

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES EN EL ÁREA URBANA DE ENVIGADO, COLOMBIA

JAMES LONDOÑO*
MAURICIO ANDRÉS CORREA**
CARLOS ALBERTO PALACIO***

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta los resultados de la estimación de contaminantes atmosféricos (CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ y COV) provenientes de fuentes móviles en la zona urbana del municipio de Envigado para el año 2010. Se utilizó información de vehículos matriculados en el municipio, aforos, distribución y actividad vehiculares. Las emisiones fueron estimadas mediante los factores establecidos en el método IVE que mejor se ajustaron a los patrones de movilidad, características del parque automotor y tipo de combustibles presentes en la zona de estudio. Como resultado, fue posible estimar las emisiones horarias y diarias de los contaminantes analizados, y con la ayuda de un sistema SIG, se representaron gráficamente. A partir de los resultados, se evidenció que las mayores emisiones se presentaron sobre las vías con mayor tránsito vehicular (Carrera 50 o Avenida Regional, carrera 48 o Avenida Las Vegas, carrera 43A o Avenida El Poblado y vía paralela a la quebrada La Ayurá); el mayor aporte lo hace el monóxido de carbono (CO) con 18,4 t d⁻¹ (71,3 %), la hora del día con mayor emisión de este contaminante es las 12:00 horas con 1,4 t h⁻¹ (7,4 %) y la categoría vehicular que más aporta a los niveles ambientales con este contaminante es Autos con 8,3 ton d⁻¹ (32,7 %).

PALABRAS CLAVE: factor de emisión; fuentes móviles; contaminantes atmosféricos; modelo IVE.

* Ingeniero Sanitario y Magíster en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Docente de cátedra, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería e integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. jameslondono@gmail.com

** Ingeniero Sanitario y Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia. Docente, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería e integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. mcorrea@udea.edu.co

*** Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Doctor en Ingeniería, Área de Aprovechamiento en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Decano Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–. Medellín, Colombia. cpalacio@udea.edu.co

ESTIMATION OF THE EMISSIONS OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS FROM MOBILE SOURCES IN THE URBAN AREA OF ENVIGADO, COLOMBIA

ABSTRACT

This research presents the results of estimates of air pollutants (CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ and VOC) from mobile sources in the urban area of the municipality of Envigado for 2010. We use information on vehicles registered in the municipality, capacity, vehicular distribution and activity for categories. The emissions were estimated by the factors in the IVE method with best fit to the mobility patterns, vehicular fleet characteristics and type of combustibles in the area under study. As a result, it was possible to estimate hourly and daily emissions of the pollutants studied, and with the help of a GIS system, were plotted. From the results, we found that the largest releases occurred on roads with higher vehicle traffic (Carrera 50 or Avenue Regional, Carrera 48 or Avenue Las Vegas, Carrera 43A or Avenue El Poblado and road parallel to the stream La Ayurá), where the largest contribution does carbon monoxide (CO) with 18,4 t d⁻¹ (71,3 %), time of day which showed the highest emission of this pollutant is at 12:00 hours with 1,4 t h⁻¹ (7,4 %) and the vehicle category that most contributes to environmental levels are Automobile with 8 t d⁻¹ (32,7 %).

KEYWORDS: emission factor; mobile sources; atmospheric pollutants; IVE model.

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PROVENIENTES DE FONTES MÓVEIS NA ÁREA URBANA DE ENVIGADO, COLÔMBIA

RESUMO

Este trabalho de pesquisa apresenta os resultados da estimativa de contaminantes atmosféricos (CO, NO_x, SO₂, PM10 e COV) provenientes de fontes móveis na zona urbana do município de Envigado para o ano 2010. Utilizou-se informação de veículos matriculados no município, contagens de tráfego, distribuição e atividade veicular. As emissões foram estimadas mediante os fatores estabelecidos no método IVE que melhor se ajustaram aos padrões de mobilidade, características do parque automotor e tipo de combustíveis presentes na zona de estudo. Como resultado, foi possível estimar as emissões horárias e diárias dos contaminantes analisados, e com a ajuda de um sistema SIG, se representaram graficamente. A partir dos resultados, evidenciou-se que as maiores emissões se apresentaram sobre as vias com maior trânsito veicular (Carrera 50 ou Avenida Regional, Carrera 48 ou Avenida Las Vegas, Carrera 43A ou Avenida El Poblado e via paralela a riacho Ayurá); a maior contribuição é feita pelo monóxido de carbono (CO) com 18,4 t d⁻¹ (71,3 %), a hora do dia com maior emissão deste contaminante é as 12:00 horas com 1,4 t h⁻¹ (7,4 %) e a categoria veicular que mais contribui aos níveis ambientais com este contaminante é Autos com 8,3 t d⁻¹ (32,7 %).

PALAVRAS-CÓDIGO: fator de emissão; fontes móveis; contaminantes atmosféricos; modelo IVE.



1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la problemática de la contaminación del aire ha sido de primordial interés, en el nivel local, regional y global, desde el punto de vista ambiental y de la salud humana. La presencia de partículas, monóxido de carbono, oxidantes fotoquímicos y óxidos de azufre y nitrógeno en áreas urbanas se ha señalado como la responsable de tal problemática. De acuerdo con los reportes presentados por la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire –Redaire– (red establecida mediante convenio interinstitucional para el estudio de la calidad del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá), esta situación no le es ajena al Valle de Aburrá, y el panorama no es nada alentador, debido a que en algunos puntos se están presentando eventos de calidad del aire que sobrepasan los niveles máximos permisibles, de acuerdo con la normativa nacional vigente. En aquellos puntos donde no se ha sobrepasado la norma, la tendencia es al deterioro de la calidad del aire, según el Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA– (2006).

