

Optimización del uso de la energía en el transporte y su impacto en la calidad del aire: estimación de emisiones en el parque automotor de Medellín

Álvaro Delgado Mejía, Bayron Álvarez Arboleda, David Vanegas Metaute, Andrés Delgado Mejía, Julián Gómez Rueda, Ruby Sharay Estrada

**Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia**

Resumen

Para mayo de 2024 el parque automotor nacional ascendía a 19.34 millones de vehículos (RUNT), de los cuales el 61.6% corresponde a motocicletas y el 38.3% a automóviles, camioneta, camión, bus, entre otros. Por otra parte, según el último inventario de emisiones para Medellín y el Área Metropolitana (AMVA, 2022), el sector transporte ha sido identificado como el principal responsable de las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos sin quemar (HC) y material particulado (MP).

A partir de la caracterización del parque automotor local, el Área Metropolitana pudo cuantificar el impacto ambiental causado por las motocicletas (de dos tiempos y cuatro tiempos) que circulan por la ciudad, lo cual sumado a la contribución de los vehículos de cuatro y más ruedas, dan cuenta del problema de deterioro de la calidad del aire ocasionada por el sector transporte.

Es así como este estudio presenta una estimación de las emisiones contaminantes generadas por el parque automotor de motocicletas en Medellín y el Área Metropolitana, bajo un recorrido estandarizado, utilizando el International Vehicle Emission Model (IVE), un modelo ampliamente reconocido a nivel mundial para la evaluación de emisiones vehiculares.

Los resultados muestran que las emisiones gaseosas contaminantes alcanzan sus valores máximos durante las horas pico de movilidad, lo que resalta la necesidad de estrategias sostenibles en el sector transporte. En este contexto, la movilidad eléctrica se presenta como una alternativa viable para reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad del aire en la región.

Palabras clave: emisiones contaminantes; motocicleta; modelo IVE; huella de carbono; energía; transporte

Abstract

By May 2024, the national vehicle fleet totaled 19.34 million vehicles (RUNT), of which 61.6% correspond to motorcycles and 38.3% to cars, vans, trucks, buses, among others. Furthermore, according to the latest emissions inventory for Medellín and the Metropolitan Area (AMVA, 2022), the transportation sector has been identified as the primary contributor to emissions of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NOx), unburned hydrocarbons (HC), and particulate matter (PM).

Based on the characterization of the local vehicle fleet, the Metropolitan Area was able to quantify the environmental impact caused by motorcycles (two-stroke and four-stroke) circulating in the city. This, combined with the contribution of four-wheeled and multi-wheeled vehicles, highlights the problem of air quality deterioration caused by the transportation sector.

This study presents an estimation of the pollutant emissions generated by the motorcycle fleet in Medellín and the Metropolitan Area, using a standardized route, using the International Vehicle Emission Model (IVE), a widely recognized global model for assessing vehicle emissions.

The results show that gaseous pollutant emissions peak during peak travel hours, highlighting the need for sustainable strategies in the transportation sector. In this context, electric mobility is presented as a viable alternative to reduce environmental impact and improve air quality in the region.

Keywords: *polluting emissions; motorcycle; IVE model; carbon footprint; energy; transportation*

1. Introducción

En la actualidad, los grandes centros urbanos enfrentan un problema que cada vez se agrava más, la contaminación atmosférica causada por el uso de combustibles fósiles, tanto a nivel industrial como en el sector transporte, tal como lo indica Leroutier (Leroutier 2022) quien establece que el transporte por carretera es el principal contribuyente a las emisiones de carbono, especialmente en zonas densamente pobladas, (Barnes et al., 2019; Borge et al., 2018), quienes indican que este sector aportó el 21% de las emisiones totales de CO₂ en toda la Unión Europea (UE), mientras que para América Latina es responsable del 15% de las emisiones de CO₂. Medellín y su área metropolitana no son ajenos a esta situación y en el último inventario de emisiones (AMVA 2022) se señala que particularmente el sector transporte es el principal responsable de las emisiones de CO, NO_x y HC, donde los vehículos de transporte de carga y de pasajeros son los que más contaminan, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular en toneladas, para el año 2022 (AMVA, 2022).

