

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**EVALUACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES Y  
SELECCIÓN DE UN MODELO ADECUADO PARA EL ÁREA DE LIMA  
METROPOLITANA**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLERA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORA:**

Andrea María Portal Díaz

**ASESOR:**

Julio César Cuisano Egúsqiza

Lima, Julio, 2020

## Resumen

Lima Metropolitana es la octava ciudad más contaminada de Latinoamérica, situación que está relacionada con los problemas de tráfico y las características del parque automotor, que en su mayoría está compuesto por vehículos livianos (Gestión, 2019). Como respuesta a estas condiciones, otras ciudades de la región han ido desarrollando inventarios de emisiones que permiten estimar la cantidad de contaminantes generados, específicamente por el sector transporte, y que sirven como herramientas para la elaboración de estrategias y políticas de reducción de contaminantes en las ciudades.

En este estudio se evaluarán los modelos de estimación de emisiones más utilizados a nivel internacional para la elaboración de inventarios de emisiones asociadas al parque automotor de vehículos livianos. Con tal propósito, se analizaron los alcances y limitaciones de los modelos existentes, considerando que hayan sido utilizados con anterioridad en ciudades con características similares al área de estudio.

Con ello, se obtuvo que el modelo MOVES presentará la mejor opción vinculada a estimar la generación de emisiones, las características y actividad vehicular de nuestra ciudad. Además, permitiría representar al parque automotor de Lima, debido a que es posible la clasificación de categorías vehiculares, incluyendo a vehículos livianos.

## Contenido

1. Introducción.....	1
2. Objetivos .....	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. Metodología.....	3
4. Resultados.....	6
5. Conclusiones.....	10
6. Bibliografía.....	12

## Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de modelos de emisión vehiculares. Tomado de Elkafoury (2013).....	4
--	---



## **1. Introducción**

### **1.1. Antecedentes**

Las emisiones producidas por vehículos, provenientes del tubo de escape, son una mezcla entre gases y partículas dadas por la combustión que generan una baja calidad del aire, contaminación ambiental, problemas a la salud y calentamiento global. Entre las más importantes están el Monóxido de carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM) y Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las concentraciones de estos compuestos contaminantes dependen de diversos factores como las características de los vehículos (tecnología, potencia), el estado de mantenimiento, factores de operación (aceleración, velocidad) y otros.

Desde el año 1960 se llevan mayores regulaciones en cuanto al control de emisiones vehiculares con la finalidad de reducir sus efectos dañinos (Sher, 1998). Y en las últimas décadas, se han elaborado diversos modelos de estimación que son empleados para la obtención de inventarios de emisiones y para el planeamiento de estrategias y políticas de mitigación de contaminación de las ciudades. Estos modelos difieren entre sí en los parámetros que consideran y en la forma en la que estiman las emisiones.

### **1.2. Definición del problema**

Existe una falta de información de la cantidad real de emisiones que generan los vehículos livianos en Lima Metropolitana, debido a la insuficiencia de recursos económicos invertidos y al personal calificado. El último inventario de emisiones del sector transporte de Lima Metropolitana fue publicado en el año 2014; sin embargo, en

este estudio se tomó como año base el 2003 que fue en cual se realizaron campañas de emisiones en la ciudad (Dawidowski, Sánchez-Ccoyllo, & Alarcón, 2014).

### **1.3. Propuesta solución**

En el trabajo se evaluarán los modelos de emisiones vehiculares utilizados actualmente por la comunidad internacional para proponer un modelo adecuado al sector transporte de Lima Metropolitana y así estimar su contribución a la contaminación ambiental de la ciudad.

### **1.4. Justificación**

Se han desarrollado varios tipos de modelos de emisión para permitir el desarrollo de estrategias de planificación y manejo de la calidad del aire. En su mayoría, las emisiones son el resultado de una función de parametros como velocidad, aceleración, consumo de combustible y otras como combinación de varios factores (Kairan, 2013).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos fueron diseñados para determinadas regiones y no toman en cuenta las diferencias tecnológicas, información disponible y condiciones de países en desarrollo (IVE, International Vehicle Emission Model, 2019).