La valoración de las emisiones atmosféricas constituye un elemento imprescindible previo al establecimiento de políticas y acciones de control de la calidad del aire. Esta información, tal como lo establece Van Aardenne (2002), se obtiene por medio del denominado inventario de emisiones atmosféricas, el cual se define como la recopilación de números que representan las cantidades de uno o más contaminantes emitidos a la atmósfera a causa de las actividades de tipo antrópicas o naturales dentro de una zona determinada y en un período determinado.

El municipio de Envigado, con una extensión de 78,8 km² (85 % área rural y 15 % área urbana) y una población, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE– (2008), de 187.121 habitantes (95 % en la zona urbana y 5 % en la zona rural), limita con los municipios de Rionegro, El Retiro, Itagüí, Sabaneta, Caldas y Medellín. De la superficie total que corresponde al AMVA (1.152

km²), Envigado ocupa el séptimo lugar con el 4,3 % entre los diez municipios que la conforman.

Envigado cuenta con una infraestructura vial que le permite tener una adecuada comunicación no sólo con su área rural, sino también con los municipios aledaños. Partiendo de Medellín, el acceso a la zona es posible por la Avenida El Poblado (Carrera 43A) o la Avenida Las Vegas (Carrera 48); también es posible el ingreso al municipio por la Autopista Sur (carretera Troncal de Occidente), que además comunica a Envigado con el sur del país. Otras vías de acceso desde el municipio de Medellín son las transversales (Carrera 27) que se conectan con la Vía Las Palmas. Estas vías se han convertido en sistemas de conexión y tránsito obligado para una gran cantidad de vehículos de todo tipo que se movilizan no sólo en el ámbito local, sino también para aquellos que se desplazan entre los diferentes municipios que integran el AMVA, como lo menciona Zuluaga (2010).

La calidad del aire en el municipio de Envigado ha sido medida desde el año 2006 en una estación automática ubicada en la empresa Sofasa a los 6° 10' 18,12" N y 75° 35' 44,16" O, y a una altura de 1.537 msnm. La información arrojada por esta estación en los últimos años ha mostrado que la tendencia del PM₁₀ presenta un marcado decrecimiento en la concentración promedio anual, pasando de 71,4 µg/m³ en 2006 a 46,2 µg/m³ en 2009; mientras que para los NO_x y O₃ el decrecimiento ha sido leve.

En este trabajo se propone una metodología detallada para realizar la estimación de las emisiones producidas por el tráfico vehicular en ciudades intermedias, como es el caso de Envigado, y hace parte de un proyecto que incluye la estimación de las emisiones y la modelación de la dispersión de contaminantes provenientes de fuentes móviles. Esta metodología integra el cálculo de las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles (CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ y COV) a partir de la distribución del parque automotor (automóviles, camiones, taxis, buses y motocicletas), el

flujo vehicular y los factores de emisión que emplea el modelo IVE (International Vehicle Emissions).

2. METODOLOGÍA

La metodología que a continuación se describe explica cada paso para la estimación de las emisiones vehiculares de Envigado. Es una metodología sencilla y posiblemente aplicable en áreas urbanas similares a este municipio.

2.1 Área de estudio y resolución espacial

Se construyó una malla con 420 celdas de $0,0625 \text{ km}^2$ ($0,25 \times 0,25 \text{ km}$), la cual comprende un área de 25 km^2 ($5 \times 5 \text{ km}$) e incluye la totalidad de la zona urbana del municipio de Envigado, estableciendo así la resolución espacial.

Las celdas fueron numeradas secuencialmente comenzando desde la esquina inferior izquierda con coordenada geográfica UTM (huso horario zona

18 N) X: 432,6797 km y Y: 679,2706 km, creciendo en numeración hacia arriba y hacia la derecha hasta terminar en la esquina superior derecha con coordenada X: 437,6676 km y Y: 684,5253 km, como se presenta en la figura 1.

2.2 Información base

En esta actividad se recopiló información primaria y secundaria. La primaria consistió ante todo en los aforos y actividad vehiculares de las principales categorías del parque automotor en el área urbana. Respecto a la secundaria, se usó la suministrada por las Secretarías del Medio Ambiente y de Tránsito y Transporte del Municipio, información sobre vehículos matriculados en Envigado y mediciones de flujo vehicular. Otras fuentes consultadas fueron la Oficina Asesora de Planeación Municipal, donde se recopilaron datos sobre la malla vial, tipos y características de las vías (ancho de la calzada), y la página web del Ministerio de Transporte (Mintransporte, 2010), donde se obtuvieron datos

