



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE CO EN EL HABITÁCULO DE VEHÍCULOS  
SUBCATEGORÍA M1 EN LAS RUTAS MÁS TRANSITADAS DE LA CIUDAD DE  
CUENCA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Automotriz

**AUTORES: BRYAM DAVID ARPI PAÑI**

**ODALIS FIORELLA AYORA LOJA**

**TUTOR: ING. RAFAEL WILMER CONTRERAS URGILÉS, MSc.**

Cuenca - Ecuador

2023

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bryam David Arpi Pañi con documento de identificación N° 0107553604 y Odalis Fiorella Ayora Loja con documento de identificación N° 0106358823; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 27 de julio del 2023

Atentamente,



---

Bryam David Arpi Pañi

0107553604



---

Odalis Fiorella Ayora Loja

0106358823


## CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Bryam David Arpi Pañi con documento de identificación N° 0107553604 y Odalis Fiorella Ayora Loja con documento de identificación N° 0106358823, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo académico: “Análisis de los niveles de CO en el habitáculo de vehículos subcategoría M1 en las rutas más transitadas de la ciudad de Cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 27 de julio del 2023

Atentamente,



---

Bryam David Arpi Pañi

0107553604



---

Odalis Fiorella Ayora Loja

0106358823

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rafael Wilmer Contreras Urgilés con documento de identificación N° 0104463328, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE CO EN EL HABITÁCULO DE VEHÍCULOS SUBCATEGORÍA M1 EN LAS RUTAS MÁS TRANSITADAS DE LA CIUDAD DE CUENCA, realizado por Bryam David Arpi Pañi con documento de identificación N° 0107553604 y por Odalis Fiorella Ayora Loja con documento de identificación N° 0106358823, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 27 de julio del 2023

Atentamente,



---

Ing. Rafael Wilmer Contreras Urgilés, MSc.

0104463328

# ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE CO EN EL HABITÁCULO DE VEHÍCULOS SUBCATEGORÍA M1 EN LAS RUTAS MÁS TRANSITADAS DE LA CIUDAD DE CUENCA.

Bryam David Arpi Pañi<sup>1</sup>, Odalis Fiorella Ayora Loja<sup>2</sup>

## Resumen

Este estudio presenta una metodología para el análisis de los niveles del monóxido de carbono CO, en el habitáculo de vehículos subcategoría M1, mediante el uso de herramientas de medición de climatización TESTO 440. Para ello, se considera la normativa GOST 33554-2015, como también las directrices de la OMS sobre la calidad del aire en interiores. Para la obtención de datos de CO, se realizaron mediciones en diferentes vehículos con varios modos de ventilación a una frecuencia de registro de 1Hz, mediante el método de detección electroquímica. Las mediciones se llevaron a cabo en dos rutas, durante el tráfico en horas pico y en horas valle, tanto para sentido Norte-Sur y Sur-Norte. Los resultados revelaron que los modos de ventilación WC AC y WC VC mostraron la exposición más significativa en la cabina, en los 5 vehículos de prueba con valores promedios de 6,9 ppm y 4,9 ppm respectivamente. En el caso de los vehículos CAV y KR, se observó una infiltración de contaminantes mayor en un 21,5% en comparación con otros vehículos en el experimento. Esto revela que los vehículos con carrocería baja tienen una mayor susceptibilidad a la entrada de CO en cabina. Sin embargo, el 53,33 % del total de muestras no excedieron los límites establecidos por la normativa, indicando un estado de salud bueno para los ocupantes .

**Palabras clave:** monóxido de carbono, exposición en el habitáculo, modos de ventilación, límites de CO en el habitáculo.

## Abstract

This study presents a methodology for analyzing carbon monoxide (CO) levels in the cabin of M1 subcategory vehicles using TESTO 440 air conditioning measurement tools. The study considers the GOST 33554-2015 regulation, as well as the WHO guidelines on indoor air quality. CO data was obtained by measuring various vehicles with different ventilation modes at a recording frequency of 1 Hz, using the electrochemical detection method. The measurements were carried out on two routes, during peak and off-peak hours, for both North-South and South-North directions. The results revealed that the WC AC and WC VC ventilation modes showed the most significant exposure in the cabin, with average values of 6.9 ppm and 4.9 ppm, respectively, across the five tested vehicles. For CAV and KR vehicles, a 21.5% higher infiltration of contaminants was observed compared to other vehicles in the experiment. This indicates that these vehicles with low bodywork are more susceptible to CO entry in the cabin. However, 53.33% of the total samples did not exceed the limits established by regulations, indicating a good health state for the occupants.

