

## **ESTIMACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES DE AUTOBUSES URBANOS, CASO DE ESTUDIO IBARRA-ECUADOR**

### **ESTIMATING VEHICLE EMISSIONS FROM PUBLIC TRANSPORT BUSES, CASE STUDY: IBARRA-ECUADOR**

Rosero Añazco Ramiro Andrés<sup>1</sup>, Rosero Obando Fredy Alexander<sup>2</sup>, Mera Rosero Zamir Andrés<sup>3</sup>, Tapia Gudiño Fausto Eduardo<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Universidad Técnica del Norte, Av 17 de Julio 5-21, Ibarra  
e – mail: rarosero@utn.edu.ec<sup>1</sup>, farosero@utn.edu.ec<sup>2</sup>, zamera@utn.edu.ec<sup>3</sup>, fetapia@utn.edu.ec<sup>4</sup>

*Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro VI Edición 2017, No.1 (19)*

#### **Resumen**

En el marco de la regulación en materia de reducción de emisiones contaminantes emitidas por fuentes móviles, es necesario crear una línea base para la toma de decisiones de gobiernos locales para mejorar la calidad del aire en las ciudades y reducir las emisiones vehiculares. En este ámbito, el estudio estima las emisiones contaminantes producidas por autobuses urbanos de la ciudad de Ibarra utilizando el Modelo Internacional de Emisiones Contaminantes (IVE).

El modelo matemático para el cálculo de los factores de emisión se basa en una metodología que toma como base información referente a las características técnicas de la flota vehicular, patrones de conducción, así también los arranques en frío, calidad del combustible utilizado y situación geográfica de la ciudad.

Se muestran resultados referentes a emisiones de una ruta específica para la hora de mayor congestión vehicular de los principales gases contaminantes y de efecto invernadero como son monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC), óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado con un diámetro menos a 10µm (PM<sub>10</sub>) y monóxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

#### **Palabras clave**

Emisiones vehiculares, gases de efecto invernadero, medio ambiente.

#### **Abstract**

The regulations about the reduction of pollutant emissions emitted by mobile sources, needs a baseline for the decision-making of local governments to improve air quality in cities and reduce vehicular emissions. In this area, the study estimates the pollutant emissions produced by vehicles of mass urban passenger transport on Ibarra city, using the International Model Emission Model (IVE).

The mathematical model for the calculation of the emission factors is based on an established methodology that takes as basis the technical characteristics of the vehicle fleet, driving patterns, as well as the cold starts, quality of the fuel used and the geographical location of the city.

Emissions results are presented for the main pollutants and greenhouse gases such as carbon monoxide (CO), volatile organic compounds (VOC), nitrogen oxide (NOx), particulate matter with diameters of 10 µm or less (PM<sub>10</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).

#### **Keywords:**

Environment, greenhouse gases, vehicle emissions.

## 1. Introducción

La gestión eficaz del cambio climático y de la calidad del aire en las ciudades requieren el conocimiento de las fuentes de contaminación del aire, además de la capacidad de entender y proyectar las emisiones procedentes de dichas fuentes y la capacidad de manejar los procesos de regulación asociados a controlar las emisiones de esas fuentes. Este es un gran reto para países en vías de desarrollo con información limitada o inexistente y programas de planificación distintos en materia de control de emisiones vehiculares y gestión del transporte público (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Barth, 2005).

Mediante la utilización de modelos matemáticos que simulan el comportamiento de fuentes de contaminación como los motores de combustión interna es posible estimar en nivel de emisiones de manera confiable y efectiva.

Considerando la insuficiente disponibilidad de información en el país y en la región para desarrollar modelos computacionales de emisiones, el modelado matemático computacional es una herramienta para la estimación rápida de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero provenientes de fuentes móviles, adaptables a cualquier ciudad y con una demanda limitada de información de entrada. (SEMARNAT-INE-WGA, 2009).

Con el objeto de ayudar a países en vías de desarrollo a avanzar el proceso de gestión de la calidad del aire que permita la consideración y mitigación de los impactos producidos por las emisiones vehiculares, el ISSRC (International Sustainable Systems Research Center) ha desarrollado una herramienta y metodología para la evaluación de las emisiones de fuentes móviles; el modelo Internacional de Emisiones Vehiculares IVE estima las emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero en función de la composición tecnológica de la flota, patrones de conducción, distribución de arranques en frío, así como características geográficas de la localidad fuente de estudio. La recolección de datos y el modelo de proceso de IVE se han aplicado en más de 19 países. (Davis, Lents, Street, & Habra, 2005).

El Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE en el año 2014 presentó el Inventario Preliminar de la Emisiones Contaminantes del Aire, donde los factores de emisión del tráfico vehicular se estructuraron en base a los factores de emisión utilizados en el Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México del año 2008 (Ministerio del Ambiente, 2014); dando como resultado que el tráfico vehicular es el principal contribuyente de las emisiones de contaminantes de la zona urbana.

En este ámbito, el informe recomienda como trabajos futuros la utilización de modelos matemáticos computacionales para la determinación de factores de emisión con información propia del país.

## Fundamentación teórica

Los componentes claves que determinan el nivel de emisiones de los vehículos son: tecnología, combustible, operación, programas de inspección y mantenimiento, además de las condiciones geográficas de la localidad; siendo así, que el proceso de estimar emisiones en el modelo IVE se realiza en base de factores de emisión y factores de corrección que se aplican para estimar las emisiones de fuentes móviles.

Son tres componentes críticos que se usan en el modelo IVE para crear inventarios de emisiones fiables:

- i. Factores de emisión de vehículos (Base de factores de emisión y factores de corrección);
- ii. Actividad Vehicular (Datos de entrada de la Localidad); y
- iii. Distribución de la flota vehicular (Datos de entrada de la Flota).

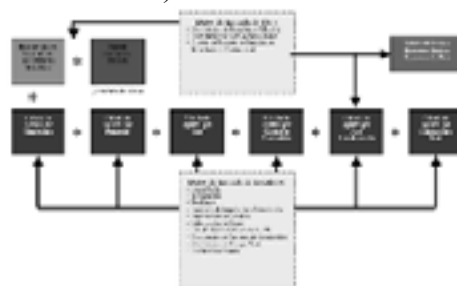


Fig. 1 Arquitectura del modelo IVE (International Sustainable Systems Research Center, 2008)

La base de factores de emisión del modelo IVE está compuesta emisiones en ruta y emisiones para arranque en frío. En las ecuaciones (1) y (2) se ponderan los factores de emisión corregidos para cada ruta y el patrón de conducción para el tipo de tecnología de control de emisiones de la flota vehicular objeto del estudio. (International Sustainable Systems Research Center, 2008)

$$Q_{en\ ruta} = \sum_i \{f_{[t]} * \sum_d [Q_{[t]} * \bar{U}_{FTP} * f_{[dt]} * K_{[dt]}]\} / \bar{U}_C \quad (1)$$

$$Q_{partida} = \sum_i \{f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d \{f_{[dt]} * K_{[dt]}\}\} \quad (2)$$

**Tabla 1 Variables utilizadas en las ecuaciones de factores de emisión.**

Variable	Descripción
$B_{[t]}$	Base de factores de emisión para cada tecnología (partida (g/partida) o en ruta (g/km))
$Q_{[t]}$	Factores de emisión ajustados para cada tecnología (partida (g/partida) o en ruta (g/km))
$f_{[t]}$	Fracción de viaje por tecnología específica
$f_{[dt]}$	Fracción de tiempo por cada tipo de conducción o fracción de tiempo soak por tecnología específica
$K_{[dt]}$	Factor de corrección por modo de conducción
$U_{FTP}$	Velocidad Promedio del ciclo de conducción LA4 (una constante (km/h))
$\bar{U}_C$	Velocidad Promedio del ciclo de conducción específico, valor ingresado por el usuario en el archivo Localidad (km/h)

La metodología de estimación de emisiones del modelo IVE se fundamenta con una tasa de emisión base y una serie de factores de corrección que son aplicados para estimar la cantidad de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero para la flota vehicular analizada. (International Sustainable Systems Research Center, 2008)

**Tabla 2 Factores de corrección.**

Variables Locales	Variables de calidad de combustible	Variables de potencia y conducción
Temperatura	Consumo	Pendiente
Humedad	Azufre	Uso AC
Altitud	Plomo	Encendidos
Programas I/M	Benceno	VSP

