


Emisiones vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima - Perú noviembre 2020

Vehicular emissions by means of a dynamic model of systems in the Central highway in the city of Lima - Peru November 2020

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.19.1.2023.07>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 12/08/2021. Fecha de Aceptación: 01/12/2021.

Keren Abigail Prieto-Mostacero 
Universidad Peruana Unión. Lima (Perú)
kerenprieto@upeu.edu.pe

Iveth Sheyla Ordoñez Luera 
Universidad Peruana Unión. Lima (Perú)
ivethordonez@upeu.edu.pe

Joel Hugo Fernández-Rojas 
Universidad Peruana Unión. Lima (Perú)
hugof@upeu.edu.pe

Para citar este artículo

K. Prieto-Mostacero, I. Ordoñez Luera & J. Fernández-Rojas, “Emisiones vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima - Perú noviembre 2020”, *INGE CUC*, vol. 18, no. 2, pp. 71–88. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.19.1.2023.07>

Resumen

Introducción— La mayor contaminación del aire como gases orgánicos totales y partículas micro-métricas es causada por el parque automotor; esta realidad se muestra mediante una dinámica de sistemas.

Objetivo— El objetivo de la investigación fue estimar las emisiones vehiculares generadas y liberadas a la atmósfera en la Carretera Central cono Este de la ciudad de Lima, Perú.

Metodología— Se obtuvo los datos durante 35 días continuos en noviembre y diciembre del 2020. Luego se desarrolló un modelo dinámico de sistemas en el software VENSIM PLE 8.2.1, se ingresaron variables de niveles de actividad como el número de vehículos agrupados en categorías y factores de emisión con relación a la velocidad adquiridos de la EMEP/EEA 2019.

Resultados— Se contabilizaron 853 670 vehículos, de los cuales la categoría B correspondiente a vehículos livianos de cuatro pasajeros representan 59.18% del total. El modelo estimó como principal agente gaseoso que se emite a la atmósfera al CO₂ con un total de 632 982 toneladas, tres agentes presentan emisiones medias CO, HCT y NOX con 174.14, 66.57 y 41.55 toneladas respectivamente, las emisiones menores son PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃, las cuales generaron 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 y 0.02 toneladas respectivamente.

Conclusiones— La mayor contaminación causa vehículos de categoría B que correspondiente a vehículos livianos de cuatro pasajeros con emisiones de CO₂, CO y HCT, la categoría G, que son camiones pesados mayores a 16 toneladas y la categoría A Motocicletas suman también a estas emisiones en menor medida.

Palabras clave— Contaminación aire; dinámica de sistemas; modelamiento VENSIM PLE

Abstract

Introduction— The greatest air pollution such as total organic gases and micrometric particles is caused by the automobile fleet; this reality is shown through a system dynamics.

Objective— The objective of the research was to estimate the vehicular emissions generated and released into the atmosphere in the Central Highway in the eastern part of the city of Lima, Peru.

Methodology— The data was obtained during 35 continuous days in November and December 2020. Then a dynamic systems model was developed in the VENSIM PLE 8.2.1 software, variables of activity levels were entered such as the number of vehicles grouped in categories and factors of emission relative to speed acquired from EMEP / EEA 2019.

Results— 853 670 vehicles were counted, of which category B corresponding to four-passenger light vehicles represent 59.18% of the total. The model estimated CO₂ as the main gaseous agent that is emitted into the atmosphere with a total of 632 982 tons, three agents present average emissions CO, HCT and NOX with 174.14, 66.57 and 41.55 ton respectively, the lowest emissions are PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O and NH₃, which generated 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 and 0.02 tons respectively.

Conclusions— The greater pollution causes category B vehicles than corresponding to four-passenger light vehicles with CO₂, CO and HCT emissions, category G, which are heavy trucks greater than 16 tons and category A Motorcycles also add to these emissions to a lesser extent.

Keywords— Air pollution; dynamic of systems; VENSIM PLE modeling



I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire constituye uno de los más grandes problemas ambientales actuales a nivel mundial, como resultado de la presencia de agentes contaminantes de origen natural y antrópico, presentes en un gran número de ciudades del planeta. El aire tiene una interacción directa con el organismo humano y la presencia de estos agentes puede producir efectos graves en la salud humana [1]; cada año 7 millones de personas mueren prematuramente como consecuencia de la contaminación del aire [2]. Actualmente, el enfoque principal de la contaminación atmosférica son las emisiones por parte del parque automotor, que contienen un número elevado de contaminantes como Gases Orgánicos Totales (GOT), Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), Material Particulado (PM), gases tóxicos del aire (3-butadieno, benceno, formaldehído, etc.) y especies reductoras de visibilidad (amoníaco, sulfatos, $\text{PM}_{2.5}$, etc.) [3].

La contaminación del aire en el Perú inició en la década de los sesenta con el desarrollo de las industrias de harina de pescado, las mineras metálicas y no metálicas, y las ciudades más afectadas fueron Lima, Callao, Chimbote, La Oroya y Yuta [4]. Según el BM la ciudad de Lima encabezaba la lista como la ciudad más contaminada para el año 2007, y de todas las emisiones atmosféricas, las del parque automotor fueron la fuente más importante [5]. El PISA (Plan Integral de Saneamiento Atmosférico) indica que los vehículos automotores son responsables de alrededor del 90% de la contaminación del aire de Lima y el 10% restante es explicado por las fuentes estacionarias [5]. El resultado es elevados niveles de concentración de sustancias tóxicas en el aire, e incluso en algunas partes de Lima en algunas horas, se superan los niveles permitidos a nivel internacional, lo que causa problemas graves en la salud pública y degradación de la calidad de vida [6].

La ciudad de Lima concentra 8 575 millones de habitantes [7], lo que corresponde aproximadamente a la cuarta parte de la población total peruana, lo cual hace una tendencia creciente en las fuentes de contaminación atmosférica (emisiones vehiculares, industriales y comerciales) por estar asociadas con el consumo de los combustibles fósiles, carbón, etc. [4]. El distrito de Lima-metropolitana cuenta con grandes cantidades de establecimientos industriales, predominando con un 52%, son las industrias de papel, alimentos y bebidas, metálicas y maquinarias, textil, y curtiembre [8]. De la misma manera en el distrito de Ate, el 53% de sus establecimientos son industrias, y en el distrito de los Olivos, el 95.8% son microempresas productoras, en su gran mayoría, estas industrias no cuentan con dispositivos de control de emisiones contaminantes en sus calderos y/o chimeneas, o se encuentran en desuso por falta de mantenimiento, representando un peligro para la calidad del aire en las zonas, incluso la problemática se agrava dependiendo del tipo de combustible que utilizan y por la limitada capacidad de fiscalización de los LMP's vigentes [9]. Por otro lado, Lima, al ser una ciudad céntrica presenta alta congestión vehicular, y constante combustión de gases de efecto invernadero, por esta razón, la ciudad es considerada como una Zona de Atención Prioritaria (ZAP) en materia de gestión de calidad de aire de acuerdo a la cuarta disposición final del DS No. 003-2017-MINAM, en base a ello se han realizado estudios de las emisiones atmosféricas a causa de fuentes móviles [10].

Existen diversas normativas tanto internacionales como nacionales que buscan gestionar y frenar la emisión de contaminantes del parque automotor. Entre las normas internacionales más conocidas que establecen límites de emisiones para vehículos de carretera están la legislación CARB, EPA y EURO [11]. En el caso de protocolos para el monitoreo de fuentes móviles, en Latinoamérica existen diversas guías, tal es el caso de Chile el cual cuenta con una "Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes" [12]. A nivel nacional aunque no se cuenta con algún protocolo de monitoreo de fuentes móviles, se tienen normativas que buscan la regulación de este tipo de emisiones, tal es el caso de la norma peruana DS No. 007-2020-MINAM, que aprueba el Índice de Nocividad de Combustibles (INC) para el periodo 2020-2021, donde se muestra una lista de combustibles según su índice de nocividad, la cual es utilizado como un criterio del Ministerio de Economía y Finanzas para establecer el Impuesto Selectivo

al Consumo (ISC), de esta manera se incentiva que los transportistas disminuyan el consumo de combustibles más contaminantes, mediante un mayor pago de impuestos [13]. Así mismo, en la norma peruana DS. No. 010-2017-MINAM, se establecen los Límites Máximos Permisibles (LMP) de emisiones atmosféricas para vehículos automotores, lo cual incluye vehículos automotores en circulación, vehículos automotores nuevos a ser importados o ensamblados en el país y vehículos automotores usados importados, buscando proteger, asegurar la salud de la pública, y garantizar así la protección y el cuidado del ambiente.

Las estaciones de medición pública y privada monitorean las cantidades de contaminantes concurrentes en varios puntos de la ciudad lo cual nos ayudan y permiten formular indicadores de calidad del aire. Las emisiones de fuentes móviles nos dan ciertos criterios metodológicos específicos, aunque, existen escasas estimaciones de lo que efectivamente se expulsa a la atmósfera en términos de cantidad. Estas mediciones directas son de alto costo y requieren personal competente, por eso, generalmente se litiga a estimaciones aplicando diversas metodologías [14]. Estos factores de emisión son obtenidos en modelos computacionales, de los cuales, los más usados son los siguientes: Modelo Mobile, que calcula factores de emisión para vehículos de gasolina y diésel, Modelo IVE sirve para estimar rápidamente del inventario de emisiones de automóviles en circulación —usado en Perú y, la Metodología CORINAIR aliado de EMEP son usados en la prevención y control de contaminación transfronteriza [15]. El EMEP y la EEA cada tres años brindan una guía para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones, este documento respalda los informes sobre contaminación atmosférica transfronteriza a largo plazo [16].

En el presente artículo se llevó a cabo la estimación de emisiones vehiculares generadas en la Avenida Carretera Central ubicada al Este de la ciudad Lima, una de las principales vías nacionales. A través de la construcción de un modelo dinámico de sistemas el cual consiste en un diagrama que muestran relación entre sus variables, además de conocer los cambios en las variables a través del tiempo utilizando (1) y (2) del cálculo de emisiones vehiculares [17], y cuantificar las emisiones liberadas a la atmósfera de origen vehicular, la estimación contempló un conteo de vehículos in situ, así como el uso de las metodologías internacionales EMEP/EEA para el inventario y estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos.

II. METODOLOGÍA

A. Lugar de estudio

El área de estudio donde se llevó a cabo la estimación de emisiones vehiculares corresponde a la Carretera Central del Perú, ruta PE-22.2, autopista administrada por el MTC del Perú, la cual es una vía transversal con una penetración de 176.22 km de longitud, la cual parte desde la ciudad de Lima y se comunica con el departamento de Junín en el centro del país.

Se estableció una sección de 16.5 km de largo de la Carretera Central (Avenida Nicolás Ayllón), con inicio en el kilómetro 16.5 con coordenadas UTM 300227.00 m Este y 8673135.00 m Sur, finalizando en el kilómetro 33.0, con coordenadas UTM 314704.00 m Este y 8679344.00 m Sur. Se eligió esta sección de vía debido a que es recta y presencia gran flujo vehicular, además está libre de cruces que tengan conexión con otras avenidas principales con el fin de minimizar la variación en el flujo vehicular.

En la Fig. 1 se puede observar el mapa de la Lima metropolitana y la sección de vía de la Carretera Central la cual se estableció para la estimación de emisiones vehiculares. El punto M1 corresponde a la salida de la Comunidad Autogestionaria de Huaycán, el punto M2 corresponde al cruce de la Carretera Central con la Avenida 7 de junio en Lurigancho-Chosica, y los puntos de control M3 y M4 corresponden los lugares donde se realizó el conteo del flujo vehicular. En la Tabla 1 se puede observar los datos de ubicación geográfica de los puntos de control.