Categoría vehicular	Emisiones (ton/año)				
	CO	SO _x	PM _{2.5}	NO _x	COV
Camiones	373,085.80	5.36	1,281.27	6,514.72	19,078.68
Volquetas	2,320.24	1.08	894.29	1,332.60	286.39
Buses servicio especial	197,594.27	2.08	781.49	2,467.39	10,278.63
Buses	18,869.67	1.47	252.49	1,646.33	1,211.54
Motos 4T	32,384.15	15.04	117.29	1,481.49	3,056.19
Autos	98,687.41	35.21	100.27	2,925.97	2,612.10
Tractocamiones	381.01	0.3	68.42	353.06	59.81
Autos servicio especial	1,873.43	2.12	20.22	267.24	85.94
Taxis	661.07	4.32	2.63	155.01	72.29
Motos 2T	19.17	0	0.16	0.01	7.54
Metropolitán	82.15	0.01	0.09	9.05	0.41
Total	725,958.37	66.99	3,518.62	17,152.88	36,749.51

El Área Metropolitana de Medellín y el Valle de Aburrá está conformada por 10 municipios (Medellín como capital del Departamento de Antioquia y núcleo principal, Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Itagüí, Sabaneta, Envigado, La Estrella y Caldas), ubicada a una altitud promedio de 1538 m.s.n.m. y ocupando una superficie de 1157 km²; según el DANE, para 2020 su población era de 4.06 millones de habitantes y un índice de motorización promedio cercano a los 400 vehículos por cada 1000 habitantes.

A partir de información de la Secretaría de Movilidad de Medellín, el parque automotor que circula en el Valle de Aburrá para 2024, era de 2.6 millones de vehículos (representando un incremento del 700% con respecto al año 2000), de los cuales el 40% corresponde a automóviles, buses, camiones, etc., y el 60% a motocicletas. A su vez, el parque automotor de motocicletas está distribuido entre 23.8% de baja cilindrada, 72% de cilindrada media, 3% de alta cilindrada, 1% de motocicletas de dos tiempos y 0.2% de motocicletas eléctricas. A diferencia de los automóviles, el parque automotor de motocicletas usa exclusivamente gasolina como combustible, con una demanda energética anual de 7710 TJ, que corresponde casi al 16% de la demanda total del sector transporte, aspectos que sumados a la antigüedad del parque, es importante a la hora de caracterizar las emisiones gaseosas contaminantes.

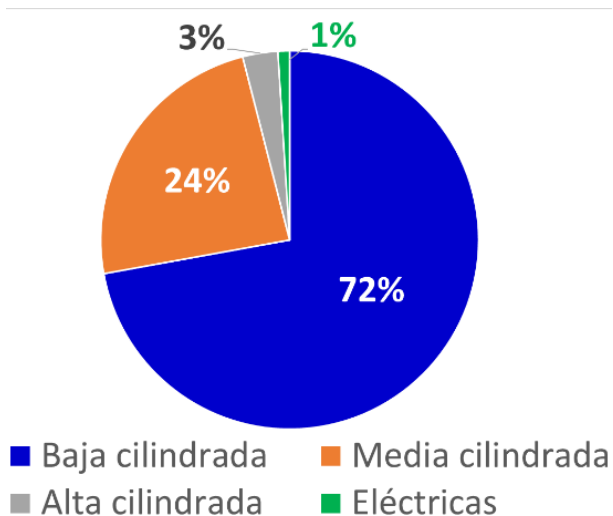


Figura 1. Distribución del parque automotor de motocicletas en el Valle de Aburrá (AMVA, 2022)

Atendiendo a la problemática que se acaba de describir, en este trabajo se efectúa una estimación de la carga de contaminantes gaseosos emitidas por el parque automotor de motocicletas que circulan por el Área Metropolitana, empleando el modelo IVE (*International Vehicle Emissions Model*), el cual ha sido ampliamente utilizado, incluso por organismos gubernamentales, para formular estrategias y legislaciones en materia ambiental. Algunos trabajos que se pueden mencionar son el de Giraldo et al. (Giraldo, 2022), quienes mediante el IVE desarrollaron un inventario de emisiones para la Ciudad de P, estimando cerca de 20.8 millones de toneladas anuales de emisiones generadas por las fuentes móviles, destacándose el CO con 16.7 Mton/año causado principalmente por los vehículos a gasolina, mientras que los camiones de carga contribuyen con el 57.2 % de las emisiones de CO y el 68.5% de las emisiones de material particulado. Por su parte, Lovera et al. (Lovera, 2024), Quinde Medina (Quinde, 2020), Román (Román, 2011) y Proaño (Proaño, 2023) llevaron a cabo estudios similares para las ciudades de Lima, Cuenca, Pasco y Riobamba, respectivamente, llegando prácticamente a la misma conclusión, que el fenómeno de la contaminación atmosférica se debe en gran medida a la actividad del sector transporte.