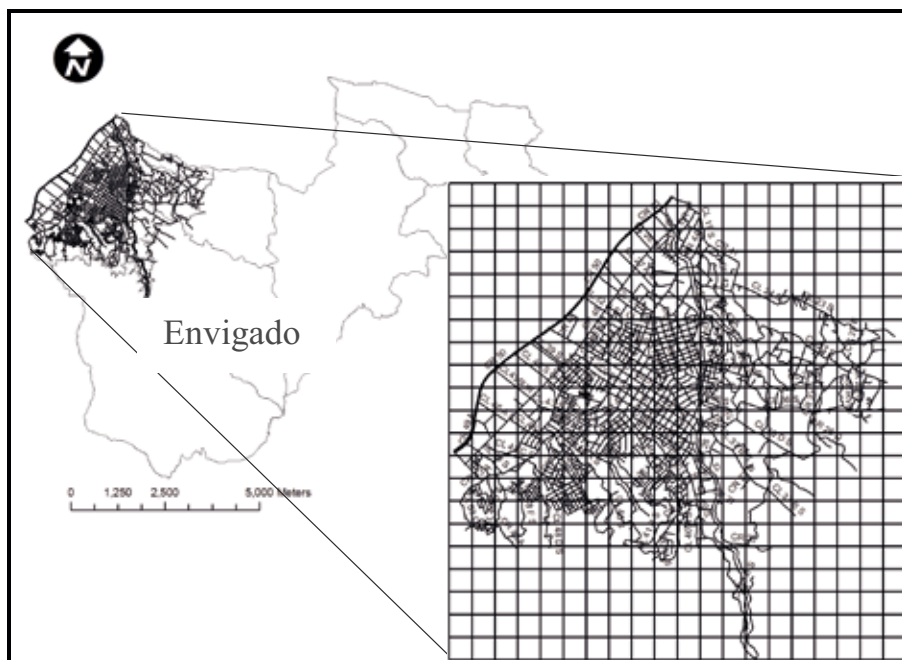


Figura 1. Dominio espacial de la zona objeto de estudio



referentes a la distribución vehicular por tipo de vehículo, edad y modelo.

La distribución vehicular (clase) suministrada por la Secretaría de Tránsito y Transporte del Municipio se presenta en la tabla 1, la cual fue necesario agrupar en cinco categorías de acuerdo con el peso y tipo de uso, como lo establece el AMVA (2006): autos, camiones, taxis, buses y motos. En esta clasificación los vehículos livianos o autos corresponden a los que tiene un peso bruto menor de 3,5 toneladas, sin incluir los vehículos livianos de transporte de pasajeros o taxis. Las motos, seguida de los automóviles, se reportan como las categorías vehiculares más significativas dentro del parque automotor que circula en el municipio de Envigado.

A partir de la información vial suministrada por la Oficina de Planeación del Municipio fue posible hacer una discretización de la malla vial. Se generaron dos grupos importantes de vías (ver figura 2), a saber:

- *Principales.* Arteria mayor, colectoras mayor y vías de importante flujo vehicular, como lo son la Avenida Regional, la Avenida Las Vegas, la Avenida El Poblado, vías de ingreso y salida a la zona centro, la vía paralela a la quebrada La Ayurá, la Loma del Escobero, calle 21 Sur (sector conocido como La Frontera) y la carrera 42 entre Zona Centro y el barrio La Paz.
- *Secundarias.* Arteria menor, colectoras menor, servicio y, en general, el resto de vías internas del municipio.

2.3 Intensidad vehicular

Para determinar la intensidad vehicular se analizaron los aforos vehiculares del trabajo “Elaboración del mapa de ruido para la zona centro del municipio de Envigado”, realizado en el 2007 por el Grupo GIGA de la Universidad de Antioquia (GIGA, 2007), donde se obtuvo información en 24 puntos diferentes durante 24 horas de un día laboral típico.

Tabla 1. Agrupación del parque automotor por categorías vehiculares

Categoría	Clase	Total	% Categoría
Vehículos livianos (Autos)	Automóvil	86.399	44,9
	Camioneta	15.896	
	Campero	18.592	
Vehículos pesados (Camiones)	Camión	4.840	2,3
	Camión doble troque	37	
	Tractocamión	662	
	Tractocamión remolque	6	
	Volqueta	675	
	Volqueta doble troque	58	
Taxis	Automóvil	3.524	1,3
Buses	Bus	618	0,7
	Buseta	261	
	Microbús	953	
	Minibús	17	
Motos	Motocicleta	133.960	50,7
	Motoneta	688	
	Cuatrimoto	1.756	

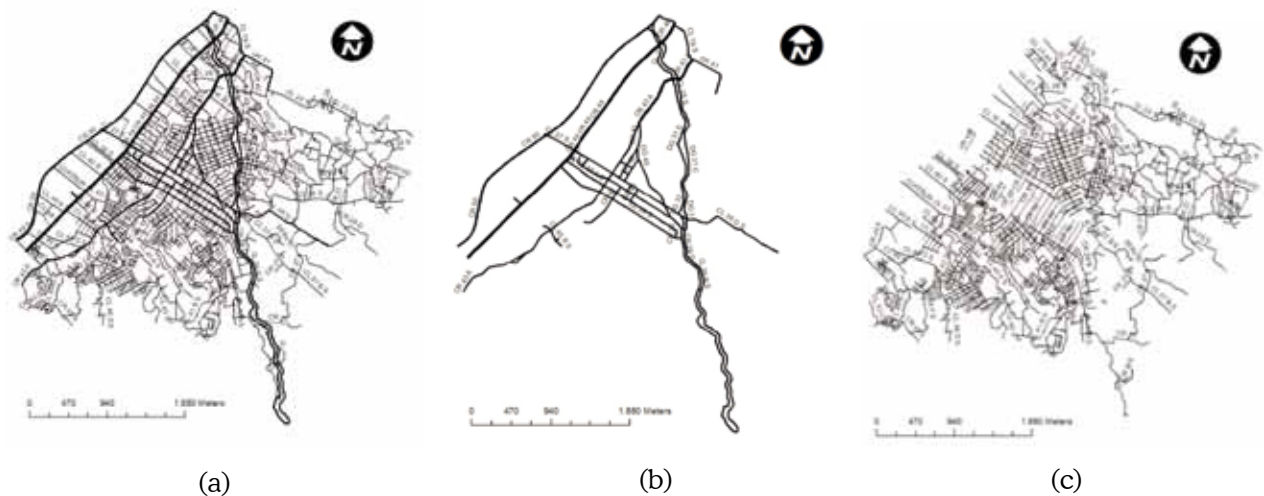


Figura 2. a) Red vial zona urbana; b) Vías principales; c) Vías secundarias

Esta información fue validada con videos de flujo vehicular suministrados por la central de semáforos del Municipio; adicionalmente, se incluyó en el análisis información de aforos vehiculares en 12 sitios sobre las principales vías y en franjas horarias pico elaborados por la Oficina de Planeación.