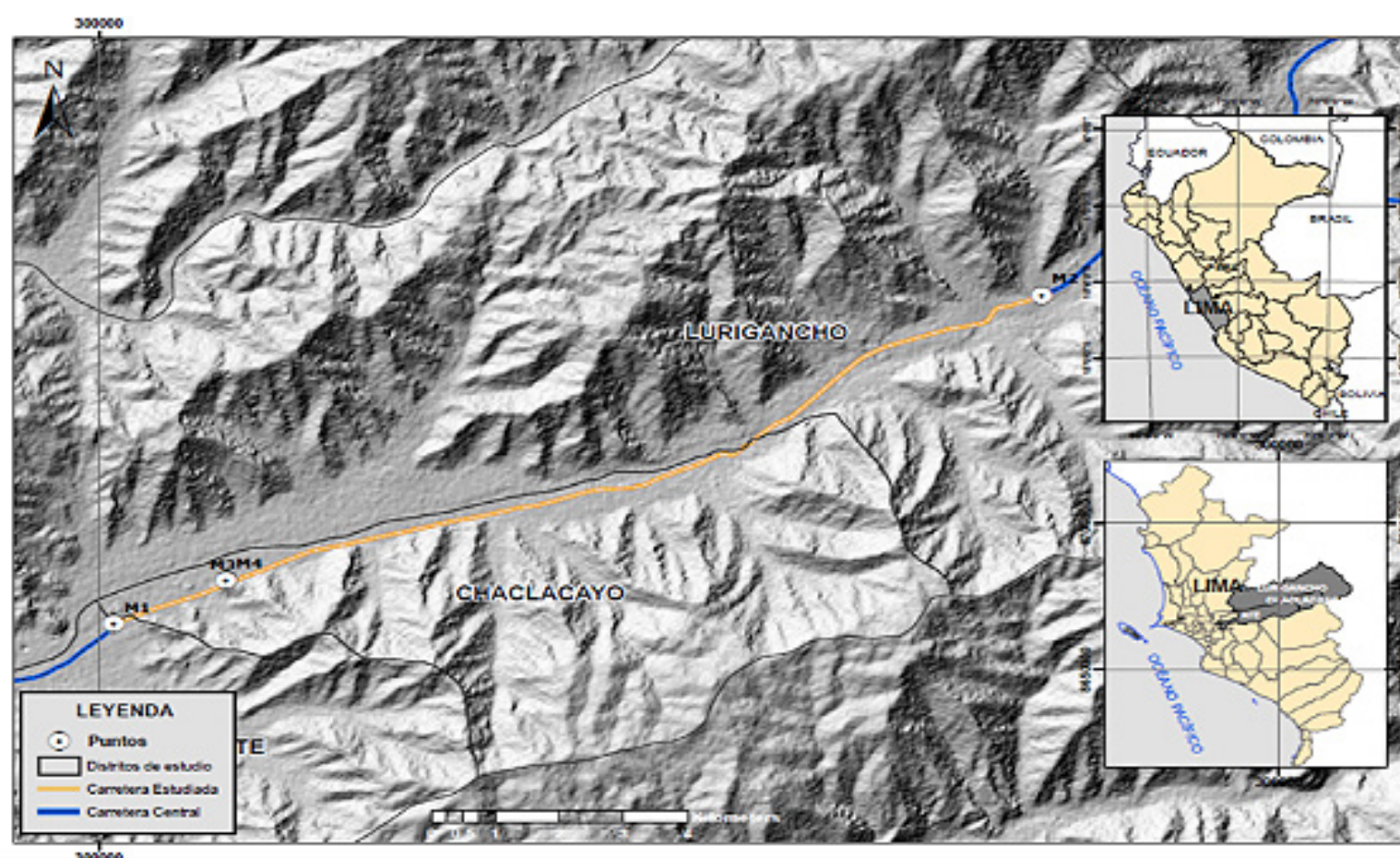


Fig. 1. Ubicación del estudio.
Fuente: Autores.

TABLA 1.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN COORDENADAS UTM.

Puntos	Ubicación – Descripción	Longitud	Latitud	Altura*
M1	Comunidad Autogestionaria de Huaycán	300227.00 E	8673135.00 S	511 m
M2	Cruce con la Avenida 7 de Junio	314704.00 E	8679344.00 S	846 m
M3	Cruce con la entrada de Ñaña dirección Este a Oeste	302003.09 E	8673959.94 S	548 m
M4	Cruce con la entrada de Ñaña dirección Oeste a Este	301979.56 E	8673951.48 S	550 m

* Altura en metros sobre el nivel del mar. La longitud y latitud UTM se encuentran en la zona 18 L.
Fuente: Elaborado por los autores.

B. Cálculo de Emisiones Vehiculares

Las emisiones vehiculares contemplan cinco tipos de emisiones, emisiones en caliente, por partidas en frío, evaporativas, polvo y desgaste, siendo las emisiones en caliente aquellas que se generan cuando el vehículo se encuentra en operatividad las que representa el mayor porcentaje del total de emisiones liberadas a la atmósfera. Las estimaciones de emisiones vehiculares en caliente se realizaron a partir de metodologías internacionales proporcionadas en la “Guía de Inventario de emisiones vehiculares del EMEP del año 2019” [16], en la sección para fuentes móviles, se partió de (1):

$$E_i = \sum_k \text{Nivel de actividad}_k \times FE_{ik} \quad (1)$$

Donde:

E_i : Emisiones (masa) del contaminante i .

$\text{Nivel de actividad}_k$: Nivel de actividad de la categoría vehicular k .

FE_{ik} : Factor de emisión del contaminante i para la categoría k (g/km).

Para los niveles de actividad se determinó el flujo vehicular durante 35 días continuos del 16 de noviembre al 20 de diciembre del 2020 mediante conteo vehicular en la sección de vía de estudio de 16.5 km de largo en las horas diurnas de 6:00 horas a 18:00 horas de cada día; se determinó la velocidad promedio de los vehículos en 55 km/h, y se clasificó a las categorías vehiculares en ruta (Tabla 2); a partir de establecer los niveles de actividad se obtuvo (2). Los factores de emisión en función de la velocidad para cada categoría vehicular se muestran en la Tabla 3 y Tabla 4.

TABLA 2.
CATEGORÍAS VEHICULARES.

Categorías	Vehiculos Considerados
A	Motocicletas, motos lineales, moto taxis, moto cars.
B	Vehículos livianos de pasajeros, taxis, colectivos, autos (4 pasajeros), Station Wagon, mini van (menor a 10 pasajeros).
C	Vehículos livianos comerciales, camionetas 4 × 4, camionetas, combis, furgones, mini van (15 pasajeros).
D	Buses interurbanos, buses interprovinciales, buses urbanos.
E	Camiones livianos ≤ 7.5 Tn, Coaster.
F	Camiones medianos 7.5 a 16 Tn.
G	Camiones pesados ≥ 16 Tn.

Fuente: Autores.

$$E_{ijk} = F_{jk} \times L_j \times FE_{ik} \quad (2)$$

Donde:

- E_{ijk} : Emisiones (Tn) del contaminante considerado i en una sección de vía j para la categoría vehicular k en una hora determinada.
- F_{jk} : Flujo vehicular (veh/h) total de la sección de vía j a la hora determinada.
- L_j : Largo de la sección de vía (km).
- FE_{ik} : Factor de emisión en función de la velocidad (g/km) del contaminante i para la categoría k (g/km).

La Tabla 2 muestra las categorías vehiculares asignadas, donde se agruparon diferentes tipos de vehículos según las similitudes técnicas que compartían estos, como la capacidad del motor de combustión interna, peso del vehículo, tipo de combustible usado, entre otras similares, donde se establecieron siete categorías como resultado.

La Tabla 3 y Tabla 4 muestran los factores de emisión en función de la velocidad para las siete categorías vehiculares establecidas en ruta, los factores de emisión son para condiciones de vehículos sin normas y tecnología de control de emisiones, y presentan una incertidumbre de $\pm 2\%$ [16], ya que en el Perú las políticas de control no son exigentes en su cumplimiento, y el acceso a la tecnología del control de emisiones vehiculares es más costosa que el propio vehículo en muchos casos [13]. Los agentes contaminantes considerados para la estimación de emisiones en caliente fueron, Material Particulado Respirable (MP_{10}), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (HCT), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O) y Amoníaco (NH_3).

TABLA 3.

FACTORES DE EMISIÓN EN G/KM, EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA LAS CATEGORÍAS VEHICULARES A, B, C.

Agente	Categoría A	Categoría B	Categoría C
PM10	-	0.019	$0.000045 \times V^2 - 0.004885 \times V + 0.1932$
CO	$0.0139 \times V^2 - 1.42 \times V + 55.0$	$0.0203 \times V^2 - 2.2662 \times V + 77.661$	$0.000223 \times V^2 - 0.026 \times V + 1.076$
HCT	$0.0015 \times V^2 - 0.164 \times V + 5.51$	$11.589 \times V - 0.5595$	$0.0000175 \times V^2 - 0.00284 \times V + 0.2162$
NOX	$0.00005 \times V^2 - 0.0009 \times V + 0.092$	$9.5 \times 10^{-6} \times V^3 + 0.0016 \times V^2 + 0.0738 \times V + 1.2586$	$0.000241 \times V^2 - 0.03181 \times V + 2.0247$
CO2	*	*	*
SO2	**	**	**
CH4	0.2	$3.31 \times 10^{-5} \times V^2 - 0.00573 \times V + 0.268$	0.005
N2O	0.002	0.005	0.017
NH3	0.002	0.002	0.001
CC	$0.02730 \times V^2 - 2.8490 \times V + 98.90$	$595.76 \times V - 0.534$	$0.0198 \times V^2 - 2.506 \times V + 137.42$

*, **: Los agentes CO₂ y SO₂ no presentan factores de emisión ya que son derivados del consumo de combustible CC y otras emisiones como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

Fuente: Autores.

TABLA 4.

FACTORES DE EMISIÓN EN G/KM, EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA LAS CATEGORÍAS VEHICULARES D, E, F Y G.

Agente	Categoría D	Categoría E	Categoría F	Categoría G
PM10	$9.2934 \times V - 0.7373$	$4.5563 \times V - 0.707$	$9.6037 \times V - 0.7259$	$10.933 \times V - 0.7054$
CO	$63.791 \times V - 0.8393$	$37.280 \times V - 0.6945$	$37.28 \times V - 0.6945$	$37.280 \times V - 0.6945$
HCT	$44.217 \times V - 0.8870$	$40.120 \times V - 0.8774$	$40.12 \times V - 0.8774$	$40.12 \times V - 0.8774$
NOX	$125.87 \times V - 0.6562$	$50.305 \times V - 0.7708$	$92.584 \times V - 0.7393$	$116.16 \times V - 0.5859$
CO2	*	*	*	*
SO2	**	**	**	**
CH4	0.175	0.085	0.085	0.175
N2O	0.03	0.03	0.03	0.03
NH3	0.003	0.003	0.003	0.003
CC	$1708 \times V - 0.5396$	$1425.2 \times V - 0.7593$	$1068.4 \times V - 0.4905$	$1678.7 \times V - 0.4593$

*, **: Los agentes CO₂ y SO₂ no presentan factores de emisión ya que son derivados del consumo de combustible CC y otras emisiones como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

Fuente: Autores.

Para la estimación de las emisiones de CO₂ se utilizó la metodología presentada en la EMEP/EEA [16], la cual establece y menciona que el carbono contenido en el combustible es oxidado a CO₂, teniendo en consideración que el carbono también es emitido como CO, hidrocarburos totales y material particulado. La ecuación (3) indica la estimación para el CO₂.

$$EE_{CO_2j} = 44.011 \times \frac{CC_{jm}}{12.0011 + 1.008 \times r_{H:C_m}} - \frac{E_{jm}^{CO}}{28.011} - \frac{E_{jm}^{HCT}}{13.85} - \frac{E_{jm}^{MP}}{12.011} \quad (3)$$

Donde:

	EE_{CO_2j}	:	Emisiones de CO_2 emitidas por el vehículo de la categoría j (Tn/día).
	CC_{jm}	:	Consumo de combustible del vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).
	E_{jm}^{CO}	:	Emisiones de CO emitidas por el vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).
j	E_{jm}^{HCT}	:	Emisiones de HCT emitidas por el vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).
	E_{jm}^{MP}	:	Emisiones de MP emitidas por el vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).
	$rH:C_m$:	Relación entre el hidrogeno y carbono existente en el combustible (1.8 para gasolina y 2.0 para diésel).