2. Metodología

El Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) es un modelo informático diseñado para estimar las emisiones de los vehículos con motor de combustión interna y tiene como objetivo ayudar a las ciudades y regiones a desarrollar estimaciones de emisiones para dirigir las estrategias de control y la planificación del transporte y predecir cómo éstas afectarán las emisiones locales. El modelo tiene la capacidad de realizar estimaciones de contaminantes atmosféricos locales (contaminantes de criterio), emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes tóxicos. Este modelo ha sido utilizado ampliamente en diversos estudios sobre emisiones en distintas partes del mundo.

En este trabajo, se siguió la secuencia de pasos ilustrada en la figura XX, donde primeramente se caracterizó el parque automotor de motocicletas de la ciudad de Medellín y su área metropolitana, en cuanto al tipo (cuatro tiempos y dos tiempos), sistema de suministro de combustible (carburador e inyección electrónica) y tamaño (cilindrada alta, media y baja). Igualmente se especificaron los parámetros propios de la localidad donde se efectúa el estudio, en este caso el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y finalmente se caracterizó el combustible utilizado por este tipo de vehículos.

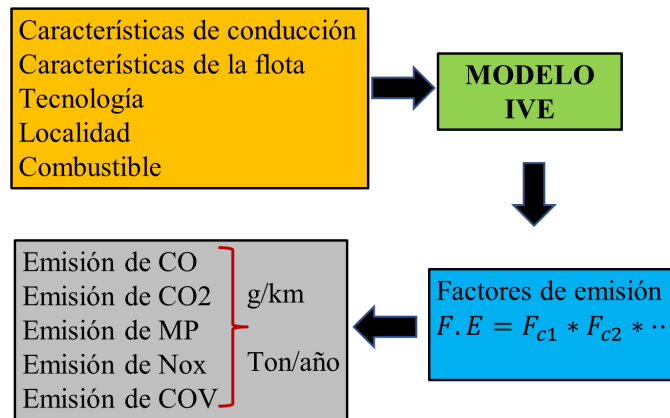


Figura 2. Etapas metodológicas para aplicar el modelo IVE

Posteriormente se crearon los archivos correspondientes a la flota y a la localidad, los cuales fueron cargados al modelo IVE para que los factores de emisión calculados estuvieran contextualizados a esta región en particular. En el archivo de localidad, se especifican los patrones de conducción (perfiles de velocidad y aceleración) y las condiciones ambientales del área de estudio (altitud, pendiente y temperatura), así como las características del combustible. Por su parte, el archivo de flota se especifican las tecnologías que componen la flota objeto del estudio (Tipo de combustible, contenido de azufre, contenido de etanol, sistema de suministro de combustible, sistema de control de emisiones, etc.). A continuación, se procedió a modelar tres escenarios correspondientes a situaciones de tráfico en horas de la mañana, medio día y noche, en uno de los principales corredores viales de la ciudad como es la carrera 80. De esta manera se obtienen los resultados de factores de emisión para el CO, CO₂, NO_x, COV y Material particulado.

3. Resultados

Una vez cargados en el modelo IVE los archivos de localidad y de flota, se procedió a modelar los tres escenarios planteados, recolectando la información que se presenta en la Figura 3, donde se muestran los resultados de emisión para las 8 AM.

