

Air emissions inventory of the public transport in maracaibo municipality. Part I: Passenger car

Anali Machado^{1*}, Neyma García¹, José Huertas², César García¹,
Ninoska Ferrer¹, Roselyn León¹ y María Verónica Machado³

¹Centro CEDEGAS, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado Postal 526 Maracaibo 4001-A, Venezuela. *E-mail: amachado@luz.ve. ²Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia. ³Instituto de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD), LUZ.

Abstract

The first phase of mobile source emission inventory based on the 2001 census (specifically, passenger car) for the Maracaibo Municipality, is presented in this work. The estimation was carried out using the methodology developed by the U.S. Environmental Protection Agency. The following gases were included in the inventory: carbon monoxide (CO), total hydrocarbons (HC) and nitrogen oxides (NOx). It was verified using the inventory, that the main pollution emitted to the atmosphere was the CO (5307,88 ton/year) representing the 86,42%, followed by the HC (6,96%) and NOx (6,62%). In Addition, Maracaibo downtown was the most important area that contributed to the pollution in the municipality (94,37%). This study is a tool to develop a calculus method to evaluate the remaining categories of the public transport, and also for the private sector; provides a methodology for the emission inventory generated by this source, more accurate than the applies in Venezuela and shows the first results to determine the contribution of these gases in the urban environmental pollution and the Heat Island effect.

Key word: Emission factors, mobile sources, air emission inventory.

Inventario de emisiones del transporte público en el municipio Maracaibo. Parte I: Vehículos de pasajeros de cinco puestos

Resumen

En este trabajo se presenta la primera fase del Inventario de Emisiones de fuentes móviles, basado en el transporte público Censo 2001 (específicamente, la categoría de unidades de automóviles colectivos), para el municipio Maracaibo. Los gases incluidos en el inventario fueron: CO, HC y NOx. La estimación se realizó mediante el uso de los Factores de Emisión promulgados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (AP42-95) como método de evaluación rápida de las fuentes. Por medio del inventario elaborado se pudo constatar que el CO es el principal contaminante emitido a la atmósfera por parte de los vehículos automotores con 5307,88 ton/año, lo que representa un 86,42% de las emisiones totales, seguido por el HC (6,96%) y el NOx (6,62%). Igualmente, que dentro de los sectores estudiados el centro de Maracaibo es el que aporta mayor cantidad de poluentes (94,37%). Es importante enfatizar que este estudio presenta un método para evaluar las restantes categorías del transporte público, así como las del sector privado proporciona una metodología para realizar un inventario de emisiones generadas por esta fuente más real que la aplicada en Venezuela hasta los momentos y muestra los primeros resultados para determinar la contribución de los gases en la contaminación del ambiente urbano y en el efecto Isla Caliente.

Palabras clave: Factores de emisión, fuentes móviles, inventario de emisiones.

Introducción

La evaluación de los niveles de contaminación del aire, asociados a la presencia de gases tóxicos, ha despertado gran interés durante los últimos años, debido a los efectos indeseables que estos generan en los seres vivos y materiales, y a su incidencia sobre la atmósfera, en la cual producen alteraciones tales como: reducción de visibilidad, precipitación y formación de neblina, reducción de la radiación solar, alteración de las temperaturas y de la distribución de los vientos.

Anualmente son vertidas a la atmósfera a nivel mundial una gran cantidad de sustancias tóxicas, entre ellas 700 millones de toneladas de monóxido de carbono, 150 millones de toneladas de óxidos de nitrógeno y 200 millones de toneladas de partículas sólidas e hidrocarburos [1]. La contaminación atmosférica afecta a millones de personas de todo el mundo, especialmente a aquellas que viven en los grandes núcleos urbanos y en áreas fuertemente industrializadas, con denso tráfico de vehículos. Aproximadamente un 60% de la contaminación atmosférica es producida por los vehículos automotores, los cuales representan la mayor fuente individual de emisiones poluentes y por consiguiente su grado de contribución a la contaminación atmosférica se considera relevante [2, 3].