Para la estimación de emisiones de SO_2 se utilizó la metodología presentada en la EMEP/EEA [16], donde se asume que todo el contenido de Azufre (S) en el combustible se transforma completamente en SO_2 . Teniendo en cuenta que el peso atómico del Azufre es 32 y el del Oxígeno es 16, el peso final será entonces el doble que el del azufre, siendo (4) la forma de estimación, se asume que el contenido de azufre es de 60 ppm.

$$EE_{SO_2j} = 44.011 \times CC_{jm} \times Scont_m \quad (4)$$

Donde:

	EE_{SO_2j}	:	Emisiones de SO_2 emitidas por el vehículo de la categoría j (Tn/día).
	CC_{jm}	:	Consumo de combustible del vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).
	$Scont_m$:	Contenido de azufre del combustible tipo m (en peso m/m).

C. Construcción del Modelo Dinámico de Sistemas

Para la construcción del modelo dinámico se utilizó el software VENSIM PLE (v. 8.2.1) [20], se tomó como variables el tiempo de evaluación de la estimación de emisiones de 35 días, el número de vehículos contabilizados por categoría, los factores de emisión para cada agente contaminante, la velocidad promedio en la sección de la vía de estudio y el largo de la vía.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama dinámico de sistemas construido para estimar las emisiones en caliente generadas por la Categoría Vehicular A, se observa la variable "Time" que corresponde a los 35 días de evaluación, la cual ejerce un efecto directo en la variable "Numero de Vehículos Categoría A" correspondiente al flujo vehicular registrado cada día durante las horas diurnas del periodo de evaluación, de esta última variable se generan ocho nuevas variables "Emisiones PM10 A", "Emisiones CO A", "Emisiones HCT A", "Emisiones CC A", "Emisiones CH_4 A", "Emisiones NOX A", "Emisiones NH_3 A" y "Emisiones N_2O A", las cuales son producto de la relación de las variables "Velocidad Promedio A" y "Longitud de Vía A" con cada factor de emisión correspondiente a cada agente contaminante emitido representados en las variables "F.E. PM 10 A", "F.E. CO A", "F.E. HCT A", "F.E. CC A", "F.E. CH4 A", "F.E. NOX A", "F.E. NH_3 A" y "F.E. N_2O A".

Como proceso final de la estimación se generan las emisiones de CO_2 y SO_2 representadas en las variables "Emisiones CO_2 A" y "Emisiones SO_2 A", producto de la relación de las variables "Emisiones PM10 A", "Emisiones CO A", "Emisiones HCT A" y "Emisiones CC A" respectivamente como se indica en el diagrama (Fig. 2).

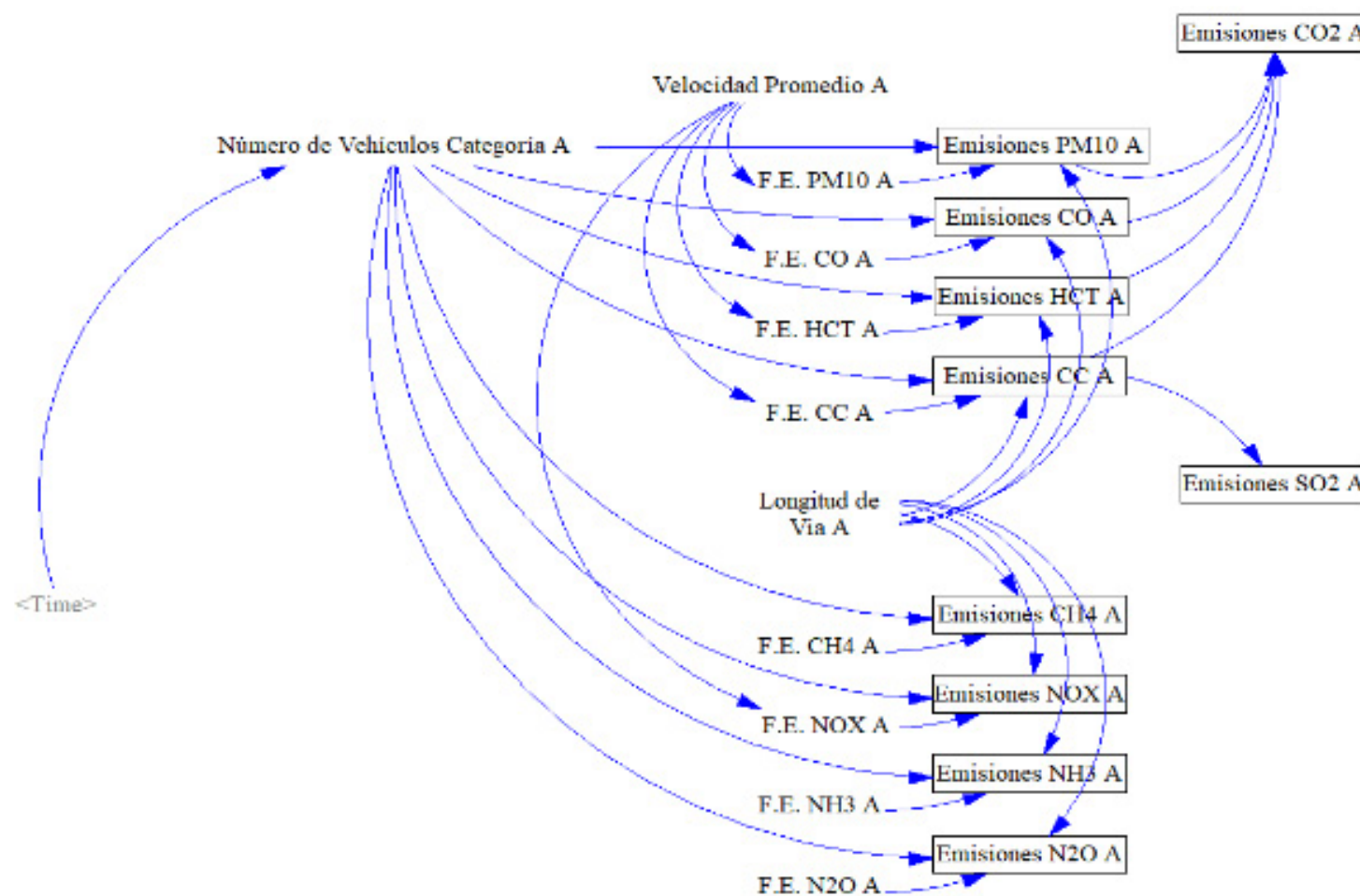


Fig. 2. Diagrama dinámico de sistemas para estimar las emisiones en caliente de la Categoría A.
Fuente: Autores.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama dinámico de sistemas construido para estimar las emisiones generadas por la categoría vehicular A, para las categorías B, C, D, E, F y G la estructura del diagrama se mantiene, las variables que se mantienen constantes son “Time”, “Velocidad Promedio” y “Longitud de Vía”, las variables que adoptan valores diferentes para cada categoría son “Numero de Vehículos Categoría”, “F.E. PM₁₀”, “F.E. CO”, “F.E. HCT”, “F.E. CC”, “F.E. CH₄”, “F.E. NOX”, “F.E. NH₃” y “F.E. N₂O”, obteniéndose emisiones diferentes en cada una de estas categorías asignadas para cada agente contaminante considerado como se observa en la Fig. 4 donde se muestra el diagrama dinámico de sistemas completo observándose una compleja relación entre variables de cada categoría, las emisiones generadas en cada categoría son sumadas obteniéndose las variables finales “Emisiones Totales CO₂”, “Emisiones Totales PM₁₀”, “Emisiones Totales CO”, “Emisiones Totales HCT”, “Emisiones Totales SO₂”, “Emisiones Totales CH₄”, “Emisiones Totales NOX”, “Emisiones Totales NH₃” y “Emisiones Totales N₂O”, como se observa en la Fig. 3.

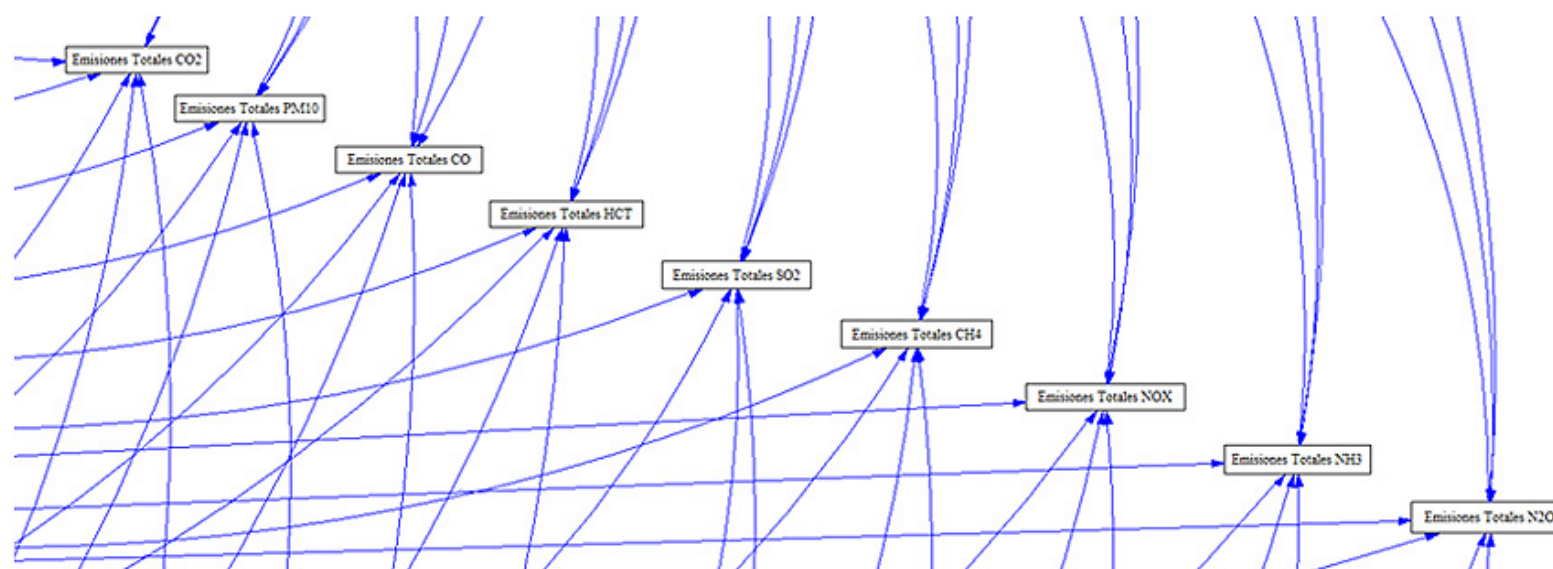


Fig. 3. Acercamiento del diagrama dinámico de sistemas final mostrando las Emisiones Totales para cada agente contaminante.
Fuente: Autores.