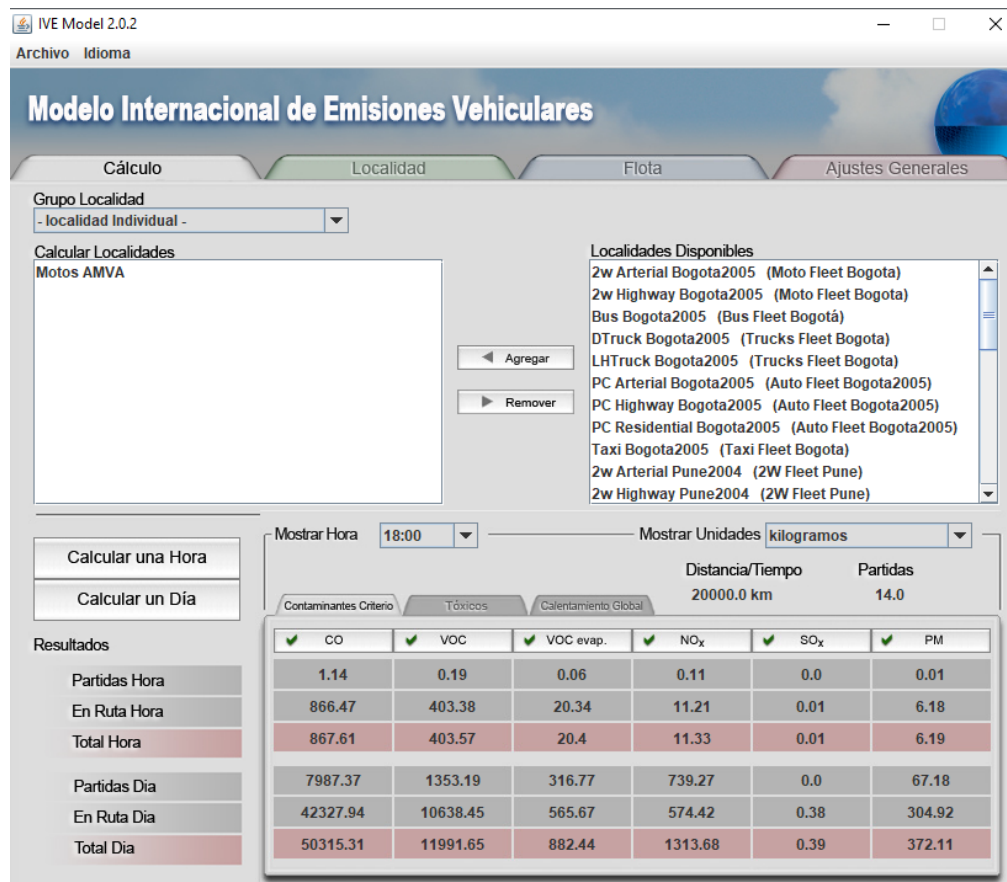


Figura 3: Resultados de factores de Emisión de CO, VOC, NO_x y PM, para el escenario de las 8 AM.

Tras procesar los resultados para todos los escenarios estudiados, en la figura 4, se muestra el comparativo de ellos, junto con el estimado de emisiones del parque automotor de motocicletas que hizo el Área Metropolitana en el último inventario de emisiones del año 2022, donde puede observarse que la hora más crítica, tanto por la congestión vial como por la cantidad de gases contaminantes emitidos, es la que corresponde al escenario matutino, entre las 7 AM y las 8 AM, ya que en este intervalo de tiempo se tuvieron los mayores factores de emisión para el CO, COV, NO_x, SO_x y PM, lo cual puede explicarse por la alta intensidad vehicular en este corredor vial y a que la velocidad de circulación promedio es levemente menor que en los otros dos escenarios estudiados. Con el fin de comparar con los datos publicados en el inventario de emisiones de 2022, los resultados del modelo que están en una base de kg/h se llevan a ton/h, proporcionando el número de motocicletas considerado en el este estudio, con el número total de motocicletas que circulan por Medellín. Las diferencias se deben a que en el inventario de emisiones se consideró información real y recorridos más amplios y en rutas diferentes a las que se abordó en este estudio, sin embargo, el modelo está dentro de un margen de error aceptable, si se tienen en cuenta las simplificaciones hechas en el modelo.