**Keywords:** Carbon monoxide, in-cabin exposure, ventilation modes, in-cabin CO limits.

## 1. Introducción

Las emisiones contaminantes generadas por los vehículos de combustión interna (MCI) impactan en la calidad del aire, tanto en el interior de la cabina como en el medio ambiente [1]. Estas emisiones incluyen dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), hidrocarburos no combustionados (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y monóxido de carbono (CO), siendo los más nocivos para el medio ambiente y la salud los NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y el CO [2]. Este último (CO) es un gas venenoso, incoloro, inodoro e insípido, que tiene un efecto contraproducente en los seres humanos al combinarse con la hemoglobina de la sangre, y reducir el contenido de oxígeno en el torrente sanguíneo [3]. Altas exposiciones a este gas provocan efectos graves, como dolores de cabeza, mareos, debilidad, náuseas, confusión, pérdida de conciencia e incluso puede ser mortal [4].

Para mitigar estos efectos, las concentraciones de CO están reguladas por la normativa GOST 33554-2015 y directrices de la Organización mundial de la Salud (OMS). Dado que, los índices de mortalidad asociados con la exposición a la contaminación del aire tienen un impacto significativo en la salud humana a nivel mundial [5]. La investigación de [6] entre 1979 y 1988 ha registrado 500 muertes no intencionales, por intoxicación de CO causadas por emisiones de escape en los Estados Unidos. Años más tarde entre 1980 y 1995, el informe de [7] registra otras 56 muertes por la misma causa. De ellas 24 (43%), fueron causadas por sistemas de escape defectuosos y falta de ventilación en los compartimentos de pasajeros, 22 (39%) por la operación de vehículos de motor en espacios mal ventilados, y 10 (18%) por el uso de dispositivos de calefacción que queman combustible en habitáculos con ventilación inadecuada. En Ecuador, entre 2010 y 2022, se reportaron 20 muertes y 7 casos de intoxicación crónica por inhalación de monóxido de carbono en vehículos [8, 9, 10].

Estos incidentes resaltan la importancia de abordar de manera efectiva los problemas relacionados con la calidad del aire en el interior de los vehículos. Los estudios de [11, 12], han analizado la calidad del aire en el interior de la cabina, y demostraron que los altos niveles de concentraciones de CO en el habitáculo están influenciados por factores directos como; la proximidad con el tráfico, el modo de ventilación [13], y características propias de los automóviles; como la carrocería baja y el punto de entrada del sistema de ventilación [14]. Otro aspecto a considerar es el nivel de auto contaminación, evidenciada en un estudio de [15], donde demostró una exposición del 15% de CO y del 30% de PM<sub>2.5</sub> producto de la recirculación de los gases de escape y las emisiones generadas por el propio vehículo. En la misma línea, factores secundarios estudiados como el tipo de combustible [16], patrones

de conducción [17], meteorología, topografía [18], y el estado de la carretera [19], también influyen en el entorno contaminante, destacando las elevadas concentraciones de CO encontradas en túneles y autopistas. En el análisis de [20] se ha denominado a estos factores como parámetros micro meteorológicos no controlados, destacando su variabilidad en función del tiempo.

Con el fin de determinar las concentraciones de CO, en el año 2002 [21, 22] han estudiado varias áreas urbanas de Hong Kong encontrado que, en túneles, carreteras y entornos rurales, existen proporciones de 1.8, 8 y 10 ppm respectivamente, dependiendo del modo de ventilación. Estudios similares, como [23] se ha evaluado las emisiones contaminantes en túneles de Teherán, Irán (megaciudad contaminada) donde ha demostrado que la exposición promedio a CO y PM<sub>10</sub> dentro del vehículo es siete veces mayor cuando las ventanas estaban abiertas en comparación con las ventanas cerradas y el aire acondicionado encendido. Además, se ha observado que el CO y PM<sub>10</sub> aumentaban un 100 % y un 30 %, respectivamente, en comparación con la conducción en una autopista.