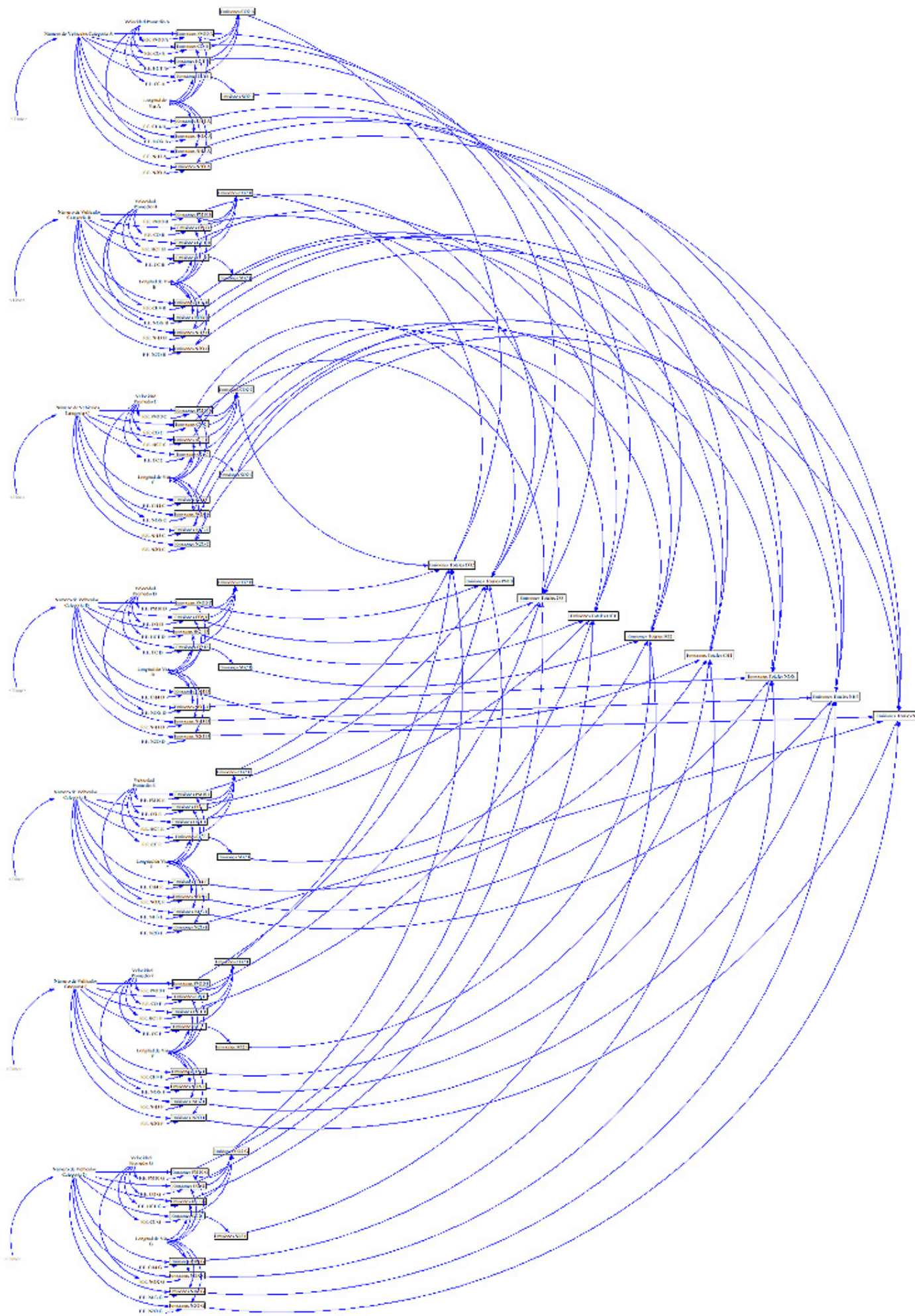


Fig. 4. Diagrama dinámico de sistemas para estimar las emisiones en caliente de la Categoría A, B, C, D, E, F y G.
Fuente: Autores.

III. RESULTADOS

A. Conteo de Unidades Vehiculare

Luego de realizar el conteo vehicular en la sección de vía de la carretera Central, se obtuvo el número de vehículos totales que circulan según las categorías establecidas, como se muestra en [Tabla 5](#), donde se observa la sumatoria de vehículos registrados por semana para cada categoría, así como el total de vehículos de cada categoría durante los 35 días de conteo y el total de vehículos contabilizados durante cada semana.

TABLA 5.
RESULTADOS DEL CONTEO VEHICULAR PARA CADA CATEGORÍA EN VEHÍCULOS/SEMANA.

Categorías	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Total
A	10304	9926	11200	11102	10472	53004
B	101353	112746	93492	100548	97132	505271
C	24688	16051	25760	25732	24556	116787
D	1940	1280	1652	1680	1848	8400
E	16430	14598	17808	18466	18564	85866
F	4824	6192	6328	7168	5992	30504
G	9910	8172	12936	11984	10836	53838
TOTAL	169449	168965	169176	176680	169400	853670

Nota: Los números indican el sumatorio total de vehículos contabilizados de forma mecánica durante cada semana del periodo de análisis según la categoría.

Fuente: Autores.

Como se observa en la Fig. 5 se contabilizaron 853670 unidades vehiculares durante los 35 días de análisis, la categoría con mayor de número de vehículos contabilizados corresponde a la B Vehículos livianos de pasajeros, taxis, colectivos y autos (4 pasajeros), con un total de 505271 vehículos, lo que equivale a un 59.18 % del total de unidades vehiculares, y la categoría con menor número de vehículos corresponde a la D, Buses interurbanos, buses interprovinciales y buses urbanos, con un total de 8400 vehículos equivalentes al 1.66% del total del unidades contabilizadas.

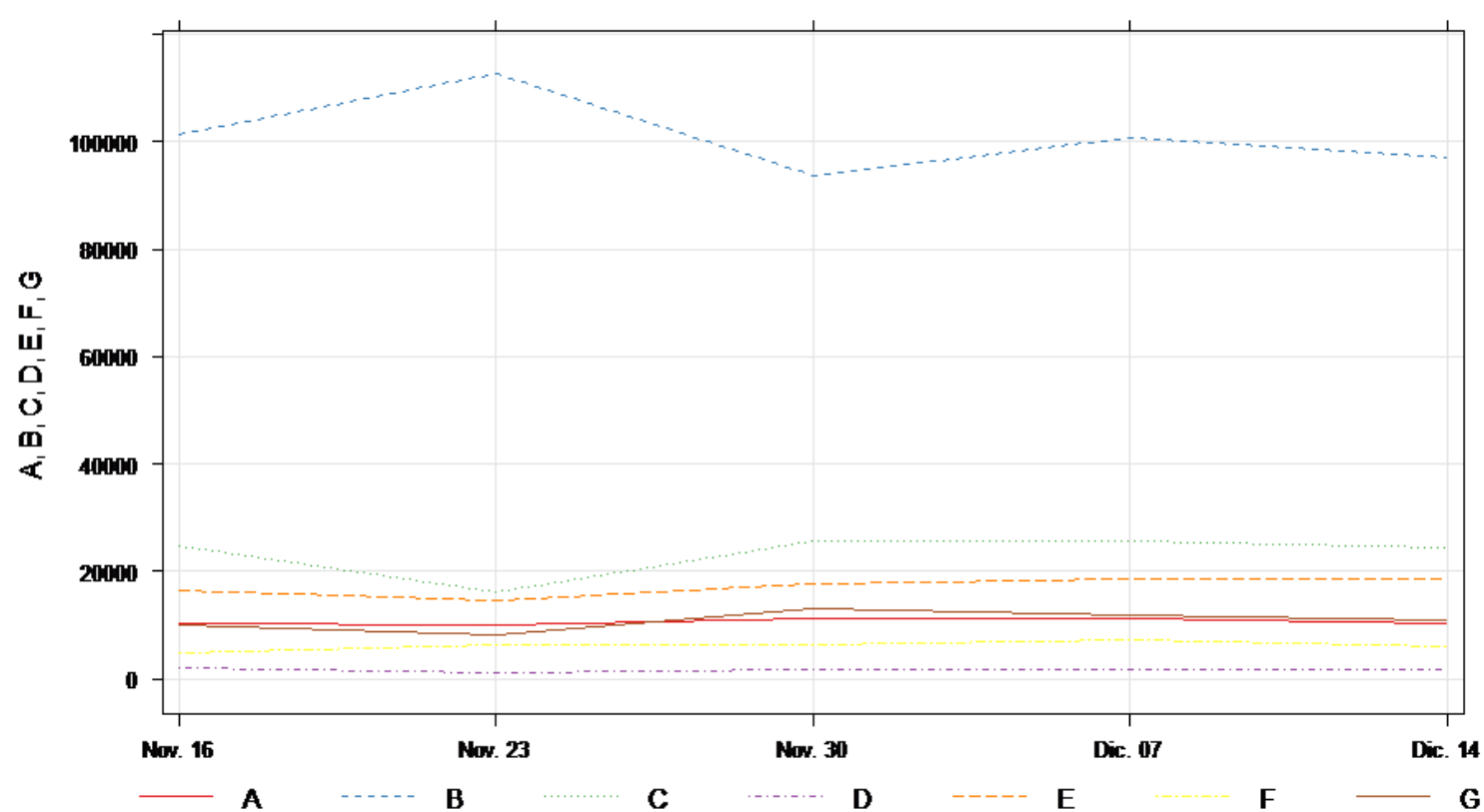


Fig. 5. Distribución del flujo vehicular registrado.

Fuente: Autores.

B. Emisiones Vehiculares en Caliente

Se cargaron los datos de niveles de actividad y factores de emisión en el modelo dinámico presentado en la Fig. 2, Fig. 3 y Fig. 4 mediante el software VENSIM PLE (v. 8.2.1) [20], donde se obtuvieron las estimaciones de emisiones en caliente para los agentes contaminantes Material Particulado Respirable (MP_{10}), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (HCT), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O) y Amoníaco (NH_3), generados por los vehículos contabilizados en la sección de vía de la carretera Central, obteniéndose los siguientes resultados gráficos.

1) *Emisiones de CO₂*

La Fig. 6 muestra gráficamente las emisiones generadas de CO₂ acumuladas para los 35 días de análisis, donde se observa que la categoría B es la que genera mayor cantidad de emisiones de forma considerable con un total de 29 802.60 toneladas, en segundo lugar, tenemos a la categoría G con un total de 11125 toneladas, seguidas de las categorías C, E, A, F con emisiones de 5 307.45, 4 573.29, 4 170.27 y 3 532.48 toneladas respectivamente en ese orden, por ultimo tenemos a la categoría D con 1 324.72 toneladas de CO₂.