Es importante señalar que los vehículos reportados en los aforos para la categoría de livianos incluyen taxis, y en la categoría de pesados se incluyen buses y camiones. Por lo anterior, fue necesario llevar a cabo una desagregación partiendo de la distribución vehicular.

2.4 Actividad vehicular

A la fecha no se cuenta con información oficial acerca del kilometraje promedio recorrido por los vehículos que hacen parte del parque automotor que circula en el municipio de Envigado, información importante para el cálculo de emisiones. Por ello, fueron consultados diferentes sectores del transporte en el municipio, como empresas de transporte de carga y pasajeros y un centro de diagnóstico autorizado (CDA), que es una entidad descentralizada para la inspección del buen funcionamiento de los vehículos, con el fin de obtener información sobre

los recorridos promedio que realizan las diferentes categorías vehiculares dentro del municipio. Con las consultas se estableció la distancia promedio diaria recorrida por un vehículo de cada categoría.

Para validar y ajustar la información de los kilómetros recorridos dentro de la zona de estudio, se hicieron seguimientos a dos rutas de buses de transporte público y a dos vehículos particulares dentro del municipio. Para el desarrollo de esta actividad fueron necesarios varios recorridos en simultáneo con cada vehículo evaluado.

2.5 Estimación de emisiones

Para el cálculo de las emisiones vehiculares en Envigado se confeccionaron una serie de hojas de cálculo para el procesamiento de la información y cómputo de las emisiones totales por contaminante y por categoría vehicular de acuerdo con la ecuación 1 (Tuia *et al.*, 2007). Las emisiones horarias para un día laboral típico también fueron estimadas.

$$Emi_k = \sum_j^n N_j \times M_j \times FE_{jk} \quad (1)$$

donde:

E_{mik} es la cantidad total diaria de emisión del contaminante k para un área urbana (g/día).



N_j es el número de vehículos de la categoría j (N).

M_j es la actividad vehicular diaria expresada como la cantidad de kilómetros recorridos por día y por la categoría j (km/día).

FE_{jk} es el factor de emisión asociado a la categoría vehicular j y al contaminante k . Se expresa como la masa de contaminante generada por kilómetro recorrido por un tipo de vehículo ($g\ km^{-1}$).

2.6 Factores de emisión

El modelo IVE cuenta con la opción de ingresar los factores de emisión propios de cada ciudad, sin embargo, en caso de no contar con esta información, el modelo utiliza principalmente factores de emisión desarrollados a partir del ciclo de conducción del método de prueba federal o FTP (Federal Test Procedure) de los Estados Unidos de América (IVE, 2009), para luego ser ajustados a la realidad de las características observadas de la ciudad para la cual se elabora el estudio.

Para la estimación de las emisiones de Envigado se emplearon los factores de emisión base por tecnología para COV, CO, NO_x, PM₁₀ y SO₂ propuestos por Giraldo (2005) para Bogotá, los cuales dependen de la categoría vehicular, tipo de combustible, uso de aire acondicionado, tipo de transmisión de los vehículos, control de la relación aire/combustible, sistema de control de emisiones y la edad o modelo.

2.7 Distribución espacial de las emisiones de contaminantes

El cálculo de las emisiones en el área objeto de estudio se realizó sobre la distribución espacial ya descrita, teniendo en cuenta la desagregación por tipo de vía propuesta por Tuia *et al.* (2007), la carga vial que soporta cada tipo de vía y el volumen de tráfico que circula por ellas, esto con el fin de corregir la emisión total producida en cada celda.

La ecuación 2 describe el cálculo de las emisiones de acuerdo con la desagregación por tipo de vía.

$$E_{ikj} = ET_k \times FV_{ij} \times FW_{ij}$$

$$\sum_i^n FW_i = 1 \quad (2)$$

donde:

E_{ikj} es la cantidad total de emisión del contaminante k producida por el tipo de vía j para la celda o polígono i (kg/día).

ET_k es la emisión total estimada para el contaminante k (kg/día).

FV_{ij} es la fracción de vía en la celda i del tipo de vía j .

FW_{ij} es el factor de corrección por desagregación vial para la celda i y tipo de vía j (0,7 para vías principales y 0,3 para secundarias).

3. RESULTADOS

3.1 Intensidad de tránsito

La información obtenida de aforos de tránsito vehicular fue organizada y validada mediante videos de flujo vehicular suministrados por la central de semáforos del Municipio de Envigado, y los resultados de este proceso para las vías de la zona urbana se muestran en la tabla 2.

En promedio para las vías urbanas del municipio, la hora de mayor flujo vehicular correspondió a las 12:00 m. Los vehículos livianos, seguidos de las motos, se presentan como las categorías vehiculares más significativas dentro del parque automotor que circula en Envigado.

3.2 Distribución vehicular

La tabla 3 muestra la participación del parque automotor según la edad o modelo de los vehículos utilizada en el cálculo de las emisiones y establecida en la metodología IVE. Esta información fue extraída de la página web del Ministerio de Transporte (<http://www.mintransporte.gov.co/portal/page/portal/mintransporte>) con año base en el 2009.

