



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

28
Zejem



FACULTAD DE INGENIERIA

**IMPLANTACION DE UN SISTEMA DE
INFORMACION GEOGRAFICA, PARA EL ESTUDIO
DE CONTAMINANTES PROVENIENTES DE
FUENTES VEHICULARES EN LA CIUDAD
DE MEXICO.**

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

**PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
INGENIERO INDUSTRIAL**

P R E S E N T A :

JULIO LAYSA JIMENEZ

ASESOR DE TESIS:

MC. VICENTE FUENTES GEA

FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1995



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis a:

Mi Padre por su confianza, motivación y cariño; por ser un ejemplo de superación personal y en cumplimiento de nuestro juramento.

Mi Madre por su apoyo, su paciencia y su amor.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mi asesor M.C. Vicente Fuentes por su amistad y acertados consejos para la elaboración de este trabajo. Agradezco al M.I. Jorge García Jurado por haberme guiado en el aprendizaje del manejo de los Sistemas de Información Geográfica.

INDICE

- I. INTRODUCCIÓN
- II. OBJETIVOS
- III. CALIDAD DEL AIRE
 - III.1 **Fuentes de Emisión de Contaminantes Atmosféricos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.)**
 - III.1.1 *Fuentes Naturales*
 - III.1.2 *Fuentes Móviles*
 - III.1.3 *Fuentes Fijas*
 - III.2 **Niveles de Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.)**
 - III.2.1 *Partículas Suspensas Totales (PST)*
 - III.2.2 *Monóxido de Carbono (CO)*
 - III.2.3 *Ozono (O₃)*
 - III.2.4 *Dióxido de Azufre (SO₂)*
 - III.2.5 *Óxidos de Nitrógeno (NO_x)*
 - III.3 **Efectos en la Salud de los Contaminantes Atmosféricos de Mayor Interés**
- IV. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)
 - IV.1 **Antecedentes de los Sistemas de Información Geográfico (SIG)**
 - IV.2 **Componentes que integran los Sistemas de Información Geográfico**
 - IV.3 **Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfico**
 - IV.4 **Mercado Actual de los Sistemas de Información Geográfico**
- V. MODELO DE EMISIONES VEHICULARES
 - V.1 **Los Sistemas de Transporte en la Ciudad de México**
 - V.1.1 *La Problemática del Sistema de Transporte*
 - V.1.2 *Problemática del Transporte Público Automotor*
 - V.2 **Emisiones Vehiculares**
 - V.2.1 *Principales Contaminantes Atmosféricos Generados por los Vehículos*
 - V.2.2 *Origen de los Contaminantes*

V.3 Condiciones del Tránsito Vehicular

V.3.1 Condiciones Específicas de la Ciudad de México

V.4 Características Generales del Modelo de Emisiones Vehiculares

V.4.1 Emisiones provenientes de la Vialidad Primaria

V.4.2 Emisiones provenientes de la Vialidad Secundaria

VI. RESULTADOS

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VIII. BIBLIOGRAFÍA

I. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del crecimiento de la población y la industria en el Valle de México y del rezago en la implantación de medidas estratégicas preventivas y correctivas (entre las primeras se pueden mencionar la planeación urbana, la verificación vehicular, la inspección de procesos industriales, etc; ejemplo de las segundas son el programa de contingencia ambiental, el programa de "hoy no circula", la suspensión del acceso vehicular en el centro histórico, el cambio de horarios de trabajo y/o de períodos vacacionales, etc.), para abatir la contaminación del aire, se han incrementado de manera apreciable las concentraciones de diversos contaminantes atmosféricos en la zona, particularmente en lo que se refiere al ozono, los oxidantes fotoquímicos y el monóxido de carbono. Actualmente la región del Valle de México presenta uno de los niveles de contaminación por ozono más altos del mundo, rebazándose en más del 90% de los días del año la Norma Mexicana de la Calidad del Aire referente a este compuesto

En lo que se refiere a las medidas de control sobre la contaminación atmosférica, existen algunas que se sabe de ante mano cual va a ser el impacto de su aplicación, sin embargo, existen otras como las estratégicas correctivas, que es muy difícil estimar el efecto que van a tener, por lo que es importante evaluarlas antes de llevarlas a la práctica.

Para poder evaluar la eficacia de planes y estrategias que permitan reducir los niveles de contaminación y debido a la complejidad del problema de la zona, es conveniente utilizar y/o desarrollar modelos matemáticos que permitan simular el fenómeno de la contaminación atmosférica. En particular, se requiere simular el fenómeno de transporte y dispersión de los contaminantes, tomando en consideración las condiciones meteorológicas prevalecientes y las propiedades fotoquímicas de los precursores del ozono y otros compuestos oxidantes. Esto hace necesario desarrollar y aplicar procedimientos para simular los siguientes aspectos:

- a) La dispersión y el transporte de contaminantes con base en la ecuación de difusión en tres dimensiones.
- b) El campo de vientos que se establece en el Valle de México utilizando métodos de pronóstico.
- c) Las emisiones de los contaminantes precursores de los compuestos fotoquímicos a intervalos de 1 hora y con una resolución espacial de 1 kilómetro cuadrado.
- d) Los mecanismos y la cinética de las reacciones fotoquímicas que caracterizan al Valle de México

Aunque, hasta la fecha, el uso de modelos de dispersión para la evaluación de estrategias ha sido limitado, se han hecho algunos estudios acerca de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México a través de modelos matemáticos. Un ejemplo es el modelo MONOX, el cual es un modelo bidimensional desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Fuentes, V. 1987), que se basa en la solución de la ecuación de transporte atmosférico de contaminantes y fue diseñado para predecir

las concentraciones de CO originadas por las emisiones vehiculares en el Valle de México. Otro ejemplo es el *Estudio Global de la calidad del Aire*, proyecto conjunto del Instituto Mexicano de Petróleo y Los Alamos National Laboratory (Williams, Porch, 1991) en donde se utilizan los modelos HOTMAC Y RAPTAD (Carbajal, 1992), basados en las ecuaciones completas de transporte, para predecir niveles de contaminación en el Valle de México. Los estudios mencionados no son los únicos, pero han sido los más importantes por los recursos que han utilizado y por los logros alcanzados

En la presente tesis se desarrolla la herramienta de simulación (Modelo de Emisiones Vehiculares) para predecir la generación, por parte de las fuentes móviles, de compuestos de escasa reactividad química, es decir, del monóxido de carbono. El modelo de emisiones constituye una herramienta que permite generar emisiones vehiculares con una resolución espacial de 1 kilómetro cuadrado a intervalos de 1 hora, tomando en consideración los siguientes factores: el tipo de vialidades existentes en la Ciudad de México, la composición vehicular, las velocidades promedio de las distintas vías, los tipos de combustibles y otras características que pueden modificarse fácilmente de acuerdo a las necesidades del usuario. A fin de implementar a este modelo una resolución espacial, se recopiló y proceso la información referente a los trazos viales, a la distribución espacial de los flujos vehiculares y su patrón de fluctuaciones horaria, por medio de un **Sistema de Información Geográfico**.

Un Sistema de Información Geográfica es una nueva tecnología que se está convirtiendo, cada vez más, en una herramienta esencial para analizar y transferir gráficamente información acerca del mundo (especialmente hablando), además de ser una herramienta sumamente útil para ayudar a los tomadores de decisiones a indicar aspectos tales como las alternativas de desarrollo y conservación de recursos. Además hoy en día, los procesos de modelación y simulación deben ser necesariamente más eficientes, por lo que se requiere incorporar a su metodología elementos de alto nivel tecnológico, como lo son los Sistemas de Información Geográfico, que hagan de la recopilación de información y su procesamiento una tarea que consuma el menor tiempo posible, con el propósito de obtener resultados prácticamente inmediatos, con los cuales apoyar al tomador de decisiones.

II. OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es establecer las relaciones entre el sistema de transporte urbano y las emisiones de contaminantes atmosféricos que provoca. La premisa fundamental es que el mejoramiento de la calidad del aire dependerá de un mejor uso de las vialidades y de la reducción de los flujos vehiculares en las zonas urbanas. Los objetivos particulares son:

- a) **Desarrollar una herramienta consistente en un modelo de emisiones vehiculares, para simular la generación de las emisiones vehiculares en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.), en especial las de monóxido de carbono (CO), de manera que permita el estudio de escenarios alternos.**
- b) **Proponer y analizar el uso de los Sistemas de Información Geográficos como herramientas de consulta y procesamiento de información gráfica-espacial que requiere y genera el modelo de emisiones vehiculares, para el apoyo a la toma de decisiones.**
- c) **Elaborar un programa de computadora, que permita incorporar de una manera fácil y dinámica, los diferentes factores que influyen en la emisión del monóxido de carbono (CO) por medio de las fuentes móviles; además de realizar las operaciones necesarias para el cálculo de dichas emisiones.**

III. CALIDAD DEL AIRE

III.1 Fuentes de Emisión de Contaminantes Atmosféricos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.)

III.1.1 Fuentes Naturales

En general, con respecto a la presencia de compuestos contaminantes en la atmósfera por procesos o fenómenos naturales, se considera que el aire naturalmente contiene especies de polen, esporas, sales, humo, vapores y cenizas de carácter urbano, suburbano y agrícola; gases, polvos y cenizas provenientes de volcanes e incendios forestales; arena y partículas suspendidas proveniente de zonas áridas y desforestadas; neblina de áreas húmedas; bruma de las regiones montañosas, por la presencia de hidrocarburos; y emisiones de ácido sulfhídrico (H₂S) y metano (CH₄) por la descomposición anaerobia de materia orgánica y la consecuente emisión de monóxido de carbono (CO) por el rompimiento del metano.

En particular, sólo una pequeña fracción de los contaminantes atmosféricos en la Z.M.C.M. son emitidos por fuentes naturales. La parte principal de esta fracción la constituyen las tolvaneras que, por su origen (sector NNE) y la dirección de los vientos en su momento de iniciación, cruzan áreas que ocupan asentamientos humanos que carecen de servicios sanitarios, lo que hace que, conjuntamente con el polvo proveniente del suelo, acareen detritos, lo que produce un problema adicional al de las tolvaneras.

Las tormentas de polvo ocurren principalmente en la época de secas, cuando las áreas rurales que rodean a la ciudad, principalmente por el norte, oriente y sur, tiene escasa vegetación en pie. Una fuente importante de polvo es el área del ex-lago de Texcoco, al NE de la ciudad; ahí, el intemperismo y la poca vegetación que no puede prosperar debido al alto contenido de sales del suelo, ocasionan el aflojamiento y la desintegración estructural del suelo. Después de las lluvias de la estación húmeda, la superficie queda lista en las llanuras del ex-lago y, tan pronto como se seca la costra, los granos superiores pueden ser removidos por el viento. Por otra parte, muchas de las tierras de labor que rodean el área urbana se encuentran en barbecho en el invierno y primavera, al preparar las tierras de cultivo se entierran también los residuos vegetales que ayudan a proteger el suelo contra la erosión del viento.

Esta condición de superficie de suelo suelto y seco, conjuntamente con los vientos fuertes que irrumpen en el valle de octubre a abril, provocan el levantamiento de partículas de suelo que son acarreadas hacia el área urbana. Por lo tanto para reducir este efecto erosivo que abate a la ciudad procedente de las áreas rurales, se requerirá poner en marcha programas de protección de los suelos por medio de vegetación y de los residuos vegetales después de la cosecha, así como el establecimiento a intervalos regulares de barreras de árboles o arbustos rompe vientos o bandas de cultivos que reduzcan y/o frenen la velocidad del viento.

III.1.2 Fuentes Móviles

Se entiende por fuentes móviles a todo tipo de vehículos que circulan dentro de una zona específica, entre los cuales se incluyen los ferrocarriles, los barcos y hasta los aviones que sobrevuelan la región. En otras palabras, son toda aquella fuente contaminante cuya característica principal sea la de desplazarse de un lugar a otro.

En el caso particular, para la Z.M.C.M., es de notarse que en 1983, las fuentes móviles, en especial los vehículos automotores, fueron el principal aportador de los contaminantes emitidos a la atmósfera con un 81%, la cantidad de monóxido de carbono (3,600,000 ton/año) constituye el 89% de este 81% o bien el 75% del total de emisiones totales calculadas para la Z.M.C.M. (4,942,400 ton/año). En la actualidad siguen siendo la fuente de mayor aportación de contaminantes atmosféricos. En los referente a los otros tipos de fuentes móviles (aviones, ferrocarriles, etc.) no existe información en lo relativo a la cantidad de unidades y las emisiones que emiten a la atmósfera.

Para 1992, la mayor parte de los vehículos en la República Mexicana se encontraban concentrados en el Distrito Federal (22%).

La importancia de las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno por fuentes móviles en la contaminación atmosférica, se magnifica cuando se observa la población vehicular en Distrito Federal, que en 1981 era de 2,004,229, en 1992 de 2,476,528 (padrón vehicular del programa de placa permanente) y en 1994 rebasa los 3,000,000 de vehículos automotores, con un crecimiento anual esperado de aproximadamente el 6% y una vida promedio de vehículo de doce años.

La clasificación de los vehículos automotores por servicio en la Z.M.C.M. se presenta en la siguiente Tabla 3.1.

Tabla 3.1	
Porcentaje del Tipo de Vehículo Registrado en el D.F., 1992	
<i>Tipo de Transporte</i>	<i>Porcentaje</i>
Automóvil particular	85.16
Camión particular (carga ligera)	7.10
Taxis, combis y minibuses	6.14
Camión urbano (carga pesada)	0.88
Camión materialista	0.07
Autobús de pasajeros	0.35
Otros	0.28

Fuente: DDF Dirección General de Autotransporte Urbano Padrón vehicular del programa de placa permanente, 1992

La población vehicular, el mal estado de los vehículos que tienen más de 10 años de uso (alrededor del 45%), la velocidad promedio de desplazamiento en horas críticas (4 Km/h), la altitud de la Ciudad de México (2,240 m sobre el nivel del mar), son factores que provocan un incremento en las emisiones de CO e hidrocarburos, no así en las emisiones de NO_x (en comparación con emisiones al nivel del mar).

Aunque el crecimiento vehicular ha sido grande en la Z.M.C.M. (alrededor del 10% anual) la densidad vehicular por km² es menor que en otras poblaciones; por ejemplo, en la Z.M.C.M. existen 522 vehículos por km², en New York 2,821 vehículos por km² y en Chicago 1,147 vehículos por km², lo cual no es de sorprender, ya que México tiene aproximadamente siete habitantes por vehículo y las ciudades mencionadas anteriormente 3.6 y 1.9 habitantes por vehículo respectivamente.

En lo que se refiere a los vehículos de diesel que componen en su mayoría el transporte colectivo y el de carga en la Z.M.C.M., representan un 8% aproximado del total de vehículos automotores; sin embargo, las molestias que causan a la población son altamente criticadas, ya que emiten grandes cantidades de humo (partículas carbonáceas) y malos olores, sin contar con la contaminación de compuestos de azufre (SO₂), producto del alto contenido de azufre del combustible diesel (0.5% en peso, en 1991; a partir de octubre de 1993, el contenido de azufre bajo hasta aproximadamente 0.05%).

Basándose en que los motores a diesel son aproximadamente 30% más eficientes en relación a los kilómetros recorridos por litro de combustible que los motores de gasolina y considerando que el combustible contiene no menos de 0.3% de azufre en peso, se calcula que un motor a diesel emite aproximadamente 250 veces más dióxido de azufre (SO₂) que uno de gasolina por distancia recorrida. Considerando que se consumen en la Z.M.C.M., alrededor de 4,000 m³/ día de diesel en vehículos, la emisión de dióxido de azufre es de aproximadamente 16 toneladas.

En lo relativo a las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, los motores de gasolina sobrepasan a las emisiones de los motores a diesel, con la excepción de la emisión de hidrocarburos en los vehículos de gasolina equipados con convertidores catalíticos (introducidos a partir de los modelos 1991). Por lo que toca a la emisión de óxidos de nitrógeno, los motores a diesel son mayores emisores que los de gasolina. En cuanto a partículas emitidas, los motores a diesel llegan a emitir 10 veces más partículas por kilómetro que los motores a gasolina y hasta 30 veces más que los mismos de gasolina equipados con catalizadores. Las partículas emitidas generalmente consisten en sólidos carbonáceos que absorben hidrocarburos de la combustión, algunos de los cuales son conocidos como cancerígenos.

Por lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la emisión de contaminantes por el uso de vehículos automotores en la Z.M.C.M. puede y debe controlarse llevando a cabo estrategias de control en automóviles nuevos, así como un programa de Inspección y Mantenimiento (I/M) en la población vehicular de la República Mexicana

En lo relativo a la cuenca del Valle de México, se debe tener especial cuidado en la o las estrategias seleccionadas, ya que debe considerarse la química atmosférica, que rige la producción de contaminantes secundarios por la condiciones especiales del área en lo relativo a su altitud (2,240 m), radiación solar y meteorología.

III.1.3 Fuentes Fijas

Se denominan fuentes fijas a aquellas fuentes emisoras que no presentan algún tipo de desplazamiento. Por lo general, están constituidas por instalaciones fabriles, refinerías, plantas de proceso, calderas y todo aquel proceso que genere emisiones de compuestos considerados como contaminantes atmosféricos.

Existen varias formas de clasificarlas, ya sea por el tipo de fuente o principio de operación o características de proceso. en la Tabla 3.2 se presenta un ejemplo de agrupación por actividad:

Tabla 3.2 Fuentes Fijas en Grupo por Actividad	
<i>1. Fuentes de combustión externa</i>	<ul style="list-style-type: none"> Combustión de carbón Combustión de combustóleo Combustión de leña Combustión de petróleo Combustión de gas Combustión de diesel
<i>2. Disposición de residuos sólidos</i>	<ul style="list-style-type: none"> Quema en tiraderos Quema de pastizales secos Incineradores de basura
<i>3. Fuentes por pérdidas por evaporación</i>	<ul style="list-style-type: none"> Pintura de autos Almacenamiento de gasolina o productos volátiles de petróleo Almacenamiento de solventes Distribución de gasolina

En lo relativo a la cuenca del Valle de México, se debe tener especial cuidado en la o las estrategias seleccionadas, ya que debe considerarse la química atmosférica, que rige la producción de contaminantes secundarios por la condiciones especiales del área en lo relativo a su altitud (2,240 m), radiación solar y meteorología.

III.1.3 Fuentes Fijas

Se denominan fuentes fijas a aquellas fuentes emisoras que no presentan algún tipo de desplazamiento. Por lo general, están constituidas por instalaciones fabriles, refinarias, plantas de proceso, calderas y todo aquel proceso que genere emisiones de compuestos considerados como contaminantes atmosféricos.

Existen varias formas de clasificarlas, ya sea por el tipo de fuente o principio de operación o características de proceso, en la Tabla 3.2 se presenta un ejemplo de agrupación por actividad:

Tabla 3.2 Fuentes Fijas en Grupo por Actividad	
<i>1. Fuentes de combustión externa</i>	<ul style="list-style-type: none"> Combustión de carbón Combustión de combustóleo Combustión de leña Combustión de petróleo Combustión de gas Combustión de diesel
<i>2. Disposición de residuos sólidos</i>	<ul style="list-style-type: none"> Quema en tiraderos Quema de pastizales secos Innumeradores de basura
<i>3. Fuentes por pérdidas por evaporación</i>	<ul style="list-style-type: none"> Pintura de autos Almacenamiento de gasolina o productos volátiles de petróleo Almacenamiento de solventes Distribución de gasolina

4. Industria química

Ácido adípico
Amoniaco
Carbón "negro"
Cloro-alcálico
Explosivos
Ácido clorhídrico
Ácido fluorhídrico
Ácido nítrico
Ácido fosfórico
Anhídrido ftálico
Plásticos
Pinturas
Jabón y detergentes
Carbonato de sodio
Ácido sulfúrico
Plantas de azufre
Fibras sintéticas
Hule sintético
Ácido tereftálico

5. Industria de la agricultura y alimentos

Secado de alfalfa
Tostado de café
Algodón
Molinos y almacenamiento de granos
Fermentación
Procesamiento industrial de pescado
Procesamiento industrial de carnes
Fertilizantes
Elaboración de almidón
Procesamiento de caña de azúcar
Elaboración de alimentos balanceados para animales

6. Industria metalúrgica

Producción primaria de aluminio
Manufactura de coque
Fundidora de cobre
Producción de aleaciones de hierro
Industria de hierro y acero
Fundidoras de plomo
Fundidoras de zinc
Industria del bronce

7. Industria de productos minerales

Plantas de asfalto y de concreto
Fábricas de tabique y refractarios
Manufactura de carburo de calcio
Manufactura de cemento, cal y yeso
Manufactura de fibra de vidrio
Manufactura de vidrio
Procesamiento de roca fosfórica
Procesamiento de arena y grava

8. Industria del petróleo Refinación de petróleo Producción de gas y crudo Elaboración de productos de petroquímica
9. Industria de la madera Industria química de pulpa de madera Industria del papel Operaciones de madererías
10. Fuentes varias Incendios forestales (ocasionados por el hombre) Caminos no pavimentados Fumigación con pesticidas Plantas geotérmicas

La Tabla 3.3 presenta en forma resumida las emisiones potenciales por algunos grupos de industrias.

Tabla 3.3					
Emisiones potenciales por grupo de fuente					
Grupo de Industria	Emisiones				
	SO ₂	Partículas	Hidrocarburos	Óxidos de Nitrógeno	Otros
Fuentes de combustión	X	X		X	X
Disposición de residuos sólidos		X			X
Evaporación por almacenamiento			X		
Industria química	X	X	X	X	
Industria agrícola y alimentos	X	X		X	
Industria metalúrgica	X	X			
Industria productos minerales		X			
Industria del petróleo	X	X	X	X	X
Industria de la madera		X			
Fuentes varias	X	X	X	X	X
Fuentes: Bravo A. II.					

Las emisiones a la atmósfera en las grandes áreas urbanas de nuestro país, producto de la actividad industrial, la representan en su mayoría la emisión de bióxido de azufre y partículas. Siendo nuestros combustibles fósiles (combustóleo) rico en su contenido en azufre (alrededor del 3.6% en peso), es consecuencia directa que estas emisiones de bióxido de azufre estén en función del volumen consumido de este combustible.

Las concentraciones de bióxido de azufre y de partículas suspendidas en la atmósfera de las principales ciudades del país, son lo suficientemente elevadas para rebasar las recomendadas por las normas de calidad de aire nacionales y extranjeras.

III.2 Niveles de Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.)

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.) está localizada al sureste de la cuenca del Valle de México, a una altitud de 2,240 m sobre el nivel del mar, a una latitud de 19°26'13'', norte y longitud de 99° oeste. Está rodeada de montañas de hasta 5,200 m de altura y su temperatura anual oscila entre 10 y 20 °C; la precipitación media anual es de 777 mm y se distribuye principalmente en los meses de mayo a octubre.

La Z.M.C.M. está conformada por 16 delegaciones del D.F. y 17 municipios conurbados del Estado de México. Su área abarca aproximadamente 2,110 km²; tiene una población aproximada de 18.5 millones de habitantes, de los cuales el 55% reside en el D.F. y el 45% en las municipalidades conurbadas del Estado de México. Su densidad de población, según estimaciones, va de 7,000 hab/Km en el centro hasta 500 hab/Km en las zonas de menor población (zonas conurbadas), además algunas proyecciones indican que la población crecerá a un ritmo de 1.4% anual, la cual representa la más alta del resto del país.

La Z.M.C.M. es el centro político, administrativo y económico de México, ya que cuenta con 1/3 del total de la producción doméstica del país. Hay más de 30,000 industrias de todo tipo y tamaño, además de 12,000 facilidades de servicios. Entre las industrias en el valle, 250 manejan residuos peligrosos y 4,000 usan procesos de combustión y/o transformación¹, los cuales generan emisiones atmosféricas, principalmente bióxidos de azufre (SO₂), partículas (PST) e hidrocarburos (HC).

En lo que respecta al transporte, dentro de la Z.M.C.M. existe una población vehicular cercana a los 3 millones de vehículos de todo tipo (particulares, colectivos, públicos, de carga pesada y ligera, etc.), los cuales generan la mayor parte de las emisiones a la atmósfera, de la región. Se cuenta con un sistema de transporte público que integra el transporte propiedad del gobierno (Ruta 100) y una empresa paraestatal (Sistema de Transporte Troncal, STT), para 1989 existían más de 69,000

¹ De las 4,000 industrias que usan procesos de combustión y/o transformación, 70 son responsables del 85% de las emisiones atmosféricas principalmente bióxido de azufre, que constituye aproximadamente el 45% del total de las emisiones. Otras sustancias producidas por este tipo de fuente son las partículas suspendidas (16%), óxidos de nitrógeno (10%), monóxido de carbono (13%) e hidrocarburos (16%) del total de emisiones

colectivos, cuya característica especial es que siguen una ruta fija, en la actualidad existen aproximadamente 155 mil vehículos entre taxis de ruta libre o de sitio y colectivos de ruta fija (peseros). Además, la ciudad de México cuenta con una moderna red de metro, vehículos eléctricos de transporte público, tales como los trolebuses y dos líneas de tren ligero, las cuales se conectan con las del metro, es importante mencionar que los transportes antes mencionados no emiten ningún tipo de contaminante atmosférico, pero sus desventajas son sus altos índices de inversión económica. El tema de sistemas de transporte en la Ciudad de México, se vera con más detalle en el capítulo V.1.

Estas características geográficas, demográficas, económicas y urbanas, aunadas a las condiciones meteorológicas propias de la cuenca en la que se localiza la Z.M.C.M. son los principales responsables del problema de la contaminación atmosférica.

La Z.M.C.M., considerada como una megalópolis, ha sido objeto de diversos estudios en lo relativo a la calidad del aire, entre los más recientes se encuentran el PICCA y el Estudio Global de la Calidad del Aire (IMP y el Laboratorio Nacional de Los Alamos), etc. Los contaminantes que han sido objetos de dichos estudios sistemáticos y para los cuales existen a nivel internacional, criterios de calidad (sin ser los únicos importantes en áreas contaminadas) son: partículas suspendidas totales (PST) en la atmósfera, bióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), oxidantes, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno (NO_x), plomo (Pb) y ozono (O_3), que es un contaminante secundario generado por la reacción fotoquímica entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, principalmente.

Los niveles máximos permisibles fijados en los criterios ecológicos² para cada uno de los contaminantes antes mencionados, resumidos en la Tabla 3.4, tiene como objetivo proteger la salud de humanos, animales y plantas; los medios ambientales (aire, agua, suelo); patrimonios culturales y otros bienes materiales, así como establecer una base, a partir de la cual poner en práctica medidas de control. También se incluyen en dicha Tabla, los valores propuestos en los proyectos de normas de calidad del aire expedidos por la Secretaría de Salud (Ssa) en coordinación con la Sedesol, y publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 18 de enero de 1994. Por lo general, las normas de calidad de aire se expresan como concentraciones máximas permisibles de contaminantes en diferentes períodos; por ejemplo para el CO, el período de referencia es de 8 horas, mientras que para el O_3 es de 1 hora. Como se puede apreciar en la Tabla 3.4, no sólo se revisan, sino que en algunos casos se hacen más estrictos los valores de los criterios y se enriquecen, al añadir promedios anuales de algunos contaminantes.

² Para desarrollar estos criterios se consideran diferentes periodos específicos, además de diferentes variables, por ejemplo: las características fisicoquímicas del contaminante, el tiempo de exposición, la humedad relativa, la temperatura, etc.

Tabla 3.4 Normatividad de la Calidad del Aire		
Contaminante	Criterios 1982 ⁽¹⁾	Proyectos de normas 1994 ⁽²⁾
Monóxido de carbono (CO)	13 ppm en 8 hrs.	11 ppm en 8 hrs.
Dióxido de azufre (SO ₂)	0.13 pp, en 24 hrs.	0.13 ppm en 24 hrs. 0.03 ppm en 1 año
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm en 1 hr.	0.21 ppm en 1 hr.
Ozono (O ₃)	0.11 ppm en 1 hr.	0.11 ppm en 1 hr.
Partículas menores a 10 µm (PM-10)	150 µg/m ³ en 24 hrs.*	150 µg/m ³ en 24 hrs. 50 µg/m ³ en 1 año
Partículas suspendidas totales (PST)	275 µg/m ³ en 24 hrs.	260 µg/m ³ en 24 hrs. 75 µg/m ³ en 1 año
Plomo (Pb)	1.5 µg/m ³ (trimestral)*	1.5 µg/m ³ (trimestral)
* Criterios internacionales, es decir no son oficiales		
Fuente: (1) DOF del 29 de noviembre de 1982 y (2) del 18 de enero de 1994		

Para evaluar el impacto que los ordenamientos legales tiene en la calidad del aire y vigilar la concentración de los contaminantes atmosféricos que permitan dirigir y orientar las acciones de control se estableció la Red Nacional de Monitoreo. Por lo que respecta a la Z.M.C.M. en 1972 se instaló y puso en operación la Red Manual de Monitoreo Atmosférico y en 1986 la Red Automática, ambas conforman la Red Metropolitana de Calidad del Aire³ con 25 y 32 estaciones respectivamente (Figura 3.1).

Con base en la información generada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la SEDESOL emite diariamente un reporte sobre la calidad del aire en la forma del *Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)*, el cual describe numéricamente los niveles de contaminación. La determinación del IMECA se realiza a partir de promedios horarios ponderados por medio de los valores de referencia que se presentan en la Tabla 3.5. Un valor IMECA de 100 puntos corresponde a la norma para cada contaminante y un valor IMECA de 500 representa niveles de contaminación para los cuales existen evidencias de daños significativos a la salud.

³ Como parte de la política de descentralización del gobierno federal, en 1992 fue transferida la Red Metropolitana de Calidad del Aire, del Instituto Nacional de Ecología (INE) (antes Subsecretaría de Ecología) a la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Valle de México, instancia de carácter interinstitucional y actualmente presidida por el Departamento del Distrito Federal (DDF)

Figura 3.1

Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico

Estación/ cabeza	Localización/nombre	Zona	SO2	O3	CO	NO2	NOX	H2S	HCNM	PST	PM-10	MET	Aldehido	Total
Red Automática de Monitoreo Atmosférico														
1-Z	Lagunilla	C		X	X									2
2-E	Vallejo	NO	X											1
3-S	Santa Ursula	SO	X											1
4-B	Tacuba	NO	X	X	X	X	X	X				X		7
5-G	ENEP-Acatlán	NO	X	X	X	X	X					X		6
6-M	Los Laureles	NE	X											1
7-H	La Presa	NE	X							X				2
8-J	La Villa	NE	X								X			2
9-N	San Agustín	NE	X	X		X	X					X		5
10-C	Azcapotzalco	NO	X	X										2
11-E	Tlanepanla	NO	X	X	X	X	X	X		X	X	X		3
12-L	Xalostoc	NE	X	X	X	X	X			X	X	X		8
13-X	Merced	C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		10
14-T	Pedregal	SO	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
15-O	Cerro de la Estrella	SE	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
16-U	Plateros	SO	X	X								X		3
17-Y	Hangares	NE	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
18-P	UAM Iztlapalpa	SE	X	X						X				3
19-K	Aragón	NE	X		X									2
20-O	Netzahuacóyotl	NE	X		X						X			3
21-D	IMP	NO			X									1
22-W	Benito Juárez	SO		X	X	X	X							4
23-R	Taxqueña	SE		X	X					X				3
24-V	Insurgentes	C			X									1
25-A	Cuhtláhuac	NO			X									1
26-TLI	Tultitlán	NO	X		X	X	X		X		X			6
27-AT	Atizapán	NO	X		X	X	X							4
28-VF	Villa de las Flores	NE	X		X	X	X		X		X			6
29-CJ	Cuajimalpa	NO		X										1
30-TL	Tlalpan	SE		X										1
31-CH	Chapingo	NE		X										1
32-TH	Tláhuac	SE	X	X							X			3
Número de estaciones			21	19	21	13	13	3	6	10	6	11		
Red Manual de Monitoreo Atmosférico														
PO	Portales	SE								X				1
PD	Pedregal	SO								X	X		X	3
FA	Felipe Angeles	SO								X				1
TX	Taxqueña	SE								X				1
ES	Cerro de la Estrella	SE								X	X		X	3
VC	Vicentina	SE								X				1
NT	Netzahuacóyotl	SE								X				1
AP	Aeropuerto	NE								X				1
BER	Fray Bernardino	SE								X				1
MU	Museo Cd. de México	CE								X				1
MC	Merced	SE								X	X		X	3
CFE	Museo Tecnológico	SO								X				1
LO	Lomas	SO								X				1
SH	Secretaría de Hacienda	NO								X				1
TL	Tlanepanla	NO								X	X		X	3
VI	La Villa	NE								X				1
XA	Xalostoc	NE								X	X		X	3
LP	La Presa	NE								X				1
CHA	Chapingo	NE								X				1
Número de estaciones										19	5		5	

Modificado de Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica en el Valle de México, 1993

Figura 3.1

Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico

Estación/ caseta	Localización/nombre	Zona	SO2	O3	CO	NO2	NOX	H2S	HCNM	PSY	PM-10	MET	Aldehido	Total
Red Automática de Monitoreo Atmosférico														
1-Z	Lagunilla	C		X	X									2
2-E	Vallejo	NO	X											1
3-S	Santa Ursula	SO	X											1
4-B	Tecuba	NO	X	X	X	X	X	X				X		7
5-G	ENEP-Acatlán	NO	X	X	X	X	X					X		6
6-M	Los Laureles	NE	X											1
7-H	La Presa	NE	X							X				2
8-J	La Villa	NE	X								X			2
9-N	San Agustín	NE	X	X		X	X					X		5
10-C	Azcapotzalco	NO	X	X										2
11-E	Tlanepantla	NO	X	X	X	X	X	X		X	X	X		9
12-L	Xalostoc	NE	X	X	X	X	X			X	X	X		8
13-X	Merced	C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		10
14-T	Pedregal	SO	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
15-O	Cerro de la Estrella	SE	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
16-U	Plateros	SO		X	X							X		3
17-Y	Hangares	NE	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
18-P	UAM Iztapalapa	SE		X	X					X				3
19-K	Aragón	NE	X		X									2
20-O	Netzahualcóyotl	NE	X		X						X			3
21-D	IMP	NO			X									1
22-W	Benito Juárez	SO		X	X	X	X							4
23-R	Taxqueña	SE		X	X					X				3
24-V	Insurgentes	C			X									1
25-A	Cuicahuac	NO			X									1
26-TL	Tultitlán	NO	X		X	X	X		X		X			6
27-AT	Atizapán	NO	X		X	X	X							4
28-VF	Villa de las Flores	NE	X		X	X	X		X		X			6
29-CJ	Cuajimalpa	NO		X										1
30-TL	Tlalpan	SE		X										1
31-CH	Chapingo	NE		X										1
32-TH	Tláhuac	SE	X	X							X			3
Número de estaciones			21	19	21	13	13	3	6	10	6	11		
Red Manual de Monitoreo Atmosférico														
PO	Portales	SE								X				1
PD	Pedregal	SO								X	X		X	3
FA	Felipe Angeles	SO								X				1
TX	Taxqueña	SE								X				1
ES	Cerro de la Estrella	SE								X	X		X	3
VC	Vicentina	SE								X				1
NT	Netzahualcóyotl	SE								X				1
AP	Aeropuerto	NE								X				1
BER	Fray Bernardino	SE								X				1
MU	Museo Cd. de México	CE								X				1
MC	Merced	SE								X	X		X	3
CFE	Museo Tecnológico	SO								X				1
LO	Lomas	SO								X				1
SH	Secretaría de Hacienda	NO								X				1
TL	Tlanepantla	NO								X	X		X	3
VI	La Villa	NE								X				1
XA	Xalostoc	NE								X	X		X	3
LP	La Presa	NE								X				1
CHA	Chapingo	NE								X				1
Número de estaciones										19	5		5	

Modificado de Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica en el Valle de México 1993

Tabla 3.5				
Equivalencia del IMECA a la concentración de los contaminantes atmosféricos				
Contaminante	IMECA 100	IMECA 200	IMECA 300	IMECA 500
CO [ppm]	13 [8hrs]	22 [8hrs]	31 [8hrs]	50 [8hrs]
NO ₂ [ppm]	0.21 [1hr]	0.66 [1hr]	1.10 [1hr]	2.00 [1hr]
SO ₂ [ppm]	0.13 [24hrs]	0.35 [24hrs]	0.56 [24hrs]	1.00 [24hrs]
PST [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	275 [24hrs]	546 [24hrs]	637 [24hrs]	1000 [24hrs]
PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	150 [24hrs]	350 [24hrs]	420 [24hrs]	600 [24hrs]
O ₃ [ppm]	0.11 [1hr]	0.23 [1hr]	0.35 [1hr]	0.60 [1hr]

Fuente: Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. DDF, 1994

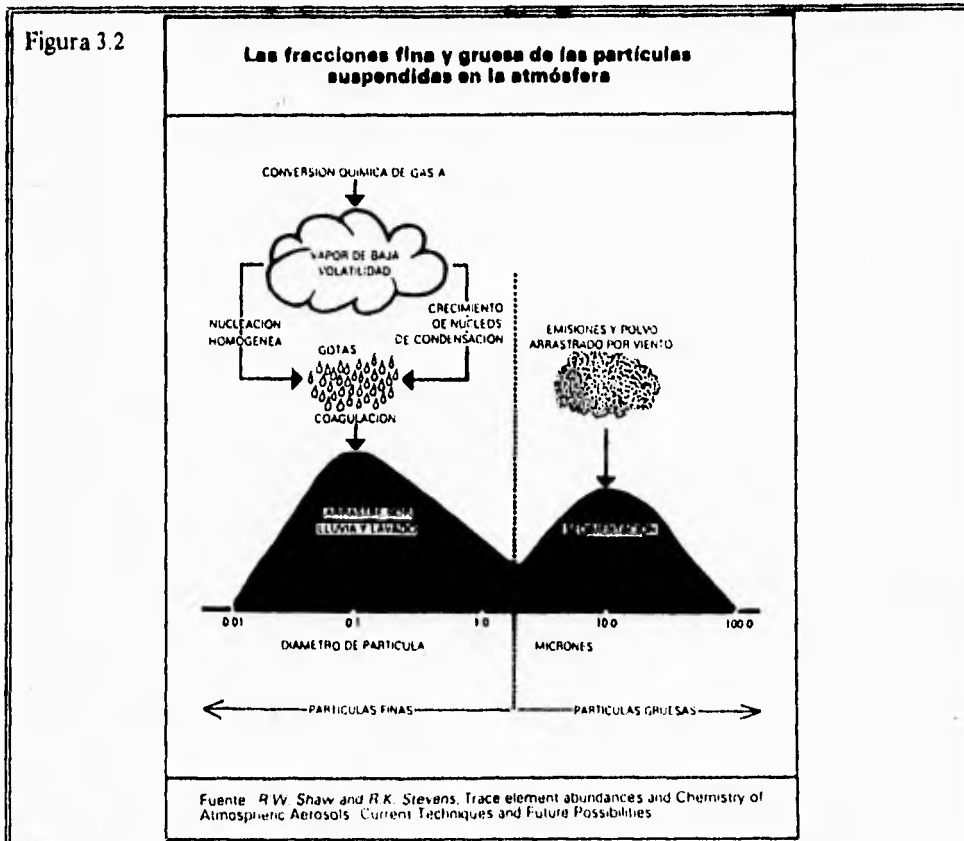
III.2.1 Partículas Suspensas Totales (PST)

El término partículas suspendidas abarca un amplio rango de sólidos o líquidos sutilmente divididos que pueden estar dispersos en el aire y que se encuentran en un tamaño mayor que moléculas simples (0.0002μ de diámetro), pero menor que 100μ (1μ micrón [μ] = $\times 10^{-6}$ m). Las partículas suspendidas en este rango tienen una vida media en estado suspendido que va de unos cuantos segundos a varios meses; estas partículas son responsables de la reducción de la visibilidad y toman parte en reacciones con otros contaminantes atmosféricos, la variación en cuanto al tamaño se ilustra en la Figura 3.2.

Las fuentes de partículas son muy variables y están en función de la actividad propia de cada población. La combustión de energéticos es una de las principales fuentes de partículas, en la mayoría de los casos, originada por una combustión incompleta. Las partículas que provienen de la combustión generalmente están integradas por partículas atomizadas y cenizas del combustible.

Las partículas de origen natural se componen principalmente de suelo y ocasionalmente por partículas de origen biológico (restos orgánicos de plantas y animales, esporas, virus, etc.); las cuales son producidas por dos mecanismos: las de intervalo menor a 1μ provienen principalmente de condensación, mientras que las partículas suspendidas de mayor tamaño son el resultado de procesos naturales, mecánicos y otros.

Figura 3.2



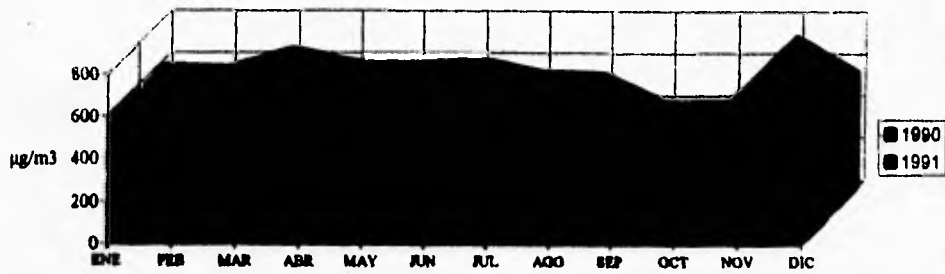
En la Z.M.C.M., se estima que el 73% de las PST, tienen su origen en las zonas erosionadas, deforestadas o desecadas, el resto corresponden a la producción industrial (21%) y al transporte (6%), de éstos, el transporte privado aporta 5% del total (ver Tabla 3.6). Estas partículas (polvo, humos, aerosoles y otros) tiene un efecto directo en la calidad del aire de la Z.M.C.M., la cual, conjuntamente con la meteorología propia del área, da como resultado las fluctuaciones obtenidas en las diferentes estaciones del año.

Tabla 3.6 Inventario de Emisiones		
	Partículas Suspendidas Totales (PST) [tons/año]	Porcentaje [%]
Transporte privado a gasolina	14,516	4.68
Transporte de servicio público a gasolina	2,323	0.75
Transporte de carga a gasolina	1,440	0.46
Transporte ligero de carga a diesel	380	0.12
Transporte pesado de carga a diesel	150	0.05
Transporte urbano R-100	260	0.08
Transporte suburbano	660	0.21
Transporte foráneo	50	0.02
Termoeléctrica Valle de México	124	0.04
Termoeléctrica Jorge Luque	76	0.02
PEMEX	0	0.00
Industrias	64,213	20.72
Servicios	504	0.16
Degradación ecológica (Suelos)	225,249	72.67
TOTAL	309,945	100.00
Fuente: SEDUE, JICA, 1991.		