Los estudios anteriores se enfocan en factores directos, limitando la influencia de los modos de ventilación en los niveles de CO en cabina. Sin embargo, en el año 2007 [24], ha estudiado diferentes modos de ventilación que fueron; (WC VC) ventanas cerradas (WC), ventilaciones cerradas (VC) ; (WC AC Rec) ventanas cerradas (WC), aire acondicionado en recirculación (AC Rec) ; (WC AC FA) ventanas cerradas (WC), aire acondicionado en entrada de aire fresco o renovación de aire (AC FA) y (W1/20 VC) ventana semi abierta (W1/20) con ventilaciones cerradas (VC) y obtuvieron niveles medios de 20 ppm, concluyendo que las configuraciones (WC , VC) y (WC AC Rec), experimentaron los niveles de exposición más altos, con niveles medios de CO de 37,4 y 30,8 ppm respectivamente. Estos valores superaron las pautas establecidas por California Air Resources Board (CARB) de 20 ppm por hora y las directrices de la OMS para la calidad del aire interior (IAQ) de 26 ppm por hora. Así también han determinado los modos de ventilación menos significativos como; (WC AC FA) FA y (W1/20 VC) con valores medios de 19 y 18,4 ppm, respectivamente.

Como se mencionó previamente, existen investigaciones que analizan la relación entre los niveles de concentración de CO [11, 12], y los índices de mortalidad, considerando los diferentes modos de ventilación que afectan el estado de salud del habitáculo [24]. Continuando con los estudios de CO en cabina, este trabajo presenta una metodología para evaluar los niveles de CO en los vehículos más vendidos en Ecuador. Los niveles de CO encontrados se comparan con la normativa GOST 33554-2015 y las

directrices de la OMS. Esto con el fin de evaluar la influencia de los modos de ventilación en el estado de salud del habitáculo. Finalmente, se proponen medidas de mitigación cuando este gas supera las normativas y directrices de comparación. Aunque el confort térmico no fue objeto de estudio en esta investigación, es una variable relevante para futuros estudios.

## 2. Materiales y métodos

En esta sección, se describe en detalle el proceso metodológico aplicado en esta investigación, así como los materiales y herramientas utilizados.

### 2.1 Metodología

Este estudio se lleva a cabo mediante una metodología de dos fases. En la primera fase, se recopilan recursos bibliográficos sobre las normativas y directrices, relacionados con el estado de salud del habitáculo de pasajeros y la cantidad de CO. Además, se establece el protocolo, y las condiciones de prueba como: la ruta experimental y los modos de ventilación para los vehículos. En la segunda fase, se describe el proceso de toma y análisis de datos de las concentraciones de CO. En función al nivel de concentración encontrado, se realizan propuestas de mitigación de este gas, en el habitáculo. El detalle de la metodología se presenta en el flujograma de la Figura 1.

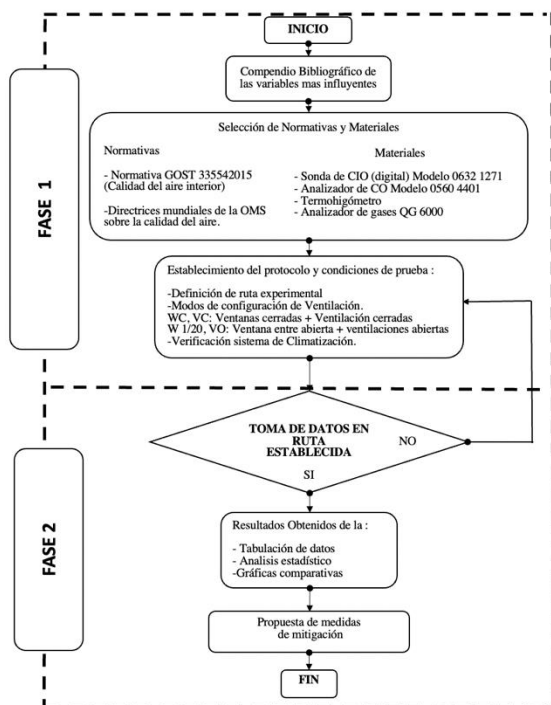


Figura 1. Metodología aplicada.

Definida la metodología, a continuación, se describen los materiales para el desarrollo del trabajo.

## 2.2 Materiales

A continuación, se realiza una descripción de los materiales, tanto bibliográficos como de experimentación. Los primeros, utilizados en este estudio son, la Normativa GOST 33554-2015 y las Directrices mundiales de la OMS. Los segundos, describen las características técnicas de los equipos de medición como: la sonda de CO, el termohigrómetro y el analizador de gases QG 6000.