Existen algunas recomendaciones para megaciudades de países en desarrollo [4, 5, 6, 7], que intentan resolver los problemas de contaminación atmosférica, especialmente aquellos derivados del tránsito. No obstante, un requerimiento previo para la introducción de medidas o instrumentos de control y abatimiento es el levantamiento de un detallado inventario de emisiones que cubra la zona afectada, con alto nivel de desagregación espacial y temporal.

En Venezuela, el Decreto No. 2673, capítulo I de las Normas sobre Emisiones de Fuentes Móviles vigente [8], establece regulaciones para las emisiones de gases de hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, para los vehículos del año modelo 2000 y en el capítulo III para las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos para todo el parque automotor.

Considerando que en el municipio Maracaibo, existe un importante parque automotor y que el transporte público es el que se encuentra en un es-

tado de mayor desgaste [9], resulta de sumo interés realizar un inventario de emisiones que permita diagnosticar la contribución del transporte público (específicamente carros por puestos) sobre los niveles de contaminantes tóxicos presentes en el aire. El presente estudio permite estimar la cantidad emitida a la atmósfera anualmente de NO_x, HC y CO; gases que han sido señalados como precursores para la formación de óxidos fotoquímicos en el ambiente y contribuyentes tanto en el efecto Invernadero como en el Isla Caliente [10].

La estimación de la cantidad de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes móviles en zonas urbanas requiere de información detallada que describa la actividad del tráfico en el área de estudio. Esta información puede provenir de mediciones directas, encuestas de tráfico, o modelos de transporte para una red vial predeterminada [11, 12] y un adecuado manejo de dicha información permite calcular las emisiones asociadas a la actividad del sector transporte para las distintas categorías vehiculares consideradas [13, 14, 15].

De esta manera, el presente trabajo tiene como objetivo establecer un procedimiento lógico, basado en la información existente o con posibilidades de ser adquirida, para la aplicación de la metodología de estimación por factores de emisión propuesta por la USEPA (AP-42) [16], que permita la elaboración de un inventario de las emisiones reguladas producidas por fuentes móviles, en principio para el transporte público en el municipio Maracaibo, y que pueda ser aplicable al sector privado, en otros municipios y estados. El propósito mencionado permitirá establecer el orden de magnitud con el cual contribuyen cada uno de los gases emitidos por dichas fuentes en la contaminación ambiental, lo cual permitirá establecer futuras estrategias de control para la reducción de la contaminación del aire por este tipo de fuentes por parte de los entes responsables. Es importante puntualizar que los factores de emisión son un promedio estadístico de la tasa a la cual un poluente cualquiera es descargado a la atmósfera como resultado de un proceso, considerando diferentes indicadores; así, en algunos casos se relacionará la cantidad de poluentes emitidos con la capacidad de producción, mientras que en otros casos podrían seleccionarse los kilómetros recorridos por un automóvil. Este último es el empleado en el presente trabajo.

Marco metodológico

La metodología empleada utiliza los Factores de Emisión de la AP-42, año 1995, Volumen II, Sección I, recopilados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S.E.P.A), específicamente los mostrados en el apéndice H, como método de evaluación rápida de las fuentes (EPA, 2000) [16]. Los factores de emisión en base a los kilómetros recorridos, recopilados por la USEPA se obtuvieron aplicando la serie de los modelos "MOBILE". Estos modelos permiten la estimación de los gases descargados a la atmósfera por las fuentes móviles mediante factores de emisión obtenidos considerando ecuaciones de la tasa de emisión con métodos de análisis que caracterizan el comportamiento del vehículo de acuerdo a diferentes condiciones tales como: deterioro, impacto de las gasolinas oxigenadas, factores de corrección por velocidad, etc. En el presente trabajo se consideran únicamente vehículos livianos del transporte público, específicamente unidades de carros por puesto que circulan a través del municipio Maracaibo en virtud de que sólo de esta categoría se conoce suficiente información, para la realización de las estimaciones, ya que en Venezuela no existe un registro nacional del parque automotor actualizado y confiable [3, 17].

