

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY

CAMPUS MONTERREY
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



MODELO DE EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DE
CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR EMISIONES DEL TRANSPORTE Y
SU APLICACIÓN AL AREA METROPOLITANA DE MONTERREY

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

PRESENTA:

JORGE RAMSÉS SÁNCHEZ GUTIÉRREZ

MONTERREY, N. L.

OCTUBRE 2003

DEDICATORIA

A mis Papás:

Por perpetuar en el legado más valioso que se puede ofrecer: La educación y formación de los hijos.

A mi Veracruz:

Por trascender, gracias a su mar de esencias humanas, de algarabía y de naturaleza generosa.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que representa la estructura básica de convivencia y formación a la que un ser humano puede acceder, en la cual se afianzan y cimientan los objetivos de toda persona.

Al Dr. Gerardo Mejía, no son suficientes los argumentos para agradecer que su conocimiento, su actitud y valor humano me hallan sido también compartidos. Esto, para poder consolidar una etapa más en mi vida. A la Sra. Leticia Bravo y a Gerardito. ¡Gracias!

Al Dr. Vicente Garza y al Dr. Alberto Mendoza, su disponibilidad, tiempo, orientación y conocimiento en el ámbito permitieron que este trabajo sea uno de calidad y de utilidad al servicio de la sociedad.

A mis amigos de Juan Díaz, a toda esa gran flota que ríe, toma, se divierte pero que a pesar de las adversidades es feliz.

A la “Vieja Guardia”, que es el núcleo de amistad más trascendente que existe a mi alrededor y del cual me jacto de pertenecer, en donde las fuerzas de la unión entre seres que comparten ideales, pensamientos y fines comunes representa la mayor grandeza que existe: ¡Vivir!.

A Verónica, sin tu amor, paciencia, carácter y comprensión nada de esto tendría razón haber sucedido: ¡Te amo!

A la Sra. Bassy y a Don Toño, pareja de bondad, de plena convicción por el amor al prójimo y la sana convivencia, sus actos y hechos ante mí lo demuestran y quedan reflejados en la culminación de este trabajo. ¡Sin ustedes, nada de esto se leería!

A la presencia de mis nuevos amigos: Marco Martínez, Wilson Patraca, Arturo Esperón, Jed Horn, Ruth Bueras, Rosa María Gómez, Alejandra Estrada, ¡Gracias!. ¡Ustedes son parte de esta cosecha!. Y muchos más.

RESUMEN

La contaminación originada por el transporte vehicular se ha convertido en uno de los problemas ambientales más crecientes en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). En este trabajo se propone una metodología de evaluación de las de control de la contaminación por transporte aplicada al AMM.

La evaluación de las estrategias de control se realiza considerando el parque vehicular de automóviles particulares y taxis (LDGV), camionetas pick-ups (LDGT1) y autobuses de transporte urbano (HDDV) que están registrados en el año 2000 en el AMM. Así mismo, se identificaron las opciones de control de la contaminación por transporte. En este trabajo se seleccionaron las que se relacionaban con el uso de combustibles alternos como gas lp, gas natural, gasolina reformulada y el uso de vehículos eléctricos e híbridos, con la finalidad de ser probadas en la flota vehicular del AMM.

Las factores de emisiones de CO, HC y NO_x del parque vehicular se estimaron usando el Modelo Mobile 5 AMM aplicado a la flota vehicular registrada en el año 2000. Con los datos de los recorridos promedios diarios por tipo de vehículo en km/día y las cantidades de los tipos de vehículos mencionados, se estimaron las factores de emisión para dichos contaminantes en gr/km. Se encontró que los automóviles particulares y los taxis generan la mayor cantidad de emisiones de CO, HC y NO_x debido a sus cantidades dentro del parque vehicular y a sus recorridos en km diarios respectivamente.

La evaluación de las estrategias de control de la contaminación por transporte se hizo en base a dos escenarios que se resuelven por medio de programación lineal usando la subrutina LCONF de la librería IMSL para Fortran. El primer escenario consiste en minimizar los costos totales de inversión de las conversiones de los vehículos, sujeto a las restricciones que están constituidas por el diferencial de emisiones de CO, HC y NO_x en kg/veh-día. El diferencial de emisiones se calcula al restar los factores de emisión en kg/veh-día obtenidos con el Mobile 5 AMM con los que se obtienen con el uso de combustibles alternos mencionados. En el segundo escenario, se maximizan por

separado la reducción de emisiones de CO, HC y NO_x que representan la función objetivo y los costos de conversión individual representan al sistema de restricciones.

Los resultados para el primer escenario muestran que la opción de conversión a gas natural comprimido (GNC) produce grandes reducciones de emisiones de CO, HC y NO_x pero sus costos de conversión la hacen ser una opción cara. La opción del gas LP es una opción barata, mayormente difundida y con infraestructura disponible al público además de que genera similares reducciones de CO y NO_x como el GNC. Por otro lado, las opciones de vehículos eléctricos e híbridos reducen ampliamente las emisiones pero son técnica y económicamente no factibles en el actualmente para el AMM. En el caso de la combinación de las opciones de combustibles alternos para el escenario de minimización de emisiones, se obtuvieron cantidades totales de taxis y autobuses de transporte urbano convertidos a gas LP, GNC y eléctricos. Con lo anterior, se obtuvieron reducciones de emisiones de CO, HC y NO_x y un costo total de conversión fijado para cada corrida ejecutada.

Para el segundo escenario de evaluación, al fijar los montos de capital en tres corridas distintas para la maximización de reducciones de cada contaminante (CO, HC y NO_x), se obtuvieron también una combinación de las cantidades de vehículos particulares, taxis, camionetas pick-ups y autobuses de transporte público convertidos para una reducción de emisiones de CO, HC y NO_x. Para el caso de maximización de reducción de emisiones, el modelo toma las opciones de reducción que sean más baratas y que conlleven una reducción en emisiones mayor. En este escenario 2 se convierten mayormente los taxis a vehículos a gas lp y gas natural, así como los autobuses de transporte urbano a gas natural. Se considera que la evaluación de estrategias de reducción de la contaminación por transporte permite apoyar a la toma de decisiones en los programas para el mejoramiento de la calidad del aire del AMM. También se pueden agregar más opciones de control de la contaminación al modelo de evaluación propuesto y realizar un inventario de emisiones más preciso con la finalidad de obtener una base de emisiones más confiable.

INDICE

1.-	EL TRANSPORTE URBANO Y SU IMPACTO AMBIENTAL	
1.1	Análisis del crecimiento vehicular mundial	1
1.2	Emisiones de contaminantes de los vehículos automotores	6
1.3	Antecedentes de control de la contaminación por transporte	10
1.4	Antecedentes de control de la contaminación en el AMM	11
1.5	Problemática en el AMM por contaminación del transporte	12
1.6	Sistema de tráfico	13
1.7	Objetivo	15
1.8	Alcance	15
2.-	CONTAMINANTES GENERADOS POR EL TRANSPORTE	
2.1	La Contaminación Ambiental	17
2.1.1	Material Particulado.	18
2.1.2	Monóxido de Carbono (CO)	18
2.1.3	Ozono (O ₃)	19
2.1.4	Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	19
2.1.5	Bióxido de Azufre (SO ₂)	19
2.2	Efectos de los contaminantes sobre el ser humano	20
2.2.1	Efectos en la salud del Material Particulado	20
2.2.2	Efectos en la salud Monóxido de Carbono (CO)	21
2.2.3	Efectos en la salud Ozono (O ₃)	23
2.2.4	Efectos en la salud Óxidos de Nitrógeno	24
2.2.5	Efectos en la salud Bióxido de Azufre (SO ₂)	27
2.3	Efectos a la salud humana debido al ruido del tráfico urbano	26
2.3.1	Efectos físicos	28
2.3.2	Efectos psicológicos	28
2.4	Legislación Ambiental Mexicana aplicable a emisiones vehiculares	28
3.-	ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACION POR TRANSPORTE	
3.1	Estrategias de control de la contaminación del transporte	32

3.2	Elementos de una estrategia de control de la contaminación para transporte	36
3.3	Análisis de las estrategias de control de la contaminación por transporte	37
3.4	Programación lineal y su aplicación en problemas de contaminación del aire	41
4.-	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR TRANSPORTE	
4.1	Metodología de evaluación de estrategias de control de la contaminación por transporte para el AMM	43
4.2	Selección de opciones de reducción de la contaminación por transporte	45
4.3	Cálculo de emisiones del transporte	47
4.4	Metodología para el cálculo de los factores de emisión	51
4.5	Costos de las opciones de reducción de la contaminación por transporte	53
4.6	Proceso de evaluación de opciones de reducción de la contaminación por transporte	54
4.6.1	Primer Escenario: Minimización del costo total para una cierta reducción de emisiones de CO, HC y NO _x	54
4.6.2	Segundo caso: Maximizar la reducción de emisiones fijando una inversión económica	56
5.-	FACTORES DE EMISION DEL TRANSPORTE EN EL AMM	
5.1	Análisis de la flota vehicular del AMM	58
5.2	Ejecución del Modelo Mobile 5 para el AMM	60
5.3	Factores de emisiones vehiculares a partir de las opciones de reducción de la contaminación por transporte en el AMM	66
5.3.1	Gas reformulada	66
5.3.2	Gas Natural	68
5.3.3	Gas LP	71
5.3.4	Eléctricos	71
5.3.5	Híbridos	71
6.-	EVALUACIÓN DE ESCENARIOS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE EN EL AMM	
6.1	Cálculo de emisiones para LDGV (autos particulares, taxis), LDGT1 (camionetas pick-up) y HDDV (autobuses de transporte urbano) para el año 2000 en el AMM	73

6.2	Escenario 1: Minimización de costos de inversión sujeto a restricciones de emisiones de los contaminantes CO, HC y NO _x	75
6.2.1	Caso 1: Conversión de automóviles y taxis (LDGV), camionetas pick-up (LDGT1) y autobuses de transporte urbano (HDDV) a Gas LP	76
6.2.2	Caso 2: Conversión de automóviles y taxis (LDGV), camionetas pick-up (LDGT1) y autobuses de transporte urbano (HDDV) a Gas natural comprimido (GNC)	83
6.2.3	Caso 3: Uso de automóviles particulares , taxis (LDGV) y camionetas pick-up (LDGT1) de gasolina reformulada (GRF)	89
6.2.4	Caso 4:Combinación de los casos 1 (Gas LP) y 2 (GNC) que incluyen los casos de automóviles particulares, taxis y autobuses de transporte urbano impulsados por la electricidad y de autobuses de transporte urbano híbridos impulsados por diesel-electricidad	96
6.3	Escenario 2: Maximización de la reducción de emisiones para CO, HC y NO _x sujeto a un monto de inversión económica	103
6.3.1	Caso 1: Maximización de la reducción de emisiones es de CO sujeto a un monto de capital de inversión económica como restricciones	104
6.3.2	Caso 2: Maximización de las emisiones de HC sujeto a restricciones de costos de conversión	106
6.3.3	Caso 3: Maximización de las emisiones de NO _x sujeto a restricciones de costos de conversión	109
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
	REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS	114
	ANEXOS	117
	VITA	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Porcentajes de incremento en el uso de vehículos de pasajeros de 1970 1989.	5
Tabla 1.2	Contribución relativa porcentual del transporte vehicular a la contaminación en ciudades del mundo durante 1990 [Mage, 1995].	9
Tabla 1.3	Inventario de emisiones en ton/año para fuentes móviles en 1995 para el AMM [INE, 1997].	14
Tabla 2.1	Correlación entre las concentraciones de Carboxihemoglobina y las manifestaciones clínicas en seres humanos.	22
Tabla 2.2	Efectos del Bióxido de Azufre (SO ₂) sobre la salud humana	26
Tabla 2.3.	Niveles de ruido aproximado desde fuentes típicas	27
Tabla 2.4.	Normas Oficiales Mexicanas (ECOL) aplicables a las emisiones de fuentes Móviles [SEMARNAT, 2003].	29
Tabla 4.1	Lista de recomendaciones de reducción de la contaminación por parte del grupo de trabajo	46
Tabla 4.2	Clasificación de Vehículos [Radián ,1995].	53
Tabla 5.1	Cantidad de vehículos en los municipios del AMM en el año 2000	59
Tabla 5.2	Cantidades por tipo de vehículos en el AMM durante el año 2000	60
Tabla 5.3	Clasificación de los vehículos de acuerdo al Mobile 5	61
Tabla 5.4	Velocidades promedio y cantidad de kilómetros recorridos para	61
Tabla 5.5	Factores de emisión en gr/km para LDGV, LDGT1, HDDV y MC en base a las velocidades del AMM para el año 2000 (Calculado con Mobile 5 AMM).	62
Tabla 5.6	Factores de emisión en gr/km para LDGV, LDGT1, HDDV y MC en base a las velocidades del AMM para el año 2000 (Calculado con Mobile 5 AMM) con GRF.	67
Tabla 5.7	Factores de emisión de HC, CO y NO _x para gas natural de LDGV, LDGT1 y LDGT2.	68
Tabla 5.8	Factores de emisión en gr/km para para transporte con Gas LP	71
Tabla 6.1	Emisiones de CO, HC y NO _x en kg/veh-día para los automóviles particulares y taxis (LDGV), camionetas pick-up (LDGT1) y autobuses de transporte urbano (HDDV) en el año 2000.	74

Tabla 6.2	Emisiones totales de CO, HC y NO _x en kg/día para LDGV (autos particulares y taxis), LDGT1 (camionetas pick-up) y HDDV (autobuses de transporte urbano) para el año 2000 en el AMM.	75
Tabla 6.3	Costos de conversión a Gas LP para LDGV, LDGT1 y HDDV para el AMM.	76
Tabla 6.4	Factores de emisiones de CO, HC y NO _x en kg/veh-día para autos particulares, taxis, camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano.	77
Tabla 6.5	Emisiones totales de CO, HC y NO _x en kg/día para LDGV, LDGT1 y HDDV con Gas LP.	78
Tabla 6.6	Comparativa de emisiones totales de CO, HC y NO _x entre los vehículos para el año 2000 y los vehículos a Gas LP.	78
Tabla 6.7	Resultados del sistema de programación lineal adaptado a la minimización de costos totales de conversión a Gas LP.	81
Tabla 6.8	Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización para Gas LP.	81
Tabla 6.9	Costo de conversión de vehículos LDGV, LDGT1 y HDDV a vehículos con GNC.	84
Tabla 6.10	Factores de emisión de CO, HC y NO _x en kg/veh-día para automóviles particulares, taxis, camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano que usan GNC como combustible.	85
Tabla 6.11	Emisiones totales de CO, HC y NO _x en kg/día con GNC.	85
Tabla 6.12	Comparativa de emisiones totales de CO, HC y NO _x entre los vehículos con combustible para el año 2000 y los vehículos con GNC.	92
Tabla 6.13	Resultados del sistema de programación lineal adaptado a la minimización de costos totales de conversión a GNC.	87
Tabla 6.14	Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización para GNC.	89
Tabla 6.15	Resultados de incremento en \$(M.N)/veh-día al utilizar gasolina Premium en lugar de Magna Sin.	90
Tabla 6.16	Factores de emisión de CO, HC y NO _x en kg/veh-día para los tipos de LDGV y LDGT1 con GRF	91

Tabla 6.17	Emisiones totales de CO, HC y NO _x en kg/día con GRF para LDGV y LDGT1.	92
Tabla 6.18	Comparación de emisiones totales de CO, HC y NO _x entre los vehículos con combustible para el año 2000 contra vehículos a GRF	92
Tabla 6.19	Resultados del sistema de programación lineal adaptado a la minimización de costos totales de conversión a GRF.	94
Tabla 6.20	Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización.	95
Tabla 6.21	Cantidades de tipos de vehículos con distintos tipos de combustibles en Ciudades de Estados Unidos.	96
Tabla 6.22	Porcentaje y cantidad propuesta de vehículos de vehículos a convertir en el AMM.	98
Tabla 6.23	Emisiones en kg/día-veh para HDDV a diesel-eléctricos.	98
Tabla 6.24	Nivel de reducciones fijados para CO, HC y NO _x de acuerdo a cada escenario para el caso 4.	100
Tabla 6.25	Resultados de la ejecuciones del caso combinado.	102
Tabla 6.26	Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización.	103
Tabla 6.27	Resultados de la ejecuciones del Caso 1 de maximización de reducción de emisiones de CO.	106
Tabla 6.28	Resultados de la ejecuciones del Caso 2 de maximización de reducción de emisiones de HC.	108
Tabla 6.29	Resultados de la ejecuciones del Caso 2 de maximización de reducción de emisiones de HC.	110

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Factores que constituyen el ciclo del crecimiento urbano	2
Figura 1.2	Población del AMM de 1990 al 2001 [INEGI, 2001]	3
Figura 1.3	Total de vehículos en el AMM en el año 2001	6
Figura 1.4	Puntos de origen de la emisiones de los vehículos automotores. [EPA, 2001].	7
Figura 1.5	Contribución por fuentes de contaminación en el AMM en 1995 [INE, 1997].	12
Figura 2.1	Días en que se rebasó la norma para PM ₁₀ en el AMM de Enero de 1993 a Julio del 2002 en el AMM [SIMA, 2002].	31
Figura 2.2	Días en que se rebasó la norma para CO en el AMM de 1993 a Julio del 2002 en el AMM [SIMA, 2002].	31
Figura 3.1	Etapas en la planeación y el control de la calidad del aire	33
Figura 3.2	Diagrama simplificado del conocimiento base de Evaluación Integrada [Molina, 2002].	35
Figura 3.3	Medidas típicas para la reducción de contaminantes relativas a vehículos.	39
Figura 3.4	Medidas típicas para la reducción de contaminantes relativas a combustibles.	40
Figura 4.1	Metodología de control de la contaminación por transporte para el AMM	44
Figura 5.1	Distribución de vehículos por municipios del AMM en el año 2000	59
Figura 5.2	Factores de emisión promedio en gr/km para la flota vehicular mostrada en el AMM para el año 2000.	63
Figura 5.3	Curvas de comportamiento de los factores de emisión para HC, NO _x y CO en base a la velocidad de automóviles particulares y taxis (LDGV).	64
Figura 5.4	Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO _x y CO en base a las velocidad de camionetas pick-up (LDGT1).	64

Figura 5.5	Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO _x y CO para camionetas pick-up (LDGT1 en base a la velocidad de autobuses de transporte urbano (HDDV).	65
Figura 5.6	Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO _x y CO en base a la velocidad de motocicletas (MC).	65
Figura 5.7	Curvas de comportamiento de los factores de emisión en base a la velocidad de automóviles particulares y taxis (LDGV) con GRF	69
Figura 5.8	Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO _x y CO en base a la velocidad de camionetas pick-up (LDGT1) con	69
Figura 5.9	Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO _x y CO en base a la velocidad de autobuses de transporte urbano(HDDV) con GRF.	70
Figura 5.10	Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO _x y CO en base a la velocidad de motocicletas (MC) con GRF.	70

CAPITULO 1

EL TRANSPORTE URBANO Y SU IMPACTO AMBIENTAL

El auge económico mundial, como consecuencia del desarrollo industrial y demográfico, ha generado el crecimiento de ciudades tanto en países en desarrollo como en los ya desarrollados y por ende un aumento en el número de vehículos. En este capítulo, se analizarán una de las consecuencias de este fenómeno, que lo representan el transporte urbano y su impacto en el contexto ambiental. Al respecto, se describe el comportamiento del crecimiento vehicular, los antecedentes del control de contaminación por transporte a nivel mundial así como las condiciones actuales en que se encuentra esta situación en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) .

1.1 Análisis del crecimiento vehicular mundial

El crecimiento urbano se puede representar por medio de un sistema cerrado en donde interaccionan los factores que conforman los servicios de transporte, el crecimiento económico, los impactos al transporte y por ende los impactos económicos y ambientales, como se muestran en la Figura 1.1 [Molina, 2000]. De esta forma, se pueden agrupar los elementos a considerar para analizar el fenómeno del crecimiento vehicular mundial y tener una mejor perspectiva para controlar este problema. En el esquema de la Figura 1.1 ninguno de los cuadros puede quedar aislados porque afecta el desempeño de los otros por lo que esta conexión nos da una idea de las enormes repercusiones que arrojan el uso del transporte.

En la mayoría de las grandes ciudades del mundo (Beijín, Ciudad de México, Los Ángeles, Tokio, etc.) la contaminación atmosférica ocasionada por los vehículos es, o se está convirtiendo, en uno de los principales problemas para la salud de la población [Mage, 1995].

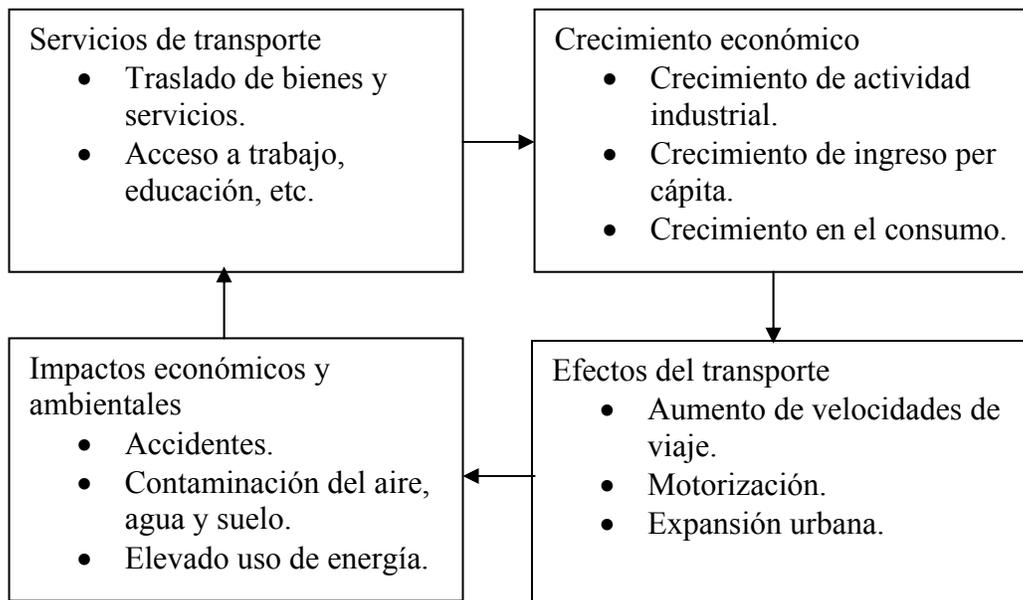


Figura 1.1 Factores que constituyen el ciclo del crecimiento urbano

Los países industrializados, en los cuales se encuentra el 86% del total de los vehículos a nivel mundial, tienen una larga y profunda experiencia sobre este problema. En los países en vías de desarrollo, el rápido crecimiento industrial y el aumento de la población, acompañado de la elevación del estándar de vida, tiende a producir un patrón de crecimiento vehicular similar al de los países industrializados [Mage, 1995].

En diversas ciudades de países desarrollados y de aquellos en vías de desarrollo los problemas son agudos y, a menos que se introduzcan o fortalezcan inmediatamente las medidas de control de la contaminación, el daño a la salud pública será muy grave [Mage, 1995]. Por otro lado, América Latina y el Caribe se considera la región más urbanizada del mundo en desarrollo, con un alto crecimiento del parque automotor. En 1994 habían 43 áreas urbanas con una población de más de un millón de habitantes, y se espera que para el 2010 se alcance el número de 52 [Mage, 1995].

Los niveles de contaminantes en el aire en muchas áreas urbanas exceden frecuentemente las normas nacionales, regionales o locales y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). La mayor fuente de contaminación proviene de los vehículos

automotores, especialmente los que son más viejos y no han recibido el debido mantenimiento. El Ozono, las Partículas suspendidas y el Monóxido de Carbono son los contaminantes que causan la mayor atención para ser reducidos [Ornusal, 1994]. En Latinoamérica, debido al crecimiento demográfico, Sao Paulo, Ciudad de México, Buenos Aires y Río de Janeiro figuran entre las diez zonas más pobladas del mundo en donde la contaminación atmosférica se agrava, por ejemplo, por factores meteorológicos como las inversiones térmicas, las cuales impiden la dispersión vertical de los contaminantes y provocan altas concentraciones en el medio ambiente [Ornusal, 1996].

Para el AMM las tendencias de crecimiento poblacional mostraron un crecimiento de alrededor de 500,000 habitantes durante la década de los 90's, como se puede apreciar en la Figura 1.2 [INEGI, 2001]. De 1999 al 2001 el crecimiento anual fue de 100,000 habitantes aproximadamente.

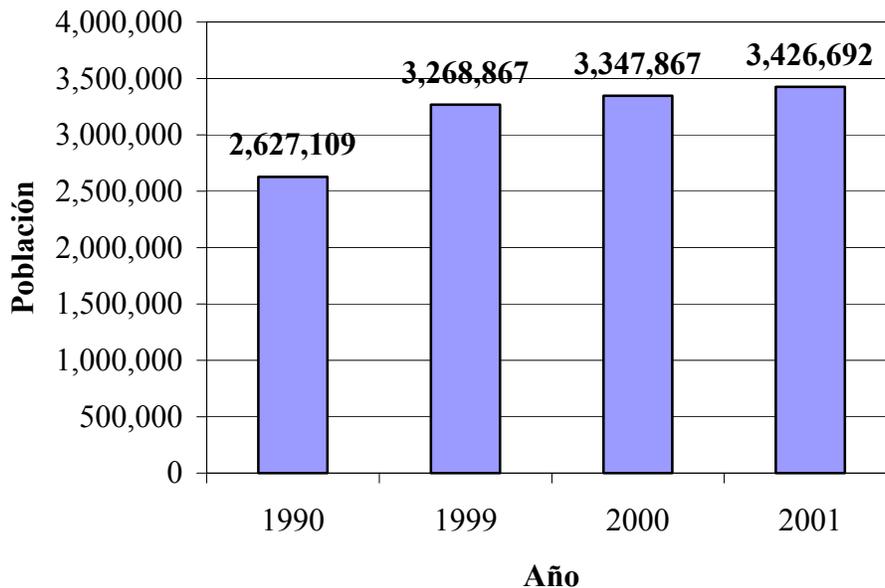


Figura 1.2 Población del AMM de 1990 al 2001 [INEGI, 2001].

El uso de los automotores se ha incrementado notablemente a lo largo y ancho del mundo. En 1950 había alrededor de 53 millones de vehículos en todo el mundo y sólo cuatro décadas después (1990) el parque vehicular mundial fue superior a los 430 millones, un factor de ocho veces más [Bannister, 1998]. En promedio, el parque

vehicular ha crecido alrededor a de 9.5 millones de automóviles por año durante este periodo. De manera simultánea, la flota de autobuses y camiones ha crecido alrededor de 3.6 millones de vehículos por año. Mientras que la tasa de crecimiento ha disminuido en los países industrializados, en otras partes, el crecimiento de la población y el aumento de la urbanización e industrialización ha incrementado el uso de vehículos automotores [Bannister, 1998].

El análisis de las tendencias en el crecimiento del parque vehicular a nivel mundial revela un ascenso lineal desde antes de 1970 y cada año durante dos décadas se han añadido a la flota mundial 16 millones de vehículos, sin incluir aquellos con dos ruedas como las motocicletas. El registro internacional de vehículos ha venido creciendo alrededor de 1.8 por cada 1.000 personas a 2.3 vehículos (automóviles más camiones y autobuses) por cada 1.000 personas. El número de motocicletas per cápita durante las últimas décadas se ha mantenido estable. Si esta tendencia se mantiene hasta el año 2010, habrá 154 vehículos por cada 1,000 personas (excluyendo las motocicletas) en comparación con 112 vehículos por cada 1,000 personas en 1990 [Schwela, 1999].

Las proyecciones del incremento vehicular se han hecho tomando en cuenta el crecimiento poblacional y el desarrollo económico, ya que son los principales factores que lo afectan. Es necesario aplicar las decisiones correspondientes a la planeación del uso del suelo, al fomento del transporte masivo y a las características de los combustibles debido al impacto ambiental y económico que genera este crecimiento vehicular. Estas decisiones influirán en el contexto global de desarrollo y en las labores tendientes al cuidado del ambiente de manera definitiva en los próximos 20 a 50 años [OCDE, 1995].

Se prevé por otro lado, una desaceleración de la tasa de crecimiento urbano de la región de América Latina y el Caribe como resultado de un descenso general del crecimiento demográfico, menos migración del campo a la ciudad y tasas de natalidad más bajas de los que han ya emigrado. Aun así, se estima que el 80% de la región residirá en zonas urbanas para el año 2010, además de las ciudades mencionadas con anterioridad, ciudades adicionales tendrán población de más de 1 millón de habitantes: Mendoza en Argentina, Santa Cruz en Bolivia, Sao Luis en Brasil, Tegucigalpa en Honduras, Ciudad

Juárez y León en México y otras. Como resultado del crecimiento económico y de la liberación del comercio exterior, se estima que las ventas de vehículos en América Latina y el Caribe crezcan considerablemente hasta alcanzar 4.5 millones de unidades para inicios de este siglo XXI (unas tres veces más que en 1990). Este total estará integrado por unos 3.3 millones de vehículos de pasajeros, 900,000 vehículos comerciales livianos y 300,000 vehículos comerciales pesados [OCDE, 1995].