### 2.2.1 Norma interestatal rusa GOST 33554-2015

En esta investigación, se aplica la normativa mencionada, la cual especifica los límites, métodos de ensayo y medición de los contaminantes en el interior de los vehículos. La normativa es un referente para evaluar la calidad del aire en los vehículos, y promover medidas de mitigación del CO en cabina. Es aplicable a vehículos de las categorías M, N, L6, L7 con MCI y compartimento interior cerrado. Fue desarrollada por el Instituto Central de Investigaciones Científicas para Automóviles y Transporte Automotor (NAMI). Implementada por el Comité Técnico Interestatal de Normalización MTK "Transporte de Carretera", en Rusia el 1 de abril de 2017 [25].

Determinada la normativa referente a este estudio, se han investigado las directrices de la OMS respecto al CO, en la calidad del aire.

### 2.2.2 Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire

En este estudio, se aplican las directrices de la OMS, las cuales establecen las concentraciones permisibles de CO, por ejemplo, un valor de 10 ppm para un período de 8 horas. Para obtener más información sobre estos valores, se puede consultar la Tabla 1. También se incluyen otras concentraciones como CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Además, las directrices proporcionan información general sobre los principales contaminantes, y sus efectos adversos en la calidad del aire.

Tabla 1. Directrices sobre la calidad del aire con tiempo y contaminante.

Contaminante $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tiempo promedio	Directrices sobre la calidad del aire que siguen siendo válidas
NO <sub>2</sub>	1 hora	200
SO <sub>2</sub>	10 minutos	500
CO	8 horas	10
	1 hora	35
	15 minutos	100

Tras determinar las directrices de la OMS, se especifica la instrumentación necesaria para el registro del CO.

### 2.2.3 Sonda de CO - TESTO 440

Para la experimentación, se utilizó el equipo TESTO 440, incluyendo la sonda de CO modelo 0632 1271, observada en la Figura 2 (a). Este equipo, cumple con los requisitos establecidos por la normativa [25]. La instrumentación fue configurada con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Este equipo posee un rango máximo de 500 ppm y una resolución de 0,1 ppm. El Testo 440 trabaja mediante el método de detección electroquímica. Como herramienta receptora de información, se recurre al medidor de climatización modelo 0560 4401 observado en la Figura 2 (b). Este almacena la información de la sonda. Sus especificaciones se describen en la Tabla 2.



Figura 2. (a) Sonda de CO modelo 0632 1271  
(b) Medidor de climatización Modelo 0560 4401.

Tabla 2. Especificaciones técnicas – Sonda de CO modelo 0632 1271

Características	Valor
<b>Rango de medición</b>	0 ... 100ppm (500ppm1).
<b>Exactitud</b> (a 22°C, ±1 dígitos)	±3ppm (0 ... 30 ppm). ±5ppm (30.1 -100ppm). ±10% del v.m (100.1-500ppm).
<b>Resolución</b>	0.1ppm
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	(-20 ... +50°C / recomendado: -1--+30°C)
<b>Temperatura de servicio</b>	(-5 ... +50°C)

Definida la instrumentación, es necesario conocer los parámetros de climatización, esto a través de un termohigrómetro.

### 2.2.4 Termohigrómetro

Para registrar los parámetros de climatización, como la humedad relativa y la temperatura, se emplea un Termohigrómetro Datalogger con sonda externa Elitech RC-4HC, el cual se muestra en la Figura 3. Consultar las especificaciones técnicas en la Tabla 3.



Figura 3. Termohigrómetro Datalogger

Tabla 3. Especificaciones técnicas – Termohigrómetro Datalogger

Especificaciones técnicas	
<b>Opciones de grabado</b>	Multiuso
<b>Rango de Temperatura</b>	de -30°C a 60°C (sensor interno) s-40°C a 85°C (sensor externo)
<b>Rango de Humedad</b>	10% - 99%
<b>Exactitud</b>	+0.5(-20°C/+40°C); +3%RH (25°C,20%RH a 90%RH),
<b>Resolución de Temperatura</b>	de 0.1°C,0.1%RH

Registrados los parámetros en el interior del vehículo, se han medido las emisiones en el escape, utilizando un analizador de gases.

### 2.2.5 Analizador de Gases

Con la finalidad de comparar y contrastar, la influencia de la contaminación en el habitáculo con la externa, se utiliza el analizador de gases modelo QGA 6000. Este equipo, observado en la Figura 4, es utilizado para medir y analizar la composición de los gases presentes en el escape, de los vehículos de prueba. En la Tabla 4 se describen las especificaciones técnicas.