Es muy importante conocer la distribución de estas partículas suspendidas en relación con su tamaño, con el fin de conocer sus posibles efectos en la salud, ya que su grado de penetración y retención en el sistema respiratorio es función del tamaño aerodinámico, (la fracción inhallable de 0-15 μm de diámetro, puede tener efectos directos en la salud). También debe considerarse el efecto que la concentración de partículas finas tiene cuando están asociadas con la humedad relativa sobre la visibilidad y la relación que puede existir entre partículas finas con características químicas especiales (composición química, que les confiere propiedades toxicológicas muy especiales) con el daño presentado en materiales.

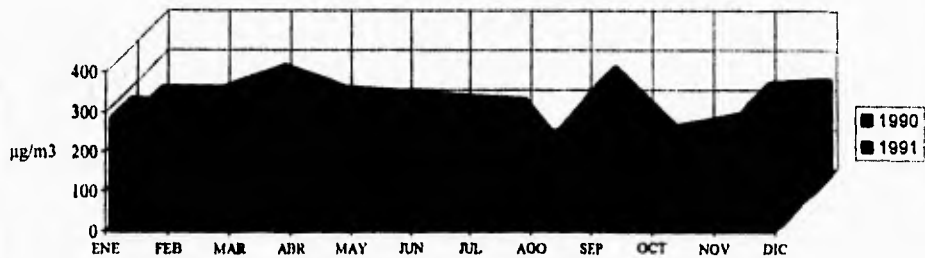
A continuación se presenta en las Gráficas 3.1 y 3.2 el promedio de máximos diarios de las Partículas Suspendidas Totales (PST) y las de Partículas con diámetro menor a 10 μm (PM10) durante el periodo de 1990 a 1991

Gráfica 3.1
Partículas suspendidas totales (PST)
Promedio de máximos diarios (1990-1991)



* Norma: 275 µg/m3 en 24 hrs

Gráfica 3.2
Partículas con diámetro menor a 10 µm (PM10)*
Promedio de máximos diarios (1990-1991)



* Norma: 150 µg/m3 en 24 hrs

Es de observarse que los datos representados en estas gráficas deben ser tomados con reservas, dado el número limitado (entre dos y seis días por mes) de los muestreos realizados en estaciones de la RAMA. Además, los registros máximos observados tanto de PST como de PM10, mantiene en casi todos los meses un nivel superior al aceptado por las normas, lo cual es lo mismo decir que se viola la norma prácticamente en todos los días en que se realizan estas mediciones (1 a 6 días al mes). De acuerdo con la información de los dos últimos años, los meses invernales y de secas presentan registros relativamente más elevados que los meses propios de la temporada de lluvias, además cabe mencionar que la zona más afectada por este contaminante es la zona nordeste, la cual presenta las lecturas de IMECA más altas de la ciudad, rebasando los 300 puntos. Conviene destacar que, de todas maneras, en los meses con lluvias se rebasan regularmente las normas, lo que sugiere que la aportación de partículas por fuentes vehiculares e industriales es significativa.

Otro contaminante que se emite y se transporta en el material particulado es el plomo, cuyos efectos negativos a la salud son innegables, por lo cual existe gran preocupación sobre los posibles riesgos a los seres vivientes que puedan resultar de la emisión de plomo por actividades humanas al medio ambiente y particularmente sobre los efectos por exposición a mediano y largo plazos.

El plomo puede ser emitido a la atmósfera en forma de partículas, humo, neblina o vapor, dependiendo de la fuente y del método de generación. El plomo adicionado a las gasolinas como antidetonante es principalmente tetra etilo de plomo (TEP)⁴ y tetrametilo de plomo (TMP). Estos compuestos orgánicos pueden emitirse a la atmósfera a través del carburador, del sistema de alimentación del tanque y del escape del automóvil. Los compuestos de plomo emitidos por el escape de automóviles que consumen gasolina con plomo como combustible son: partículas con diámetro equivalente entre 2 y 10 μm , como bromocloruro de plomo (PbClBr); y en partículas con diámetros menores a 1 μm las formas alfa y beta de cloruro de amonio y bromocloruro de plomo ($\text{NH}_4 \cdot 2\text{Pb Cl Br}$, $2\text{NH}_4\text{Cl} \cdot \text{PbClBr}$). Por lo tanto, las concentraciones de plomo en la atmósfera está altamente relacionada al tráfico vehicular, tanto en número de unidades como en densidad de vehículos en circulación.

En la Cuenca del Valle de México, con base en información proporcionada por PEMEX, en el año de 1982 (H. Bravo, 1987), por el sólo consumo de gasolina "nova" con plomo como aditivo se emiten a la atmósfera aproximadamente 32 ton/día de plomo. Hoy en día, como se puede observar en la Tabla 3.7, las aportaciones más importantes de plomo a la atmósfera corresponde a los automóviles privados (80%), vehículos de servicio público a gasolina (13%) y los camiones de carga a gasolina (7%). Es importante mencionar que para este inventario, la contribución de la industria de fundición de metales no ferrosos y fabricación de acumuladores no ha sido determinada.

⁴ En México, la cantidad de TEP que se agrega a las gasolinas para su consumo en el país fluctúa entre 0.5 y 1.0 ml/galón.

Tabla 3.7
Inventario de Emisiones

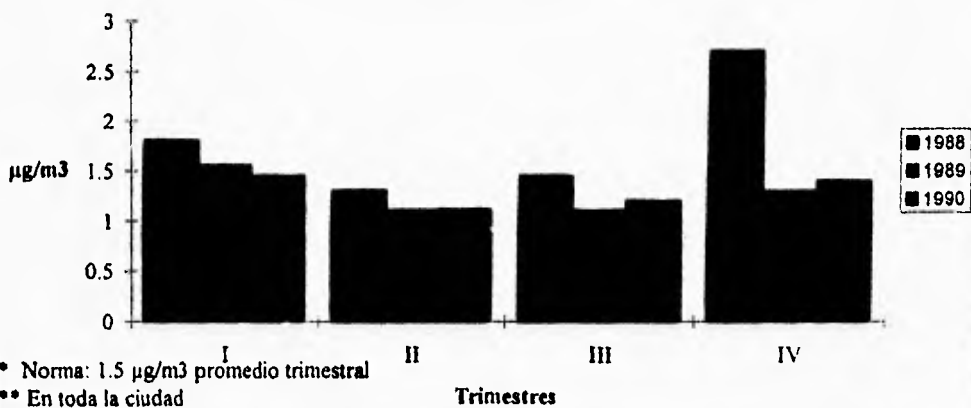
	Plomo (Pb) (tons/año)	Porcentaje [%]
Transporte privado a gasolina	880	80.00
Transporte de servicio público a gasolina	146	13.27
Transporte de carga a gasolina	74	6.73
Transporte ligero de carga a diesel	0	0.00
Transporte pesado de carga a diesel	0	0.00
Transporte urbano R-100	0	0.00
Transporte suburbano	0	0.00
Transporte foráneo	0	0.00
Termoeléctrica Valle de México	0	0.00
Termoeléctrica Jorge Luque	0	0.00
PEMEX	0	0.00
Industrias	0	0.00
Servicios	0	0.00
Degradación ecológica (Suelos)	0	0.00
TOTAL	1,100	100.00

Fuente: SEDUE, JICA, 1991.

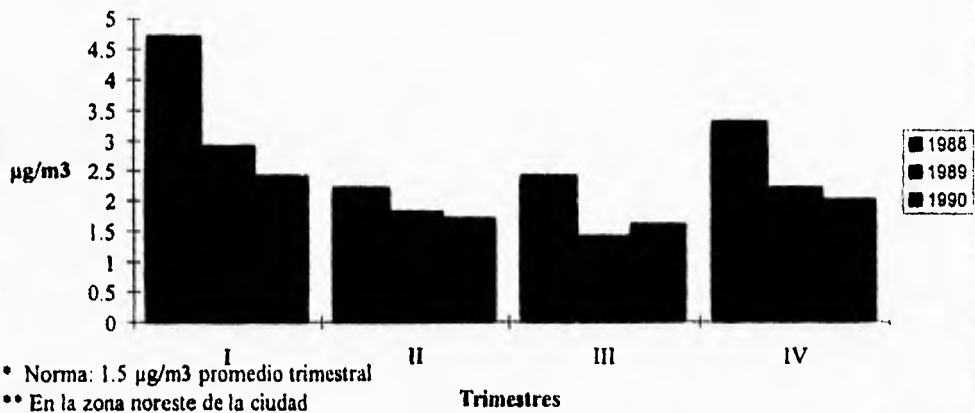
Estas cantidad, por no estar distribuida uniformemente en la atmósfera, se presenta en concentraciones por arriba de la norma de calidad de aire para plomo en PST de los EU ($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3/3$ meses), como se puede observar en las Gráficas 3.3 y 3.4, donde se muestran los promedios trimestrales en toda la ciudad y máximos trimestrales en la zona nordeste, respectivamente.

Es de observarse que en la Gráfica 3.3, las variaciones estacionales del plomo son un tanto similar a las de las partículas en suspensión, con los meses invernales (noviembre - febrero) como los de mayor concentración; además se muestra una tendencia de reducción durante los meses del verano (junio - octubre). En la Gráfica 3.4 se muestra la zona nordeste, que en 1990 registró el mayor número de violaciones a la norma trimestral del plomo, esto pudo ser por la elevada densidad industrial de esta zona. Sin embargo según fuentes oficiales (Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1993-1994, SEDESOL e INE), el comportamiento de este contaminante, durante 1990 a 1994, ha ido en disminución, lo cual se puede justificar por las medidas tomadas por PEMEX en la reducción del nivel de plomo en las gasolinas distribuidas en el país.

Gráfica 3.3
Plomo (Pb). Promedios trimestrales (1988 -1990)



Gráfica 3.4
Plomo (Pb). Promedios máximos trimestrales (1988 -1990)



III.2.2 Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido. Su oxidación ocurre en la atmósfera, pero la velocidad de estas reacciones es muy lenta; se genera en la combustión incompleta de combustibles fósiles.

El CO en áreas urbanas presenta variaciones diurnas, diarias, semanales, estacionales y tendencias anuales. Las diurnas, diarias y semanales se correlacionan con los patrones de tránsito vehicular de la comunidad; la variaciones estacionales dependen en gran parte de las variables meteorológicas; las concentraciones y tendencias anuales son altamente dependientes de los patrones de crecimiento de la población vehicular y del tipo de vehículos y su antigüedad.

En 1982 (H. Bravo, 1987), del total en peso de contaminantes emitidos a la atmósfera anualmente (4,788,400 ton) de la Ciudad de México, sólo el 3% (153,800 ton) es material particulado; el 97% restante (4,634,600 ton) son contaminantes gaseosos de esta cantidad total el 75% es monóxido de carbono.

Los valores de monóxido de carbono observados en la Z.M.C.M. son elevados, se presume que los automóviles particulares contribuyen con 71%, seguidos por los vehículos de servicio público a gasolina (18%) y los camiones de carga a gasolina (10%), cuyo funcionamiento a la altitud de la Ciudad de México, las condiciones inadecuadas de afinación y operación de aproximadamente el 65% de los vehículos circulantes, el aumento anual del volumen vehicular (alrededor del 10-12%) y el sistema vial de la propia ciudad que deja mucho que desear, incrementa las concentraciones de CO casi al doble, el resto del total de emisiones (1%) proviene de procesos industriales de combustión (ver Tabla 3.8).

La variación horaria del monóxido de carbono se representa en la Gráfica 3.5, la cual señala claramente que el aumento de los niveles de CO son altamente dependientes de la actividad vehicular como producto de la propia actividad de los habitantes del área. En la Tabla 3.9, se puede observar las concentraciones de dicho contaminante en el mes de diciembre de 1992 y los días en que se rebaso el valor criterio, por zonas dentro de la Z.M.C.M. es de notarse que como se representa en la Gráfica 3.6 y la Tabla 3.9, las emisión de este contaminante han ido disminuyendose, debido a acciones tomadas por el Gobierno Federal como el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICA) y los planes de contingencia ambiental por ejemplo.

Tabla 3.8
Inventario de Emisiones

	Monóxido de Carbono (CO) [tons/año]	Porcentaje [%]
Transporte privado a gasolina	2,436,959	70.87
Transporte de servicio público a gasolina	623,745	18.14
Transporte de carga a gasolina	340,884	9.91
Transporte ligero de carga a diesel	3,890	0.11
Transporte pesado de carga a diesel	320	0.01
Transporte urbano R-100	3,040	0.09
Transporte suburbano	6,900	0.20
Transporte foráneo	550	0.02
Termoeléctrica Valle de México	663	0.02
Termoeléctrica Jorge Luque	121	0.00
PEMEX	0	0.00
Industrias	21,759	0.63
Servicios	0	0.00
Degradación ecológica (Suelos)	0	0.00
TOTAL	3,438,831	100.00

Fuente: SEDUE, JICA, 1991.

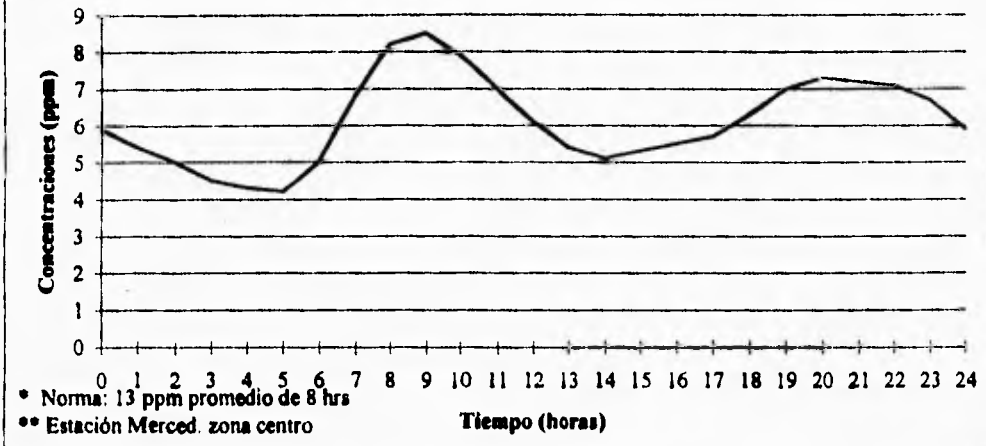
Tabla 3.9
Monóxido de Carbono (ppm), Diciembre de 1992

Zona	No. de datos	Myno	Máx.	Prom
Norweste	31	0	10.4	6.6
Nordeste	31	0	12.9	6.8
Centro	31	0	9.9	6.8
Suroeste	31	0	9.2	4.8
Sureste	31	0	10.9	5.6

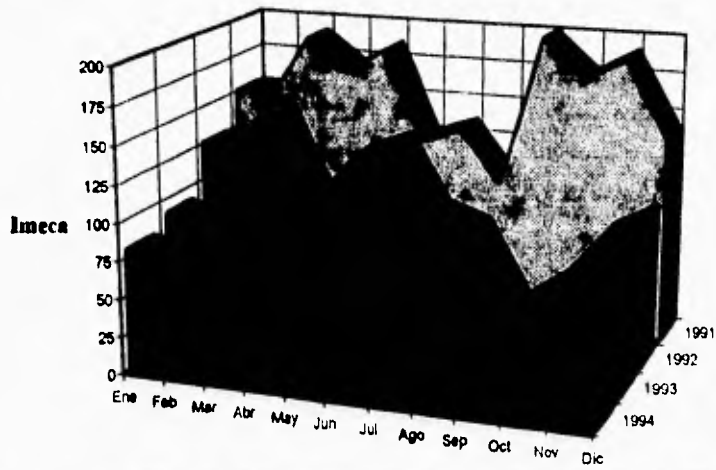
Myno = días mayores al valor criterio
 Máx. = concentración máxima
 Prom = concentración promedio
 ppm = partes por millón

Fuente: Boletín Informativo de la Calidad de Aire No 12, INE, SEDESOL, 1992

Gráfica 3.5
Variaciones horarias de CO (Promedio 1990)



Gráfica 3.6
Monóxido de Carbono (CO)
Máximos mensuales en la Ciudad de México



III.2.3 Ozono (O₃)

El ozono es considerado como contaminante secundario, es decir no es emitido directamente por fuentes específicas, sino formado en la atmósfera por reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos (hidrocarburos), cuyas fuentes son: vapores de gasolina, solventes químicos y productos de la combustión. Estas reacciones son estimuladas por la radiación solar (de determinadas longitudes de onda en el espectro ultravioleta U.V.).

La contaminación por ozono y productos oxidantes cobró importancia en el año de 1940 y se le denominó "Los Angeles Smog", hoy en día se ha convertido en un problema para la Ciudad de México, ya que se caracteriza por recibir suficiente radiación solar y tener altas emisiones contaminantes provenientes de vehículos automotores (fuente de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno).

En la Gráfica 3.7, se observa que la máxima concentración de O₃ coincide con bajos niveles de sus precursores (NO_x y HC) y altas tasas de radiación solar, lo cual ocurre, en la mayoría de los casos, entre las 12 y las 14 horas. Por la tarde, a medida que decae la radiación solar y la temperatura, las concentraciones de dicho contaminante también se abaten, mientras que las de NO_x y HC vuelven a incrementarse; es evidente que durante la noche las concentraciones de O₃ se mantienen a niveles muy bajos y constantes.

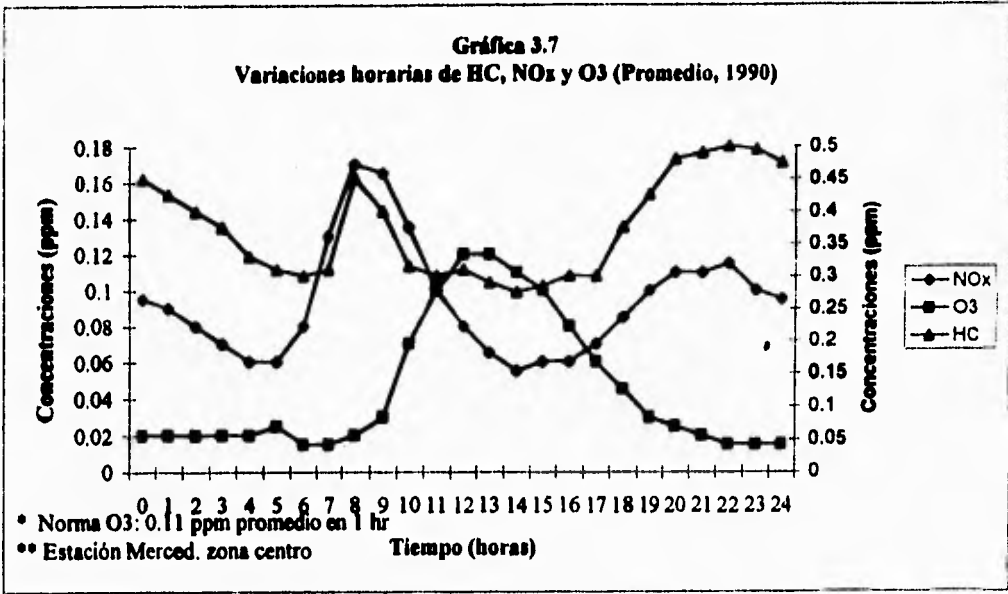
Durante los últimos cuatro años, como se muestra en la Gráfica 3.8, este contaminante ha persistido con un número de excedencias al mes que va de 20 a 31 días (como ejemplo ver la Tabla 3.10, para el mes de diciembre de 1992), lo cual nos indica que aún no ha sido controlado, pero aun así, los índices máximos son decrecientes, ya que el número de contingencias (medidas mayores a 250 Imecas) en estos últimos años han ido de 63 en 1991, a 41 en 1992, a 11 en 1993 hasta cero en 1994. Aunque no existen diferencias notables entre los distintos meses del año, se podría decir que durante algunos años los valores más elevados se han observado en mayo, agosto, noviembre y diciembre.

Zona	No. de datos	Myno	Máx.	Prom.
Noroeste	31	22	0.355	0.172
Nordeste	31	26	0.263	0.165
Centro	31	26	0.393	0.209
Suroeste	31	27	0.402	0.198
Sureste	31	27	0.280	0.176

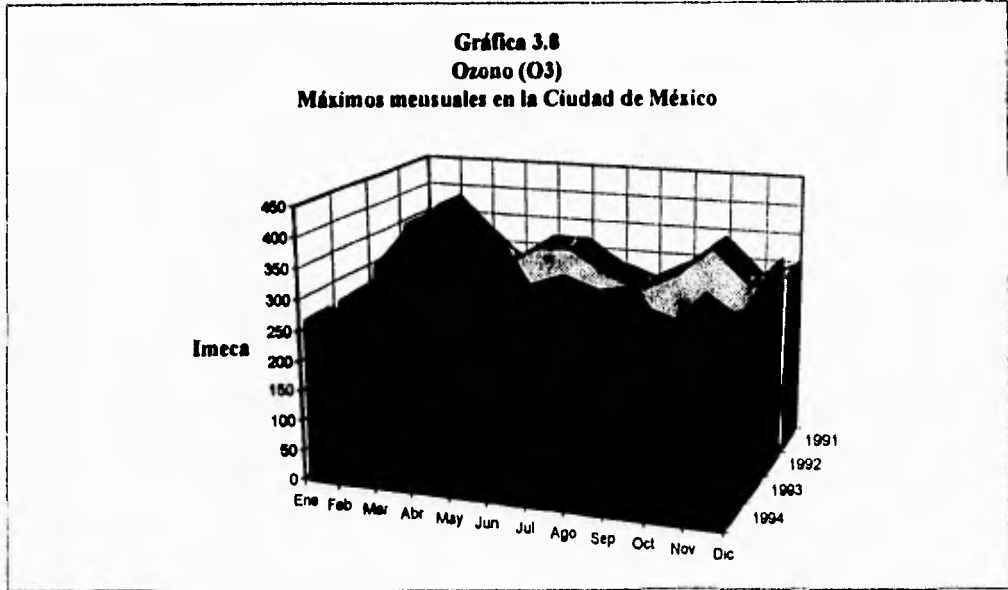
Myno = días mayores al valor entero
Máx. = concentración máxima
Prom = concentración promedio
ppm = partes por millón

Fuente: Boletín Informativo de la Calidad de Aire No.12. INE: SEDESOL, 1992

Gráfica 3.7
Variaciones horarias de HC, NOx y O3 (Promedio, 1990)



Gráfica 3.8
Ozono (O3)
Máximos mensuales en la Ciudad de México



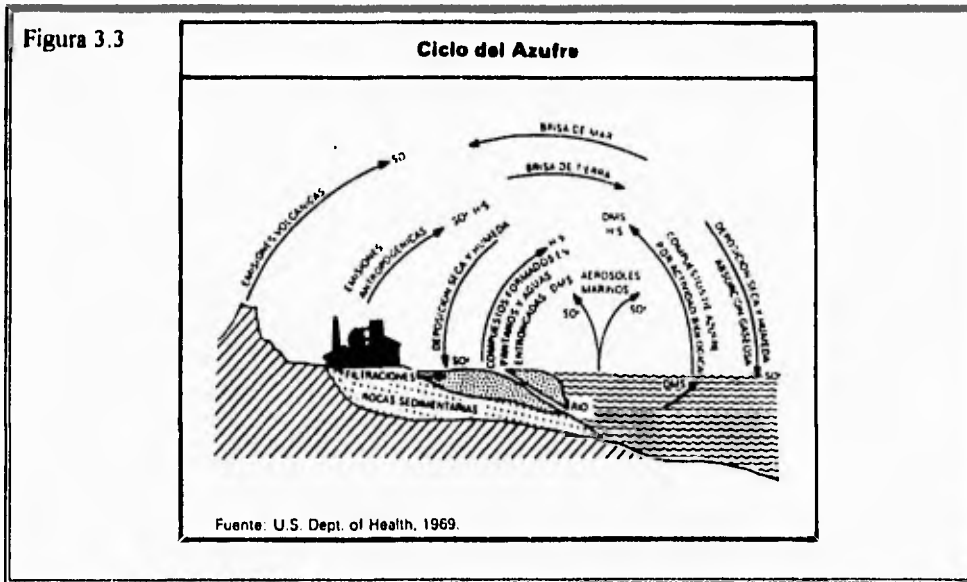
III.2.4 Bióxido de Azufre (SO₂)

El bióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro, que puede ser detectado por su sabor en concentraciones entre 1,000 y 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (aprox. 0.38 y 1.15 ppm). En concentraciones más altas arriba de 10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (aprox. 3.0 ppm) tiene un olor cáustico irritante. Se disuelve con facilidad en agua para formar ácido sulfuroso (H₂SO₃) y en solución de este último se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico con el oxígeno del aire.

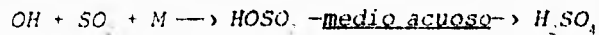
En forma natural, el SO₂ y H₂S son emitidos por los volcanes y este último es producido también por las bacterias anaeróbicas que se encuentran en el suelo, mares, pantanos y terrenos litorales.

La mayoría de las emisiones antropogénicas de azufre se encuentran en el aire bajo la forma de SO₂, que resulta del uso de combustibles fósiles (el combustóleo y otros hidrocarburos pesados), ya que estos derivados del petróleo contienen porcentajes importantes de azufre (2 - 4%).

La Figura 3.3 muestra el ciclo natural y antropógeno de compuestos de azufre.



Por otra parte, estos compuestos actúan como precursores en la formación de lluvia ácida a través de reacciones químicas en las que pueden intervenir compuestos fotoquímicos. El trióxido de azufre es un intermediario importante en la cadena de oxidación del azufre que conlleva a la producción tanto de ácido sulfúrico como de sulfatos. A continuación se resumen las reacciones de oxidación atmosférica que explican la producción del ácido sulfúrico presente en la lluvia ácida



Donde:

- OH = Radical oxhidrilo
- SO₂ = Bióxido de azufre
- M = Cualquier molécula aceptora de energía
- H₂SO₄ = Ácido sulfúrico

En la Z.M.C.M., el SO₂ es emitido preponderantemente por el sector industrial (77%) y su perfil de concentraciones a lo largo del día denota el comportamiento típico de una sustancia proveniente de chimeneas altas. Es importante mencionar que dicho contaminante también proviene del sector transporte, aunque con una contribución relativamente baja (16%), como se puede observar en la Tabla 3.11⁵.

	Bióxido de Azufre (SO ₂) [tons/año]	Porcentaje [%]
Transporte privado a gasolina	5,215	4.45
Transporte de servicio público a gasolina	1,095	0.94
Transporte de carga a gasolina	608	0.52
Transporte ligero de carga a diesel	6,610	5.64
Transporte pesado de carga a diesel	700	0.60
Transporte urbano R-100	1,270	1.08
Transporte suburbano	2,790	2.38
Transporte foráneo	230	0.20
Termoeléctrica Valle de México	1,062	0.91
Termoeléctrica Jorge Luque	943	0.81
PEMEX	0	0.00
Industrias	90,017	76.87
Servicios	6,569	5.61
Degradación ecológica (Suelos)	0	0.00
TOTAL	117,109	100.00

Fuente: SEDUE, JICA, 1991

⁵ Las estimaciones reportadas por la Agencia de Cooperación Internacional de Japon (JICA), indican que las emisiones de SO₂ provenientes de vehículos a gasolina pueden ser de dos a tres veces mayores que las reportadas actualmente en el inventario, por lo que se requiere especial atención en este aspecto.

Como se puede ver en la Gráfica 3.9, el comportamiento de dicho contaminante presenta una concentración máxima matutina por acumulación alrededor de las 9:00 hrs., que coincide con el rompimiento de la estructura de inversión térmica. Según los expertos, en este lapso la turbulencia y los patrones de circulación vertical hacen que descienda parte del SO_2 emitido a niveles de chimenea industrial y aumenten momentáneamente sus concentraciones a nivel de piso, en seguida se inicia un proceso de dispersión. La concentración decrece a medida que la circulación del aire diluye al contaminante hasta un mínimo, alrededor de las 15:00 hrs. A partir de esta hora y hasta las 7:00 hrs. del día siguiente, el nivel se mantiene semiestable, presentando pequeñas fluctuaciones. Las áreas de mayor impacto en la Ciudad de México son la nordeste y la del centro de la ciudad, esto debido a la influencia que tiene la actividad industrial, así como los factores meteorológicos en dichas zonas. Además, es de notarse en la Gráfica 3.10, que durante 1988 a 1991 dicho contaminante conserva un perfil de excedencias por debajo de la norma en la mayoría de los meses, con excepciones en los meses que van de noviembre a enero, en donde se han presentado hasta seis días con excedencias (menos que el 3% de los días del año). Es probable que hayan influido la sustitución de combustóleo por gas natural en las termoelectricas y en algunas industrias, y el uso de combustibles con un contenido limitado de azufre

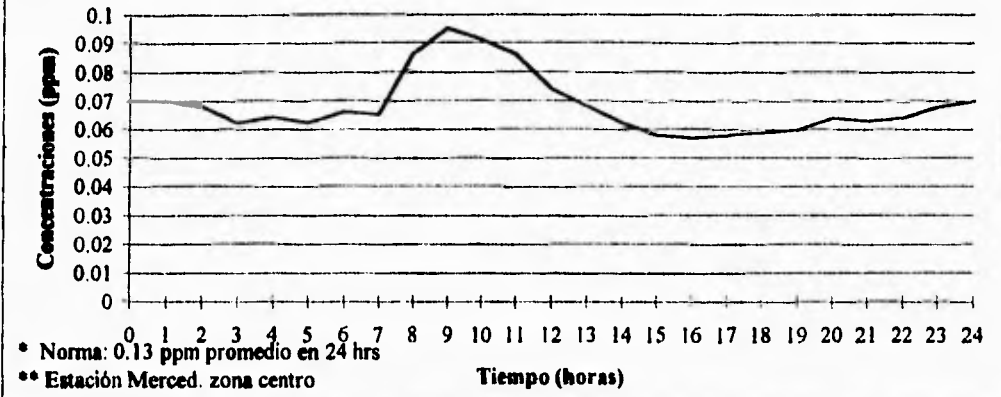
III.2.5 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

De los óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera, los más importantes son el óxido de nitrógeno (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO_2)

La utilización de combustibles fósiles en condiciones de temperaturas altas genera NO y pequeñas cantidades de NO_2 . Estos son emitidos a la atmósfera por diferentes medios: escapes de automóviles, chimeneas, incineradores y ciertos procesos químicos, entre otros. Los NO_x que se forman durante la combustión son el producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico o bien de la oxidación del nitrógeno orgánico del combustible.

Durante las horas del día con luz solar, el NO de la atmósfera puede ser convertido cuantitativamente a NO_2 por medio de una serie de reacciones que involucran interacción con hidrocarburos y oxígeno, denominado ciclo fotolítico, el cual puede ser esquematizado como se ilustra en la Figura 3.4.

Gráfica 3.9
Variaciones horarias de SO₂ (Promedio 1990)



Gráfica 3.10
Dióxido de Azufre (SO₂)
Máximos mensuales en la Ciudad de México

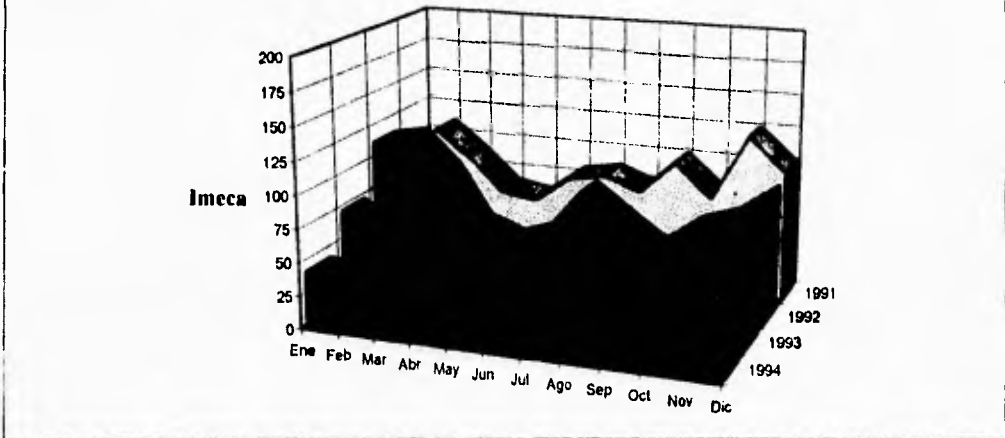
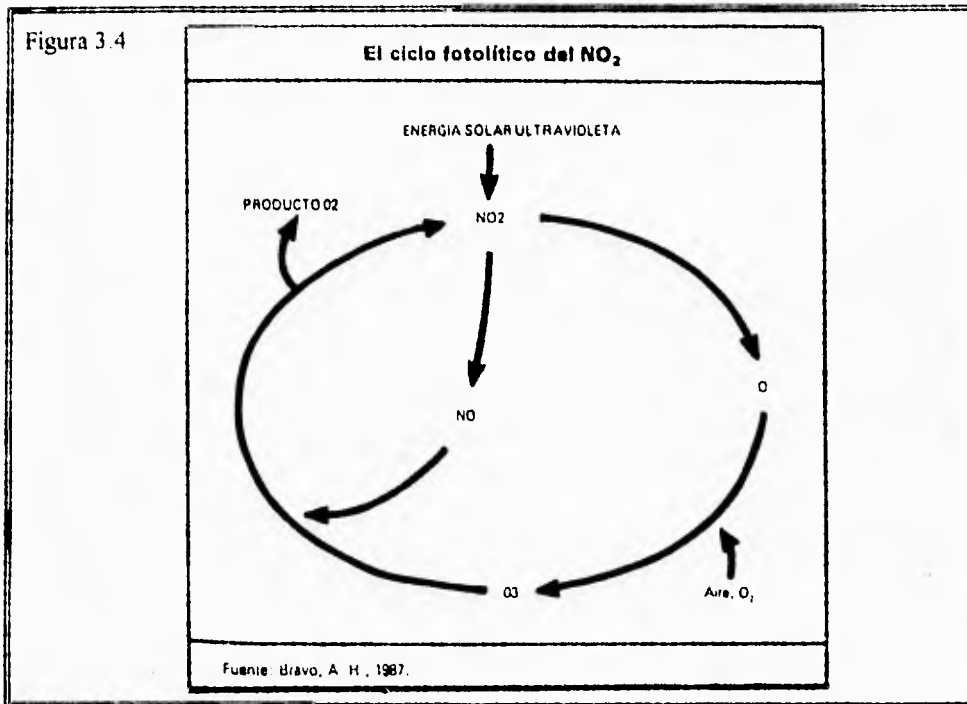
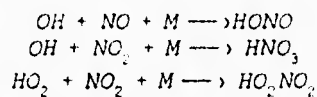


Figura 3.4



Las emisiones de NO_x aparte de actuar como elementos centrales en los procesos de generación de ozono y otros oxidantes fotoquímicos, pueden ser convertidas a nitratos que son partículas finas que incrementan los problemas de partículas respirables, o bien generar ácidos y, por lo tanto, lluvia ácida, a partir de las siguientes reacciones:



Donde:

OH	= Radical oxhidrilo	NO	= Monóxido de nitrógeno
M	= Cualquier molécula receptora de energía	HONO	= Ácido nitroso
NO ₂	= Bióxido de nitrógeno	HNO ₃	= Ácido nítrico
HO ₂	= Radical HO ₂	HO ₂ NO ₂	= Ácido pernitrico

Otra propiedad importante de los óxidos de nitrógeno es la reducción de la visibilidad en atmósferas contaminadas, debido a que el NO₂ absorbe energía luminosa del espectro visible y causa que en el horizonte objetos blancos se aprecien de color amarillo pálido o café-rojizo

La generación natural de NO_x es producida por acción bacteriana. Sin embargo, los procesos de eliminación naturales mantienen un nivel basal del orden de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.7 ppm) para NO . Un caso diferente se presenta con las concentraciones en ambientes urbanos, donde se localiza una gran parte de las fuentes antropógenas de NO_x ; en estos ambientes urbanos los niveles son mayores, porque los contaminantes son introducidos a la atmósfera más rápidamente de lo que son eliminados.

Dentro de la Z.M.C.M., las concentraciones de los óxidos de nitrógeno representan la adición de bióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido nítrico (NO) presentes en la atmósfera y son atribuibles tanto al sector industrial como al del transporte, por lo que en su comportamiento diario se conjugan ambos patrones de actividad. Como se puede observar en la Tabla 3.12, es evidente que los automóviles privados son el principal factor contribuyente en la emisión de este contaminante, con una aportación del 38%, no obstante, la industria participa en conjunto con el 23% de las emisiones. También cabe mencionar que las termoeléctricas Valle de México y Jorge Luque generan 6% y 1%, respectivamente. Estas concentraciones tienen gran importancia en las reacciones fotoquímicas atmosféricas, debido a que participa en la producción de los contaminantes oxidantes (como el ozono) y los ya identificado en la Ciudad de México como "smog", los cuales son visibles como una nube de color amarillo pardo sobre la ciudad.

Tabla 3.12
Inventario de Emisiones

	Óxido de Nitrógeno (NO_x) (tons/año)	Porcentaje [%]
Transporte privado a gasolina	54,865	37.59
Transporte de servicio público a gasolina	8,964	6.14
Transporte de carga a gasolina	4,661	3.19
Transporte ligero de carga a diesel	14,670	10.05
Transporte pesado de carga a diesel	1,210	0.83
Transporte urbano R-100	4,440	3.04
Transporte suburbano	10,080	6.91
Transporte foráneo	800	0.55
Termoeléctrica Valle de México	9,200	6.30
Termoeléctrica Jorge Luque	1,740	1.19
PEMEX	0	0.00
Industrias	33,883	23.22
Servicios	1,134	0.98
Degradación ecológica (Suelos)	0	0.00
TOTAL	145,947	100.00

Fuente: SEDUE, JICA

Las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) observadas en la Ciudad de México son consistentemente poco más bajas que las observadas para el óxido nítrico (NO). La variación horaria promedio de NO y NO₂, en la estación La Merced, zona centro para 1990 se puede observar en la Gráfica 3.11. En la Gráfica 3.12, se demuestra que el NO₂ mantiene una estacionalidad más marcada que el CO y el SO₂, con la época invernal como la de mayor incidencia de días con niveles por encima de la norma y mayores promedios máximos mensuales. De abril a septiembre en que se presentan las lluvias, mayores temperaturas y elevadas tasas de radiación solar prácticamente no se dan excedencias, debido a que se incrementa la reactividad de la atmósfera y dicho contaminante reacciona fotoquímicamente para producir contaminantes secundarios como el O₃.

III.3 Efectos en la Salud de los Contaminantes de Mayor Interés

Los efectos de la contaminación del aire pueden variar desde la simple irritación transitoria hasta en enfermedades agudas o incluso la muerte, en función de la magnitud de los niveles de concentración y de los periodos de exposición de la población afectada.

Básicamente se usan dos enfoques en el estudio de los efectos sobre la salud de los contaminantes atmosféricos: estudios experimentales (toxicológicos) con humanos y animales, y estudios epidemiológicos, basados en los efectos medibles en la salud de grupos expuestos naturalmente a determinados contaminantes. La duración de las exposiciones incluidas en estudios experimentales con humanos se limitan a periodos de pocos días. Por otra parte, los estudios epidemiológicos permiten evaluar los efectos crónicos, aunque también dan oportunidad a evaluar los efectos relacionados con exposiciones a concentraciones críticas en periodos relativamente cortos, principalmente en grupos de alto riesgo.

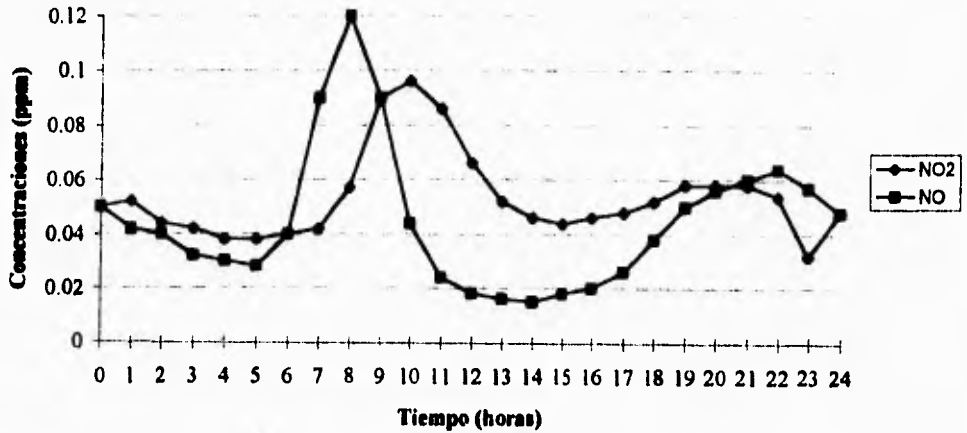
A continuación se presenta un resumen de los criterios avalados por la Organización Mundial de la Salud y otras instituciones relevantes para cada tipo de contaminante.

Partículas

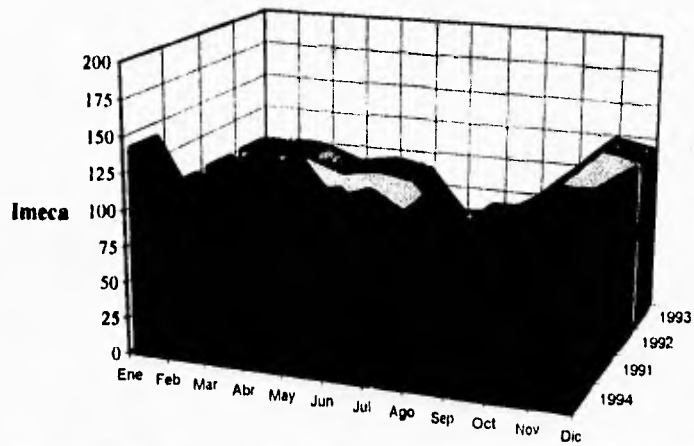
Cuando las partículas suspendidas en el aire son inhaladas pueden irritar el sistema respiratorio, o dañar los mecanismos de ventilación en los pulmones. De ese modo contribuyen a agudizar enfermedades respiratorias, en mucho, de la misma manera como los contaminantes gaseosos lo hacen. La inhalación prolongada de ciertos componentes de las partículas suspendidas puede incrementar el número de casos y la severidad de enfermedades respiratorias crónicas. En la Tabla 3.13, se puede observar algunas consecuencias por la deposición de partículas en el aparato respiratorio.