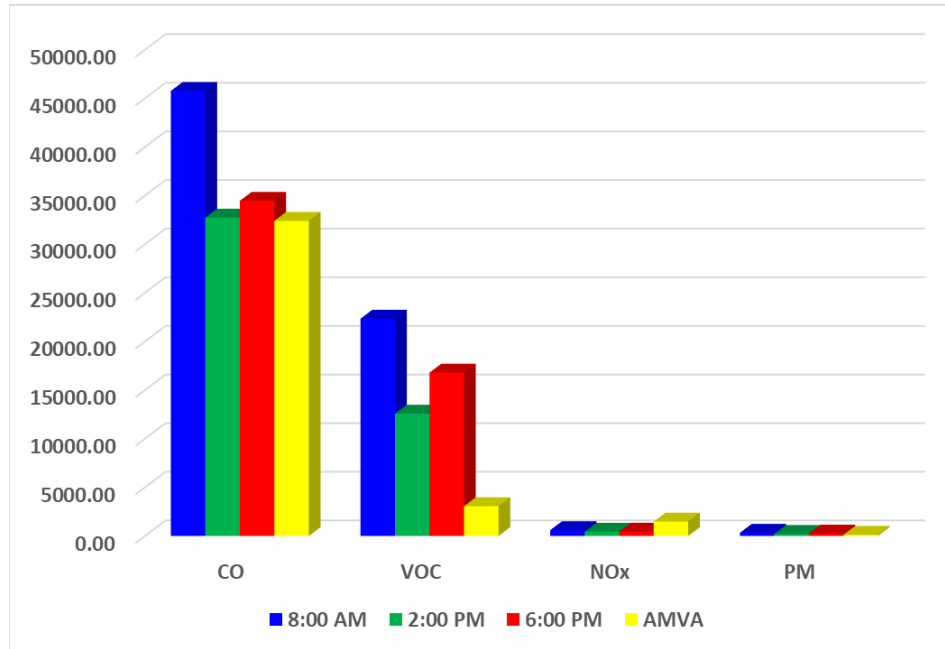


Figura 4: Emisiones (ton/año) de contaminantes criterio causadas por el parque automotor de motocicletas en el AMVA

La misma tendencia se encontró para las emisiones de gases de efecto invernadero, Figura 5, como el bióxido de carbono y el metano, siendo el horario matutino y nocturno los más críticos y no estando tan alejados del resultado publicado por el AMVA. Nuevamente, llevando las unidades del modelo de kg/h a ton/año, se ilustran los resultados a continuación.

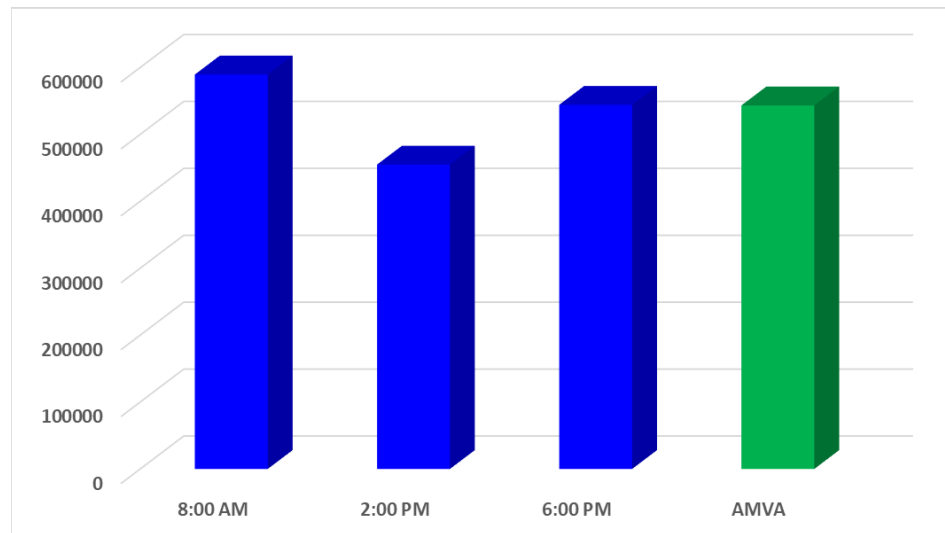


Figura 5: Emisiones de gases de efecto invernadero (Ton eq CO₂/año) por el parque automotor de motocicletas en el AMVA

En lo que respecta al uso de la energía, en el mismo informe se especifica que el sector transporte a gasolina demandó casi 30 TJ de energía en 2022, con un consumo de las motocicletas de 2 y 4

tiempos de 7711 TJ, correspondiente al 15.6%. En la medida en que siga aumentando el parque automotor de motocicletas con motor de combustión, también aumentará la demanda de gasolina y con ello un aumento en las emisiones gaseosas contaminantes, así como de gases de efecto invernadero. En este punto se plantea como alternativa el uso de motocicletas eléctricas o en su defecto incentivar a los usuarios de estos vehículos a que utilicen cada vez más el servicio de transporte público, particularmente el que es eléctrico (como el metro, el tranvía y los cables). En la tabla siguiente se muestra una proyección de cuánto disminuiría el consumo de gasolina para diferentes escenarios de sustitución a eléctrico del parque automotor de motocicletas en Medellín y el área metropolitana.

Tabla 2. Proyección de la disminución de consumo de gasolina por el parque automotor de motocicletas de Medellín y el AMVA.