En el modelo IVE, los patrones de conducción se caracterizan usando como parámetros la potencia específica vehicular (VSP) y la condición de estrés del motor. Estos parámetros se calculan con datos referentes al inventario de la tecnología vehicular de la flota y el ciclo de conducción de la ruta objeto de estudio y su pendiente. (International Sustainable Systems Research Center, 2008)

$$VPS = v/1.1a + 9.81(\text{atan}(\sin(\text{pendiente}))) + 0.132 + 0.00302v^3 \quad (3)$$

$$\text{pendiente} = (h_{t=0} - h_{t=-1}) / v \quad (t=-1 \text{ a } 0 \text{ segundos})$$

$$v = \text{velocidad (m/s)}$$

$$a = \text{aceleración (m/s}^2\text{)}$$

$$h = \text{Altitud (m)}$$

$$\text{Estrés del motor} = \text{Índice}_{RPM} + (0.08 \text{ ton/kW})$$

$$\text{Potencia}_{Prepromedio} \quad (4)$$

$$\text{Potencia}_{Prepromedio} = \text{Promedio}(VSP_{t=-5\text{sec to } -25\text{ sec}})$$

$$\text{(kW/ton)} \quad (5)$$

$$\text{Índice}_{RPM} = \text{Velocidad}_{t=0} / \text{Divisor Velocidad (adimensional)}$$

## 2. Metodología y materiales

La metodología que emplea el modelo IVE es la Bottom – Up, que consiste en reunir diferente información de un sistema que conformarán un todo. los elementos individuales son especificados detalladamente, juntando sus componentes hasta conformar un sistema final, en este caso el inventario de emisiones vehiculares.



**Fig. 2 Metodología para la estimación de emisiones vehiculares.**

### Selección de la ruta y elaboración del ciclo de conducción

Para la selección de la ruta más representativa, se han analizado 22 rutas de las dos cooperativas que comprenden el servicio de autobuses de transporte urbano de la ciudad de Ibarra, tomando en cuenta consideraciones como la distancia recorrida, el nivel de servicio y los sectores de la ciudad que comunica, la ruta seleccionada fue la “Católica – Alpachaca”, esta comprende una distancia total de 16 kilómetros que comunica los dos sectores de la ciudad mediante avenidas y calles secundarias.



Fig. 3 Ruta "Católica - Alpacaca", recorrido total 16 km.

La toma de datos de actividad de los vehículos mediante sistema GPS para la determinación de los ciclos de conducción, se la realizó en el período de tiempo comprendido entre las 6:00 y las 20:00, hora correspondiente al período de actividad de la ruta, con una duración promedio por viaje de una hora y treinta minutos, con una velocidad promedio de circulación de 18,5 km/h.

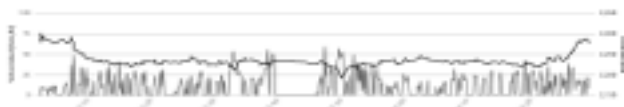


Fig. 4 Ciclo de conducción ruta "Católica - Alpacaca", velocidad promedio 18,5 km/h, tiempo total 1h30 min.

### Inventario de flota vehicular y condiciones geográficas

En lo referente al inventario de la flota vehicular se ha analizado la totalidad de la muestra que comprenden 283 unidades, donde la caracterización según el peso bruto vehicular, sistema de inyección combustible y tecnología de control de emisiones, arrojó valores comunes para toda la flota de acuerdo con la clasificación establecida por el modelo IVE.

La caracterización de los patrones de encendido y apagado del motor se la realiza mediante encuestas a los conductores para determinar la distribución de los arranques en frío y en caliente de los vehículos. En el modelo IVE un arranque en frío se considera cuando el motor a reposado 18 horas o más, una partida en frío habitualmente

provoca un mayor nivel emisiones de emisiones mientras el motor llega a su temperatura normal de operación; se considera una partida en caliente cuando el motor es apagado por 5 minutos o menos antes de ponerse en marcha, finalmente se realiza el conteo del número de veces que se enciende en el día. Al ser un servicio de transporte con frecuencias definidas, los patrones de encendido son constates, los cuales van de 8 a 12 horas para el arranque en frío.

Los valores relacionados con las variables ambientales locales considerados para el área de estudio son: temperatura promedio 18°C y una humedad relativa de 68% a una altura de 2220 m.s.n.m.

### Cálculo de VSP y BINs

Los patrones de conducción de la ruta establecida se obtuvieron del cálculo de la potencia específica vehicular VSP donde se usa un modelo matemático que incluye datos de velocidad, aceleración y pendiente en la ruta segundo a segundo con el objetivo de caracterizar el stress del motor, con los límites establecidos por la metodología se definen los BINs de potencia del motor.

Tabla IV Resultados del cálculo de BINs de potencia del motor.