En el caso de las partículas finas conocidas como PM10 -de tamaño menor a 10 micrómetros-, son especialmente nocivas porque pueden penetrar a las cavidades pulmonares sin ser captadas por la acción de limpieza natural del sistema respiratorio. La EPA identifica los siguientes grupos como los más sensibles a los efectos de las partículas finas respirables en el aire ambiente:

Gráfica 3.11
Variaciones horarias de NO y NO2 (Promedio 1990)



Gráfica 3.12
Bióxido de Nitrógeno
Máximos mensuales en la Ciudad de México



- Personas con influenza, enfermedades crónicas respiratorias y cardiovasculares y ancianos.
- Niños.
- Otros grupos considerados sensibles son los fumadores, las personas que tienen problemas para respirar por la nariz y los atletas, ya que durante el ejercicio su respiración es forzada y de alto flujo.

Tabla 3.13 Respuesta posibles a deposición de partículas en el aparato respiratorio		
Región Principal	Mecanismos Potenciales	Consecuencias Potenciales/Observadas
Pulmonar	Decrecimiento en el transporte de oxígeno y probable incremento en la resistencia del flujo sanguíneo a través de los capilares pulmonares.	Agravamiento de los padecimientos cardiopulmonares asociados / Londres, 1954.
	Muerte de macrófagos como resultado de la liberación de enzimas proteolíticas que dañan tejidos alveolares por sílice y otros polvos gruesos.	Pneumoconiosis/Arenas en el desierto, polvos agrícolas en granjeros/ trabajadores de sílice en granito/carbón en trabajadores de electrodos.
	Daño a macrófagos y otros mecanismos de defensa contra huéspedes por recubrimiento superficial de materiales tóxicos. Daño a tejidos por aerosoles ácidos.	Incremento de la susceptibilidad a infecciones/incremento en la mortalidad
	Efectos combinados de expulsión y eliminación lenta de partículas.	Acumulación de pigmentos en pulmones a partir de materia particulada inhalada.
Torácica	Posibles efectos en mecanismos sobre huéspedes (eliminación, inmunología). Promoción de infecciones.	Incremento de infecciones en el tracto respiratorio inferior en los niños
	Absorción de compuestos tóxicos (ej: pesticidas, metales pesados, carcinógenos) que dan como resultado efectos extrarrespiratorios. Eficiencia de absorción mayor para deposición alveolar.	Efectos en el sistema nervioso y hematológico por el plomo; cáncer gastrointestinal.
Extratorácica	Irritación química y mecánica, estimación de receptores por material depositado.	Efectos sintomáticos: Sequedad en la nariz, boca y garganta (polvo polimerizado conteniendo carbon negro) estornudos y alergias (polen)
	Sistema de eliminación de mucociliar detenido por polvo fino de madera.	Cáncer nasal.
Traqueobronqueal	Incremento en la deposición de la laringe.	Cáncer laringeal / humo del cigarro

	Irritación química y mecánica dando como resultado la broncoconstricción por polvos "inertes" (carbón, carbonato de calcio); polvos uranos resuspendidos (materiales conglomerados, sulfatos volátiles) polvos orgánicos gruesos, aeróalergenos (polen, polvo de granos, etc.); aerosoles, ácidos finos (ácido sulfúrico, bisulfato de amonio), comunidades con alto nivel de partículas suspendidas; partículas finas combinadas con gases contaminantes.	Reducción de la función respiratoria. Dificultad en respirar y otros agravamientos en padecimientos cardiacos y pulmonares, como: asma, bronquitis, enfisema, influenza (nitrate de sodio).
	Velocidades de eliminación alterada, producción incrementada de mucosidad por el material depositado (humo de cigarro, polvos, ácido sulfúrico).	Posible incremento de bronquitis por exposición repetida a vapores de ácido sulfúrico, incremento en la persistencia a la bronquitis en personas expuestas a altos niveles de contaminación; en trabajadores expuestos a polvos de carbón y otros polvos.
Traqueobronqueal	Daño a tejidos por aerosoles ácidos.	Lesiones bronquiales.
	Interacción de carcinógenos y partículas ambientales.	Producción de tumor intratraqueal por Benzopireno, producida por carbón, hierro y asbesto.

Fuente: EPA, *Draft staff paper for particulate matter; Committee meeting, July 1981.*

Bióxido de azufre

El bióxido de azufre es un irritante respiratorio muy soluble, ello provoca que la mayor parte que se inhala se absorba por la nariz, el ser humano responde al SO_2 atmosférico sufriendo el efecto de broncoconstricción, la que puede ser evaluada en términos de incrementos a resistencia respiratoria y efectos en el sistema respiratorio. En la Tabla 3.14, se muestra la información disponible respecto de los efectos del SO_2 sobre la salud.

La Figura 3.5, presenta un esquema de concentración vs efecto en la salud a exposiciones a corto y largo plazo al SO_2 . El área sombreada representa las condiciones que traen como consecuencia un aumento en la mortalidad. El área marcada con rejilla representa las condiciones en que se reportan efectos nocivos a la salud; las condiciones en que se sospechan estos efectos se identifican como el área punteada. El área no sombreada ilustra las condiciones en que no se esperan problemas significativos.

Es importante mencionar que en una atmósfera contaminada con partículas suspendidas, el bióxido de azufre es particularmente perjudicial ya que paraliza los cilios epiteliales del tracto respiratorio, causando que las partículas penetren en los pulmones y se sedimenten. En la Tabla 3.15, se muestran los efectos sobre la salud de la exposición combinada del SO_2 y las PST.

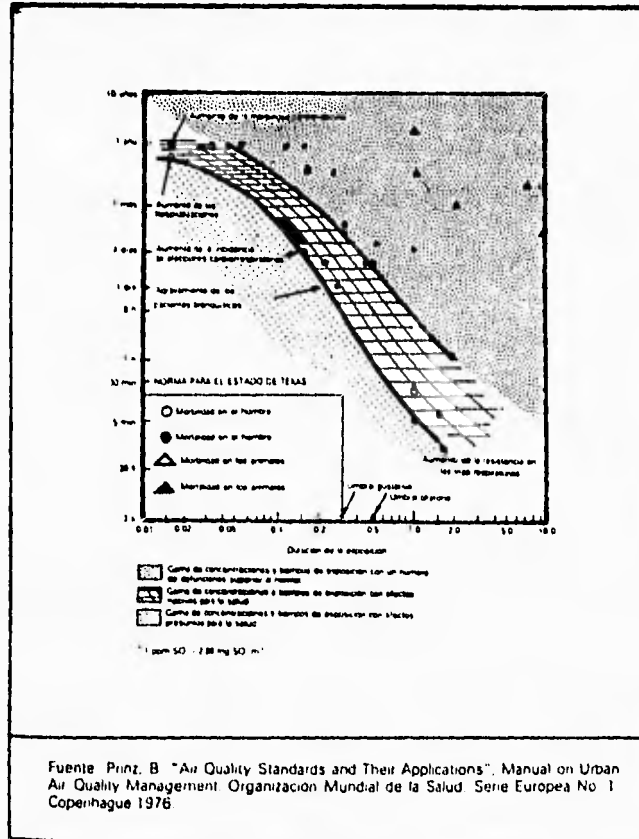
Tabla 3.14
Efectos del dióxido de azufre sobre la salud humana *

Concentraciones (ppm)	Tiempo de exposición	Efectos
0.15 - 0.25	1 - 4 días	Respuestas cardiorrespiratorias
1.0 - 2.0	3 - 10 min.	Respuesta cardiorrespiratoria en individuos sanos.
5.0	1 hora	Sofocamiento e incremento de resistencia en los pulmones.
10.0	1 hora	Peligro severo, algunas hemorragias nasales.

* Los datos se refieren a adultos sanos bajo condiciones experimentales en el laboratorio

Fuente: Davies, Mackenzie y Cornwell, *op. cit.* y Levv

Figura 3.5



Fuente: Prinz, B "Air Quality Standards and Their Applications". Manual on Urban Air Quality Management Organización Mundial de la Salud. Serie Europea No 1 Copenhague 1976.

Efectos en las Plantas: Se han observado efectos dañinos por la absorción de SO₂ por las plantas, y se conocen dos efectos típicos de daño visible en hojas: daño severo y crónico. El primero está asociado con altas concentraciones a intervalos cortos de tiempo, y el resultado es que las hojas se sequen y adquieran un color amarillo pálido y en ocasiones rojizo. El efecto de daño crónico es el resultado de exposiciones a bajas concentraciones y exposiciones largas, con lo que las plantas adquieren gradualmente un tono amarillento.

Tabla 3.15
Efectos en la salud por la exposición combinada a SO₂ y PST.

Concentraciones de		Efectos
SO ₂	PST	
0.91 ppm (promedio diario)	500 µg/m ³ (promedio diario)	Aumento de la mortalidad y de las hospitalizaciones.
0.09 - 0.10 ppm (media aritmética anual)	250 µg/m ³ (promedio diario)	Empeoramiento de enfermedades pulmonares.
0.40 ppm (media aritmética anual)	250 µg/m ³ (media aritmética anual)	Síntomas respiratorios.
0.03 ppm (media geométrica anual)	100 µg/m ³ (media geométrica anual)	Efectos sobre la visibilidad y molestias leves.

Fuente: Levy, Paula, *Air Quality Management Plan*, EU, 1989

La Figura 3.6, presenta efectos del SO₂ sobre la vegetación a diferentes concentraciones y exposiciones.

Monóxido de carbono

Cuando se inhala, el monóxido de carbono entra (formando carboxihemoglobina CoHb) a la corriente sanguínea y se une químicamente a la hemoglobina, la sustancia que acarrea el oxígeno a las células. La afinidad del monóxido de carbono por la hemoglobina en los glóbulos rojos es 200 - 2,500 veces que la del oxígeno. Esto reduce la cantidad de oxígeno entregada a todos los tejidos del cuerpo. Los impactos adversos del monóxido de carbono sobre la hemoglobina están determinados por la cantidad de aire respirado, la concentración del contaminante y el tiempo de exposición. Los niveles de carboxihemoglobina y sus efectos se muestran en la Tabla 3.16

Figura 3.6

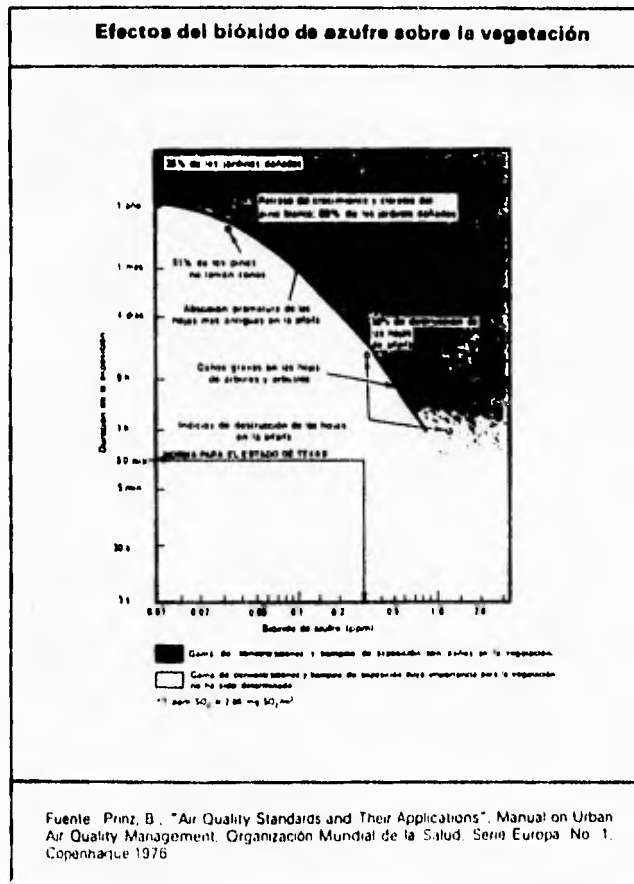


Tabla 3.16
Niveles de Carboxihemoglobina y sus efectos reportados

COHb%	Efectos
0.4	Valores fisiológicos normales para No-fumadores.
2.5 - 3.0	Disminuye rendimiento en el ejercicio en pacientes con anginas o con claudicación intermitente.
4.0 - 5.0	Incremento en los síntomas en policia de tránsito (CEFALEALASITUD); incrementa el déficit de oxígeno en No-fumadores
5.0 - 10.0	Cambio en metabolismo miocárdico y posible daño, disminución estadísticamente significativa de la percepción visual, agilidad manual o habilidad de aprendizaje.
> 10.0	CEFALEA y problemas de coordinación manual y cambios en respuesta visual medido por el electroencefalograma.

Fuente: Wadden R.A.; Scheff-PE. *Indoor Air Pollution*, John Wiley and Sons, 1982

El CO debilita las contracciones del corazón, reduciendo la cantidad de sangre bombeada a varias partes del cuerpo, lo que resulta en una reducción del oxígeno disponible para los músculos y varios órganos. Así, disminuye el funcionamiento aun de individuos saludables y puede ser amenazante para la vida de aquéllos con enfermedades del corazón. Individuos con anemia, enfisema y otras enfermedades pulmonares, así como fumadores y aquéllos que vivan en altitudes elevadas, son más susceptibles a los efectos del monóxido de carbono. Aun a concentraciones relativamente bajas, el monóxido puede tener efectos sobre la función mental, agudeza visual y reflejos.

Las plantas son relativamente insensibles al CO a concentraciones en que han resultado tóxicas para los animales.

Oxidantes fotoquímicos

En relación con los efectos del ozono, algunos estudios sobre exposición de humanos se han enfocado a la determinación del límite de concentración en el cual se puede detectar su olor y en la ocurrencia de cambios en la función pulmonar. Por ejemplo en un estudio, involucrando a diez personas expuestas a 0.02 ppm de ozono, nueve fueron capaces de detectar el olor de inmediato y durante cinco minutos.

Otros estudios muestran que muchas de las sustancias irritantes para los ojos son productos de reacciones fotoquímicas. Las precursoras de sustancias irritantes son compuestos orgánicos en combinación con los óxidos de nitrógeno. Aunque las concentraciones de oxidantes pueden correlacionarse con la severidad de la irritación en los ojos, una relación efecto-origen directa con el ozono no se ha establecido. Asimismo, se observa un incremento en frecuencia de ciertos tipos de ataques de asma en una pequeña porción de personas con esta enfermedad, en días cuando la

concentración de oxidantes excede concentraciones máximas de 0.13 ppm. En la Tabla 3.17, se muestra un resumen de los resultados de investigaciones recientes realizadas en los Estados Unidos.

Efectos adversos en la vegetación se observan después de exposiciones a concentraciones de 0.05 ppm durante cuatro horas.

Tabla 3.17 Respuestas en Humanos a Exposiciones de Ozono		
Respuesta	Sujeto	Condiciones de Exposición
Decremento del 5-10% en función respiratoria	Hombres jóvenes sanos	0.18 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 2 horas -- O ₃ en aire purificado
Incremento en tos	Niños sanos	0.10 ppm -- Programa de campo de verano normal -- O ₃ en aire ambiente
	Hombres jóvenes sanos	0.12 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 2 horas -- O ₃ en aire purificado
Funcionamiento atlético reducido	Hombres jóvenes sanos	0.08 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas -- O ₃ en aire purificado
	Hombres y mujeres jóvenes sanos	0.12 - 0.13 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 16-28 minutos -- O ₃ en aire ambiente
	Hombres jóvenes sanos	0.18 ppm con un flujo respiratorio de 54 l/min durante 30 minutos -- O ₃ en aire purificado
	Hombres y mujeres jóvenes sanos	0.12 - 0.13 ppm con ejercicio y con flujo de intercambio de 30-120 l/min durante 16-28 minutos -- O ₃ en aire purificado
Incremento en reactividad nasal	Hombres jóvenes sanos	0.08 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas -- O ₃ en aire purificado
	Hombres adultos jóvenes con rinitis alérgica	0.18 ppm con ejercicio pesado durante 2 horas -- O ₃ en aire purificado
Incremento en permeabilidad nasal	Hombres jóvenes sanos	0.40 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 2 horas -- O ₃ en aire purificado
Incremento en inflamación nasal	Hombres sanos	0.08 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas -- O ₃ en aire purificado
Paso de partículas traqueobronquial acelerado	Hombres sanos	0.20 ppm con ejercicio ligero intermitente durante 2 horas -- O ₃ en aire purificado

Oxidos de nitrógeno

El NO no es irritante y no se considera que produzca efectos adversos en la salud en las concentraciones a las que se encuentra en atmósferas urbanas. Sin embargo, el NO₂ es tóxico, su efecto primario se presenta en el tejido pulmonar, y a concentraciones mayores de 188 mg/m³ (100 ppm) es letal para la mayoría de las especies animales y 90% de las muertes son causadas por edema pulmonar. Además, se observan efectos del NO₂ sobre tres clases de materiales; fibras sintéticas textiles, metales y vegetación. Se presenta decoloración en las telas y fallas en sistemas de relevo eléctrico como consecuencia de altos niveles de nitratos en partículas

La Tabla 3.18, presenta un resumen de algunos de los estudios científicos realizados sobre los efectos del NO₂.

Tabla 3.18 Resumen de efectos producidos por el NO ₂				
Efecto	Concentración NO ₂		Duración de exposición	Comentario
	ppm	µg/m ³		
Incremento en la incidencia de enfermedades respiratorias en familias	0.062 a 0.109	117 a 205	2 a 3 años	Estudio en Chattonnoga promedio semestral
Incremento en la incidencia de bronquitis aguda en infantes y niños de escuela	0.063 a 0.083	118 a 156	2 a 3 años	Estudio en Chattonnoga promedio semestral
Detección de malestar en el olfato	0.12	225	-----	Percepción inmediata
Efectos en especies de naranja fractura de hojas y baja producción	0.25	470	8 mese	-----
Clorosis en hojas de especies de naranja	0.5	940	35 días continuos	-----
Conejos cambios estructurales en el colágeno pulmonar	0.25	470	4 horas/día por 6 días	Efecto aparente sostenido después de 7 días de la última exposición

Fuente: *Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides*, 1971

Plomo

Las concentraciones de Pb no se incrementan en condiciones normales (no se considera el posible efecto de la lluvia ácida) en la parte comestible de la mayoría de las plantas; sin embargo, se ha reportado que las hojas de plantas que se encuentran a una distancia de cerca de 25 metros de arterias muy transitadas contienen concentraciones de plomo mayores que las plantas que crecen en sitios distantes a estas arterias. Los alimentos, el agua y otros líquidos son la mayor fuente de ingestión

de plomo en el hombre y en la mayoría de los animales; no obstante, la inhalación de plomo contenido en el aire en atmósferas urbanas también es una fuente potencial de acumulación de plomo en el organismo.

La mayor fuente de las altas concentraciones de plomo en sangre en niños es sin lugar a dudas el plomo contenido en pinturas, el hecho de que muchos niños con niveles altos del metal en la sangre habitan en casas sin el problema de plomo en su pintura, implica que el plomo emitido por vehículos (que consumen combustibles con plomo) puede aportar a través de las partículas respiradas en áreas urbanas, concentraciones de plomo que se introducen al organismo.

Cerca de la mitad de las partículas que contienen plomo, son removidas del aire por gravedad a una distancia de algunos cientos de metros de la fuente de emisión. El remanente del plomo se encuentra en forma de aerosol, que permanece suspendido hasta que se remueve por precipitación. La mayor parte del plomo que entra en sistemas acuáticos via precipitación y lavado no es soluble en el agua y aparentemente, es removido del agua por sedimentación. La baja solubilidad de este metal en agua es un factor importante en los sistemas terrestres, debido a que afecta la habilidad de las plantas para asimilarlo.

IV SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica, (del inglés: *Geographic Information System, GIS*), representan un poderoso instrumental de análisis y modelamiento de problemas diversos que tienen en común el manifestarse espacialmente, en este caso particular la problemática es la contaminación atmosférica proveniente de fuentes vehiculares. El fin último de un SIG es el de contribuir a la toma de decisiones, con base en el análisis de los datos que ingresan en el mismo. A su vez estos sistemas son particularmente útiles en el manejo interactivo (usuario/sistema) de información de diversas fuentes, en distintas escalas y con diferentes contenidos (principalmente naturales y socio-económicos), además facilitan la integración de información para comprender y resolver problemas de índole multidisciplinarios, en los que radica su principal fortaleza. (Burrough, (1986) define a un SIG como "un poderoso conjunto de herramientas para coleccionar, almacenar y recuperar, según se desee, transformaciones y despliegue de datos espaciales tomados del mundo real para un conjunto particular de propósitos". Sin embargo podemos decir, de una manera más simple que un SIG es "un sistema computarizado que puede retener y usar información que describen lugares y objetos sobre la superficie terrestre".

Los SIG se utilizan para ayudar a los tomadores de decisiones indicando alternativas de planeación de desarrollo y conservación de recursos, así como un modelado de resultados posibles de escenarios, como se puede apreciar en la Figura 4.1, además ofrecen una fuente rápidamente accesible de hechos objetivos relacionados con ciencias de la Tierra, y una herramienta veloz, económica y flexible para combinar tales hechos con otros productos para crear alternativas de decisión. Dentro del campo de aplicación para modelos ambientales, un SIG es capaz de proveer soporte de procesamiento de información en un sistema individual, así como en un módulo ambiental acoplado.



Los SIG son un miembro de una familia de herramientas que permiten a las computadoras representar fenómenos espaciales y analizar datos espacialmente relacionados. Todos los SIG integran funciones de mapeo, que despliegan mapas o rasgos geográficos con un manejador de bases de datos que organizan los atributos ligados a los rasgos de mapas, estos conceptos se verán con más detalle en los subsecuentes capítulos.

Aunque la mayoría tome a los SIG como nueva tecnología, los conceptos y técnicas que forman la base de dicha tecnología han estado en desarrollo por lo menos desde hace ya más de 30 años. En los 10 últimos años, los SIG se han utilizado de diversas maneras, en distintos campos de aplicación, por lo que su uso se ha expandido de manera significativa. Además dichos SIG continuarán su evolución para satisfacer las necesidades de aquellas personas interesadas en su aplicación, sin importar si los problemas a resolver son pequeños o grandes o si requieren de análisis de información dinámico o estático.

IV.1 Antecedentes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG tienen una historia muy antigua, pero con poca documentación al respecto, sin embargo se pueden encontrar indicios de ellos como por ejemplo: a través de cartografía asistida por computadora (Tobler, 1959), en la ingeniería civil (Horwood et al 1962) y en estudios geográficos (Dacey and Marble, 1965). Definitivamente existía una base en lo que sería un SIG en el año de 1972, cuando se publicó las memorias del Segundo Simposio en el Manejo de Información Geográfica (Tobler, 1972), sin embargo, el Sistema de Información Geográfico Canadiense, desarrollado entre 1960 y 1969 se considera como la primera producción de un SIG (Tomlinson, 1988)

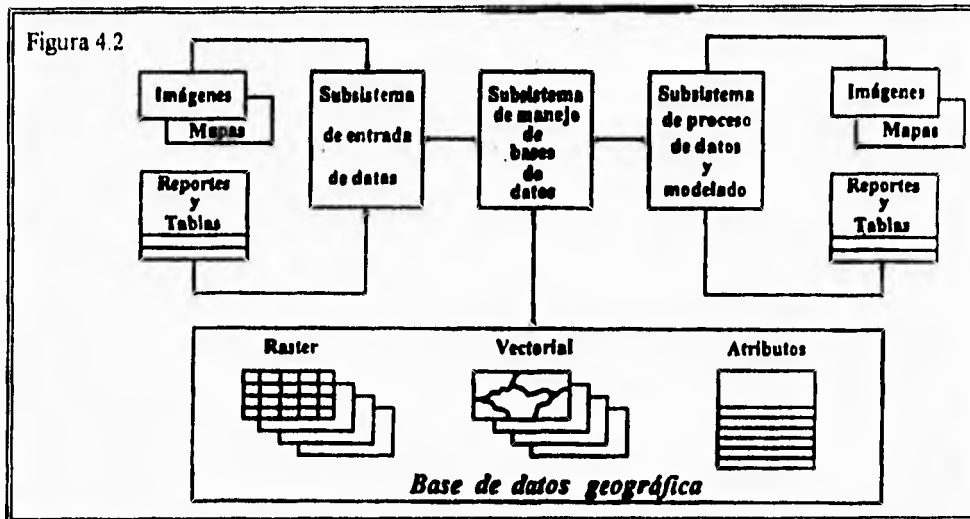
La Percepción Remota ha tenido un impacto significativo en los SIG, sin embargo el enfoque principal de la percepción remota ha sido en el desarrollo de Sistemas de Procesamiento de Imágenes (SPI) provenientes de satélites. El uso de información derivada de la percepción remota en SIG, ha sido

de interés desde 1972 (Tomlinson), no obstante la unión entre un Sistema de Procesamiento de Imágenes y un SIG se ha llevado a cabo desde 1983 (Marble and Peuquet).

La utilización de SIG en temas referentes al Medio Ambiente, ha sido de gran interés a partir de 1979, cuando en la conferencia AutoCarto IV, llevada a cabo en Crystal City Virginia, se trató la interacción entre un SIG y temas de este índole; También en conferencias de percepción remota como PECORA VII en 1981, llevada a cabo en Sioux Falls, South Dakota, se manejaba el interés por enlazar un SIG y un SPI para el manejo de aspectos ambientales. A partir de estas fechas los SIG se han utilizado en varios temas referentes al deterioro del medio ambiente, por ejemplo: Burrough (1986), enfocó la utilización de un SIG para el avalúo de los recursos forestales; Starr y Estes (1990), maneja un SIG desde una perspectiva de percepción remota; Tomlin (1990), trata a un SIG desde una perspectiva analítica de mapeo algebraico; y por último Clarke (1990), además de manejar la perspectiva de Tomlin, maneja la transformación algorítmica del espacio, lo cual fue una aportación muy valiosa en dicha época. La modelación de aspectos ambientales proporciona un gran campo de aplicación de los SIG, debido a la necesidad de manejar diversos tipos de información tanto espacial como temporal.

IV.2 Componentes que integran los Sistemas de Información Geográfica

Un SIG es un conjunto de programas y equipos de computación que permite el acopio, manipulación y transformación de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite) y no-espaciales (atributos) provenientes de varias fuentes, temporal y espacialmente diferentes. Consisten de cuatro componentes principales: agrupamiento y entrada de datos, bases de datos geográficos, modelado y análisis de datos, y presentación y visualización de datos. Bryan y Zobrist (1976) propusieron cuatro criterios para considerar que un SIG es realmente útil. Estos criterios son: (1) debe proveer ubicaciones de puntos y áreas, (2) debe ser posible agregar variables individuales y agrupadas, (3) debe efectuar representaciones de arreglos espaciales de los datos, y (4) debe ser capaz de interactuar con programas de análisis estadístico y matemático. En la Figura 4.2, se presenta una representación esquemática de un SIG.



Entrada y Agrupación de Datos

Existen métodos para un agrupamiento eficiente de datos que proveen exactitud y confiabilidad, consistentes con el nivel de aplicación de la información. El proceso usualmente involucra la interpretación de imágenes aeroespaciales, observaciones de campo, la digitación de mapas y el soporte para las fuentes de datos existentes.

La captura de datos o digitalización es una secuencia de tareas para codificar los identificadores de posición de datos espacialmente orientados. En su forma más burda, la digitalización puede verse como la determinación de los valores de las coordenadas X e Y que describen la ubicación de puntos, líneas, áreas o superficies, conforme se van representando en uno o más mapas. En un sentido más amplio, digitalizar es la tarea de crear un archivo de datos aceptables, libre de errores y legible por una computadora, proveniente de fuentes muy variadas, como pueden ser mapas, planos, etc. En síntesis, este es el proceso por el que los datos se convierten del formato analógico - mapa - a un formato digital, legible por el sistema computarizado. Estos se acumulan y manejan en bancos de datos vectoriales, conformados por puntos, segmentos y polígonos referenciados a un sistema de coordenadas del mundo real.

Una entidad geográfica se define por dos tipos de datos, geométricos y no geométricos. Los primeros se relacionan con la ubicación geográfica de la entidad que se está analizando. Los no geométricos se relacionan con la información registrada (usualmente descriptiva) de dicha entidad. La transformación de estos datos geométricos a un formato compatible con computadoras digitales requiere del uso de un procedimiento de digitalización.

Base de Datos Geográfica

Una base de datos espacial describe una colección de entidades, algunas de las cuales tiene ubicación permanentes en algún espacio global y dimensionado. Normalmente existe una mezcla de tipo de entidades geométricas y no geométricas que pueden cambiar con el tiempo. Las entidades de tipo geométrico tienen las propiedades topográficas básicas de ubicación, dimensión y forma. Las entidades no geométricas no son reconocidas al no tener ubicaciones permanentes con respecto a otras entidades. Los datos espaciales describen la ubicación y la topología de rasgos de puntos, líneas, polígonos y superficies, mientras que los datos no espaciales describen las características de estos rasgos.

Base de Datos Gráfica

La información gráfica incluye atributos, una ubicación espacial, extensión o configuración y es dinámica (cambia con el tiempo). Estos atributos geométricos pueden ser topológicos o métricos. Estos últimos incluyen posición, forma y tamaño que pueden expresarse en coordenadas espaciales. Los atributos topológicos son aquellos que describen características tales como conectividad y adyacencia que no varían bajo distorsiones y cambios de escala. Las entidades geográficas están convencionalmente divididas en puntos, líneas, polígonos y superficies. Los polígonos son, tal vez, los rasgos más utilizados en los SIG. Por ejemplo, las cotas de altitud pueden representarse como puntos, en tanto que los rasgos lineales (tales como fallas geológicas, redes fluviales o carreteras) pueden representarse como segmentos, así como los polígonos se utilizan para representar unidades de paisajes (ecológicas, geomorfológicas, etc.). Esencialmente, la representación computacional de entidades de puntos, línea, polígono y superficie toman una de dos formas: datos cuadrículados (celulares, raster) o datos vectoriales. La estructura de datos raster consiste en una matriz de celdas de tamaño uniforme, cada una referenciada por un índice posicional único (renglón y columna). Contiene un número o código que representa el tipo de valor del atributo que se está mapeando, el cual puede ser ordinal (escalar o vector) o nominal. Una de las mayores desventajas de la organización celular es que existe mucho desperdicio de espacio de almacenamiento en una computadora para datos espaciales.

La estructura de datos vectoriales representa entidades puntuales definidas directamente por sus coordenadas, entidades de línea definidas por una cadena de coordenadas espaciadas tanto uniforme como no uniformemente, y entidades de área o poligonales definidas por sus fronteras. Cuando los datos vectoriales se transforman en el formato en celdas (o raster), se denomina conversión vector-celda o celdarización, la cual se utiliza para facilitar su combinación con otros datos (por ejemplo, las imágenes de satélite en formato digital) y el análisis y modelamiento de acuerdo con fines específicos. Este proceso de celdarización de los mapas temáticos (digitados) normalmente genera información tabular relativa a las unidades (polígonos) que los conforman. El valor de la celda (pixel), el número total de celdas para cada valor, el área total de los polígonos, así como su perímetro, conforman los atributos básicos del cuadro correspondiente a cada mapa celdarizado.

Los productos de percepción remota también son parte de la base de datos gráfica, ya que hacen posible la sobre posición de estos datos con aquellos derivados del SIG. Integrando técnicas de procesamiento de imágenes con procedimientos convencionales de manejo de SIG, se crea la posibilidad de optimizar la transformación de datos en información y el mejorar la calidad de los datos

para operaciones de modelado, por ejemplo: la exactitud de una clasificación espectral, puede aumentar sustancialmente a partir de la integración de la información proveniente de otras fuentes, las cuales puede ser: la interpretación visual, mapas temáticos, información de campo.

Base de Datos de Atributos

Adicionalmente a la representación espacial de un rasgo, cada entidad tiene usualmente cierta cantidad de atributos que también son importantes. Estos atributos pueden ser tanto nominales, tales como nombres geológicos, usos del suelo, tipos de cultivos, etc., como escalares, por ejemplo datos batimétricos (profundidades acuáticas) o datos topográficos (elevación de contornos).

Un sistema de base de datos es esencialmente un sistema de guardado computarizado de registros, es decir, un sistema cuyo propósito general es retener datos y hacer que estén disponibles en cualquier momento. La base de datos por sí misma puede ser entendida como una especie de archivero electrónico (Date, 1986).

Las bases de datos dan facilidades para realizar varias operaciones comúnmente requeridas en manipulación de datos de atributos. Estas operaciones incluyen:

1. Adicionar nuevos conjuntos de datos a la base de datos.
2. Insertar nuevos datos en un conjunto ya existente.
3. Recuperar datos de conjuntos ya existentes.
4. Actualizar y/o transformar datos de conjuntos ya existentes.
5. Eliminar datos de conjuntos ya existentes.
6. Borrar conjuntos de datos de la base de datos.

Análisis de Datos, Modelado y Manipulación Cartográfica

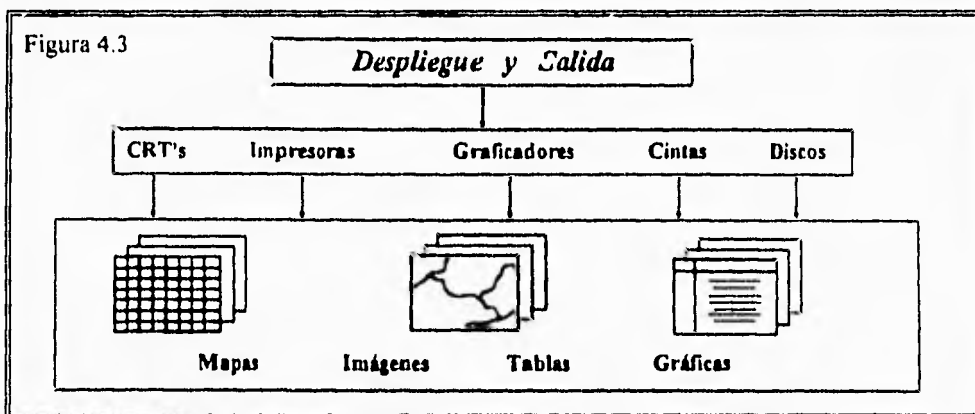
Una de las características más importantes de los SIG es su capacidad para analizar datos y modelar espacialmente. Las capacidades convencionales de análisis y manipulación de los SIG incluyen superposición de mapas, procedimientos de reclasificación, análisis de proximidad y otras técnicas de modelación cartográfica. Un resultado posible e importante es la formulación de escenarios, es decir, la simulación de situaciones hipotéticas como producto de cambios en las condiciones iniciales.

La superposición de mapas arroja uno nuevo donde los valores asignados a cada ubicación del mismo se calculan como una función de valores independientes, asociados con dicha localidad, en dos o más mapas existentes. La determinación de distancias involucran operaciones de medición cartográfica de la distancia, lo cual resulta en un nuevo mapa en el que la distancia y la ruta entre puntos puede expresarse como una simple distancia euclidiana

Estas capacidades se utilizan, ya sea por sí mismas o junto con otros modelos estadísticos o de simulación, los que incluyen evaluación de tierras, agroecología, producción de cultivos, hidrología, degradación del suelo, modelos de erosión, estudios de riesgos y catástrofes, etc. Otra herramienta importante en las capacidades de análisis de los SIG es el procesamiento de imágenes. En síntesis, este subsistema si se puede clasificar de esta manera, permite transformar los datos seleccionados para que se les procese en información útil para la toma de decisiones.

Salida de Datos

El módulo de salida de un SIG ofrece productos que son requeridos normalmente tanto por el usuario como por el analista de datos o la persona responsable en la toma de decisiones. Estos productos representan la información obtenida a partir del análisis, en forma de mapas, gráficas, tablas, fotografías y dispositivos magnéticos que bien pueden desplegarse en la pantalla, o imprimirse según las necesidades. Nótese que la calidad de las imágenes de salida está en función de la calidad de los dispositivos que la realizan. En la Figura 4.3, se muestra esquemáticamente el módulo de salida de un SIG.



IV.3 Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfico

El rango de aplicaciones de los SIG en la planeación de ciudades es amplio, sin embargo, no todos los sistemas son adecuados para estos fines; por tal razón, el desarrollo de un SIG debe comenzar con una revisión comprensiva de los usos que se le quiere dar. Los SIG se catalogan en tres grupos, los cuales se mencionan a continuación con algunos detalles de sus características (ARC News, primavera 1991, Vol. 13, No. 2)

1) Mapeo de Datos

Despliegue de datos. Esto se refiere al uso de mapas temáticos o mapas de ubicación de puntos, para realizar reportes y presentaciones, o para ayudar en el análisis humano de la distribución espacial de fenómenos socioeconómicos.

2) Captura de Datos Anteriores

Almacenamiento y recuperación de información del suelo. Los SIG pueden servir como archivos para datos relativos al uso de suelo, tales como propiedad de terrenos, áreas permisibles para distintos tipos de construcción, información de impuesto, etc.

Manejo de zonas y delegaciones. Un SIG puede usarse para guardar y actualizar mapas de delegaciones o municipios. En este contexto, los SIG que poseen capacidades de topología, permiten responder ordenes de ubicación, propiedades y/o características de delegaciones, municipios, parcelas, etc.

Notificación. Diversas acciones de planeación, urbanización, reglamentación, etc. requieren que los propietarios y residentes dentro de un cierto radio de un lote en particular, sean notificados de algún cambio en la zona. El trabajo de determinar cuáles lotes están dentro de un radio determinado, en cierta zona, generalmente se realiza a mano y toma bastante tiempo. Un SIG puede programarse para determinar los lotes afectados por ciertas restricciones, produciendo un mapa detallado del área y además rotular los sobres de notificación a los propietarios, en el caso de ser necesario.

Administración del crecimiento y de permisos. Los planeadores, urbanistas, etc., utilizan un SIG para obtener información de lotes en construcción y el estatus de sus permisos, y así determinar rápidamente el desarrollo potencial del área y su crecimiento. Esta capacidad es crucial para una administración más efectiva del crecimiento urbano.

3) Modelado Interactivo de Datos

Selección de sitios. Pueden establecerse criterios geográficos para identificar sitios potenciales para un uso en particular.

Impacto Ambiental. Los SIG pueden usarse para identificar impactos en el medio ambiente geográficamente determinados. A manera de ejemplo se mencionan algunos que se relacionan con el deterioro de los suelos (impactos por erosión):

- Spanner, mediante la combinación de imágenes Landsat MSS y MT con un Modelo Digital de Elevación, discriminó diversos tipos de vegetación y uso del suelo que el sólo procesamiento de imágenes fue incapaz de identificar.
- Wheeler y Ridd incluyeron también imágenes de satélite en el banco de datos del SIG con fines de Planeación (riesgos naturales y manejo de recursos).

- Walsh aplicó métodos similares en la elaboración de mapas de hidrología superficial para la identificación de movimiento de contaminantes.
- Millington, desarrolló un SIG para evaluar el riesgo de la erosión en Sierra Leona.

Modelos de Desarrollo contra Factibilidad en el Uso del Suelo. La factibilidad para el desarrollo de ciertos lotes puede analizarse a través de establecer índices de desarrollo. Los atributos clave que se pueden examinar pueden incluir pendientes, tipo de suelo, drenaje, infraestructura disponible, etc. De igual forma, si la investigación realizada fue encaminada a factores que hacen que ciertos lotes sean más atractivos para el desarrollo, un SIG podría producir mapas de factibilidad que pudieran alertar a los planeadores acerca del desarrollo potencial antes de que este ocurra.

Modelado de Redes. Por años, los planeadores del transporte, ingenieros civiles, etc., han construido modelos de redes de transporte para predecir los impactos de cambios propuestos en los sistemas locales, o bien, en los usos de suelo a los que sirven dichos sistemas. Aunque los SIG basados en plataformas PC no pueden todavía soportar las zonas tan grandes y complejas que modelan los paquetes de redes de transporte, existen ciertos progresos.

Determinación de Isolíneas. Los planeadores, ingenieros civiles, ambientales, etc., generalmente necesitan dibujar contornos, de isolíneas o líneas de igual valor alrededor de localidades geográficas determinadas. La orden "muestra los contornos de terrenos cuyo predio es N\$X,XXX como función de su distancia al centro de la ciudad" o "Que población es afectada por la distribución del monóxido de carbono producido por un proceso X, de la fabrica X ubicada en X lugar?", ambas ordenes requieren de un SIG para representar adecuadamente las distancias en el espacio, así como para ligar éstas con una base de datos de atributos.

Rápidamente los SIG se han vuelto una herramienta estándar para el manejo de recursos, y actualmente es difícil pensar en que se realicen estudios en planeación de recursos, mapeo de ciudades o estudios de impactos ambientales sin uno de estos sistemas o sin contemplar su implantación de alguna manera. El uso efectivo de grandes volúmenes de datos espaciales depende de la existencia de un sistema de procesamiento y manejo geográfico eficiente que transforme esos datos en información utilizable, en pocas palabras un SIG.

Es posible agrupar las aplicaciones típicas de los SIG en la siguiente forma:

- a) Cartografía automática
- b) Diseño de subdivisiones
- c) Mapeo catastral
- d) Mapeo de carreteras
- e) Mapeo y administración de instalaciones
- f) Mapeo geodésico
- g) Monitoreo de eventos (accidentes, crímenes, incendios, fuentes puntuales, etc.)
- h) Creación de mapas estadísticos de censos

- i) Planeación y gestión de uso del suelo
- j) Estudios de impacto ambiental
- k) Inventario y administración de recursos naturales
- l) Sistema de información de tierra
- m) Estudios comerciales
- n) Planeación y programación de rutas de transporte
- o) Planeación regional y urbana
- p) Selección de rutas carreteras
- q) Estudios prospectivos de ingeniería
- r) Exploración minera

En síntesis, gracias al procesamiento en un SIG, donde se combinan datos espectrales con otro tipo de información complementaria, se logró una expansión notable del potencial de aplicación de los datos que proporcionan los satélites y los mapas temáticos.

IV.4 Mercado Actual de los Sistemas de Información Geográfica

Existen comercializados distintos SIG para diferentes plataformas de hardware y con diversos costos, casi todos desarrollados en los Estados Unidos. En nuestro país poco se ha hecho para el desarrollo de estos sistemas. Más bien, los esfuerzos se enfocan al proceso de imágenes y no a las bases de datos georreferenciadas.

Existen varios paquetes geográficos en el mercado actualmente, si se hace una comparación de los cuatro principales, en 1989, que son: Atlas Graphics, Land Trak, MapInfo y Arc/Info, se puede ver que los cuatro paquetes están basados en vectores, es decir, que los rasgos de mapeo que tienen, como las líneas y los polígonos, se crean uniendo puntos que representan ubicaciones individuales, que están diseñados para ambientes MS-DOS de computadoras personales compatibles, además todos están bien documentados. Se escogieron estos cuatro paquetes por varias razones: (1) tienen una presencia significativa en el mercado; (2) representan diferentes y útiles elementos de mapeo computarizado y análisis geográfico; y (3) pueden usarse en una amplia variedad de aplicaciones de planeación, estudios de impacto, etc.