La mayoría de estos vehículos, sobretodo los automóviles, formarán parte de una flota urbana. El número de vehículos retirados de la flota urbana será muy inferior al número que se añada, lo que dará como resultado un número mucho más alto de vehículos en circulación, más congestionamiento y más consumo de combustible [OCDE, 1995]. Como ejemplo del crecimiento vehicular, en la Tabla 1.1 [OCDE, 1995] se muestra el incremento en el uso de vehículos de pasajeros de 1970 a 1989 que se debió a los auges económicos y de crecimiento industrial de los países capitalistas. Se observa que estos porcentajes de incremento fueron muy elevados y que llegan a más del 600% como el caso de Grecia o el 272% para Japón durante ese periodo.

Tabla 1.1 Porcentajes de incremento en el uso de vehículos de pasajeros de 1970 a 1989.

País	% de cambio
Canadá	84
Estados Unidos	61
Japón	272
Australia	98
Francia	87
Grecia	605
Suecia	56
Reino Unido	83

Para el caso del AMM, los datos de la Subsecretaría del Transporte del Estado de Nuevo León del año 2002 muestran que la cantidad total de vehículos va en constante ascenso desde la década pasada, tal como se puede apreciar en la Figura 1.3. Para el año 2001 se contabilizan 941,066 vehículos lo que puede indicar que se requiere en la ciudad de más infraestructura vial debido al rápido crecimiento de la flota vehicular.

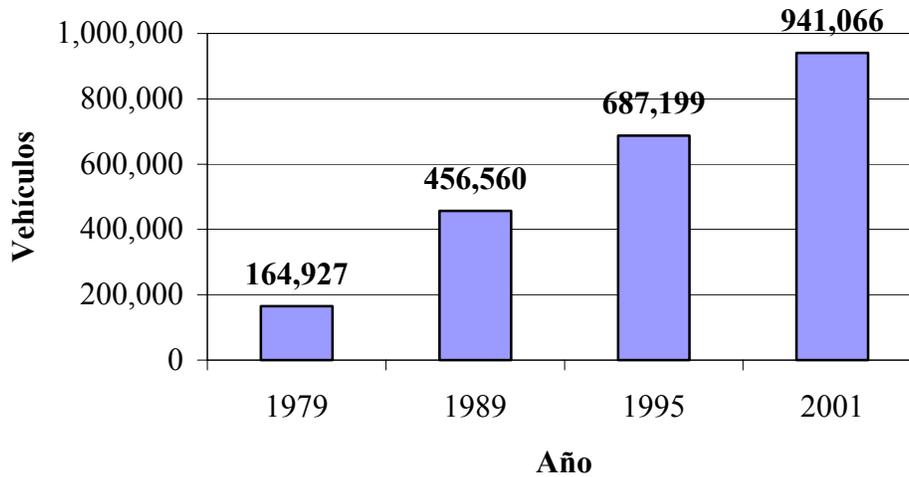


Figura 1.3 Total de vehículos en el AMM en el 2001.

Para el AMM, el número de vehículos va aumentando de 3.73 personas/vehículo para el año 2001 mientras que en 1990 era de 5.75 personas por vehículo [INEGI, 2001].

1.2 Emisiones de contaminantes de los vehículos automotores

Las emisiones de los vehículos automotores son el resultado de la combustión o evaporación del combustible. Los combustibles más comunes para el transporte son la gasolina (con o sin Plomo) para vehículos livianos (como los automóviles) y el diesel para vehículos pesados (como los autobuses y camiones). Se utilizan también otros combustibles comerciales en los vehículos, como los Alcoholes (el Metanol y Etanol), mezclas de gasolina y alcohol, gas natural comprimido (GNC) y gas licuado de petróleo (Gas LP). Los vehículos pesados utilizan también combustibles, como la gasolina, el GNC y el Gas LP. Los principales contaminantes emitidos por los vehículos a gasolina son el Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos (HC), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Plomo y el Bióxido de Azufre (SO₂). De hecho, los vehículos automotores son la fuente

principal de contaminación de CO, NO₂, e Hidrocarburos: Estos contaminantes son fotoquímicamente reactivos que interactúan con el Bióxido de Nitrógeno (NO₂) para formar el Ozono (O₃) y Partículas en suspensión las cuales contienen Plomo (Pb) [Mage, 1995]. En la Figura 1.4 se señalan los puntos de emisiones de un automóvil típico las cuales son evaporativas (que se generan sobre el motor), las que se emiten durante las recargas de combustible y las emisiones desde el escape.

Los procesos de combustión de motores a gasolina o diesel generan los contaminantes como producto de las reacciones en las cámaras de combustión, a continuación se describen de manera general los procesos por los cuales estas especies químicas se generan.

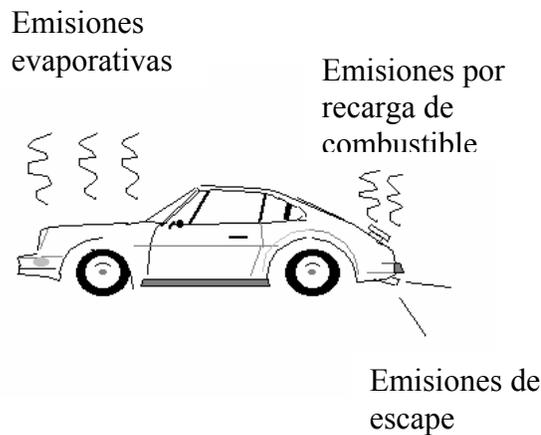


Figura 1.4 Puntos de origen de la emisiones de los vehículos automotores. [EPA, 2001].

La Ecuación 1.1 muestra la reacción del proceso de combustión que generan la emisión de los contaminantes, en donde los combustibles quemados en su totalidad liberan CO₂ mas Agua (H₂O) y Nitrógeno. En el proceso típico que se muestra en la Ecuación 1.2, el Monóxido de Carbono es liberado como parte de los procesos incompletos de combustión ya que no se tienen procesos eficientes su totalidad.

Proceso de combustión “Completa”



Proceso de combustión de motor típico



Por lo anterior, aproximadamente el 90% del CO en el ambiente urbano proviene de las fuentes móviles. Los altos niveles (20 a 30 mg/m³) identificados en el aire ambiente de áreas de congestionamiento vehicular pueden ocasionar niveles de Carboxihemoglobina del 3% (COHB), capaces de producir efectos cardiovasculares y neuroconductuales adversos. El NO₂, gas café-rojizo en parte responsable de la clásica neblina de smog en la ciudades contaminadas, puede producir problemas respiratorios en las personas sensibles, por ejemplo en los asmáticos y los niños. Las partículas dispersadas PM_{2.5} y PM₁₀ (partículas menores a 2.5 micras y partículas menores a 10 micras) pueden generar problemas también de tipo respiratorio o crónico por la presencia de esas pequeñas partículas en el aire.

Así mismo, el O₃ es resultado de las reacciones fotoquímicas entre los Hidrocarburos y los Óxidos de Nitrógeno (NO_x), que en la atmósfera urbana provienen principalmente de los vehículos (60 a 80%). Áreas con un intenso flujo vehicular y escasa dispersión, como Los Ángeles y la Ciudad de México, presentan niveles de O₃ del orden de 600 a 700 µg/m³, que dañan seriamente la salud de las personas, particularmente de la población sensible [Mage, 1995]. Las partículas en suspensión, incluyendo los aerosoles de Ácido Sulfúrico (H₂SO₄), se producen durante el consumo de combustible para automotores con contenido de Azufre, particularmente diesel. Se considera que los componentes de estas emisiones fueron la principal causa del exceso de mortalidad observada durante los episodios de smog en Londres y en Nueva York de los años cincuentas y sesentas [Mage, 1995].

Con la finalidad de conocer cuál es el porcentaje de contribución a la contaminación del transporte vehicular en diferentes países, en Tabla 1.2, se muestran éstos porcentajes para algunas ciudades del mundo, con su número correspondiente de vehículos existentes en 1990 para CO, NO₂, SO₂ y las Partículas Sólidas Totales (PST).

Por otro lado, la exposición a niveles elevados de contaminantes de origen vehicular se presenta en tres situaciones:

- Dentro de los vehículos,
- Durante las actividades de trabajo o por el tránsito a lo largo de las calles congestionadas,
- En áreas urbanas residenciales y no residenciales con alta contaminación por tránsito vehicular.

Tabla 1.2 Contribución relativa porcentual del transporte vehicular a la contaminación en ciudades del mundo durante 1990 [Mage, 1995].

Ciudad	Población (1990, Millones)	Número de vehículos (Millones)	Vehículos/ 100 habitantes	Contaminantes, % de contribución			
				SO ₂	CO	NO ₂	PST
Londres	10.57	2.7	26	1	95	75	76
Bombay	11.13	0.59	5	35	89	52	-
Buenos Aires	11.58	1	9	38	99	48	69
El Cairo	9.08	0.94	10	8	99	29	-
Calcuta	11.83	0.5	4	5	48	60	2
Los Angeles	10.47	8	76	60	90	70	89
Manila	8.4	0.51	6	23	97	91	82
México	19.37	2.5	13	22	97	76	2
Sao Paulo	18.42	4	22	73	94	82	31
Seúl	11.33	2.66	23	12	56	78	30

Para efectos de cubrir los alcances de este trabajo nos enfocaremos únicamente a analizar las emisiones generadas por los vehículos en el tránsito habitual en las calles y avenidas del AMM.

1.3 Antecedentes de control de la contaminación por transporte

El “Acta de Aire Limpio” [EPA, 2001] dio a la EPA (Environmental Protection Agency) mayor autoridad y facultad para regular la contaminación por vehículos automotores en Estados Unidos. De esta forma las políticas de control de emisiones se han convertido en más estrictas desde principios de los años 70’s. La EPA determina los niveles de contaminación que se pueden emitir por parte de los automóviles y por otro lado los fabricantes indican a los consumidores de qué manera se pueden respetar esos límites. La reducción de emisiones de aquel entonces se debió fundamentalmente a las mejoras en el diseño de los motores más la adición cámaras de recolección de vapores y las válvulas de recirculación de gases de escape con la finalidad de reducir los Óxidos de Nitrógeno [EPA, 2001]. En Estados Unidos, la llegada de la “primera generación” de convertidores catalíticos en 1975 redujo significativamente las emisiones de Hidrocarburos y de Monóxido de Carbono. En ese mismo año se introdujeron las gasolinas sin Plomo. Esto condujo a grandes reducciones de niveles de Plomo en el ambiente y alivió serios problemas de salud humana relacionados con la contaminación por Plomo.

La siguiente etapa en la carrera tecnológica del control de contaminación por vehículos vino en los años de 1980 a 81. En respuesta a estándares más estrictos, los fabricantes equiparon a los vehículos con sistemas de control de emisiones más sofisticados. Estos sistemas incluían por ejemplo un catalizador “de tres vías”. Este convertidor transforma el Monóxido de Carbono e Hidrocarburos a Bióxido de Carbono y Agua, y también ayuda a reducir los Óxidos de Nitrógeno a Nitrógeno elemental y Oxígeno. Además se cuenta con una computadora a bordo y un sensor de Oxígeno. Este equipo ayuda a optimizar la eficiencia del convertidor catalítico [EPA, 2001].

Actualmente el control de las emisiones vehiculares se rige por el “Acta de Aire Limpio”. Los límites para fuentes móviles incluyen estándares de “final de tubo” más estrictos, durabilidad mayor de los motores y sistemas de diagnóstico computarizado el cual identifica funcionamiento incorrectos de los controles de emisión [EPA, 2001].

1.4 Antecedentes de control de la contaminación en el AMM

En el AMM las acciones para el control de la contaminación por vehículos comenzaron con el programa de verificación vehicular que se estableció en 1991. Su objetivo era prevenir y controlar las emisiones contaminantes provenientes de vehículos automotores en circulación a fin de mejorar la calidad del aire del AMM. Fue básicamente un sistema centralizado operado bajo contrato. En éste, el Gobierno del Estado de Nuevo León otorgó la autorización a una empresa para realizar la medición y verificación de las emisiones contaminantes provenientes de los vehículos automotores [INE, 1997]. Para ello se establecieron nueve centros de verificación vehicular ubicados estratégicamente, con un mínimo de cuatro módulos de analizadores de gases. Además, se disponía de cuatro unidades móviles que eran enviadas a las terminales de rutas urbanas y empresas con flotilla vehicular.

Desde el inicio del programa, se estableció la obligatoriedad de dos verificaciones al año (una por semestre) para todo tipo de vehículos. En el año de 1996 las autoridades estatales y municipales celebraron un acuerdo para modificar y actualizar el programa de manera que se estableció una verificación anual para vehículos de uso particular y verificaciones semestrales para vehículos de uso intensivo. Así mismo, los municipios de García, Juárez y Cadereyta se integraron al programa [INE, 1997]. Actualmente este programa ya no se sigue ejecutando por ineficiencia en resultados, corrupción, burocracia excesiva y por los altos costos de operación. Así mismo se introdujeron a principios de la década de los 90’s las gasolinas sin Plomo Magna Sin y Premium con la finalidad de eliminar la gasolina Nova que contenía dicho contaminante las cuales era y son usadas con automóviles con convertidores catalíticos.

1.5 Problemática en el AMM por contaminación del transporte

De acuerdo al inventario preliminar de emisiones del parque vehicular al año 1995, los Automóviles constituyen la principal fuente de contaminación atmosférica en el AMM, contribuyendo aproximadamente con un 71% de las emisiones totales. Un 88% de las emisiones generadas por fuentes móviles es Monóxido de Carbono. Los vehículos automotores contribuyen con el 96% de las emisiones totales de este contaminante en el AMM [INE, 1997]. En la Figura 1.5 [INE, 1997] se observa que el sector transporte (todo tipo de vehículos) influye en gran medida a la generación de contaminantes del aire, constituyendo más del 50% de la aportación total entre los sectores involucrados (Industrial, Suelo y Servicios).

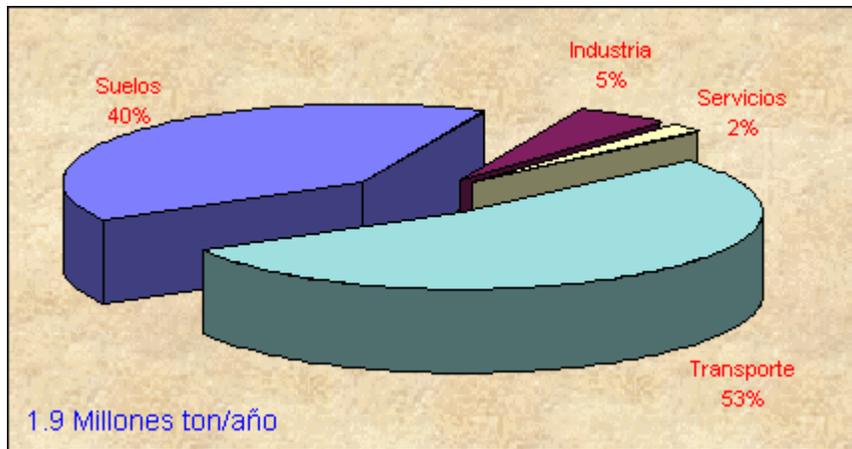


Figura 1.5 Contribución por fuentes de contaminación en el AMM en 1995 [INE, 1997].

1.6 Sistema de tráfico

La traza urbana original del AMM es diversa y obedece a un juego de calles en líneas geométricas y a pendientes pronunciadas. Esto se define principalmente por la prolongación de las carreteras que son parte de las calles y avenidas principales, las cuales convergen hacia el centro del AMM [INE, 1997]. Algunas vías primarias y secundarias tienen un ancho sin continuidad lo que produce reducción o aumentos de carriles en diversos tramos. Además, por la falta de estacionamientos en la zona centro, se tienen problemas viales que se acrecientan en las horas pico de acceso a las escuelas. La composición del parque vehicular indica que los vehículos particulares tipo sedán representan el 52%, los vehículos pick-up ocupan el segundo lugar con 40%, el 3% corresponde a los camiones y cerca del 3% a los taxis. El transporte público contribuye con el 1% del parque vehicular.

Por otro lado, el mayor número de recorridos diarios que se realizan en la zona es a través del transporte público, como son los autobuses de transporte urbanos, suburbanos y los taxis, en los cuales se realiza el 62% de los viajes del AMM. El porcentaje restante lo llevan a cabo los autos particulares y algún otro tipo del transporte. En este aspecto es importante mencionar que no obstante que los autos particulares representan casi el 52% del parque vehicular, sólo realizan un poco más del 38% de los viajes diarios en el AMM [INE, 1997].

Un elemento adicional que contribuye a la mayor intensidad de las emisiones del sector transporte, es la velocidad a la que se desplazan los vehículos en las zonas urbanas. La velocidad promedio vehicular en el AMM es de 20 a 30 kilómetros por hora. Esta velocidad, sumamente baja, se ve reducida aún más cuando la ciudad sufre de interrupciones y obstrucciones viales por la existencia de calles sin pavimentación, o de reducciones de tres a dos carriles. Otras clase de interrupciones se dan por manifestaciones de carácter público, como son las marchas y los plantones aunque éstas de dan en muy baja frecuencia [INE, 1997]. Aunque es difícil cuantificar el impacto ambiental ocasionado por estas obstrucciones viales, debido a que depende del lugar donde ocurra y la hora en que se realiza, la vialidad que se afecta, el número de carriles

obstaculizados y la duración de la misma, es una realidad que al disminuir significativamente la velocidad de viaje, se incrementan las emisiones vehiculares de HC y CO, sobre todo en los vehículos con carburador [INE, 1997].

En la Tabla 1.3 [INE, 1997] se muestran las contribuciones de algunos contaminantes por cada categoría de vehículos para el año de 1995. Se puede ver que los vehículos particulares son los que aportan en mayor cantidad debido a sus altas emisiones de CO, NO_x y HC en ton/año, aquí se muestran también las aportaciones de los aviones.

Tabla 1.3 Inventario de emisiones en ton/año para fuentes móviles en 1995 para el AMM [INE, 1997].

Transporte	Partículas	SO₂	CO	NO_x	HC	Pb	Total
Autos particulares	581	987	443,074	16,724	40,707	65	502,138
Pick-up	737	627	281,242	10,616	25,839	41	319,102
Taxis	80	137	61,345	2,316	5,636	9	69,523
Camiones de pasajeros	2,943	461	74,850	2,825	6,877	N/A	87,967
Camiones de carga	1,596	250	40,592	1532	3,729	N/A	47,705
Motocicletas	4	7	3,052	115	280	1	3,459
Aeropuerto	N/A	N/A	318	140	69	N/A	527

N/A = No Aplica

En la Tabla 1.3 se indica que los autos particulares contribuyen con la mayor cantidad de contaminantes seguidos de las pick-up con 319,102 ton/año, cabe destacar que la aportación de los camiones de pasajeros en ese entonces fue de 69,523 ton/año.

1.7 Objetivo

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología de evaluación de las estrategias de control de la contaminación originada por fuentes móviles o vehículos automotores y aplicarla en el AMM. Esto mediante el desarrollo de un modelo de optimización que permita obtener las mejores estrategias económicas y ambientalmente efectivas para reducir las emisiones de contaminantes por estas fuentes dentro del AMM.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Estimar las emisiones de NO_x , CO y HC por tipo de vehículo para el año 2000.
- Desarrollar un modelo que permita predecir el costo mínimo de implementación de las estrategias a un cierto nivel de emisiones de NO_x , HC y CO y la máxima reducción de emisiones que se puedan obtener con cierta inversión económica.
- Identificar las medidas más efectivas de control de la contaminación de transporte en el AMM.

1.8 Alcance

Con la información en kg/día de CO, HC y NO_x que se emiten a la atmósfera en el año 2000 por parte del transporte en el AMM y con la de los costos de implementación de las opciones de control de la contaminación, seleccionadas, se llevarán a cabo las evaluaciones para dos escenarios. En el primero de ellos, se busca determinar el costo mínimo de la combinación de estas opciones al fijar una tasa de emisiones en kg/día. En el segundo escenario se pretende obtener el máximo nivel de emisiones con la menor cantidad de inversión de capital posible.

Para resolver el problema, se plantea un sistema de optimización que se resuelve mediante la programación lineal y requiere los costos de conversión de cada opción y la

reducción de contaminantes de cada opción. En la metodología se aplica el software Mobile 5 AMM [Radián, 1995] modificado por Radian International LLC, que calcula los factores de emisión de los contaminantes. Para resolver el proceso de optimización se usará una subrutina de optimización llamada LCONF obtenida de IMSL (International Mathematical Statistics Library) que se ejecuta en el lenguaje de programación Fortran (Visual o Digital Fortran).

De esta manera, se obtiene una aproximación adecuada del impacto económico y ambiental de la contaminación por transporte que permite posteriormente ser utilizado dentro de las estrategias de evaluación integral de contaminación. Este trabajo no abarca los cambios que puedan generar la construcción de la infraestructura vial como puentes, pasos a desnivel y nuevas avenidas que influyen en las velocidades de recorrido de los vehículos y que por lo tanto, afectan a las emisiones. Tampoco se abarcan las emisiones de aviones y locomotoras .

CAPITULO 2

CONTAMINANTES GENERADOS POR EL TRANSPORTE

En este capítulo se hace un resumen de las características físicas y orígenes de los principales contaminantes generados por el transporte como Óxidos de Nitrógeno, Monóxido de Carbono, Hidrocarburos, PM₁₀, PM_{2.5} y Bióxido de Azufre. También se muestran los efectos a salud debido a los niveles de exposición o concentración de éstos. Se señalan asimismo los efectos en los seres humanos por la contaminación del ruido. Por último, se indica la manera en que la Legislación Ambiental Mexicana se aplica a la emisión de contaminantes por los vehículos automotores, abarcando el aspecto normativo que incluyen los límites máximos de emisión y los valores del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), que representan los valores en concentración de CO, NO₂, y O₃.

2.1 La Contaminación Ambiental

La contaminación ambiental es una consecuencia del desarrollo tecnológico y urbano, más no por ello es un mal necesario o inevitable. La presencia de ciertos gases o partículas, considerados como contaminantes en la atmósfera producen cambios en el hombre, tanto a nivel estructural como fisiológico, a corto y a largo plazo [Mujica y Figueroa 1996]. La contaminación atmosférica es la presencia de contaminantes en el aire que respiramos debido a sustancias naturales o generadas por la actividad humana que pueden ser perjudiciales para la vida humana, vegetal o animal.

La contaminación puede afectar estructuras y materiales producidos por el hombre; pueden ocasionar cambios en las condiciones meteorológicas o climáticas como la lluvia ácida, el calentamiento global, el “Fenómeno del Niño”, etc. [Mujica y Figueroa 1996]. En general existe una asociación entre la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera que proceden de fuentes antropogénicas fijas o móviles y el nivel de actividad económica. Las condiciones meteorológicas y topográficas afectan la dispersión y el transporte de los

contaminantes, lo que puede resultar en concentraciones suficientemente nocivas para la población, los bienes y el medio ambiente. El deterioro de la calidad del aire es un importante problema ambiental en muchos grandes centros urbanos de países industrializados y en desarrollo [Ornusal, 1996]. Desafortunadamente, dentro de la amplia gama de contaminantes que se encuentran en la atmósfera, muy pocos ejercen un efecto específico en el organismo que pueda ser medido o correlacionado directamente con la concentración de dicho contaminante [Mujica y Figueroa, 1996].

2.1.1 Material Particulado.

Las Partículas sólidas, aerosoles o líquidas que se encuentran dispersas en la atmósfera, conocidas bajo el nombre de partículas suspendidas, engloban al polvo, la tierra, la arena, la ceniza, el hollín, las partículas de metales, el cemento, los diversos tipos de polen, etc. La fracción respirable, torácica o PM_{10} , está compuesta por las partículas que tienen un diámetro menor a 10 micras y que debido a su tamaño es posible que penetren hasta los alveolos pulmonares. Las PM_{10} se pueden combinar con los NO_x , u Óxidos de Azufre (SO_x) y cuando se combinan con agua forman la lluvia ácida [Strauss y Mainwaring, 1990].

Las PM_{10} tienen pueden ser de origen antropogénico o natural. El antropogénico derivado de la combustión industrial, de fuentes móviles y en el hogar por la combustión del tabaco, la madera, el carbón y los combustibles derivados del petróleo, así como de diversos procesos industriales, la basura y la erosión de los materiales empleados en la construcción, como cemento, vidrio, cerámica y de los metales, como Plomo, Hierro, Aluminio. En el origen no antropogénico o natural participan en su formación de manera natural los incendios, la erosión eólica y las erupciones de los volcanes. Cuando existen muchas partículas estas pueden impedir la buena visibilidad [Strauss y Mainwaring, 1990].

2.1.2 Monóxido de Carbono (CO)

El Monóxido de Carbono es un gas incoloro e inodoro que puede combinarse con la Hemoglobina de la sangre de los seres vivos para formar la Carboxihemoglobina, misma

que interfiere con el intercambio del Oxígeno; en altas concentraciones puede producir la muerte. La combustión no completa de los Hidrocarburos es una de las fuentes principales de CO. Este CO se genera durante la combustión de las gasolinas, el diesel, el petróleo, el combustóleo, el aguarrás, el thinner, etc. Otra fuente de CO son los incendios forestales [Strauss y Mainwaring, 1990].

2.1.3 Ozono (O₃)

El Ozono es un gas incoloro e inestable, que se forma al combinarse fotoquímicamente un átomo libre del Óxido de Nitrógeno, de los derivados del petróleo o de los Hidrocarburos con el Oxígeno al entrar en contacto con la luz solar. Su formación depende directamente de la luz solar y de la disponibilidad de Óxidos de Nitrógeno, de la evaporación de la Gasolina y otros combustibles y lubricantes [Strauss y Mainwaring, 1990].

2.1.4 Bióxido de Nitrógeno (NO₂)

Es un gas oxidante color café rojizo que tiene un olor picante. Estos compuestos provienen de la combustión del carbón y del tabaco, de los vehículos y de los combustibles que no han sido refinados adecuadamente, como el petróleo diáfano y el combustóleo. Ambos son utilizados en la industria y en las plantas que generan energía eléctrica; de manera natural se puede producir por las tormentas eléctricas. Dentro del hogar se genera por la combustión del gas empleado en las estufas [Strauss y Mainwaring, 1990].

2.1.5 Bióxido de Azufre (SO₂)

Es un gas incoloro que tiene un olor picante. Cuando se oxida y se combina con agua produce Ácido Sulfúrico, que es el componente básico de la lluvia ácida. Es un contaminante natural de origen fósil que se produce por la combustión del carbón, diesel, combustóleo y gasolina que contengan Azufre. También se produce en las fundidoras de metales ricos en Azufre, en los procesos industriales y por las erupciones de los volcanes.

La combustión del alquitrán del cigarro produce Óxidos de Azufre [Strauss y Mainwaring, 1990].

2.2 Efectos de los contaminantes sobre el ser humano

El hombre, al vivir en comunidades desarrolladas y en consecuencia contaminadas, por lo general expone sólo áreas limitadas de piel a la atmósfera. Cada día inhala aproximadamente 7,500 litros de aire, de tal manera que sus pulmones y sistemas respiratorio general están en contacto con ella y tienen la potencialidad de retener cualquier sustancia nociva que pueda estar contenida en este aire [Quadri, 1994]. Los efectos de la contaminación del aire pueden variar desde la simple irritación transitoria hasta enfermedades agudas o incluso la muerte, dependiendo de la magnitud de los niveles de concentración de los periodos de exposición de la población afectada [Quadri, 1994]. Básicamente se usan dos enfoques en el estudio de los efectos sobre la salud de los contaminantes atmosféricos: Estudios experimentales (con humanos y animales) y estudios epidemiológicos (Efectos medibles en la salud de grupos expuestos)

La calidad del aire y sus efectos sobre la salud son funciones extremadamente complejas. La asociación entre un contaminante y una enfermedad o una defunción puede ser más accidental. La muerte y la enfermedad representan sólo el extremo límite de toda una gama de respuestas. Esto, aunado al hecho de que la duración y variabilidad de los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos a los que se encuentra expuesta la población es difícil de estimar con precisión, determina una significativa incertidumbre en la identificación y cuantificación de relaciones causa-efecto [Quadri, 1994]. Enseguida se presenta un resumen de los criterios avalados por la Organización Mundial de la Salud y otras instituciones relevantes para cada tipo de contaminante.

2.2.1 Efectos en la salud del Material Particulado

La contaminación por partículas finas puede causar el deterioro de la función respiratoria. El largo plazo contribuye a enfermedades crónicas, al cáncer y a la muerte prematura. Las

partículas finas conocidas como PM_{10} 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 estima se estima que más del 8% del cáncer del pulmón de no fumadores se debe a las PM_{10} contenidas en los vehículos que funcionan con diesel. La EPA identifica los siguientes grupos como los más sensibles a los efectos de las Partículas finas respirables en el aire ambiente [Strauss y Mainwaring, 1990]: Personas con influenza, enfermedades crónicas respiratorias y cardiovasculares, ancianos, niños, fumadores y personas con asma y que tiene problemas al respirar por la nariz, durante el ejercicio, los atletas también pueden considerarse sensibles debido a su respiración forzada de alto flujo [Strauss y Mainwaring, 1990].