Figura 4. Analizador de gases modelo QGA 6000



**Tabla 4.** Especificaciones técnicas – analizador de gases modelo NGA 6000

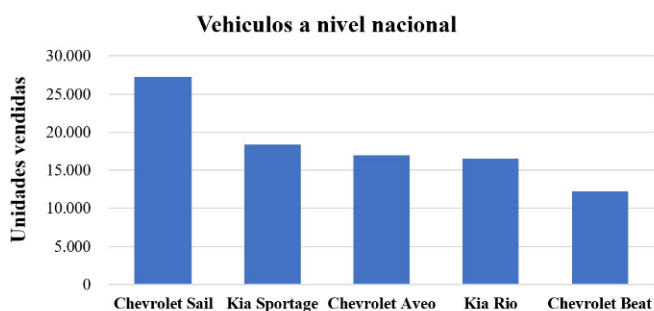
ANALIZADOR DE GASES (QGA-6000)				
<b>Medición</b>	CO, HC, CO2, λ (tasa de excedente de aire), AFR, NOx			
<b>Método</b>	CO, HC, CO2: Método NDIR			
<b>Medida</b>	O2, NOx Célula electroquímica			
<b>Mediciones</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>CO2</b>	<b>O2</b>
<b>Rango Medición</b>	0.00-9.99%	0-9,999 20,000ppm	20,000 ppm	0.020.0% 0.0~20.0%
<b>Resolución</b>	0.01%	1ppm	0.10%	0.01%
<b>Tiempo Respuesta</b>	Dentro de 10 segundos (más del 90%)			

Establecidos los equipos para la adquisición de datos, se seleccionan los vehículos de prueba.

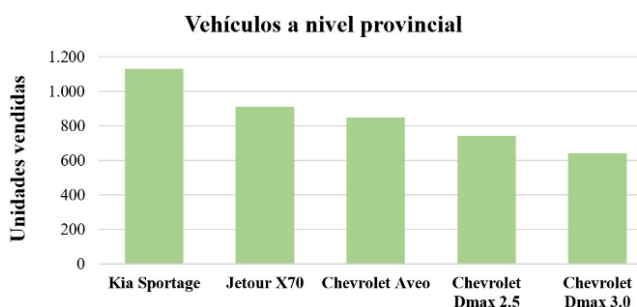
### 2.2.6 Vehículos de prueba

Las pruebas de campo se realizaron en cinco vehículos de categoría M1. De acuerdo con [26], esta categoría abarca el transporte de no más de 8 asientos, con 3 o 5 puertas y ventanas laterales detrás del conductor.

Estos vehículos fueron seleccionados en base a las estadísticas de ventas tanto a nivel nacional (Figura 5) como provincial (Figura 6). La información fue obtenida de los anuarios de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE). Con estos datos, se establece una matriz, con las cifras anuales de los vehículos más vendidos en Ecuador, organizados por marca y modelo, desde el año 2017 hasta el 2022 [27, 28, 29, 30, 31].



**Figura 5.** Vehículos más vendidos a nivel Nacional.



**Figura 6.** Vehículos más vendidos a nivel Provincial.

Tras comparar las estadísticas a nivel nacional y provincial, se han seleccionado los cuatro primeros vehículos de la Figura 5: Chevrolet Sail, KIA Sportage, Chevrolet Aveo Family y KIA Rio Sedán.

Sin embargo, los vehículos a nivel provincial, Chevrolet Dmax 3.0 y Chevrolet Dmax 2.5, que son modelos diésel, no se consideraron en la muestra. En su lugar, se seleccionó el modelo Jetour X70.

En la Tabla 5, se presentan las características técnicas de los vehículos mencionados.

**Tabla 5.** Características técnicas de los Vehículos

NOM	Marca	Modelo	Año	KM	CC	Tipo
CAV	Chevrolet	Aveo Family	2010	163269	1600	Sedan
CSD	Chevrolet	Sail STD	2016	79467	1400	Sedan
KST	KIA	Sportage	2007	170540	2000	SUV
JX70	Jetour	X70 II	2023	12848	1500	JEEP
KR	KIA	RIO	2019	73077	1400	HB

Seleccionados los vehículos de experimentación se explica la ruta de prueba.

### 3. Georreferencia de Ruta de pruebas.

El área de estudio, Cuenca-Ecuador, se encuentra en 2°54'02.0"S 79°00'16.3"W, a una altitud de 2500 msnm, donde la temperatura (°C) y humedad relativa (%) promedio anual son 16,3 y 84,4 respectivamente.