Para la obtención de los factores de emisión y el posterior cálculo de las emisiones en el municipio Maracaibo fue necesario conocer las características del parque automotor local de transporte público estudiado, tales como: modelo del vehículo (año de fabricación), tipo de control de emisiones (si existe), longitud de las diferentes rutas existentes en el municipio, número de rotaciones diarias del vehículo y tipo de combustible empleado. La información referente al número de unidades y modelo del vehículo, se obtuvo a partir del Censo 2001 realizado por el Instituto Municipal de Transporte Colectivo Urbano de pasajeros del Municipio Maracaibo [9], por informaciones obtenidas de la Gerencia de Planificación y mediante datos proporcionados por la Coordinación de Transporte de la Alcaldía de San Francisco. Las características restantes fueron obtenidas del Instituto de Investigación de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD) de La Universidad del Zulia [18], y de la información ya exis-

tente en el IMTCUMA. En el caso de rutas para las cuales no se disponía del número de rotaciones, fue considerado el valor promedio estimado por el IMTCUMA de 13. El número total de unidades de carros por puesto inventariados fue de 3720, distribuidas en 47 rutas, con longitudes que oscilan entre 3,8 y 26,6 km y un número de rotaciones que oscila entre 4,1 y 15.

Inicialmente se procedió a organizar los datos suministrados por el IMTCUMA en el Censo 2001, agrupándolos en primer lugar por categorías (carros por puesto) y luego por modelo del vehículo.

Organizados todos los datos requeridos para la determinación de las emisiones, se procedió a calcular el Recorrido Diario por Unidad y el Recorrido Promedio por Modelo, para saber las millas o kilómetros recorridos por los vehículos pertenecientes a una ruta específica y a un modelo de vehículo, respectivamente. De esta manera se obtuvo para cada modelo la longitud recorrida diariamente por todos los vehículos de acuerdo a la ruta transitada.

Recorrido diario por unidad (RDU)

El recorrido diario por unidad, para una ruta determinada es igual al producto de la longitud de la ruta por el número de rotaciones promedio que realizan los vehículos de cada ruta.

Recorrido diario promedio (RDP)

El RDP determina el espacio promedio recorrido en un día por los diferentes vehículos de un mismo modelo y ruta, que por lo general pertenecen a diferentes rutas.

$$\text{RDP (por día, modelo y ruta)} = (1 / (\text{No. de rutas en ese año})) \times \sum (\text{RDU})_{\text{modelo}} \quad (1)$$

Cálculo de los factores de emisión

El cálculo de los factores de emisión se realiza aplicando una de las ecuaciones desarrolladas por la EPA expuestas a continuación:

$$\text{BER} = \text{ZML} + (\text{DR1} \times M) \text{ si } M \leq 5 \quad (2)$$

y

$$\text{BER} = \text{ZML} + \text{DR1} \times 50 + \text{DR2} \times (M - 50) \quad (M > 5) \quad (3)$$

donde:

- BER: Emisiones del escape en g/milla.
 ZML: Nivel de emisión para vehículos con cero millas, en g/milla.
 DR1: Tasa de deterioro del vehículo por recorrido ≤ 50 kmillas, en g/milla/10 kmillas.
 DR2: Rata de deterioro del vehículo por recorrido >50 kmillas, en g/milla/10 kmillas.
 M: Millaje acumulado/10000 millas.

Los valores de ZML, DR1 y DR2 que se toman de la Tabla 1.1A.1 del apéndice H antes mencionado, dependen del tipo de poluyente considerado y del modelo del vehículo o período que agrupa a varios modelos. El valor del recorrido anual en 10 kmillas de todos los vehículos de ese modelo (M), se determina con la siguiente ecuación:

$$M = \sum RDP (\text{por modelo}) \times 330 \text{ días/1 año} \times 1/10000 \text{ millas} \quad (4)$$

donde se considera un año de 330 días.