Es necesario la selección de un modelo que se ajuste a las condiciones del área de estudio. La evaluación de los diferentes modelos y parámetros que se emplean permitirá mejorar las estimaciones de emisiones vehiculares que se lleven a cabo.

## **1.5. Alcances**

En el presente trabajo de investigación se abarcará el estudio de los diferentes modelos de estimación de emisiones del tubo de escape para que pueda ser aplicado a los automóviles livianos a gasolina que circulan en Lima Metropolitana.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Evaluar los modelos de estimación de emisiones vehiculares actualmente en uso y seleccionar un modelo más adecuado para estimar las emisiones de vehículos livianos circulando en Lima Metropolitana.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Definir las clases de modelos de emisiones existentes.
- Analizar los alcances y limitaciones de las diferentes clases de modelos.
- Determinar los modelos empleados en ciudades con parques vehiculares similares a Lima Metropolitana.
- Proponer el modelo más adecuado para estimar las emisiones de contaminantes de vehículos livianos circulando en Lima Metropolitana.

## **3. Metodología**

En el presente trabajo se realizará inicialmente un análisis de las clases de modelos que se han empleado para la obtención de inventarios y se seleccionará la categoría que presente una base más sólida para obtener resultados más exactos al simular las condiciones vinculadas al parque automotor liviano en la ciudad de Lima. Por último, de esta clase se evaluarán los modelos más usados en ciudades que posean un parque automotor similar,

tomando en cuenta la información que requieran de entrada y su capacidad de adaptación.

Uno de estos modelos será propuesto al final del estudio.

### 3.1. Modelos de emisiones

Elkafoury (2013) los define en dos tipos: modelos estáticos y dinámicos. Los primeros, también llamados de macroescala, son utilizados para inventarios a nivel nacional o regional. Estos se dividen en dos clases modelos de velocidad promedio y modelos de factores de emisiones agregados. Los modelos dinámicos o microescala usan niveles más detallados, convenientes para una aplicación urbana. Se clasifican en modelos según la situación del tráfico y modelos instantáneos. La figura 1 muestra la clasificación de los tipos de modelos mencionados.