Las pruebas se realizaron durante los meses de mayo, junio y julio, con temperaturas promedio de 16,2°C, 15,9°C y 14,9°C, y una humedad relativa atmosférica promedio, de 86%, 87% y 86% respectivamente.

De acuerdo a [32] son 90.000 los vehículos que ingresan al Centro Histórico a diario, ya sea públicos o privados. En cuanto a los habitantes de la ciudad, el 7.7% elige caminar, el 58.8% usa el transporte público y el 32.7% cuenta con auto propio. Este último porcentaje, representa un número significativo de personas expuestas a efectos graves del CO. Con el fin de incluir esta muestra al análisis, las rutas seleccionadas abarcan las calles y avenidas con mayor flujo vehicular de la ciudad. Por lo que se ha tomado las rutas de [33] como referencia.

Las rutas de prueba se muestran en la Figura 7, la primera de color rojo en sentido Norte – Sur, y la segunda de color azul en sentido Sur – Norte.



Figura 7. Rutas de prueba.

En la etapa de experimentación se realizó un total de 30 mediciones, con un tiempo aproximado de 45 a 60 minutos en cada viaje, 15 para hora valle y 15 para hora pico. Estas se subdividieron, para los 5 vehículos de prueba estudiados, con los tres modos de ventilación previamente establecidos: WC AC, WC VC, VC W1/20.

Para determinar las franjas horarias de la experimentación, se tomaron en cuenta los períodos específicos de hora pico y hora valle característicos de la ciudad, según se menciona en [33] y [32]. Los recorridos se llevaron a cabo, alrededor de las 8:00 a.m. hora valle, y a las 12:00 p.m. hora pico. Esta elección se realizó con el propósito de obtener dos conjuntos de datos diferentes, y contrastar la información recopilada.

#### 4. Resultados

En la Figura 8, se presentan las 30 mediciones de concentración de CO en función del tiempo.

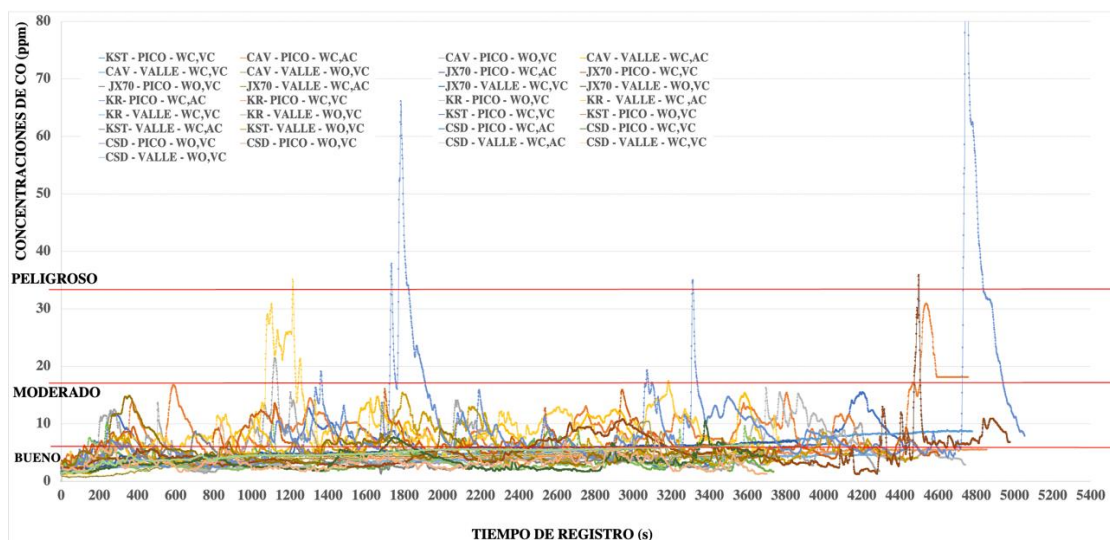


Figura 8. Perfiles de concentración de CO en el interior de los vehículos.

Se observa que el 53.33% de las muestras analizadas se encuentran por debajo de los límites establecidos por la OMS (10 ppm). Esta condición indica un ambiente considerado bueno para el habitáculo. El 30.33% de las muestras están en un rango de entre 10 y 20 ppm, clasificadas como un ambiente moderado.