BIN	Porcentaje	BIN	Porcentaje	BIN	Porcentaje
0	0,00	20	0,00	40	0,00
1	0,02	21	0,00	41	0,00
2	0,00	22	0,00	42	0,00
3	0,02	23	0,00	43	0,00
4	0,04	24	0,00	44	0,00
5	0,07	25	0,00	45	0,00
6	0,15	26	0,00	46	0,00
7	0,26	27	0,00	47	0,00
8	0,85	28	0,00	48	0,00
9	2,60	29	0,00	49	0,00
10	5,75	30	0,00	50	0,00
11	67,24	31	0,00	51	0,00
12	12,81	32	0,00	52	0,00
13	6,15	33	0,00	53	0,00
14	2,74	34	0,00	54	0,00
15	0,63	35	0,11	55	0,00
16	0,22	36	0,07	56	0,00
17	0,11	37	0,06	57	0,00
18	0,04	38	0,00	58	0,00
19	0,06	39	0,00	59	0,00

Se evidencia una tendencia marcada en el comportamiento de los BINs de potencia del motor, la mayor parte se encuentra concentrado en la franja de stress bajo que corresponde a los BINs 9 al 14. La mayor concentración de potencia se encuentra en los BINs 11 y 12, lo que representa condiciones de potencia 0 o cercanas a

este valor, donde el autobús circula a velocidades muy bajas constantemente, desacelera o, se encuentra detenido.

#### 4. Resultados y Discusión

La información recopilada referente a la flota vehicular, localidad y cálculo de potencia específica vehicular se procesa en el software IVE 2.0.2; la tabla V muestra los resultados del cálculo de las emisiones para contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero en gramos por kilómetro recorrido para la hora de mayor tráfico vehicular en la ruta predefinida en el estudio.

**Tabla V Emisiones transporte urbano de la ciudad de Ibarra.**

Contaminantes Criterio (g/km)					
	CO	VOC	NOx	SOx	PM <sub>10</sub>
Partida	6,84	0,44	3,73	0,02	4,38
En ruta	44,33	8,18	29,05	0,12	2,14
Total	51,17	8,62	32,78	0,14	6,52
Contaminantes Tóxicos (g/km)					
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	CH <sub>3</sub> O	NH <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Partida	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00
En ruta	0,01	0,03	0,09	0,03	0,09
Total	0,01	0,05	0,14	0,03	0,09
Contaminantes Calentamiento Global (g/km)					
	CO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub>		
Arranque	188,95		0,01		
En ruta	1211,83		0,01		
Total	1400,78		0,02		

Los datos obtenidos de la estimación de emisiones vehiculares de los contaminantes criterios, tóxicos y de calentamiento global en los autobuses urbanos de la ciudad de Ibarra muestran que, el monóxido de carbono CO<sub>2</sub> tiene la mayor concentración con 1400 g/km que representan más del 90% de las emisiones totales.

A diferencia de los demás contaminantes criterio analizados, el material particulado PM<sub>10</sub>, tiene la mayor concentración durante el arranque, esto es 4,38 g/km, lo que representa el 67% del total.

En lo que se refiere a la velocidad media de circulación es baja, se observan cambios bruscos de velocidad y períodos largo de ralenti lo que influye en la potencia específica vehicular, lo que se refleja en las emisiones totales.

#### 5. Conclusiones

Los picos de emisiones máximas se encuentran dos franjas horarias, entre las 07h00 a 08h00 y 17h00 a 18h00. La primera franja se debe a que el periodo de reposo durante la noche es alto, los

arranques en frío maximizan las emisiones y la actividad vehicular es mayor. El segundo rango comprende la hora de finalización de actividades laborales lo que produce congestión y por ende la reducción de la velocidad promedio de circulación.

La tecnología de control de emisiones de la flota vehicular analizada es obsoleta, junto un alto y variable contenido de azufre en el combustible, determina las emisiones contaminantes totales; siendo fundamental mejorar la calidad de combustible y establecer estándares de emisión más rigurosos.

Es necesario establecer un proceso tecnificado y controlado de Inspección y Mantenimiento para controlar el estado óptimo de funcionamiento de los vehículos.

La metodología propuesta puede ser utilizada para las demás modalidades de transporte con el objetivo de obtener un inventario total de emisiones de fuentes móviles de la ciudad.