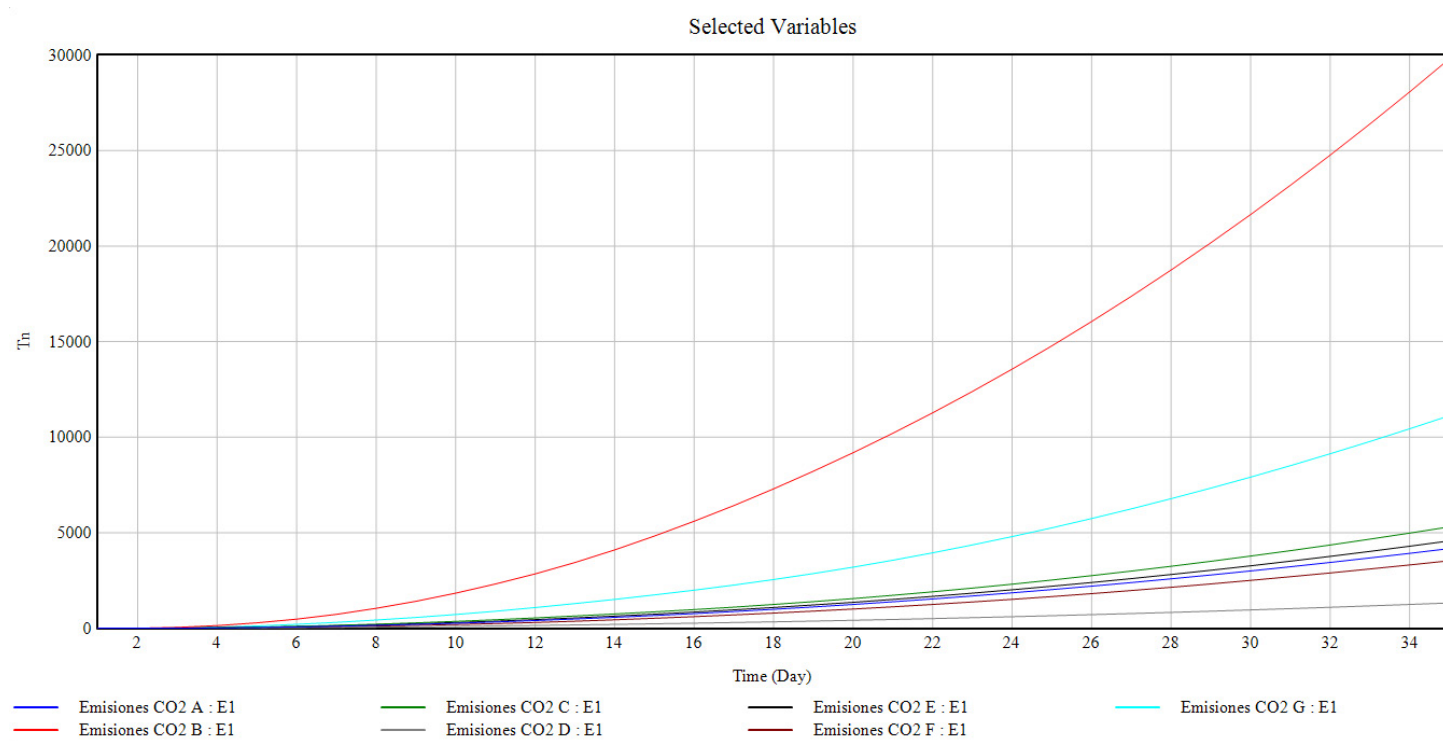


Fig. 6. Emisiones de CO₂ por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

2) *Emisiones de CO*

La Fig. 7 ilustra las emisiones generadas de CO acumuladas para los 35 días de análisis, se observa que la categoría B es la que genera mayor cantidad de emisiones con un total de 117.1 toneladas y, la categoría A ocupa el segundo lugar con 53 toneladas, en cuanto a las C, D, E, F y G estas 5 categorías generan emisiones menores entre 3 a 0.5 toneladas.

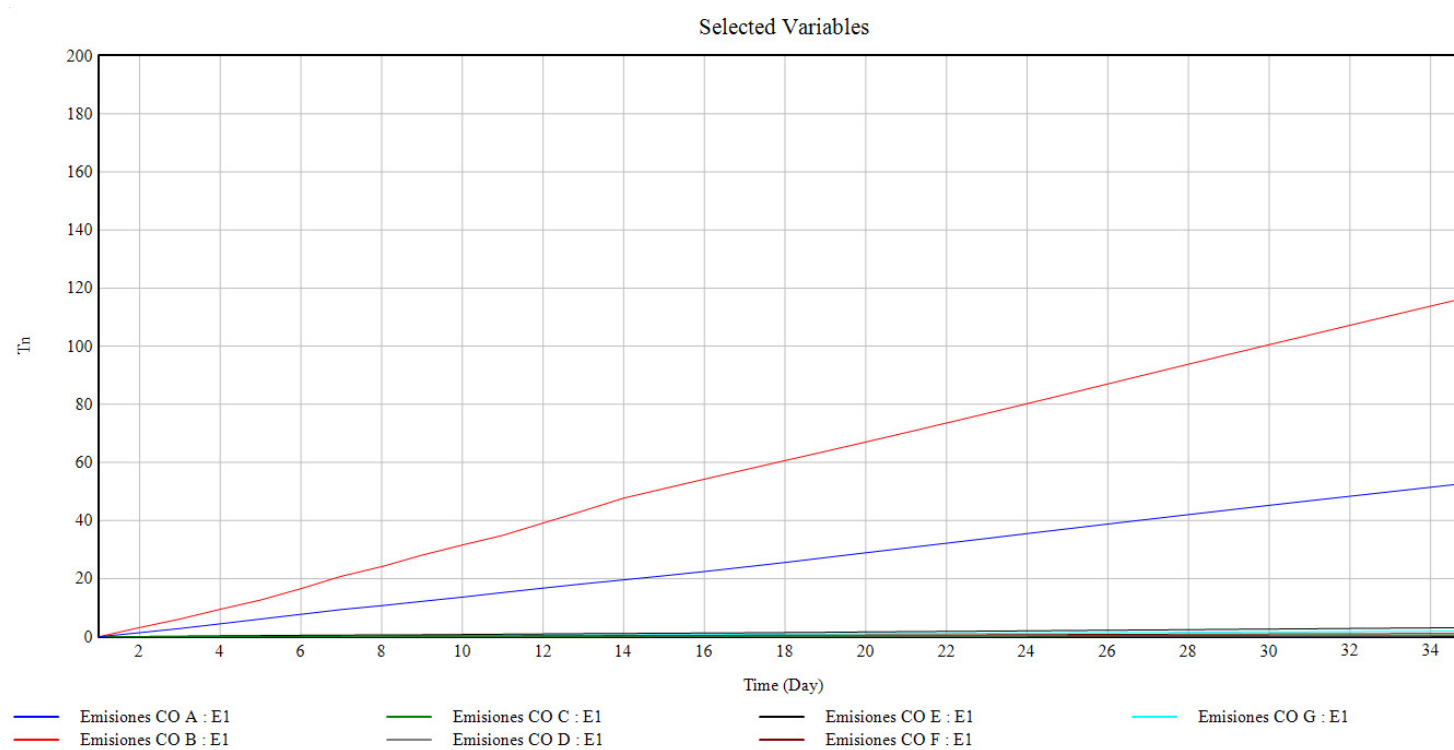


Fig. 7. Emisiones de CO por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

3) Emisiones de HCT

La Fig. 8 es una representación de las emisiones generadas de HCT acumuladas para los 35 días de análisis, observando que la categoría A es la que genera mayor cantidad de emisiones con un total de 53.04 toneladas y, la categoría B ocupa el segundo lugar con 9.99 toneladas, en cuanto a las C, D, E, F y G estas 5 categorías generan emisiones menores por debajo de las 1.6 toneladas.

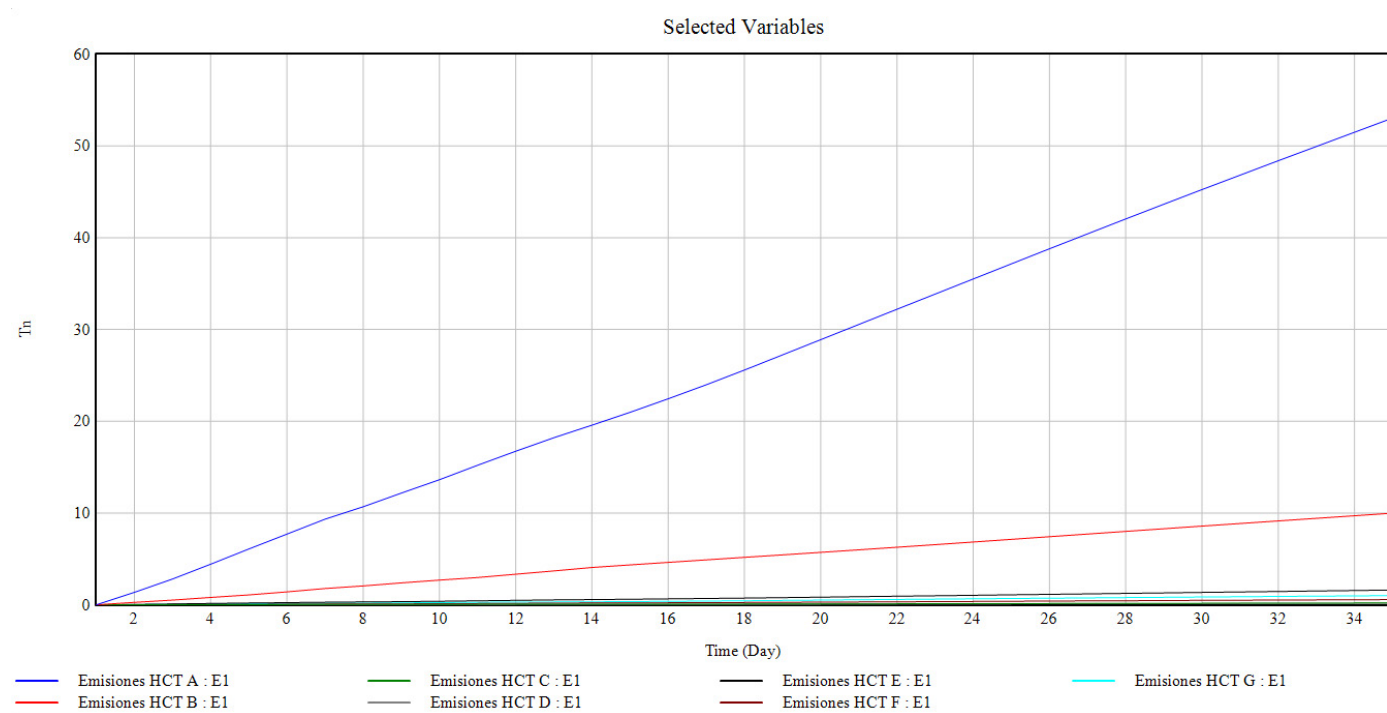


Fig. 8. Emisiones de HCT por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

4) Emisiones de NO_x

En la Fig. 9 se observan las emisiones generadas de NO_x acumuladas para los 35 días de análisis y se observa que la categoría A es la que genera mayor cantidad de emisiones con un total de 16.7 toneladas, en segundo lugar, tenemos a la categoría G con un total de 9.38 toneladas, en tercer lugar, a la categoría A con un total de 7.07 toneladas, seguidas de las categorías E, F, C y D con emisiones de 3.10, 2.29, 1.82 y 1.19 toneladas NO_x, respectivamente.

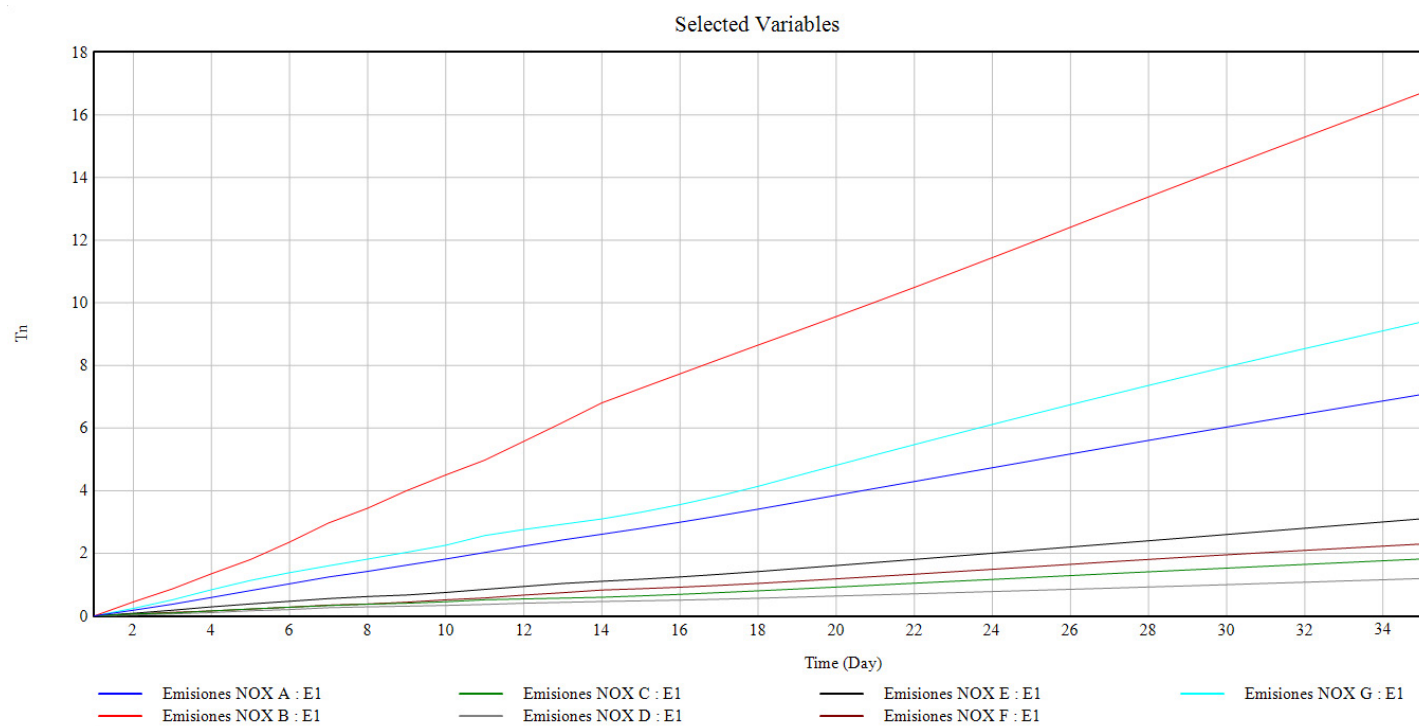


Fig. 9. Emisiones de NO_x por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