La exposición a Partículas puede incrementar los padecimientos cardíacos y pulmonares y existentes, lo que puede llevar a la muerte a los sujetos susceptibles [Ostro, 1990]. Desde el punto de vista de los síntomas agudos, se ha observado que producen alergias, una irritación de las vías aéreas superiores y de las inferiores y su acumulación en las inferiores puede producir enfermedades del tipo de la silicosis y la fibrosis pulmonar. Los efectos de las PM_{10} han sido estudiados en combinación con los efectos del SO_2 , y como contaminante único [Pope y cols., 1991]. En un estudio realizado en Utah, Estados Unidos, se detectó una asociación entre la tos y la exposición a PM_{10} en dos grupos de niños, sintomáticos y asintomáticos [Pope y cols., 1991], sin embargo, aún existen dudas sobre los límites en frecuencia y dosis a los cuales las partículas se vuelven nocivas para la salud por lo que es difícil establecer sus límites en la calidad del aire [Ostro, 1990].

2.2.2 Efectos en el salud del Monóxido de Carbono (CO)

Al inhalarse, el CO interfiere con el transporte del oxígeno (O_2) a los tejidos, dado que la Hemoglobina (que es el pigmento sanguíneo encargado del intercambio gaseoso tisular) tiene una afinidad 200 veces mayor por el CO que por el O_2 . De esta manera, el CO reacciona con la Hemoglobina formando Carboxihemoglobina (COHb), lo cual limita la distribución de Oxígeno al cuerpo. A niveles del 5% al 10% de COHb se deterioran la percepción visual, la destreza manual y la habilidad para aprender (una concentración de 50

ppm de CO durante ocho horas ocasiona un nivel de COHb de alrededor de 7.5%). A niveles de 2.5% a 3% de COHb las personas con enfermedades cardiacas no pueden realizar ciertos ejercicios de la misma manera como en ausencia de COHb (una exposición de 20 ppm de CO durante ocho horas produce un nivel de COHb de alrededor de 2.8%). Aunque las concentraciones de Monóxido de Carbono el aire son generalmente más bajas, la EPA reconoce que aun con exposiciones de bajo nivel las personas con enfermedades cardiovasculares se encuentran en riesgo [Davidson y cols., 1994]. En la Tabla 2.1 Davidson y cols., 1994 se muestran las correlaciones entre los % de CO en el aire en el aire y sus efectos clínicos.

Tabla 2.1 Correlación entre las concentraciones de Carboxihemoglobina y las manifestaciones clínicas en seres humanos.

Carboxihemoglobina (%)	CO en aire (%)	Manifestaciones clínicas
0 a 10		Ninguna
10 a 20	0.007 a 0.012	Cefalea moderada y fatiga
20 a 30	0.012 a 0.022	Cefalea, visión borrosa, falta de destreza motora
30 a 40	0.022 a 0.035	Debilidad, mareo, nausea, vómito, visión borrosa, confusión, palpitaciones
40 a 50	0.035 a 0.052	Debilidad, ataxia, taquicardia, confusión, alucinaciones
50 a 60	0.052 a 0.080	Convulsiones, coma,
60 a 70	0.080 a 0.112	Incontinencia, coma, convulsiones
Más de 70	0.195	Falla respiratoria y muerte

2.2.3 Efectos en la salud del Ozono (O₃)

El efecto del Ozono en la función pulmonar no está totalmente entendido, en general el Ozono a niveles de aproximadamente 1 ppm se produce un estrechamiento de las vías respiratorias en las zonas pulmonares profundas, la cual resulta en un aumento en la resistencia del paso de aire. Los efectos de la exposición prolongada a niveles típicos de Ozono de áreas urbanas aproximadamente 0.1 a 0.2 ppm no se han establecido claramente todavía. Otro efecto de los oxidantes fotoquímicos es la irritación ocular [Davidson y cols., 1994]. En la ciudad de México Castillejos y cols. (1992) realizaron un estudio en escolares, que puede reflejar un proceso inflamatorio que pudiera ser diferente de la respuesta aguda fisiológica al Ozono. Se ha observado que puede producir irritación y ardor de los ojos y del aparato respiratorio, donde produce tos seca, dolor subesternal, resequedad e irritación de la garganta y agrava las enfermedades crónicas respiratorias y cardiovasculares. También disminución de la función ventilatoria pulmonar, e inflamación neutrofílica de la submucosa respiratoria.

Castillejos y cols., 1992 describió por primera vez los efectos nocivos del O₃ sobre la salud humana, relacionada con la exposición a concentraciones de O₃ de 0.12 a 0.40 ppm durante dos horas en personas sanas y en fumadores, mientras realizaban ejercicio físico pesado. En la Ciudad de México un incremento en 53 ppm de O₃ durante 48 horas se asocia a la tos con flema el mismo día en que se realizan las espirometrías [Castillejos y cols., 1992]. Demostraron que el número de visitas a un servicio de emergencia por crisis respiratorias asmáticas en niños se relacionó con la exposición a O₃ y SO₂, encontraron que un incremento de 50 ppb aumentaba en 43 % el número de visitas al día siguiente y si los niveles altos continuaban durante dos días el porcentaje aumentaba a un 68%.

En otro estudio también realizado en la Ciudad de México, [Romieu y cols, 1992] se encontró una asociación entre los niveles de O₃ y el ausentismo escolar por enfermedad respiratoria, para los escolares expuestos hasta por dos días consecutivos a altos niveles. Los niveles de Ozono dentro y fuera de los salones de clase han sido analizados bajo diversas circunstancias. Se ha encontrado que si se mantienen las ventanas y las puertas de

los salones cerradas los niveles pueden permanecer por abajo de los niveles establecidos por la OMS, aunque el nivel de Ozono del exterior esté por arriba de 300 ppb. El efecto agudo del NO₂ y del O₃, asociados a la temperatura, sobre el tracto respiratorio de los residentes de la Zona Metropolitana del Valle de México ha producido un aumento entre 19% y 43% de las consultas, y cuando el ozono se asocia a las partículas suspendidas menores de 10 micras, produce un incremento sobre los síntomas respiratorios en los niños asmáticos. Se encontró que un incremento de 20 µg/m³ de PM₁₀ produce un incremento de 8 % en estos síntomas [Romieu y cols., 1992].

También se han descrito incrementos en el número de muertes debidas al Ozono, al Bióxido de Azufre y a las Partículas de manera individual, pero cuando se analizaron independientemente solo se demostró un aumento en la mortalidad asociado a las Partículas, datos que son consistentes con los reportados en otras ciudades [Romieu y cols., 1992]. Los efectos crónicos del Ozono solo se han reportado en estudios en animales donde se observan cambios metaplásicos en el epitelio nasal y la pérdida de las células liciadas.

2.2.4 Efectos en la salud de Óxidos de Nitrógeno

Estudios de salud ocupacional han mostrado que el Bióxido de Nitrógeno puede ser fatal en concentraciones elevadas. A menores niveles, pero todavía mayores que los que se respiran en el aire ambiental, irrita los pulmones, es causa de bronquitis y neumonía y poca disminución de la resistencia a infecciones respiratorias, por ejemplo la influenza. Según la EPA, en la actualidad no existe evidencia científica de efectos adversos, en humanos, derivados de la exposición a largo plazo de Óxidos de Nitrógeno en niveles ambientales.

Pero la evidencia combinada de los estudios de exposición controlada de animales y humanos, así como estudios de comunidad en interiores, indican con claridad la posibilidad de que el Bióxido de Nitrógeno afecta grupos sensibles de la población expuesta a niveles cercanos a los que alcanzan en el exterior [Strauss y Mainwaring, 1990]. Los diversos estudios han producido resultados controvertidos, ya que a nivel experimental reduce la eficacia de los mecanismos de defensa de los pulmones. no encontraron aumento en la

incidencia de enfermedades respiratorias agudas del tracto superior o del inferior en una cohorte de niños que fueran debidos al NO₂, pero indican que los hallazgos pueden solo generalizarse a las zonas donde el NO₂ en exteriores no es elevado.

2.2.5 Efectos en la salud del Bióxido de Azufre (SO₂)

El Bióxido de Azufre es un irritante respiratorio muy soluble. Esto provoca que la mayor parte que se inhala se absorba por la nariz y las vías respiratorias superiores. Como consecuencia, es muy escasa cantidad llega a los pulmones. En la Tabla 2.2 [Davidson y cols., 1994] se muestran datos de variada procedencia que revelan alguna disparidad en la información disponible respecto a los efectos del Bióxido de Azufre sobre la salud humana. Generalmente los datos se refieren a adultos sanos bajo condiciones experimentales en el laboratorio [Davidson y cols., 1994]. Es importante hacer notar que más de un contaminante puede inducir el mismo efecto. Por ejemplo el Bióxido de Azufre y el Formaldehído producen irritación y resistencia a la conducción del aire en la parte superior del tracto respiratorio, y tanto el Monóxido Carbono como el Bióxido de Nitrógeno interfieren el transporte de Oxígeno por la Hemoglobina.

De los efectos agudos que se han documentado, quizás el más importante es el episodio ocurrido en Londres en 1952 [Davidson y cols., 1994], donde hubo un exceso de muertes en el área, debido a un incremento en las partículas de 4,000 µg/m³ y un aumento en el SO₂ de 0.95 ppm. Los efectos del SO₂ se han asociado con incrementos en la mortalidad y en la morbilidad. En Ohio, Estados Unidos, se observó una asociación positiva entre la mortalidad diaria y los niveles de partículas suspendidas totales y el SO₂ del día previo [Pope y cols., 1991], aumento que también se ha asociado con un incremento en la morbilidad respiratoria. En Ontario, Canadá, hubo un aumento en las tasas de admisiones hospitalarias por problemas respiratorios incluyendo el asma, durante los inviernos de 1974 a 1983, atribuido a la combinación de Sulfatos y O₃ en el ambiente.

Tabla 2.2 Efectos del Bióxido de Azufre (SO₂) sobre la salud humana

Concentración (ppm)	Tiempo de exposición	Efectos
0.15 a 0.25	1 – 4 días	Respuestas cardiorespiratorias
1.0 a 2.0	3 – 10 min	Respuestas cardiorespiratorias en individuos sanos
5.0	1 hora	Sofocamiento e incremento de resistencia en los pulmones
10.0	1 hora	Peligro severo, algunas hemorragias nasales

Otro estudio realizado en Estados Unidos ,refiere una asociación entre las concentraciones diarias de SO₂ y de PM₁₀ y las tasas de síntomas respiratorios crónicos en escolares preadolescentes. También se han reportado efectos crónicos en España [Pope y cols., 1991], donde se estudiaron niños asmáticos residentes de dos zonas con diversos grados de contaminación por partículas suspendidas totales , SO₂ , encontraron que el asma de tipo II y fue más frecuente en los residentes de la zona menos contaminada y las de los tipos I, III y IV más frecuentes en los niños residentes en las áreas más contaminadas. Recientemente, se ha propuesto que las concentraciones de Sulfatos en el aire se tomen como un índice de Partículas suspendidas para la evaluación de riesgos a la salud [Pope y cols., 1991]. Sin embargo, no se establecen cortes para dichos índices.

2.3 Efectos a la salud humana debido al ruido del tráfico urbano

El ruido es una de las principales causas de la preocupación de la población de las ciudades, ya que es un indicador del nivel de vida y además puede provocar efectos nocivos sobre la salud, el comportamiento y actividades del hombre, y provoca efectos psicológicos y sociales. Según la OCDE 130 millones de personas se encuentran en un nivel sonoro

superior a 65 dB(A), el límite aceptado por la OMS y otros 300 millones residen en zonas de incomodidad. Las principales fuentes de contaminación acústica en la sociedad actual proviene del alto flujo vehicular de los vehicular, debido a las altas revoluciones y velocidades de los motores a diesel o gasolina que son ruidosos, de tecnología obsoleta y anticuada, con la falta de materiales acústicos, y por las motocicletas o los escapes rotos o abiertos de algunos vehículos. El ruido también es provocado por el comportamiento humano, abuso o uso indebido de claxons, mofles deportivos, cápsulas, arranques y frenados bruscos, radio o estereo a alto volumen [Schewela, 1999].

Los ruidos arriba de 80 dB(A) son molestos, las normas internacionales señalan como satisfactorios sonidos menores de 60 a 65 dB(A) en zonas urbanas. En el AMM los niveles que se han registrado son altos y van de los 75 a los 91 dB(A), en el AMM los Camiones urbanos generan de 80 a 94 dB(A). En la Tabla 2.3 [Schewela, 1999] se muestran los niveles promedio de nivel ruido de distintas fuentes generadoras.

Tabla 2.3. Niveles de ruido aproximado desde fuentes típicas

Fuentes	Nivel de ruido (dB(A))
Cerca de una turbina de jet	130
Máquina taladrando roca	120
Concierto de pop	110
Autobús de pasajeros	75
Conversación normal	65
Calle de colonia tranquila	55
Umbral para interrupción del sueño	45
Habitación en silencio	30
Umbral auditivo humano	0

2.3.1 Efectos físicos

El ruido puede causar daño temporal o permanente al sistema auditivo que puede deberse situaciones de trabajo, conciertos al aire libre, discotecas, eventos deportivos con motos. De acuerdo a la considerable variación en la sensibilidad humana con respecto al ruido, la naturaleza de riesgo en un ambiente ruidoso se describe en términos de “Riesgo de daño”. Este riesgo es considerado despreciable a niveles de exposición de 75 dB(A) en un tiempo de exposición de 8 horas [Schewela, 1999]. Con respecto al ruido ambiental y al ruido del tráfico en carretera no existen riesgos al sistema auditivo.

2.3.2 Efectos psicológicos

La respuesta inmediata al ruido estimula un mecanismo de defensa que resulta en una contracción de músculos alrededor de los ojos [Schewela, 1999], la respuesta causa una búsqueda involuntaria del ruido o de su origen, así mismo la fatiga y la irritabilidad se pueden hacer presentes y la tensión causada por las reacciones bioquímicas que causa la irritabilidad. La exposición al ruido puede causar disturbios al sueño, teniendo dificultad para conciliarlo.

2.4 Legislación Ambiental Mexicana aplicable a emisiones vehiculares

Los límites máximos permisibles para las emisiones vehiculares están fijadas por las NOM's (Normas Oficiales Mexicanas) en su rubro de normas referentes a la Ecología denominadas ECOL en las aplicables al aire (Contaminación Atmosférica) de emisiones de fuentes móviles. A continuación se hace un resumen de las aplicables en esta materia (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Normas Oficiales Mexicanas (ECOL) aplicables a las emisiones de fuentes Móviles [SEMARNAT, 2003].

Norma Oficial Mexicana	Objetivo	Publicación en el Dario Oficial de la Federación
<u>NOM-041-ECOL-99</u>	Provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina.	06-08-99
<u>NOM-042-ECOL-99</u>	Hidrocarburos, Monóxido de Carbono y Óxido de Nitrógeno de vehículos nuevos en planta, e Hidrocarburos del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado o natural con peso bruto vehicular que no exceda 3,856 kilogramos.	06-09-99
<u>NOM-044-ECOL-93</u>	Hidrocarburos, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno, Partículas suspendidas, totales y opacidad de humo del escape de motores nuevos que usan diesel para vehículos con peso mayor a 3,857 kg.	22-10-93
<u>NOM-045-ECOL-96</u>	Opacidad de humo de escape de vehículos en circulación que usan diesel.	22-04-97
<u>NOM-047-ECOL-99</u>	Vehículos en circulación que usan gasolina, gas licuado de petroleo, gas natural u otros combustibles alternos	10-05-00

<u>NOM-048-ECOL-93</u>	Hidrocarburos, Monóxido de Carbono y humo de motocicletas en circulación.	22-10-93
<u>NOM-049-ECOL-93</u>	Motocicletas en circulación que usan gasolina.	22-10-93
<u>NOM-050-ECOL-93</u>	Vehículos en circulación que usan gas licuado o natural u otros combustibles alternos.	22-10-93
<u>NOM-076-ECOL-95</u>	Hidrocarburos no quemados, Monóxido de Carbono, Óxido de Nitrógeno en vehículos nuevos en planta, así como Hidrocarburos del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado, gas natural y otros combustibles y que se usarán en vehículos con peso bruto mayor de 3,857 kg.	26-12-95
<u>NOM-077-ECOL-1995</u>	Opacidad de humo de vehículos en circulación que usan diesel.	13-11-95

Con la finalidad de tener un panorama del comportamiento de los niveles de emisión de PM_{10} , NO_x y CO registrados por las estaciones de monitoreo del Sistema de Información Meteorológica y Ambiental (SIMA) se presenta un historial de la cantidad de días por año que se rebasaron las normas en promedio de 24 hrs desde 1993 hasta el mes de Julio del 2002 para el AMM. Es importante saber que la norma de Calidad del Aire del PM_{10} es de $150 \mu g/m^3$ en promedio de 24 horas lo cual equivale a 100 puntos de IMECA. En la Figura 2.1 se muestran el número de días en que se rebasa la norma para PM_{10} en el AMM de 1993 al 2002, de la misma manera se muestran en las Figuras 2.2 los días en que se rebasa la

norma para CO en el AMM en el mismo periodo. Para el NO₂ se rebasó un solo día la norma para el mismo periodo que fue en el año de 1993.

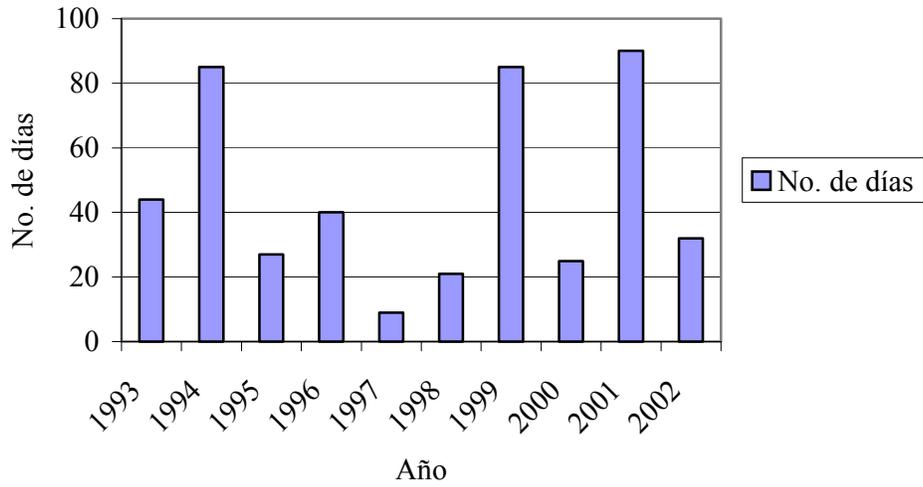


Figura 2.1 Días en que se rebasó la norma para PM₁₀ en el AMM de Enero de 1993 a Julio del 2002 en el AMM [SIMA, 2002].

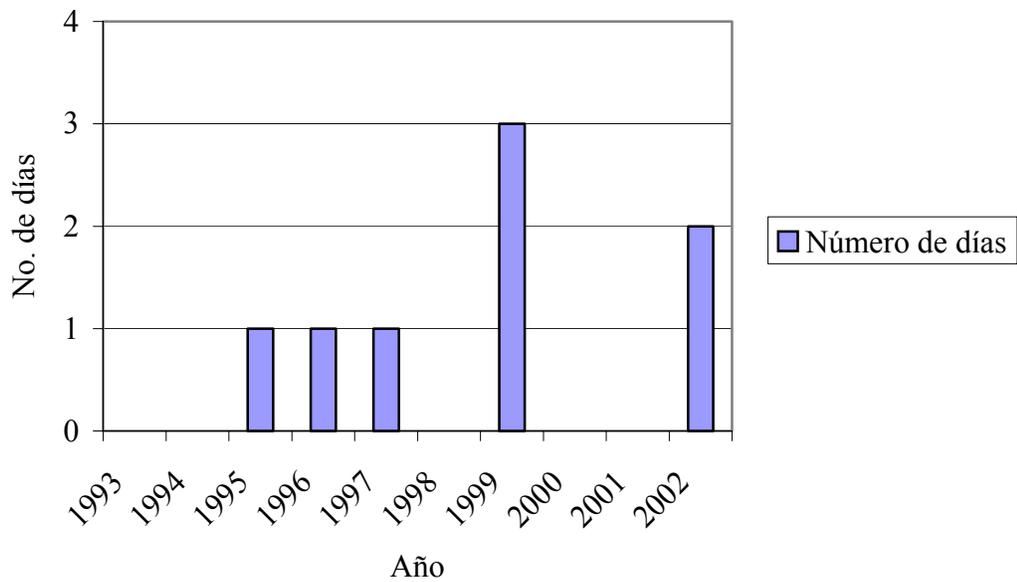


Figura 2.2 Días en que se rebasó la norma para CO en el AMM de 1993 a Julio del 2002 en el AMM [SIMA, 2002].

CAPITULO 3

ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACION POR TRANSPORTE

En este capítulo se describen las características que conforman a las estrategias y medidas que se implementan para controlar y ayudar a los procesos de minimización de los efectos de la contaminación del aire. Esto nos permite conocer la importancia que juegan estas medidas en los programas integrales de control de la contaminación.

3.1 Estrategias de control de la contaminación del transporte

El diseño de una estrategia de gestión de calidad del aire debe conllevar el cumplimiento de las normas de calidad del aire en un plazo pertinente. Es por ello que la gestión de calidad del aire tiene este compromiso y reconocer las interdependencias entre la contaminación y los procesos económicos y urbanos que determinan el uso de energía, sin olvidar la calidad y tipo de energéticos y los usos del suelo, así como las características tecnológicas de la planta vehicular, industrial y de servicios.

Ateniendo a estas referencias, aquí se plantean dos vertientes donde pueden desarrollarse diferentes políticas y acciones. La primera correspondería a la estructura de los sectores o procesos de actividad metropolitana donde habría que adoptar algunos criterios generales que permitan racionalizar el consumo de energía, la calidad de los energéticos, extender el uso de tecnologías de control de emisiones y combustión, y regular los usos y estados de suelos. En una segunda vertiente, más fina, destaca la necesidad de actuar sobre las emisiones de los contaminantes que son prioritarios en función de los aspectos más graves de la calidad del aire. Los instrumentos de actuación en ambos niveles abarcarían diversos

mecanismos económicos, así como procedimientos normativos y regulatorios dentro de un marco institucional eficaz y con la capacidad política, técnica y de control necesaria. Este esquema de planeación se ilustra en la Figura 3.1 [Quadri, 1994].

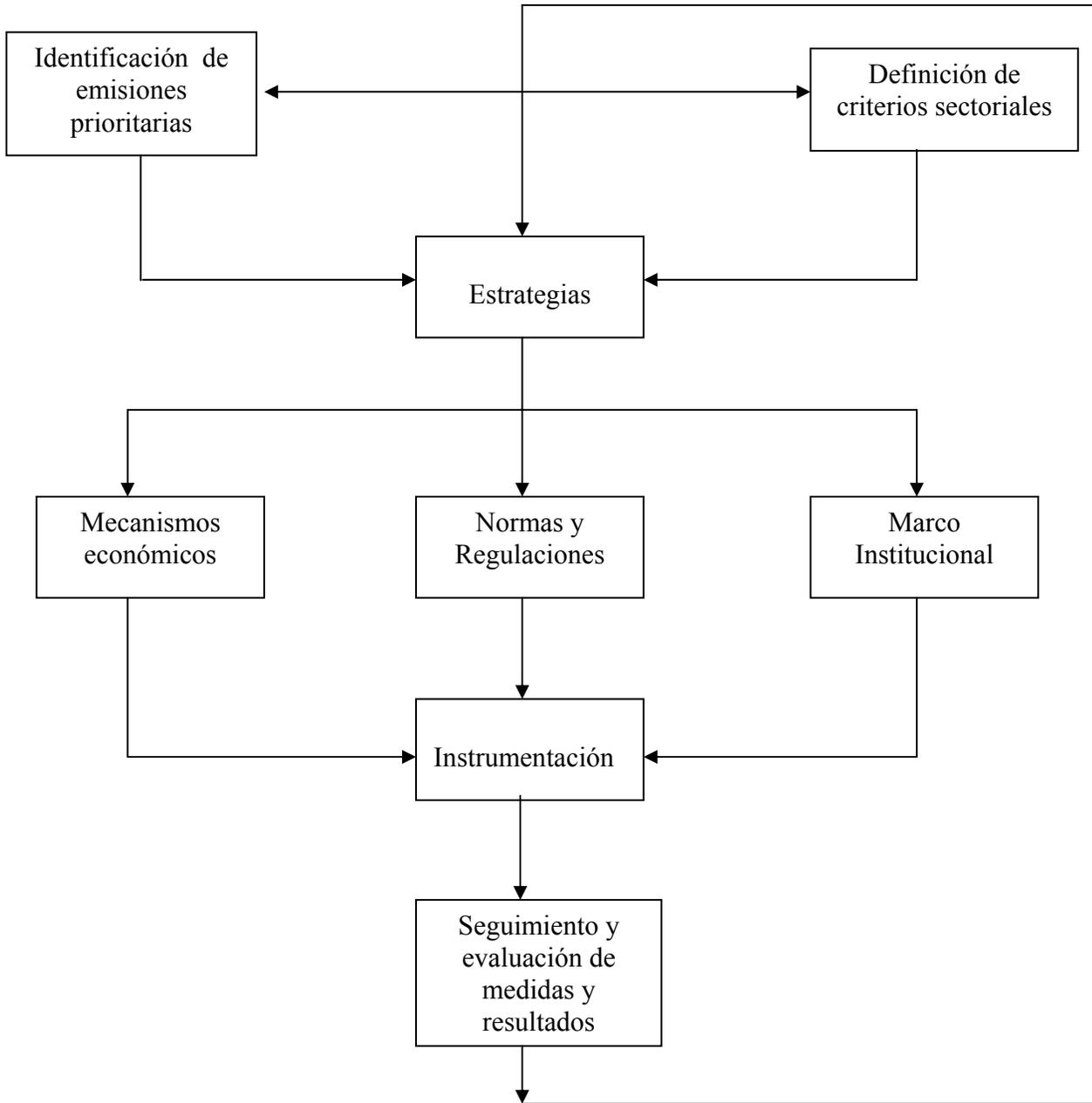


Figura 3.1 Etapas en la planeación y el control de la calidad del aire.

En la Figura 3.1 se puede apreciar el papel medular que juegan las estrategias dentro de las funciones de control de la calidad del aire en donde factores como las normas, el marco jurídico, la instrumentación se encuentran interrelacionadas estrechamente.

Uno de los principales desafíos en el desarrollo de un plan de calidad del aire coordinado, robusto y costo-efectivo es considerar todos los aspectos científicos, tecnológicos y políticos, institucionales y administrativos del problema, así como necesidades de educación dentro y entre las diferentes instituciones y grupos interesados. Por ejemplo, el Programa de Calidad del Aire de la Ciudad de México está utilizando una aproximación de evaluación integrada (EI) para facilitar la integración de ciencias de la salud y la atmósfera con análisis tecnológico y político, así como la información de los grupos involucrados y la diseminación de conocimientos. La Figura 3.2 ilustra cómo el diálogo y los diferentes elementos analítico se conjuntan. Asociado a cada uno de estos componentes se encuentra el conocimiento especializado y la información detallada relacionada que, cuando se conjuntan, informarán a los gobiernos del Distrito Federal, del Estado de México y el Nacional y a otras partes involucradas sobre cuales emisiones deben ser primeramente consideradas y qué opciones de política ambiental pueden ser las más efectivas para reducir estas emisiones a un costo razonable [Molina, 2000].