Tabla 2. Intensidad media de tránsito vehicular para un día laboral

Hora	Livianos	Pesados	Motocicletas	Total (IMH*)
	Vehículos/hora			
00:00	327	7	61	395
01:00	128	3	29	160
02:00	91	1	22	114
03:00	130	7	22	159
04:00	200	69	39	308
05:00	382	178	145	705
06:00	1442	385	436	2263
07:00	2582	599	730	3911
08:00	2663	639	961	4263
09:00	2618	607	1039	4264
10:00	2681	651	1194	4526
11:00	2880	686	1331	4897
12:00	3035	664	1215	4914
13:00	2342	529	1016	3887
14:00	3177	443	1132	4752
15:00	2885	399	1093	4377
16:00	2680	361	953	3994
17:00	3028	352	1145	4525
18:00	2846	350	1005	4201
19:00	2427	236	658	3321
20:00	2105	181	542	2828
21:00	1460	123	397	1980
22:00	817	70	197	1084
23:00	677	16	112	805
IMD**				66633

*IMH es la intensidad media horaria. **IMD es la intensidad media diaria

Fuente: Adaptado de GIGA (2007)

Tabla 3. Distribución vehicular por edad o modelo según factores IVE

Categoría por edad	Autos	Buses	Camiones	Taxis	Motos
ODO < 79000 km	≥ 2005	≥ 2008	≥ 2006	2009	≥ 2008
80000 km < ODO < 161000 km	2000-2004	2006-2007	2001-2005	2008	2006-2007
ODO > 161000 km	≤ 1999	≤ 2005	≤ 2000	≤ 2007	≤ 2005



El número de vehículos que circula diariamente, discriminado por categoría, usado en la estimación de las emisiones se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Distribución por categoría de los vehículos que circulan en Envigado en un día laboral

Categoría	Vehículos por día	% Participación
Autos	42382	64
Taxis	1221	2
Buses	1719	2
Camiones	5837	9
Motos	15474	23
Total	66633	100

La categoría vehicular que más se presenta diariamente en las vías de Envigado son los autos, ya que 64 de cada 100 vehículos son automóviles, los otros 36 restantes se distribuyen entre taxis (2 %), buses (2 %), camiones (9 %) y motos (23 %).

3.3 Perfil vehicular

La distribución porcentual de la intensidad promedio horaria del flujo vehicular se exhibe en la

figura 3, que representa la variación en la cantidad de vehículos que se movilizan hora a hora en la red vial del escenario planteado y para un día laboral.

El perfil muestra que cerca del 84 % de tráfico vehicular diario en Envigado se presenta entre las 07:00 y las 19:00 horas. También se observa que la más baja actividad vehicular se presenta a las 02:00 horas. Los valores más altos de flujo se presentan entre las 11:00 y las 12:00 horas.

3.4 Actividad vehicular

La actividad vehicular permitió validar la información obtenida en las encuestas y la suministrada en los centros de diagnóstico automotor –CDA–. La información encontrada para el municipio de Envigado se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Actividad vehicular por categoría

Categoría	Actividad vehicular km-veh/día
Autos	12
Taxis	81
Buses	72
Camiones	36
Motos	17

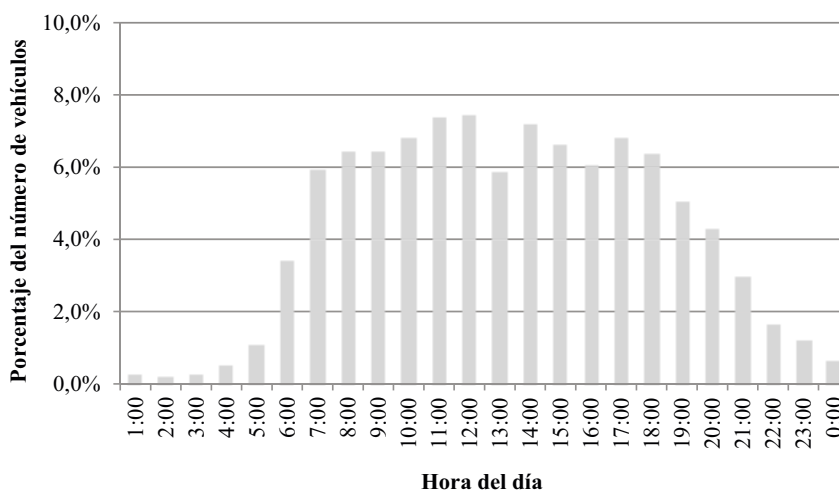


Figura 3. Perfil de intensidad horaria del flujo vehicular en Envigado

3.5 Emisiones

Los resultados de las emisiones de las fuentes móviles usando los factores de emisión propuestos en el modelo IVE se muestran en la tabla 6 y en la figura 4. El monóxido de carbono es el contaminante más emitido con 18,41 t d⁻¹ (71,3 %), seguido por los óxidos de nitrógeno con 4,5 t d⁻¹ (17,4 %) y los compuestos orgánicos volátiles con 2,7 t d⁻¹ (10,3 %). Los camiones y buses se muestran como

las categorías vehiculares que más emisiones de PM₁₀ presentan: 0,105 t d⁻¹ y 0,073 t d⁻¹ respectivamente. Los autos presentan una emisión diaria de 8,25 t d⁻¹ de CO y esa categoría representa el 32,74 % de las emisiones de este contaminante.