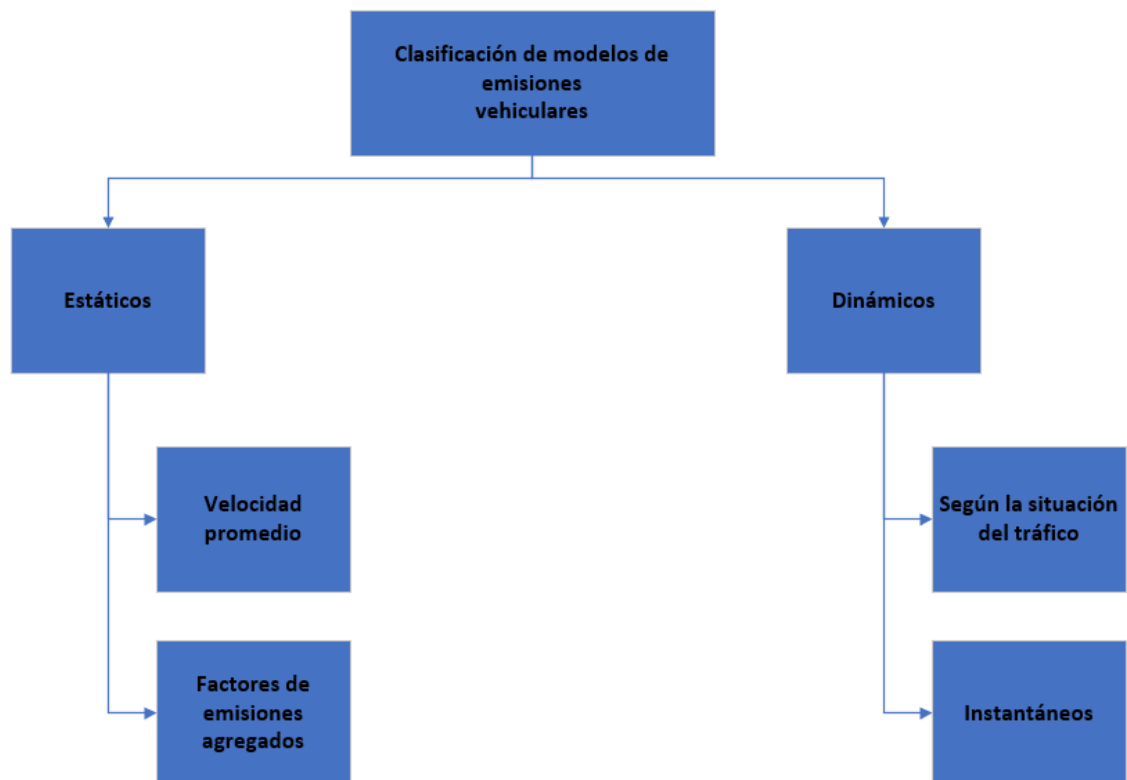


Figura 1. Clasificación de modelos de emisión vehiculares. Tomado de Elkafoury (2013)

a) Modelos de velocidad promedio

Son de los más antiguos, de fácil manejo y requieren de información fácilmente accesible; estos asumen que la generación promedio para determinado contaminante y vehículo varía con la velocidad promedio de un viaje. Sin embargo, tienen limitaciones dado que no considera las demás características de operación y que se pueden obtener los mismos promedios de velocidad para diferentes viajes, caso que se refleja más a bajas RPM porque el rango de posibles variaciones operacionales aumenta (Boulter, 2007). Algunos ejemplos de estos modelos son: VEPM, COPERT, ARTEMIS.

b) Modelos de factores de emisión agregados

Estos utilizan un solo factor de emisión para representar una característica del vehículo o de manejo (rutas urbanas, rurales y vías rápidas). Operan a partir de los kilómetros viajados del vehículo o su consumo de combustible. Por su simplicidad, no puede ser aplicado a situaciones que no estén definidas detalladamente.

Son muy usados en inventarios a grandes escalas cuando no se requiere de información detallada de la operación del vehículo. Son usualmente utilizados para el cálculo de contaminantes no regulados como compuestos orgánicos volátiles (COV) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) por la poca disponibilidad de relaciones entre estos y la operación de los automóviles. Para contaminantes regulados como CO, PM, CO<sub>2</sub> ya no se suelen emplear porque existen métodos más exactos (Barlow & Boulter, 2009). Algunos ejemplos de estos modelos son el NAEI, COPERT, MOBILE.



c) Modelos según la situación del tráfico

Estos buscan incorporar velocidad y el dinamismo de los viajes en las estimaciones. Además, asocian las emisiones promedias generadas con una situación de tráfico particular descrita por el usuario (Elkafoury, 2013). Por ejemplo, existen factores de emisiones que han sido relacionados a una condición de tráfico común; sin embargo, esto puede resultar en inconsistencias de interpretación porque no existen definiciones universales para situaciones del tráfico. Para su uso se necesita información detallada de la velocidad y el tráfico del ciclo de conducción. Como ejemplos de estos modelos se tienen: HBEFA y ARTEMIS.

d) Modelos instantáneos

Han sido los más desarrollados en estos años debido a la gran precisión de resultados al acercarse más a un comportamiento real de manejo. Su exactitud se obtiene en base a que relacionan los niveles de emisiones con las características del vehículo, su operación y el entorno en un corto periodo de tiempo. Los más antiguos relacionaban los contaminantes con velocidad instantánea (Ej. MODEM) y los más actuales se basan principalmente en la potencia instantánea para determinar la generación de emisiones (Ej. PHEM, MOVES, IVE). Pero, debido a su gran cantidad de data requerida no son convenientes para aplicaciones a nivel nación, sino para casos locales.