Como se ilustra en la Figura 3.2 son extensos los requerimientos de obtención de datos, de modelación necesarios para caracterizar problemas concurrentes de calidad de aire y soluciones programáticas. Este diagrama simplificado divide las actividades de cuatro columnas. Primeramente se encuentra la columna del diálogo político, la cual representa la interacción del proyecto con tomadores de decisiones en el Valle de México responsables de conjuntar e implementar la próxima versión del Programa de Calidad del Aire. Este diálogo multifacético está apoyado por la investigación en los impactos de las emisiones de contaminantes en la salud humana (Ciencia de efectos en la Salud); investigación sobre las fuentes de contaminantes y su transformación en la atmósfera a Ozono, Partículas finas y otros contaminantes (Ciencias de la Atmósfera); e investigación sobre las fuentes directas e indirectas de esas emisiones, incluyendo la tecnología adecuada y las opciones políticas que

pueden reducir las emisiones de una manera coordinada y costo–efectiva (Actividades y Emisiones),

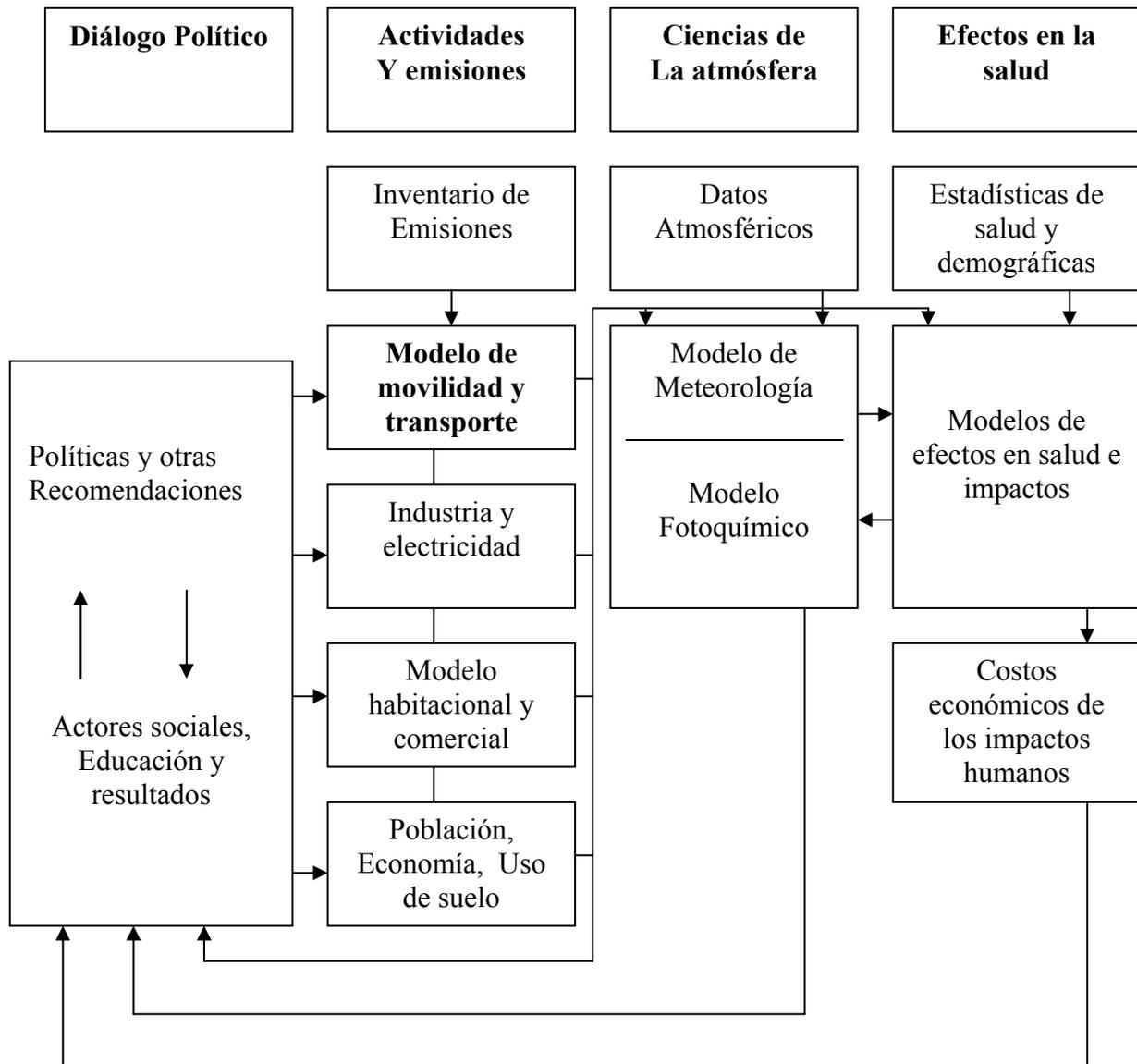


Figura 3.2 Diagrama simplificado del conocimiento base de Evaluación Integrada [Molina, 2000].

A través del uso de la estructura de la evaluación integrada, se puede comparar el desempeño de las numerosas opciones de reducción de emisiones. Estas opciones pueden ser comparadas no solo bajo circunstancias anticipadas, sino también por otras circunstancias y contingencias. Una aproximación de análisis de escenarios empleando las capacidades analíticas de la estructura de evaluación integrada puede identificar estas opciones. Y es preciso recordar que un programa “Robusto” no lo es sólo con respecto al rango de opciones que engloba, sino también en cómo “Aprende” con el tiempo y es capaz de adaptarse a nuevos conocimientos científicos, a la información relacionada a la efectividad de sus programas, y a los cambios de la economía local, regional y nacional. Por lo tanto un plan robusto de gestión de calidad del aire considera no solamente programas y medidas que son deseables implementar, sino también factores políticos e institucionales que le permitan operar efectivamente con el tiempo [Molina, 2000].

3.2 Elementos de una estrategia de control de la contaminación para transporte

El propósito de un programa de control de contaminación está orientado a reducir las emisiones vehiculares hasta un nivel recomendable para lograr una calidad del aire saludable. Se deben de considerar a los contaminantes provenientes de las fuentes móviles de una ciudad o de un país, hasta límites prácticos de acuerdo a su factibilidad tecnológica, económica y social. A fin de lograr estos objetivos generales, es necesario establecer normas de emisión para lograr la reducción esperada, para esto se aplican los programas relativos al cumplimiento de estas normas y las medidas de control del uso de vehículo cuando así se requiera.

Los objetivos para reducir emisiones deben ser cumplidos de tal forma que sean equitativos con respecto a grupos de la población afectados y, cuando exista la posibilidad, combinarlos con medidas alternas de la forma menos costosa. [Schwela, 1999]. La formulación e implementación de una estrategia integral y eficaz de control de la calidad del aire exige un esfuerzo coordinado de las instituciones nacionales, regionales y locales que representan las diferentes jurisdicciones de las zonas urbanas. Como mínimo deberán

participar las instituciones responsables del medio ambiente, el transporte y el tránsito, la calidad y abastecimiento de combustible, la industria y la salud pública. Es así mismo importante la participación de la comunidad científica y empresarial, los sindicatos y las organizaciones no gubernamentales. Además, deberá elaborarse un plan específico de participación para identificar las opiniones del público e incorporarlas en el proceso de toma de decisiones. [OECD, 1995]

En general, la formulación e implementación de las medidas específicas de control de la contaminación se han visto obstaculizadas por la falta de claridad o la superposición de responsabilidades institucionales; el equipo, experiencia técnica y recursos humanos y financieros inadecuados, administración financiera ineficiente, falta de voluntad política, y respaldo o participación del público limitados. Las instituciones responsables de esta actividad deberán fortalecer sus recursos humanos y financieros y sistemas administrativos si han de poner en práctica y hacer cumplir una estrategia eficaz de control de la contaminación del aire. La composición exacta de la estrategia no puede ser la misma para todos los centros urbanos, sino que deberá basarse en los problemas específicos de la contaminación atmosférica. Toda estrategia de reducción y control de la contaminación atmosférica deberá orientarse en una cuidadosa evaluación de los datos sobre emisiones y calidad del aire, modelos de dispersión y análisis costo-beneficio de las diferentes medidas [Mage, 1995].

3.3 Análisis de las estrategias de control de la contaminación por transporte

Las medidas pueden clasificarse como de Mando y Control o de Incentivos de Mercado, por lo general estas medidas, si se utilizan bien, se complementan entre sí. Las medidas de Mando y Control para reducir la contaminación atmosférica por vehículos automotores se basan principalmente en opciones regulatorias. Incluyen las normas sobre emisiones que fijan un tope a la concentración de contaminantes liberados por los vehículos, normas que especifican la calidad del combustible para los vehículos automotores, requisitos para usar determinada tecnología (como boquillas más pequeñas

para la carga de combustible sin plomo), reglas de prueba de certificación de vehículos nuevos, requisitos de inspección de vehículos en uso y restricciones al tránsito.

Los Incentivos de Mercado se basan en las fuerzas de mercado para incorporar mejoras a la calidad del aire. Dado que la contaminación puede considerarse como una externalidad negativa cuyos costos no son plenamente absorbidos por los emisores de contaminantes, los incentivos de mercado se basan en el principio de que "el que contamina paga" e impone un precio a las actividades contaminantes, de esta manera internalizando el costo de la externalidad. Las medidas se usan para los vehículos, combustibles y gestión de transporte y se clasifican como medidas de Mando y Control, Incentivos de mercado y medidas adicionales. Estas medidas suelen estar acompañadas por acciones de fomento de la concientización pública y la educación [INE, 1997].

En la Figura 3.3 se muestran las medidas de Mando y Control que se aplican a vehículos. Las medidas contienen los requerimientos legales y disposiciones normativas sobre emisiones que son aplicadas a vehículos nuevos, en uso y a vehículos importados., las cuales incluyen los programas de inspección y mantenimiento (I/M), pruebas en líneas de ensamblado y otros. Asimismo, se presentan las medidas de incentivos de mercado para éstos. En la Figura 3.4 se muestra que se aplican medidas normativas para los combustibles de los vehículos, las cuales son para gasolina, diesel y combustibles alternativos como el GNC, GLP, Metanol y Etanol. Los incentivos de mercado son los impuesto a los combustibles que pueden ser aplicados y los permisos.

Por otro lado, se señalan más adelante las medidas referentes a la gestión del transporte que se dividen en acciones de Mando y Control, Incentivos de Mercado y otras opciones.

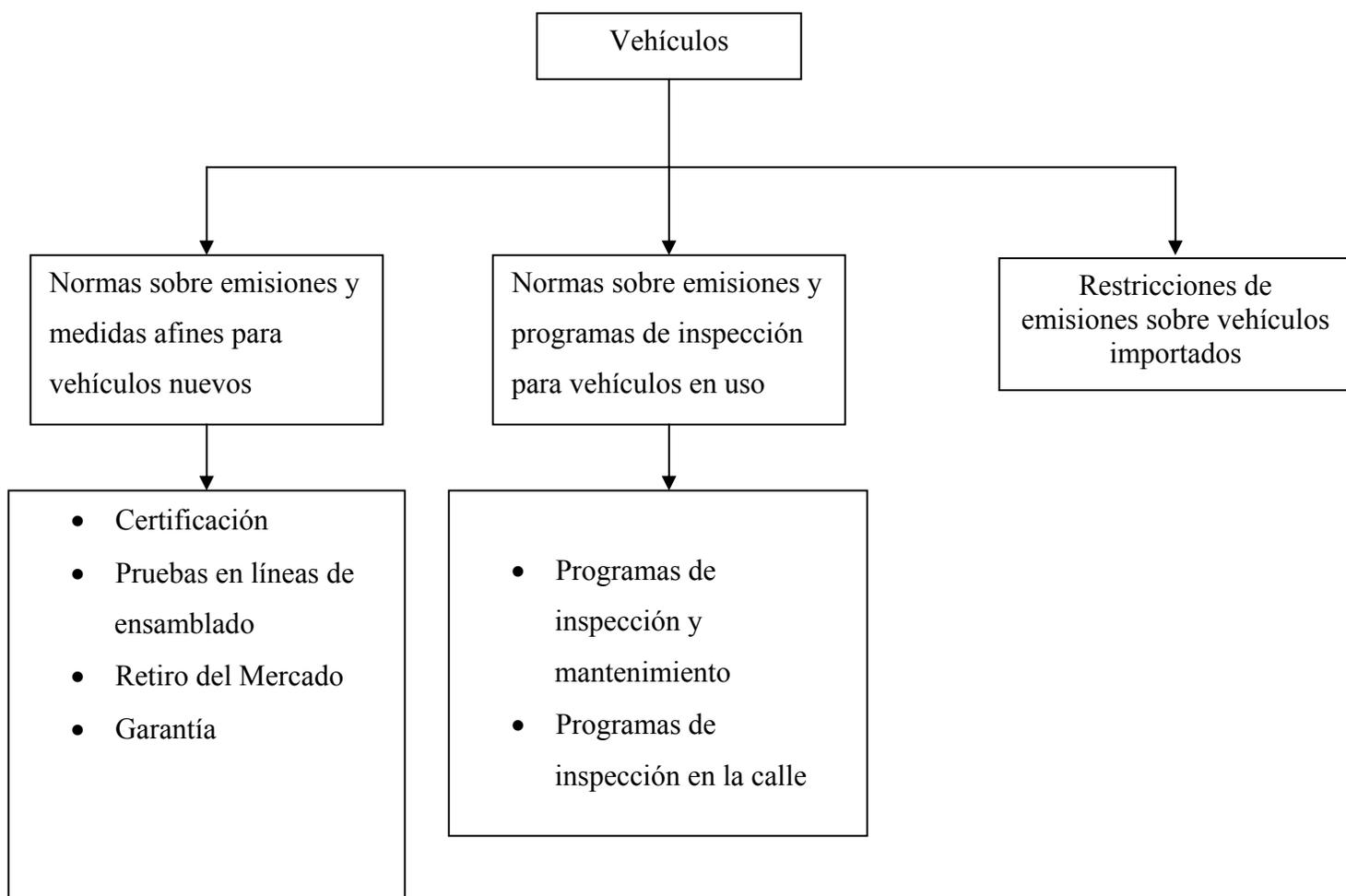


Figura 3.3 Medidas típicas para la reducción de contaminantes relativas a vehículos.

Los Incentivos de Mercado para las medidas relativas a vehículos son los siguientes:

- Cargos por emisiones
- Cargos por registro de vehículos
- Programas de reconversión
- Incentivos para remplazar o dar de baja vehículos

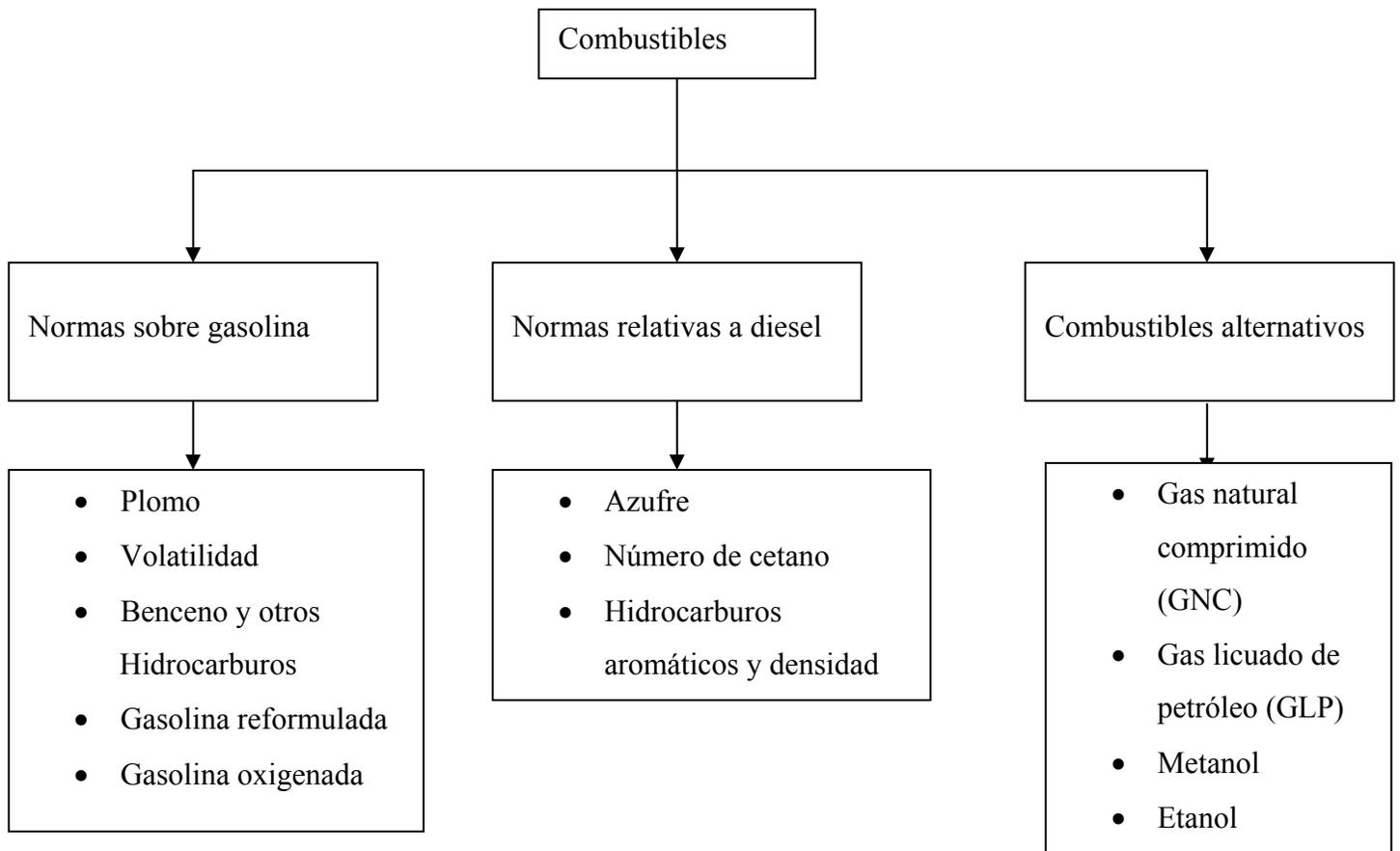


Figura 3.4 Medidas típicas para la reducción de contaminantes relativas a combustibles.

Los Incentivos de Mercado para las medidas relativas a combustibles son los siguientes:

- Impuestos a los combustibles
- Permisos y créditos negociables

A continuación se señalan las medidas de Mando y Control, Incentivos de Mercado así como otras medidas adicionales que se llevan cabo en la Gestión del Transporte y que tienen la finalidad de reducir la contaminación por transporte:

Medidas de Mando y Control:

- Vedas de circulación
- Restricciones al estacionamiento y al comercio en la vía pública
- Medidas de prioridad de circulación de autobuses
- Imposición de un número mínimo de pasajeros
- Horario escalonado de trabajo
- Límite de velocidad
- Planificación y control de uso del suelo

Incentivos de Mercado

- Peajes
- Concesión de licencias de zona

Medidas adicionales

- Servicio de transporte colectivo
- Fomento de transporte no motorizado
- Estacionamiento fuera de la vía pública

3.4 Programación lineal y su aplicación en problemas de contaminación del aire

La evaluación ambiental y económica de las estrategias encaminadas a reducir la contaminación del aire involucra el manejo de muchas variables. Encontrar los valores óptimos bajo criterios de costos y beneficios no es una tarea sencilla pues involucra aspectos sociales, tecnológicos, políticos y culturales las cuales se tienen que combinar para obtener soluciones factibles para controlar la contaminación del aire. Los métodos de optimización son herramientas poderosas para estudiar este tipo de problemas y obtener las

mejores soluciones. Una de las técnicas más utilizadas es la Programación lineal. Esta técnica se aplicó en el primer estudio a gran escala de contaminación del aire en Estados Unidos, el cual se llevó a cabo en la región de San Luis Missouri, En este estudio se incluyeron emisiones de distintas fuentes: tanto de área como puntuales. La Programación lineal representó una importante herramienta para la planeación ambiental a nivel local o de cuenca atmosférica [Kohn, 1978].

La Programación lineal en este estudio se utilizó de la siguiente manera:

- 1.- Se consideró un nivel de emisiones de un contaminante en el aire, que fue proporcional a las emisiones totales de ese contaminante.
- 2.- Se basó en un modelo de difusión en la cual las localizaciones geográficas de las diferentes fuentes de contaminación se tomaron en cuenta. En este modelo, las medidas para abatir la contaminación incluyeron la localización de nuevas fuentes de contaminación o la relocalización de las ya existentes.
- 3.- El logro de niveles o estándares de contaminación a un costo total mínimo de abatimiento de la contaminación.

En otro estudio llevado a cabo en la Ciudad de México por el Instituto Mexicano del Petróleo y los Alamos National Laboratory, se utilizó la Programación lineal para evaluar la contaminación en el Ciudad de México. La metodología de evaluación utilizó la Programación Lineal Mixta y la Teoría de decisiones [Hardie y cols. 1994] considerando factores económicos, sociales, técnicos, ambientales, políticos e institucionales. El grupo de estrategias seleccionadas para ser evaluadas se llevó a cabo con la Programación lineal entera mixta con la que se obtuvieron al menor costo un cierto nivel de reducción de contaminantes fijado. Esta metodología fue creada para ayudar a las autoridades en la toma de decisiones párale control de la contaminación del aire.

CAPITULO 4

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR TRANSPORTE

Este capítulo plantea el proceso de identificación, elección y combinación de la serie de opciones de reducción de la contaminación ocasionada por el transporte en el AMM. Primeramente, se analizan las opciones de reducción de la contaminación para transporte y se seleccionan las más adecuadas para el AMM. Se predicen los factores de emisión de HC, NO_x y CO para la flota vehicular con la finalidad de estimar las toneladas diarias emitidas. Estos parámetros, así como los costos de conversión e implementación para cada vehículo de la opción de reducción de emisiones se alimentan a un sistema de optimización lineal para dos casos generales. Se busca la combinación de las opciones de reducción de emisiones para obtener un costo mínimo total de inversión para una cierta reducción de las emisiones. En el segundo caso se fija capital económico y se busca la combinación óptima que genere las menores emisiones de contaminantes de acuerdo a los tipos de vehículos que se les aplique.

4.1 Metodología de evaluación de estrategias de control de la contaminación por transporte para el AMM.

La Figura 4.1 presenta un diagrama que nos permite identificar cada una de las acciones ejecutadas que representan a la metodología general para evaluar la reducción de la contaminación para transporte. El diagrama de flujo de la metodología inicia con la selección de las opciones de reducción de la contaminación por transporte, seguido del cálculo de los factores de emisión en gr/km para HC, NO_x y CO del año 2000.



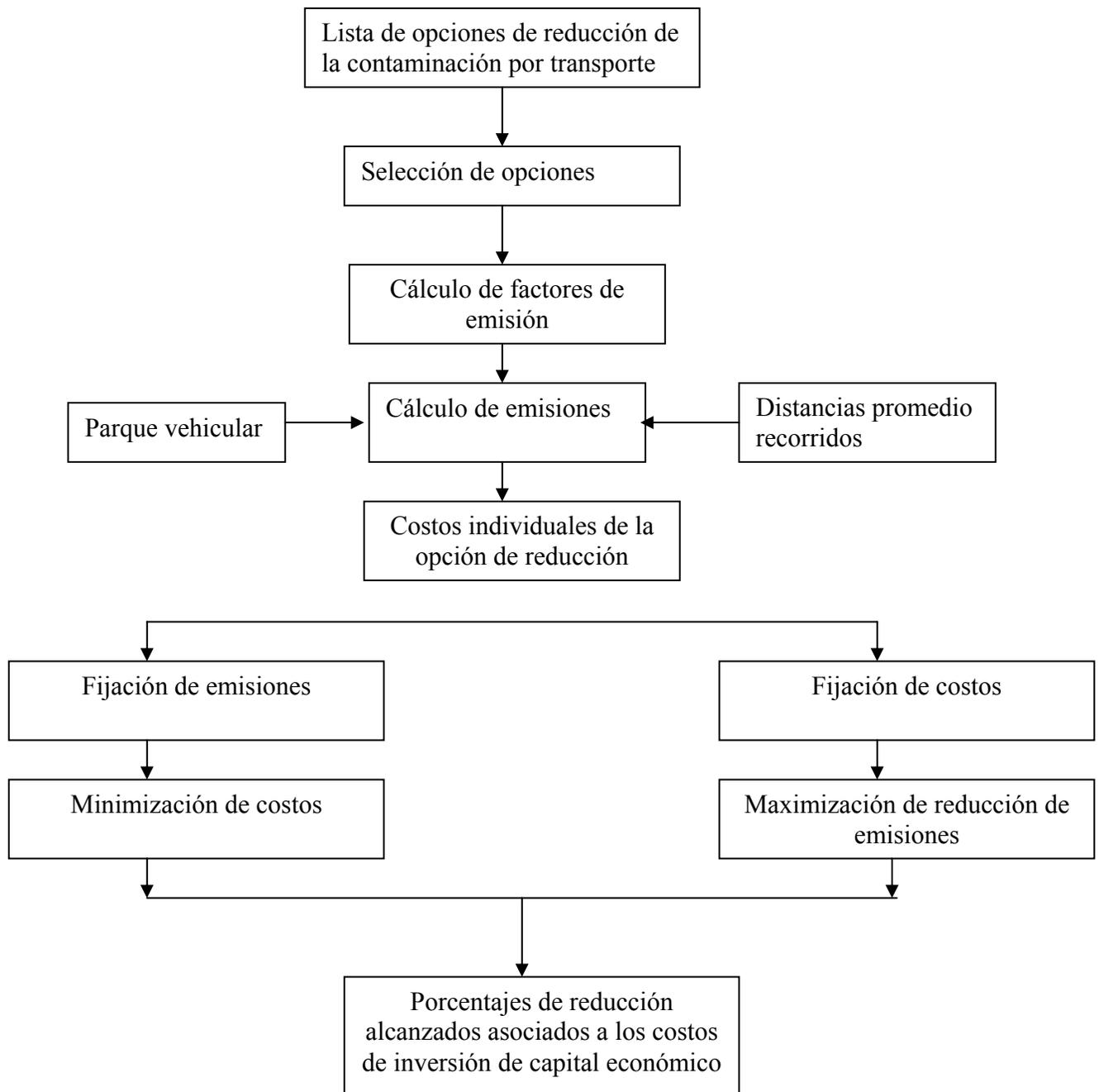


Figura 4.1 Metodología de control de la contaminación por transporte para el AMM.

Junto al número de los vehículos en el AMM y las distancias promedio diarios, se calculan las emisiones en kg/día generadas por cada tipo de vehículo: Así mismo se calculan los costos para cada opción de reducción de la contaminación y se aplica la Programación

lineal para obtener la combinación óptima que minimice los costos de las opciones de reducción de la contaminación. En el segundo caso se calculan las emisiones de contaminantes a partir de un planteamiento de optimización de acuerdo a los montos de inversión que pueden aplicarse a cada opción de reducción de la contaminación que también usa la Programación lineal como herramienta para la resolución matemática del problema.

4.2 Selección de opciones de reducción de la contaminación por transporte.

Las opciones de reducción se muestran la Sección 3.3 de este trabajo, donde las opciones se clasificaron de acuerdo a su tipo y origen. Se seleccionan para evaluación algunas medidas de reducción de la contaminación por transporte recomendadas en un simposio denominado “Mejoramiento de la calidad del aire mediante soluciones rentables basadas en diversas tecnologías de emisiones vehiculares” realizado por el ITESM y el Southwest Research Institute [UNINET, 1992]. Las recomendaciones enfatizaron las siguientes áreas:

- Tecnología para el control de emisiones en vehículos a gasolina.
- Tecnología para el control de emisiones vehículos a diesel.
- Combustibles alternos.
- Regulación, inspección, requerimientos para vehículos nuevos y viejos.
- Sistema de control para automóviles y vehículos de carga en uso.

En el simposio, los problemas fueron clasificados en categorías que incluyen problemas relacionados con el parque vehicular, combustibles y lubricantes, infraestructura, legislación, información, recursos económicos. A partir de la definición de estos problemas hicieron 128 recomendaciones y se seleccionaron las más importantes. Se recomendaron una serie de acciones generales para lograr disminuir las emisiones vehiculares en el AMM. Se identificaron y clasificaron 25 problemas relacionados con la emisión de contaminantes a la atmósfera del AMM. Las recomendaciones se centraron en aplicar medidas a la flota vehicular existente las cuales de acuerdo a sus condiciones de uso, mantenimiento, vida útil y distancias recorridas representan el aspecto de mayor importancia en el AMM para la

generación de contaminantes. Las 16 recomendaciones más importantes de reducción de la contaminación por transporte propuestas en esta reunión se muestran en la Tabla 4.1 las cuales fueron seleccionadas por el panel de expertos participantes.

Tabla 4.1 Lista de recomendaciones de reducción de la contaminación por parte del grupo de trabajo.

Número	Recomendación
1	Recuperar los vapores de Gasolina en las estaciones de servicio
2	<i>Usar el Gas Natural comprimido o Gas LP en flotillas de vehículos de tamaño medio</i>
3	Quitar de la circulación vehículos con altas emisiones y con mucho uso
4	Reparar, ajustar o modificar los vehículos que no pasen la prueba “Bar 90”
5	Medir y controlar dentro de ciertos límites el NO _x , HC y CO
6	<i>Abastecer de combustibles oxigenados y reformulados tales como el Metanol, Etanol, MTBE/ETBE, TAME</i>
7	Viajar en periodos de poco tráfico
8	Plan maestro para autobuses y tren ligero
9	Usar fondos del gobierno para mejorar el transporte público
10	Mejorar la logística del flujo vehicular
11	Regular el uso de espacios de estacionamiento
12	Llevar a cabo el inventario formal de emisiones
13	<i>Promover el uso de Gas natural comprimido en el transporte público incluyendo Taxis, Camiones urbanos, Microbuses y vehículos oficiales</i>
14	Buscar fondos federales para implementar diversas opciones de diferentes combustibles
15	Establecer un laboratorio independiente de medición y pruebas
16	Concientización ambiental

Las recomendaciones presentadas en la Tabla 4.1 se dieron en 1992 pero todavía se pueden aplicar debido a que son medidas que se implementan a largo y a mediano plazo. De estas recomendaciones, las medidas no. 2, 6 y 13 de ellas pueden aplicarse a la metodología de control de este trabajo. Aunque otras también se pueden aplicar pero es más complicado debido a la participación de otros factores no considerados en este estudio. Las recomendaciones de este estudio se centran en la aplicación de combustibles alternos y reformulados en la flota vehicular. Así mismo se requiere la medida No. 12 para tener una base cuantitativa de emisiones diarias o anuales de CO, NO_x y HC (Inventario de emisiones).

Las otras son medidas u opciones que involucran directamente a las autoridades y a las organizaciones a través de la aplicaciones de recursos económicos e inversiones a largo y mediano plazo. En el capítulo 6 indican y se resuelven los escenarios para evaluar las opciones de reducción de la contaminación por transporte.