5) Emisiones de PM10

La Fig. 10 es una gráfica de las emisiones generadas de PM₁₀ acumuladas para los 35 días de análisis donde se observa para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, la categoría G es la que genera mayor cantidad de PM₁₀ con un total de 0.54 toneladas seguido de las categorías E, F, B, C, D con valores menores a 0.36, 0.25, 0.15, 0.10 y 0.06 toneladas respectivamente, la categoría A no tiene emisiones generadas, ya que para el cálculo de la estimación el factor de emisión correspondiente a esta categoría asume que no genera material particulado en el proceso de combustión.

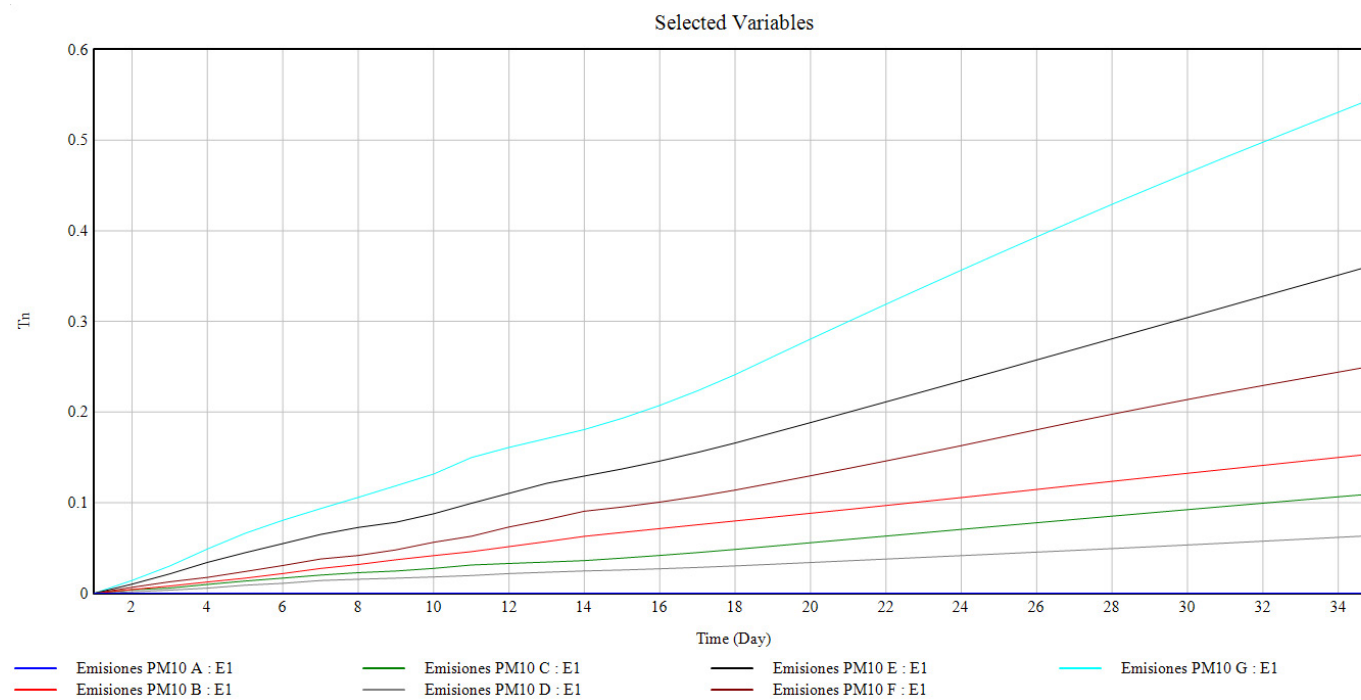


Fig. 10. Emisiones de PM10 por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

6) Emisiones de CH₄

La Fig. 11 representa las emisiones generadas de CH₄ acumuladas para los 35 días de análisis y se observa al igual que las emisiones de PM₁₀, para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, la categoría B es la que genera mayor cantidad de CH₄ con un total de 0.42 toneladas seguido de las categorías A, G y E con valores de 0.16, 0.14 y 0.11 toneladas respectivamente, siguiendo a estas tenemos por ultimo a las categorías F, D y C con valores de 0.04, 0.02 y 0.01 toneladas.

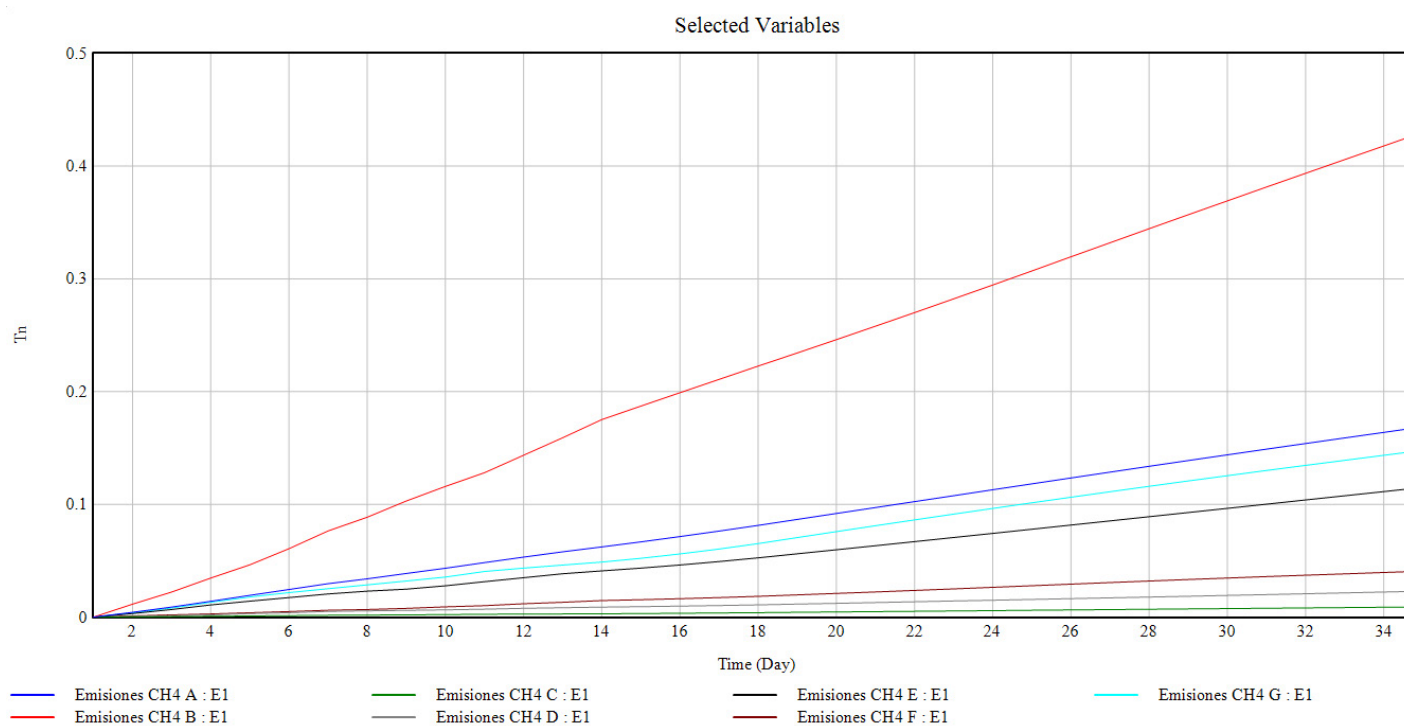


Fig. 11. Emisiones de CH4 por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

7) Emisiones de SO_2

La Fig. 12 ilustra gráficamente las emisiones generadas de SO_2 acumuladas para los 35 días de análisis donde se observa al igual que las emisiones de PM_{10} y CH_4 , para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO_2 y CO principalmente, la categoría B es la que genera mayor cantidad de SO_2 con un total de 0.95, en segundo lugar tenemos a la categoría G con un total de 0.35 toneladas, seguido de las categorías C, E, A y F con valores de 0.16, 0.14, 0.13 y 0.11 toneladas respectivamente, y por último la categoría D con un total de 0.04 toneladas.

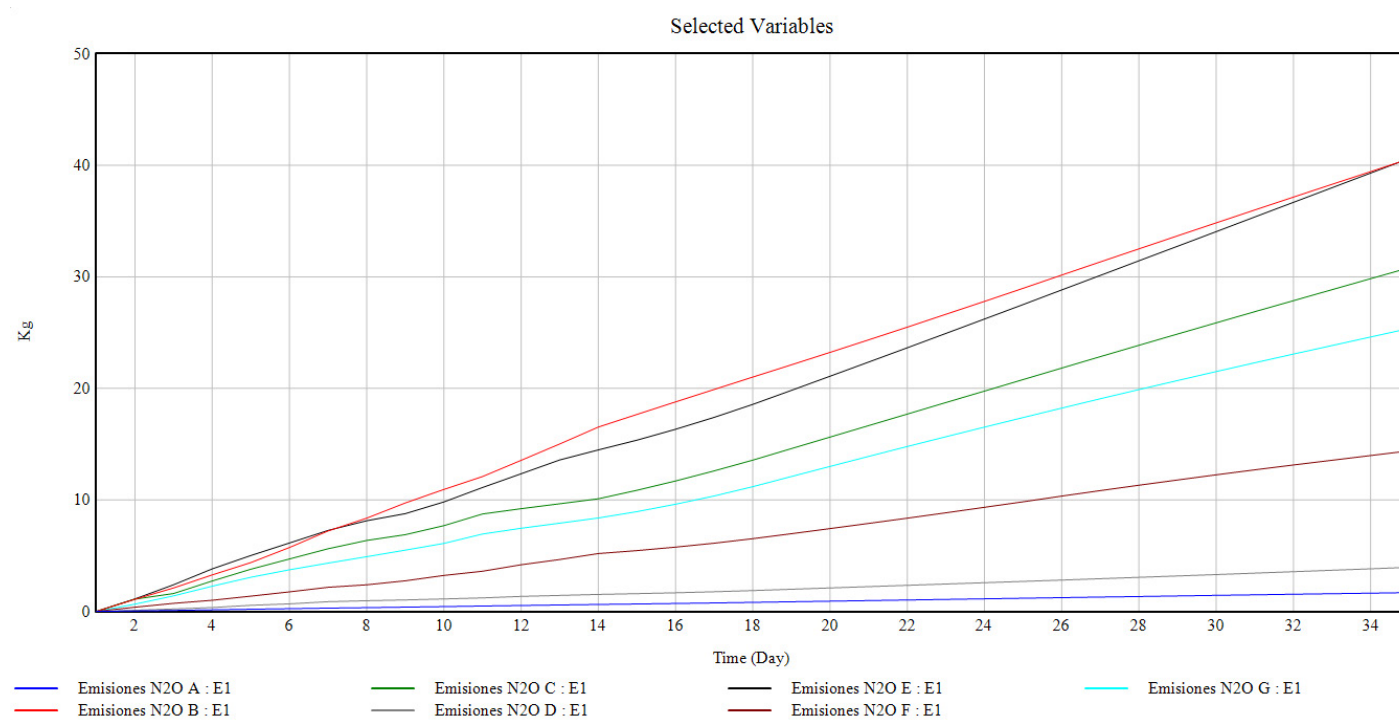


Fig. 12. Emisiones de SO_2 por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

8) Emisiones de N_2O

En la Fig. 13 se pueden observar las emisiones generadas de N_2O acumuladas para los 35 días de análisis y se observa al igual que las emisiones de PM_{10} , CH_4 y SO_2 para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO_2 y CO principalmente, las categorías E y B generan emisiones acumuladas muy similares con 40.6 y 40.5 kilogramos respectivamente, seguidas de las categorías C, G y F con valores de 30.8, 25.3 y 14.4 kilogramos respectivamente, por ultimo retomamos a las categorías D y A con 3.9 y 1.6 kilogramos respectivamente.