Dentro de lo que es la aparición de los SIG en nuestro país, existe la siguiente información: SIGSA, ubicada en la colonia del Valle, D.F., distribuye ARC/INFO, un SIG muy completo que presenta para plataformas PC, SUN y Silicon Graphics, aunque a precios de 1993-4 muy diferentes que van desde \$10,700 USD el paquete completo para PC, hasta \$28,500 USD la versión para estaciones de trabajo. ARC/INFO está desarrollado por la compañía estadounidense *Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI)* ubicada en la ciudad de Nueva York. ARC/INFO está basado en un modelo de datos georrelacional que reúne información geográfica en una serie de "capas" independientes. Esta conceptualización de agrupación de datos hace que ARC/INFO sea compatible con numerosos sistemas de manejo de bases de datos, lo cual crea una poderosa herramienta al poder utilizar otro tipo de software para complementar la información capturada en el SIG. El integrador de imágenes de ARC/INFO permite al usuario desplegar imágenes raster, soportando formatos como GRID, RLC, BIL, TIFF, BIP, etc. (Fuente: folleto publicitario de ARC/INFO).

Existe otro paquete que está desarrollado por ESRI, cuyo nombre es ArcCAD, el cual establece las uniones necesarias para integrar los sistemas líderes de las tecnologías CAD y GIS, AutoCAD y ARC/INFO. ArcCAD es un producto completo e integrado, de filosofía horizontal, que incluye todas las herramientas necesarias para trabajar a la vez con ambas tecnologías. Extiende el modelo de datos de AutoCAD para crear bases de datos topológicas y espaciales de naturaleza relacional, comunicándose de forma directa y transparente con las entidades gráficas de AutoCAD. ArcCAD no es un traductor de datos entre AutoCAD y ARC/INFO, sino un SIG completo capaz de crear datos geográficos directamente en el formato de ARC/INFO. Esto implica una total integración con el resto de productos de ESRI, por ejemplo:

- ArcCAD puede utilizar información creada por ARC/INFO y PC ARC/INFO, que a su vez pueden manejar datos de ArcCAD.
- Al ser una extensión del modelo de datos de AutoCAD, ArcCAD utiliza directamente los ficheros de dibujo de AutoCAD.
- ArcCAD es capaz de manejar la cuantiosa información geográfica disponible bajo el programa ArcDATA.
- ArcVIEW para PC, estación de trabajo o Macintosh, puede ser utilizado para visualizar, analizar y presentar coberturas generadas con ArcCAD.
- ArcCAD puede ser utilizado para acceder a ficheros dBASE, DXF, ASCII, e IGES.

La empresa SECO Computación, en la colonia Nápoles, D.F., es representante de MAP/INFO, un SIG desarrollado por *MAP/INFO Corporation* con oficinas centrales en Troy, New York, y cuyas ventajas son, principalmente, su facilidad de uso por medio de menús, se encuentra muy bien documentado y su bajo costo (únicamente \$750 USD en su versión para PC en el año de 1992, sin embargo no se han desarrollado versiones para estaciones de trabajo); en contraparte, sus desventajas son su limitada capacidad de selección de datos y un pobre nivel de comparación de direcciones simplificadas. Un equipo de trabajo de la Fundación Arturo Rosenblueth en 1994, en esta capital ha desarrollado una interfase para que MAP/INFO, en su condición de SIG, sea compatible con AUTOCAD, en su condición de procesador de imágenes, para que de esa manera, la información almacenada en la base de datos, pueda referenciarse a una imagen satélite, o bien, una fotografía aérea o mapa digitalizado y procesado en ambiente AUTOCAD⁶.

SELPER-México anuncia la aparición para 1993 del SIGEF, un sistema de información geográfica y estadística que cubre la región fronteriza entre México y los Estados Unidos. Desarrollado entre el Colegio de la Frontera Norte (COLEF), el ORSTOM francés y con una participación financiera de CONACYT, tendrá capas de información concernientes al medio físico como la topografía, la climatología, la hidrología, la geología, los usos de suelo, etc., así como información estadística de la economía de la región. Analizará imágenes Landsat TM 1991 y SPOT 1992 de zonas irrigadas

⁶ AUTOCAD fue creado originalmente para diseñar, por lo que sus capacidades de procesamiento de imágenes no son muy amplias, lo que lo pone en desventaja con los diversos paquetes diseñados de origen para ese objetivo.

(Imperial Valley y Mexicali) y urbanas (Tijuana y San Diego). El acceso a esta información se realizará por vía informática (SELPER- México, 1993).

Por último, Jorge Roji y su equipo de colaboradores han liberado ya algunas versiones de la conocida *Gula Roji* para computadoras. Cuenta con prácticamente todas las funciones de un SIG común y corriente con la novedad de que tiene todos los nombres de las calles, de las colonias, los códigos postales, algunos sentidos de circulación de avenidas, estaciones de Metro, etc.

V. MODELO DE EMISIONES VEHICULARES

V.1 Los Sistemas de Transporte en la Ciudad de México

V.1.1 *La Problemática del Sistema de Transporte*

El Sistema de Transporte urbano vincula las distintas actividades económicas a través del traslado de personas y de mercancías, además constituye uno de los elementos más importantes de la estructura urbana y su funcionamiento está condicionado a los procesos de crecimiento demográfico y físico. El transporte urbano se comporta de manera similar al modelo de crecimiento y urbanización desordenado y segregatorio que ha seguido la ciudad de México.

La desmedida concentración de población y sus consecuentes necesidades de desplazamiento entre una zona y otra, la gran expansión física del área urbana y el fomento al uso del automóvil particular son, entre otros, los elementos más importantes del proceso de urbanización que agudizan los problemas tales como:

- Congestionamientos vehiculares y peatonales
- Pérdida de horas-hombre
- Sobrecarga de las vías y vehículos
- Contaminación ambiental
- Irregularidad e incomodidad en el servicio que se presta cotidianamente en esta zona.

La Ciudad de México es la más grande concentración urbana del mundo, con aproximadamente 18.5 millones de habitantes alojados en 1,200 km², es decir, 20% de la población total en sólo 1% del territorio nacional. En los últimos años el crecimiento demográfico ha multiplicado las necesidades de transporte. De 1950 a 1970 la población en el D.F. pasó de 3 a 7 millones, lo cual representó un incremento de viajes de 2 millones de viajes/persona/día (VPD) a 8.5, respectivamente. En la periferia de la ciudad también se registró un crecimiento desmedido. Basta citar como ejemplo a cuatro municipios conurbados del Estado de México: Naucalpan, Tlanepantla, Ecatepec y Nezahualcóyotl. Los tres primeros corresponden a zonas industriales y el último a la zona habitacional más grande de la periferia de la ciudad. Entre 1970 y 1980 la tasa de crecimiento en estos municipios fue una de las más altas del país y rebasó la media nacional, Tlanepantla 9.9%, Ecatepec 18.6% y Nezahualcóyotl

11.9%, mientras en el D.F. no rebasó el 3.5% en el mismo periodo. Gran parte de la población recién asentada en los municipios conurbanos proviene del D.F.⁷, lo cual ha incrementado los traslados entre ambas entidades. Este distanciamiento creciente entre los lugares de habitación y de trabajo fue y sigue siendo uno de los factores que provocó la expansión del servicio de transporte público y colectivo, hacia esas zonas desamente pobladas

Un fenómeno interesante a destacar es que en las zonas centrales de la ciudad, en donde existen decrementos de población, las necesidades de transportación no disminuyeron; por el contrario, aumentaron por los nuevos usos del suelo, comerciales y administrativos. Las cuatro delegaciones centrales del D.F. (Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Benito Juárez y Cuauhtémoc) que redujeron su población de 1950 a 1970 de 69.4% a 30.2%, siguen albergando importantes puntos de atracción de viajes.

De acuerdo a los motivos de viajes, el motivo trabajo es el que predomina con el 62.5% del total; le siguen los escolares con el 26.9%, los de compras con el 5.3% y el resto con otros motivos.

De 1920 a 1960 el área urbana de la ciudad creció más de 6 veces (de 46.3 a 298.4 km²). En 1970, la mancha urbana, por donde circulaba el transporte colectivo, era de aproximadamente 746 km²; en 1987 aumentó a 1,210, y se estima que para el año 2000 tendrá 1,960 km², es decir, la mancha urbana, que demandará transporte, crecerá 750 km² (casi la misma extensión que tenía en 1970). (ver Tabla 5.1)

	1950	1960	1970	1987	2000
Z.M.C.M.	238.75	435.57	746.40	1,208.20	1,9060.00
D.F.	229.88 ^a	312.80 ^b	435.78 ^c	633.82 ^d	884.00
Municipios conurbados	53.86	122.70	310.62	574.38 ^d	1,076.00

a Estudio demográfico del D.F. 1950-1970. El colegio de México, 1975
b Estimación del CECODES con datos de González Taver, E. El AMCM y su región geoeconómica. Universidad de Guanajuato.
c Datos del Programa General del Programa Director para el Desarrollo Urbano del D.F., 1987. DDF., 1987
d Plan Estatal de Desarrollo Urbano del Estado de México, 1986. Gobierno del Estado de México.
Nota: Estimaciones al año 2000 en base a ocupación de nuevas áreas con densidad media de (112 hab-ha= y las reservas con densidad alta (171 hab-ha).

Fuente: CECODES. Delgado Javier. "Proceso de Metropolitización", Impactos Ambientales del Crecimiento Urbano de la Z.M.C.M., 1987.

⁷ Se estima que más de la mitad de los viajes en los municipios conurbados son viajes de conexión con el D.F. (Fuente: *El Transporte en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Arq. José A. Flores Moreno)

La zona norte de la ciudad es la que ha experimentado la mayor expansión física debido, entre otras cosas, a la localización de las zonas industriales instaladas a partir de 1970 precisamente sobre los grandes ejes viales de acceso a la ciudad. Actualmente la nueva industria está localizada principalmente en los municipios de Tlanepantla, Naucalpan y Ecatepec, y la tendencia proseguirá hacia Cuautitlán y Tultitlán.

Las solución al problema del transporte no debe limitarse a atender los aspectos urbanos estrictamente funcionales, sino ubicarse en las causas y formas de desarrollo del proceso de crecimiento y urbanización en la ciudad. Cualquier intento por planificar integralmente el transporte debe contemplar la ordenación territorial de la ciudad.

El transporte, en tanto uno de los principales impulsores de la expansión física y la consolidación de las nuevas zonas urbanas, es un dinámico vehículo de la urbanización; no sólo desde el punto de vista físico, sino también por su repercusión en el crecimiento y concentración de población en las zonas a donde llega. Estas recientes áreas de población, impulsadas por el transporte, generan nuevas necesidades de desplazamiento a áreas aledañas, lo cual va requiriendo a su vez de nuevas obras viales, generándose un proceso continuo de expansión-consolidación-expansión.

En una ciudad tan densamente poblada como la de México, el uso del automóvil particular se ha convertido en un mal necesario e inevitable. Esto se debe básicamente a tres factores que expresan una política de fomento a dicho medio de transporte frente al de tipo colectivo; las deficiencias propias de los distintos modos de transporte público, las cuales se hablarán de ellas más adelante en este capítulo; el impulso a la industria automotriz por las facilidades arancelarias y el ínfimo crecimiento del transporte colectivo comparado con el particular.

En el D.F. el crecimiento vehicular iniciado vertiginosamente desde la década de los cuarenta alcanzó tasas del 10 al 12% entre 1950 y 1980 (ver Tabla 5.2); a partir de este último año y hasta 1986 se produce un decremento en el ritmo de crecimiento vehicular explicado por dos razones: una, las estadísticas del D.F. dejan de registrar los vehículos de los municipios conurbados del Estado de México, los cuales representaban casi la mitad del área urbana y, dos, el constante aumento en el precio tanto de los automóviles y de las partes automotrices. La crisis de esta industria fue particularmente aguda entre 1982 y 1984; a partir de 1985 y 1986 recobra su crecimiento, pero en menor proporción.

Un aspecto importante a destacar de este vertiginoso crecimiento vehicular es la tendencia histórica del aumento de los automóviles particulares respecto al transporte público. Según los datos de la Tabla 5.2 (referentes sólo al D.F.), entre 1970 y 1980 los automóviles crecieron 10.5% y los autobuses 3.9%⁸. Asimismo, entre 1980 y 1986 mientras 160 mil personas demandaron cada año algún tipo de transporte en el D.F. el crecimiento anual de espacios en los automóviles particulares fue de 106 mil⁹.

⁸ En realidad la tasa de crecimiento de autobuses para pasajeros fue menor, pues en los datos de la Tabla 5.2 se incluyen los autobuses para otros fines.

⁹ En el período se consideró un crecimiento anual de 273 mil personas, de las cuales el 59% tenía por lo menos la edad factible de emplear el transporte (15 a 64 años). El crecimiento vehicular se obtuvo de la Tabla 5.2.

Tabla 5.2
Población y vehículos automotores en el Distrito Federal, 1970 - 2000

Año	Población		Vehículos		Automóviles		Autobuses		Otros automotores
	Total (miles)	Tasa	Total (miles)	Tasa	Tasa	asientos en autos (miles)	Total (miles)	Tasa	Total
1950	3,050	5.73	74	4.34	4.47	275	4.28	6.61	15,033
1960	4,871	4.79	248	12.8	13.47	963	6.91	4.90	48,571
1970	6,874	3.50	718	11.20	11.84	2,948	9.89	3.65	118,167
1980	8,831	2.53	1,870	10.04	10.51	8,009	14.49	3.89	253,454
1986	9,749	1.66	1,788	-0.73	-0.73	7,663	14.44	-0.05	241,248
1990	11,170	2.37	2,005	2.90	2.94	8,605	15.54	1.85	268,743
2000	13,319	1.77	2,548	2.42	2.44	10,960	18.29	1.64	337,480

Actualmente se desconoce la cantidad exacta de vehículos que circulan por la Z.M.C.M., aunque se indica con frecuencia una cifra entre 2.5 y 3 millones de automotores, de los cuales 2,476,528 se encuentran registrados en el Distrito Federal de acuerdo con la distribución que se señala en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3
Porcentaje del Tipo de Vehículo Registrado en el D.F., 1992

<i>Tipo de Transporte</i>	<i>Porcentaje</i>
Automóvil particular	85.16
Camión, particular (carga ligera)	7.10
Taxis, combis y minibuses	6.14
Camión urbano (carga pesada)	0.88
Camión materialista	0.07
Autobús de pasajeros	0.35
Otros	0.28

Fuente: DDF. Dirección General de Autotransporte Urbano. *Patron vehicular del programa de placa permanente, 1992.*

Se observa que más del 85% de los vehículos registrados en el D.F. son privados, lo que indica claramente la preponderancia de este tipo de transporte. Además, de acuerdo con la información del programa de placa permanente del D.F., aproximadamente un 45% de los vehículos tiene más de 10 años de uso.

A pesar que el 85% de los vehículos son automóviles particulares, éstos sólo atienden al 16% del total de los viajes, mientras que el colectivo cuenta con sólo el 7% de los vehículos y moviliza el 84% de los viajes restantes. Asimismo, el transporte individual o particular ocupa 10 veces más área vial (4 m²/persona contra 0.4), pero transporta por hora 9 veces menos personas que el colectivo, lo cual ha llevado a saturar la capacidad de diversas vialidades, repercutiendo en muy bajas velocidades de circulación que a su vez contribuyen a incrementar las emisiones contaminantes a la atmósfera.

Para el año 2000 los críticos conflictos que provocará el crecimiento del transporte particular se expresarán en la falta de vialidad y en el agravamiento de la salud de la población. Se requerirá triplicar la actual superficie vial, pues mientras que en 1978 existían 1,700 vehículos por kilómetro cuadrado en el 2000 serán 4,800, ello considerando el mismo patrón de expansión urbana y la tendencia más alta de crecimiento vehicular (ver Tabla 5.4). Por otra parte, se estima para ese año un consumo al día de 29 millones de litros de combustible, con el consecuente deterioro del ambiente en la ciudad.

Con base en criterios de consumo energético y emisiones contaminantes, en la Tabla 5.5, se plantea la estructura del sector transporte en la Z.M.C.M., en términos de su distribución modal. Como puede notarse, un fuerte consumo energético y la baja proporción de la demanda de viaje-persona-día (VPD) satisfecha por los autos privados se asocian con una elevada ineficiencia y emisiones contaminante. Por cada VPD los vehículos privados consumen alrededor de 19 veces más energía que R-100, 9 veces más que el transporte colectivo de ruta fija (peseros), 62 veces más que el metro y 94 veces más que los trolebuses. En cuanto a las emisiones de contaminantes, los autos privados emiten cerca de 2 veces más que los colectivos (sin convertidor catalítico), 31 veces más que los autobuses suburbanos y 68 veces más que la R-100.

Respecto a la distribución horaria de los viajes, en el periodo comprendido entre las 6:30 y las 10:00 de la mañana, así como de las 18:00 a las 22:00 horas, se representa la mayor concentración de viajes, los cuales corresponden a una tercera parte del total. Es en este periodo donde se agudizan los problemas de transportación y de tránsito, que se refleja en congestionamientos viales y en la saturación de los modos de transporte público.

En lo que respecta a la Red Vial, esta puede dividirse en Vialidad Primaria y Vialidad Secundaria. La primera está constituida por cuatro anillos, una serie de vías radiales (vías de acceso controlado) y un sistema de corredores o ejes viales que forman una retícula ortogonal con direcciones Norte-Sur y Oriente-Poniente. Los cuatro anillos son: Anillo de Circunvalación, el Circuito Interior, el Anillo Periférico y la Carretera Transmetropolitana (inconclusa a la fecha), que unirá las poblaciones de Tulyehualco, Chalco, Texcoco, Tepexpan, Lechería, La Venta y Xochimilco.

Tabla 5.4
Total de Vehículos en la Z.M.C.M 1980 - 2000
(miles)

Tendencia 1 según Vehículos			Tendencia 2 según Población					Tendencia 3 según Área Urbana			
Año	Unidades	Tasa	Hab.	Tasa	Unidades	Tasa	hab/veh	Km ²	Unidades	Tasa	veh/km ²
1980	2,000*	11.8	13,890	4.4	2,000*	11.8	6.9	1,009	2,000*	11.8	1.7
1983	2,800*	11.8	15,542	3.8	2,800*	11.8	5.6	1,104	2,800*	11.8	2.0
1986	3,505	7.8	17,378	3.8	3,573	8.5	4.9	1,208	3,597	8.7	2.5
1990	4,473	6.3	19,940	3.5	4,685	7.0	4.3	1,386	4,992	8.5	3.0
2000	6,894	4.4	26,783	3.0	7,656	5.0	3.5	1,955	9,445	6.6	4.8

Fuente: A excepción de las cifras señaladas los datos y estimaciones por CECODES, Delgado, J., "Proceso de Metropolitización, Impactos Ambientales del Crecimiento Urbano de la Z.M.C.M.", 1987

* SPP. Anuario Estadístico del Distrito Federal, 1984

Tabla 5.5
Sector Transporte en la Z.M.C.M.. Consumo energético y carga contaminante por tipo de transporte

Medio de transporte	Viaje persona/día	Consumo energético Kcal*10 ¹⁰ /día	Consumo de energía Kcal/VPD	Emisiones por contaminante Ton/día						Total (ton)
				Pb	PST	SO ₂	NO _x	HC	CO	
Autos privados	4,400,000	8.0	20,000.0	2.0	12.0	9.8	115.0	386.5	3,638.7	4,163.9
Transporte colectivo	10,020,000	2.3	2,186.3	0.4	5.6	4.6	53.6	204.8	1,933.2	2,202.2
Ruta - 100	4,200,000	0.5	1,071.5	---	0.7	14.3	22.0	6.7	17.2	60.8
Autobuses suburbanos	5,500,000	1.0	1,872.7	---	1.7	35.8	50.0	14.5	34.6	136.5
ME-TRO	4,800,000	0.2	319.2	---	0.4	0.2	11.0	1.0	---	12.6
Trolebus y tren ligero	535,000	0.0	212.8	---	---	---	1.0	0.1	---	1.1
Totales	29,450,000	11.9	4,142.9*	2.4	20.3	64.5	252.7	613.5	5,623.7	6,577.1

* Resultados promedios para todo el sistema de transporte

Entre las Vías radiales destacan las siguientes: Río San Joaquín, Parque Vía, Vallejo, Cien Metros, Insurgentes, Norte y Sur, Vía Morelos, F.C. Hidalgo, Peñón-Texcoco (por concluir), Vía Tapo, Ignacio Zaragoza, Ermita Iztapalapa, México-Tulyehualco, Canal de Miramontes, Calz. de Tlalpan, Av. San Jerónimo, Constituyentes, Reforma Pte., etc.

A partir de 1979 se han puesto en funcionamiento los primeros Ejes viales, sistema constituido, dentro del Circuito Interior, por nueve avenidas que corren en sentido norte-sur y seis en sentido oriente-poniente. En noviembre de 1980 se pusieron en operación 97.5 Km más de ejes viales fuera del Circuito Interior, las cuales incluyen las prolongaciones sur y norte de los Ejes 1 Ote. y 3 Ote; prolongación norte de los Ejes Central y 1 Pte.; prolongación sur del Eje 2 Ote. y construcción de los Ejes 5 Ote., 3 Nte. y 5 Nte.

Estas infraestructuras, a pesar de su alta especificación, se vuelven insuficientes durante más de 6 horas al día, ante el uso que se hace de los vehículos particulares; pero también por la carencia de vías principales alternas para llegar al D.F. y el estacionarse sobre las vías públicas (esta acción llega a ocupar el 33% de la misma).

Por otra parte, la vialidad secundaria que se subdivide en calles colectoras, calles locales y calles peatonales, presenta deficiencias tales como que gran parte de las calles presentan bruscas variaciones en las secciones (comprenden secciones angostas), su trazo es irregular y a veces padecen de continuidad, y por lo general existe la falta de estacionamiento (problema que también afecta a la vialidad primaria) o se encuentra invadido por múltiples actividades como son los talleres mecánicos, los pequeños comercios, mercados sobre ruedas, etc, que frenan la fluidez del tránsito, aun cuando las calles están en sentido único.

V.1.2 Problemática del Transporte Público Automotor

Dentro del Sistema de Transporte, el transporte público es el principal medio para trasladar la mano de obra de las zonas de habitación hacia los lugares de producción, comercio, finanzas o de servicios básicos: hospitales, escuelas, centros recreativos, etc.

La función del Estado en el transporte público se deriva de la que cumple dentro de los procesos de urbanización; en términos económicos, cubrir satisfactores de bienestar social cuya producción es poco rentable para los particulares en determinados periodos y circunstancias históricas; en términos políticos, asegurar en lo posible su constante funcionamiento por ser un servicio de vital importancia fundamentalmente para el sector productivo

En la ciudad de México subsisten actualmente dos formas de operar el transporte, las cuales en realidad son formas de intervención del Estado: la prestación directa por medio de empresas públicas y las concesiones a empresas privadas. Sin embargo, la existencia de dos regímenes de propiedad del transporte implica inevitablemente enfrentamientos entre las empresas concesionarias (que buscan la mayor rentabilidad económica) y las estatales, cuya prestación directa del servicio requiere necesariamente de subsidios.

A continuación se muestra la Tabla 5.6, en donde se describen las características de los distintos modos de transporte público:

Tabla 5.6					
	Modos				
	Metro	Tren Ligero	Trolebús	Autobús	Mínibus
Capacidad de Transporte (pasj/hr)	30,000 a 60,000	10,000 a 30,000	3,000 a 10,000	1,000 a 10,000	1,000 a 4,000
Velocidad (K/hr)	40	22	15	15	18
Vida útil (año)	30	20	20	6	5
Tiempo de entrada en operación (meses)	30	28	12	6	1
Inversión por K (millones de \$ de 1988)	90,000	18,000	9,000	4,000	No evaluada
Costo de operación por pasajero (pesos de 1988)	280	No evaluada	340	450	No evaluada
Consumo de energía kcal/viaje/persona	319.2	212.8	212.8	1,071.5	2,186.3

Fuente: Departamento del D.F., Gobierno del estado de México, *Programa Integral de Transporte*, 1989

■ *Sistema de transporte colectivo (METRO):*

Desde el año de 1967, fecha en la que fue inaugurado, el servicio del METRO se convirtió en la columna vertebral del transporte en la capital del país. Actualmente a través de sus 9 líneas y más de 140 K de red transporta un promedio diario de 4,800,000 VPD, considerando los transbordos

La capacidad de transportación del metro es la mayor en comparación con las del resto de los medios de transporte público. Es también el más rápido: dos veces más que el tren ligero y el mínibus, y más de dos y media veces que el trolebús y el autobús. Su vida útil es la más larga y es el más barato en costos de operación: 20% y 60% menos que el trolebús y el autobús, respectivamente. Su carga contaminante (en términos de UTE/VPD) es equivalente a la mitad de la de los autobuses urbanos y su consumo de energía por VPD sólo es menor para el tren ligero y el trolebús. Sin embargo, la elección del METRO como la mejor alternativa de transporte masivo no es tan obvia como parece, ya que sus costos de inversión por kilómetro son muy elevados en relación con los otros medios de transporte, lo que implica enormes costos de capital y dificultades crecientes para la obtención de financiamientos y la continuidad de las obras.

■ *Transporte eléctrico de superficie (trolebús y tren ligero)*

Los tranvías, que comenzaron a operar desde principios de siglo, fueron prácticamente retirados de la circulación en el año de 1979, al iniciarse la construcción de los ejes viales. En cambio, los trolebuses, pudieron ser adaptados a la nueva infraestructura urbana; debido a sus mayores posibilidades de maniobra. Actualmente opera una red de 21 líneas de trolebús, con una longitud aproximada de 450 K cubierta por 300 unidades. Por otra parte, en sustitución de los tranvías se implantó el tren ligero, el cual cuenta con 11.6 K de longitud y 10 trenes en operación. Estos son los mejores medios en cuanto a eficiencia energética y carga contaminante; sin embargo, en conjunto, actualmente sólo absorben 1.8% de la demanda total de transporte de la ciudad.

■ *Autotransporte urbano y suburbano*

En el año de 1983, dos años después de la municipalización del servicio de transporte urbano, la R-100 tenía 5,200 unidades con servicio en 83 rutas directas y 130 alimentadoras. Sin embargo, ante problemas presupuestales y sindicales se abatió la calidad del servicio, principalmente por la falta de un mantenimiento preventivo y correctivo adecuado; lo anterior determinó que da aproximadamente 7,000 unidades, en 1988 circularan poco más de 3,000, muchas de ellas en malas condiciones. Ello originó que a los autobuses de R-100 se les considerara como un símbolo de la contaminación. En 1990, el gobierno capitalino reestructuró a la empresa a fin de mejorar la imagen y el servicio que se ofrece a la comunidad, incorporando unidades nuevas con motores más eficientes y menos contaminantes.

Por su parte, desde 1982 el gobierno del Estado de México ha participado directamente en la prestación del servicio a través de la empresa paraestatal, *Sistema de Transporte Troncal (STT)*, con el fin de mejorar y regular al transporte suburbano que circula por los municipios conurbados. Actualmente por diversos problemas únicamente dan servicio 300 autobuses de ese sistema. El resto de los autobuses suburbanos, conocidos como *chimecos*, pertenecen al sector privado y cuentan con un parque vehicular de alrededor de 7,000 unidades, de los que circulan en promedio 4,700. La mayoría de estas unidades se encuentran en condiciones mecánicas deficientes por lo que sus emisiones contaminantes son las más ostentosas a diferencia de R-100 y STT, prácticamente no existe ningún tipo de control sobre ellos. Se estima que un 90% de esta flota vehicular usa diesel como combustible, lo cual agrava los riesgos ambientales generados por su deficiente operación, es decir de los contaminantes resultantes de la combustión incompleta del diesel.

Hasta su reciente desplazamiento por los vehículos colectivos de ruta fija o libre, los autobuses fueron el medio de transporte público más importante en la Z.M.C.M., en la actualidad cubren 33% de la demanda. El consumo de energía por VPD es aproximadamente dos tercios del correspondiente a los colectivos, en tanto que su carga contaminante es equivalente a la mitad de la de éstos. De acuerdo con la inversión y al tiempo de entrada en operación, los autobuses son también un medio bastante accesible.

■ *Transporte colectivo de ruta fija y libre*

Hoy día operan en el D.F. y su zona conurbada aproximadamente 155 mil vehículos entre taxis de ruta libre o de sitio y colectivos de ruta fija (peseros). El servicio de pesero se autorizó desde el año de 1950, con la finalidad de complementar a los autobuses. De entonces a la fecha, este sistema de transporte público ha proliferado, cubriendo actualmente el 34% de la demanda total de la ciudad. A partir de diciembre de 1986, el gobierno capitalino ha autorizado el servicio de minibuses, existiendo una tendencia hacia la sustitución de peseros por este tipo de vehículos de mayor capacidad. Los colectivos tienen la ventaja de su flexibilidad y manejabilidad, pero en comparación con el resto de los medios de transporte público son los menos eficientes en cuanto al consumo de energético y carga contaminante por VPD.

Como conclusión, todos los factores antes mencionados revelan hoy un problema altamente complejo para mantener el funcionamiento del transporte urbano, si tomamos en cuenta que se trata de una ciudad en constante expansión física y con altas tasas demográficas; pero fundamentalmente por la coexistencia de varios modos de transporte que responden a dos tipos de propiedad y que plantean fuertes limitaciones para lograr una coordinación más eficaz y un mejor servicio. En otras palabras, los problemas fundamentales se refieren a la falta de integración entre los diferentes modos de transporte de ambas entidades (D.F. y Edo. Mex.), tanto desde el punto de vista operativo como tarifario; y además que no existe un criterio uniforme en cuanto a leyes y reglamentos en materia de tránsito y transporte.

El transporte público de superficie, estructurado en la vialidad existente, sufre los problemas de tener que utilizar una red vial que ha sido planeada más bien para el uso del transporte privado que del público, por lo que la congestión en el sistema vial afecta al transporte público de diversas maneras: la baja velocidad de operación aumenta el tiempo de desplazamiento; los costos de operación también aumentan ya que se consume más combustible, más horas-hombre y existe mayor desgaste del vehículo para cubrir la misma distancia, la confiabilidad y seguridad del servicio disminuye considerablemente.

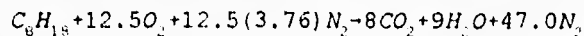
Hacer frente a un problema tan crítico y complicado como lo es el transporte masivo de la ciudad ha tenido impactos negativos en el ambiente. Durante décadas, el transporte automotor ha operado a base de una tecnología altamente contaminante; este hecho convirtió la relación transporte contaminación en una cuestión prácticamente indisoluble. Las tendencias de crecimiento demográfico, las necesidades de traslado e inversiones públicas indican que la utilización del transporte público automotor no disminuirá notablemente, a pesar de emplear nuevas formas alternativas basadas en la energía eléctrica, como el METRO, el trolebús y el tren ligero, lo cual nos lleva a pesar seriamente en la utilización de sistemas computacionales para conocer, examinar y responder a estos problemas de una forma activa

V.2 Emisiones Vehiculares

Según datos oficiales, el 80% de la contaminación atmosférica en la ciudad de México es producida por los vehículos automotores, por lo que es importante explicar porqué los coches contaminan y qué tenemos que hacer para evitarlo.

V.2.1 Principales Contaminantes Atmosféricos generados por los vehículos

La combustión idealizada de gasolina que se lleva a cabo dentro del cilindro de un motor de combustión interna, se representa mediante la siguiente reacción:¹⁰



Si esta reacción llega a ocurrir, se le considera como un proceso de combustión estequiométrica, lo cual se refiere a que todos los átomos de oxígeno en el oxidante reaccionan químicamente para aparecer en el producto.

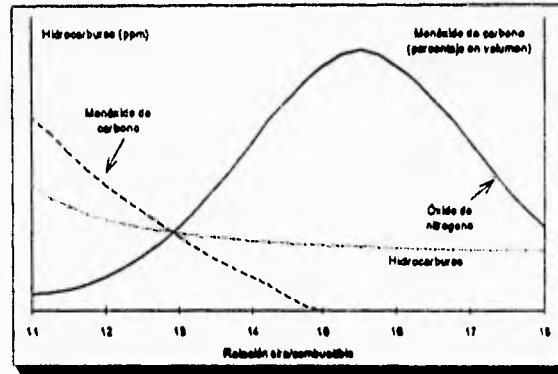
Para que esta reacción ocurra, la relación aire-combustible (A/C) debe ser óptima, es decir de 14 a 15 gramos de aire por gramo de gasolina o 59.5 moles aire por mol de combustible. A manera de ejemplo, la Gráfica 5.1 muestra las concentraciones de NO_x, HC y CO en el escape de un automóvil, en función de la relación A/C que a su vez resulta de la carburación del motor. Es de observarse que existe un equilibrio dinámico entre los compuestos citados por lo que cualquier modificación en la relación A/C influye sobre todos los componentes. Por ejemplo, hasta una relación A/C de 16, la concentración de NO_x tiende a incrementarse mientras que las concentraciones de CO y de HC disminuyen.

Debido a que la reacción no alcanza el estado de equilibrio por que las condiciones de temperatura, presión y tiempo de reacción no son adecuados, la combustión por lo general es incompleta y los vehículos producen los siguientes contaminantes

- Hidrocarburos no quemados. Es decir vapores de gasolina o gasolina no quemada, que al combinarse con otros compuestos en el aire y al recibir la luz solar producen el neblumo o smog.
- Monóxido de carbono (CO). Producto de la combustión, cuya emisión aumenta considerablemente cuando la combustión es inadecuada, generalmente debido a la falta de oxígeno suficiente.

¹⁰ El aire puede ser considerado como una mezcla de 1 mol de O₂ a 3.76 mols de N₂.

Gráfica 5.1

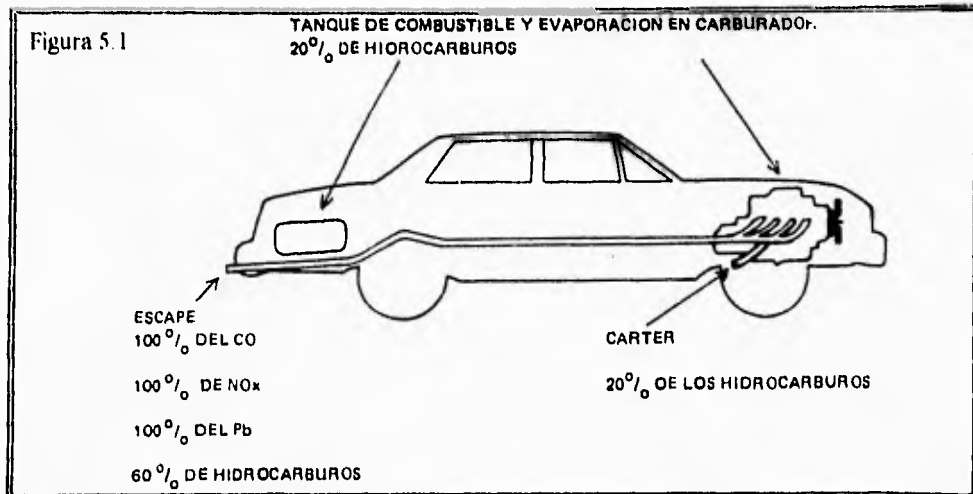


- Óxidos de nitrógeno (NO_x). Producidos en la cámara de combustión cuando se combina el nitrógeno del aire con el oxígeno a temperaturas mayores de 1400°C .
- Plomo (Pb), en el caso de que el combustible lo contenga.
- Óxidos de azufre (SO_x), en el caso de que el combustible lo contenga por ejemplo el diesel.

5.2.2 Origen de los Contaminantes

El motor de su automóvil es una máquina de combustión interna. Si la combustión se realiza correctamente, el auto funcionará mejor, el consumo de combustible será adecuado y el automóvil emitirá menos contaminantes.

Los principales orígenes de los contaminantes emitidos por un vehículo se muestran en la Figura 5.1 y son:



1.- El sistema de alimentación del combustible

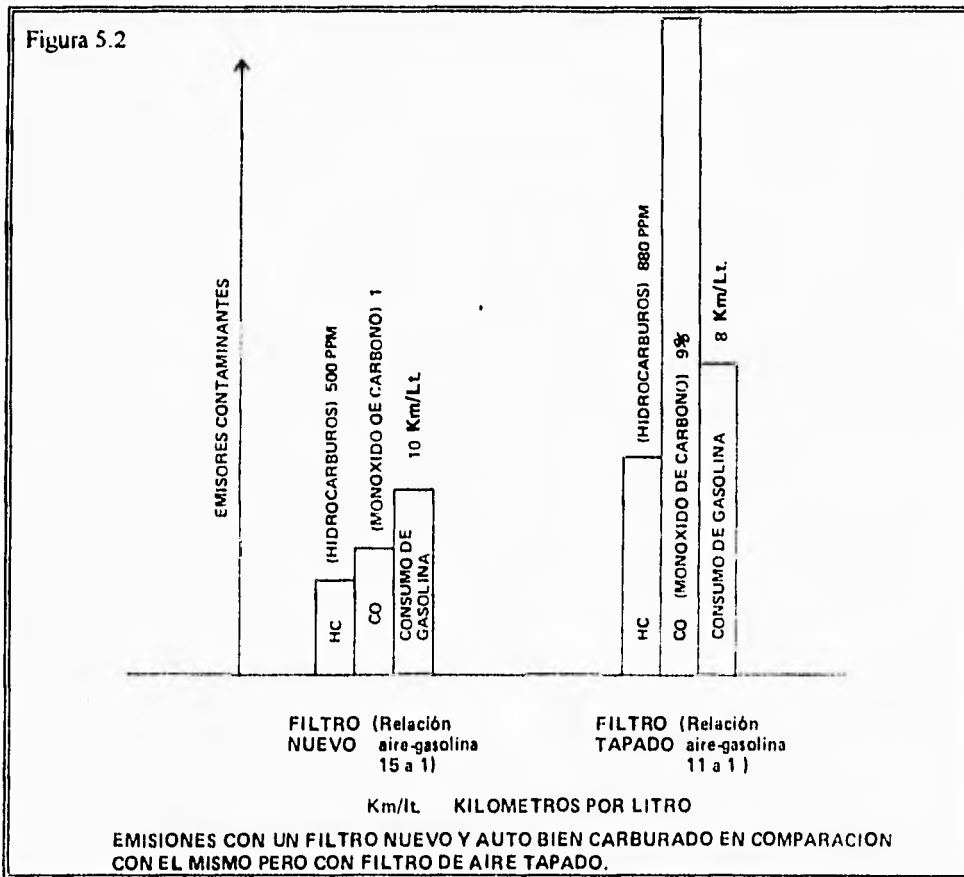
Esto se refiere al tanque de gasolina, las mangueras y el carburador, que generan el 20% de los hidrocarburos no quemados, en vehículos sin equipo de control.

Algunos problemas típicos que generan emisiones al ambiente son:

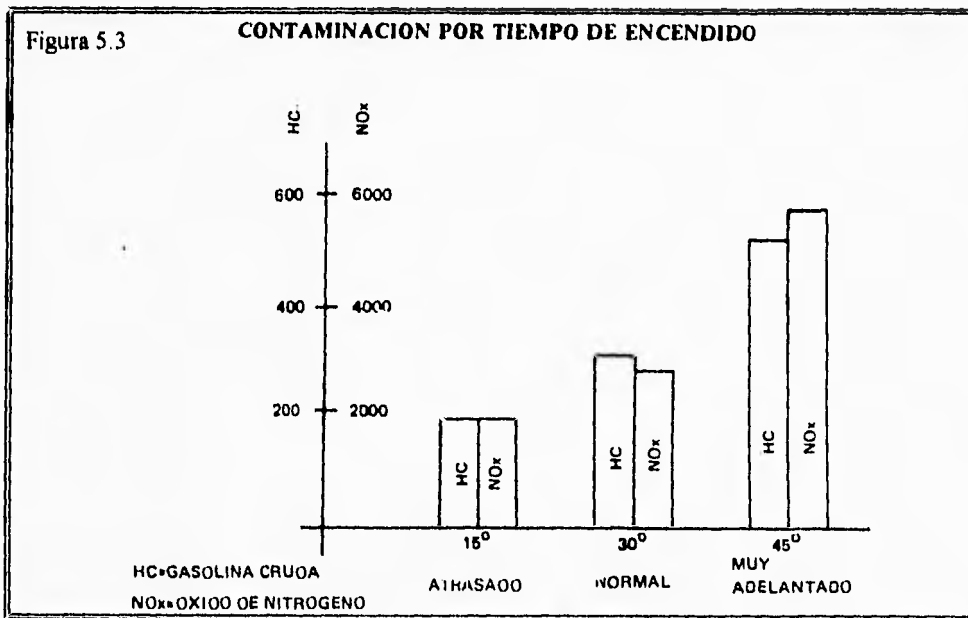
- Cuando el tanque de gasolina y las mangueras de suministro no están bien sellados, producen evaporaciones de hidrocarburos no quemados que pasan directamente a la atmósfera. Un auto sin tapón, detenido, pierde 1/8 de litro de gasolina al día, por evaporación, pero si está en funcionamiento, puede perder hasta un litro
- Cuando se llena por completo el tanque de gasolina, pueden perderse, por derrames hasta 5 litros de gasolina que contaminan directamente la atmósfera.
- Cuando los automóviles no cuentan o se encuentra en mal estado su sistema de control de evaporaciones del tanque de gasolina o del carburador, lo cual genera hasta un 20% de las emisiones de hidrocarburos no quemados por evaporación.
- Cuando los sistemas de precalentamiento de aire, los cuales controlan la admisión de aire caliente hacia el filtro de aire y permiten un ahorro de gasolina de un 15 o 20%, no están en buen estado, producen un aumento en la contaminación durante los primeros 10 minutos de funcionamiento del motor, debido a que este se encuentra frío y no existe una adecuada atomización del combustible. Si el motor está caliente se mejora la atomización y al saltar la

chispa dentro del cilindro, la mezcla se quema bien y no contamina. Por ejemplo, cuando la temperatura del aire ambiente es de 20°C y el motor está frío (porque ha estado parado durante 8 horas o más), el consumo de combustible es del doble de lo normal. y cuando la temperatura es de 5 a 10°C (como en el invierno), el consumo de combustible es del triple

- Cuando el filtro de aire está obstruido, la proporción de aire-gasolina provoca que el carburador reciba más gasolina que la que pueda quemar, dando como resultado un aumento notorio en las emisiones de contaminantes y un aumento del 5 al 10% en el consumo de gasolina (ver Figura 5.2).