La determinación de las emisiones, requirió del cálculo de un recorrido por período (Mperíodo) ya que los factores están agrupados de esta forma, empleándose la siguiente ecuación:

$$M_{\text{período}} = \left(\sum M / NAP \right) \quad (5)$$

donde:

NAP = número de modelos en ese período.

Una vez determinado el M (por período o por año, según sea el caso), se comparó con los valores de M propuestos por la metodología y, dependiendo del resultado, se seleccionó la ecuación adecuada correspondiente (ecuación 2 ó 3) para calcular el BER.

Cabe destacar que para la estimación de las emisiones se consideró que un viaje realizado por un vehículo de transporte público representa un recorrido en el ciclo urbano, conocido como el FTP-75.

Estimación de las emisiones

Para el cálculo de las emisiones generadas (ton/año), por la categoría estudiada en el municipio Maracaibo, se hizo uso de los factores de emisión obtenidos de acuerdo a la metodología explicada en la etapa anterior, en g/milla recorrida.

El procedimiento de cálculo consistió en multiplicar el factor de emisión por las millas promedio anuales recorridas por los vehículos; así, la ecuación empleada para la obtención de las emisiones de cada compuesto en ton/año, para un modelo resultó ser:

$$E(i) = [FE(j) (\text{g/milla}) \times RDP (\text{millas/día}) \times NV] \times 330 \text{ días/1 año} \times 1 \text{ ton}/907184,74 \text{ g} \quad (6)$$

donde:

- E(i)= Emisiones del compuesto i por año o período, por ruta.
 FE(j)= Factores de emisión obtenidos por año de vehículo o período de estudio.
 RDP= Recorrido diario promedio por modelo o período de vehículo.
 NV= Número de vehículos por año o período.

Finalmente, para obtener el total de las emisiones de poluyente determinado se realizó la sumatoria de los E(i) obtenidos para cada modelo o período.

Adicionalmente se calcularon las emisiones en un importante sector de gran afluencia vehicular, el casco central, por el cual transitan casi todas las rutas del transporte público; asimismo, se determinó el porcentaje que aporta el centro de Maracaibo sobre el total de emisiones calculadas para todo el municipio.

Resultados y Discusión

En general del estudio realizado al parque automotor de transporte público en el municipio Maracaibo, puede observarse que las edades de la flota vehicular para el municipio abarcan un amplio rango muy amplio de 50 años (1950-2000), evidenciándose que la mayor parte de los vehículos (81,37%) corresponde a los modelos (1970-1979), siendo los modelos 1975, 1976 y 1977 los que presentan mayor cantidad de vehículos.

Los factores de emisión en g/milla obtenidos para cada uno de los contaminantes bajo estudio en el municipio Maracaibo, más bajos fueron los estimados para los modelos 1998 en adelante, mientras que, los mayores factores de emisión reportados fueron encontrados para modelos automotores pertenecientes al período Pre-1968, pero en todos los casos se observa una tendencia decreciente en los mismos. Asimismo,

en los factores obtenidos para los modelos 1975 al 1979 y 1981 al 1988, se evidencian dos reducciones importantes, hecho asociado a la introducción del convertidor catalítico en los Estados Unidos (el cual fue realizado en dos etapas), tomando en cuenta que los vehículos en los cuales se basa el método de la USEPA son americanos.

En las Figuras 1, 2 y 3 se sintetiza la producción de cada uno de los contaminantes emitidos considerados; en dichas figuras las barras indican las emisiones y las líneas el número de vehículos inventariados en cada año. En general, la totalidad de las emisiones exhiben una relación directamente proporcional con el número de vehículos circulantes.

Los resultados obtenidos indican que el CO fue el contaminante emitido en mayor cantidad, lo cual refleja que el CO es el principal contribuyente en las emisiones de fuentes móviles bajo estudio, siendo este comportamiento un factor común que debe estar asociado intrínsecamente al proceso de combustión.