La figura 4 muestra el aporte de las diferentes categorías vehiculares a las emisiones totales y por cada uno de los contaminantes estimados. Las categorías de camiones y autos tienen una participación

Tabla 6. Emisiones totales provenientes de fuentes móviles en Envigado

Categoría vehicular	CO	VOC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂	Total categoría	% categoría
	Emisión (kg/día)						
Autos	8257,29	992,00	659,62	2,76	12,13	9923,80	38,5
Taxis	1257,12	133,55	106,05	1,79	1,94	1500,45	5,8
Motos	3047,36	890,63	107,13	18,20	1,02	4064,33	15,7
Buses	964,53	195,89	1422,53	72,75	7,49	2663,19	10,3
Camiones	4882,10	451,37	2204,36	105,21	12,17	7655,21	29,7
Total contaminante	18408,40	2663,45	4499,69	200,70	34,75	25806,99	100,0
% contaminante	71,3	10,3	17,4	0,8	0,1	100,0	-

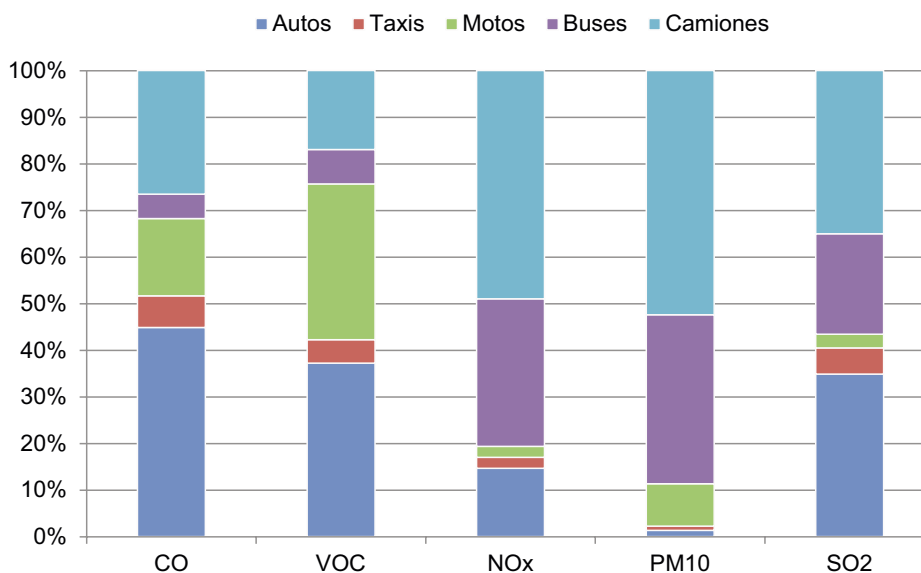


Figura 4. Emisiones por categoría vehicular para un día laboral



importante en las emisiones de contaminantes tales como CO, VOC, NO_x y SO₂. Esto era de esperarse al considerar que estas dos categorías representan cerca del 73 % de los vehículos que circulan diariamente en el municipio, y según Arango (2009) “el mejoramiento de la calidad de los combustibles no se ve reflejado en la misma proporción que las emisiones de compuestos azufrados y material particulado especialmente en el parque automotor de transporte pesado antiguo” en el país.

Otra categoría que presentó resultados críticos con respecto a su aporte a las emisiones totales fue la de los buses. Esta categoría es responsable de un alto porcentaje de varios contaminantes: alrededor de 1,42 t d⁻¹ (34,5 %) de las emisiones de óxidos de

nitrógeno, 41 % con 72,75 t d⁻¹ de las emisiones de material particulado PM₁₀ y del 21,5 % con 7,49 t d⁻¹ de las emisiones de óxidos de azufre. Estos aportes tienen aun más relevancia si se tiene en cuenta que los buses representan cerca del 9 % del parque automotor del municipio.

Con la información de la variación de flujo vehicular para un día laboral y las emisiones totales por contaminantes fue posible estimar la variación de las emisiones horarias. La tabla 7 muestra dichos resultados. Las horas de mayores emisiones sobre las vías de Envigado se presentan entre las 11:00 y 12:00 horas y a las 14:00 horas, en las cuales se intensifica el volumen vehicular por desplazamientos en el intermedio de la jornada laboral.

Tabla 7. Emisiones horarias

Hora	VOC	CO	NO _x	PM	SO ₂	Total
	Emisiones en kg/hora					
00:00	18,02	149,43	24,46	1,05	0,21	193,16
01:00	7,32	60,70	9,94	0,43	0,08	78,47
02:00	5,23	43,39	7,10	0,31	0,06	56,09
03:00	7,21	59,81	9,79	0,42	0,08	77,31
04:00	14,04	116,44	19,06	0,82	0,16	150,52
05:00	32,16	266,79	43,67	1,88	0,37	344,87
06:00	103,26	856,49	140,20	6,03	1,18	1107,17
07:00	178,45	1480,19	242,29	10,42	2,05	1913,40
08:00	194,52	1613,43	264,10	11,35	2,23	2085,64
09:00	194,58	1613,94	264,19	11,36	2,23	2086,29
10:00	206,57	1713,37	280,46	12,06	2,37	2214,82
11:00	223,47	1853,55	303,41	13,04	2,56	2396,03
12:00	224,26	1860,11	304,48	13,09	2,57	2404,51
13:00	177,40	1471,48	240,87	10,36	2,03	1902,15
14:00	216,88	1798,91	294,46	12,66	2,49	2325,41
15:00	199,77	1656,96	271,23	11,66	2,29	2141,91
16:00	182,24	1511,61	247,44	10,64	2,09	1954,01
17:00	206,48	1712,61	280,34	12,05	2,37	2213,84
18:00	191,72	1590,22	260,30	11,19	2,20	2055,63
19:00	151,56	1257,11	205,78	8,85	1,74	1625,03
20:00	129,09	1070,74	175,27	7,54	1,48	1384,12
21:00	90,33	749,24	122,64	5,27	1,04	968,53
22:00	49,49	410,47	67,19	2,89	0,57	530,61
23:00	36,75	304,81	49,89	2,15	0,42	394,02
Total	3040,79	25221,81	4128,56	177,51	34,87	32603,53