- Cuando el sistema de encendido, ya sea de platino o electrónico, no funciona debidamente, es decir que no suministra una chispa potente que dure alrededor de uno y medio milisegundos, no se logra que el volumen de mezcla prendido sea mayor y que la combustión sea completa, generando así emisiones a la atmósfera. En el sistema de platino hay que tomar en cuenta el tiempo de encendido, ya que un encendido demasiado adelantado (platinos muy abiertos), provoca un mayor consumo de combustible, desgaste de motor y mayores emisiones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados (ver Figura 5.3).

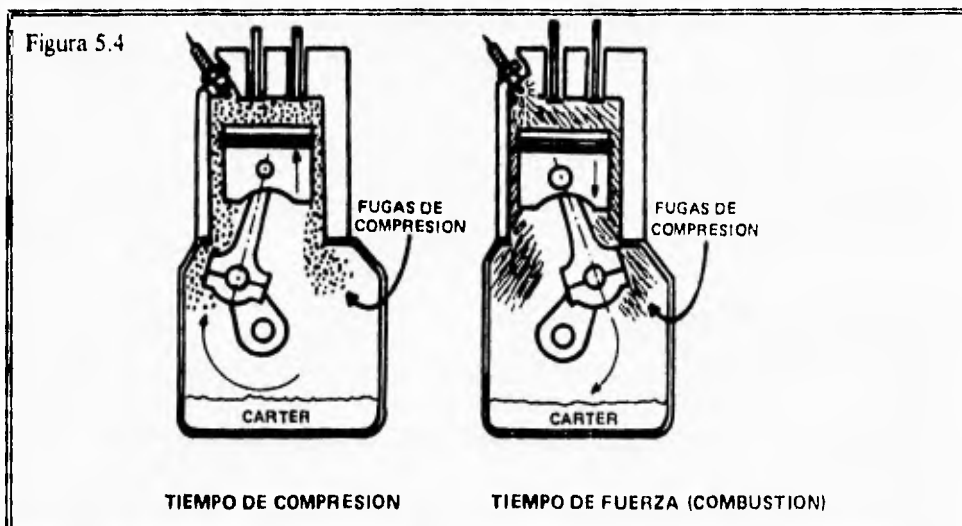


- Cuando el carburador no funciona correctamente, es decir cuando se enriquece la mezcla aire-combustible (hay menos aire para la combustión y más combustible), se aumentan las emisiones de hidrocarburos y de monóxido de carbono; y cuando la mezcla se empobrece (hay más oxígeno disponible para la combustión), el combustible se quema completamente y disminuyen las emisiones de hidrocarburo y monóxidos de carbono. En este último caso hay que tomar en cuenta que la mezcla no sea demasiado pobre (el combustible estará tan diluido que la mezcla no encenderá), ya que hará fallar el encendido y las emisiones de gasolina no quemadas aumentarán.

2.- El cárter, que es el recipiente que almacena el aceite del motor, emite también un 20% de los hidrocarburos no quemados en vehículos sin equipo de control.

Las emisiones de hidrocarburos no quemados del cárter se producen por fugas de compresión alrededor de los pistones, lo que aumenta cuando el auto ya ha recorrido unos 70 o 90 mil kilómetros. En la figura 5.4, se muestran los lugares donde se generan los gases de "paso de compresión"

Este tipo de fugas aumenta mucho cuando el motor deja escapar compresión en exceso, porque tiene los anillos rotos o excesivamente desgastados. Para evitar que pasen a la atmósfera los gases del cárter, éste debe ventilarse hacia el múltiple de admisión o hacia el filtro de aire, para que los gases se quemen nuevamente de regreso al motor.



3.- El escape da salida a óxidos de nitrógeno, a partículas de monóxido de carbono en cantidades considerables y al 60% de las emisiones de hidrocarburos no quemados.

A continuación, en la Tabla 5.7 se muestra la composición típica del gas de escape.

Modo de operación	Hidrocarburo no quemados* ppm	Monóxido de Carbono % vol.	Óxidos de Nitrógeno ppm	Hidrógeno % vol.	Bisóxido de Carbono % vol.	Agua % vol.
Ideal	750	5.2	30	1.7	9.5	13.0
Crucero	300	0.8	1500	0.2	12.5	13.1
Acelerado	400	5.2	3000	1.2	10.2	13.2
Desacelerado	4000	1.2	60	1.7	9.5	13.0

* Estos resultados fueron tomados por un detector ionizador de flama, y representan un 80% de más

Fuente: Starkman, 1971

Es de notarse que los tres modos propuestos (crucero, acelerado y desacelerado) tiene ventajas y desventajas con respecto a su emisiones, es decir que en algunos contaminantes están por debajo del modo ideal y en otras lo rebazan; sin embargo el modo desacelerado es el más conveniente, en cuestión a emisiones.

En particular, para la estimación de las emisiones de monóxido de carbono (CO) no se consideran los dos últimos tipos de emisión; por lo tanto, el modelo que se expone en este capítulo sólo considera las emisiones provenientes del escape de los vehículos.

V.3 Condiciones del Tráfico Vehicular

Las Condiciones del tráfico vehicular, se refiere a la distribución del volumen vehicular en el tiempo y en el espacio, y a su composición en tipos de vehículos. Estas distribuciones son determinantes del modo en que se utilizan las instalaciones viales, para acomodar satisfactoriamente la demanda de tráfico.

Dado que el volumen vehicular no presenta una distribución uniforme a lo largo del día, normalmente las distintas vías se proyectan para que puedan hacer frente a las demandas punta que tienen lugar en periodos breves como 15 min. o un hora. De forma análoga, el tráfico de una vía tampoco se distribuye por igual ni entre los carriles disponibles ni entre los dos sentidos de circulación posibles.

A continuación se mencionan algunas características importantes para el presente trabajo:

Variación en el Tiempo

La demanda de tráfico varía según el mes del año, día de la semana, hora del día e incluso en intervalos subhorarios de una misma hora. Estas variaciones son importantes si se pretende que las carreteras soporten eficazmente las demandas punta o demandas máximas, sin que se produzcan su

colapso. Las vías adecuadas para acomodar la demanda de la hora punta son susceptibles de colapsarse si las intensidades de circulación dentro de dicha hora punta superan su capacidad.

En los apartados siguientes se exponen las variaciones de la demanda de tráfico en el tiempo:

- **Variación Estacional y Mensual** - Representa la fluctuación estacional de la demanda de tráfico de una vía. Está a su vez, refleja la actividad social y económica de la zona servida por dicha vía.
- **Variaciones Diarias** - Representa las fluctuaciones diarias del volumen a lo largo de la semana. Estas se relacionan con el tipo de vía en el cual se aforó.
- **Variaciones Horarias** - Representa las fluctuaciones del volumen horario en función del carácter de la vía y del día de la semana. En estas es evidente las horas puntas típicas, matinal y vespertina, en días laborales.
- **Variaciones Subhorarias del Flujo** - Representan las fluctuaciones del volumen expresadas en unidades subhorarias, por lo general en 15 minutos. Son útiles en el análisis del nivel de servicio, ya que se basa en las intensidades punta que se producen dentro de la hora punta. La consideración de estas puntas es de la mayor importancia, pues aunque la congestión debida a una capacidad inadecuada se produzca sólo durante escasos minutos, puede precisarse un tiempo considerable en su disipación debido a la dinámica del flujo colapsado.

La Hora Punta u Hora de Máxima Demanda (HMD)

Tanto los análisis de capacidad como otros estudios de tráfico hacen hincapié en la HMD del volumen de tráfico, debido a que es el periodo más crítico para la circulación y el que presenta las mayores demandas de capacidad. No obstante, el volumen de la HMD no es un valor constante día a día ni estación a estación, por lo que los ingenieros de transporte se enfrentan con la necesidad de tomar una decisión importante en el diseño de las vías.

Composición del Tráfico

La distribución de los vehículos entre los distintos tipos (la composición) es la característica del tráfico que más influencia tiene sobre la capacidad y los niveles de servicio. Los vehículos pesados, definidos como aquellos que tienen más de cuatro ruedas en contacto con el pavimento, afectan adversamente a la circulación de dos formas críticas:

- a. Son más grandes que los vehículos ligeros y, por lo tanto, ocupan un mayor espacio de la calzada.
- b. Tienen peores posibilidades de maniobrar que los vehículos ligeros, especialmente en lo relativo a la aceleración, la deceleración y la posibilidad de mantener la velocidad en las rampas.

En general se clasifican los vehículos pesados en las tres categorías siguientes:

- **Camiones** - Un camión se define como un vehículo pesado utilizado básicamente para el transporte de mercancías o para la realización de un servicio (que no sea el servicio de transporte público).
- **Vehículos de recreo** - Se define como vehículo de recreo (VR) a todo vehículo pesado llevado por un conductor privado, cuya misión es el transporte de equipo o instalaciones de recreo.
- **Autobuses** - Un autobús es un vehículo pesado que transporta a grupos de personas, bajo un régimen de alquiler de servicio de transporte colectivo, o en franquicia mercantil. A otro nivel inferior los servicios de autobús se clasifican en interurbanos o locales. Los interurbanos (o "de paso") se mueven en la corriente de tráfico sin realizar paradas para recoger o dejar pasajeros en la vía por la que circulan. Los autobuses de transporte colectivo local realizan este tipo de paradas dentro del entorno de la vía.

Actualmente el mercado está dominado por vehículos más ligeros con motores menos potentes. Estas características ponen de manifiesto un problema creciente para los ingenieros de tránsito, debido a que los coches cada vez son más pequeños y ligeros y menos potentes, y los camiones, por el contrario, más grandes y potentes; es más cada vez es mayor la proporción de camiones en la corriente circulatoria.

Distribuciones Espaciales

El volumen de tráfico varía simultáneamente en el tiempo y en el espacio. Las dos características espaciales de mayor interés para el análisis de capacidad son el reparto por sentidos y la distribución por carril.

Reparto por Sentidos

En cualquier hora concreta, el flujo de circulación puede ser mayor en un sentido que en el otro. Tanto la capacidad como el nivel de servicio varían de forma significativa de acuerdo con la distribución por sentidos, debido a la interacción entre los flujos de cada sentido en dichas vías. Asimismo, debe hacerse notar que el reparto por sentidos no es una característica constante en el tiempo y que varía con la hora del día, día de la semana, estación y de año en año. Además existen otros factores como el desarrollo urbano que se crea en las proximidades de las carreteras, que generalmente inducen un crecimiento del tráfico, el cual modifica la distribución por sentidos existente.

Distribución por Carriles

La distribución por carriles depende de la regulación del tráfico, de su composición, de la velocidad y el volumen, del número y localización de los puntos de acceso, del modelo origen-destino de los conductores, del grado de desarrollo urbano del entorno y de los hábitos de los conductores locales. Por todos estos factores no cabe hablar de distribuciones por carril "típicas", aunque hay que

hacer notar que la mayoría de los vehículos pesados tienden a circular por los carriles de la derecha, en parte porque su velocidad de operación es inferior a la del resto de los vehículos, y por otra por la regulación existente que les prohíbe la utilización de los carriles de alta velocidad, situados más a la izquierda.

La distribución por carriles es un factor crítico en el análisis de intersecciones ramal-autopista, toda vez que el tráfico que circula por el carril derecho es el volumen que converge o diverge con los vehículos del ramal.

V.3.1 Condiciones Específicas de la Ciudad de México

En lo que respecta a la Ciudad de México, la cual presenta características especiales que influyen en la producción de emisiones de CO, es conveniente mencionar los siguientes factores que determinan un comportamiento específico:

I) Factores en función del tiempo en el cual el vehículo está en circulación y de las distintas formas de operación (acelerado, desacelerado, crucero y en marcha)

a) Los hábitos del conductor: por ejemplo, el conductor de un colectivo que se detiene y detiene el tráfico cada vez que sube o baja un pasajero.

b) El tipo de vía en que se encuentra dicho vehículo: Dentro de la clasificación por número de carriles de la red vial se encuentran las vías amplias, las cuales tienen 2 o 3 carriles por sentido, las vías sencillas de doble circulación y las vías reducidas de un solo carril.

c) La cantidad de tráfico en dichas vías, provocando no únicamente mayor contaminación por la mayor densidad del tráfico, sino también que los vehículos contaminen por más tiempo.

II) Factores en función del vehículo:

a) El estado en que se encuentra dicho vehículo: Existe una cantidad considerable de vehículos que carecen de mantenimiento apropiado, provocando así un mayor grado de contaminación.

b) El año y el modelo del vehículo: La vida media de un vehículo que circula en la Ciudad de México es de más de 10 años, cuando en otros países por, ejemplo, es de menos de 5 años. Esto influye notablemente en los factores de emisión que se utilicen y en la cantidad de contaminación que produce un vehículo circulando en la ciudad de México.

c) El tipo de combustible que utiliza el vehículo: En la actualidad los combustibles utilizados son; la gasolina nova, la gasolina magna sin, el diesel, el diesel sin y el gas lp. Para cada uno de estos combustibles existe un factor de emisión correspondiente.

d) Si el vehículo tiene o no convertidor catalítico: Los únicos vehículos que por ley deben tener convertidor catalítico son los de modelo 1991 en adelante, este convertidor provoca que las emisiones se reduzcan considerablemente.

III) Factores de distribución del tránsito urbano:

a) Zonas Industriales: En estas zonas a comparación de otras, el tránsito vehicular se compone de una gran cantidad de vehículos pesados, los cuales presentan un índice de contaminación mayor que los vehículos ligeros.

b) Zonas Residenciales: Al contrario de las zonas industriales, estas se componen principalmente de vehículos ligeros y de modelos recientes, produciéndose en estas, emisiones más bajas.

c) Centros históricos: Para la conservación de estos centros, se restringe el acceso vehicular, provocando una alteración en el tránsito vehicular, dichas alteraciones también se conocen como alteraciones viales, que pueden ser obstrucciones o desvíos del tránsito vehicular.

d) Eventos especiales: Se refieren principalmente a las marchas, desfiles, plantones y accidentes viales. En general todo evento especial provoca una alteración vial.

e) Obras públicas: Entre las más comunes se encuentran el bacheo, la repavimentación, mantenimiento del sistema de alcantarillado, mantenimiento de señalización vial, además de algunas obras eventuales como construcción del metro, construcción de puentes a desnivel y ampliaciones viales. Al igual que los eventos especiales todas las obras públicas provocan alteraciones viales.

Adicionalmente a los factores previamente mencionados es importante mencionar el efecto de la altura sobre el nivel del mar de la Ciudad de México, la cual propicia una combustión incompleta de los combustibles y provoca un incremento significativo de las emisiones de CO e hidrocarburos con respecto a las cantidades que se producen al nivel del mar.

El Modelo de Emisiones Vehiculares que se presenta en este capítulo, permite incorporar la mayor parte de los factores anteriormente mencionados, siempre y cuando dicho modelo se alimente con la información requerida

V.4 Características Generales del Modelo de Emisiones Vehiculares

El modelo permite generar emisiones vehiculares con una resolución espacial de 1 kilómetro cuadrado a intervalos de 1 hora, tomando en consideraciones el tipo de vialidades existentes en la Ciudad de México, los volúmenes vehiculares a diferentes horas del día, las distancias que estos recorren, la composición vehicular, la velocidad promedio de los vehículos y los factores de emisión característicos de los vehículos que circulan en la zona.

Entre los factores que más influyen en la producción de CO, desataca el tipo de vía en la que se va a llevar a cabo la evaluación de emisiones, es decir, sobre las vías primarias o las vías secundarias. Con objeto de simplificar la operación del modelo, principalmente en lo que se refiere al proceso de alimentación de la información, se decidió dividir el modelo de emisiones vehiculares en dos módulos, los cuales contempla únicamente las emisiones generadas en la vialidad primaria y secundaria, respectivamente. La metodología y los factores que interviene en el cálculo de dichas emisiones en ambas vialidades, se expresan en las secciones V.4.1 y V.4.2.

El cálculo de las emisiones vehiculares se llevó a cabo en una malla anidada de 39 x 45 Km, es decir 1,620 celdas de 1 km², la cual está contenida entre las coordenadas UTM 471,000 y 510,000 en x y 2,130,000 y 2,175,000 en y, respectivamente. Esta región se encuentra dentro de la Z.M.C.M. e incluye la Sierra de Guadalupe en el Norte, la Sierra de Santa Catarina en el Este y la Sierra de las Cruces y el volcán del Ajusco en el Suroeste, como se puede apreciar en la Figura 5.7.

Es importante señalar que para efectuar dicho cálculo, se requiere proporcionar los siguientes datos:

- El volumen vehicular a cada hora del día.
- La composición vehicular, de dicho volumen.
- El número de segmentos de vía que hay dentro de una celda específica.
- La distancia recorrida, asociada a cada segmento de vía.
- El factor de emisión correspondiente a cada tipo vehicular y a las velocidades promedio de las distintas vías.

La obtención de los datos correspondientes al volumen vehicular y a la composición vehicular, es relativamente fácil ya que provienen de la información proporcionada por las estaciones de aforo, sin embargo debido a que existe un número limitado de estaciones de aforo, esparcidas por toda la ciudad de México (ver Figura 5.8), fue necesario utilizar el SIG para localizar geográficamente cada estación de aforo y su áreas de influencia.

Este procedimiento se llevo a cabo digitalizando un mapa del estudio para la localización de estaciones aforadoras en el Distrito Federal, proporcionado por la Coordinación General de Transporte del Departamento del Distrito Federal, posteriormente mediante un procedimiento de interpolación e extrapolación de la localización de dichas estaciones, se establecieron las áreas de influencia, logrando así que la información proporcionada por dichas estaciones, comprendiera la totalidad de la región.

Figura 5.7

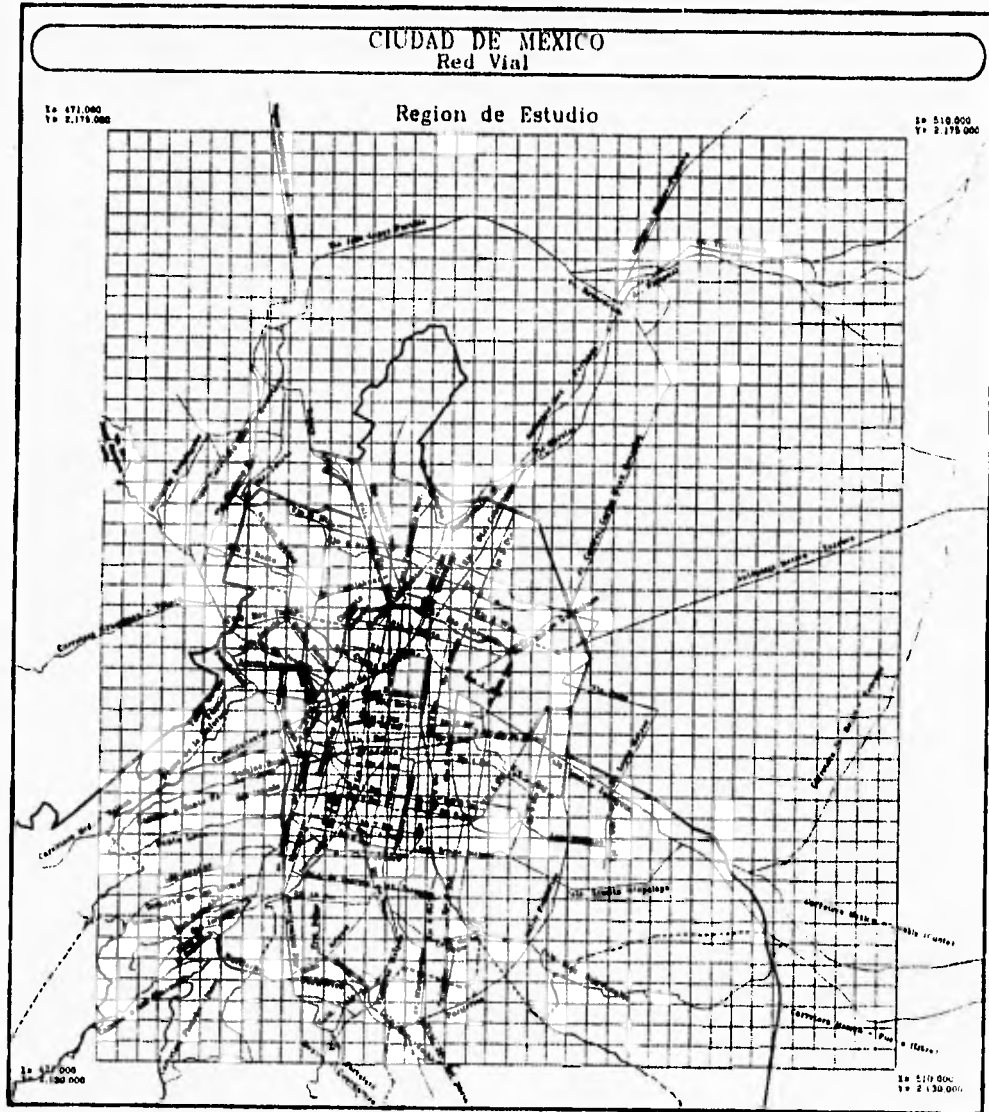
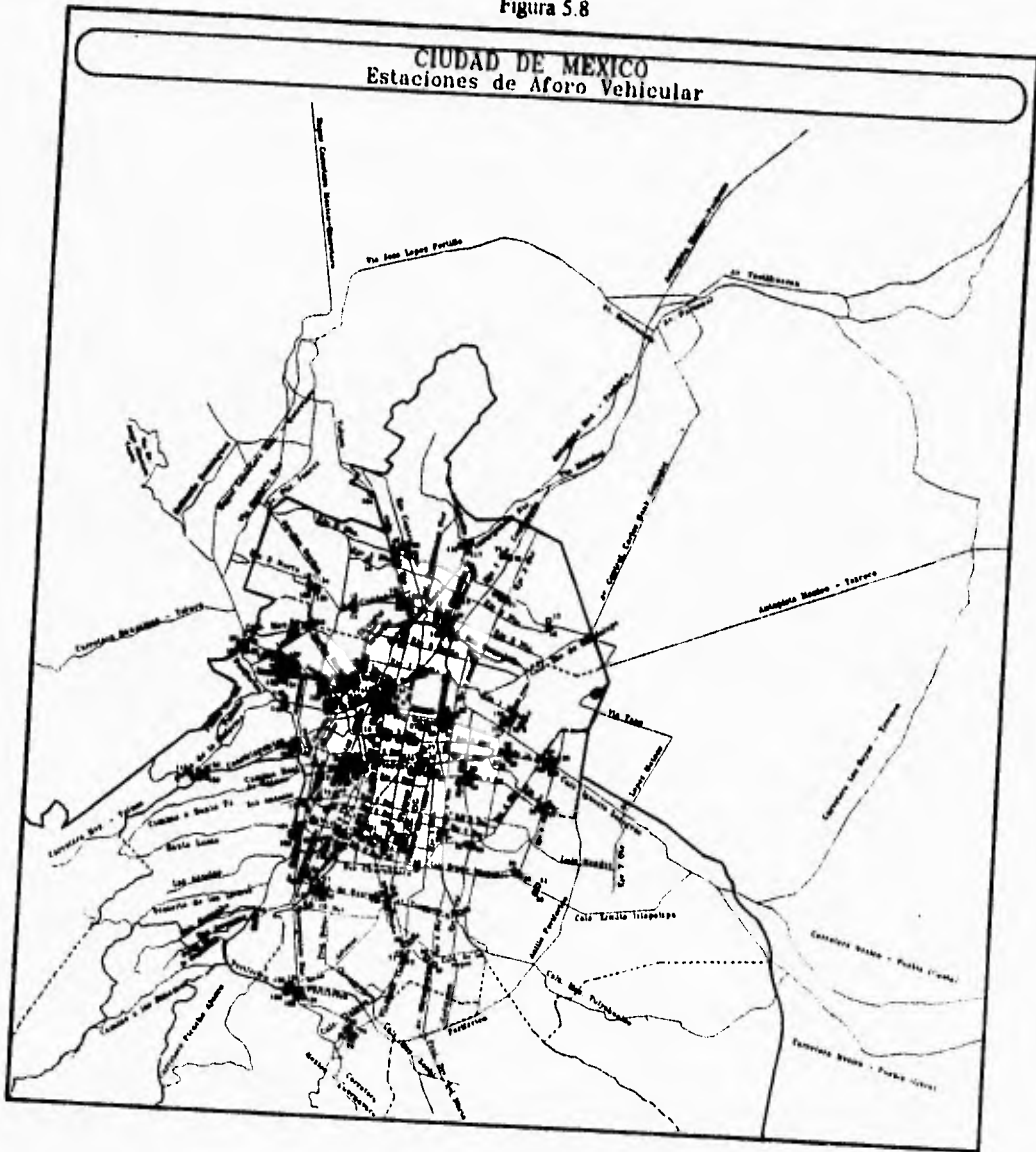


Figura 5.8



Los factores de emisión, se obtienen de información bibliográfica, como en manuales de Factores de Emisión que publican algunas instituciones como: la Secretaría de Desarrollo Social, la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (EPA), etc. Sin embargo los datos referentes a los segmentos viales requieren de la utilización de un SIG, ya que son datos gráfico-espaciales.

Para obtener estos últimos datos, fue necesario elaborar un mapa digital en donde se localizaran geográficamente, las vialidades de la Ciudad de México y la malla de 39 x 45 celdas unitarias. Este mapa digital, se logró mediante la digitalización de una serie de planos cartográficos de la Ciudad de México, escala 1:20,000 (ATLAS SIGSA, 1986). Aparte de la digitalización de las vías y la localización de la malla, se realizó la topología o cobertura de ambas entidades para crear las tres bases de datos que se requieren para un análisis (base de datos geográfica, gráfica y de atributos).

Por último, para obtener la distancia recorrida y el número de segmentos de vía que hay dentro de una celda, se realizó una superposición de la cobertura de las vialidades con la cobertura de la malla. Los resultados se agruparon dentro de un archivo ASCII, en forma de matriz, tal y como lo requiere el programa MODEMI.

Con la información señalada anteriormente, el modelo genera las emisiones vehiculares y su evolución en el tiempo en una celda en particular. Posteriormente, los cálculos se repiten en cada una de las celdas que integran la región de estudio, para así proporcionar las emisiones en toda la región.

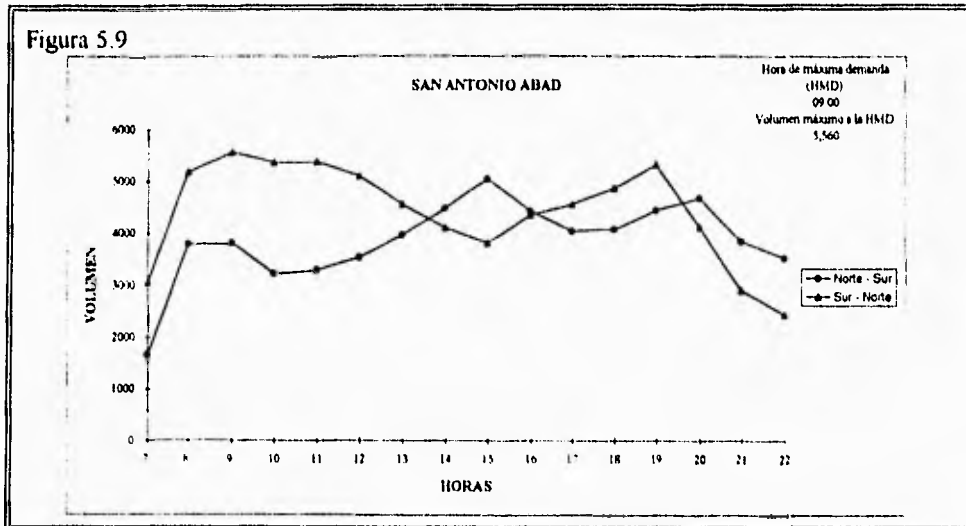
V.4.1 Emisiones Provenientes de la Vialidad Primaria

Por vialidad primaria se entiende todas las vías importantes de la ciudad, las cuales están compuestas básicamente por autopistas y vías rápidas (avenidas y ejes viales), sus características más relevantes son los grandes volúmenes vehiculares que maneja, accesos controlados, distancias de recorrido grandes y circulación continua. Estas vías se clasifican en:

- I.- Vías de acceso controlado, por ejemplo: Anillo periférico, Circuito Interior, Viaducto M. Alemán y Viaducto Tlalpan.
- II.- Ejes viales, en su mayoría circulando en el sentido de Norte a Sur o de Oriente a Poniente.
- III.- Avenidas principales, por ejemplo: Paseo de la Reforma, Insurgentes, Av. Universidad y Calz. I Zaragoza.

Las emisiones vehiculares de CO que se producen en las vías primarias dependen del volumen del tráfico vehicular, la distancia que éste recorre, la composición vehicular y las velocidades promedio que alcanzan los vehículos circulando en las diferentes vías. Además, debido a que la mayoría de las vías primarias (vías de acceso controlado y arterias principales) constan de una doble circulación, existe una variación por sentidos en el volumen vehicular y en la velocidad promedio, como se muestra en la Figura 5.9, lo que hace importante el considerar el flujo vehicular por sentidos. Asimismo, se supone que todos los vehículos que se encuentran en estas vías han alcanzado una temperatura de combustión estable, y por consiguiente, no se consideran en este tipo de vías los vehículos que arrancan con el

motor frío, factor que será discutido más adelante en la sección correspondiente a las emisiones procedentes de las vías secundarias.



Ya que las emisiones de CO dependen del volumen vehicular y su composición, es necesario obtener los volúmenes vehiculares totales por tipo i de vehículo V_{veh_i} . Para una celda en particular de la región de estudio, esto implica obtener la siguiente información:

1 - La composición vehicular $C_{veh_i}(t)$, la cual se estima multiplicando el volumen vehicular $N_{veh}(t)$ que hay en una celda específica a cada hora del día, por la fracción de vehículos de tipo i correspondiente a la composición existente, $FactComp_i$. Este factor de composición representa el porcentaje de vehículos de tipo i que se encuentra en el total del volumen vehicular circulando en dichas vías. Lo anterior se representa con la siguiente ecuación:

$$C_{veh_i}(t) = (N_{veh}(t) * FactComp_i) \quad (1)$$

2 - La distancia D_k asociada a cada segmento de vía k por donde circulan dichos vehículos, dada en kilómetros.

3 - El número total de segmentos de vías k , que hay dentro de dicha celda.

Obtenidos los datos anteriores, el volumen vehicular por distancia se determina sumando los productos de la composición vehicular $C_{veh_i}(t)$ de cada segmento k de la vía, descrita en la ecuación

(2.1), por la distancia D_i asociada a dicho segmento. Esta suma se realiza hasta completar el número total de segmentos que hay en la celda en cuestión, como se muestra enseguida:

$$Vveh_i(t) = \sum_{j=1}^n Cveh_{i,j}(t) \cdot D_j \quad (2)$$

Una vez obtenido el volumen-distancia vehicular de tipo i a cada hora del día, es importante determinar, como se mencionó anteriormente, la cantidad de este volumen que se encuentra en cada sentido de la vía. Para ello se consideraron los sentidos de mayor y menor circulación, los cuales, debido a las diferentes velocidades promedio de los vehículos, se denominaron sentido lento y sentido rápido respectivamente.

Los volúmenes vehiculares correspondientes al tipo de vehículo i , por sentido son:

1.- El volumen vehicular de tipo i en el sentido rápido a cada hora del día $Vveh_iR(t)$, el cual se obtienen multiplicando el volumen-distancia vehicular de tipo i $Vveh_i(t)$ circulando sobre la vía a cierta hora t , por una fracción de vehículos que se encuentran en el sentido de menor circulación a la misma hora $FvehMC(t)$, lo anterior se representa con la siguiente ecuación:

$$Vveh_iR(t) = [Vveh_i(t) \cdot FvehMC(t)] \quad (3)$$

Donde la fracción de vehículos que se encuentran en el sentido de menor circulación a la hora t $FvehMC(t)$, se obtiene dividiendo el volumen vehicular correspondiente al sentido de menor circulación a la hora t , entre la suma de los volúmenes vehiculares de ambos sentidos, es decir:

$$FvehMC(t) = \frac{VehMenorC(t)}{[VehMayorC(t) + VehMenorC(t)]} \quad (4)$$

2.- El volumen-distancia vehicular de tipo i en el sentido lento a cada hora $Vveh_iL(t)$, se obtiene multiplicando el mismo volumen-distancia vehicular a una hora t $Vveh_i(t)$, utilizado en la ecuación (3), por la diferencia que existe entre el 100% de los vehículos circulando en dicha vía a la misma hora, y la fracción $FvehMC(t)$ antes mencionada, como sigue:

$$Vveh_iL(t) = [Vveh_i(t) \cdot [1 - FvehMC(t)]] \quad (5)$$

Después de haber obtenido los volúmenes-distancia vehiculares a cada hora, por tipo *i* de vehículo en ambos sentidos $V_{veh,R}(t)$ y $V_{veh,L}(t)$, mediante las ecuaciones (3) y (5), se requiere estimar la cantidad de emisión que producen los volúmenes vehiculares mencionados. Esta estimación se lleva a cabo multiplicando los volúmenes-distancia vehiculares de tipo *i* en ambos sentidos y a cada hora del día, por los factores de emisión $FactEmi_{i,R}$ y $FactEmi_{i,L}$, correspondientes a cada tipo de vehículo *i* y a cada sentido (rápido y lento). Lo anterior se representa con las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,R}(t) = (V_{veh,R}(t) * FactEmi_{i,R}) \quad (6)$$

$$E_{i,L}(t) = (V_{veh,L}(t) * FactEmi_{i,L}) \quad (7)$$

Es importante recordar que estos factores de emisión dependen del tipo de vehículo y de la velocidad promedio a la que circulan dichos vehículos. Para determinar las velocidades promedio por tipo de vía, se utilizó la información proporcionada por la Coordinación General de Transporte del Departamento del Distrito Federal (ver Tabla 5.8), y el estudio realizado por Japan International Cooperation Agency (JICA), para la Ciudad de México; se estimó una velocidad promedio para este tipo de vialidad de 60 Km/hr, en el sentido de mayor circulación, mientras que para el sentido de menor circulación se obtuvo una velocidad de 30 Km/hr. Por lo tanto, los factores de emisión utilizados para este trabajo, correspondientes a los 4 tipos vehiculares y a las velocidades promedio anteriormente mencionadas, son los que aparecen en la Tabla 5.9.

Tabla 5.8 Velocidades Promedio						
Tipo de Vía	Velocidad en Flujo Libre *			Velocidad de Marcha en HMD		
	μ	σ	N	μ	σ	N
Vías de Acceso Controlado	67.29	16.28	362	36.75	15.03	362
Vías Primarias	45.03	14.31	1,638	27.12	11.45	1,638
Ejes Vitales	40.81	12.21	748	26.08	10.14	748
Vías Secundarias	42.82	13.59	1,578	25.42	10.69	1,578

* con un muy reducido número de vehículos circulando
 μ = Promedio estándar
 σ = Desviación
N = Número de casos
HMD = Hora de máxima demanda (8:00 - 9:00 Hrs.)
Fuente: CGT, JICA 1990

Después de haber obtenido los volúmenes-distancia vehiculares a cada hora, por tipo *i* de vehículo en ambos sentidos $V_{veh,R}(t)$ y $V_{veh,L}(t)$, mediante las ecuaciones (3) y (5), se requiere estimar la cantidad de emisión que producen los volúmenes vehiculares mencionados. Esta estimación se lleva a cabo multiplicando los volúmenes-distancia vehiculares de tipo *i* en ambos sentidos y a cada hora del día, por los factores de emisión $FactEmi_{i,R}$ y $FactEmi_{i,L}$, correspondientes a cada tipo de vehículo *i* y a cada sentido (rápido y lento). Lo anterior se representa con las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,R}(t) = (V_{veh,R}(t) * FactEmi_{i,R}) \quad (6)$$

$$E_{i,L}(t) = (V_{veh,L}(t) * FactEmi_{i,L}) \quad (7)$$

Es importante recordar que estos factores de emisión dependen del tipo de vehículo y de la velocidad promedio a la que circulan dichos vehículos. Para determinar las velocidades promedio por tipo de vía, se utilizó la información proporcionada por la Coordinación General de Transporte del Departamento del Distrito Federal (ver Tabla 5.8), y el estudio realizado por Japan International Cooperation Agency (JICA), para la Ciudad de México; se estimó una velocidad promedio para este tipo de vialidad de 60 Km/hr, en el sentido de mayor circulación, mientras que para el sentido de menor circulación se obtuvo una velocidad de 30 Km/hr. Por lo tanto, los factores de emisión utilizados para este trabajo, correspondientes a los 4 tipos vehiculares y a las velocidades promedio anteriormente mencionadas, son los que aparecen en la Tabla 5.9.

Tabla 5.8 Velocidades Promedio						
Tipo de Vía	Velocidad en Flujo Libre *			Velocidad de Marcha en HMD		
	μ	σ	N	μ	σ	N
Vías de Acceso Controlado	67.29	16.28	362	36.75	15.03	362
Vías Primarias	45.03	14.31	1,638	27.12	11.45	1,638
Ejes Vitales	40.81	12.21	748	26.08	10.14	748
Vías Secundarias	42.82	13.59	1,578	25.42	10.69	1,578
* con un muy reducido número de vehículos circulando μ = Promedio estándar σ = Desviación N = Número de casos HMD = Hora de máxima demanda (8:00 - 9:00 Hrs.) Fuente: CGT, JICA 1990						

Tabla 5.9 Factores de Emisión de Monóxido de Carbono, para el cálculo de Emisiones en las Vías Primarias [g/Km]		
Tipo de Vehículo	(30 Km/hr)	(60 Km/hr)
Autos particulares	33.66	18.75
Autobuses	7.66	6.77
Camiones	84.19	40.15
Trailers	7.66	6.77

Donde $E_i R(t)$ y $E_i L(t)$ representan las emisiones producidas en cada hora t , por los vehículos de tipo i que se encuentran en el sentido de menor y mayor circulación respectivamente. La emisión total en g/hr, por tipo i de vehículo $E_i(t)$ se calcula sumando las ecuaciones (6) y (7), como sigue:

$$E_i(t) = E_i R(t) + E_i L(t) \quad (8)$$

Finalmente, las emisiones totales $E_t(t)$ en g/seg correspondientes a cada hora t , producidas por n tipos vehiculares caracterizan a la composición vehicular en una celda específica dentro de la región de estudio, se calcula sumando las emisiones $E_i(t)$ provenientes de cada tipo de vehículo a la hora t , esto se expresa de la siguiente manera:

$$E_t(t) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n E_i(t) \right)}{3600} \quad (9)$$

Debido a que el procedimiento anteriormente descrito está referido a una celda en particular, es necesario repetirlo en cada una de las celdas que integran la región de estudio, para así conocer las emisiones en toda la región.

V.4.2 Emisiones Provenientes de la Vialidad Secundaria

A lo que se le denomina vialidad secundaria es al conjunto de calles (principales, colectoras y locales) que conforman un subsistema que alimenta a las vías primarias. Este tipo de vías tienen como principal características, el acceso a propiedades colindantes y una circulación discontinua.

Las emisiones vehiculares de CO que se producen en las vías secundarias, al igual que las emisiones generadas en las vías primarias, dependen del volumen de tráfico vehicular, la distancia que éste recorre, la composición vehicular y las velocidades promedio de cada vía. Sin embargo, debido

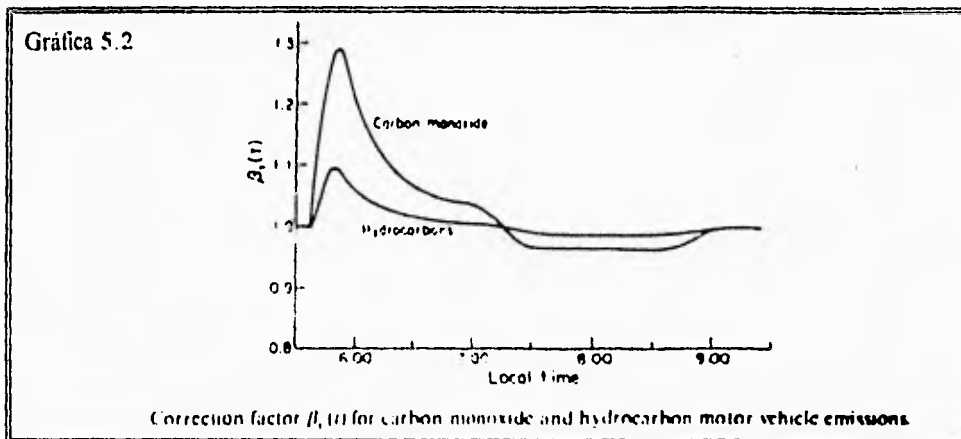
a que la mayoría de los viajes se originan en estas vialidades, es necesario hacer ciertas consideraciones adicionales, por ejemplo

I.- Ya que la mayoría de los vehículos inician su recorrido sobre esta vías, su modo de arranque es en frío, es decir que el motor no ha alcanzado la temperatura ideal para realizar una combustión estable. Esto provoca que las emisiones de un vehículo en estas condiciones sean mayores que si fuese sobre una vía primarias, con la misma velocidad. A fin de determinar la emisión que resulta de este modo de operación, es necesario conocer lo que se denomina como la "fracción de vehículos que arrancan en frío", cuya obtención se discutirá más adelante.

Hay que recordar que los factores de emisión, correspondientes a la vialidad secundaria dependen solamente de la composición vehicular y del modo de arranque, ya que se determinó que la velocidad promedio es constante (30 Km/hr.). Por lo tanto, los factores de emisión que se utilizaron dentro de este trabajo para el cálculo de la emisiones de CO sobre esta vialidad son los que aparecen en la Tabla 5.10.

Tipos Vehiculares (30 Km/hr.)	Modos de Arranque	
	Frio	Caliente
Autos particulares	33.66	18.75
Camiones	84.19	40.15
Omnibuses	7.66	6.77

II - Debido a que existe un periodo durante las primeras horas de la mañana (06:00 a 09:30 hrs.), en el cual existe un incremento considerable de inicios de viajes en donde la mayoría de los vehículos arrancan en frío, se multiplica el factor de emisión correspondiente por un parámetro de corrección (Reynolds, 1973) que tome en cuenta esta situación. Este parámetro de corrección se muestra en la Gráfica 5.2 y tiene la finalidad de incrementar el factor de emisión durante esas horas del día, en las que hay un número considerable de inicio de viajes. Pronto existirá un número mayor de viajes terminado que iniciados, por lo que el parámetro de corrección reducirá el factor de emisión hasta que la totalidad de los vehículos hayan alcanzado la temperatura ideal para la combustión.



A continuación se describirá el procedimiento que se siguió para cuantificar las emisiones de CO producidas sobre las vías secundarias, en una celda en particular de la región de estudio.