#### 6. Referencias

- [1] Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1939), 155-165.
- [2] Davis, N., Lents, J., Street, S. P., & Habra, L. (2005). Advancing Climate and Air Quality Database Management Systems and Emissions Inventories in Developing Countries. Technical Paper in the Proceedings of the Transportation Research Board Annual Conference January, 9-12.
- [3] Goyal, P., Mishra, D., & Kumar, A. (2013). Vehicular emission inventory of criteria pollutants in Delhi. SpringerPlus, 2(1), 216.
- [4] Guadalupe, J. L. (2016). Modelación de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres en Quito, Ecuador ”,

164.

- [5] Huo, H., Zhang, Q., He, K., Yao, Z., Wang, X., Zheng, B., ... Ding, Y. (2011). Modeling vehicle emissions in different types of Chinese cities: Importance of vehicle fleet and local features. *Environmental Pollution*, 159(10), 2954-2960.
- [6] International Sustainable Systems Research Center. (2008). *Manual del Usuario del Modelo IVE Mayo*, 2008, 55.
- [7] Lovera, D., Osses, M., Nikila, N., Nuñez, D., Valentín, L., Mayor, G., ... Vera, S. (2004). Modelo IVE: Metodología, mediciones y simulación de las emisiones de fuentes móviles en la ciudad de Lima - Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(14), 92-99.
- [8] Ministerio del Ambiente. (2014). *Inventario Preliminar de las Emisiones de Contaminantes del Aire, de los cantones Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro*, 3, 124.
- [9] Restrepo, Á., Izquierdo, S., & López, R. (2007). Estimación de Factores que inciden sobre la contaminación ambiental generada por fuentes móviles en Pereira. *Scientia et Technica*, (37), 267-272.
- [10] SEMARNAT-INE-WGA. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*.
- [11] Shafie-Pour, M., & Tavakoli, A. (2013). On-road vehicle emissions forecast using IVE simulation model. *International Journal of Environmental Research*, 7(2), 367-376.

## 7. Biografía



<sup>1</sup>Ramiro Rosero. Ingeniero Automotriz por la Universidad e la Fuerzas Armadas ESPE; realizó sus estudios de máster en Ingeniería de Automoción en la Universidad Politécnica de Cataluña. Entre su experiencia profesional se destaca la participación en proyectos de Homologación Vehicular y Revisión Técnica Vehicular para el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV-EPN). Ocupó el cargo de Técnico de Transporte en la Agencia Nacional de Tránsito realizando actividades referentes a la calificación de empresas fabricantes de carrocerías, elaboración de proyectos de normativas técnicas para la regulación y homologación de vehículos. Actualmente se desempeña como Docente e Investigador de la Carrera de Ingeniería Automotriz en la Universidad Técnica del Norte.



<sup>2</sup>Fredy Rosero. Nació en Ibarra El 29 de diciembre de 1984. En sus estudios de pregrado obtuvo el título de Ingeniero Automotriz en la Escuela Politécnica del Ejército. Diplomado en Autotrónica y una Maestría en Ingeniería del Transporte en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. En la actualidad es Docente Titular de la Universidad Técnica del Norte y sus trabajos de investigación están relacionados al desarrollo de estudios, metodologías, normativas y dispositivos tecnológicos que permitan mejorar los sistemas de transporte y la movilidad de las personas.



<sup>3</sup>Zamir Mera. Nació en Ibarra en 1985. En sus estudios de pregrado obtuvo el título de Ingeniero Automotriz en la Escuela Politécnica del Ejército. Luego en los estudios de postgrado obtuvo un Diplomado en Autotrónica y una Maestría en Energías Renovables en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Es doctorando

en Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Madrid. Se desempeña como Docente Titular de la Universidad Técnica del Norte y sus intereses de investigación están en temas relacionados a: impacto medioambiental de vehículos y transporte por carretera, eficiencia energética en los sistemas de transporte, efectos y aplicación de la movilidad urbana sustentable, análisis de ciclo de vida en los sistemas de transporte.



<sup>4</sup>Fausto Tapia. Nació en Ibarra En 1980. En sus estudios de pregrado obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Escuela Politécnica Nacional. Luego en los estudios de postgrado obtuvo un Diplomado en Educación Superior en la

PUCE-I y una Maestría en Ingeniería Industrial y Productividad en la Escuela Politécnica Nacional. En la actualidad es Docente de la Universidad Técnica del Norte y sus trabajos de investigación están relacionados al desarrollo de estudios, metodologías, normativas y dispositivos tecnológicos que permitan mejorar los sistemas productivos controlando los procesos y manejando de manera eficiente los excesos de contaminación.