% de sustitución	Consumo de energía (TJ/año)	Consumo de gasolina (gal/año)
0	7711	213 411 367
5	7325.5	202 740 798,7
10	6940	192 070 230,3
15	6554.4	181 399 662
20	6168.8	170 729 093,6

4. Análisis y conclusiones

En este trabajo se estimaron las emisiones contaminantes generadas por el parque automotor de las motocicletas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, utilizando el modelo IVE, desarrollado para tal fin. A partir de los resultados obtenidos, se pueden mencionar los siguientes aspectos como los más significativos.

- Teniendo en cuenta que a nivel nacional y local circulan más motocicletas (61%) que automóviles (40%), la contribución al problema de la contaminación ambiental se hace evidente.
- Los resultados del modelo indican que las emisiones de CO fueron las mayores, seguidas por las de VOC y NOX, para un recorrido típico a nivel urbano en la ciudad de Medellín.
- A partir de los resultados obtenidos, se pueden formular algunas estrategias e iniciativas para mitigar el problema de la contaminación, como:
 - mejorar la calidad de la gasolina.
 - Implementar programas de inspección y mantenimiento más rigurosos.
 - Fomentar el uso de sistemas de transporte públicos masivos (Metro, Metroplus, Cables, Tranvía e integradores).
 - Fomentar el uso de movilidad eléctrica, particularmente los unipersonales (patinetas eléctricas, bicicletas y motocicletas eléctricas)

- A partir de la caracterización del parque automotor local, el Área Metropolitana pudo cuantificar el impacto ambiental causado por las motocicletas (de dos tiempos y cuatro tiempos) que circulan por la ciudad, lo cual sumado a la contribución de los vehículos de cuatro y más ruedas, dan cuenta del problema de deterioro de la calidad del aire ocasionada por el sector transporte

5. Referencias

Artículos de revistas

- Giraldo, William & TORO, Maria V. (2008). Estimación de la emisión de contaminantes por motocicletas en el Valle de Aburra. Revista DYNA, 75(156), 241-250.
- 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(8).
- Quinde Medina, D. D. (2020). Estimación de emisiones de CO2 en taxis con cilindrada de 1400cc bajo parámetros de conducción normal en la ciudad de Cuenca, utilizando el modelo IVE (Master's thesis, Universidad del Azuay).
- Román, N. H., & Dávila, D. L. (2011). Estimación de emisiones contaminantes de las fuentes móviles en la ciudad minera de Pasco empleando el Modelo IVE. Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 1-10.
- Proaño Castellano, Y. B., & Castro Franco, K. E. (2023). Análisis de concentración de emisiones gaseosas vehiculares mediante el modelo IVE en el cantón Riobamba (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo).

Libros

- Echeverri L., Carlos. (2019). Contaminación Atmosférica. Primera Edición. Ediciones de la U, Bogotá, enero de 2019. Pp. 600. ISBN 978-958-762-941-5.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - fuentes móviles, año 2022.

Memorias de congresos

- Caballero Morales, M. (2011). Análisis de Emisiones de Vehículos Livianos Según Ciclos de Conducción Específicos para la Región Metropolitana.

Sobre los autores

- **Álvaro Delgado Mejía:** Ingeniero Mecánico, Máster en Energía de la Universidad de Antioquia. Profesor Auxiliar e investigador de la Institución Universitaria Pascual Bravo. alvaro.delgado@pascualbravo.edu.co
- **Bayron Álvarez Arboleda:** Ingeniero Eléctrico, Máster en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Políticas Culturales y Gestión Cultural. Profesor titular e investigador de la Institución Universitaria Pascual Bravo. b.alvarez@pascualbravo.edu.co

- **David Vanegas Metaute:** Estudiante de Ingeniería Mecánica e investigador de la Institución Universitaria Pascual Bravo. david.vanegas790@pascualbravo.edu.co
- **Andrés Delgado Mejía:** Estudiante de Ingeniería Mecánica e investigador de la Institución Universitaria Pascual Bravo. andres.delgado137@pascualbravo.edu.co
- **Julián Gómez Rueda:** Tecnólogo en Mecánica automotriz, estudiante de Ingeniería Mecánica e investigador de la Institución Universitaria Pascual Bravo. julian.gomez220@pascualbravo.edu.co
- **Ruby Sharay Estrada:** estudiante de Ingeniería Mecánica e investigadora de la Institución Universitaria Pascual Bravo. ruby.estrada422@pascualbravo.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)