4.3 Cálculo de emisiones del transporte

Un requerimiento fundamental para proponer estrategias con la finalidad de controlar la contaminación ambiental, es contar con un inventario de emisiones donde se cuantifican los contaminantes emitidos a la atmósfera. Es necesario entender la estrecha relación que existe entre las emisiones que resultan, los métodos y políticas necesarias que aseguren que los niveles de contaminación presentes en el ambiente se encuentran dentro de los límites permisibles.

En un inventario de emisiones de contaminantes, las fuentes de emisión se clasifican dentro de dos categorías principales:

- Fuentes de área
- Fuentes puntuales

Las fuentes móviles son una subcategoría que queda dentro de las fuentes de área. Sin embargo los procedimientos para preparar y mantener un inventario de emisiones de fuentes móviles difieren de aquellos utilizados por las fuentes de área. Las fuentes móviles que integran este tipo de inventario de emisiones y para las cuales se desarrollan una serie de procedimientos de cálculo incluye a los vehículos que circulan por las carreteras públicas, aviones, locomotoras y otros.

La Agencia de Protección al Ambiente (EPA) y la Comisión de Recursos del Aire de California (CARB) de los Estados Unidos, han desarrollado programas de recolección de grandes cantidades de datos con la finalidad de cuantificar la tasa de emisiones de contaminantes emitidos por cada categoría individual de vehículos automotores. Ambas organizaciones han utilizado ésta información para desarrollar modelos que ayuden a los analistas a estimar la contribución de emisiones de origen vehicular al inventario de emisiones local. Estos modelos, comúnmente conocidos como modelos de factores de emisión, están diseñados para considerar los numerosos efectos que influyen en la determinación del volumen de contaminantes emitidos. El modelo de estimación de emisión desarrollado por la EPA, es llamado Mobile 5 [Radian, 1995]. Actualmente ya se dispone del Mobile 6 que abarca el cálculo de otros factores de emisión como CO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}.

Los componentes primarios del modelo para calcular factores de emisión incluyen los factores de emisión base, la caracterización de la flota vehicular, las características del combustible, las condiciones de operación de los vehículos, los efectos de las condiciones ambientales locales, el efecto de programas alternativos de inspección y mantenimiento y el efecto de modificaciones y mala recarga de combustible. Ninguno de estos factores es constante o fijo. La tecnología está continuamente desarrollándose y por lo tanto se producen cambios en la emisión de contaminantes. Los cambios en los precios de los combustibles y las condiciones económicas también producen cambios en las ventas de vehículos y por tanto en los patrones de viaje. Se quieren grandes esfuerzos para cuantificar de manera precisa estos factores y poder así estimar la influencia de estos factores tienen sobre los niveles de emisión vehicular [Vega y de Anda, 1995].

Para el cálculo de las emisiones generadas por la flota vehicular se usan factores de emisión que representan el promedio estadístico de la tasa actual a la cual un contaminante es liberado a la atmósfera. Los factores de emisión se determinan para cada tipo de vehículos con la ayuda del modelo Mobile 5 para el AMM. Este modelo fue desarrollado en Fortran basado en el Mobile-5A de la EPA de los Estados Unidos, modificado por Radian International para desarrollar los factores de emisiones aplicados a la flota vehicular que circula en el AMM [INE, 1997]. El modelo Mobile 5 AMM calcula los factores de emisiones evaporativas y de escape para los contaminantes CO, HC y NO_x en gr/km, basándose en una flota vehicular promedio que consume como combustibles gasolina o diesel. Los tipos de vehículos que considera el modelo son:

Tabla 4.2 Clasificación de Vehículos [Radián, 1995].

Clasificación	Tipo de vehículo
LDGV (Light Duty Gasoline Vehicles)	Vehículos a gasolina de servicio ligero
LDGT1 (Light Duty Gasoline Trucks 1)	Camionetas a gasolina de reparto ligero
LDGT2 (Light Duty Gasoline Trucks 2)	Camionetas a gasolina de reparto pesado
HDGV (Heavy Duty Gasoline Vehicles)	Camiones a gasolina de carga pesada
LDDV (Light Duty Diesel Vehicles)	Vehículos a diesel de servicio ligero
LDDT (Light Duty Diesel Trucks)	Camionetas a diesel de servicio pesado
HDDV (Heavy Duty Diesel Vehicles)	Camiones a diesel de carga pesada
MC (Motorcycles)	Motocicletas

Las información requerida para categoría es la siguiente:

- Número
- Año
- Modelo
- Distribución por año de cada categoría
- Kilometraje anual acumulado
- Velocidad promedio de circulación

Al calcular los factores de emisión el modelo Mobile 5 AMM considera también una serie de variables que pueden ser modificadas. Estas incluyen:

- Altitud
- Año calendario
- Velocidad promedio
- Temperatura ambiente
- Temperaturas mínima y máxima
- Mes de evaluación
- Características del combustible
- Número de mantenimientos anuales.

Los archivos con que cuenta el modelo Mobile 5 AMM son los siguientes:

- M5MONT.EXE; es el archivo ejecutable
- MONT.RUN; es el archivo de entrada de datos para el AMM.
- MONT.OUT; es el archivo de salida de datos para el AMM.
- MONTMAP.INP; archivo modificable donde se pone la correspondencia de los modelos de vehículos mexicanos con los de los E.U.A.
- REGMAR.INP; porciento de los vehículos por año modelo
- REGMC.INP; parque vehicular por tipo de vehículo del lugar donde se esta aplicando el modelo.

El modelo se ejecuta al introducir el archivo MONT.RUN en el editor del MS-DOS, éste se considera el archivo de entrada y es donde se modifican los datos que se quieran cambiar; después se corre el M5MONT.EXE y por último se va al archivo MONT.OUT para obtener los factores de emisión para cada tipo de vehículo. Con el recorrido promedio de los vehículos, el número de ellos de acuerdo a su clasificación y los factores de emisión calculados con el modelo Mobile 5 para el AMM, se determinan las emisiones para cada tipo de vehículo en el periodo que se desee (Día, Mes, Año).

4.4 Metodología para el cálculo de los factores de emisión

El primer paso para estimar los factores de emisión es calcular la Tasa de Emisión Base (BER) de vehículos automotores dentro del modelo Mobile 5 AMM. Las BER se calculan a partir de pruebas de laboratorio sobre los vehículos en uso, bajo condiciones de prueba estandarizada (temperatura estándar, prueba de combustible, ciclos de manejo, entre otros). En general, las ecuaciones que definen las BER incorporan una tasa de emisión de kilometraje cero y una tasa de deterioro. La tasa de emisión de kilometraje cero describe las emisiones de vehículos nuevos, mientras que la tasa de deterioro describe como se incrementan las emisiones al incrementarse el kilometraje. Las Ecuaciones. 4.1 y 4.2 que definen las BER son las siguientes [Radián, 1995]:

$$\text{BER} = \text{ZML} + (\text{DET1} * \text{CUMMIL} / 16,000) \quad (4.1)$$

Para CUMMIL \leq A 80,000 kilómetros.

$$\text{BER} = \text{ZML} + (\text{DET1} * 5) + (\text{DET2} * \text{CUMMIL} - 80,000) / (16,000) \quad (4.2)$$

Para CUMMIL $>$ 80,000 kilómetros.

Donde:

BER = Tasa de Emisiones Base.

ZML = Nivel de emisiones a kilometraje cero (intersección con el eje cero).

DET1 = Tasa de deterioro por cada 16,000 kilómetros, para un kilometraje acumulado de hasta 80,000 kilómetros.

DET2 = Tasa de deterioro por cada 16,000 kilómetros, para un millaje acumulado de más de 80,000 kilómetros.

CUMMIL = Kilómetros medido en el odómetro.

Las tasas de emisión base sin embargo no corresponden exactamente a las emisiones vehiculares. Las tasas representan las emisiones medidas bajo condiciones de prueba altamente controladas. Con la finalidad de reconciliar las diferencias que existen entre las emisiones medidas en pruebas y las emisiones actuales, se aplican diferentes factores de

ajuste a las emisiones actuales. Mediante esta metodología, un Factor de Emisión Base (BEF) puede ser calculado a partir de las BER. El cálculo se hace mediante Ecuación 4.3:

$$\text{BEF} = (\text{BER} * \text{OMTCF} * \text{PCLEFT}) + \text{OFFCO} + \text{OMTTAM} \quad (4.3)$$

Donde:

BEF = Factor de Emisión Base.

VER = Tasa de Emisión Base.

OMCTCF = Corrección por temperatura, por la Presión de Vapor Reid (PVR) y modos de operación.

PCLEFT = Crédito del programa de inspección y mantenimiento.

FOCO = Corrección del CO, temperatura baja.

OMTTAM= Compensación por modificaciones, considera los siguientes tipos de modificaciones:

- Bomba de aire.
- Catalizador.
- Restricción de alimentación de combustible.
- Recirculación de los gases de escape.
- Uso de combustible con Plomo.
- Temperatura y modo de operación.

La Ecuación 4.3 muestra únicamente los factores de ajuste principales que son aplicables a todos los tipos de contaminantes en muchas situaciones típicas. Hay factores de ajuste adicionales que son únicamente aplicables en circunstancias muy especiales de un contaminante por ejemplo la corrección al CO por baja temperatura. Después de que han sido calculados los factores de emisión base para cada año modelo con los ajustes apropiados, se calculan los factores de emisión para la composición de la flota, con la

inclusión de factores de ajustes adicionales. Los factores de emisión para la composición de la flota (COEF) se calculan usando la Ecuación 4.4 [Radián, 1995]:

Donde:

TF = Fracción de viaje, fracción de la flota en el año calendario al que corresponde al año y modelo del vehículo.

SALHCF = Corrección por velocidad, aire acondicionado, carga extra y remolques.

RVPCF = Corrección por PVR (Presión de Vapor de Reid) en canister abierto y vehículos sin catalizador.

Los factores de ajuste adicionales (SALHCF) consideran los efectos de las velocidades de tráfico características en áreas específicas, el uso de aire acondicionado, carga extra de remolques. Después de estos ajustes, cada factor de emisión ajustado es ponderado con la fracción de viaje (Vehicle Miles Traveled).

4.5 Costos de las opciones de reducción de la contaminación por transporte

Estos costos son los que se generan al implementar las opciones de reducción por transporte que se eligieron de la tabla 4.1. Estos costos cubren la conversión de los distintos tipo de vehículos a usar otros combustibles. En este estudio se consideran que los costos de operación, de mantenimiento, anuales y fiscales son los mismo para cada conversión que se haga. El costo de conversión incluye el costo que se presenta adquirir el equipo o sistema para la medida de opción de reducción de la contaminación por transporte. Este costo se obtiene de las empresas que venden los sistemas de conversión para los vehículos.

4.6 Proceso de evaluación de opciones de reducción de la contaminación por transporte

El proceso de evaluación de opciones para el control y/o reducción de la contaminación generada por el transporte puede ser resuelto mediante Programación Lineal (PL). El proceso de PL selecciona un grupo de opciones que minimice algunos aspectos significativos de la estrategia como son el costo total que se define como una función objetivo lineal, sujeto a restricciones en los niveles de emisión de contaminantes, o monto de capital a invertir. En este estudio se proponen dos escenarios de ejecución en donde se puedan minimizar los costos de inversión fijando el diferencial de emisiones como restricciones y por otro lado, el maximizar las reducciones de emisiones de contaminantes tomando como restricciones a los costos de inversión.

4.6.1 Primer Escenario: Minimización del costo total para una cierta reducción de emisiones de CO, HC y NO_x.

En este escenario la función objetivo tiene como variables a determinar la cantidad de equipos a implementar en los vehículos para reducir la contaminación. Se fijan los costos de conversión para cada opción de reducción de la contaminación por transporte de acuerdo al tipo de vehículo que se trate, y se consideran como restricciones al diferencial de emisiones en kg/veh-día. En la Ecuación 4.4 la función objetivo representa este escenario que está sujeta a restricciones de la Ecuación 4.5 de en donde X_i es el vector de variables a optimizar que se desea obtener.

La función objetivo lineal para este escenario a ser minimizada se define de la siguiente manera:

$$\text{Función objetivo : } \underset{X_i}{\text{Min}} \sum_{i=1}^N \text{Costo}_i * X_i \quad (4.4)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$[\Delta e_{ji}][X_i] \geq [\mu_j] \quad \forall j \quad (4.5)$$

Donde:

$Costo_i$ = Costo total individual de la opción de control de la contaminación para el tipo de vehículo i en (\$/vehículo), \$ en M.N.

X_i = Vector que representa el número de equipos utilizados por la opción de reducción de la contaminación aplicado al tipo de vehículo i , en otras palabras, significa el número de vehículos de las categoría i que se convierten para que utilicen el combustible alterno.

N = Tipo de vehículo, LDGV, LDGT1, LDGT2 HDDV

$$X_i \geq 0$$

X_i Debe ser mayor, menor o igual a cierto número dependiendo de la cantidad existente del tipo de vehículo del parque vehicular. Por ejemplo no pueden obtenerse 1,200 equipos de conversión de Diesel a Gas natural para Autobuses de transporte urbano si la flota de éstos es de 1,000 unidades.

Δe_{ji} = Matriz que contiene el diferencial entre las emisiones actuales y las de la opción de reducción de la contaminación del contaminante j . (j = CO, NO_x y HC en kg/veh-día).

μ_j = Límite de emisiones a reducir para el contaminante j en kg/día

4.6.2 Segundo caso: Maximizar la reducción de emisiones fijando una inversión económica.

Se establece una función objetivo que contenga como variables a determinar los valores de X_i para maximizar la reducción de emisiones de cada contaminante j , e_{ji} . Las restricciones se conforman por los costos de cada una de las opciones de control de la contaminación que se apliquen y que tienen como límite un monto de capital de inversión. Este sistema genera la combinación de tipo de vehículos convertidos en cada una de las opciones sugeridas. En la Ecuación 4.6 se muestra la función objetivo y en la Ecuación 4.7 la fórmula de restricciones que sirve para encontrar los valores óptimos de X_i .

La función objetivo puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} \text{Max} \\ X_i \end{matrix} \quad \text{Reducción - emisiones} \sum_{i=1}^N \Delta e_{ij} * X_i \quad \forall j \quad (4.6)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$[Costo_i][x_i] \leq [Cap_i] \quad (4.7)$$

Donde:

Cap_i = Vector que representa el capital total que fue asignado para la implementación de cada una de las opciones de control de la contaminación elegidas (\$, M.N).

$Costo_i$ = Matriz que contiene el costo total individual de la opción de control de la contaminación para la clase de vehículo i en (\$/vehículo), \$ en M.N.

X_i = Vector que representa el número de equipos utilizados o dispositivos por la reducción de la contaminación, aplicado a la clase de vehículo i , representa el número de vehículos convertidos para utilizar combustible alterno.

N = Tipo de vehículo, LDGV, LDGT1, LDGT2 HDDV

$X_i \geq 0$

Para ejecutar cada caso se requieren las emisiones diarias para cada tipo de vehículo de acuerdo a la opción de reducción de contaminación por transporte que se considere. Para esto se usó el modelo Mobile 5 AMM en donde se calculan los factores de emisión para HC, NO_x y HC. Se investigan los costos y los factores de emisión de las opciones de reducción de la contaminación basada en el cambio de combustibles, con éstos datos podemos ejecutar los casos y formar escenarios para la reducción de la contaminación por transporte en el AMM al más bajo costo y con la mayor reducción de emisiones de contaminantes posible.

CAPITULO 5

FACTORES DE EMISION DEL TRANSPORTE EN EL AMM

En este capítulo se calculan los factores de emisiones de la flota vehicular para el año 2000 en el AMM y para las opciones de reducción de la contaminación por transporte que son aplicadas. Estos factores permiten obtener posteriormente la base de emisiones para el cálculo total de las cantidades de contaminantes NO_x, CO, y HC de cada una de los tipos de vehículos antes y después de la aplicación de las medidas de reducción de la contaminación por transporte. Las reducciones en emisiones representan los límites máximos si se convierte toda la flota vehicular, que tecnológicamente es factible alcanzar con las estrategias propuestas.

5.1 Análisis de la flota vehicular del AMM

La distribución del parque vehicular que se tiene registrada en el AMM que se usó en este trabajo fue del año 2000. En la Tabla 5.1 se puede apreciar la distribución total de los vehículos registrados en el AMM, según los datos de la Subsecretaría del Transporte del Gobierno del Estado de Nuevo León para el año 2000. Esta distribución contiene los vehículos particulares, públicos y motocicletas así como camionetas, autobuses de transporte urbano, camiones y taxis. Las cifras se muestran para cada municipio conurbano y se puede apreciar que el municipio de Monterrey tiene alrededor del 44% del total de vehículos registrados del AMM con un poco más de 300,000 unidades. La Figura 5.1 es derivada de la Tabla 5.1 y muestra de qué manera se distribuyen los vehículos particulares, públicos y motocicletas registrados en el año 2000 en cada uno de los municipios del AMM. Se puede distinguir claramente en la figura 5.1 que la cantidad de automóviles particulares excede ampliamente a los vehículos públicos registrados en cada uno de los municipios.

Tabla 5.1 Cantidad de vehículos en los municipios del AMM en el año 2000.

AMM	Cantidad
Apodaca	32,962
Guadalupe	132,807
Garza García	63,596
Gral. Escobedo	23,675
Santa Catarina	33,906
San Nicolás de los Garza	132,004
Monterrey	334,171
Total	753,121

En la Figura 5.1 se distingue que la cantidad de autos particulares predomina en cada uno de los municipios del AMM.

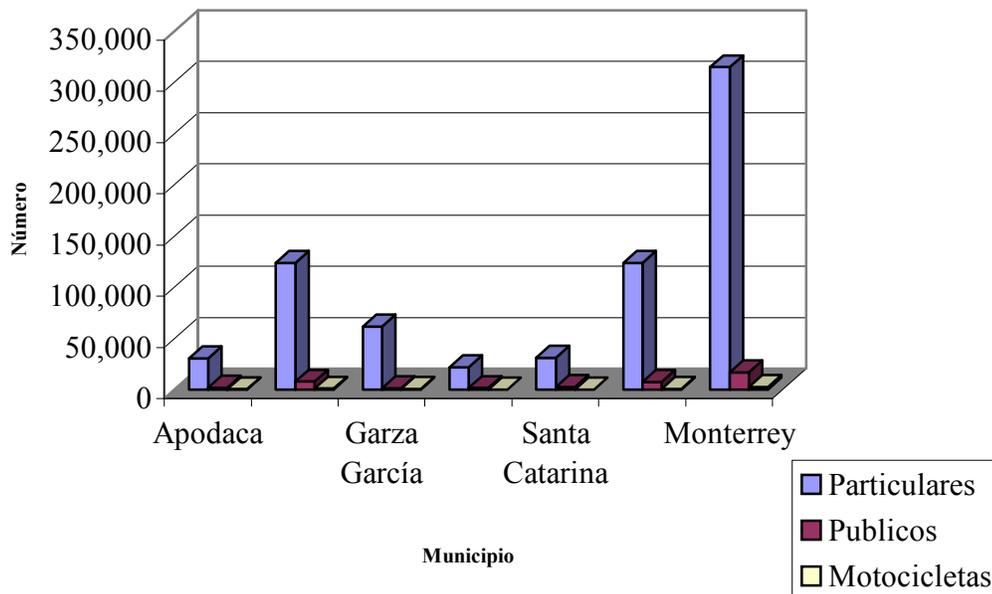


Figura 5.1 Distribución de vehículos por municipios del AMM en el año 2000.

En la Tabla 5.2 se muestra que los autos (automóviles particulares y taxis) son los tipos de vehículos que más prevalecen en el AMM, las camionetas pick-up son un poco más de 170,000 seguido de los autobuses de transporte urbano y los que menos representan en número son las motocicletas con 5,961 en el año 2000 [Subsecretaría del Transporte, 2000].

Tabla 5.2 CANTIDADES POR TIPO DE VEHÍCULOS EN EL AMM DURANTE EL AÑO 2000.

Vehículo	Cantidad
Autos	549,258
Camionetas pick-up	172,016
Camión de carga	1,854
Autobuses de transporte urbano	11,547
Motocicletas	5,961
Otros	12,485
Total	753,121

5.2 Ejecución del Modelo Mobile 5 para el AMM

El modelo Mobile 5 AMM se ejecutó para los tipos de vehículos LDGV (automóviles particulares y taxis), LDGT1 (camionetas pick-up) y HHDV (autobuses de transporte urbano) debido a la clasificación que se hizo. Éstos son los que realizan los mayores recorridos diarios tal y como se mencionó en el Capítulo 1. Los factores de emisión para HC, NO_x y CO, se obtuvieron tomando la temperatura mínima y máxima de cada mes de Enero a Diciembre del año 2000. La temperatura utilizada en el modelo es para calcular factores de emisión a diferentes velocidades. En este estudio se calculan a 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 65 km/hr. Los vehículos se homologan de acuerdo a la nomenclatura que maneja el Mobile 5 AMM para los tipos de vehículos de acuerdo a la Tabla 5.3:

Tabla 5.3 Clasificación de los vehículos de acuerdo al Mobile 5.

Clasificación de Mobile 5 AMM	Equivalencias
LDGV	Automóviles y Taxis
LDGT1	Camionetas pick-up
HDDV	Autobuses de transporte urbano

Con la finalidad de calcular las emisiones por unidad vehicular y por periodo de la flota vehicular, se requieren de los recorridos promedio diarios de cada uno de los tipos de vehículos y de las velocidad promedio a la cual éstos vehículos recorren el AMM. La Tabla 5.4 [Subsecretaría del Transporte, 2000] muestra las velocidades y los kilómetros recorridos para cada tipo de vehículos.

Tabla 5.4 Velocidades promedio y cantidad de kilómetros recorridos para cada Tipo de vehículo en el AMM.

Tipo de Vehículo	Velocidad Promedio, km/hr	Recorrido Promedio, km/día
Automóvil particular	20-30	25.8
Taxis	20-30	200
Camionetas pick-up	20-30	25.8
Autobuses de transporte urbano	10	200

La Tabla 5.5 muestra los factores de emisión calculados para el AMM para cada una de las velocidades mencionadas con anterioridad y para cada tipo de vehículos de donde se obtienen los promedios de emisión de gr/km del contaminante. Es importante calcular los factores de emisión a diferentes velocidades con la finalidad de observar los cambios de las emisiones en (gr/km) conforme se aumenta la velocidad. En el Anexo A se muestran parte del archivo de entrada para la ejecución del Mobile 5 AMM para el año 2000.

Tabla 5.5 Factores de emisión en gr/km para LDGV, LDGT1, HDDV y MC en base a las velocidades del AMM para el año 2000 (Calculado con Mobile 5 AMM).

Velocidad km/hr	Autos particulares y Taxis (LDGV)			Camionetas Pick-ups (LDGT1)			Autobuses de transporte urbano (HDDV)			Motocicletas (MC)		
	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO
10	9.19	1.68	102.79	7.52	1.67	87.9	5.13	25.45	20.04	17.76	0.17	87.46
20	5.18	1.58	51	4.14	1.59	42.22	3.83	20.51	12.89	10.4	0.15	41.97
30	3.89	1.65	35.58	3.04	1.62	28.48	2.96	17.45	8.89	8.12	0.16	28.23
40	3.23	1.77	27.28	2.53	1.77	22.61	2.37	15.69	6.58	7	0.18	21.48
50	2.77	1.89	21.58	2.17	1.89	18.59	1.96	14.9	5.23	6.24	0.2	17.01
60	2.45	1.97	17.71	1.92	1.97	15.9	1.68	14.95	4.45	5.69	0.21	13.94
65	2.33	1.99	16.4	1.84	2	15.02	1.58	15.29	4.22	5.5	0.22	12.88
Promedio	4.14	1.79	39.04	3.3	1.79	32.96	2.79	17.75	8.9	8.67	0.18	31.85

En la Figura 5.2 se observa que las emisiones de CO para las 4 categorías de vehículos mostradas representan la mayor cantidad de contaminantes por kilómetro recorrido con factores que son de entre 30 y 40 gr/km. Asimismo, se muestra un valor alto del factor de emisión de NO_x para los HDDDV en comparación que los otros tipos de vehículos. El valor en gr/km para HC de MC es el casi el doble que el de las otras categorías de vehículos.

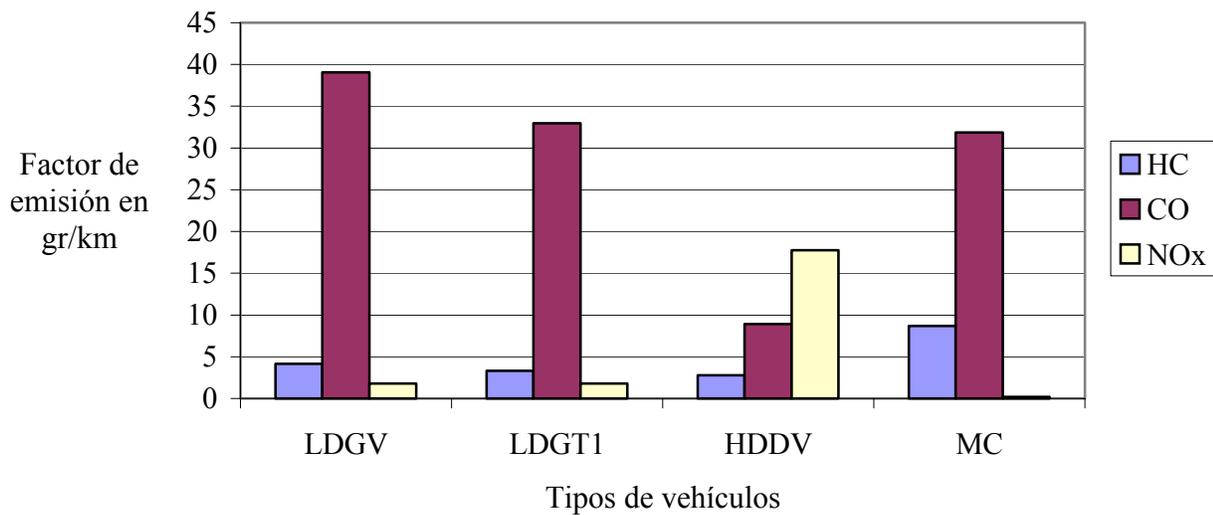


Figura 5.2 Factores de emisión promedio en gr/km para la flota vehicular mostrada en el AMM para el año 2000.

De la Figura 5.3 a la 5.6 se muestran los comportamientos de los valores de los factores de emisión de los contaminantes conforme se va aumentando la velocidad para cada los tipos de vehículos que se indican. Se aprecia que los factores de emisión disminuyen conforme se aumenta su velocidad pero en distinta proporción dependiendo del vehículo que se trate, lo que representa que se tengan menos emisiones a mayores velocidades de recorrido.

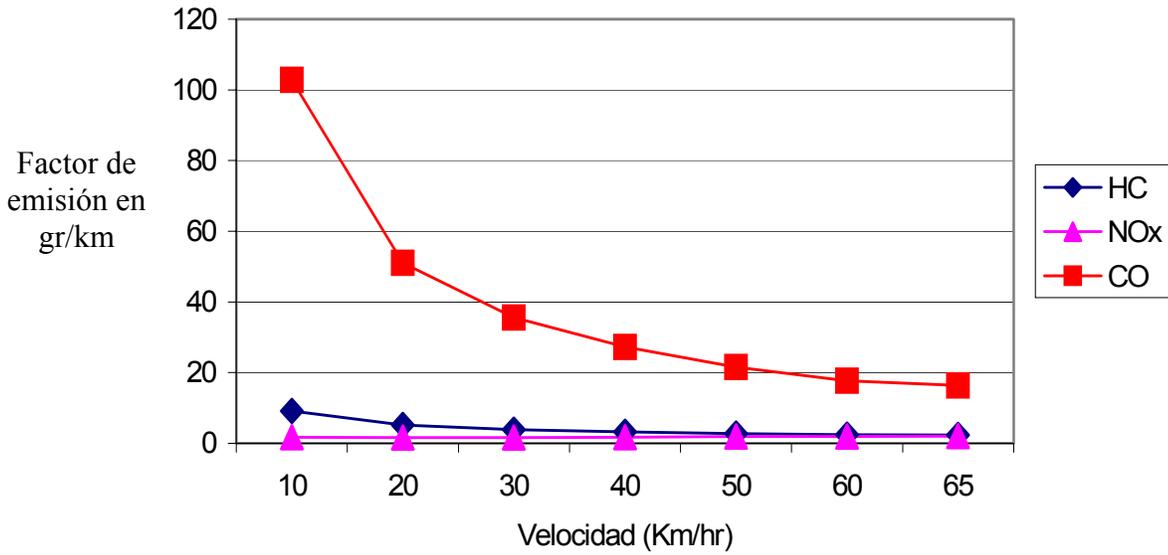


Figura 5.3 Curvas de comportamiento de los factores de emisión para HC, NO_x y CO en base a la velocidad de automóviles particulares y taxis (LDGV).