En la distribución porcentual de las emisiones del inventario global del municipio Maracaibo, las emisiones de CO correspondieron a un porcentaje de 86,44%, seguido por un 6,96% para el HC y 6,62% para el NOx. Es importante destacar que aunque el CO representa el poluyente mayormente emitido por las fuentes móviles, el NOx es considerado 10 veces más peligroso para el organismo humano y aunque sus concentraciones se encuentran muy por debajo de los límites conside-

rados críticos, su principal efecto puede ser relacionado con la contribución del mismo en la formación de smog fotoquímico y lluvia ácida, entre otros. Igualmente los HC y específicamente los compuestos orgánicos volátiles generan un impacto sobre el sistema ambiental global, contribuyendo a la disminución de la capa de ozono en la estratosfera y a la formación de ozono fotoquímico en la troposfera y produciendo efectos tóxicos y carcinógenos y persistencia en el ambiente de compuestos poluentes recalcitrantes [19].

Se puede apreciar en la Tabla 1, que las emisiones correspondientes al centro de Maracaibo, son ligeramente inferiores a la totalidad emitida en el municipio, representando un 94,37% aproximadamente sobre el total de emisiones del municipio, la gran magnitud del aporte es debido a que es allí donde confluyen la mayoría de las rutas. Por consiguiente, es importante realizar esfuerzos por mejorar el flujo vehicular en esta zona tan concurrida, disminuyendo el congestionamiento a horas pico, evitándose así las altas concentraciones de estos compuestos.

Aunado a esta circunstancia, es importante señalar que además de las rutas que circulan por el centro de Maracaibo, existen otras rutas que a pesar de que no pertenecen al municipio Maracaibo transitan por el centro, como es el caso de las rutas del municipio San Francisco que contribuyen con las emisiones ya existentes en el sector.

Sobre la base de que en el municipio Maracaibo se genera una importante cantidad de con-

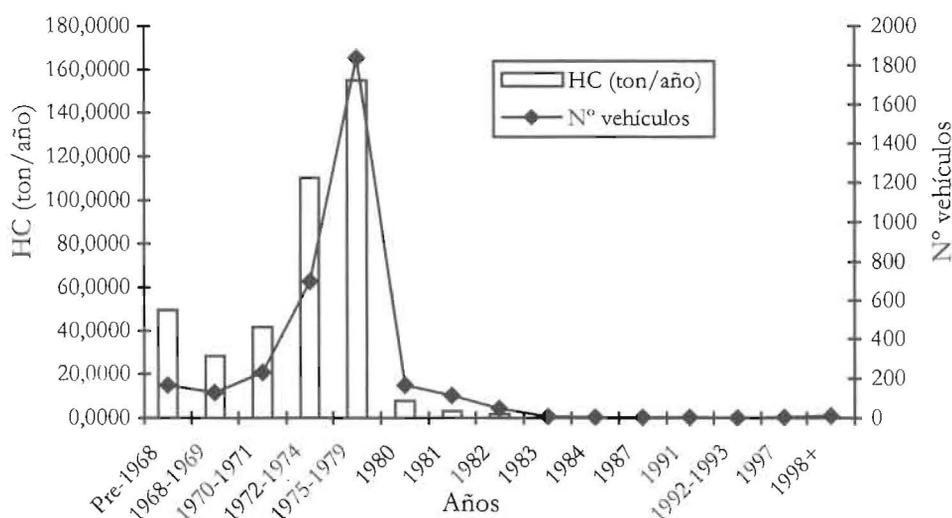


Figura 1. Ton/año de HC, emitidas en el municipio Maracaibo.