Así mismo, el 13.33% de las muestras superan el rango considerado peligroso de 20 ppm, lo que significa que los ocupantes tienden a un mayor riesgo de sufrir efectos adversos en su salud, debido a la mala calidad del aire. Finalmente, el 3.33% de las muestras superan las 35 ppm y llegan incluso a 116 ppm, lo cual indica una posibilidad de riesgo de intoxicación debido a los niveles excesivamente altos de CO.

En resumen, la mayoría de las muestras indican un ambiente saludable. Sin embargo, los vehículos KR y CAV superan las 20 ppm en el modo de ventilación WC AC, estos representan el 16,66% del total de las muestras. Por esta razón, se realizará un análisis detallado de este modo de ventilación, en función de las concentraciones de CO mostradas en las Figuras 9 y 10.

En la Figura 9 (a), se presentan las concentraciones de CO del vehículo KR en la ruta identificada como hora pico. Donde se registran 2 picos significativos, el primero se dio a la mitad del trayecto Norte - Sur con un valor de 66,1 ppm, mientras que el segundo pico registró 34,8 ppm durante una parada de tráfico en la ruta Sur - Norte. Por otro lado, la ruta representada como hora valle de la Figura 9 (b), registra un pico de 35,1 ppm, también ubicado a la mitad del trayecto Norte - Sur. En total, durante 19,95 minutos equivalente al 23.7% del recorrido en la ruta realizada, el vehículo KR sobrepasó los niveles límites de la OMS (10ppm). Sin embargo, el 77.3% del recorrido se mantuvo en un ambiente considerado bueno.

Para las concentraciones de CO del vehículo CAV, en la ruta representada como hora valle de la Figura 10 (b), se registró un pico de 14,7 ppm, ubicado a la mitad de la ruta Norte - Sur. En total, durante 19,83 minutos equivalente al 27,5% de la ruta, el vehículo CAV sobrepasó los niveles límites establecidos por la OMS de 10 ppm.

Es importante destacar que, se encontró una coincidencia en las rutas Sur – Norte entre las Figuras, 9(a), 10(a) y 10(b). En este punto, los valores de concentración de CO son de 116.4 ppm, 30.8 ppm y

15.4 ppm, respectivamente. Esta zona representa el área de mayor flujo vehicular en la ruta Sur – Norte.

Este estudio también reveló que, las variaciones observadas en los diferentes modos de ventilación están en un rango entre 0,8 y 6,6 ppm. Este rango, en comparación con los resultados obtenidos en el estudio de [34], difieren, ya que las variaciones en las concentraciones de CO no superan 1 ppm. Por esta razón, se decide centrar el estudio en la influencia del modo de ventilación en las concentraciones de CO.