A diferencia de las vías primarias, la dificultad principal para estimar las emisiones que se producen en la vialidad secundaria, es la gran cantidad de calles que lo conforman y la carencia de información acerca de aforos vehiculares, que permitan un tratamiento similar al expuesto para el caso de las vías primarias. Este problema puede resolverse si se obtiene una relación entre el volumen vehicular de ambas vialidades; es decir que el 100% de los vehículos registrados sea igual a la suma de la fracción de vehículos circulando sobre vía primarias y secundarias. Debido a que no conocemos la fracción de vehículos circulando sobre la vialidad secundaria, suponemos que la relación puede obtenerse de la diferencia que existe entre el consumo total de combustible para vehículos automotores y el consumo de combustible que se lleva a cabo en la vialidad primaria dentro de la región de estudio, como se puede apreciar en las siguientes ecuaciones.

$$100\% \text{ de Veh.} = X\% \text{ Veh. sobre vías Pri.} + Y\% \text{ Veh. sobre vías Sec.}$$

$$Y\% \text{ Veh. sobre vías Sec.} = \text{Consumo Tot. de Comb.} - \text{Consumo vías Pri.}$$

Para poder estimar esta relación, primero, es necesario calcular el consumo de combustibles que se efectúa en el sistema vial primario, el cual se logra a partir del volumen vehicular de un tipo particular de vehículo, la distancia recorrida (en kilómetros) y el consumo promedio de dicho tipo vehicular, como se muestra a continuación.

$$\text{Consumo vías Pri.} = \frac{N_{\text{veh.}} \cdot D_i}{\text{Consumo Promedio}}$$

La relación de consumo de combustibles podría servir como base para hacer una primera estimación, aunque una forma más apropiada para estimar esta relación sería llevar a cabo un estudio de aforos vehiculares, en una muestra de calles secundarias, que permitan tipificar el comportamiento de los flujos vehiculares sobre dichas vías

Partiendo de la base de que se tiene el volumen-distancia vehicular por tipo i de vehículo $V_{veh_i}(t)$, se procede a cuantificar el número de vehículos que inician su recorrido en modo "frío" y en modo "caliente". Si la fracción de vehículos que inician su recorrido con el motor frío se representa por $FracFrio(t)$ (Reynolds, 1973), entonces los volúmenes-distancia vehiculares de tipo i que inician su recorrido en el modo frío $V_{veh_i,Frio}(t)$ y los que inician un recorrido con el motor caliente $V_{veh_i,Cal}(t)$ se obtienen de la manera siguiente:

$$V_{veh_i,Frio}(t) = V_{veh_i}(t) \cdot FracFrio(t) \quad (10)$$

$$V_{veh_i,Cal}(t) = V_{veh_i}(t) \cdot [1 - FracFrio(t)] \quad (11)$$

Después de obtener los volúmenes-distancia vehiculares $V_{veh_i,Frio}(t)$ y $V_{veh_i,Cal}(t)$, se requiere estimar las emisiones de CO que producen dichos volúmenes-distancia. Esta estimación se lleva a cabo multiplicando los volúmenes-distancia vehiculares antes nombrados, por los factores de emisión $FactEmi_i,F$ y $FactEmi_i,C$ correspondientes a cada tipo de vehículo i y al modo de arranque (arranque en frío o arranque en caliente). Estos factores de emisión además de depender del tipo de vehículo y de la velocidad promedio a la que circulan, varían de acuerdo al modo de arranque

Lo anterior se representa con las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,F}(t) = [V_{veh_i,Frio}(t) \cdot FactEmi_i,F] \quad (12)$$

$$E_{i,C}(t) = [V_{veh_i,Cal}(t) \cdot FactEmi_i,C] \quad (13)$$

Donde $E_{i,F}(t)$ y $E_{i,C}(t)$ representan las emisiones producidas en cada hora (t) , por los vehículos de tipo i , que inician su recorrido con el motor frío y caliente respectivamente. Posteriormente, para calcular la emisión total por tipo i de vehículo, $E_i(t)$, se suman las ecuaciones (12) y (13), como sigue:

$$E_i(t) = E_{i,C}(t) + E_{i,F}(t) \quad (14)$$

Finalmente, las emisiones totales en g/seg $E_i(t)$, producidas por un total de n tipos vehiculares, existentes en la composición vehicular dentro de una celda cualquiera, se obtienen a partir de la suma del producto de las emisiones provenientes de cada tipo de vehículo $E_i(t)$, por un factor de corrección

La relación de consumo de combustibles podría servir como base para hacer una primera estimación, aunque una forma más apropiada para estimar esta relación sería llevar a cabo un estudio de aforos vehiculares, en una muestra de calles secundarias, que permitan tipificar el comportamiento de los flujos vehiculares sobre dichas vías.

Partiendo de la base de que se tiene el volumen-distancia vehicular por tipo i de vehículo $V_{veh_i}(t)$, se procede a cuantificar el número de vehículos que inician su recorrido en modo "frío" y en modo "caliente". Si la fracción de vehículos que inician su recorrido con el motor frío se representa por $FracFrio(t)$ (Reynolds, 1973), entonces los volúmenes-distancia vehiculares de tipo i que inician su recorrido en el modo frío $V_{veh_i,Frio}(t)$ y los que inician un recorrido con el motor caliente $V_{veh_i,Cal}(t)$ se obtienen de la manera siguiente:

$$V_{veh_i,Frio}(t) = V_{veh_i}(t) \cdot FracFrio(t) \quad (10)$$

$$V_{veh_i,Cal}(t) = V_{veh_i}(t) \cdot [1 - FracFrio(t)] \quad (11)$$

Después de obtener los volúmenes-distancia vehiculares $V_{veh_i,Frio}(t)$ y $V_{veh_i,Cal}(t)$, se requiere estimar las emisiones de CO que producen dichos volúmenes-distancia. Esta estimación se lleva a cabo multiplicando los volúmenes-distancia vehiculares antes nombrados, por los factores de emisión $FactEmi_i,F$ y $FactEmi_i,C$ correspondientes a cada tipo de vehículo i y al modo de arranque (arranque en frío o arranque en caliente). Estos factores de emisión además de depender del tipo de vehículo y de la velocidad promedio a la que circulan, varían de acuerdo al modo de arranque

Lo anterior se representa con las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,F}(t) = [V_{veh_i,Frio}(t) \cdot FactEmi_i,F] \quad (12)$$

$$E_{i,C}(t) = [V_{veh_i,Cal}(t) \cdot FactEmi_i,C] \quad (13)$$

Donde $E_{i,F}(t)$ y $E_{i,C}(t)$ representan las emisiones producidas en cada hora (t), por los vehículos de tipo i , que inician su recorrido con el motor frío y caliente respectivamente. Posteriormente, para calcular la emisión total por tipo i de vehículo, $E_i(t)$, se suman las ecuaciones (12) y (13), como sigue:

$$E_i(t) = E_{i,C}(t) + E_{i,F}(t) \quad (14)$$

Finalmente, las emisiones totales en g/seg $E(t)$, producidas por un total de n tipos vehiculares, existentes en la composición vehicular dentro de una celda cualquiera, se obtienen a partir de la suma del producto de las emisiones provenientes de cada tipo de vehículo $E_i(t)$, por un factor de corrección

de emisiones $FactCorrec(t)$ (Reynolds, 1973) que es función al número de vehículos que inician su recorrido con el motor frío. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$E_t(t) = \frac{(\sum_{i=1}^n E_i(t) * FactCorrec(t))}{3600} \quad (15)$$

De la misma manera que el cálculo efectuado para determinar las emisiones procedentes de los vehículos circulando en la vialidad primaria, este procedimiento se repite en cada una de las celdas que integran la región de estudio, para así conocer las emisiones en toda la región.

VII. RESULTADOS

Para realizar las operaciones descritas en las secciones V.4.1 y V.4.2, referentes al cálculo de las emisiones procedentes de las fuentes móviles dentro de la Ciudad de México, se elaboró un programa de computadora en Fortran llamado MODEMI, el cual, según los requerimientos del modelo de emisiones vehiculares, consta de dos módulos principales EMIVEHPRI y EMIVEHSEC, en los cuales se da lectura y se procesa la información referente a las características del tráfico vehicular (volumen vehicular, composición vehicular, etc.), características de la vialidad (velocidad, longitudes entre nodos, etc) y a los factores de emisión correspondientes a los diferentes tipos de vehículos dentro de la composición vehicular.

Un aspecto importante en donde se utilizó el Sistema de Información Geográfico fue en la representación gráfica-espacial de las emisiones vehiculares obtenidas del programa MODEMI. Esta representación se muestra en las Figuras 6.1 a 6.24, en donde cada figura representa una hora específica del día. Cabe señalar que dichas emisiones únicamente corresponden a las producidas por los vehículos circulando en la vialidad primaria, esto es debido a que no se contó con la información necesaria para calcular las emisiones generadas sobre la vialidad secundaria.

Otra manera de representar las distribuciones espaciales de las emisiones vehiculares a cada hora del día es a través de curvas que representan niveles constantes de emisión de CO (Ver Figuras 6.25 a 6.36). Si seleccionamos las 3:00, 8:00, 19:00, y 22:00 hrs., podemos observar un panorama diverso entre los valores existentes a estas horas, tanto en lo que se refiere a la magnitud de las emisiones como a su distribución espacial. A las 3:00 hrs. las emisiones son bajas y principalmente periféricas; a las 8:00 hrs. se aprecia un incremento considerable de las emisiones, además de que su distribución empieza a dirigirse hacia el interior de la zona urbana; entre las 19:00 hrs. y las 22:00 hrs., el proceso anterior se invierte, es decir, a las 19:00 hrs. la distribución de las emisiones se encuentran principalmente en el interior de la zona urbana, mientras que a las 22:00 hrs. se desplazan hacia la periferia.

Ya que en las figuras anteriores es muy difícil captar la variación temporal de las emisiones de CO, se elaboró una gráfica, representando dicha variación en tres celdas representativas (una en el norte, otra en el centro y la última en el sur) de la región de estudio. La Figura 6.37, muestra estas tres variaciones temporales de las emisiones de CO, obtenidas con el modelo descrito en la sección anterior. Como se aprecia en esta Figura, la magnitud de las emisiones se incrementa del Norte hacia el Centro y, de manera más considerable, del Sur hacia el Centro de la Ciudad; este comportamiento se puede explicar, si se considera que la zona de mayor atracción de viajes vehiculares es precisamente la zona centro de la Ciudad. La región Norte presenta emisiones considerablemente más altas que la región Sur, lo cual puede ser debido a su gran actividad de transporte pesado para la actividad industrial que prolifera en dicha zona.

Es interesante observar, que si bien el patrón de variación de las emisiones es similar en las tres regiones, se presenta un desfásamiento en cuanto a la hora a la que se alcanza su nivel máximo; en la zona Sur y Centro, este ocurre alrededor de las 9:00 hrs., mientras que al Norte ocurre hasta las 12:00 hrs. del día. Nótese que el desfásamiento también se presenta al atardecer en donde existe otro

incremento, aunque más ligero que el primero, en el nivel de emisiones; las emisiones comienzan a disminuir en el Centro y Norte de la ciudad alrededor de las 19:00 hrs., la cual coincide con las horas de salida de la clase trabajadora y las oficinas. Sin embargo en la zona Sur el decrecimiento se inicia a partir de las 21:00 hrs., lo cual se puede explicar ya que esta zona se caracteriza por ser habitacional y alrededor de esta hora sería el arribo de la gente que viene de trabajar.

En otras palabras, la variación temporal y los desfases entre las zonas seleccionadas de la Ciudad coincide con los patrones de tráfico que caracterizan a cualquier zona urbana de estas dimensiones.

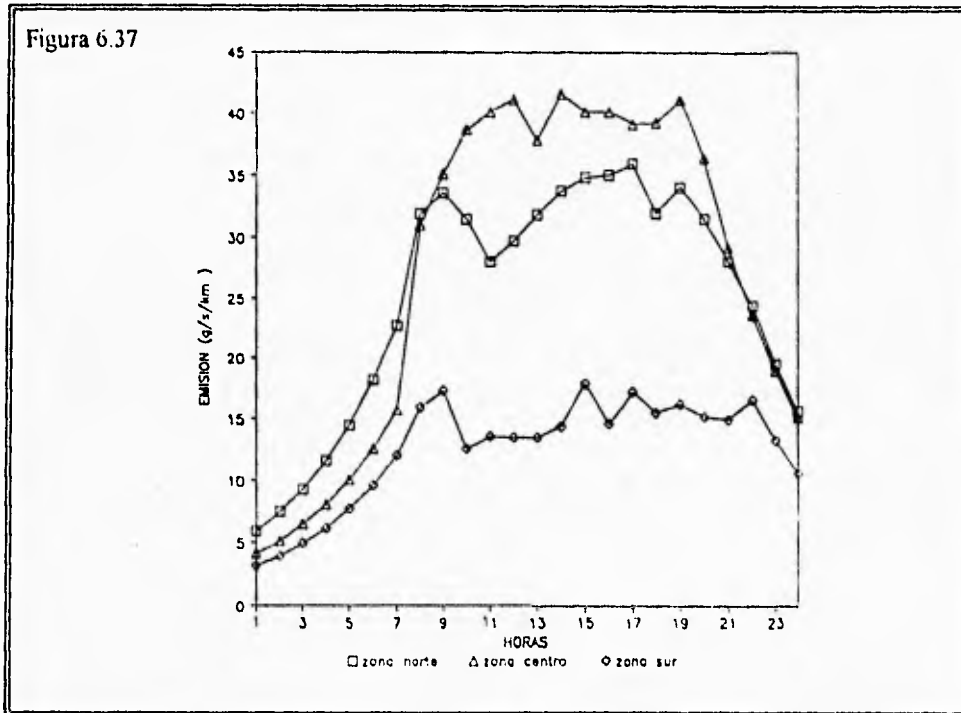
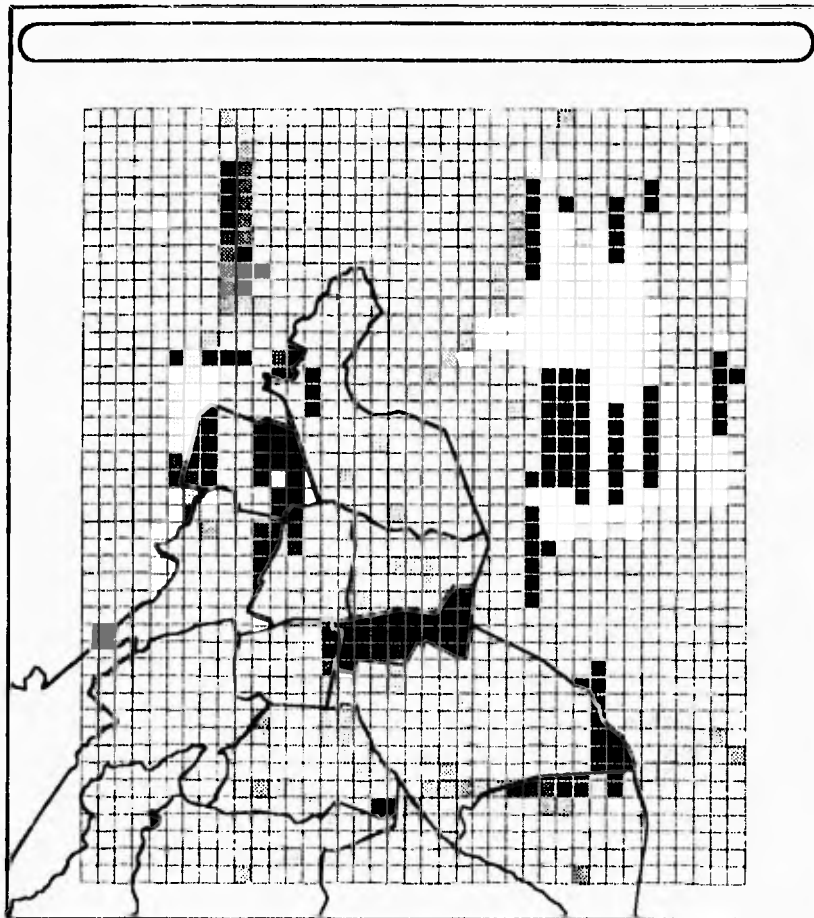


Figura 6.1
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 00:00 a las 1:00 hrs

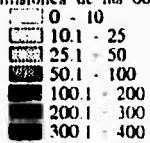


Figura 6.2
Emisiones Vehiculares de CO
[g\seg]

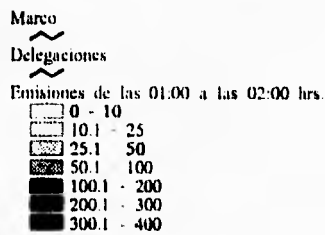
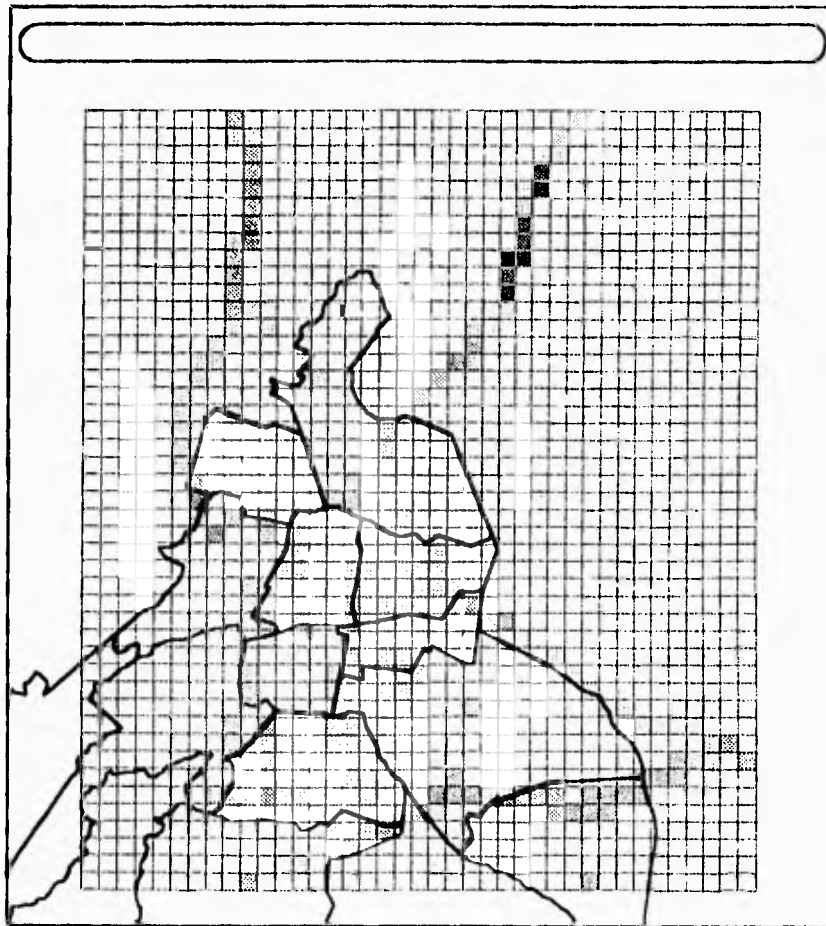
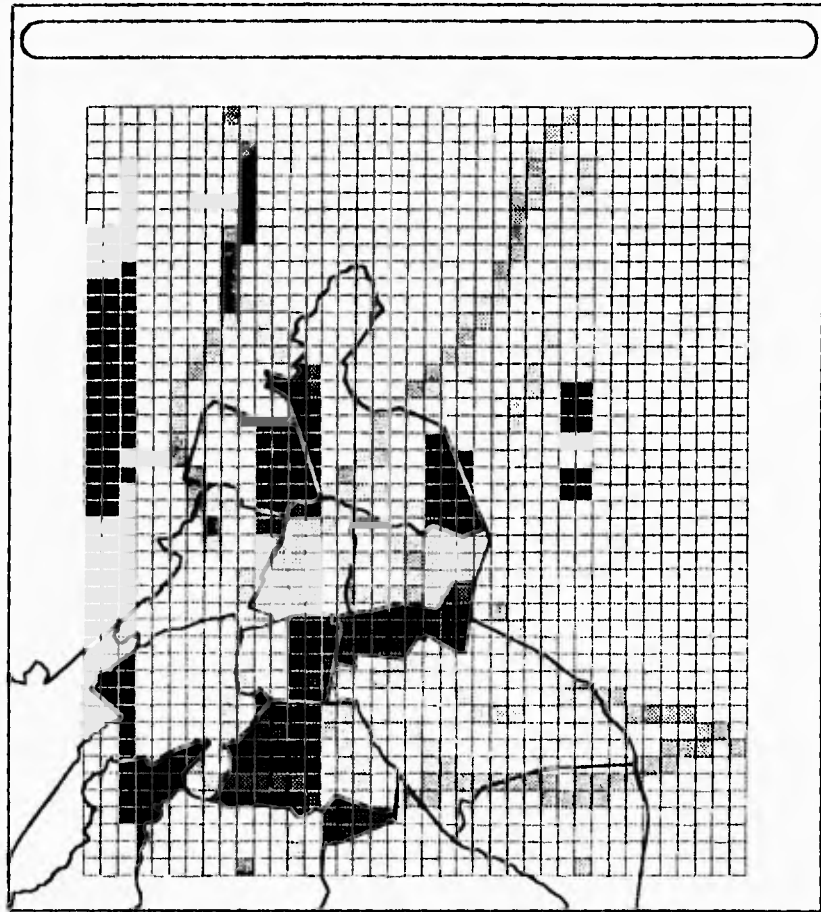


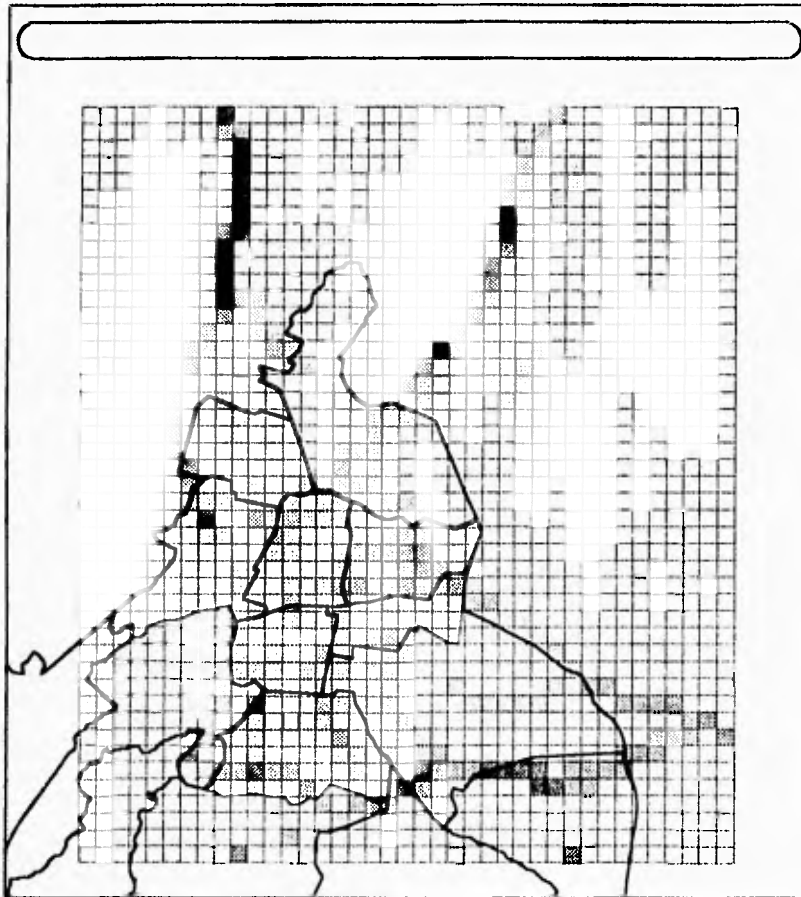
Figura 6.3
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco
Delegaciones
Emisiones de las 02:00 a las 03:00 hrs.

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

Figura 6.4
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 03:00 a las 04:00 hrs.

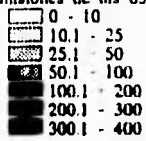
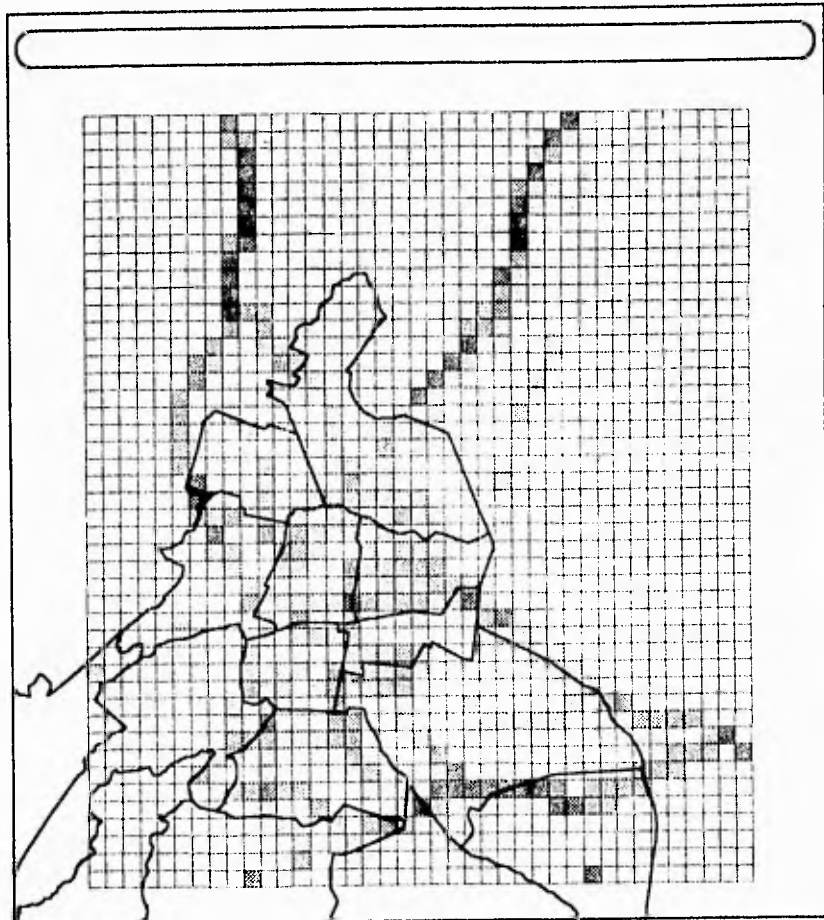


Figura 6.5
Emisiones Vehiculares de CO
[g|seg]



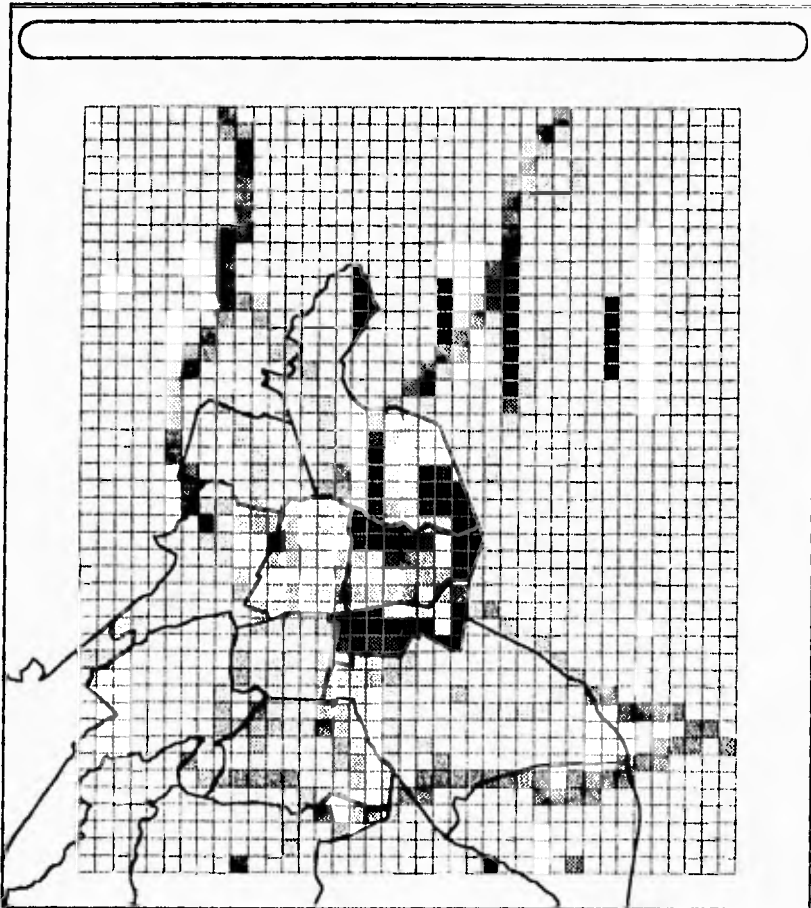
Marco

Delegaciones

Emisiones de las 04.00 a las 05.00 hrs.

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

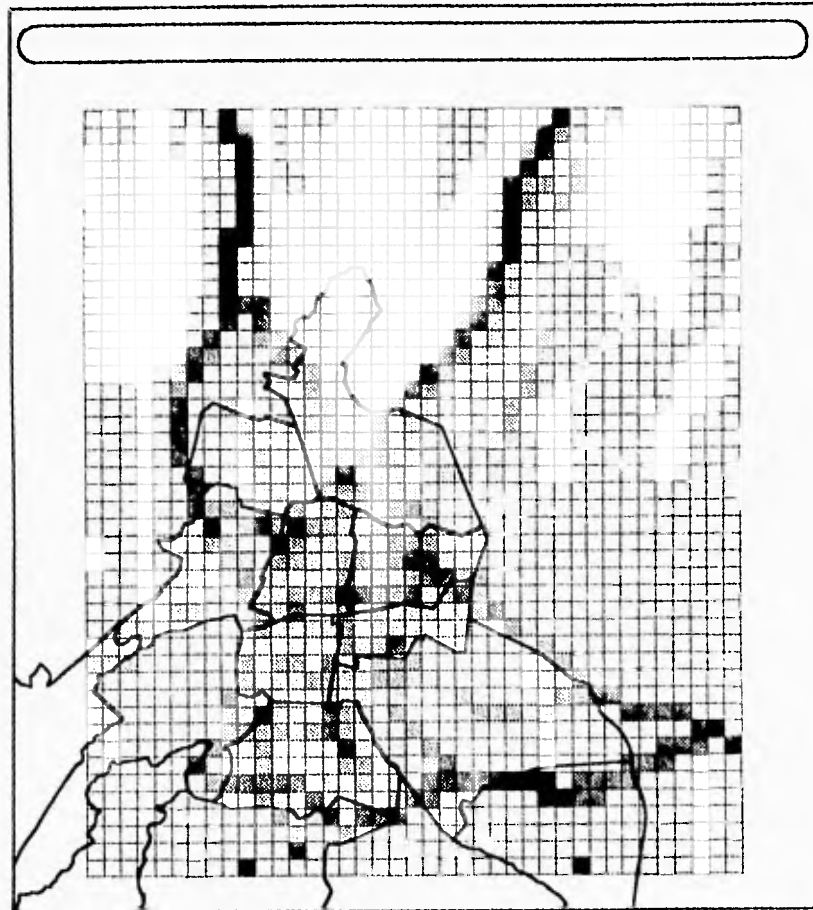
Figura 6.6
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco
Delegaciones
Emisiones de las 05:00 a las 06:00 hrs.

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

Figura 6.7
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Metro

Delegaciones

Emisiones de las 06:00 a las 07:00 hrs.

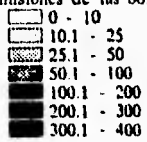
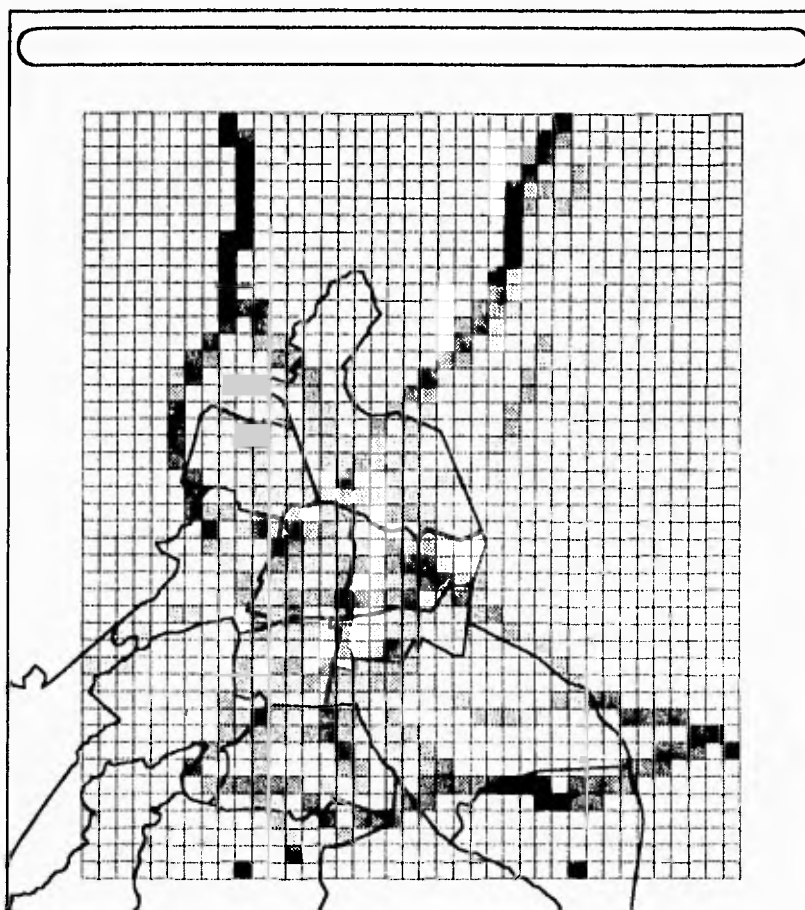


Figura 6.7
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 06:00 a las 07:00 hrs.

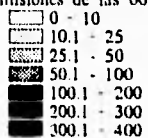
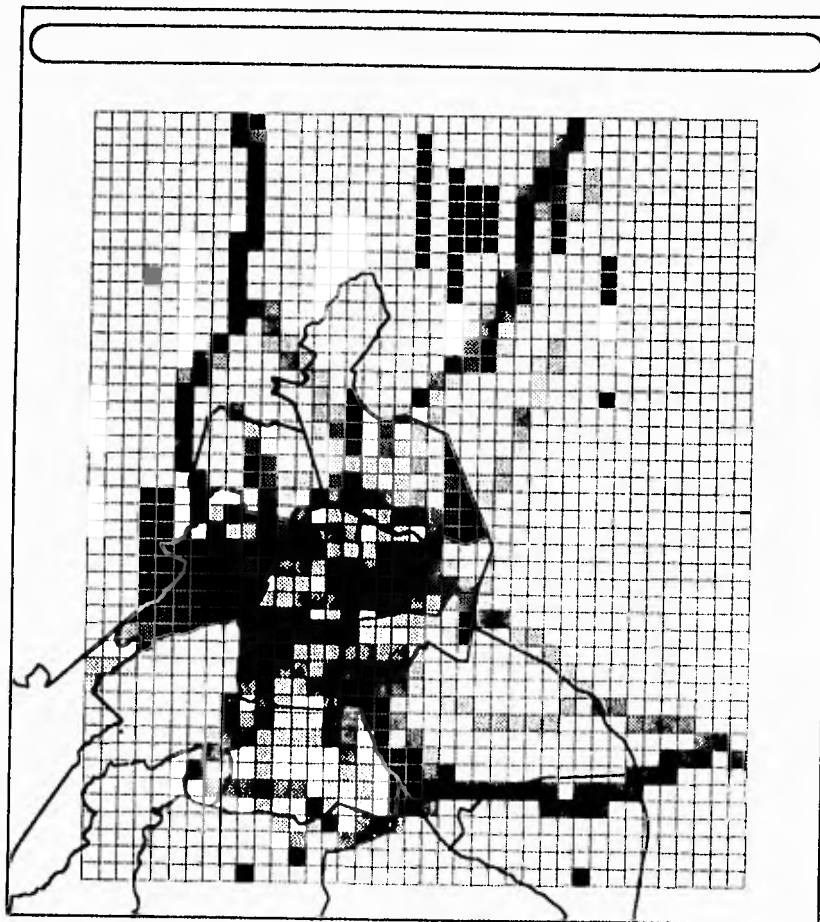


Figura 6.8
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 07:00 a las 08:00 hrs.

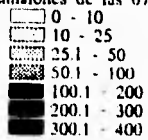
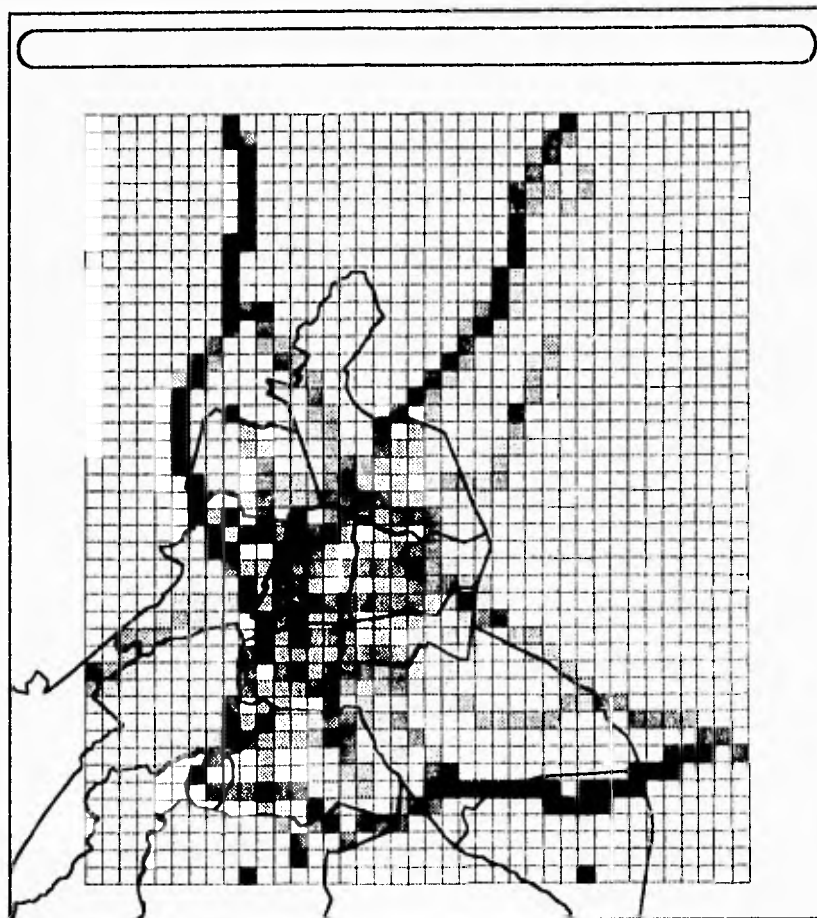


Figura 6.9
Emisiones Vehiculares de CO
[g\seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 08:00 a las 09:00 hrs.

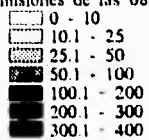
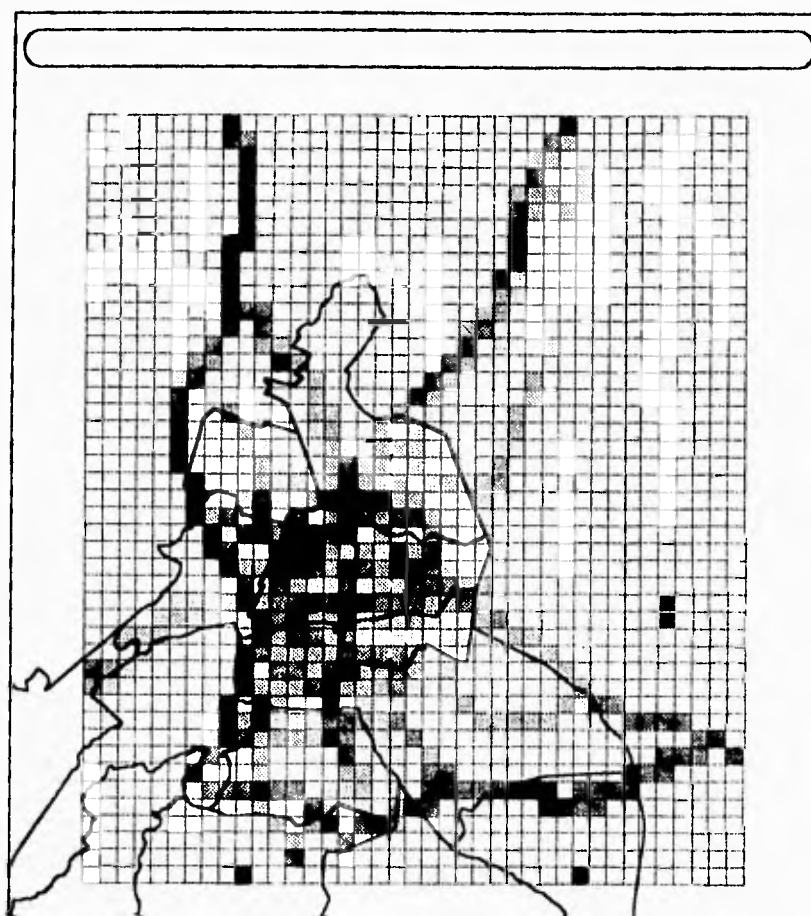


Figura 6.10
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco



Delegaciones



Emisiones de las 09:00 a las 10:00 hrs.