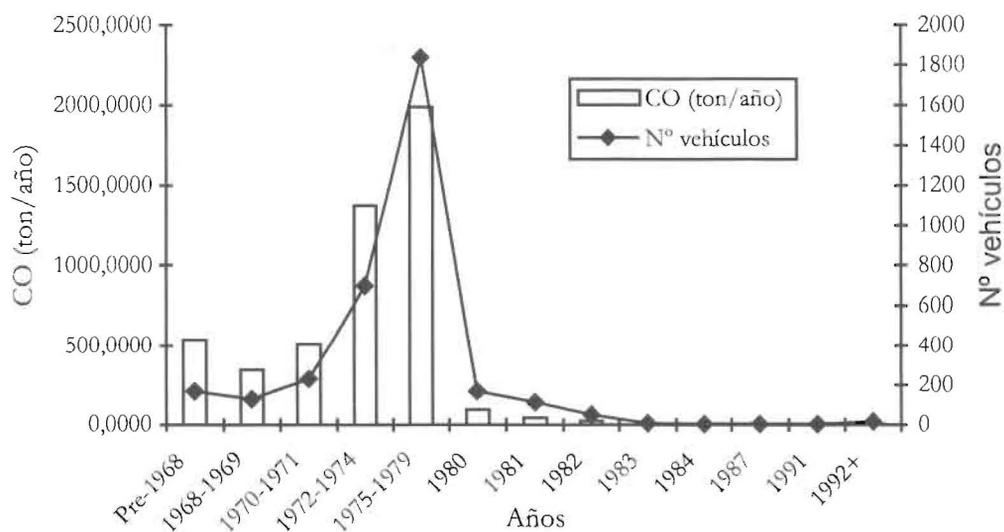


Figura 2. Ton/año de CO, emitidas en el municipio Maracaibo.

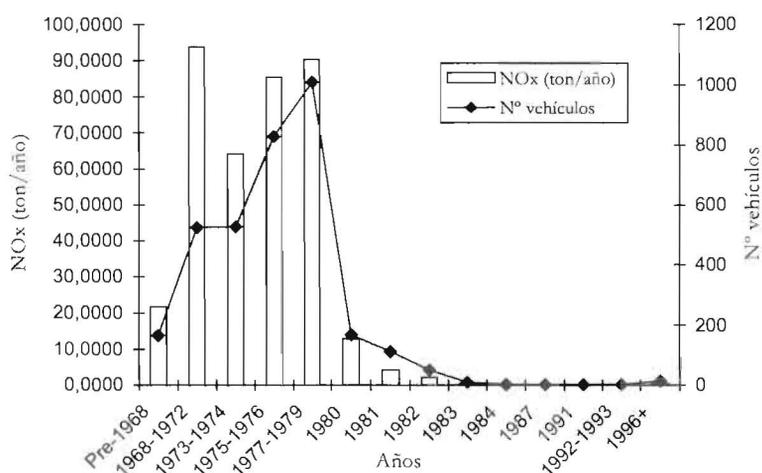


Figura 3. Ton/año de NOx, emitidas en el municipio Maracaibo.

Tabla 1
Emisiones generadas en el municipio y en el casco central

Contaminante	Municipio Maracaibo	Centro de Maracaibo
HC (ton/año)	397,67	386,99
CO (ton/año)	4933,80	4752,21
NOx (ton/año)	375,76	351,77

taminantes, cualquier esfuerzo destinado a obtener un mayor conocimiento sobre la cantidad de poluentes emitidos por todo el parque automotor del municipio, abarcando el sector público y pri-

vado, puede mejorar considerablemente el grado de confiabilidad de los cálculos de las emisiones de éstos gases, siempre y cuando se consideren las características propias del parque automotor.

Conclusiones

En el inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles realizado, se obtiene un estimado de la masa total de contaminantes que son descargados a la atmósfera del municipio Maracaibo: 5707,2636 ton/año de CO, HC y NOx, representando cada uno de ellos: 6,96%, 86,44% y 6,62% respectivamente del total.

Dentro de los sectores estudiados, el que aporta mayor cantidad de contaminantes es el

centro de Maracaibo (94,37% sobre el total de las emisiones del municipio), ya que es en ésta área donde se ubican la mayoría de las paradas de las rutas en el municipio.

El transporte público, específicamente las unidades de carros por puestos del municipio Maracaibo, poseen una edad mayor de 25 años aún cuando la edad productiva para vehículos con este tipo de uso es de 10 años, y el mantenimiento de dichas unidades es bajo y en algunos casos nulo, lo que permite inferir que las emisiones reales descargadas a la atmósfera deben ser superiores a las estimadas por la metodología empleada. Sin embargo, representan una primera estimación.