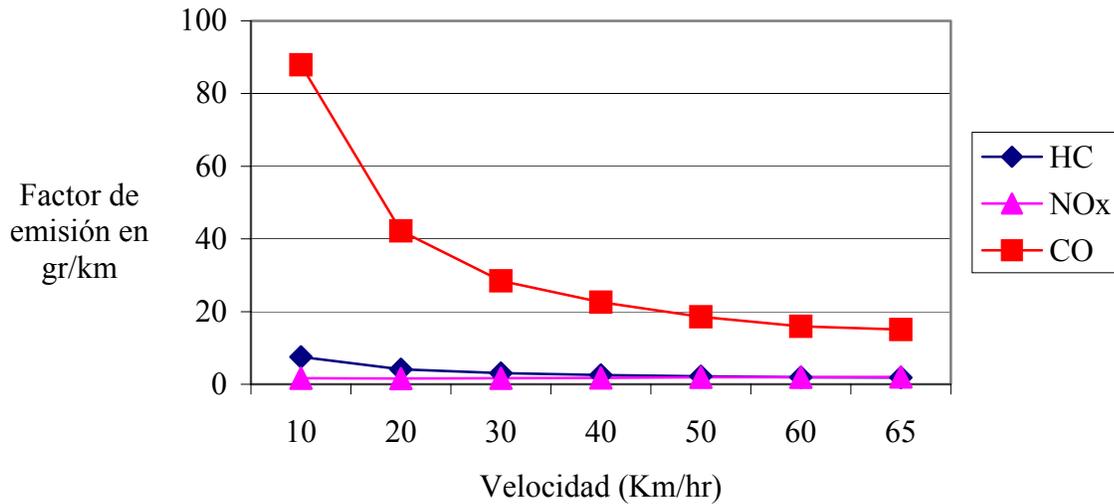


Figura 5.4 Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO_x y CO en base a las velocidad de camionetas pick-up (LDGT1).

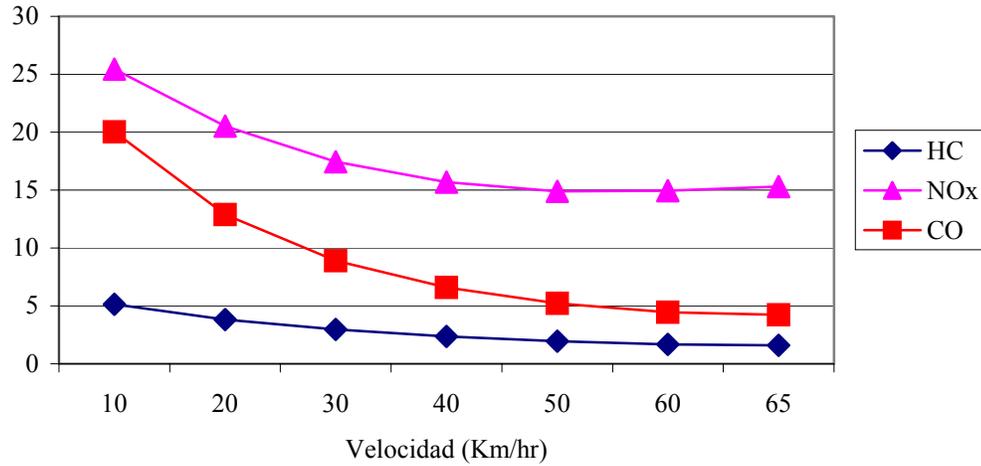


Figura 5.5 Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO_x y CO en base a la velocidad de autobuses de transporte urbano (HDDV).

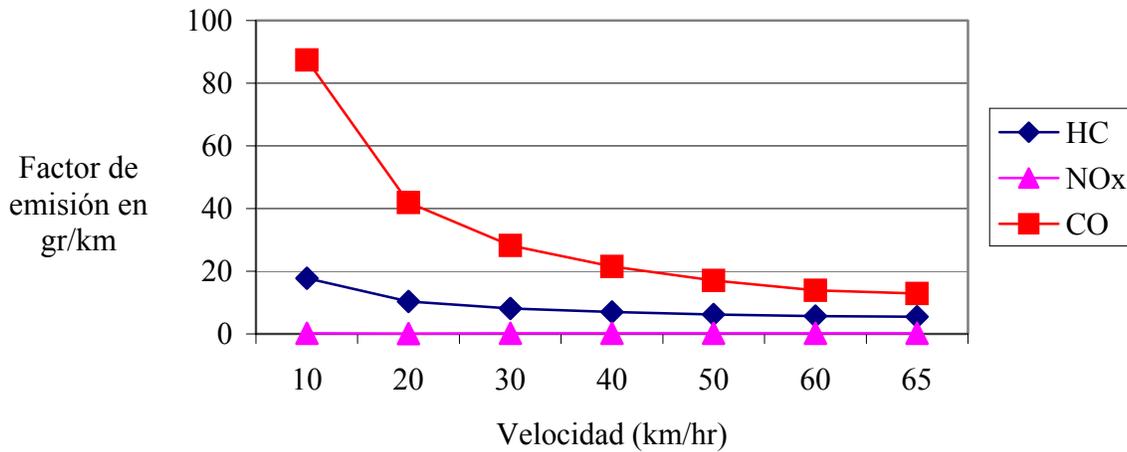


Figura 5.6 Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO_x y CO en base a la velocidad de motocicletas (MC).

5.3 Factores de emisiones vehiculares a partir de las opciones de reducción de la contaminación por transporte en el AMM.

Las opciones de reducción para este caso se toman de la Sección 4.2, las cuales están basadas en los cambios de combustible de la flota vehicular, incluyendo también las que se refieren al uso de vehículos Eléctricos e Híbridos:

- Gasolina Reformulada, (GRF)
- Gas Natural Comprimido, (GNC)
- Gas Licuado de Petróleo, (GLP)
- Eléctrico
- Híbrido

5.3.1 Gasolina reformulada

El Mobile 5 AMM tiene la opción de incluir de simular la alternativa de utilizar Gasolina reformulada y conocer sus efectos en los valores de los factores de emisión. Se maneja el mismo archivo de entrada del año 2000 haciendo el cambio por la condición mencionada.

En las Tablas 5.6 se muestran los valores de los factores de emisión en gr/km a diferentes velocidades obtenidos de los tipos de vehículos mostrados, dichos factores están calculados con el Mobile 5 AMM en la opción para GRF.

Tabla 5.6 Factores de emisión en gr/km para LDGV, LDGT1, HDDV y MC en base a las velocidades del AMM para el año 2000
(Calculado con Mobile 5 AMM) con GRF.

VELOCIDAD	Autos particulares y Taxis (LDGV)			Camionetas Pick-ups (LDGT1)			Autobuses de transporte urbano (HDDV)			Motocicletas (MC)		
	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO
10	7.8	1.74	80.29	6.24	1.65	66.35	5.1	25.34	20.04	17.02	0.18	77.38
20	4.34	1.63	40.26	3.43	1.57	31.95	3.81	20.42	12.89	9.67	0.18	37
30	3.29	1.69	28.28	2.51	1.6	21.52	2.95	17.38	8.89	7.38	0.18	24.82
40	2.71	1.8	21.57	2.08	1.74	17.16	2.36	15.62	6.59	6.26	0.2	18.34
50	2.32	1.92	17.06	1.78	1.85	14.26	1.96	14.83	5.23	5.5	0.22	14.87
60	2.04	1.99	13.98	1.58	1.93	12.3	1.68	14.89	4.46	4.51	0.23	12.61
65	1.94	1.85	12.9	1.5	1.96	8.91	1.57	15.23	4.22	4.75	0.24	11.22
Promedio	3.49	1.8	30.62	2.73	1.76	24.64	2.78	17.67	8.9	7.87	0.2	28.03

5.3.2 Gas Natural

En el reporte de la EPA “Emission Factors for Natural Gas Vehicles ” [EPA, 2001] se localizan factores de emisión promedio para este combustible en vehículos de servicio ligero (LDGV = automóviles), camionetas de servicio ligero (LDGT1) y camionetas de servicio pesado (LDGT2). los cuales están proporcionados en gr/milla. Se expresan estos factores de emisión en gr/km con la finalidad de homologar unidades con el Mobile 5 AMM y calcular posteriormente las cantidades de emisión diarias para HC, CO y NO_x de estos tipos de vehículos. En la tabla 5.7 se muestran los factores de emisión que se encontraron para Gas natural en el reporte de la EPA mencionado.

Tabla 5.7 Factores de emisión de HC, CO y NO_x para Gas natural de LDGV, LDGT1 y LDGT2.

Tipo de vehículo	Contaminante	Factor de emisión en gr/km para GNC
LDGV	HC	0.015
	CO	0.385
	NO _x	0.036
LDGT1	HC	0.018
	CO	0.14
	NO _x	0.07
LDGT2	HC	0.018
	CO	0.677
	NO _x	0.294

Los factores de emisión para LDGT2 (camionetas de carga pesada) serán asignados como valores de los HDDV (autobuses de transporte urbano) para cuando se aplique la evaluación opción de reducción de la contaminación basada en Gas natural. Debido a que la categoría LDGT2 es la más próxima en dimensiones de vehículos a la HDDV además de que no se encontraron valores específicos para HDDV.

De la Figura 5.7 a la 5.10 se muestran las gráficas de los valores de los factores de emisión de los contaminantes para GRF. Conforme se va aumentando la velocidad para cada los tipos de vehículos que se indican, se aprecia que los factores de emisión disminuyen conforme se aumenta su velocidad pero en distinta proporción dependiendo del vehículo que se trate. Esto representa que se obtengan menos emisiones a mayores velocidades de los vehículos.

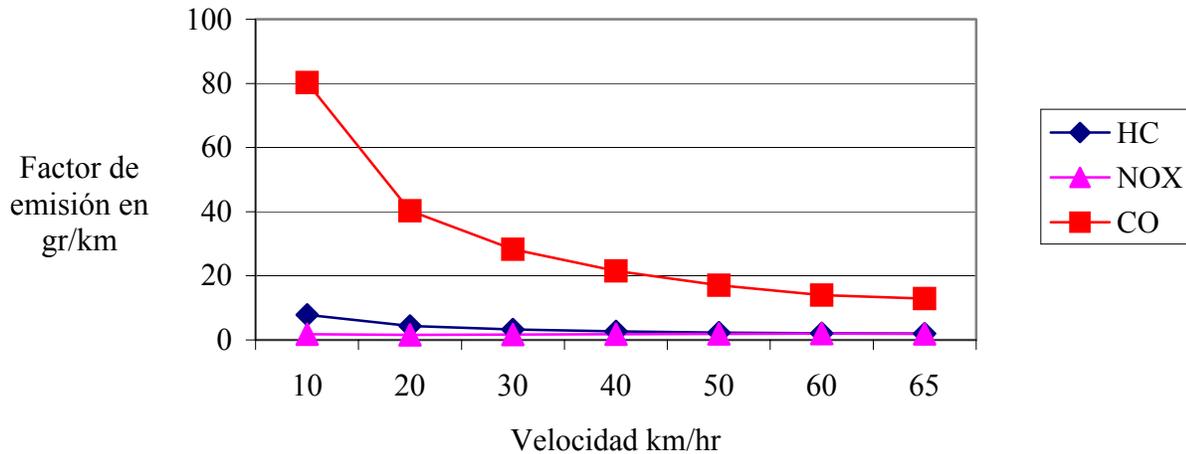


Figura 5.7 Curvas de comportamiento de los factores de emisión en base a la velocidad de automóviles particulares y Taxis (LDGV) con GRF:

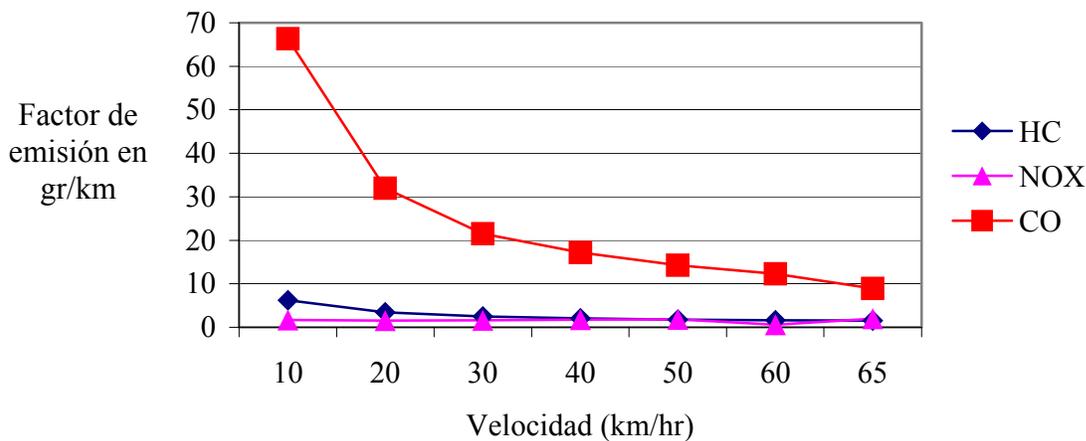


Figura 5.8 Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO_x y CO en base a la velocidad de camionetas pick-up (LDGT1) con GRF.

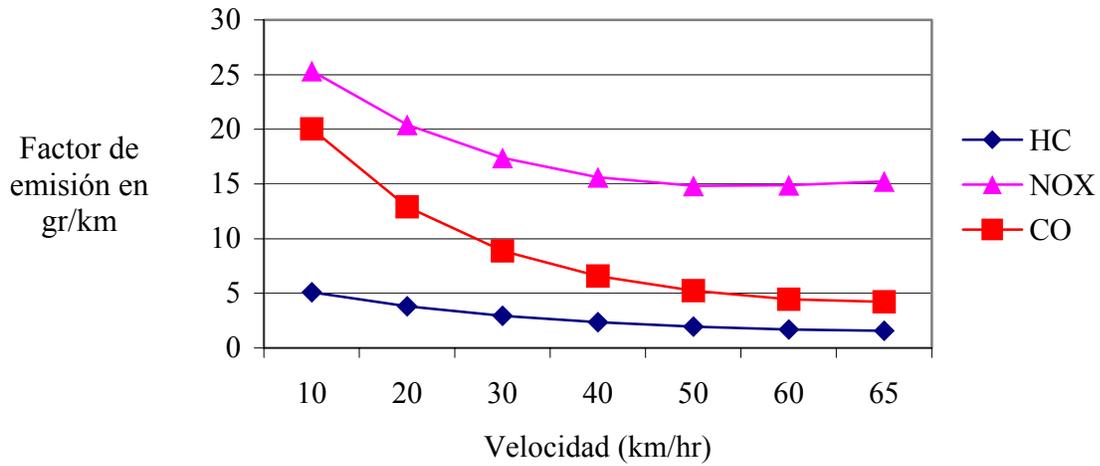


Figura 5.9 Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO_x y CO en base a la velocidad de autobuses de transporte urbano(HDDV) con GRF.

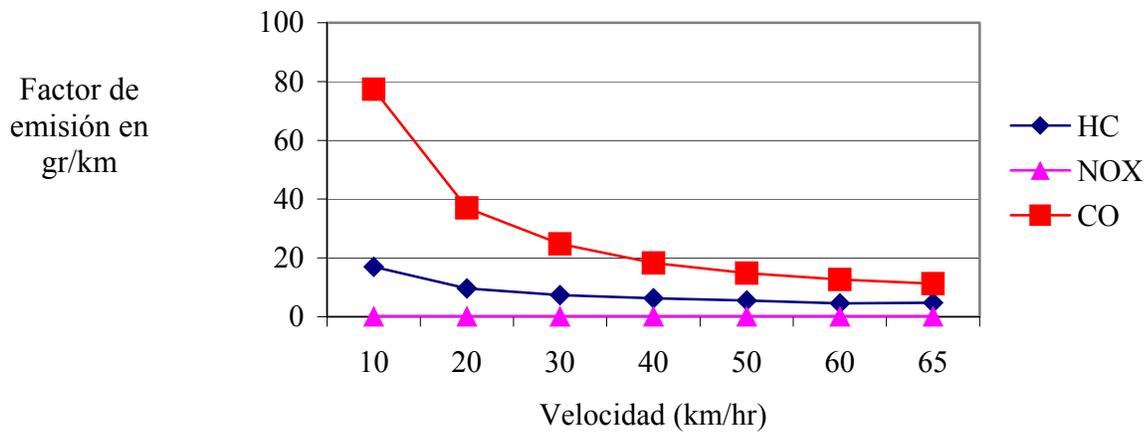


Figura 5.10 Curvas de comportamiento de los factores de emisión de HC, NO_x y CO en base a la velocidad de motocicletas (MC) con GRF.

5.3.3 Gas LP

Para este caso se usarán una serie de valores para cada contaminante representativos de los factores de emisión de todo tipo de vehículo debido a la falta de valores de emisión específicos para cada tipo de vehículo que usa Gas LP. En la Tabla 5.8 se muestran los factores de emisión para HC, NO_x y CO [EEA, 2003].

Tabla 5.8: Factores de emisión en gr/km para transporte con Gas LP

Contaminante	Factor de emisión (gr/Km)
HC	4.00
CO	3.00
NO _x	1.20

5.3.4 Eléctricos

Se considera que los autos impulsados por electricidad no generan emisiones de Gases derivadas del movimiento del vehículo. Se considera que las emisiones para HC, NO_x y CO tienen el valor de 0 gr/km. Aunque en una evaluación global habría que considerar las emisiones de contaminantes para generar energía eléctrica.

5.3.5 Híbridos

Las emisiones para los vehículos Híbridos de Diesel-eléctricos son de alrededor del 10 al 40% menores de NO_x y del 50 al 70% para CO y HC con respecto a los vehículos de diesel convencionales [Alt Fuels Advisor, 2001]. Los valores exactos dependen del motor de combustión interna utilizado. Bajo esta consideración se calcularán las emisiones en kg/veh-día para autobuses de transporte urbano que utilizan diesel-electricidad para ser impulsados usando los datos para emisiones de HDDV de la Tabla 5.5.

CAPITULO 6

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE EN EL AMM

En este capítulo se plantean y discuten los distintos casos de control de la contaminación por transporte que se indicaron en la sección 5.4 del Capítulo 5. Los casos se expresan como problemas de la Programación lineal y se resolvieron usando la subrutina LCONF de la librería de subrutinas matemáticas y estadística IMSL. Esta subrutina resuelve el problema de la programación lineal mediante el método iterativo de Powell [IMSL, 2002]. Un ejemplo de los archivos de los escenarios del programa ejecutable, se muestra en el Anexo B. De acuerdo a lo descrito en la sección 4.6, se analizaron dos escenarios de evaluación de la contaminación por transporte. En el primero, se considera minimizar los costos de inversión al aplicar estrategias de reducción de emisiones en los siguientes casos:

1. Conversión de automóviles particulares, taxis, camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano a vehículos de Gas LP.
2. Conversión de automóviles particulares, taxis, camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano a vehículos de Gas natural.
3. Uso en automóviles y camionetas pick-up de Gasolina reformulada
4. Combinación de los casos 1 y 2, que incluyen la conversión de automóviles particulares, taxis y autobuses de transporte urbano a vehículos eléctricos y la conversión de autobuses de transporte urbano a vehículos híbridos (diesel-eléctricos).

En el segundo escenario, se considera fijar un monto de inversión de capital económico con la finalidad de maximizar la reducción de emisiones de HC, NO_x y CO, considerando a los costos de conversión del caso 4 mencionado anteriormente como restricciones del problema.

6.1 Cálculo de emisiones para LDGV (autos particulares, taxis), LDGT1 (camionetas pick-up) y HDDV (Autobuses de transporte urbano) para el año 2000 en el AMM.

Las emisiones diarias en kg/veh-día por cada tipo vehículo se calculan a partir de los factores de emisión calculados en el capítulo 5 con el modelo Mobile 5 AMM. Estos factores están mostrados en la Tabla 5.6 del Capítulo 5 y se utilizan para obtener los niveles de emisiones para el año 2000 de la flota vehicular en estudio. Las emisiones se calculan utilizando la Ecuación 6.1 al multiplicar el factor de emisión del tipo de vehículo a la velocidad promedio con que se desplaza en el AMM por el recorrido promedio diario de éste en el AMM. Los datos de los kilómetros recorridos por día por cada tipo de vehículo y de las velocidades promedio de éstos fueron obtenidos de la Subsecretaría del Transporte del Estado De Nuevo León. En los datos que contiene la Tabla 6.1 se muestran los valores de la cantidad de vehículos por categoría, las velocidades promedio consideradas y las emisiones vehiculares diarias para cada contaminante calculadas con la Ecuación 6.1. Con la Ecuación 6.2 se obtiene la cantidad total en kg/día de emisiones diarias para cada contaminante.

$$TEV_{ij} = FE_{ij} * RE_i \quad \forall \quad i \text{ y } j \quad (6.1)$$

TEV_{ij} = Tasa de emisión del contaminante j por tipo de vehículo i en kg/veh-día.

FE_{ij} = Factor de emisión del contaminante j emitido por tipo de vehículo i.

RE_i = Recorrido promedio diario en km/día del tipo de vehículo i.

$$ET_{ij} = NV_i * TEV_{ij} \quad \forall \quad i \text{ y } j \quad (6.2)$$

ET_{ij} = Emisiones totales del contaminante j en kg/día para el tipo de vehículo i.

NV_i = Cantidad de vehículos de tipo i.

Tabla 6.1 Emisiones de CO, HC y NO_x en kg/veh-día para los automóviles particulares y taxis (LDGV), camionetas pick-up (LDGT1) y autobuses de transporte urbano (HDDV) en el año 2000.

Tipo de Vehículo	Particulares (LDGV)	Taxis (LDGV)	Camionetas pick-up (LDGT1)	Autobuses de transporte urbano (HDDV)
Recorrido (km/día)	25.8	240	25.8	120
Vel. prom. (km/hr)	25	25	25	10
CO (kg/veh-día)	1.1	9.98	0.87	1.27
HC (kg/veh-día)	0.11	1.06	0.09	0.40
NO_x (kg/veh-día)	0.04	0.38	0.04	2.10
No. de vehículos	523,408	25,850	172,016	11,547

Las emisiones totales diarias para CO, HC y NO_x que se generaron para el año 2000, en el AMM para los tipos de vehículos en estudio se muestran en la Tabla 6.2. Estas emisiones se consideran como los niveles de referencia de los contaminantes CO, HC y NO_x que serán comparados y restados más adelante de los niveles de emisiones en kg/día que generan las opciones de control de la contaminación basadas en combustibles que ya se propusieron. En la Tabla 6.2 se observa que la generación de CO por parte de los taxis son el 50% de la que emiten los autos particulares a pesar de que son muy inferiores en cantidad a los autos particulares, lo cual se debe a sus mayores recorridos promedios diarios (240 Km vs 25.8 Km). La misma proporción de diferencias de emisiones se guarda para el HC entre estos vehículos. Los autobuses de transporte urbano generan cantidades similares de CO que las

camionetas pick-up y se observa que el CO es el contaminante que más se genera para éstos tipos de vehículos en el AMM para el año 2000.

Tabla 6.2 Emisiones totales de CO, HC y NO_x en kg/día para LDGV (autos particulares y taxis), LDGT1 (camionetas pick-up) y HDDV (autobuses de transporte urbano) para el año 2000 en el AMM.

Contaminante	Autos particulares (LDGV) (kg/día)	Taxis (LDGV) (kg/día)	Camionetas Pick-up (LDGT1) (kg/día)	Autobuses de transporte urbano (HDDV) (kg/día)	Emisiones totales (kg/día)
CO	575,749	257,983	149,654	149,665	998,050
HC	57,575	27,401	15,481	4,619	105,076
NO_x	20,936	9823	6,881	24,249	61,889

6.2 Escenario 1: Minimización de costos de inversión sujeto a restricciones de emisiones de los contaminantes CO, HC y NO_x.

En este escenario se minimizan los costos de inversión que se generan al convertir o cambiar en tecnología de combustibles a los vehículos de la flota vehicular mencionada anteriormente. Dichos costos son únicamente los que surgen al comprar los sistemas de conversión para el uso de los combustibles alternos. Se considera que los costos por mantenimiento, de operación, amortización y precios de rescate de los equipos serían los mismos sin importar la conversión que se haga. Las restricciones se conforman por el diferencial de emisiones de CO, HC y NO_x en kg/veh-día entre las cantidades para el año 2000 mostradas en la Tabla 6.1 y las emitidas por cada opción de reducción de la contaminación por transporte. En este estudio se consideran conversiones de vehículos a Gas LP, GNC, eléctricos e híbridos que son aplicadas al escenario 1.

6.2.1 Caso 1: Conversión de Automóviles y Taxis (LDGV), Camionetas Pick-up (LDGT1) y Autobuses de transporte urbano (HDDV) a Gas LP.

Los costos de conversión para estos tipos de vehículos se obtuvieron a través de los negocios del giro mecánico y de la conversión a Gas LP [LP Conversiones, 2003]. Se utilizan como coeficientes de las variables a obtener, en este caso, el número de conversiones a realizar dentro de la función objetivo que se plantea para este caso. En la Tabla 6.3 se aprecia que los costos de conversión van en aumento conforme aumenta el tamaño de los vehículos.

Tabla 6.3 Costos de conversión a Gas LP para LDGV, LDGT1 y HDDV para el AMM.

Vehículo	Costo (M.N)
LDGV	4,500
LDGT1	4,900
HDDV	6,000

Los factores de emisión para Gas LP fueron mencionados en la sección 5.3.3 para calcular las emisiones diarias de HC, CO y NO_x con la Ecuación. 6.1 en kg/veh-día. En la Tabla 6.4 se observa que debido a los recorridos diarios promedio, las emisiones en kg/veh-día para los taxis son mayores que para las camionetas pick-up, automóviles particulares y autobuses de transporte urbano. Las emisiones diarias totales para cada contaminante se calculan con la Ecuación 6.2 y se muestran en la Tabla 6.5 en donde se observa que la mayor emisión diaria en kg la aporta el HC con Gas LP seguido del CO y del NO_x. Con los valores en kg/día para cada uno de los contaminantes se puede determinar el máximo nivel de reducción de contaminantes al usar Gas LP si se considera convertir las cantidades totales de flota vehicular de los tipos de vehículos en estudio.

Tabla 6.4 Factores de emisiones de CO, HC y NO_x en kg/veh-día para autos particulares, taxis, camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano.

Tipo de vehículo	Autos particulares (LDGV)	Taxis (LDGV)	Camionetas pick-up (LDGT1)	Autobuses de transporte urbano (HDDV)
Recorrido (km/día)	25.8	240	25.8	120
Vel. prom. (km/hr)	25	25	25	10
CO (kg/veh-día)	0.07	0.72	0.07	0.36
HC (kg/veh-día)	0.1	0.96	0.1	0.48
NO_x (kg/veh-día)	0.03	0.29	0.03	0.14
No. de vehículos	523,408	25,850	172,016	11,547

El nivel máximo de reducción de emisiones por el cambio de los combustibles actuales al uso del Gas LP se presenta en la Tabla 6.6. En esta tabla se observa que existe una gran disminución en la generación de CO y una baja reducción de HC con Gas LP mientras que para el NO_x el nivel de reducción de emisiones es alrededor del 50%. El porcentaje de reducción del 4.92% de HC se debe a que con Gas LP las emisiones en kg/veh-día aumentan para camionetas pick-up y autobuses. La columna marcada como diferencial de emisiones representa el límite máximo en kg/día que se pueden reducir al convertir todos los vehículos de gasolina y diesel a Gas LP.

Tabla 6.5 Emisiones totales de CO, HC y NO_x en kg/día para LDGV, LDGT1 y HDDV con Gas LP.

Contaminante	Autos Particulares (kg/día)	Taxis (kg/día)	Camionetas pick-up (kg/día)	Autobuses de transporte urbano (kg/día)	Emisiones totales (kg/día)
CO	36,639	18,612	12,041	4,157	71,449
HC	52,341	24,816	17,202	5,542	99,901
NO_x	15,702	7,497	5,161	1,617	29,977

Tabla 6.6 Comparación de emisiones totales de CO, HC y NO_x de los vehículos para el año 2000 y los vehículos convertidos a Gas LP.

Contaminante	kg/día para el año 2000	kg/día con Gas LP	Dif. emisiones (kg/día)	% Reducción
CO	998,050	71,449	926,602	92.84
HC	105,076	99,901	5,175	4.92
NO_x	61,889	29,976	31,913	51.56

De este caso, se fijan los porcentajes de reducción de contaminantes que se buscan alcanzar con el uso de la Programación lineal de acuerdo a los porcentajes máximos de reducción. La Ecuación 6.3 indica a la función objetivo o función de costos que será minimizada. Esta ecuación contiene los valores de los costos de conversión para Gas LP que representan los coeficientes de la cantidad de cada uno de los tipos de vehículos a determinar. En la Ecuación 6.4 se muestran las restricciones en donde la columna de la derecha representa los límites en kg/día de contaminantes que se desean reducir de CO, HC y NO. Las Ecuaciones 6.5 y 6.6 representan también restricciones del problema que indican que las incógnitas deben ser mayores o iguales que cero y los límites de vehículos a convertir de acuerdo a las cantidades de la flota vehicular para el año 2000.