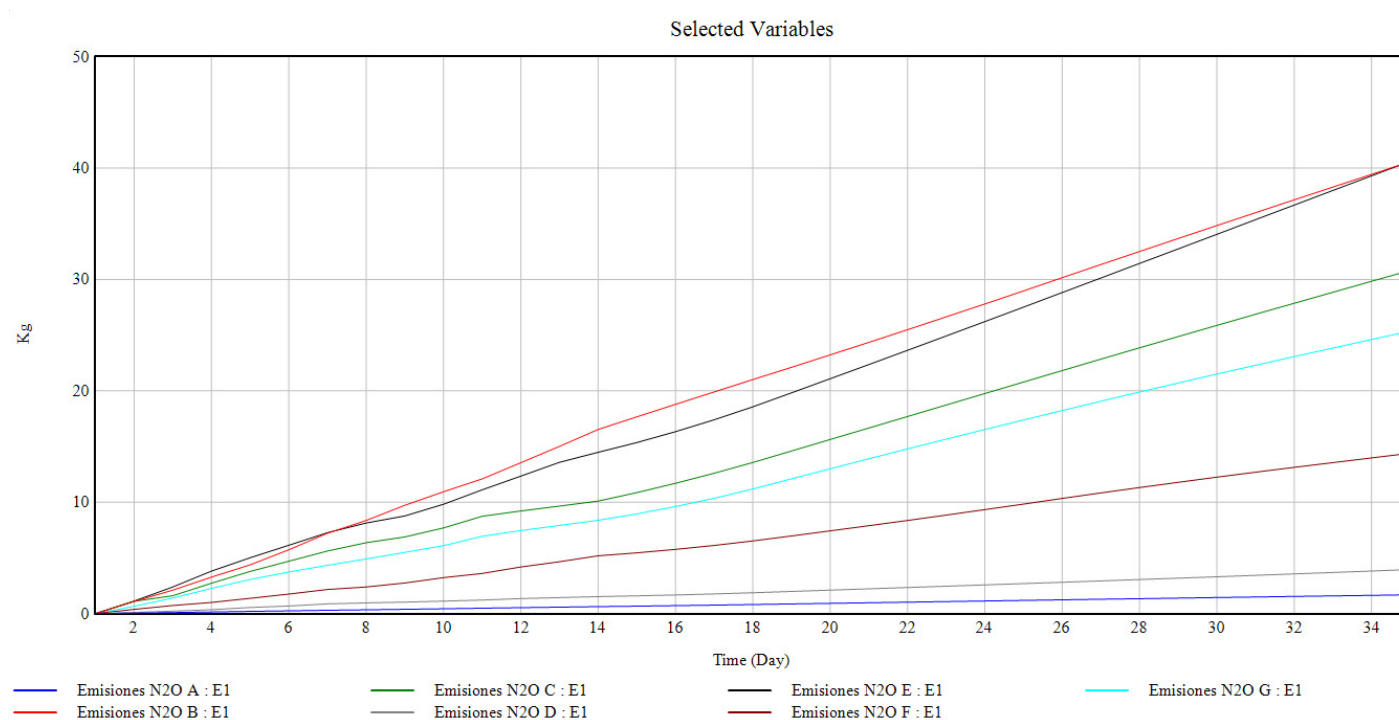


Fig. 13. Emisiones de N_2O por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

9) *Emisiones de NH₃*

La Fig. 14 es una gráfica representativa de las emisiones generadas de NH₃ acumuladas para los 35 días de análisis donde se observa al igual que las emisiones de PM₁₀, CH₄, SO₂ y N₂O para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación de las CO₂ y CO principalmente, la categoría B es la que genera mayor cantidad de NH₃ con un total de 16.2 kilogramos y, en segundo lugar tenemos a la categoría E con un total de 4.0 kilogramos, seguido de las categorías G, C, A y F con valores de 2.5, 1.8, 1.6 y 1.4 kilogramos respectivamente, por ultimo tenemos a la categoría D con 0.3 kilogramos.

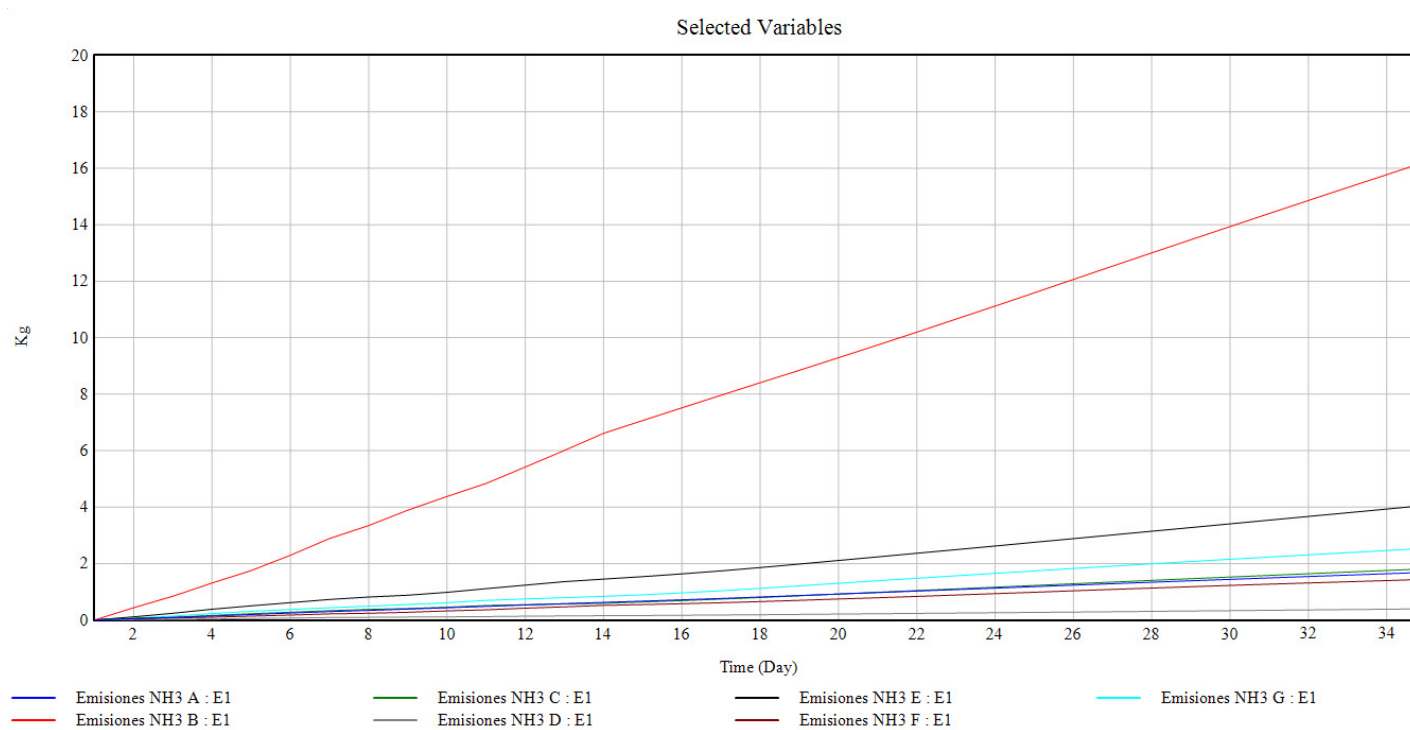


Fig. 14. Emisiones de NH₃ por categorías vehiculares.
Fuente: Autores.

Como se observa en las figuras generadas por el modelo las emisiones en caliente tienden a tener un comportamiento creciente y acumulativo debido a que los vehículos no cuentan con tecnologías de control de emisiones y no existe planes de gestión eficiente en la reducción de estas a mediano o largo plazo, la emisión con mayor masa emitida a la atmósfera por los vehículos contabilizados es el CO₂ donde las categorías B y G generaron los mayores valores con 29 802.6 y 11 125 toneladas, para el CO la categoría que emitió mayor cantidad fue la B y A con un total de 117.1 y 53 toneladas, para los HCT las categorías A y B con 53.04 y 9.99 toneladas, estos tres grupos de emisiones son las que representan las mayores emisiones; en cuantos a los siguientes contaminantes son emisiones menores, para el NO_x las emisiones mayores fueron generadas por las categorías A y G con 16.7 y 9.38 toneladas, para el PM₁₀ las mayor emisión la genero la categoría G con 0.54 toneladas, para el CH₄ la categoría B con 0.42 toneladas, para el SO₂ la categoría B con 0.95 toneladas, para el N₂O las categorías E y B con 40.6 y 40.5 kilogramos respectivamente, y por ultimo para el NH₃ la categoría B con un total de 16.2 kilogramos.

La Tabla 6 muestra el resumen de las emisiones totales de cada agente contaminante generadas por cada categoría vehicular, se observa diferentes masas de emisiones con respecto a los diferentes contaminantes, podemos agruparlos en tres tipos, emisiones mayores, medias y mínimas, con respecto al CO₂ es el agente contaminante con mayor emisión considerable con un total de 632 982 toneladas, las emisiones medias las conforman el CO, HCT y NO_x con 174.14, 66.57 y 41.55 toneladas respectivamente, las emisiones menores corresponden al PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃ los cuales generaron 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 y 0.02 toneladas respectivamente.

TABLA 6.
EMISIONES VEHICULARES TOTALES SEGÚN EL TIPO DE AGENTE CONTAMINANTE EN TONELADAS.

Categorías	CO ₂	CO	HCT	NOX	PM ₁₀	CH ₄	SO ₂	N ₂ O	NH ₃
A	4170.27	53.00	53.04	7.07	-	0.16	0.13	0.0016	0.0016
B	29802.60	117.10	9.99	16.70	0.15	0.42	0.95	0.0405	0.0162
C	5307.45	0.58	0.20	1.82	0.10	0.01	0.16	0.0308	0.0018
D	1324.72	0.29	0.16	1.19	0.06	0.02	0.04	0.0039	0.0003
E	4573.29	3.12	1.61	3.10	0.36	0.11	0.14	0.0406	0.0040
F	3532.48	1.10	0.57	2.29	0.25	0.04	0.11	0.0144	0.0014
G	11125.00	1.95	1.00	9.38	0.54	0.14	0.35	0.0253	0.0025
TOTAL	632982.00	177.14	66.57	41.55	1.46	0.90	1.88	0.1571	0.0278

Nota: Totalidad en toneladas.
Fuente: Autores.