3.6 Distribución espacial

Con el propósito de analizar las emisiones vehiculares en el escenario espacial fueron construidos los mapas donde se distribuyen las emisiones según se explicó. Con la ayuda del software ArcGis 9.3 se efectuó el almacenamiento, manipulación, análisis y presentación eficiente de los resultados obtenidos. La figura 5 muestra la distribución espacial de las emisiones totales obtenidas para cinco contaminantes evaluados (CO, COV, NO_x, SO₂ y PM₁₀) en el área urbana de Envigado.

Las emisiones del monóxido de carbono, al igual que los demás contaminantes, presentan una mayor tasa sobre las principales vías: Avenida Regional, Avenida Las Vegas, Avenida El Poblado, vía paralela a la quebrada La Ayurá y principales vías de la zona centro del municipio. Sobre estas vías se alcanzan emisiones de hasta 435 kg/día de CO; 52,3 kg/día de COV; 71 kg/día de NO_x; 3,1 kg/día de PM₁₀ y 0,6 kg/día de SO₂. Estos resultados eran de esperarse teniendo en cuenta que estas vías principales

están diseñadas para movilizar mayor volumen de vehículos que las demás.

3.7 Comparación con otros estudios

Para contextualizar los resultados obtenidos se ejecutó una comparación con otros estudios, incluido uno anterior en el municipio de Envigado. La tabla 8 presenta los resultados de emisiones de los principales contaminantes estimados en seis investigaciones diferentes. Las emisiones de CO para todos los análisis representan el mayor aporte, sin embargo, el realizado en Gran Concepción en el 2006 parece subestimar las emisiones de CO. Los aportes de PM₁₀ son similares para cuatro de los seis estudios. Los resultados para las emisiones de NO_x presentan unas diferencias importantes para todos; la misma situación se presenta para los aportes de las emisiones reportadas de SO₂. Los valores obtenidos para todos los contaminantes en los estudios ejecutados por Corantioquia (2005) y AMVA (2009) son similares a este.

Tabla 8. Resultados de emisiones en diversos estudios

Estudio	CO	VOC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
	Aporte de cada contaminante (%)				
Gran Concepción 2006 (Tuia <i>et al.</i> , 2007)	63,2	6,3	28,8	1,8	-
Medellín 2001 (Toro <i>et al.</i> , 2001)	70,8	17,0	10,7	0,7*	0,7
Bogotá 2005 (Giraldo, 2005)	87,03	7,32	5,20	0,21	0,23
Jurisdicción de Corantioquia 2005 (Corantioquia, 2006)	79,28	10,45	9,91	0,34	0,004
AMVA 2008 (AMVA, 2009)	73,9	11,4	13,0	1,1	0,7
Este estudio	71,3	10,3	17,4	0,8	0,1