0 - 10

10.1 - 25

25.1 - 50

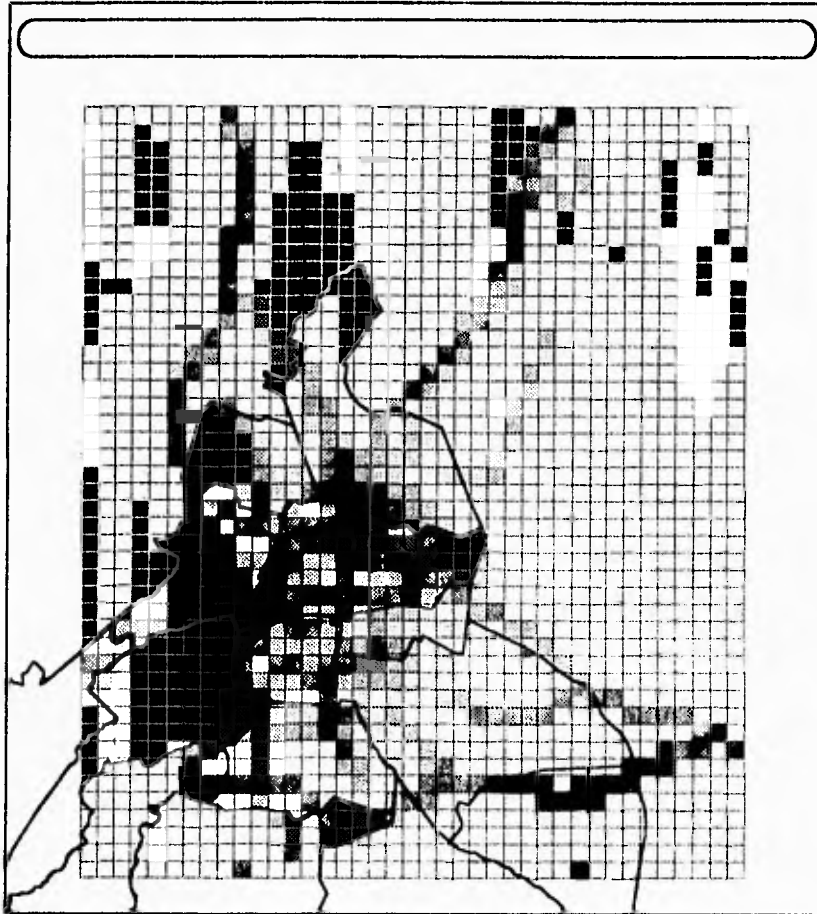
50.1 - 100

100.1 - 200

200.1 - 300

300.1 - 400

Figura 6.11
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



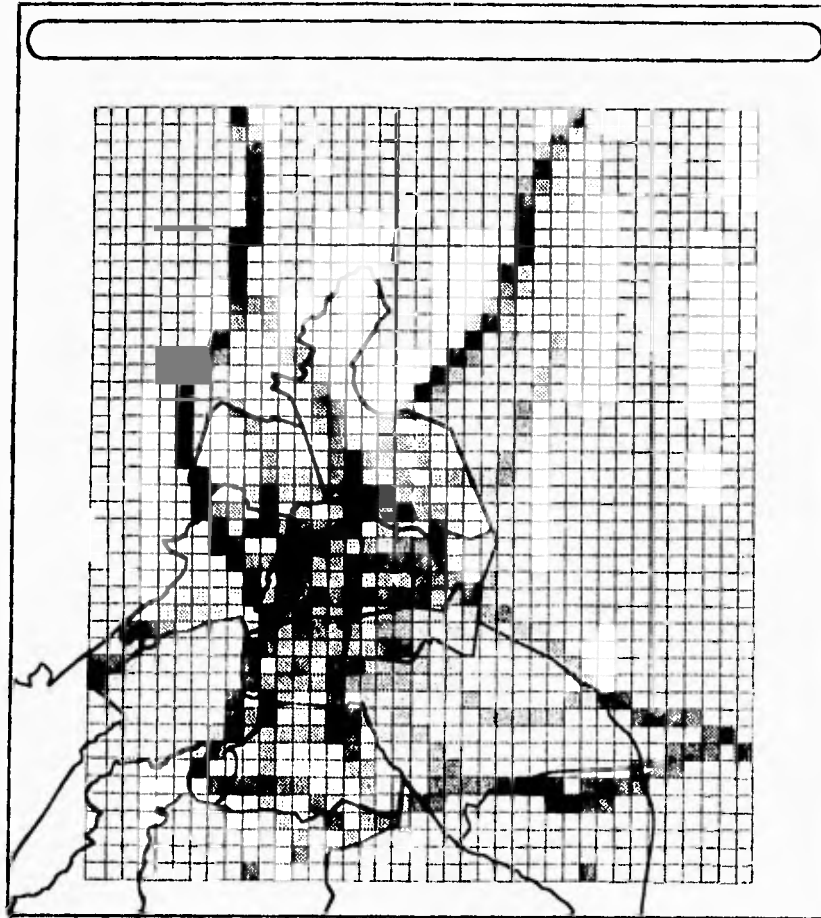
Marco

Delegaciones

Emisiones de las 10:00 a las 11:00 hrs.

- 0 - 10
- 10.1 - 25
- 25.1 - 50
- 50.1 - 100
- 100.1 - 200
- 200.1 - 300
- 300.1 - 400

Figura 6.12
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco
Delegaciones
Emisiones de las 11:00 a las 12:00 hrs.

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

Figura 6.13
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]

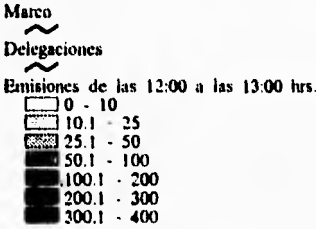
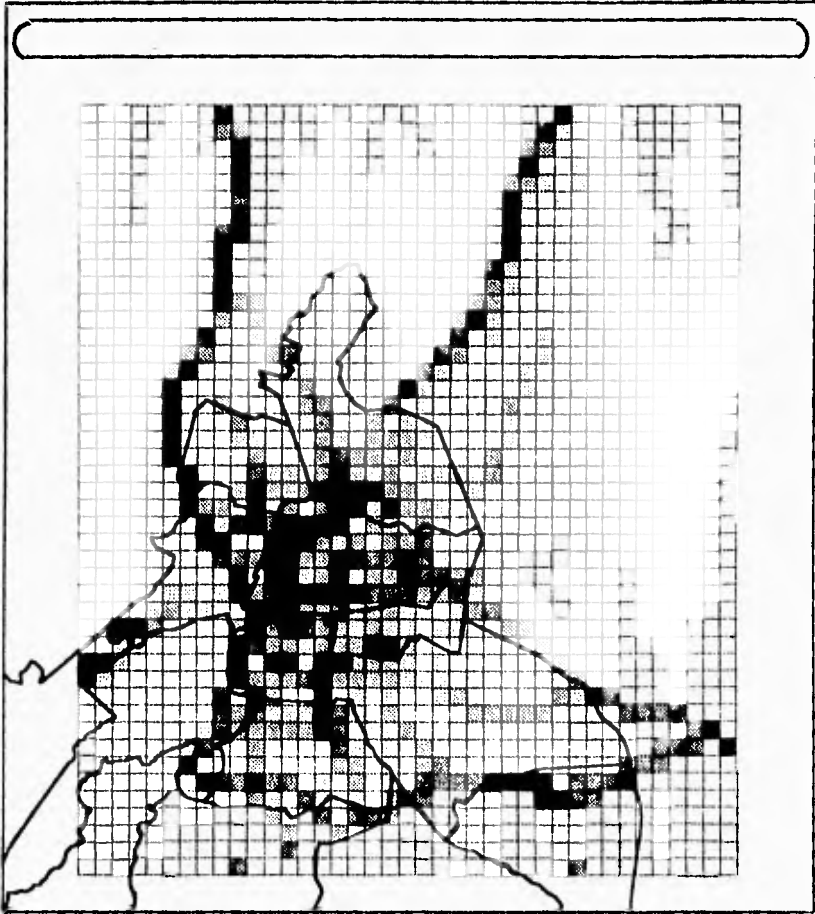
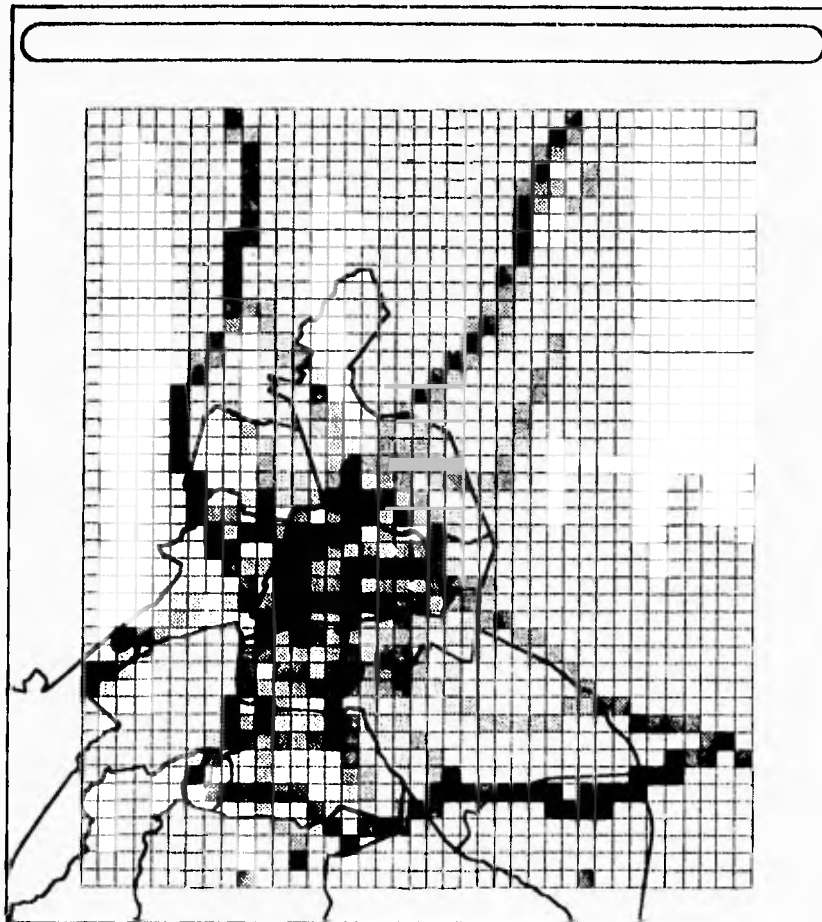


Figura 6.14
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 13:00 a las 14:00 hrs.

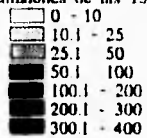


Figura 6.15
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]

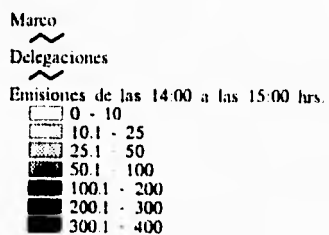
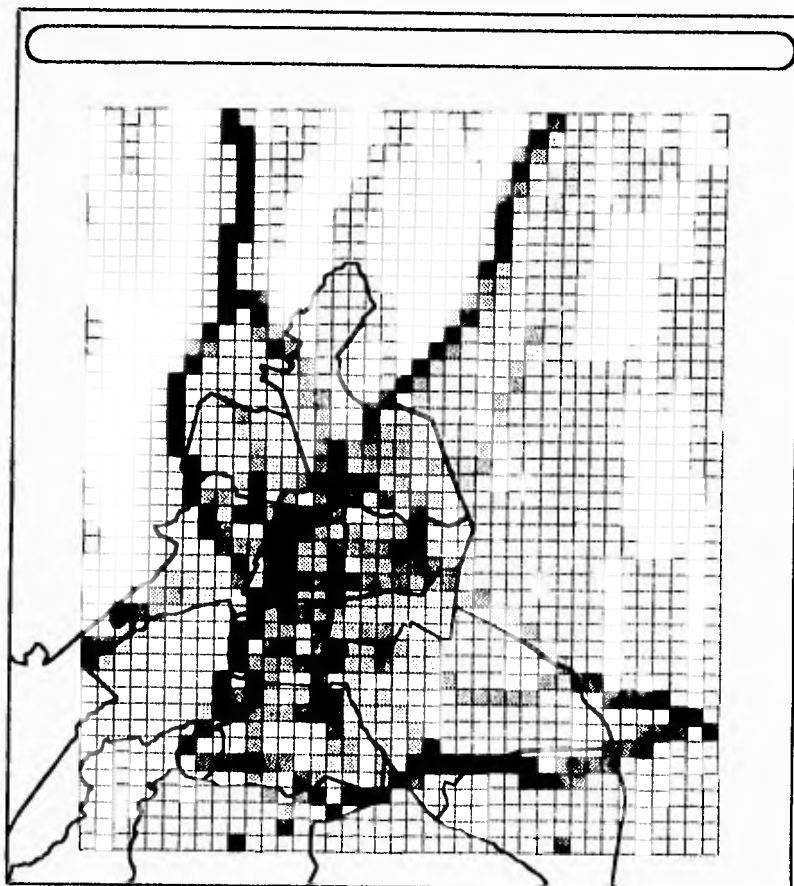
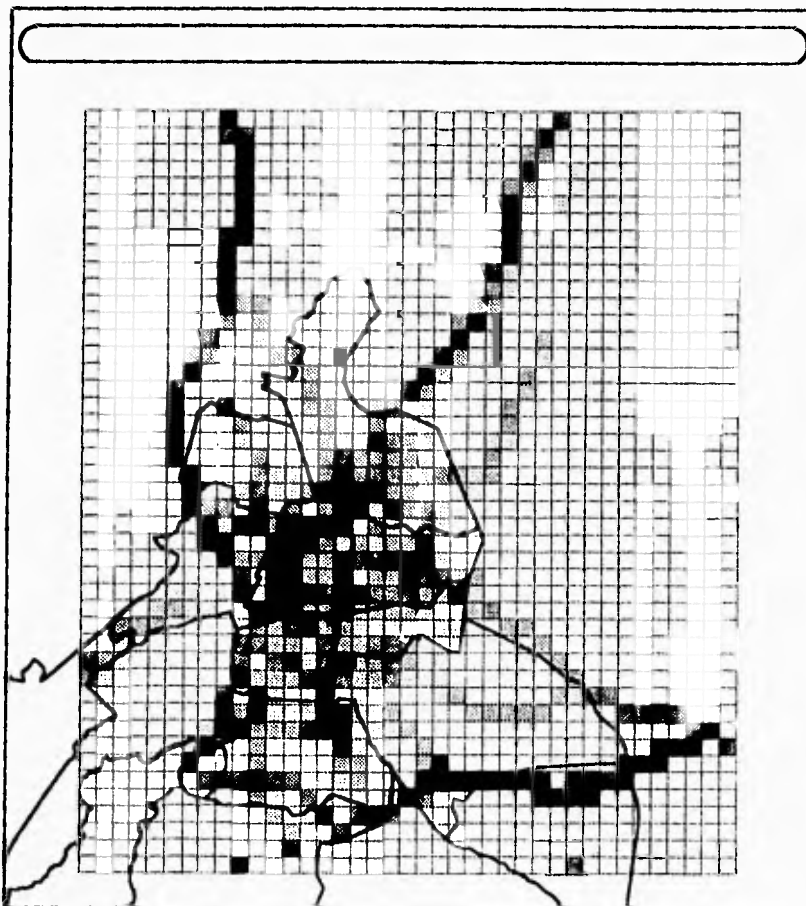


Figura 6.16
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 15:00 a las 16:00 hrs.

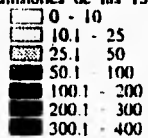
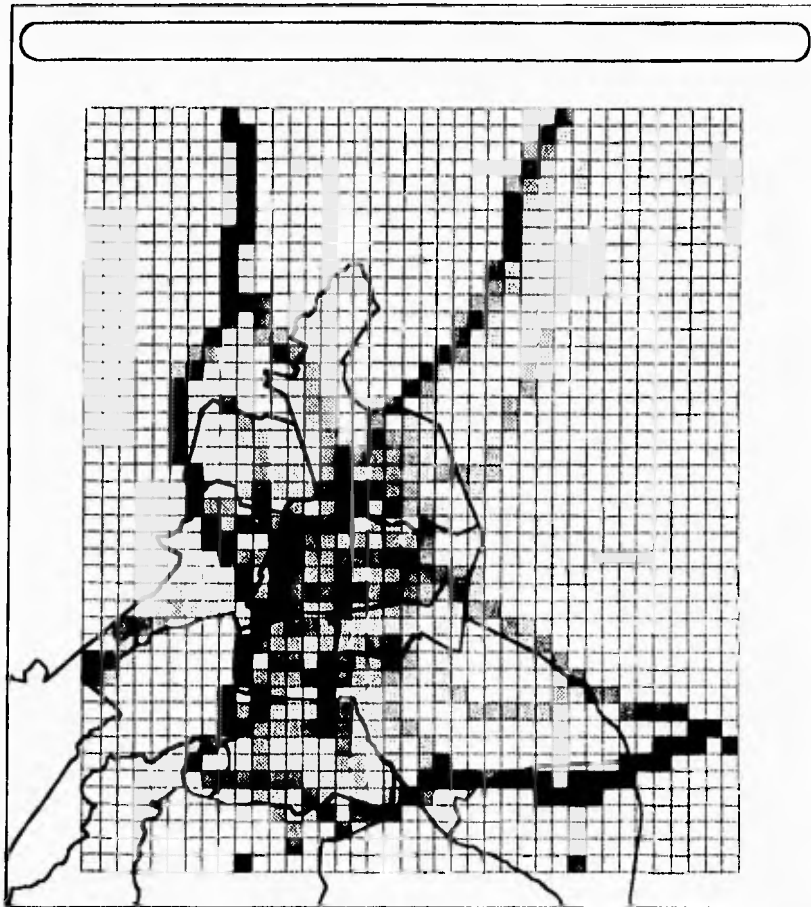


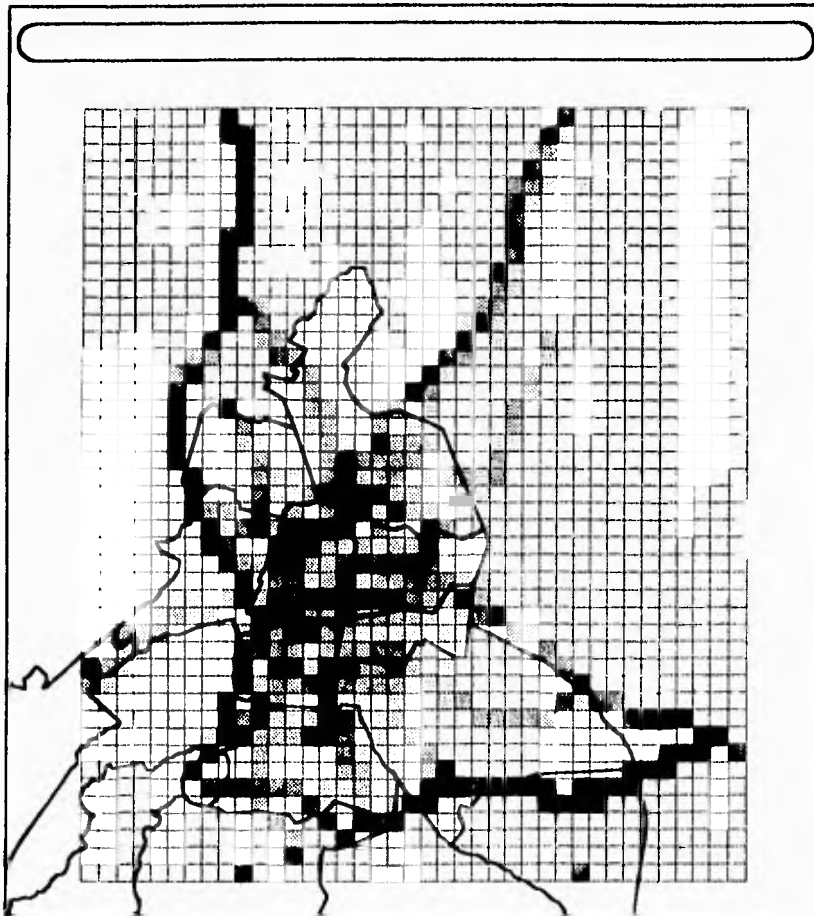
Figura 6.17
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco
Delegaciones
Emisiones de las 16:00 a las 17:00 hrs.

□	0 - 10
▤	10.1 - 25
▥	25.1 - 50
▧	50.1 - 100
▨	100.1 - 200
▩	200.1 - 300
■	300.1 - 400

Figura 6.18
Emisiones Vehiculares de CO
[g\seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 17:00 a las 18:00 hrs.

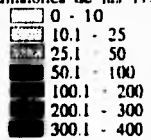
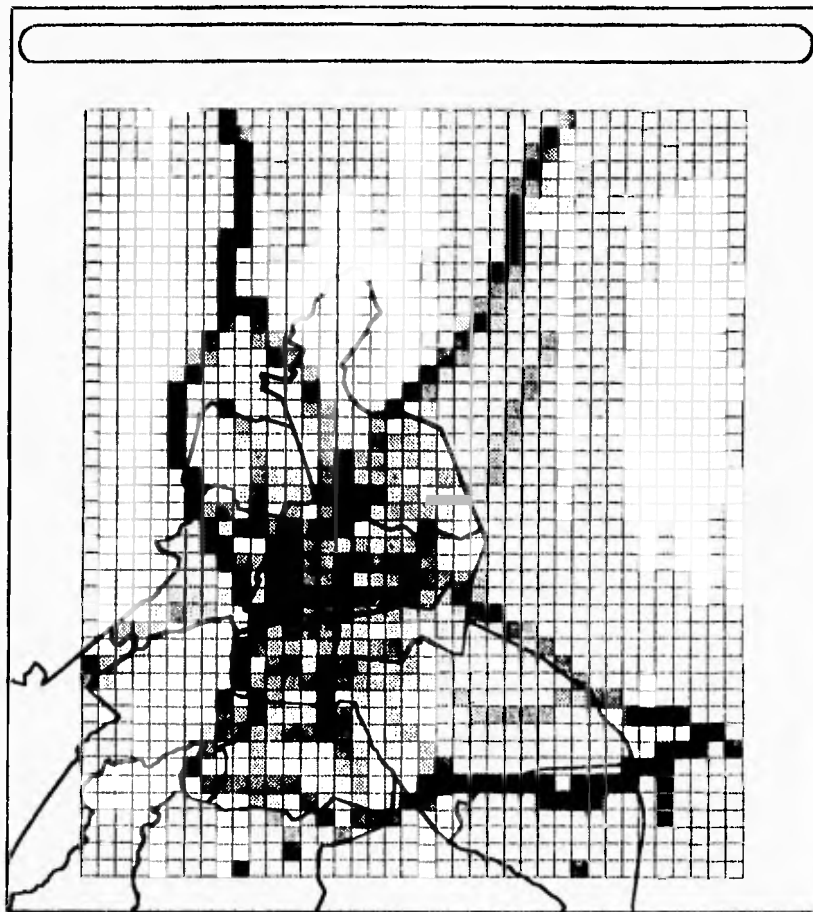


Figura 6.19
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 18:00 a las 19:00 hrs

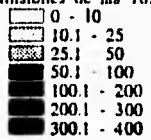
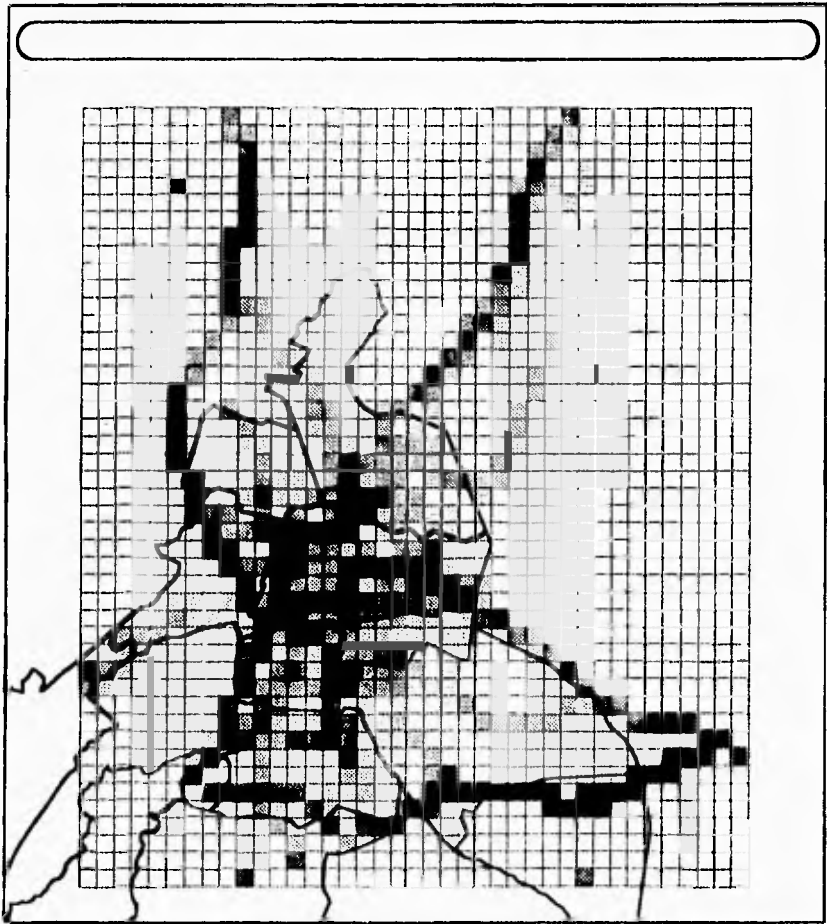


Figura 6.20
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



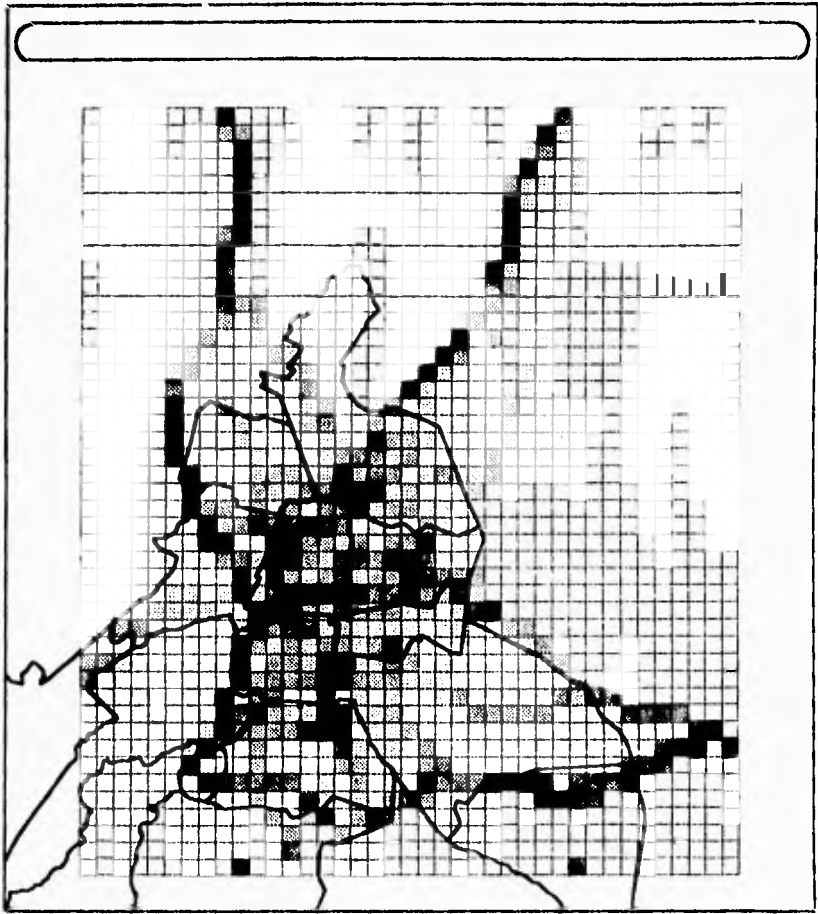
Marco

Delegaciones

Emisiones de las 19:00 a las 20:00 hrs

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

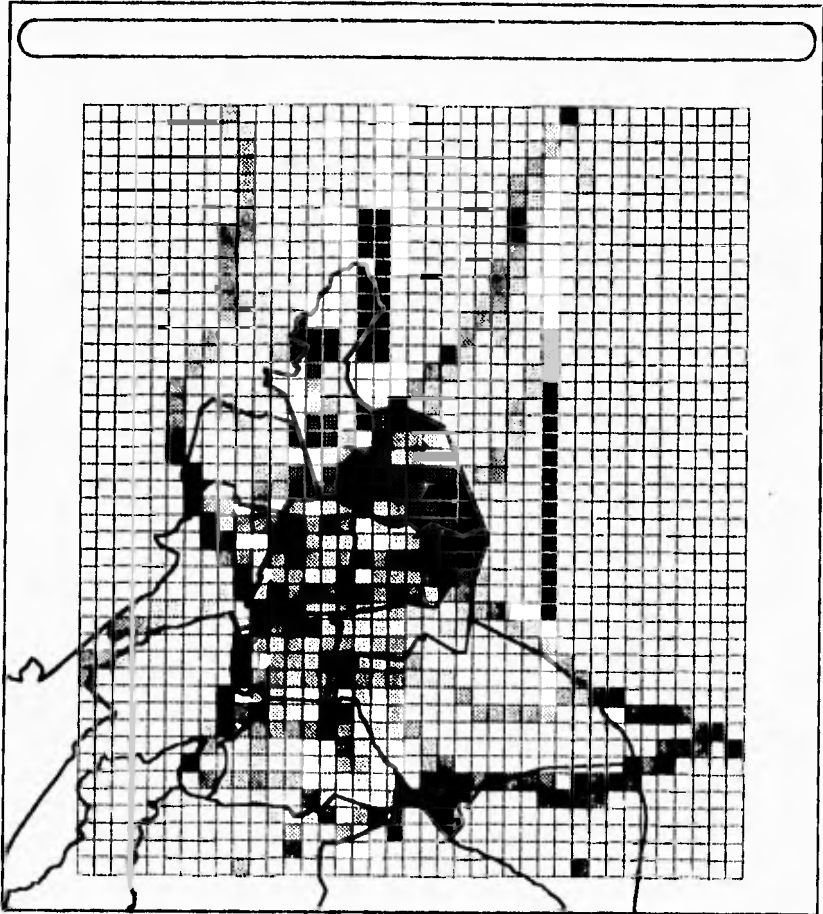
Figura 6.21
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco
Delegaciones
Emisiones de las 20:00 a las 21:00 hrs

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

Figura 6.22
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 21:00 a las 22:00 hrs.

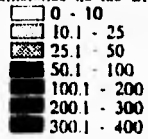
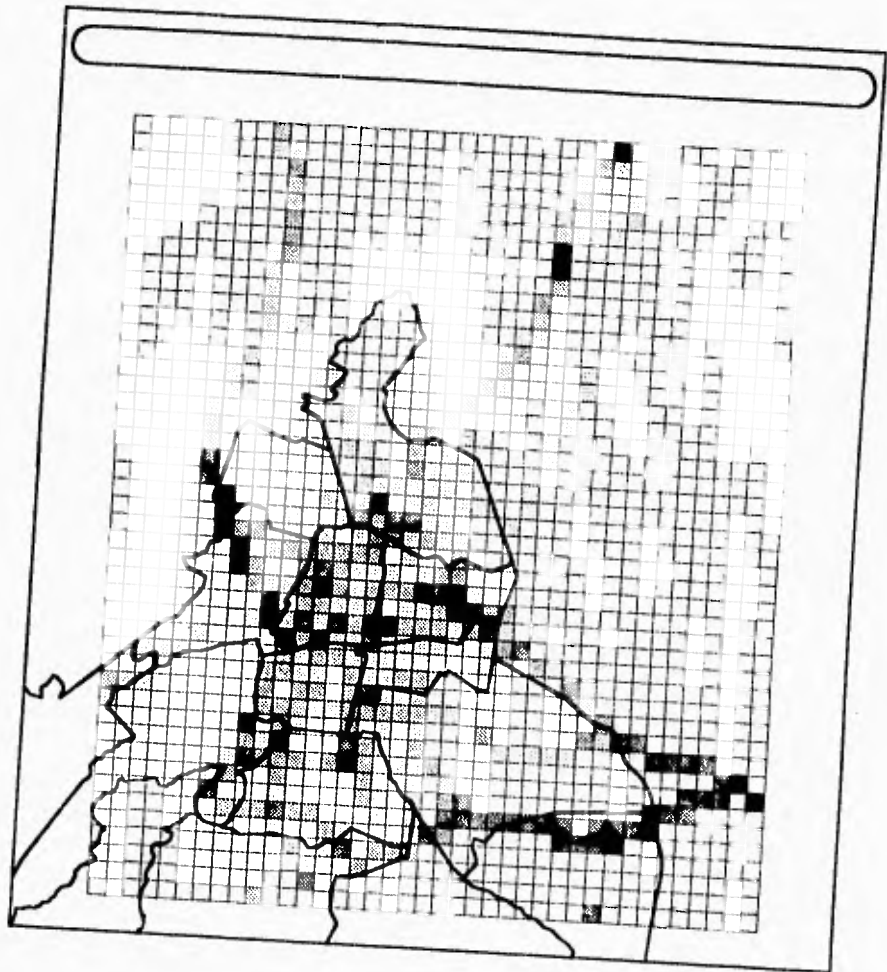


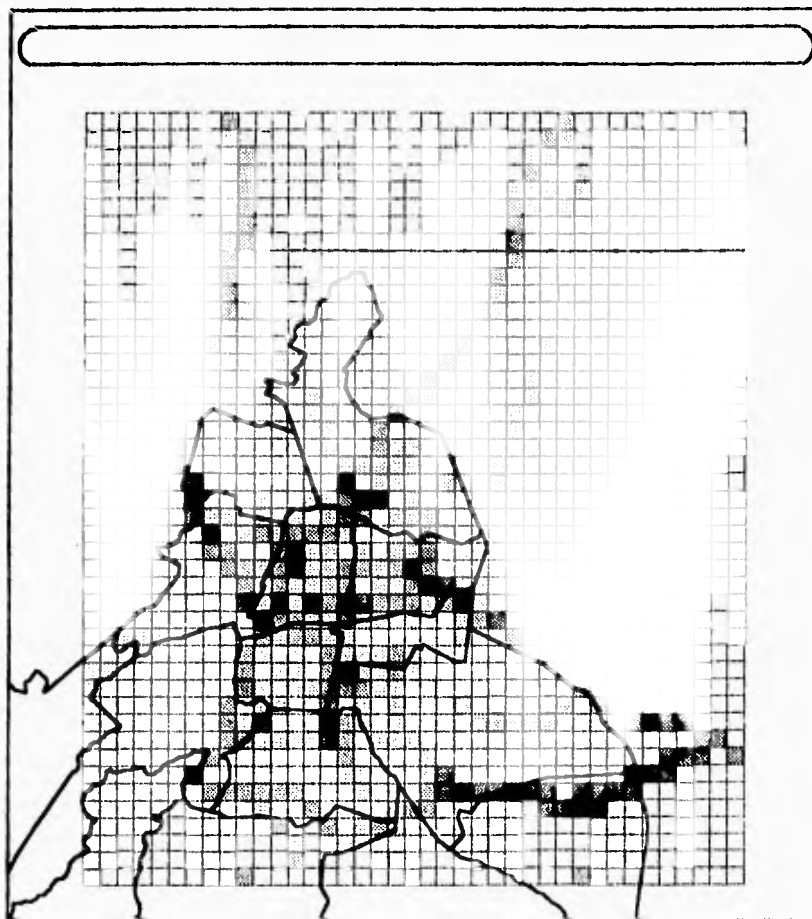
Figura 6.23
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco
Delegaciones
Emisiones de las 22.00 a las 23.00 hrs

0 - 10
10.1 - 25
25.1 - 50
50.1 - 100
100.1 - 200
200.1 - 300
300.1 - 400

Figura 6.24
Emisiones Vehiculares de CO
[g/seg]



Marco

Delegaciones

Emisiones de las 23:00 a las 24:00 hrs.

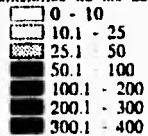
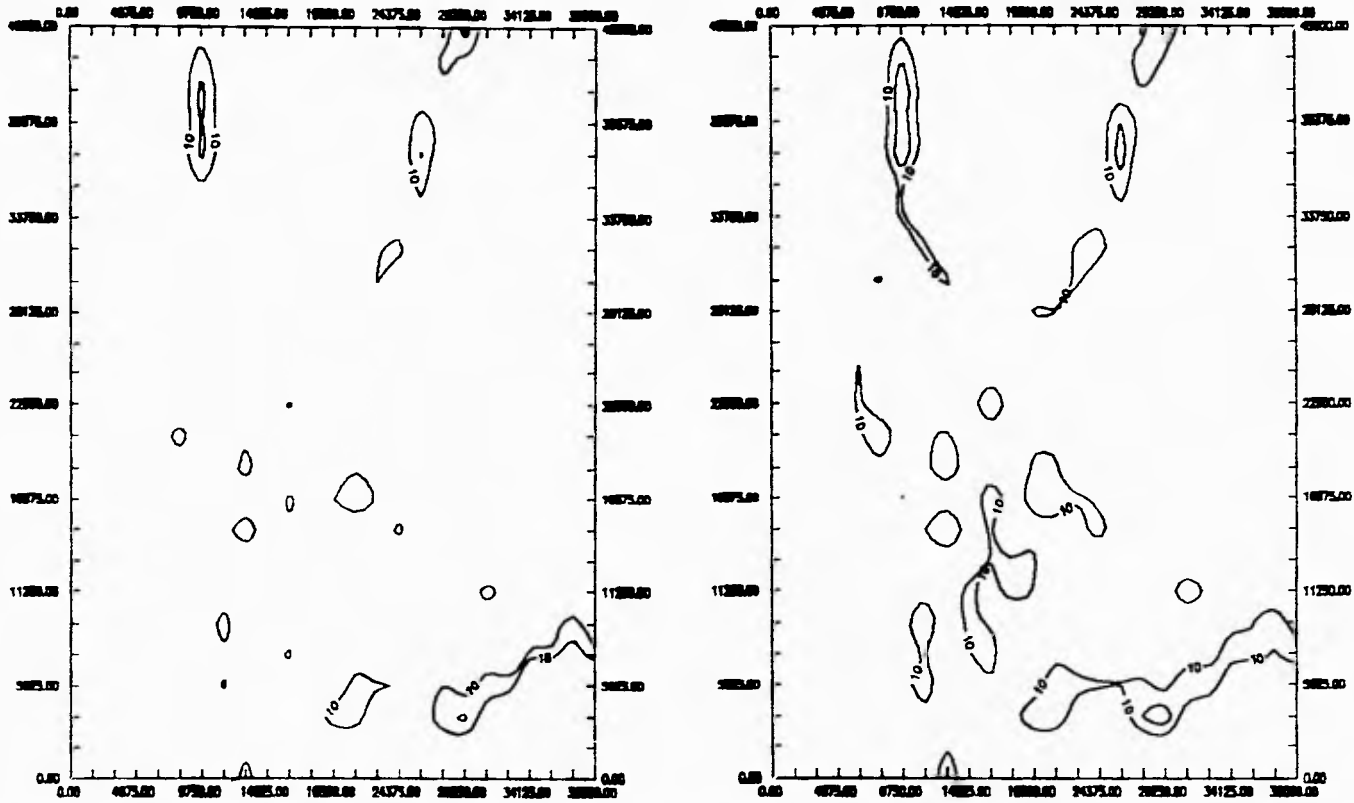


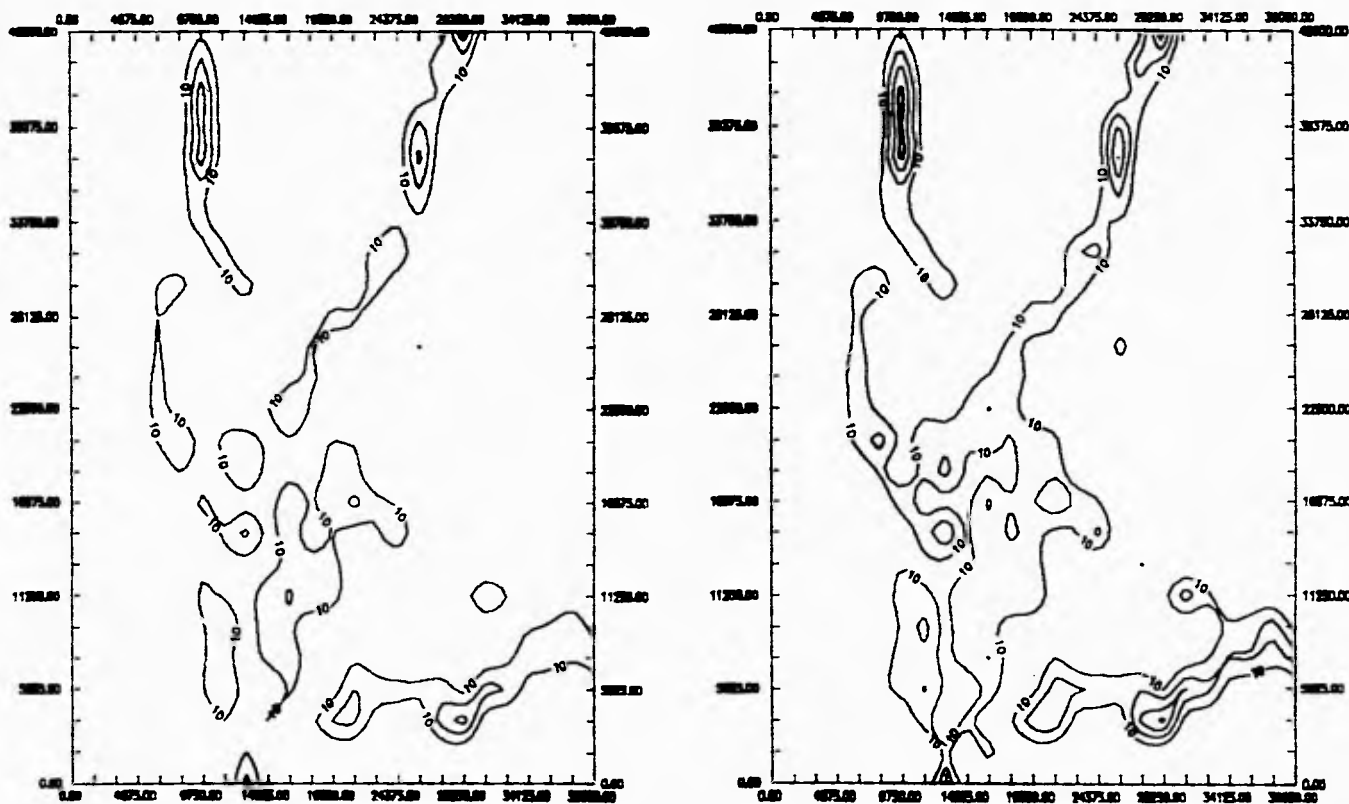
Figura 6.25
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 00:00 a las 01:00 hrs.

Emisiones de las 01:00 a las 02:00 hrs.