La función objetivo queda planteada de la siguiente forma:

$$\begin{matrix} \text{Min} \\ X_i \end{matrix} \quad \text{Costo} = 4,500X_1 + 4,500X_2 + 4,900X_3 + 6,000X_4 \quad (6.3)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\begin{bmatrix} 1.03 & 9.26 & 0.80 & 0.91 \\ 0.01 & 0.1 & -0.01 & -0.08 \\ 0.01 & 0.12 & 0.01 & 1.96 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 99,805 \\ 0 \\ 6,189 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \geq [0] \quad (6.5)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 523,408 \\ 25,850 \\ 172,016 \\ 11,547 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Donde:

- X1 = Cantidad de autos particulares convertidos en vehículos a Gas LP.
- X2 = Cantidad de taxis convertidos en vehículos a Gas LP.
- X3 = Cantidad de camionetas pick-up convertidos en vehículos a Gas LP.
- X4 = Cantidad de autobuses de transporte urbano convertidos en vehículos a Gas LP.

El primer renglón de la matriz del lado izquierdo en la Ecuación. 6.4 es la diferencia de emisiones de CO al convertir un Auto particular (LDGV), un taxi (LDGV), una camioneta pick-up (LDGT1) y un autobús de transporte urbano (HDDV) a vehículos a Gas LP. El segundo renglón es para las diferencias de emisiones de HC para los mismos tipos de vehículos y le tercer renglón para NO_x. En la Ecuación 6.4 también se observa que para el caso del HC se tienen aumento en las emisiones para camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano debido a que se tienen coeficientes negativos. Es importante hacer notar que aunque las emisiones de HC pueden aumentar, se están cambiando las emisiones de alcanos y aromáticos de la Gasolina a Propano y Butano que son menos reactivas a la formación de Ozono.

Como parte de la restricciones del problema, se considera todo el parque vehicular como límite de unidades a considerar para llevar a cabo las conversiones necesarias a Gas LP lo cual se observa en la Ecuación 6.6. Se deben de fijar la cantidad de emisiones a reducir considerando no ir más allá de las reducciones máximas entre las emisiones del año 2000 y las emisiones de acuerdo al caso de Gas LP. Los resultados para el caso de conversión de vehículos a Gas LP se observan en la Tabla 6.7. Esta tabla contiene las distintas columnas de las corridas del caso en donde se fijan los porcentajes de reducción de contaminantes y sus kg/día respectivos. En ésta también se incluyen las columnas de resultados que contienen la cantidad de los vehículos convertidos y los costos en millones de pesos para cada corrida ejecutada.

En la Tabla 6.7 se observa que para la corrida 1 un 0% en el cambio de emisiones de HC convierte sólo a los taxis y los autobuses de transporte urbano debido a los valores más elevados de estos vehículos en los diferenciales de emisión que el de automóviles particulares y las camionetas pick-up. También se observa en la corrida 2 el mismo comportamiento de la cantidad de los vehículos convertidos si se permite aumentar en un 10% a las emisiones de HC lo cual generan los mismos resultados en cantidades de vehículos convertidos entre la corrida 1 y 2 a pesar que para la corrida 2 se permite que las emisiones de HC se eleven en un 10%.

Tabla 6.7 Resultados del sistema de programación lineal adaptado a la minimización de costos totales de conversión a Gas LP.

No. de Corrida	Datos			Número de vehículos convertidos				Costo (millones de pesos)
	Contaminante	% de reducción	Lím. Mínimo de reducción (kg/día)	Autos particulares	Taxis	Pick-up	Autobuses de transporte urbano	
1	CO	10	99805	0	9,643	0	11,547	112.67
	HC	0	0					
	NOx	10	6,189					
2	CO	10	99805	0	9,643	0	11,547	112.67
	HC	-10	-10508					
	NOx	20	12,378					
3	CO	20	199,610	0	20,838	0	7,312	137.64
	HC	0	0					
	NOx	10	6,189					
4	CO	20	199,610	0	20,838	0	7,312	137.64
	HC	-10	-10,508					
	NOx	20	12,378					

Se encontró una similitud de resultados entre las corridas 3 y 4 a pesar de fijar distintos niveles de límite de emisión de los contaminantes, lo que nos permite predecir que el sistema de optimización está regido por los cambios que se generan al fijar los límites de emisiones de CO. Se observan también costos de conversión mayores de las corridas 3 y 4 debido a los valores los mayores límites de emisión de CO que de los casos 1 y 2 por lo que hay una diferencia de más del 50% de Taxis convertidos entre las corridas 1 y 2 versus la 3 y 4. Al aumentar los límites de reducción de NO_x del 10 al 20% no se encontraron cambios del número de vehículos convertidos.

En las corridas 1 y 2 se observa que se convierten a Gas LP todos los autobuses de transporte urbano disponibles a ser convertidos, mientras que para la 3 y 4 disminuyen pero aumentan en gran medida los valores de los taxis convertidos a vehículos con Gas LP. En cada una de las corridas se observa también que no se consideran a las automóviles particulares y camionetas pick ups. De aquí se puede inferir que las flotilla de taxis y autobuses de transporte urbano son las que más reducen emisiones por peso (\$) invertido. Estas unidades son las más viables a sujetarse a las disposiciones legales y gubernamentales en materia de gestión de transporte, de tal forma que los permisionarios de estos servicios se apeguen a las disposiciones en materia ambiental que se tomen.

Al aumentar los porcentajes de reducción de emisiones de los tres contaminantes, el modelo generaba soluciones no factibles para poder obtener conversiones de los tipos de vehículos para el caso. En la Tabla 6.8 se observa que las emisiones obtenidas con el modelo de optimización son mayores o iguales que las fijadas como límite mínimo, lo cual representa que se cumplen las condiciones de límite de emisiones fijadas para CO, HC y NO_x. Estas emisiones se obtienen multiplicando el número de vehículos convertidos que se obtienen de la Tabla 6.7 para cada corrida del caso, por los valores de las emisiones en kg/veh-día que se muestran en la Ecuación 6.4 de restricciones.

Los valores inferiores a los límites establecidos que se muestran en la Tabla 6.8 se deben a errores de redondeo y 1 número de cifras significativas utilizadas para calcular las emisiones de dicha tabla. Esto se muestra para el caso de las emisiones de CO.

Tabla 6.8 Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización para Gas LP.

No. de Corrida	Emisiones		
	Contaminante	Límite Mínimo de reducción(kg/día)	Reducción de Emisiones obtenidas (kg/día)
1	CO	99,805	99,802
	HC	0	41
	NOx	6,189	23,789
2	CO	99805	99,802
	HC	-10508	41
	NOx	12,378	22,789
3	CO	199,610	199,614
	HC	0	1,499
	NOx	6,189	16,832
4	CO	199,610	199,614
	HC	-10,508	1,499
	NOx	12,378	16,832

6.2.2 Caso 2: Conversión de automóviles y taxis (LDGV), camionetas pick-up (LDGT1) y autobuses de transporte urbano (HDDV) a Gas natural comprimido (GNC).

En este caso se realizan los mismos cálculos que para el caso de Gas LP. Los costos de conversión para el caso a Gas natural [El Norte, 2002] son los que se muestran en la Tabla 6.9 éstos representan los coeficientes de conversiones X1, X2 ,X3 y X4 a calcular que se introducen en la función de objetivo o de costos.

Tabla 6.9 Costo de conversión de LDGV, LDGT1 y HDDV a vehículos con GNC.

Vehículo	Costo (M.N)
LDGV	15,000
LDT1	20,000
HDDV	45,000

Los factores de emisión para calcular las emisiones diarias en kg/veh-día con GNC se muestran en la Tabla 5.7 del capítulo anterior, con éstos se calculan las emisiones en kg/veh-día que encuentran en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Factores de emisión de CO, HC y NO_x en kg/veh-día para automóviles particulares, taxis, camionetas pick-up y autobuses de transporte urbano que usan GNC como combustible.

Tipo de Vehículo	Autos particulares (LDGV)	Taxis (LDGV)	Camionetas pick-up (LDGT1)	Autobuses de transporte urbano (HDDV)
Recorrido (km/día)	25.8	240	25.8	120
Vel. prom. (km/hr)	25	25	25	10
CO (kg/veh-día)	0.0090	0.0924	0.0040	0.0800
HC (kg/veh-día)	0.0004	0.0036	0.0005	0.0020
NO_x (kg/veh-día)	0.0009	0.0084	0.0020	0.0400
No. de vehículos	523,408	25,850	172,016	11,547

Al comparar las Tablas 6.10 y 6.4 se observa que las emisiones de los vehículos con GNC son significativamente más bajas que con Gas LP ya que los factores de emisión para Gas natural tienen valores muy bajos. Similarmente al caso 1, se muestran en la Tabla 6.11 las

emisiones totales diarias si todo el parque vehicular de los vehículos LDGV, LDGT1 y HDDV se convirtieran a vehículos de GNC. Las emisiones de CO siguen siendo las que se generan en mayor cantidad, seguidas de las de NO_x y por último las que aportan los HC's.

Tabla 6.11 Emisiones totales de CO, HC y NO_x en Kg/día con GNC.

Contaminante	Particulares (kg/día)	Taxis (kg/día)	Camionetas pick-up (kg/día)	Autobuses (kg/día)	Emisiones totales (kg/día)
CO	4,711	2,389	689	924	8,713
HC	209	93	86	23	411
NO_x	471	217	344	462	1,494

En la Tabla 6.12 se muestran las diferencias y porcentajes de reducción de emisiones entre el uso de combustibles para el año 2000 y el uso de GNC. Se obtienen porcentajes de reducción de más del 99% para CO y HC y de casi del 98% para NO_x lo cual indica la alta factibilidad de reducir las emisiones al usar GNC.

Tabla 6.12 Comparación de emisiones totales de CO, HC y NO_x entre los vehículos con combustible para el año 2000 y los vehículos con GNC.

Contaminante	kg/día para el año 2000	kg/día con GNC	Dif. emisiones (kg/día)	% Reducción
CO	998,050	8,711	989,339	99.12
HC	105,076	412	104,664	99.60
NO_x	61,889	1,494	60,395	97.58

Al comparar la Tabla 6.12 con la Tabla 6.6, se observa que se obtienen mayores porcentajes de reducción de contaminantes con GNC que con Gas LP sobretodo para los HC y NO_x,

Para el caso del CO el Gas LP tiene un alto porcentaje de reducción, similar al GNC. Con estos datos, se planteó el problema de optimización en las Ecuaciones 6.7 a 6.10. Su solución permite obtener el costo mínimo de inversión a través de la función de costos que se considera la función objetivo:

$$\begin{matrix} \text{Min} \\ X_i \end{matrix} \quad \text{Costo} = 15,000X_1 + 15,000X_2 + 20,000X_3 + 45,000X_4 \quad (6.7)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\begin{bmatrix} 1.091 & 9.8876 & 0.8660 & 1.1900 \\ 0.1096 & 1.0564 & 0.0900 & 0.3980 \\ 0.0390 & 0.3716 & 0.0380 & 2.060 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 199,610 \\ 21,061 \\ 12,378 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \geq [0] \quad (6.9)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 523,408 \\ 25,850 \\ 172,016 \\ 11,547 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Donde:

- X1 = Cantidad de autos particulares convertidos en vehículos a GNC.
- X2 = Cantidad de taxis convertidos en vehículos a GNC.
- X3 = Cantidad de camionetas pick-up convertidos en vehículos a GNC.

X4 = Cantidad de Autobuses de transporte urbano convertidos en vehículos a GNC.

Al igual que en caso 1, la matriz de la izquierda de la Ecuación. 6.8 representa los valores diferenciales entre las emisiones en kg/veh-día entre el caso base y para GNC. Los resultados de la ejecución de este caso se muestran en la Tabla 6.13 a través de porcentajes de conversión similares al del caso para Gas LP. En el caso de GNC se obtienen mayores costos de las conversiones vehiculares debido al alto costo individual de conversión. Se observa que en la corrida 1 se requieren menos cantidades de vehículos totales convertidos para el caso de GNC que para Gas LP con la finalidad de cumplir con los límites fijados de emisiones.

Tabla 6.13 Resultados del sistema de programación lineal adaptado a la minimización de costos totales de conversión a GNC.

Corrida	Datos			Número de vehículos convertidos				Costo (millones)
	Contaminante	% de reducción	kg/día	Autos particulares	Taxis	Pick-up	Autobuses	
1	CO	10	99,805	0	9,948	0	1,210	203.67
	HC	0	0					
	NOx	10	6,189					
2	CO	10	99,805	0	9,948	0	1,210	203.67
	HC	10	10,508					
	NOx	10	12,378					
3	CO	20	199,610	0	19,897	0	2,420	407.35
	HC	20	21,016					
	NOx	20	12,378					
4	CO	30	299,415	36,169	25,850	0	3,664	985.24
	HC	30	31,524					
	NOx	30	18,567					

Las cantidades de taxis son similares, la cantidad de autobuses de transporte urbano convertidos es mucho menor para el caso de GNC que el de Gas LP, por lo que los costos totales para esta corrida entre ambas opciones son mayores para GNC en más del 40%. Esto es debido a que los costos de conversión para GNC por vehículos son al menos 3 veces mayores que para Gas LP.

Para la corrida No. 2, se obtienen los mismos resultados que para la corrida No. 1 lo cual indica que las variaciones de HC no son factor determinantes para obtener un número distinto de vehículos a convertir. Al duplicar el valor de los límites de emisiones de la corrida 2 a la 3, se nota que se duplica el número de vehículos a convertir, específicamente los taxis y autobuses de transporte urbano. Por ejemplo, para la corrida 3 se fijó un 20% de reducción de emisiones para todos los contaminantes por lo que casi 20,000 taxis fueron convertidos y un 20% de la flota de autobuses de transporte urbano, lo que generó un costo de 407.35 millones. Para la corrida 4, se convierten todos los taxis del parque vehicular, se toman alrededor de 36,000 automóviles particulares y una mayor cantidad de autobuses de transporte urbano que en el corrida 3. Para el caso de GNC se pueden seguir fijando límites más elevados de % de reducción de emisiones de contaminantes debido a que se tienen altos porcentajes de reducción para los tres contaminantes.

En la Tabla 6.14 se muestra que para las cuatro corridas para el caso de GNC se obtienen emisiones de CO, HC y NO_x que están por encima de los límites fijados para este caso, algunas de ellas superan en gran medida el límite fijado y otras están por debajo sólo por algunos kg menos de contaminantes obtenidos en relación al límite fijado. Esto se debe a errores de redondeo o de la cantidad de cifras tomadas al realizar los cálculos en calculadora.

Tabla 6.14 Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización para GNC.

No. de Corrida	Emisiones		
	Contaminante	Lím. mínimo de reducción(kg/día)	Emisiones obtenidas (kg/día)
1	CO	99,805	99,802
	HC	0	10,990
	NOx	6,189	6,189
2	CO	99,805	199,611
	HC	10,508	21,327
	NOx	12,378	12,990
3	CO	199,610	199,613
	HC	21,016	23,899
	NOx	12,378	12,379
4	CO	299,415	299,415
	HC	31,524	32,730
	NOx	18,567	18,564

6.2.3 Caso 3: Uso de automóviles particulares , taxis (LDGV) y camionetas pick-up (LDGT1) de gasolina reformulada (GRF).

Para este caso se hace una homologación para que todos los vehículos del tipo LDGV y LDGT1 usen como combustible Gasolina premium (Gasolina reformulada) que distribuye PEMEX. Se consideran únicamente los cambios de tipos de Gasolinas y no se requiere hacer una inversión para la adquisición de un sistema de conversión. Los costos de inversión para este caso se consideran tomando el costo promedio para el año 2002 por litro

de la Gasolina sin plomo Premium y el de Magna Sin que son de alrededor de \$ 6.5 (M.N) y \$ 5.9 (M.N) respectivamente y, junto con los rendimientos de los combustibles se pueden obtener los costos diarios de usar Gasolina Premium en lugar de Magna Sin. Por lo anterior, se calculan los costos diarios en \$/día utilizando el valor diferencial entre el costo por litro en \$/litro de la Gasolina Premium y la Magna Sin, el rendimiento en km/litro por cada tipo de vehículo y los km/día recorridos de cada uno de ellos. Lo anterior, con la finalidad de conocer cuál es costo mínimo el cual se debe de desembolsar con la finalidad de obtener una reducción de emisiones fijada. Lo expresamos en la Ecuación 6.11:

$$Costo / día = (Costo / lt Premium - Costo / lt Magna) * \left(\frac{1}{rendimiento}\right) * (km_recorridos / día) \quad (6.11)$$

En la Tabla 6.15 se muestran los rendimientos en combustibles para automóviles particulares, taxis y camionetas pick-up, los km/día que éstos recorren de acuerdo a sus usos y los \$/día por cada tipo de estos vehículos después de haber aplicado la Ecuación. 6.11. Dichos rendimientos obtuvieron al promediar los rendimientos de varios vehículos del mismo tipo.

Tabla 6.15 Resultados de incremento en \$(M.N)/veh-día al utilizar gasolina Premium en lugar de Magna Sin.

Tipo de Vehículo	Particulares (LDGV)	Taxis (LDGV)	Camionetas pick-up (LDGT1)
Recorrido (km/día)	25.8	240	25.8
Rendimiento (km/lt)	12.0	12.0	8.0
Incremento por día (\$/día)	1.29	12.0	1.93

Los valores obtenidos con la Ecuación. 6.11 representan los pesos por día que deben de pagarse como excedente por vehículo si se utiliza Gasolina Premium en lugar de Magna Sin. Estos valores se utilizan como coeficientes de las variables X1, X2 y X3 que representan a los vehículos particulares, taxis y camionetas pick-up respectivamente a calcular como resultado de la ejecución del modelo. Los factores de emisión de la Tabla 6.16 fueron calculadas a partir de los factores de emisión calculados con el Mobile 5 para el AMM en la modalidad de uso para GRF (las cuales también son restadas de las emisiones en kg/veh-día actuales con la finalidad de obtener los coeficientes de la matriz de restricciones para este caso). En la Tabla 6.16 se muestran los factores de emisión en kg/día-veh de automóviles particulares, taxis y camionetas pick-up usando GRF.

Tabla 6.16 Factores de emisión de CO, HC y NO_x en kg/veh-día para los tipos de LDGV y LDGT1 con GRF.

Tipo de vehículo	Autos particulares (LDGV)	Taxis (LDGV)	Camionetas pick-up (LDT1)
Recorrido (km/día)	25.8	240	25.8
Vel. prom. (km/hr)	25	25	25
CO (kg/veh-día)	0.884	8.224	0.690
HC (kg/veh-día)	0.098	0.912	0.076
NO_x (kg/veh-día)	0.042	0.398	0.041
No. de vehículos	523,408	25,850	172,016

En la Tabla 6.17 se muestran las emisiones totales de CO, HC y NO_x que se generan si todos las unidades vehiculares de automóviles particulares, taxis y camionetas pick-up usaran GRF (gasolina Premium) como combustible.

Tabla 6.17 Emisiones totales de CO, HC y NO_x en kg/día con GRF para LDGV y LDGT1.

Contaminante	Particulares (kg/día) (LDGV)	Taxis (kg/día) (LDGV)	Camionetas pick-up (kg/día) (LDGT1)	Emisiones totales (kg/día)
CO	462,693	212,590	118,691	793,974
HC	51,294	23,575	13,073	87,942
NO_x	21,983	10,288	7,053	39,324

De la Tabla 6.18 podemos inferir que la aplicación de GRF muestra menos porcentajes de reducción que las opciones de Gas LP y GNC, dichos porcentajes no rebasan el 13% de reducción para el HC, el 6.41% para el CO e incluso se tiene un aumento de emisiones en el caso del NO_x.

Tabla 6.18 Comparación de emisiones totales de CO, HC y NO_x entre los vehículos con combustible para el año 2000 contra vehículos a GRF.

Contaminante	kg/día actual	kg/día con GRF	Dif. emisiones (kg/día)	% Reducción
CO	848,385	793,974	54,411	6.41
HC	100,457	87,942	12,515	12.45
NO_x	37,640	39,324	-1,684	-4.47

Se resuelve el problema de optimización para este caso recurriendo a los mismos pasos y consideraciones que en los casos anteriores lo que permite obtener un costo mínimo de inversión a través de la función de costos siguiente:

$$\begin{matrix} \text{Min} \\ X_i \end{matrix} \quad \text{Costo} = 1.29X_1 + 12.0X_2 + 1.93X_3 \quad (6.12)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\begin{bmatrix} 0.216 & 1.756 & 0.18 \\ 0.012 & 0.148 & 0.014 \\ -0.002 & -0.018 & -0.001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 49,903 \\ 10,508 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \geq [0] \quad (6.14)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 523,408 \\ 25,850 \\ 172,016 \\ 11,547 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Donde:

- X1 = Cantidad de autos particulares con GRF .
- X2 = Cantidad de taxis con GRF.
- X3 = Cantidad de camionetas pick-up con GRF

Los resultados de la ejecución de este caso se muestran en la Tabla 6.19 donde se fijaron de igual manera límites de reducción de emisiones como en los casos anteriores. Debido a los bajos porcentajes de reducción de emisiones para los tres contaminantes como lo muestra la Tabla 6.19, no hay solución factible que permita cumplir las dos primeras corridas debido a que se manejan porcentajes de reducción de CO del 10% y del 10 y 20% para NO_x, lo cual se encuentra fuera del rango permisible de reducción para estos contaminantes que son del

Capítulo 6: Evaluación de escenarios para la reducción de emisiones en el sector transporte en el AMM

6.41% y un aumento de emisiones para NO_x del alrededor del 4.47%. Por lo anterior, se fijaron porcentajes de reducción de emisiones debajo de los límites máximos permisibles, por ejemplo para la corrida 3 se fijo un aumento del 1.3% para NO_x y una disminución del 5% de emisiones para CO, dejando sin cambio las emisiones de HC lo que arrojó que usara gasolina Premium una considerable cantidad de taxis y alrededor del 10% de la flota de automóviles particulares.

Tabla 6.19 Resultados del sistema de programación lineal adaptado a la minimización de costos totales de conversión a GRF.

Corrida	Datos			Número de vehículos convertidos			Costo/día (miles de pesos)
	Contaminante	% de reducción	kg/día	Autos particulares	Taxis	Pick-up	
1	CO	10	99,805	SIN SOLUCION FACTIBLE			
	HC	0	0				
	NO _x	10	6,189				
2	CO	10	99,805	SIN SOLUCION FACTIBLE			
	HC	0	0				
	NO _x	20	12,378				
3	CO	5	49,903	52,893	21,913	0	326.78
	HC	0	0				
	NO _x	-1.3	500				
4	CO	5	49,903	20,881	25,850	0	335.25
	HC	0	0				
	NO _x	-4	1500				

En la corrida 4 si se permite un aumento de emisiones de NO_x hasta del 4% se obtienen menos del 50% de los autos particulares pero la cantidad de taxis llega al límite permitido. Los costos/día entre ambas corridas son similares, pero un tanto mayores para la corrida 4 debido a que utiliza toda la cantidad de taxis los cuales tiene un costo/día mayor en más del 90% que los automóviles particulares, debido a sus mayores trayectos recorridos y por ende un mayor consumo de combustibles.

En la Tabla 6.20 se comprueba el cumplimiento de la fijación de los límites de reducción de emisiones del sistema de ecuaciones para este caso. En los casos 3 y 4 se puede notar que la columna de las emisiones obtenidas son mayores al límite mínimo fijado.

Tabla 6.20 Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización.

No. de Corrida	Emisiones		
	Contaminante	Lím. mínimo de reducción(kg/día)	Reducción en emisiones obtenidas (kg/día)
3	CO	49,903	49,904
	HC	0	3,878
	NO _x	-500	-500.22
4	CO	49,903	49,903
	HC	0	4,076
	NO _x	-1500	-507

6.2.4 Caso 4: Combinación de los casos 1 (Gas LP) y 2 (GNC) que incluyen los casos de automóviles particulares, taxis y autobuses de transporte urbano impulsados por la electricidad y de autobuses de transporte urbano híbridos impulsados por diesel-electricidad .

En este caso, se hace una combinación de los casos 1, 2 y se incluye la conversión de automóviles particulares, taxis y autobuses de transporte urbano a vehículos eléctricos y también de autobuses de transporte urbano híbridos impulsados por diesel y electricidad. También se requiere obtener un costo mínimo de inversión a través de una reducción de emisiones de CO, HC y NO_x. Para este caso se considera limitar las cantidades de vehículos a convertir de acuerdo a las experiencias de conversiones de vehículos de ciudades de Estados Unidos. Las cantidades de cada tipo de vehículo para convertir son tomadas como referencia del de la pagina del Departamento de Energía de Estados Unidos en su página dedicada al programa de “Ciudades Limpias” [Departament of Energy, USA ,2000] en donde se presentan distintas experiencias de éxito de ciudades que se han apegado a los esquemas de conversión de la flotas vehiculares. En la Tabla 6.21 se muestran las cantidades y tipo de vehículos que fueron convertidos en vehículos impulsados por diferentes combustibles.

Tabla 6.21 Cantidades de tipos de vehículos con distintos tipos de combustibles en ciudades de Estados Unidos.

Ciudad	Tipo de Vehículo	GNC (Unidades)	Gas LP (Unidades)	Eléctricos (Unidades)
Atlanta, Ga	Taxis	70		
Alamo Tx.	Autobuses de transporte urbano		236	0
El Paso Tx.		120		
PhiladeLPhia		4		
Los Angeles, Ca.		1,570		
Los Angeles, Ca.	Renta de autos			20

En el caso de la ciudad de los Ángeles el programa de mejora de calidad del aire marca estrategias para disminuir estrategias del transporte [CARB, 2003]. Estas estrategias se enfocan a la introducción de vehículos convertidos a GNC, Gas LP y ZEV (Zero Emissions Vehicles). De la flota vehicular de 24 millones de vehículos a gasolina y de aproximadamente 1 millón de vehículos a diesel en el Estado de California, la introducción sería de 2,000 eléctricos, 250 de celdas de Hidrógeno para el año 2008. La cantidad de vehículos de celdas de Hidrógeno se incrementará a 2,500 del año 2009 al 2011; a 25,000 vehículos del 2012 al 2014 y a 50,000 vehículos del año 2015 al 2017. Para el caso de vehículos que usan GNC se estima que hay más de 70,000 en Norte América en el 2002 [Ford, 2002]. Asimismo en Los Ángeles, se desea llegar a tener un 2% de la flota vehicular convertida a vehículos de cero emisiones y un 6% de la flota vehículos como Híbridos, Gas LP, GNC y otros combustibles para el 2010. Por otro lado, en 1997 en Argentina había 427,000 vehículos ligeros transformados a GNC que representaron solamente el 2% de la flota vehicular de ese país. [Cámara Nacional Argentina del GNC, 2003]. De los datos anteriores se observa que los porcentajes de conversión de vehículos a GNC y la introducción de vehículos eléctricos e híbridos son pequeños todavía.

En base a lo anterior, para el AMM estas cifras pueden ser variadas de acuerdo a las condiciones políticas, presupuestos, las necesidades y disponibilidades tecnológicas, factores sociales y económicos, por lo que es difícil fijar cantidades de vehículos a convertir. En este trabajo se proponen porcentajes y cantidades de la flota vehicular que puede ser convertida para usar combustibles alternos los cuales se muestran en la Tabla 6.22.

Se considera que los vehículos eléctricos no generan emisiones de contaminantes porque no requieren de un motor de combustión para generar trabajo. Estos vehículos tienen paquetes de baterías para generar la energía que se requiere para ser impulsados. El costo de conversión de un autobús de transporte urbano (HDDV) de diesel a eléctrico es de 200,000.00 (M.N) [Departament of Energy, USA ,2000] y el de adquirir un auto eléctrico nuevo tipo sedán es de 190,000.00 (M.N).

Tabla 6.22 Porcentaje y cantidad propuesta de vehículos de vehículos a convertir en el AMM

Clave	Conversión de vehículos	% a convertir	No. de vehículos
X1	Autos particulares a vehículos con Gas LP	10	52,341
X2	Taxis a vehículos con Gas LP	10	1,293
X3	Camionetas pick-up a vehículos con Gas LP	5	17,202
X4	Autobuses de transporte urbano a vehículos con Gas LP	15	1,732
X5	Autos particulares a vehículos con GNC	3	15,702
X6	Taxis a vehículos con GNC	10	2,585
X7	Camionetas pick-up a vehículos con GNC	3	5,160
X8	Autobuses de transporte urbano a vehículos con GNC	5	577
X9	Autos particulares a vehículos eléctricos	1	5,234
X10	Taxis a vehículos eléctricos	1	259
X11	Autobuses de transporte urbano a vehículos eléctricos	3	346
X12	Autobuses de transporte urbano a vehículos híbridos	1	115

Actualmente, el costo de un Autobús de transporte urbano híbrido impulsado por diesel y electricidad es de unos \$ 237,500 (M.N.) [Alt Fuels Advisor, 2001]. Bajo estas consideraciones, se calcula una aproximación de emisiones diarias por vehículos tomando como referencia las emisiones actuales de los HDDV's que ya se obtuvieron usando el Mobile 5 para el AMM en capítulo 5. Las emisiones para los vehículos híbridos (diesel-eléctricos) se muestran en la Tabla 6.23 y calcularon tomando los porcentajes máximos de reducción de emisiones que viene especificados en la sección 5.3.5.

Tabla 6.23 Emisiones en kg/día-veh para HDDV a diesel-eléctricos.