#### 4. Resultados

Teniendo en cuenta los alcances y limitaciones presentados anteriormente, se tiene que el modelo de emisiones más indicado en términos de precisión de resultados para la ciudad Lima Metropolitana es el dinámico, específicamente el instantáneo. Entre

los más empleados actualmente se tienen: i) simulador de emisiones vehiculares de motor (MOVES), ii) modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE), iii) modelo de emisiones vehiculares (MODEM) y iv) software de simulación de emisiones vehiculares pasajeras (VeTESS).

Dentro de este grupo se considerará a cuáles han sido empleados con anterioridad en Lima Metropolitana o en una ciudad que refleje un parque automotor similar. Entre las principales características de la ciudad de estudio se tiene la congestión vehicular; la gran concentración de vehículos que representa alrededor del 66% del Perú (Posada, 2016); con una tasa de 10.7 habitantes por vehículo y un promedio de edad del parque de 13.6 años (AAP, 2019).

a) MOVES

El Simulador de Emisiones de Vehículos de Motor o MOVES desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), calcula inventarios de contaminantes y factores de emisión en base a la distribución de la velocidad promedio y la potencia específica.

Estima emisiones de la circulación de vehículos, arranque, evaporativas, carga de combustible, neumáticos y frenos. Las emisiones estimadas por el modelo son: hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, amoníaco, dióxido de azufre, material particulado, gases efecto invernadero y tóxicos (benceno, naftaleno, formaldehído, etc.); también estima el consumo de energía (Rojas, 2015). Ha sido empleado en el inventario de fuentes móviles de la ciudad de México en los años 2016, 2013; y para la elaboración de base de datos de factores de emisión de la ciudad de Bogotá.

Para la obtención de resultados el modelo necesita ingresar información lo más cercana posible a la realidad sobre la población vehicular y su actividad, para esto MOVES define diferentes clasificaciones vehiculares de estudio según como se opere:

- Según su categoría vehicular: estos son grupos de vehículos con similares actividades y patrones de uso. Se tiene 13 categorías de las cuales 4 son para vehículos livianos como motocicletas, vehículos de pasajeros, camionetas de pasajeros (minivan, SUVs, pickups) y camiones comerciales ligeros.
- Según el tipo de vías: pueden ser fuera de la red, acceso rural restringido, acceso rural no restringido, acceso urbano restringido y acceso urbano no restringido. Además, permite la creación de más categorías de tipos de vías, si se tiene disponible información de velocidades y aceleración.
- Según el tipo del combustible: abarca gasolina, diesel, E-85, GNC, eléctricos y GLP.
- Según su tecnología vehicular: sistemas de tratamiento de gases y sistema de distribución de combustible

Con respecto a los parámetros de entrada, estos serán asignados a las clasificaciones vehiculares ya mencionadas. Estos son:

- Población vehicular;
- Distribución por edad;
- Kilómetros recorridos;
- Distribución de velocidad;
- Características de combustible;
- Características ambientales: temperatura, humedad;

- Tipo de mantenimiento.

b) IVE

Es el modelo internación de emisiones vehiculares elaborado por la universidad de California, Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sustentables y el Colegio de Ingeniería del Centro para la Investigación Ambiental.

Su desarrollo tiene como objetivo estimar las emisiones contaminantes en países en desarrollo, dado que la mayoría de los modelos desarrollados provienen de Estados Unidos y Europa y no toman en cuenta las tecnologías y las condiciones existentes de los países emergentes. Se empleo en inventarios de Perú, Colombia, Brasil, Ecuador, México, Chile (IVE, International Vehicle Emission Model, 2019).