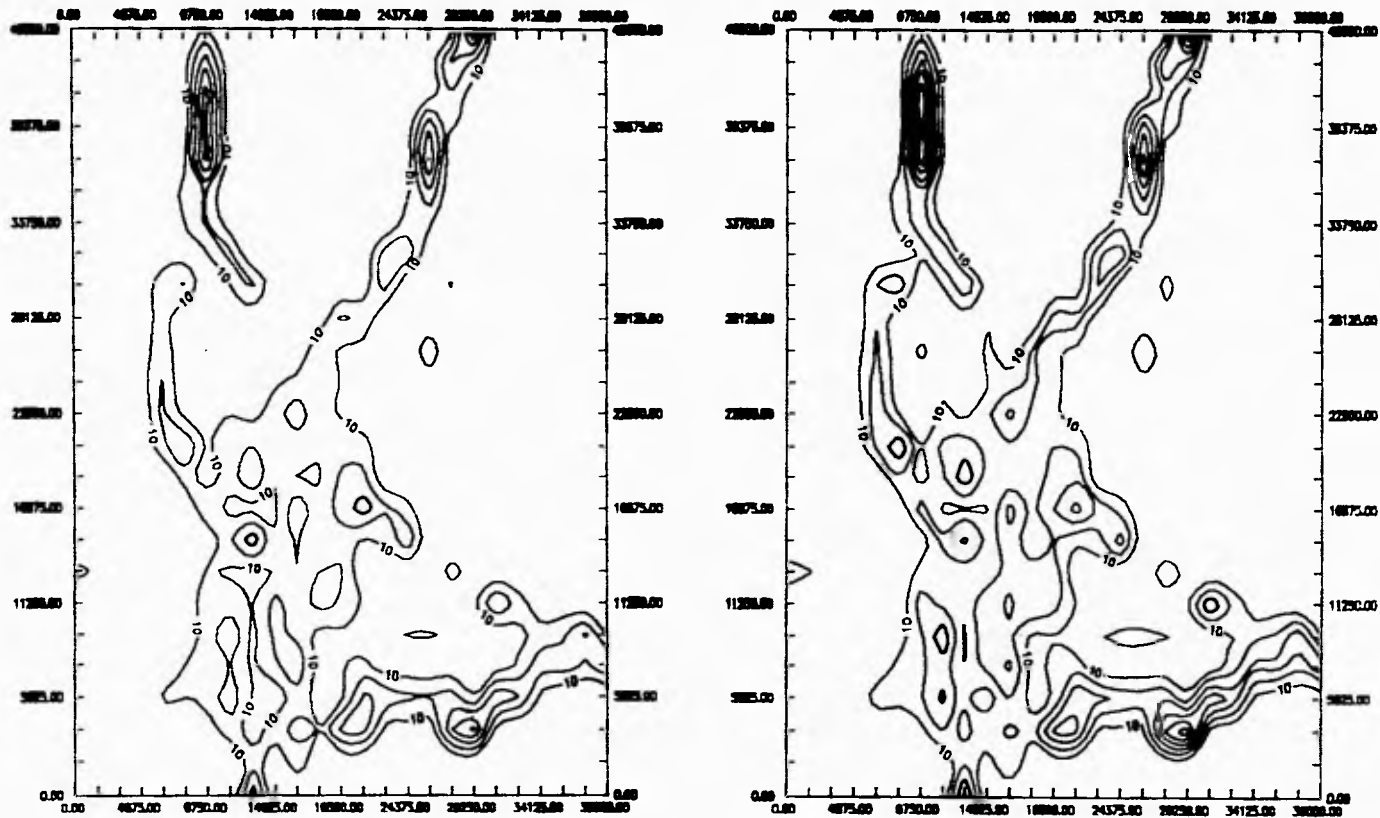
Figura 6.26
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 02:00 a las 03:00 hrs

Emisiones de las 03:00 a las 04:00 hrs.

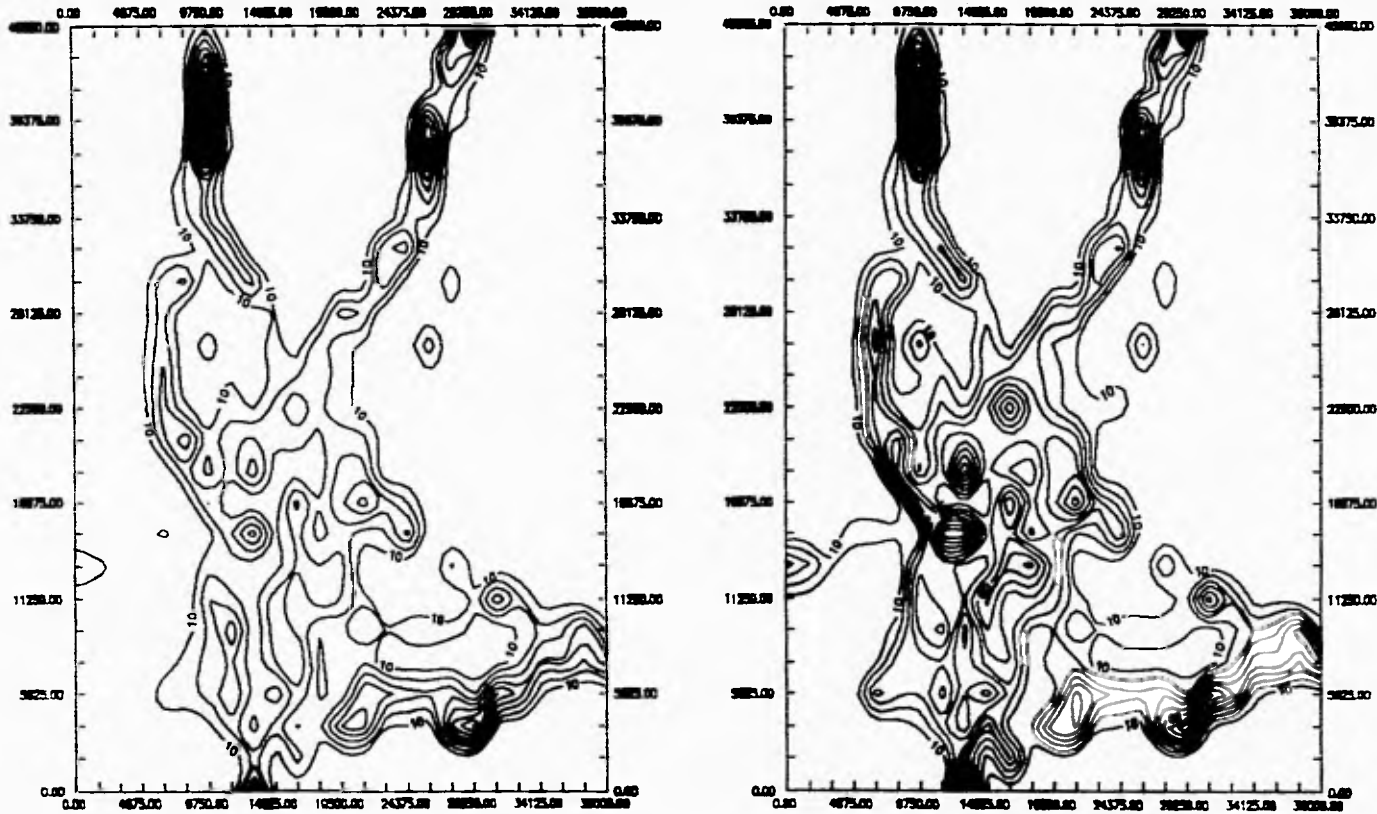
Figura 6.27
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 04:00 a las 05:00 hrs.

Emisiones de las 05:00 a las 06:00 hrs.

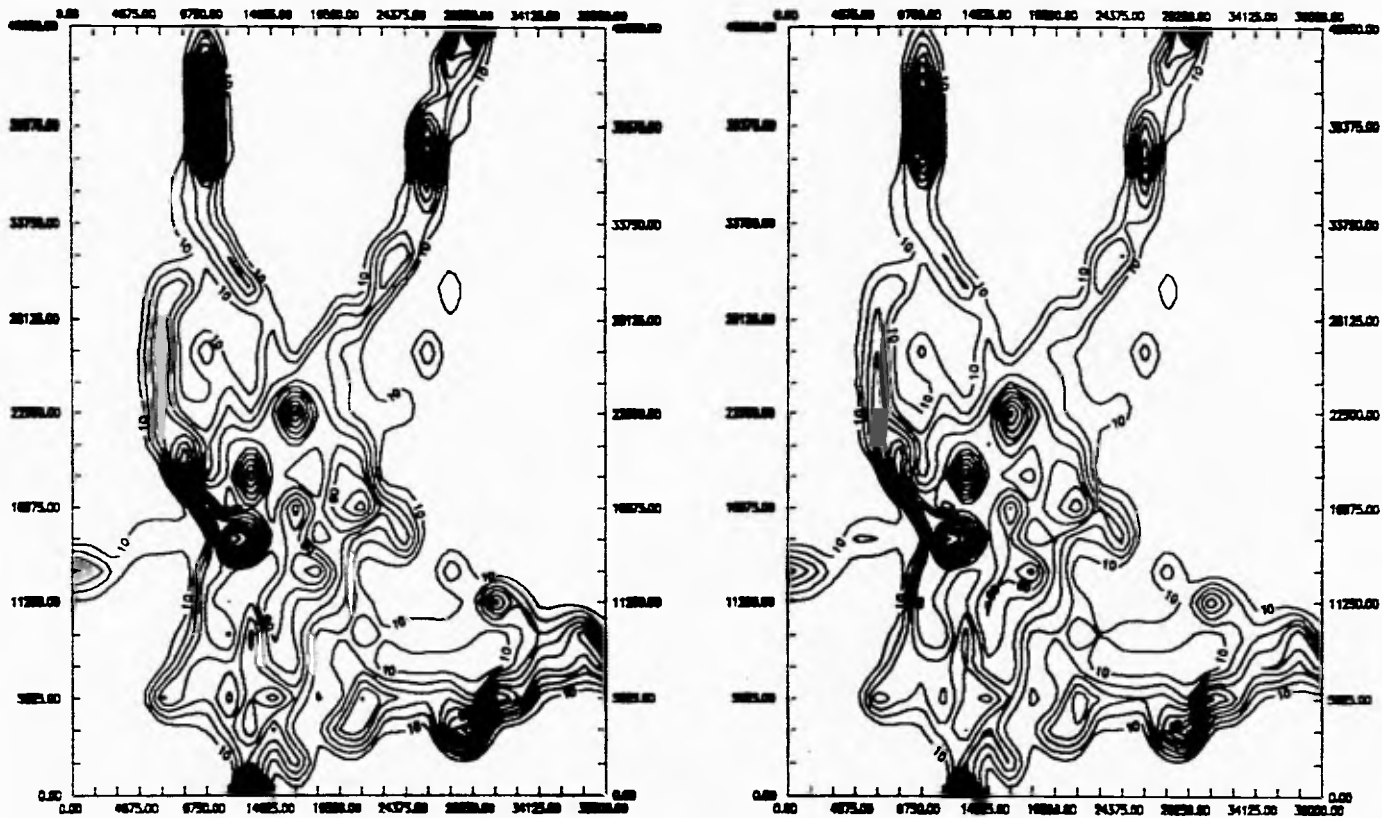
Figura 6.28
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 06:00 a las 07:00 hrs

Emisiones de las 07:00 a las 08:00 hrs

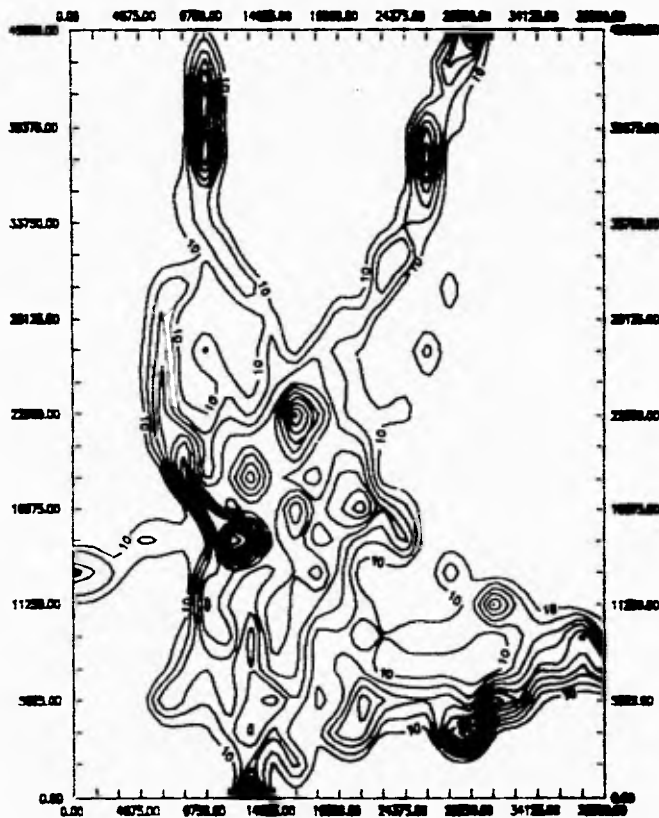
Figura 6.29
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



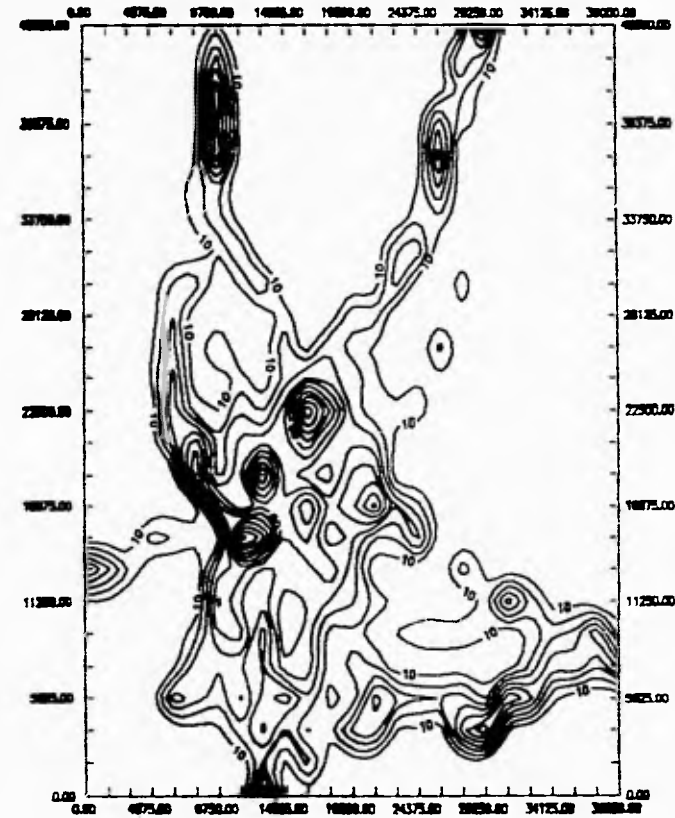
Emisiones de las 08:00 a las 09:00 hrs

Emisiones de las 09:00 a las 10:00 hrs.

Figura 6.30
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]

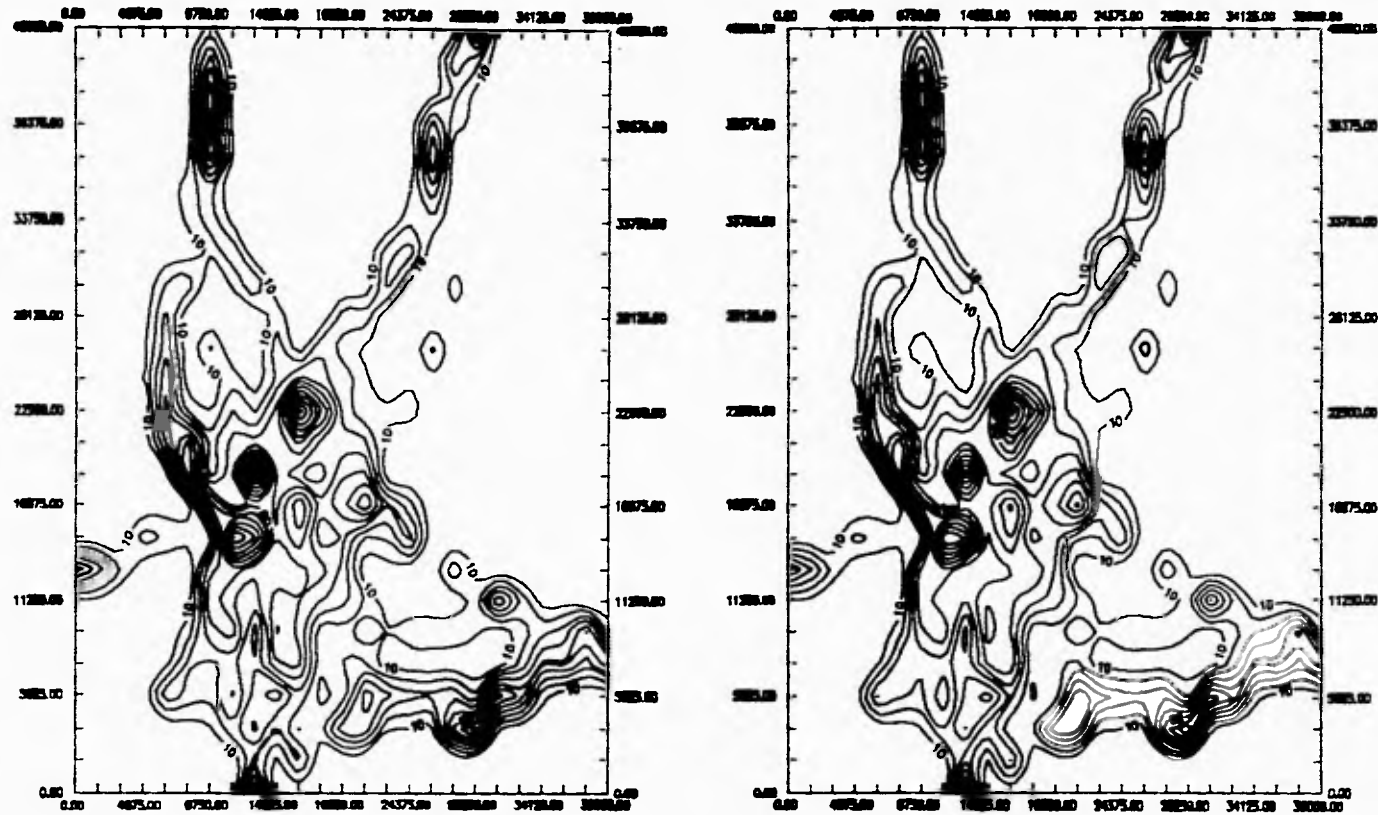


Emisiones de las 10:00 a las 11:00 hrs.



Emisiones de las 11:00 a las 12:00 hrs.

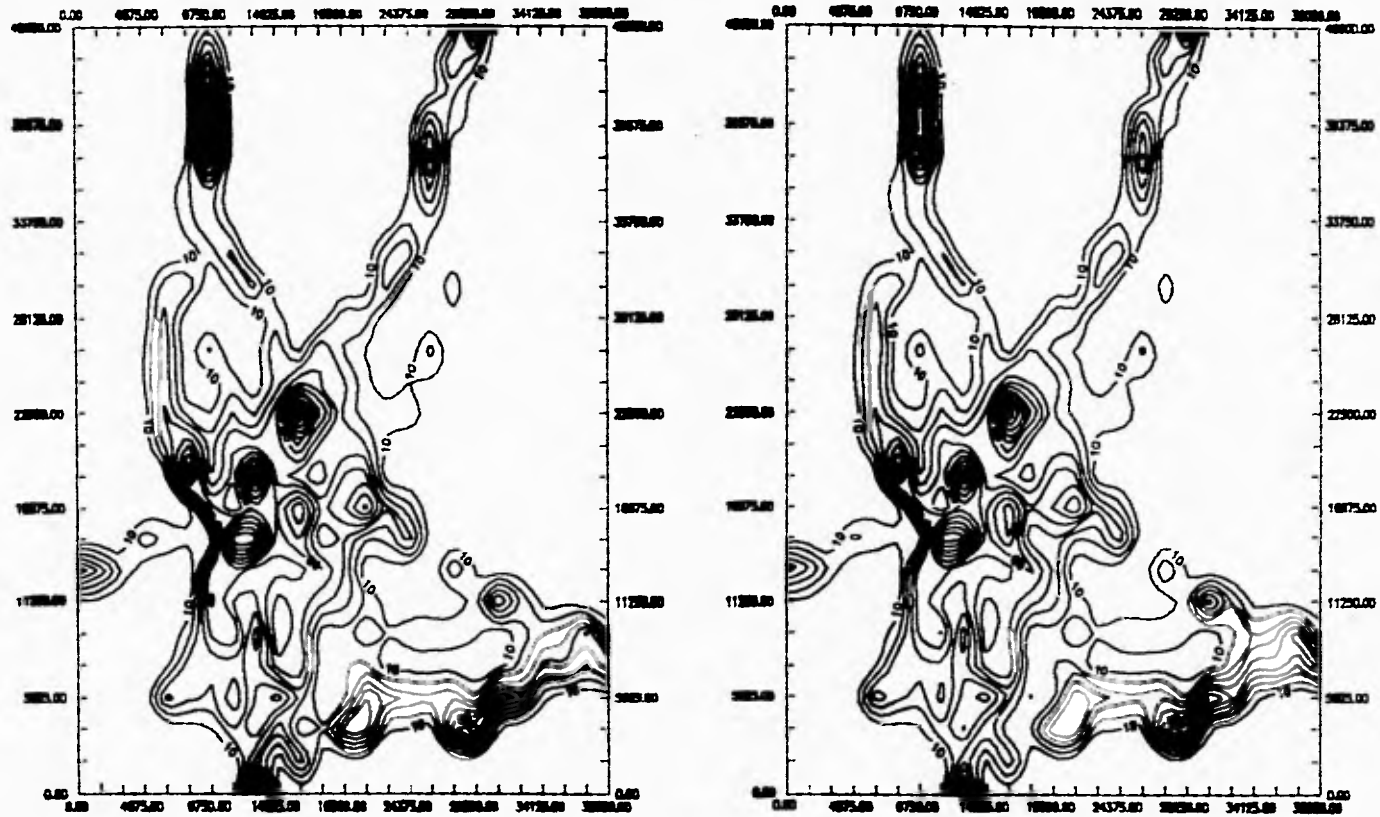
Figura 6.31
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 12:00 a las 13:00 hrs.

Emisiones de las 13:00 a las 14:00 hrs.

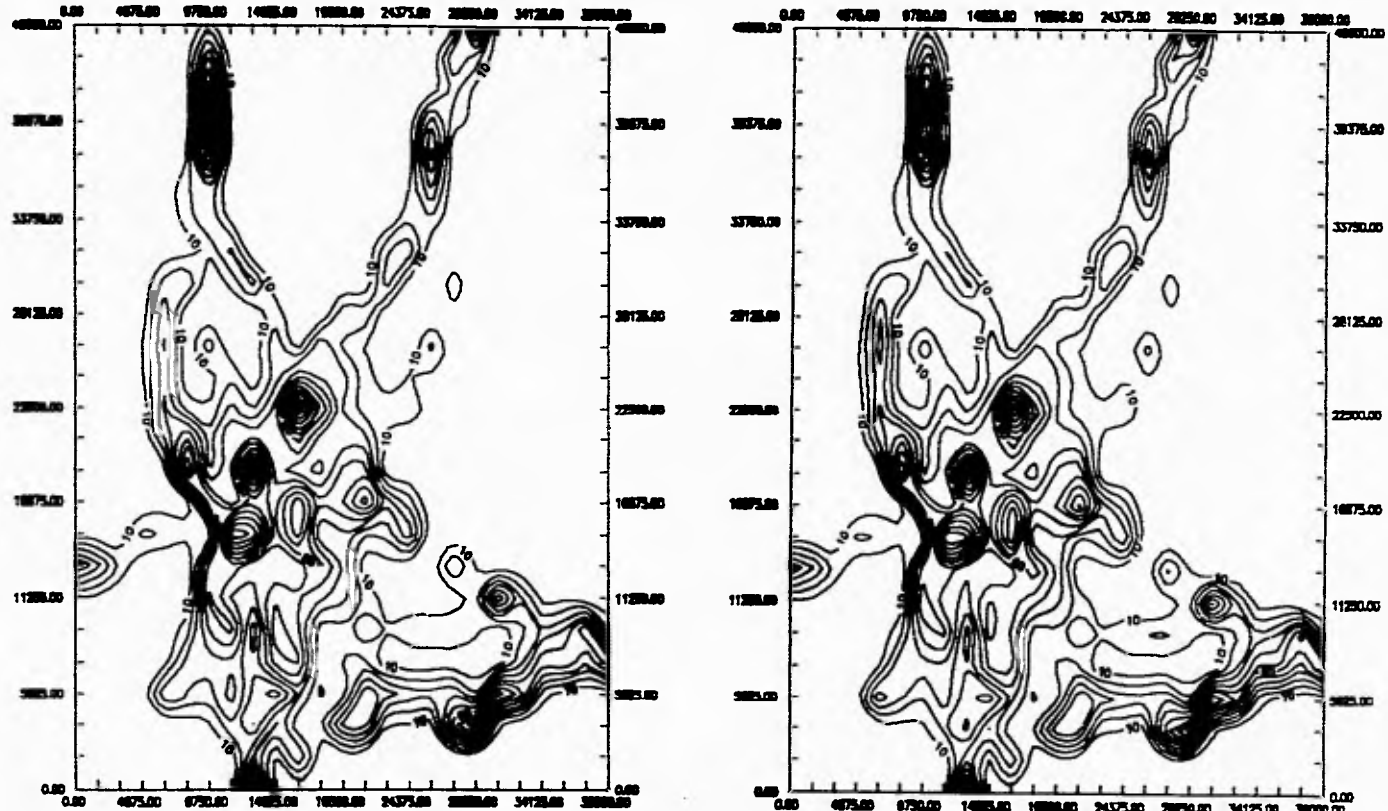
Figura 6.32
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 14:00 a las 15:00 hrs.

Emisiones de las 15:00 a las 16:00 hrs.

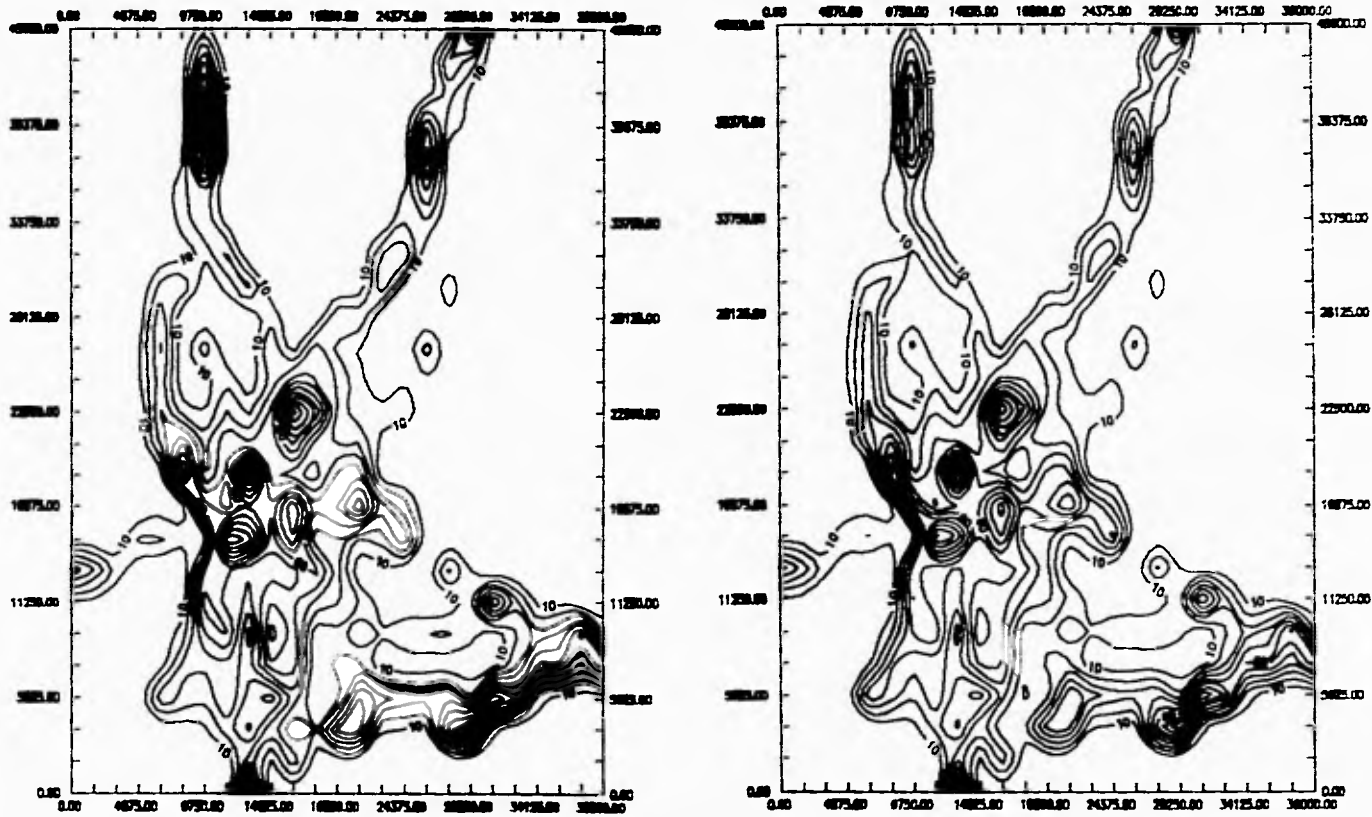
Figura 6.33
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 16:00 a las 17:00 hrs.

Emisiones de las 17:00 a las 18:00 hrs.

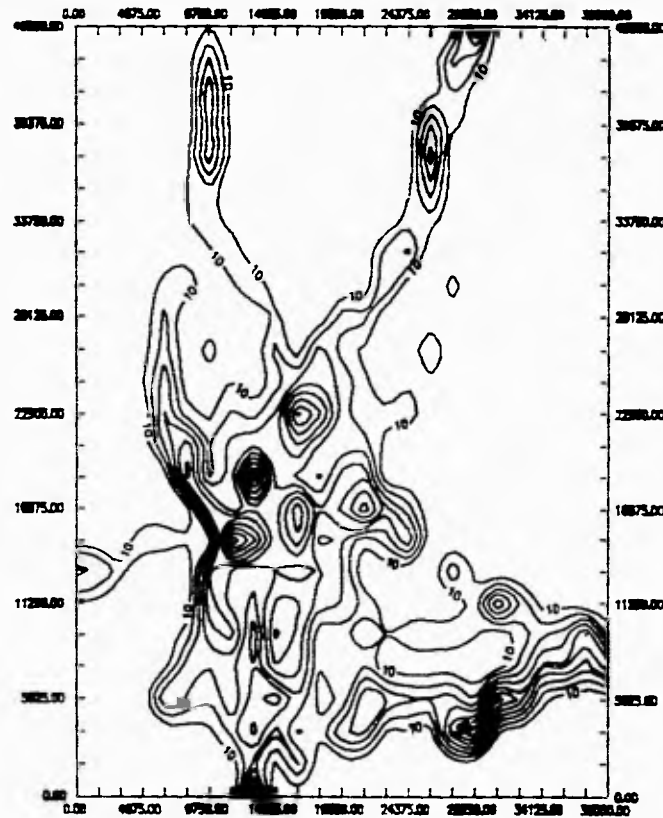
Figura 6.34
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



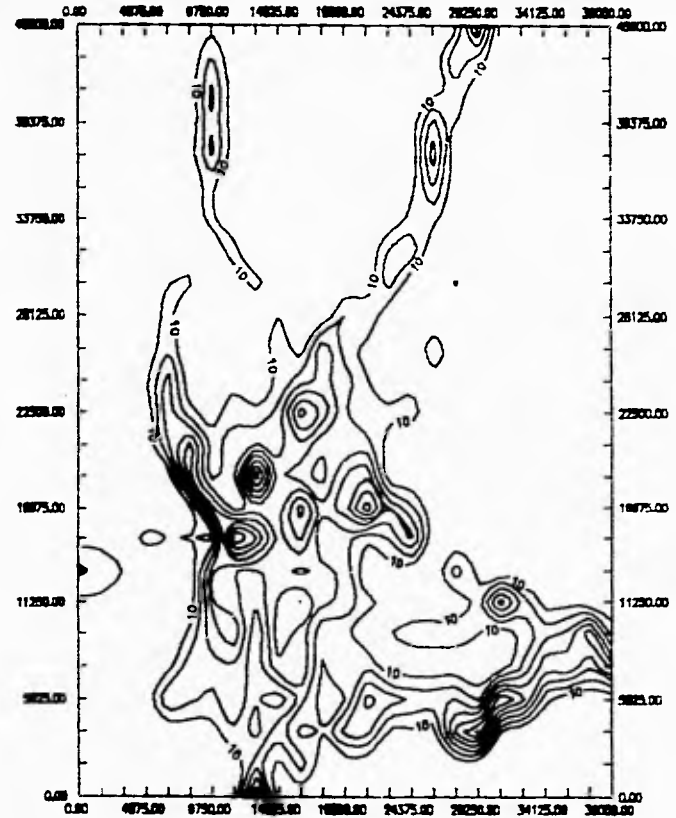
Emisiones de las 18:00 a las 19:00 hrs.

Emisiones de las 19:00 a las 20:00 hrs

Figura 6.35
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]

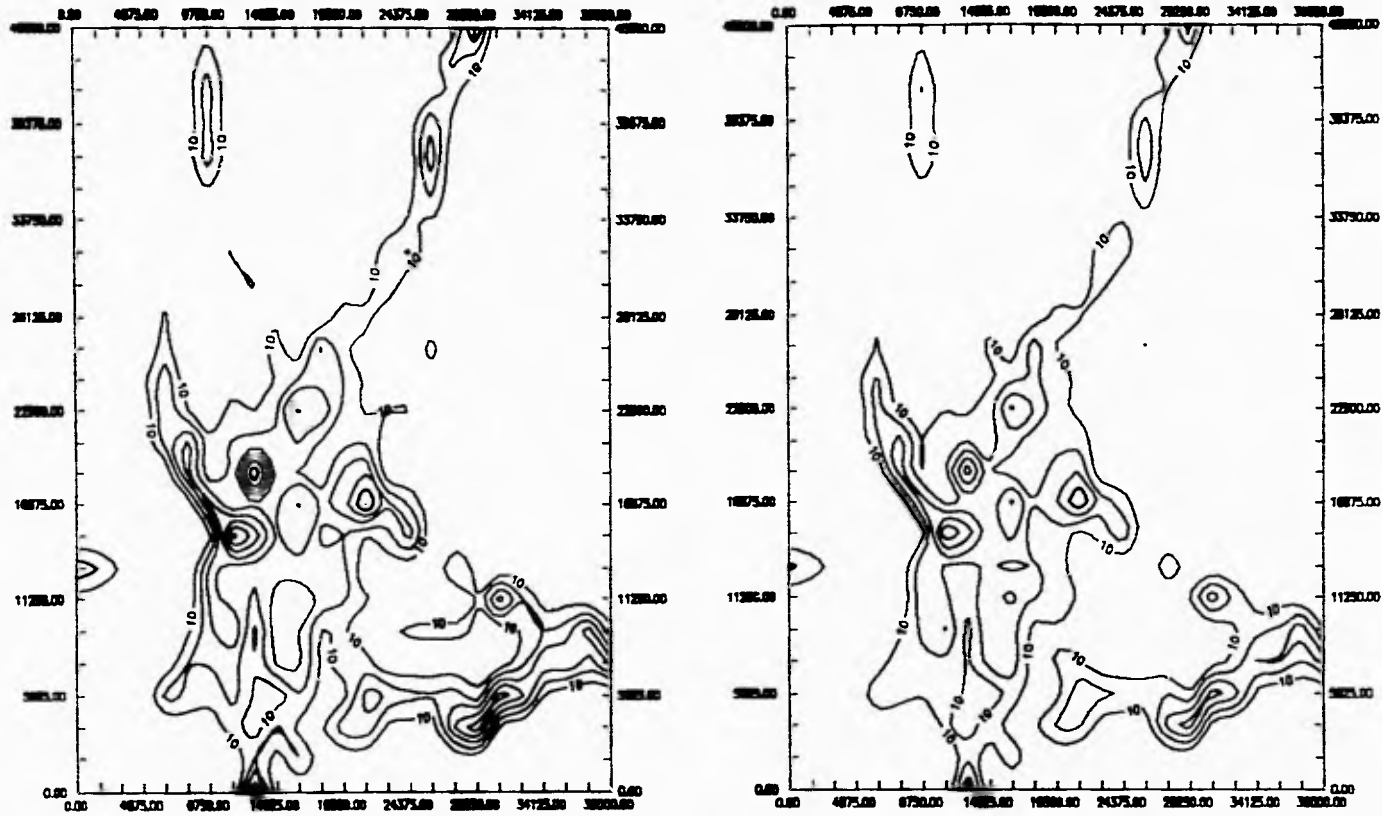


Emisiones de las 20:00 a las 21:00 hrs.



Emisiones de las 21:00 a las 22:00 hrs.

Figura 6.36
Emisiones Vehiculares de CO [g/seg]



Emisiones de las 22:00 a las 23:00 hrs.

Emisiones de las 23:00 a las 24:00 hrs.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La principal ventaja que ofrece el modelo de emisiones vehiculares desarrollado en el presente trabajo es que las modificaciones que constantemente sufren los patrones y distribuciones del tráfico en la ciudad pueden fácilmente incorporarse con un mínimo de esfuerzo y así generar emisiones actualizadas y/o simular escenario alternos. Sin embargo, el problema principal que se presenta para implementarlo es la carencia de información (tanto en calidad como en cantidad); además de la disponibilidad de dicha información por parte de las autoridades. Esto limita considerablemente la utilidad que puede tener el modelo.

Otra ventaja que presenta el modelo de emisiones es la utilidad de poderlo aplicar a cualquier otra zona urbana, siempre y cuando se cuente con la información que requiere dicho modelo.

Los resultados que se obtuvieron con el modelo presentado en este trabajo indican que los patrones de distribución espacial y temporal de las emisiones son congruentes con el comportamiento del tráfico vehicular existente en la vialidad primaria de la Ciudad de México. Sin embargo, se recomienda el acoplamiento de un modelo de tráfico que genere los patrones espaciales y temporales de los flujos vehiculares, para así contar con una herramienta de simulación más poderosa y versátil para modelar la generación de las emisiones vehiculares en el Valle de México.

Debido a que no se cuenta con la información que se requiere para calcular las emisiones generadas sobre la vialidad secundaria, se recomienda llevar a cabo un estudio de aforos vehiculares sobre algunas vías características de la vialidad secundaria o obtener una relación entre los vehículos que circulan sobre la vialidad primaria y la secundaria, como se describe en la sección V.4.2

En lo referente al Sistema de Información Geográfico, se demostró que es posible acoplarlo con un Modelo de Emisiones Vehiculares de una manera fácil y eficiente, permitiendo aprovechar la enorme capacidad de almacenamiento, manipulación y despliegue de gran cantidad de información que tiene dicho sistema. Además se demostró que un Sistema de Información Geográfico es una herramienta básica e indispensable para auxiliar el procesos de modelación y simulación, en donde obtener resultados prácticamente inmediatos es una prioridad para apoyar al tomador de decisiones en el análisis de alternativas de solución tanto a corto, como a mediano y largo plazo.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Aarne, V. P. and Jeffrey P. J., *Environmental Pollution and Control*. Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University. Durham, North Carolina. 1983
- ATLAS SIGSA, *Cartografía Básica: Ciudad de México, escala 1:20,000*, Sistemas de Información Geográfica, S.A.. México, 1986.
- Bravo Alvarez, H., *La contaminación del aire en México*, Fundación Universo Veintiuno. México, 1987.
- Burch, J.G. and Grudnitski, G., *Information Systems, Theory and Practice*, John Wiley and Sons. New Jersey, 1986.
- Burrough, P.A., *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon Press, Oxford, U.K., 1986.
- Carbajal, C., *Estudio sobre los factores físicos utilizados en los modelos matemáticos de dispersión atmosférica "HOTMAC" Y "RAPTAD", para su uso en la zona metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México, 1992.
- Dueker, K.J., *Geographic Information Systems and Computer-Aided Mapping*, Journal of the American Planning Association #53. 1987.
- Flores, J.A., *El Transporte en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Grandes Problemas de la Ciudad de México, Colección Desarrollo Urbano. DDF y Plaza & Janés Editores. México, 1988.
- Fuentes, V., Jazcilevich, A., Aguirre, R., Wellens, A., Aysa, J., Rivera, C., *Modelo metropolitano de gestión de la calidad del aire*. Informe final, presentado a la Dirección de Ecología, Departamento del Distrito Federal. DEPEFI, UNAM. México, 1993.
- Fuentes G., V. *Simulación de la calidad del aire del Valle de México mediante un modelo de dispersión*. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1987.
- García Jurado, R. J., *Percepción Remota y Procesamiento de Imágenes Digitales en la Gestión Informática para la Percepción*. Tesis, 1994.
- Goodchild, M.F., Parks, B.O. and Steyaert, L.T., *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press. USA, 1993.
- Japan International Cooperation Agency (JICA), *The Study on Air Pollution Control Plan in the*

Federal District. Final Report, 1988.

Legorreta, J., *El Transporte Público Automotor en la Ciudad de México y sus Efectos en la Contaminación Atmosférica. Medio Ambiente y Calidad de Vida en la Ciudad de México*, Colección Desarrollo Urbano. DDF y Plaza & Janés Editores. México, 1988.

Levine, J. and Landis J.D., *Geographic Information Systems for Local Planning*, American Planning Association Journal. USA, 1989.

Manual para Talleres Mecánicos, *Ahorro de Gasolina y Reducción de la Contaminación*. Instituto SEDUE

Quadri, T. G. y Sánchez C.L., *La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica*. Ed. Limusa. México, 1992.

Rafael Cal y Mayor R. S., James Cárdenas G., *Ingeniería de Transito, Fundamentos y Aplicaciones*, Séptima edición, Edit. Alfaomega. México, 1994.

Reynolds, S. D., Stinfeld, J. H., Roth, P. M., Roberts, P. J. And Lie, M., *Mathematical Modeling of Photochemical Air Pollution - II. A Model and Inventory of Pollutant Emissions*. Department of Chemical Engineering and Systems Applications Inc.. California, 1973.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de proyectos, Servicios Técnicos y Concesiones. *Manual de Capacidad Vial*, Primera Edición. México, 1991.

Secretaría de Desarrollo Social e Instituto Nacional de Ecología. *Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1991-1992*. SEDESOL, 1993.

Secretaría de Desarrollo Social e Instituto Nacional de Ecología. *Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1993-1994*. SEDESOL, 1994.

Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*, Special Report 209, National Research Council. Washington, D.C., 1985.

Valenzuela, C.R., *Basic Principles of Geographic Information Systems, Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*, Kluwer Academic Publisher. Holanda, 1991.

Williams, M.D., Porch, W., *Application of a three-dimensional prognostic model to Mexico City air Quality Studies*. Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-91-825, 1991.