Contaminante	Emisiones (kg/veh-día)
CO	0.38
HC	0.12
NOx	1.26

En la Tabla 6.22 se proponen los límites porcentuales de conversión para este caso así como las cantidades correspondientes en unidades para cada uno de los tipos de conversiones que se llevarán a cabo. En la ecuación 6.16 se muestra la función objetivo del caso combinado en donde se muestran los costos de conversión y de sustitución de las opciones antes mencionadas.

La función objetivo para este caso queda planteada de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} \text{Min} \\ X_i \end{matrix} \text{Costo} \left\{ \begin{array}{l} 4,500X1 + 4,500X2 + 4,900X3 + \\ 6,000X4 + 15,000X5 + 15000X6 + \\ 20,000X7 + 45,000X8 + 190,000X9 \\ 190,000X10 + 200,000X11 + 237,500X12 \end{array} \right\} \quad (6.16)$$

Las restricciones se conforman por las Ecuaciones 6.17 y 6.18 la cuales se centran en la limitación de la cantidad de vehículos a convertir. Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\begin{bmatrix} 1.03 & 9.26 & 0.80 & 0.91 & 1.091 & 9.8876 & 0.8660 & 1.1900 & 1.1 & 9.98 & 1.27 & 0.89 \\ 0.01 & 0.1 & -0.01 & -0.08 & 0.1096 & 1.0564 & 0.0900 & 0.3980 & 0.11 & 1.06 & 0.40 & 0.28 \\ 0.01 & 0.12 & 0.01 & 1.96 & 0.0390 & 0.3716 & 0.0380 & 2.060 & 0.04 & 0.38 & 2.10 & 0.84 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \\ X5 \\ X6 \\ X7 \\ X8 \\ X9 \\ X10 \\ X11 \\ X12 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 99,805 \\ 0 \\ 6,189 \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Las cuatro primeras columnas de la matriz de restricciones corresponden al diferencial de emisiones con Gas LP, las siguientes cuatro corresponden al GNC, de la columna nueve a la once primera son para vehículos eléctricos y la última columna corresponde al diferencial de emisiones para autobuses de transporte urbano híbridos.

$$\begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \\ X5 \\ X6 \\ X7 \\ X8 \\ X9 \\ X10 \\ X11 \\ X12 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 52,341 \\ 1,293 \\ 17,202 \\ 1,732 \\ 15,702 \\ 2,585 \\ 5,160 \\ 577 \\ 5,234 \\ 259 \\ 346 \\ 115 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

En la Tabla 6.24 se muestran los porcentajes de reducción de emisiones para el caso 4.

Tabla 6.24 Nivel de reducciones fijados para CO, HC y NO_x de acuerdo a cada escenario para el caso 4.

Corridas	Datos		
	Contaminante	% de reducción	kg/día
1	CO	10	99,805
	HC	0	0
	NO _x	10	6,189
2	CO	5	49,903
	HC	5	5,254
	NO _x	5	3,095
3	CO	10	99,805
	HC	0	0
	NO _x	0	0
4	CO	0	0
	HC	0	0
	NO _x	10	6,189

En la Tabla 6.25 se muestran las cuatro corridas con diferentes niveles de reducción de contaminantes las cuales como resultado de la ejecución del modelo, generan distintas cantidades de los tipos de vehículos para ser convertidos. Como datos relevantes de la corrida 1 de este caso 4, se observa que todos los taxis disponibles a Gas LP, GNC y eléctricos fueron convertidos y los 1,732 autobuses de transporte urbano disponibles a Gas LP, también los autos particulares disponibles a GNC. Se genera el mayor costo de conversión que es de 539.92 millones de pesos (M.N.) y la mayor cantidad de vehículos convertidos. Lo anterior se debe a que se requieren reducir el 10% de CO que es el contaminante limitante.

Para la corrida 2, persiste la conversión total de taxis a Gas LP, GNC y eléctricos, de igual forma sucede con los autos particulares a GNC, aunque también todos los autobuses de transporte urbano son convertidos a GNC. Aquí, la reducción de emisiones se fijó 50% menor para CO y NO_x en relación a la corrida 1, pero se requiere un 5% de reducción de emisiones de HC lo que genera casi una tercera parte de la cantidad de vehículos convertidos que en la corrida 1. En la corrida 3, también se convierten todos los taxis disponibles para ser convertidos a Gas LP y a GNC y casi todos los autos particulares disponibles a Gas LP. La reducción de emisiones sólo se especifica para un 10% de CO y se mantiene sin cambio para HC y NO_x lo que genera la mayor cantidad de vehículos totales convertidos, lo cual indica que las emisiones de CO controlan la cantidad de vehículos convertidos.

En la corrida 4, son convertidos en su totalidad los taxis y los autobuses de transporte disponibles a Gas LP y también los taxis y autobuses de transporte urbano disponible para GNC. En esta última corrida, la reducción del 10% de NO_x genera la menor cantidad de vehículos convertidos y también el menor costo total. Los altos costos de sustitución de los autobuses eléctricos e híbridos no permiten considerarlos en las corridas con los límites de reducción de emisión fijados. Sin embargo si abarcan como se vio en las primeras dos corridas del caso 4, a los taxis eléctricos.

Tabla 6.25 Resultados de la ejecuciones del caso combinado.

Variables	Corridas			
	1	2	3	4
X1	33,741	6	49,787	0
X2	1,293	1,293	1,293	1,293
X3	7,382	0	12,491	0
X4	1,732	4	812	1,732
X5	15,702	15,702	0	0
X6	2,585	2,585	2,585	2,585
X7	0	1,879	300	234
X8	271	577	0	577
X9	0	0	0	0
X10	259	259	0	0
X11	0	0	0	0
X12	0	0	0	0
Total de unidades	61,233	22,305	67,268	6,421
COSTO (millones)	539.92	343.71	340.71	77.05

En la Tabla 6.26 se corroboran con la columna del extremo derecho que las emisiones obtenidas son mayores a los límites mínimos de reducción de emisiones de CO, HC y NO_x fijados. Lo anterior significa que el modelo de optimización genera resultados válidos.

Tabla 6.26 Comparación de las emisiones fijadas y las emisiones obtenidas con el modelo de optimización.

No. de Corrida	Emisiones		
	Contaminante	Límite Mínimo de reducción(kg/día)	Reducciones de Emisiones obtenidas (kg/día)
1	CO	99,805	99,805
	HC	0	4,851
	NO _x	6,189	6,189
2	CO	49,903	57,295
	HC	5,254	5254
	NO _x	3,095	3,166
3	CO	99,805	99,805
	HC	0	4,993
	NO _x	0	5,755
4	CO	0	37,539
	HC	0	3,023
	NO _x	6,189	6,191

6.3 Escenario 2: Maximización de la reducción de emisiones para CO, HC y NO_x sujeto a un monto de inversión económico.

En este escenario se maximizan las reducciones en emisiones para CO, HC y NO_x de acuerdo a cada a las opciones de control de la optimización por transporte que se manejan en el escenario 1, que siguen el modelo de la Ecuación 4.8.

6.3.1 Caso 1: Maximización de la reducción de emisiones es de CO sujeto a un monto de capital de inversión económica como restricciones.

Para este caso se considera la función objetivo dada por la Ecuación 6.19. Esta ecuación representa las diferenciales de reducción de emisiones para el CO, los cuales representan a cada uno de los cuatro casos que conforman el escenario 1 de la evaluación de las estrategias de control de la contaminación por transporte. La Ecuación 6.20 representan a las restricciones del problema. Esta ecuación está conformada por los costos de conversión de cada de las opciones tratadas en el escenario para cada uno de los tipos de vehículos involucrados. Con un límite de inversión económica que están fijados en base a los costos totales de inversión. El costo está basado en el Caso 4 del escenario 1 (Sección 6.2.4). La función objetivo queda planteada de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} \text{Max} \\ X_i \end{matrix} \text{Reducción} - \text{emisiones} = \left\{ \begin{array}{l} 1.03X_1 + 9.26X_2 + 0.80X_3 + \\ 0.91X_4 + 1.091X_5 + 9.8876X_6 + \\ 0.8660X_7 + 1.1900X_8 + 1.1X_9 + \\ 0.98X_{10} + 1.27X_{11} + 0.89X_{12} \end{array} \right\} \quad (6.19)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,500X_1 + 4,500X_2 + 4,900X_3 + \\ 6,000X_4 + 15,000X_5 + 15000X_6 + \\ 20,000X_7 + 45,000X_8 + 190,000X_9 + \\ 190,000X_{10} + 200,000X_{11} + \\ 237,500X_{12} \end{array} \right\} \leq 100,000,000 \quad (6.20)$$

$$X_i \geq 0 \quad (6.21)$$

Los resultados de este caso de muestran en la Tabla 6.27. En la corrida 1, se muestra claramente que todos lo Taxis disponibles para Gas LP y GNC se convierten, 1,293 y 2,585

unidades respectivamente. Lo anterior se genera con un monto de 100 millones de pesos y permite reducir alrededor de 50 ton/día de CO. Se observa que no se convierten o implementan vehículos con altos costos de conversión individual como eléctricos e híbridos y sobre todo, desde X7 a X12. El modelo toma aquellos costos que no son tan altos pero que tienen altos valores de diferenciales de emisiones de CO como lo son el Gas LP y el GNC.

Para la corrida 2, el modelo incluye la conversión total de los vehículos disponibles a Gas LP, desde X1 hasta X4 y también de todos los taxis para ser convertidos a GNC: Se genera el doble de reducciones de CO (108 ton/día) que en la corrida 1 pero la inversión económica se cuadruplica. Al invertir 600 millones de pesos como lo muestra la corrida 3, se convierten de igual manera que en la corrida 2, todos los vehículos de X1 a X4 disponibles a convertir y X5 casi llega al límite de la totalidad de vehículos a convertir. Por otro lado, de igual manera se ocupan todos los taxis a GNC y sigue persistiendo el evitar convertir vehículos con altos costos de conversión individual.

En esta corrida, solo se aumenta la reducción de CO en 15 ton/día que en la corrida pasada a pesar de que se invierten 200 millones más. Lo anterior indica que el sistema está llegando a su límite máximo de conversiones. La relación de \$ invertido/kg-veh-día de CO hace que el modelo tome la opción que genere la mayor cantidad de reducción del contaminante al menor costo posible. La opción de menor costo con mejor ganancia de reducción de contaminantes es la de conversión de taxis a Gas LP seguida de la de los taxis a GNC, en tercer lugar se encuentra la conversión de autos particulares a Gas LP, las restantes en orden de prioridad son la conversión de camionetas pick-up a Gas LP, la de autobuses de transporte urbano a Gas LP y la de taxis autos particulares a GNC.

Tabla 6.27 Resultados del Caso 1 de maximización de reducción de emisiones de CO.

Variables	Corridas		
	1	2	3
X1	12,313	52,341	52,341
X2	1,293	1,293	1,293
X3	0	17,202	17,202
X4	0	1,732	1,732
X5	0	1,679	15,013
X6	2,585	2,585	2,585
X7	0	0	0
X8	0	0	0
X9	0	0	0
X10	0	0	0
X11	0	0	0
X12	0	0	0
Total de unidades	16,191	75,100	90,166
Reducción CO (kg/día)	50,215	108,613	123,161
Capital (millones)	100	400	600
Costo total (millones)	100	400	600

6.3.2 Caso 2: Maximización de la reducción de emisiones es de HC sujeto a un monto de capital de inversión económica como restricciones.

De la misma manera que en el caso anterior, se considera ahora para HC la función objetivo de la Ecuación 6.22 como la que muestra los diferenciales de emisiones para este contaminante, las ecuaciones restantes para este caso son las restricciones en costo y en cantidades de vehículos a las cuales se sujeta la función objetivo.

La función objetivo queda planteada de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} \text{Max} \\ X_i \end{matrix} \text{Reducción - emisiones} = \left. \begin{matrix} 0.01X_1 + 0.1X_2 - 0.01X_3 - \\ 0.08X_4 + 0.1096X_5 + 1.0564X_6 + \\ 0.0900X_7 + 0.3980X_8 + 0.11X_9 + 1.06X_{10} \\ + 0.40X_{11} + 0.28X_{12} \end{matrix} \right\} \quad (6.22)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\left. \begin{matrix} 4,500X_1 + 4,500X_2 + 4,900X_3 + \\ 6,000X_4 + 15,000X_5 + 15,000X_6 + \\ 20,000X_7 + 45,000X_8 + 190,000X_9 + \\ 190,000X_{10} + 200,000X_{11} + 237,500X_{12} \end{matrix} \right\} \leq 100,000,000 \quad (6.23)$$

$$X_i \geq 0 \quad (6.24)$$

Los resultados de la ejecución de este caso se presenta en la Tabla 6.29 en donde se fijan los mismos montos de inversión que en el caso 1 para CO.

En la primera corrida del caso 1, se convierten todos los taxis disponibles para Gas LP y GNC, así como todos los autobuses de transporte urbano disponibles para GNC en donde se reducen alrededor de 6 ton/día de HC. En la corrida 2, se presenta la substitución total de todos los taxis y autobuses de transporte urbano disponibles a vehículos eléctricos y de los autobuses de transporte urbano a vehículos híbridos. Se obtiene más del doble de la cantidad de vehículos convertidos que en la corrida 1 y sólo se logra un aumento en reducción de emisiones de HC de alrededor de 1.3 ton/día en relación a la primera corrida.

Al obtener los resultados de la corrida 3, se observa que la cantidad de vehículos convertidos es 3 veces y media mayor que la de la corrida 2 pero sólo se aumenta la reducción de emisiones en 1 ton/día. La conversión vehicular de esta corrida 3, muestra que

se convierten en su totalidad los taxis a disponibles a Gas LP, GNC y eléctricos, así también como todos los autos particulares a GNC y los autobuses de transporte a eléctricos. Las opciones que tienen el menor valor en la relación \$ invertido/kg-veh-día de HC se presentan en el siguiente orden: X6, X2, X8, X5, X10, X7, X1, X11, X12, X9, X4, X3. Lo anterior señala que las opciones de conversión de taxis a GNC y Gas LP se encuentran en los dos primeros lugares, seguidas por la opción de conversión de autobuses de transporte urbano a GNC y de autos particulares a GNC.

Tabla 6.28 Resultados de la ejecuciones del Caso 2 de maximización de reducción de emisiones de HC.

Variables	Corridas		
	1	2	3
X1	0	0	31,445
X2	1,293	1,293	1,293
X3	0	0	0
X4	0	0	0
X5	1,963	15,702	15,702
X6	2,585	2,585	2,585
X7	0	0	5,160
X8	577	577	577
X9	0	0	0
X10	0	259	259
X11	0	0	0
X12	0	0	0
Total de unidades	6,418	20,416	57,021
Reducción HC (kg/día)	3,305	5,085	5,864
Capital (millones)	100	400	600
Costo total (millones)	100	400	400

6.3.3 Caso 3: Maximización de la reducción de emisiones es de NO_x sujeto a un monto de capital de inversión económica como restricciones.

De la misma manera que en los dos primeros casos anteriores de este escenario 2, se consideran a las diferenciales de emisiones de NO_x como la función objetivo para cada una de las opciones de reducción de la contaminación por transporte tratadas en este trabajo, en donde las ecuaciones de restricciones son de la mismas características que para CO y HC de este escenario 2.

La función objetivo queda planteada de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} \text{Max} \\ X_i \end{matrix} \text{Reducción} - \text{emisiones} = \left\{ \begin{array}{l} 0.01X1 + 0.12X2 + 0.01X3 + \\ 1.9X4 + 0.0390X5 + 0.3716X6 + \\ 0.0380X7 + 2.060X8 + 0.04X9 + \\ 0.38X10 + 2.10X11 + 0.84X12 \end{array} \right\} \quad (6.25)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,500X1 + 4,500X2 + 4,900X3 + \\ 6,000X4 + 15,000X5 + 15,000X6 + \\ 20,000X7 + 45,000X8 + 190,000X9 + \\ 190,000X10 + 200,000X11 + 237,500X12 \end{array} \right\} \leq 100,000,000 \quad (6.26)$$

$$X_i \geq 0 \quad (6.27)$$

Los autobuses a Gas LP y GNC presentan los menores valores en \$ invertido/ kg-veh-día de NO_x, le siguen los taxis para los mismos combustibles. Lo cual se traduce en las conversiones totales de vehículos para estos combustibles. En la Tabla 6.29 se muestran los resultados de la ejecución del caso 3.

Tabla 6.29 Resultados de la ejecuciones del Caso 1 de maximización de reducción de emisiones de NO_x

Variables	Corridas		
	1	2	3
X1	0	0	41,557
X2	1,293	1,293	1,293
X3	0	0	0
X4	1,732	1,732	1,732
X5	0	14,836	15,702
X6	2,585	2,585	2,585
X7	0	0	0
X8	577	577	577
X9	0	0	0
X10	0	0	0
X11	346	346	346
X12	115	115	115
Total de unidades	6,648	21,484	63,907
Reducción NO_x (kg/día)	6,522	7,227	7,676
Capital (millones)	100	400	600
Costo total (millones)	100	400	600

De los tres casos para el escenario 2 se aprecia que los taxis a Gas LP y GNC son lo que presentan mejores resultado para la reducción de los contaminantes. Las peores medidas son las que se aplican a camionetas vehículos particulares eléctricos con los costos que se muestran. Los autobuses eléctricos e híbridos se utilizan cuando se requiere disminuir emisiones de NO_x y los taxis eléctricos se utilizan para ayudar a reducir emisiones de HC en el caso 2 del segundo escenario.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Los valores obtenidos en la ejecución de los escenarios de evaluación de las estrategias de control indican que la opción de conversión a GNC genera grandes reducciones de HC, NO_x y CO aunque aún es una opción que es cara y no está implementada totalmente en México. Por otro lado, el Gas LP se ha difundido de tal manera que representa el principal combustible alternativo en vehículos en nuestro país y que tiene bajos costos de conversión en comparación con el GNC. Genera similares reducciones de emisiones de CO y NO_x.
- Los Taxis y los Automóviles Particulares son la clase de vehículos que generan la mayor cantidad de emisiones de HC, NO_x y CO debido a su número y a los kilómetros recorridos. Los resultados muestran que las medidas más factibles son convertir los Taxis y los Autobuses de transporte urbano a vehículos a Gas LP y GNC.
- Las opciones de sustitución a vehículos Eléctricos e Híbridos conllevan altos costos de implementación y distan mucho de que se implementen a corto plazo en el AMM debido a la disponibilidad tecnológica y económica. Sin embargo combinando las opciones de control de la contaminación por el transporte, este tipo de vehículos pueden tener acceso en ciertas zonas del AMM donde se genere una concentración elevada de contaminantes.
- La programación lineal es una herramienta flexible para aplicarse en temas ambientales y económicos. En este trabajo se aplicó como parte de una metodología que permitió ofrecer un modelo para evaluar estrategias de control para la contaminación por transporte en el AMM. Los resultados permiten apoyar a la toma

de decisiones de las autoridades dentro de los programas para la protección al ambiente.

- Los taxis y los autobuses de transporte urbano son los tipos de vehículos que ocupan la mayor cantidad de vehículos convertidos para la reducción de los CO, HC y NO_x específicamente en la aplicación de Gas LP, GNC.

Recomendaciones:

- Considerar la evaluación de las estrategias de control de la contaminación por transporte como un elemento importante para la toma de decisiones de la gestión ambiental, se puede combinar estudios de vialidad, de impactos ambientales, efectos en la salud, de uso de combustibles y de infraestructura vial para apoyar esta toma de decisiones.
- Combinar la aplicación de este modelo con los programas de concientización ambiental, cultura vial y de incentivos fiscal en materia de asuntos ambientales, con la finalidad de obtener mejores resultados en el rubro del control de la contaminación por transporte.
- Estimar con mayor precisión y exactitud el inventario de emisiones del parque vehicular del AMM con la finalidad de obtener mejores resultados de valores de las emisiones de HC, NO_x y CO por ejemplo: Evaluar la adaptación y aplicación del Mobile 6 al AMM con la finalidad de obtener emisiones de otros contaminantes como PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂ y considerar en la evaluación de las estrategias cambios en la velocidad de los vehículos debido a la ampliación de la infraestructura vial como puentes, ampliación de carriles, pasos a desnivel y otros.
- Considerar el modelo de evaluación de estrategias como parte de una de las herramientas del proceso de evaluación integrada de la contaminación en las grandes ciudades.

- Aplicar esta metodología considerando también los costos de operación, de mantenimiento y de rescate de cada una de las opciones de control de la contaminación por transporte con la finalidad de obtener costos por periodo o anualizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alt Fuels Advisor, 2001, Vol. 10, No. 10

Bannister D., 1998, Transport Policy and Environment, E & FN Spon, 1era. Edición, London.

California Air Resources Board, <http://www.arb.ca.gov/planning/sip/stfed03/revsect2.doc>, 2003.

Cámara Argentina del GNC, 2003, <http://www.gnc.org.ar>.

Case Study, 1998, Alternative Fuel Buses Earn High Marks from Antelope Valley Schools, U.S. Department of Energy.

Castillejos M., Gold DR., Dockey DW., Tosteson T., Baum T., Speizer FE., 1992, Effects of Ambient Ozone on Respiratory Function and Symptoms in Mexico City Schoolchildren, Am J Public Health 51:155-164.

Davidson AE., Klein DE., Settipane GA., Alario AJ. 1994. Access to Care Among Children Visiting the Emergency Room with Acute Exacerbations of Asthma. Annals of Allergy, 72:469-473.

Department of Energy, 2001, Clean Cities, <http://www.cities.doe.gov/success.shtml>

EEA, European Environment Agency, http://themes.eea.eu.int/Specific_media/air, última actualización 22 de Agosto del 2003.

Ford Motor Company, 2002, www.fleet.ford.com.

IMSL, International Mathematics and Statistics Library, 2002.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información, 2001, Cuaderno Estadístico Municipal, Monterrey, Estado de Nuevo León.

Kohn R., 1978, A linear Programming Model For Air Pollution Control, MIT, Cambridge Ma, EUA.

El Norte, 2002, Negocios, Una Opción Rentable y Segura, <http://www.elnorte.com>

LP Conversiones 2003, Av. Eugenio Garza Sada 5642, Col. Mederos Monterrey N.L.

- Mage D., Zail O., 1995, Contaminación Atmosférica Causada por Vehículos Automotores, Consecuencias Sanitarias y Medidas para Combatirla, 1era. Edición, OMS, Metepec, México.
- Molina M., 2000, Proyecto para el Diseño de una Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México 2001-2010, MIT, Cambridge Ma, EUA.
- Molina M., Molina L., 2002, Air Quality In The México Mega City, Kluwer Academic Publisher, Cambridge Ma, EUA.
- Mujica V., Figueroa J., 1996, Contaminación Ambiental, Causas y Control, UAM Iztapalapa, 1era. Edición, México D.F.
- OCDE, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, 1995, Motor Vehicle Pollution, 1era. Edición, París, Francia.
- Ornusal B., Gautam S., 1996, Contaminación Atmosférica por Vehículos Automotores, Experiencias Recogidas en Siete Centros Urbanos de América Latina, Banco Mundial, 1era. Edición, Washington, EUA.
- Ostro BD., 1990, Associations between 1980 U.S. Mortality Rates and Alternate Measures of Airborne Particle Concentrations. Risk Analysis 7:449-461.
- PACAAMM, Instituto Nacional de Ecología, 1997, Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey, Monterrey N.L.
- Pope CA III, Dockey DW, Spenger JD, Raizenne ME., 1991, Respiratory Health and PM₁₀ Pollution: A Daily Time Series Analysis. Am. Rev. Resp. Dis. 144:668-674.
- Quadri, Sánchez, 1994, La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica, Limusa Editores, México D.F.
- Radián: Mobile 5-MMA_p, Rosenthal, Chávez and Garza. Final Report: Mobile Source Inventory Estimate for Monterrey, N.L., México, 1995.
- Romieu I., Cortés LM, Velasco SR, Sánchez S., Meneses F., Hernández-Ávila M., 1992, Air Pollution and School Absenteeism Among Children in Mexico City., Am J Epidemiol; 135(12): 1524-1531.
- Schwela D., Zali O., 1999, Urban Traffic Pollution, E & FN Spon, 1era. Edición, London.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003, Normas Oficiales Mexicanas (ECOL) Aplicables a las Emisiones de Fuentes Móviles, <http://www.semarnat.gob.mx/ssfna/marco-normativo/legislacion.shtml>., Última actualización 22 Agosto 2003.

SIMA, 2002, Sistema de Integral de Monitoreo Ambiental, Subsecretaría de Ecología, Gobierno del Estado de Nuevo León.

Strauss S. W., Mainwaring S.J., 1990, Contaminación del Aire, Causas, Efectos y Soluciones, Trillas, México.

Subsecretaría del Transporte, 2000, Gobierno del Estado de Nuevo León.

U.S. Environmental Protection Agency, 2001, Transportation and Air Quality, <http://www.epa.gov/otaq/>. Última actualización: 22 agosto 2003.

Uninet, 1992, Mejoramiento de la Calidad del Aire Mediante Soluciones Rentables Basadas en Diversas Tecnologías de Emisiones Vehiculares, Parte 2, ITESM, Monterrey N.L.

Vega, De Anda, Macías, 1995, Impacto del Programa de Verificación Vehicular en la Contaminación Atmosférica por Gases Vehiculares en el aire en el Área Metropolitana de Monterrey, Control Atmosférico S.A. de C.V., Monterrey N.L.

Wayne R., Becerra A., 1994, Development of a Methodology for Air Pollution Options for Improving the Air Quality in Mexico City, Los Alamos National Laboratory, Gerencia de Ciencias del Ambiente, Instituto Mexicano del Petróleo.

En el presente Anexo se muestra el archivo de entrada de una de las ejecuciones del modelo Mobile 5 AMM para calcular los factores de emisión en gr/km de la flota vehicular para el año 2000.

```
1    PROMPT -
MOBILE5-MMAp Test Run No I/M
1    TAMFLG -
1    SPDFLG -
1    VMFLAG -
5    MYMRFG -
5    NEWFLG - wo CAAA
1    IMFLAG -
1    ALHFLG -
1    ATPFLG -
1    RLFLAG -
1    LOCFLG - enter LAP record once
1    TEMFLG -
4    OUTFMT - print 112 column descriptive output format
4    PRTFLG - print exhaust HC, CO and NOx results
1    IDLFLG - print idle exhaust
1    NMHFLG - print VOC
2    HCFLAG - print HC components
1 00 10.0 12.2 20.6 27.3 20.6 1
Monterrey  MX B 6.6 17.7 7.7 7.7 20 1 1 1
1 00 20.0 12.2 20.6 27.3 20.6 1
Monterrey  MX B 6.6 17.7 7.7 7.7 20 1 1 1
1 00 30.0 12.2 20.6 27.3 20.6 1
Monterrey  MX B 6.6 17.7 7.7 7.7 20 1 1 1
1 00 40.0 12.2 20.6 27.3 20.6 1
Monterrey  MX B 6.6 17.7 7.7 7.7 20 1 1 1
1 00 50.0 12.2 20.6 27.3 20.6 1
```

ANEXO B

En este anexo se muestra el archivo fuente en lenguaje Fortran para la ejecución del proceso de optimización de la minimización de los costos de conversión para el caso combinado (2.2.4):

```
PROGRAM TESIS JORGE
USE  IMSLF77
¡DECLARACION DE VARIABLES

INTEGER  LDA, NCON, NEQ, NVAR
PARAMETER (NCON=3, NEQ=0, NVAR=12, LDA=NCON)
INTEGER  IACT(39), MAXFCN, NACT, NOUT
REAL     A(NCON,NVAR), ACC, ALAMDA(NVAR), B(NCON), OBJ,
SOL(NVAR), XGUESS(NVAR), XLB(NVAR), XUB(NVAR)
EXTERNAL FCN

      OPEN (UNIT=5, FILE= 'DATOS.DAT', STATUS='OLD')
      OPEN (UNIT=6, FILE= 'DATOS.DAT', STATUS='UNKNOWN')

¡LECTURA DE VARIABLES

READ(5,100)A ,B,XLB, XUB,XGUESS
100  FORMAT(5f10.2)

¡CALCULOS

CALL UMACH (2, NOUT)
CALL LCONF (FCN, NVAR, NCON, NEQ, A, LDA, B, XLB, XUB, XGUESS,ACC,
MAXFCN, SOL, OBJ, NACT, IACT, ALAMDA)
```

```
WRITE (NOUT,110) 'SOLUCION:'
WRITE (NOUT,120) SOL
WRITE (NOUT,110) 'VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO:'
WRITE (NOUT,120) OBJ
WRITE (NOUT,110) 'NUMERO DE EVALUCIONES DE LA FUNCION:', MAXFCN
STOP
110  FORMAT (//, ' ', A, I4)
120  FORMAT (1X, 5F16.8)
END
```

```
SUBROUTINE FCN (N, X, F)
```

```
INTEGER  N
```

```
REAL    X(*), F
```

```
F=4500*X(1)+4500*X(2)+4900*X(3)+6000*X(4)+15000*X(5)+15000*X(6)+20000*X(7)
    +45000*X(8)+190000*X(9)+190000*X(10)+200000*X(11)+237500*X(12)
```

```
RETURN
```

```
END
```