Del manual para el usuario (IVE, 2008) se obtiene que este modelo describe las características de la flota según las siguientes clasificaciones vehiculares:

- Tamaño vehicular: 7 opciones, de las cuales tres son para vehículos livianos como motocicletas, automóviles y camiones;
- Tipo de combustible: 5 opciones;
- Uso vehicular en km: 3 opciones;
- Sistema de distribución de combustible: 3 opciones;
- Sistema de control de evaporativos;
- Sistema de control de gases de escape.

Con respecto a los datos de entrada que definan la actividad vehicular de las clasificaciones mencionadas se tiene:

- Características ambientales: temperatura, humedad;

- Patrones de manejo: kilómetros recorridos, patrones de velocidad, aceleración;
- Patrones de arranques;
- Características de combustible: calidad y contenidos de aditivos;
- Programas de mantenimiento.

## 5. Conclusiones

Como se aprecia, de forma común en ambos modelos MOVES e IVE descritos se necesitan información de entrada sobre la flota vehicular, sus condiciones de operación, datos del entorno y factores de emisión de forma general. Además, que ambos permiten modificar o calcular factores de emisiones. Sin embargo, al delimitar la elaboración de un inventario en Lima Metropolitana y automóviles livianos de gasolina, se obtiene que la mejor opción resulta el modelo MOVES por poseer mayores categorías vehiculares para este tipo y por permitir un mayor nivel de detalle en la información que servirá para la creación de la base de entrada.

Con esto se logrará representar de mejor forma las características del parque automotor de la ciudad obteniendo resultados que se asimilen más a la realidad, y que permitirán una evaluación más exacta de las medidas que se tomen para la reducción de contaminantes.

Por otro lado, se debe tener en cuenta de contar con todas las fuentes necesarias que puedan brindar la información requerida por el modelo, de ser necesario se deberán realizar campañas vehiculares que permitan recolectar características sobre la distribución de parque según las categorías vehiculares y su tecnología empleada, el comportamiento de manejo para obtener distribuciones de velocidad y distribuciones sobre las distancias recorridas.

Además, también influye que el MOVES a diferencia del IVE sigue teniendo actualizaciones, siendo la más actual la del 2018, mientras que del segundo solo se cuenta hasta la versión del año 2010.



## Bibliografía

- AAP (2019). Los efectos de un parque automor antiguo. Lima, Perú. Retrieved from Asociacion Automotriz del Perú: <https://aap.org.pe/aap-los-efectos-de-un-parque-automotor-escaso-y-antiguo-2/>
- Barlow, T., & Boulter, P. (2009). *Emission factors 2009: Report2- a review of the average speed aproach for estimating hot exhaust emisions*. TRL.
- Dawidowski, L., Sánchez-Ccoyllo, O., & Alarcón, N. (2014). *Estimación de emisiones vehiculares en lima metropolitana*. Lima: SENAMHI.
- Elkafoury, A. (2013). *Emissions Modeling for Road Transportation in Urban Areas: State-of-Art Review*.
- Gestión (2019, Junio). Lima es la octava ciudad más contaminada de América Latina. *Gestión*.
- IVE (2008). *IVE Model User Manual*.
- IVE (2019). *International Vehicle Emission Model*.
- Kairan, Z. (2013). *Factor affectin vehicular emissions and emission models*. ICTE.
- Nouri, P., & Morency, C. (2015). *Untangling the impacts of various factors on emission levels of light duty gasoline vehicles*. CIRRELT.
- P.G Boulter, I. M. (2007). *A review of instantaneuous emission models for road vehicles*.

Posada, C. (2016). Aumento continuo del parque automotor, un problema que urge solucionar.

*La Cámara.*

Rojas, A. (2015). *Estimación de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles en la jurisdicción car.*

Sher, E. (1998). *Handbook of air pollution from internal combustion engines.* Academic Press.