Agradecimiento

Al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) por el soporte económico a este proyecto.

Al Ing. Eudo Portillo y la Arq. Marilin Méndez, pertenecientes al Instituto Municipal de Transporte Colectivo Urbano de los pasajeros del Municipio Maracaibo (IMTCUMA) y a la Arq. María Machado del Instituto de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD) de la Universidad del Zulia por su valiosa colaboración y receptividad al suministrar gran parte de la información requerida referente a las rutas y el parque automotor.

Referencias Bibliográficas

1. Patrakhaltsev, J., Gorbunov, V. *Toxicidad de los motores de combustión interna* 2da. Edición, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica-UNAS, Arequipa-Perú pp. 203. 1994.
2. Lapuerta, M., Hernández, J. *Tecnologías de la combustión*. 1era edición, Universidad de Castilla, La Mancha, Cuenca, España, pp. 382. 1998.
3. Mayer, H. *Air Pollution in cities*. Atmospheric Environment. 33: 4029-4037. 1999.
4. Mage, D., Ozolins, G., Perterson, P., Webster, A., Orthofer, R., Vandeweerd, V., Gwynne, M. Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment* 30 (5), 681-686. 1996.
5. Fu, L., Hao, J., He, K. Assessment of vehicular pollution in China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(5), 658-668. 2001.
6. Plaut, F.O. The comparison and ranking of policies for abating mobile-source emissions. *Transportation Research*, 4D (3), 193-205. 1998.
7. Wash, M.P. Revisión de las medidas de control de las emisiones y su efectividad. Contaminación atmosférica por vehículos automotrices, pp. 111-134. WHO/PEP/92.4. 1992.
8. Gaceta Oficial de la República de Venezuela *Normas sobre Emisiones de Fuentes Móviles*. No 36532 Decreto No. 2673 Caracas, Venezuela. 1998.
9. IMTCUMA Censo de Unidades de Transporte Público. 2001
10. Staehelin, J., Sèller, C., Stahel, W., Schlapfer, K., Wunderli S. Emission factors from road traffic from a tunnel study (Gubrist tunnel, Switzerland). Part III: results of organic compounds, SO₂ and speciation of organic exhaust emission. *Atmospheric Environment*. 32: 999-1009. 1998.
11. Reynolds, A.W., Broderick, B.M. Development of an emission inventory model for mobile sources. *Transportation Research*, 5D (2), 77-101. 2000.
12. Cardelino, C. Daily variability of motor vehicle emissions derived from traffic counter data. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48(7), 637-645. 1998.
13. Tong, H.Y., Hung, W.T., Cheung, C.S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(4), 543-554. 2000.
14. Corvalán, R., Urrutia, C. Emission factors for gasoline light-duty vehicles: experimental program in Santiago, Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(12), 2102-2111. 2000.
15. Winther, M. Petrol passenger car emissions calculated with different emission models. *Science of the Total Environment*, 224 (1-3), 149-160. 1998.
16. EPA AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Mobile Sources. Quinta

- Edición. Volumen II. Apéndices H, J y K. 2000.
17. Machado A. Desarrollo de Factores de Emisión para la Estimación de Emisiones generadas por el Parque Automotor. Trabajo de Ascenso en la Facultad de Ingeniería de La Universidad del Zulia. 2002.
 18. IFAD. Estudio de Transporte Público Urbano de Maracaibo, a través de Encuesta de Ocupación Visual. La Universidad del Zulia. 1996.
 19. Dewulf J., Van Langenhause H. Anthropogenic volatile organic compounds in ambient air and natural waters: a review on recent developments of analytical methodology, performance and interpretation of field measurements. *Journal of Chromatography A*, 843. 163-177. 1999.

Recibido el 13 de Octubre de 2003

En forma revisada el 13 de Septiembre de 2004