*Este dato corresponde a PST

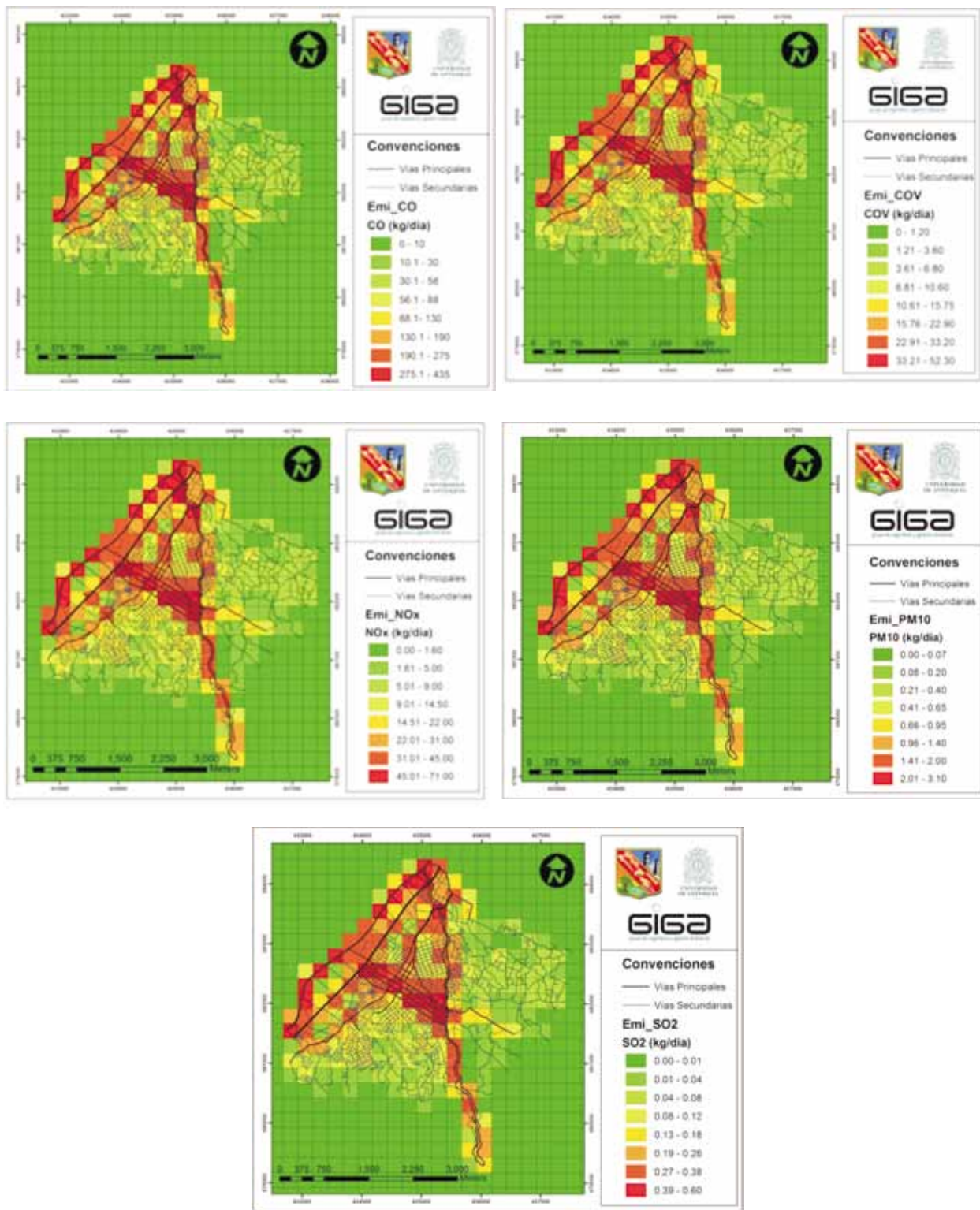


Figura 5. Distribución espacial de los contaminantes evaluados: a) CO, b) COV, c) NO_x, d) PM₁₀, e) SO₂ en Envigado

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión se centra en el hecho de que el conjunto de métodos y modelos empleados en este estudio resulta ser aceptablemente adecuado para la evaluación de las emisiones procedentes del tráfico vehicular y de su dispersión. De esta forma podría aplicarse en muchos otros casos de una manera sencilla y podría ser una herramienta de planificación y evaluación de los efectos del tráfico, así como para medir la sensibilidad frente a cambios estructurales del transporte.

De acuerdo con los objetivos planteados para el desarrollo de la investigación, se estimaron satisfactoriamente las emisiones totales para contaminantes criterio, con resultados de 18,41 t d⁻¹ para CO; 2,66 t d⁻¹ para VOC; 4,50 t d⁻¹ para NO_x; 0,20 t d⁻¹ para PM₁₀ y 0,03 t d⁻¹ para SO₂. Se estimaron los aportes de cada categoría vehicular al total de emisiones, siendo los buses y camiones las categorías de mayor relevancia, al aportar el 41 % y 39,5 % respectivamente de las emisiones de PM₁₀, a pesar de representar menos del 5 % del total de la flota de vehículos en el municipio.

El análisis de aforo vehicular permitió identificar las principales vías del municipio de Envigado que presentan congestiones significativas en horarios pico de la mañana y de la tarde. Estas vías corresponden a la Avenida las Vegas, Avenida El Poblado, vía paralela a la quebrada La Ayurá y vías de acceso al parque principal del municipio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA– por el apoyo brindado a este proyecto, al Municipio de Envigado, mediante la Secretaría de Medio Ambiente, la Secretaría de Tránsito y Transporte y la Oficina Asesora de Planeación, por el suministro de la información del parque automotor. De igual forma agradecen con especialidad a Juan Camilo Hernández, estudiante de Maestría en Ingeniería, por su valiosa ayuda en el procesamiento de los datos.

REFERENCIAS

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). *Actualización inventario de emisiones atmosféricas en el valle de Aburrá, con georeferenciación [sic] de estas*. Informe final, Convenio 323 de 2005. Medellín, 2006.
- Arango, Jorge Humberto (2009). "Calidad de los combustibles en Colombia". *Revista de Ingeniería [Universidad de Los Andes]*, No. 29 (mayo), pp. 100-108.
- Colombia. Ministerio de Transporte. *Parque automotor de Envigado*. [consultado el 20 de enero de 2010] Disponible en: <<http://www.mintransporte.gov.co/portal/page/portal/mintransporte>>
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). *Primer inventario de emisiones atmosféricas en la jurisdicción de Corantioquia*, Informe final. Medellín. 2005.
- DANE (2008). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. *Proyección de poblaciones municipales colombianas*. [consultado el 20 de enero de 2010] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php?option=com_content&view=article&id=75&Itemid=72>
- Giraldo, Liliana Andrea. *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes*. Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, 2005.
- Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–. *Elaboración del mapa de ruido de la zona centro del municipio de Envigado*. Informe final. Medellín, 2007.
- IVE (2009). *International Vehicle Emissions Modelling –IVE–: Manual del usuario versión 2.0 mayo de 2008*. Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sostenibles (ISSRC). [consultado el 30 de junio de 2009] Disponible en: <<http://www.issrc.org/ive/downloadmodel.html>>
- Toro, María Victoria; Ramírez, John J.; Quiceno, Raúl A. y Zuluaga, César A. (2001). "Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión Corinair". *Revista ACODAL*, No. 191, pp. 42-49.
- Tuia, Devis; Ossés de Eicker, Margarita; Zah, Rainer; Osses, Mauricio; Zarate, Erika and Clappier, Alain (2007). "Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities". *Atmospheric Environment*, vol. 41, No. 17 (June), pp. 3658-3671.
- Van Aardenne, John A. (2002). *Uncertainty in emission inventories*. Tesis doctoral. Wageningen University, 143 p.
- Zuluaga, Claudia Lucía. *Un aporte a la gestión del ruido urbano en Colombia, caso de estudio: Municipio de Envigado*. Tesis de maestría (Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, 2010. 110 p.