C. Discusión

La investigación realizada por la UNCP (Perú) [18], tiene similitud con esta investigación en sus hallazgos, al encontrar como contaminante mayor al gas CO₂, así como, en su estudio de investigación también se estimó la cantidad de emisiones vehiculares en el distrito de Huancayo para el año 2016, la cual tomó una población de 61 504 vehículos, esta investigación determinó que el Dióxido de Carbono (CO₂), es el contaminante que se emite en mayor cantidad, con un resultado de 255 047.4 ton/año, el segundo contaminante que se emite en mayor cantidad es el Monóxido de Carbono (CO) con una cantidad de 36 348,4 tom/año, seguido del metano CH₄ con 770.2 tom/año y por último y en menor cantidad se obtuvo de los Óxidos Nitrosos (N₂O) con 7.3 tom/año, los resultados mencionados corresponden a la categoría de autos particulares; para la investigación se tomaron un total de 111 657 vehículos en la categorías A y B, donde se obtuvo que el agente contaminante se emite en mayor cantidad es el CO₂ con un total de 11 125 ton/día, el CO es el contaminante con mayor cantidad emitido con un total de 117.1 ton/día, el CH₄ es el sexto contaminante mayor emitido con una cantidad de 0.42 ton/día, y el N₂O se emite con un total de 0.04 ton/día, en su mayoría los contaminante son emitidos por la categoría B, que corresponde a los vehículos livianos que pertenecen a los taxis autos de 4 pasajeros y menores de 10 pasajeros. Ambas investigaciones muestran a la categoría B correspondiente a los autos particulares (menores de 10 pasajeros), son lo que tienen una mayor cantidad de emisiones, siendo el CO₂ es el agente contaminante con mayor presencia en el ambiente por ser vehículos menores y que utilizan mayormente la gasolina como combustible. Por otro lado, la evaluación de los contaminantes de la primera investigación fue utilizando el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) [18] mientras que el nuestro fue con la Guía de Inventario de emisiones vehiculares del EMEP que se ajusta al sistema dinámico [16].

Otro estudio realizado en Honduras [19], en un total de 283 168 vehículos encuentra también que el CO₂ es el contaminante con mayor impacto en vehículos cuyo combustible es la gasolina, en ella se estimó las emisiones vehiculares, donde el Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), Material Particulado (PM10) y Dióxido de Carbono (CO₂); en la ciudad de Tegucigalpa, en el año 2015, demostraron que el contaminante con mayor cantidad es el CO₂ y el de menos cantidad es el SO_x, utilizando la gasolina y el diésel como combustibles principales, los resultados podían variar de acuerdo al tramo de estudio por donde transiten los vehículos y el año de antigüedad de los vehículos, a comparación con nuestro estudio, se tiene al CO₂ en común, como el agente emitido en mayor cantidad, y en contraste, se tiene al NH₃ en menor cantidad, 0.0162 ton/día.

En Perú se realizó un análisis sobre la estimación de emisiones vehiculares en Lima [14], tomando como referencia a los inventarios de emisiones, estimaron los agentes provenientes del parque automotor, dividiéndolos en categorías vehiculares como autos, taxis, buses, camiones y mototaxis, asimismo las emisiones correspondían al consumo según el tipo de combustible.

Los agentes contaminantes estimados fueron CO_2 , CO, NOX, SO_2 , NOX, encontrando al CO_2 en mayor cantidad, seguidos por los demás agentes contaminados mencionados en ese mismo orden. Esta investigación tiene mucha semejanza al trabajo realizado, ya que ambas investigaciones demuestran que el CO_2 es el agente que se encuentra en mayor cantidad, seguido del CO, NOX, SO_2 y PM_{10} , cabe señalar que los resultados obtenidos por los autores anteriormente mencionados, son por año y la investigación presente fue por un periodo de 35 días, sin embargo, sea que el flujo vehicular aumente o disminuya, los agentes contaminantes lo harán de la misma forma.

En la IAO (Colombia) [15], en su proyecto de investigación llegó a caracterizar emisiones atmosféricas provenientes del parque automotor que transitaban cerca de la Universidad Autónoma de Occidente de Cali, tomando como parámetros 4 principales agentes contaminantes, donde se obtuvo como resultados para el Óxido de Nitrógeno (NOX) un total de 0.13954374 ton/día, para el Monóxido de Carbono (CO) una cantidad de 0.57723067 ton/día, para los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) 0.13665523 ton/día, y para Material Particulado (PM_{10}), en menor cantidad con un total de 0.00851015 ton/día.

IV. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo dinámico de sistemas con el software VENSIM PLE (v. 8.2.1) [20], que explica la realidad estudiada y estimó las emisiones liberadas a la atmósfera generada por el flujo vehicular que circula en la Carretera Central en horas diurnas de 6:00 a 18:00 horas, durante un periodo de 35 días continuos, en una sección de 16.5 km de extensión, en el cual se ingresaron datos de entrada relacionados al nivel de actividad vehicular, como el número de vehículos que circulan en ruta los cuales se clasificaron en siete categorías, se estableció la velocidad promedio de los vehículos en 55 km/h, los factores de emisión en función de la velocidad fueron tomados de la guía de inventario de emisiones EMEP/EEA 2019 para fuentes móviles tomando en cuenta los agentes contaminantes CO_2 , CO, HCT, NOX, PM_{10} , CH_4 , SO_2 , N_2O y NH_3 .

Se contabilizaron en total 853 670 unidades vehiculares distribuidas en siete categorías A, B, C, D, E, F y G, siendo la categoría B correspondiente a vehículos livianos de cuatro pasajeros la categoría con mayor número de vehículos registrados en ruta, representando un 59.18 % del total de unidades. El modelo estimó como principal agente gaseoso que se emite a la atmósfera al CO_2 con un total de 632 982 toneladas liberadas, tres agentes presentan emisiones medias CO, HCT y NO_x con 174.14, 66.57 y 41.55 toneladas respectivamente, las emisiones menores corresponden al PM_{10} , CH_4 , SO_2 , N_2O y NH_3 los cuales generaron 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 y 0.02 toneladas respectivamente.

En cuanto a las categorías vehiculares, la categoría B correspondiente a vehículos livianos de cuatro pasajeros es la que emite mayor cantidad de emisiones de CO_2 , CO y HCT, la categoría G Camiones pesados mayores a 16 toneladas y la categoría A Motocicletas suman también a estas emisiones, aunque en menor medida, en cuanto a las emisiones NO_x las categorías A Motocicletas y G Camiones pesados mayores a 16 toneladas, son las que generan las mayores emisiones de este agente contaminante, las categorías B Vehículos livianos de cuatro pasajeros, la categoría E Camiones livianos menores 7.5 toneladas y Coaster, y la categoría G Camiones pesados mayores a 16 toneladas son las categorías que generan mayor cantidad de emisiones de PM_{10} , CH_4 , SO_2 , N_2O y NH_3 [4].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en primer lugar a Dios, a nuestro Padres, a los estudiantes de la Universidad Peruana Unión por la participación en la etapa del conteo de vehículos en la Carretera Central, así como también al Ingeniero Darío Ccaccya Ccaccya por su orientación durante el desarrollo del modelo.

REFERENCIAS

- [1] M. Romero, F. Olite y M. Álvarez, "La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud", *Rev Cubana Hig Epidemiol*, vol. 2, no. 44, pp. 1-14, Abr. 2006. Disponible en <https://revepidemiologia.sld.cu/index.php/hie/article/view/691/671>

- [2] ONU PNUMA, “China será anfitrión global del Día Mundial del Medio Ambiente 2019, dedicado a la lucha contra la contaminación del aire”, *ONU*, Mar. 15, 2019. Disponible en <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/china-sera-anfitrión-global-del-día-mundial-del-medio>
- [3] J. Herrera, S. Rodríguez y J. Rojas, “Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica”, *Rev Tecnol en Marcha*, vol. 25, no. 1, pp. 54–63, Ago. 2011. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i1.176>
- [4] S. Iglesias y M. Gonzalez, “Situación de la contaminación atmosférica en Lima Metropolitana y Callao”, *Rev Inst investig Fac minas metal cienc geogr*, vol. 4, no. 7, pp. 13–17, Jul. 2001. Disponible en <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/2565>
- [5] F. Rojas, “Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana”, *Tesis doctoral*, UNALM, LI, PE, 2017. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3809>
- [6] G. Lira, “Impacto Ambiental del ParqueAutomotor”, *Hidráulic & Termofluid*, vol. 1, no. 1, pp. 3–4, Dic. 1999. Disponible en https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/hidraulica_mecanica/1999_n1/impacto.htm
- [7] INEI, “Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas”, Dic. 31, 2017. *gob.pe*. Disponible en <https://censo2017.inei.gob.pe/>
- [8] CMGALLC, *Primer Plan Integral de Saneamiento Atmosférico Lima–Callao PISA L-C 2005-2010*. LI, PE: Saneam, 2004. Disponible en <https://sinia.minam.gob.pe/tags/siar>
- [9] CONAM, *Geo Peru 2002-2004*. LI, PE: PCM, 2006. Disponible en <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/geo-peru-2002-2004-informe-nacional-estado-ambiente>
- [10] CMGALLC, *Avance: Plan de Acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao Diagnóstico de la gestión de la calidad ambiental del aire de Lima y Callao*. LI, PE: MINAM, 2019. Disponible en <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>
- [11] L. Sánchez, M. Fabela, O. Flores, J. Hernández, D. Vázquez y M. Cruz, “Revisión de la Normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera”, *Publicación Técnica No. 562*, IMT-SCT, QRO, MX, 2019. Recuperado de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>
- [12] CONAMA, *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*. STGO, CL: CONAMA, 2009. Disponible en https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dml_download&p=3494
- [13] MINAM, Gobierno publica índices de nocividad de combustibles y elabora ranking de los más dañinos para la salud y el ambiente, *gob.pe*, May. 10, 2018. Disponible en <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1280-gobierno-publica-indices-de-nocividad-de-combustibles-y-elabora-ranking-de-los-mas-daninos-para-la-salud-y-el-ambiente>
- [14] L. Dawidowski, O. Sánchez-Ccoyllo y N. Alarcón, *Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana - Informe Final*. LI, PE: SENAMHI/SAEMC, 2014. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12542/454>
- [15] K. Giraldo, “Caracterización y estimación de emisiones vehiculares en la Universidad Autónoma de Occidente”, *Proyecto de grado*, Fac Ing, depto Oper Sist, UAO, CA, CO, 2011. Disponible en <https://red.uao.edu.co/handle/10614/5372>
- [16] EEA/EMEP, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 - Technical guidance to prepare national emission inventories”, EEA, LX CITY, LU, *EEA Report No. 13/2019*, 2019. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- [17] C. Franco, G. Méndez y J. Espitia, “Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá mediante Dinámica de Sistemas”, *Ingeniería*, vol. 20, no. 2, pp. 209–231, Ago. 2015. <https://doi.org/10.14483/23448393.8436>
- [18] N. Roman, “Emisiones contaminantes de vehículos del Distrito de Huancayo”, Fac. Cienc. Forest. Amb, UNCP, HCYO, PE, 2017. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4137>
- [19] W. Fletes, “Estimación de las emisiones vehiculares en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras”, *Tesis de Master*, UNACIFOR, SGPQ, HN, 2016. Recuperado de <https://reporterosdeinvestigacion.com/wp-content/uploads/2019/04/2016-11-26.tesis-emisiones-vehiculares-wmf.pdf>
- [20] *Vensim*. (v. 8.2.1). Ventana Systems, Inc, Jan 2021. Available: https://www.vensim.com/documentation/vensim-8_2_1.html

Keren Abigail Prieto-Mostacero. Universidad Peruana Unión (Lima, Perú). <https://orcid.org/0000-0003-1084-1551>

Iveth Sheyla Ordoñez Luera. Universidad Peruana Unión (Lima, Perú). <https://orcid.org/0000-0001-5774-9061>

Joel Hugo Fernández-Rojas. Universidad Peruana Unión (Lima, Perú). <https://orcid.org/0000-0002-1761-2818>