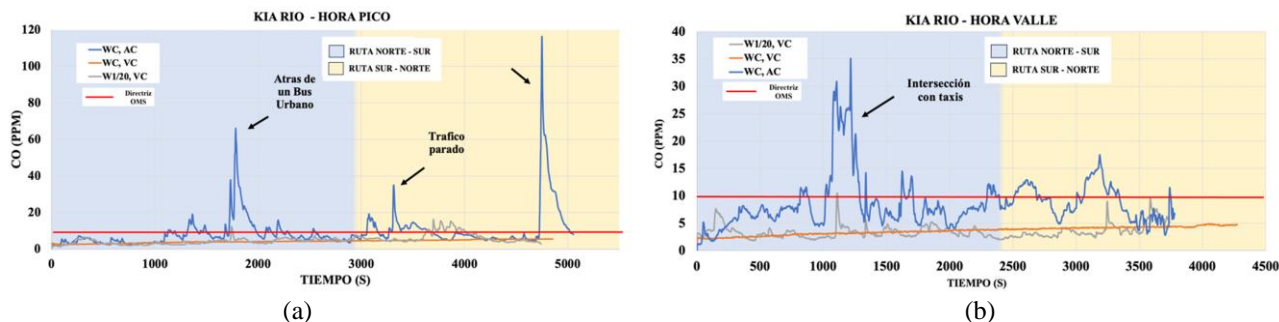


Figura 9. (a) Medición CO en KR – Hora pico, (b) Medición CO en KR – Hora valle

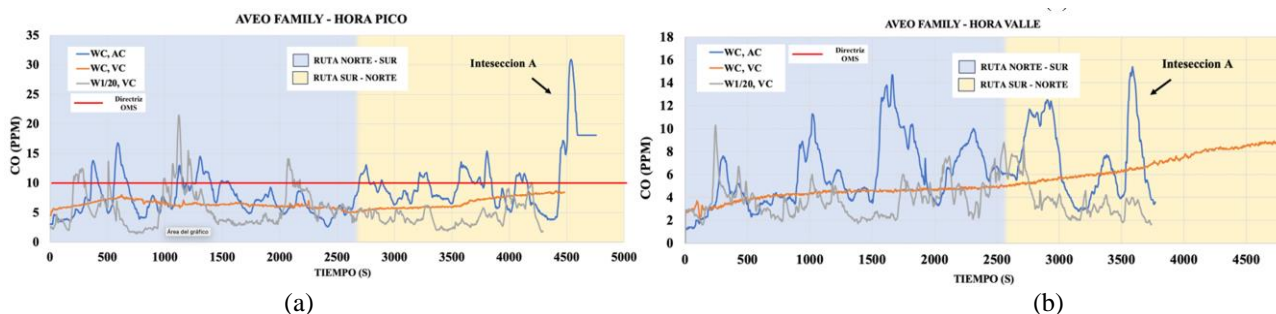


Figura 10. (a) Medición CO en CAV – Hora pico, (b) Medición CO en CAV – Hora valle.

#### 4.1 Análisis de CO con variantes del Experimento.

Con referencia a los trabajos de la sección 1 de este documento, autores como [11, 12], han basado sus estudios en los niveles promedios generales de CO en cabina. De manera similar, en este estudio el promedio total de CO en los vehículos, fue de 5,1 ppm, esto indica que se encuentra por debajo del límite permisible de la OMS (10 ppm). El promedio de las concentraciones totales de CO de los vehículos, se mantiene en niveles considerados buenos para los pasajeros. Una variante de experimentación considerada, ha sido el modo de ventilación en las concentraciones de CO. El análisis de su influencia se ha realizado mediante ANOVA. Los modos de ventilación analizados son WC AC y WC VC. Donde

el valor de  $p$  para estas variables es menor que el nivel de significancia (0,05) y aproximado a cero. El bajo valor de significancia, demuestra que al activar o desactivar el aire acondicionado, cambia la concentración de CO en el habitáculo. Las comparativas de Tukey para los dos casos, se presentan en la Figura 11. A través de esta gráfica, se determinan que los vehículos JX 70, CAV y KR representan las comparaciones más alejadas de la línea central de puntos. Estos vehículos presentan diferencias en sus características como: año, kilometraje, cilindraje y tipo de carrocería.

Por otra parte, con respecto a las comparaciones que demuestran similitud en sus medias, se observa en la Figura 11, que corresponden a los vehículos KS y CSD.

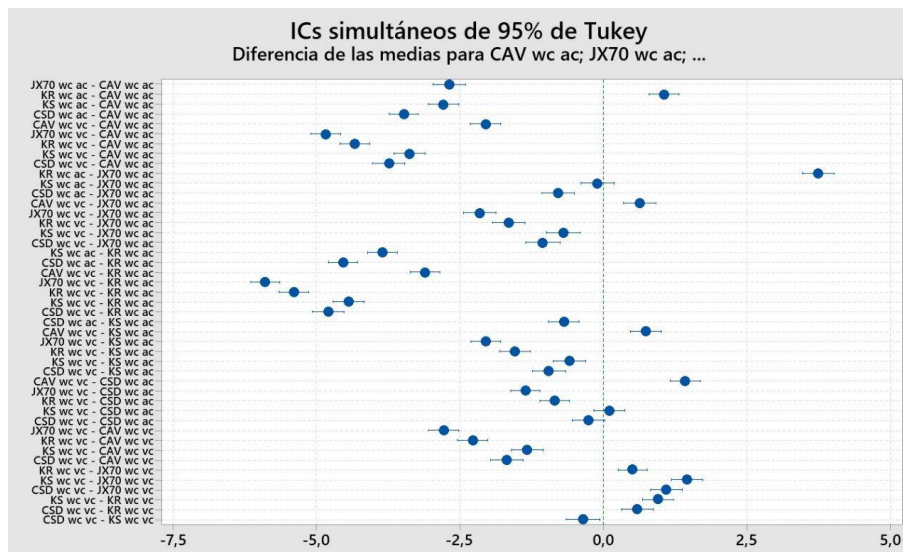


Figura 11. Comparación en parejas, de Tukey; WC AC – WC

En la Figura 12, se presentan los intervalos de comparación de las diferentes características de los vehículos. Se identifica que, cuando las ventanas están cerradas y el aire acondicionado desactivado los vehículos JX70 y KR muestran promedios de 3,8 y 4,5 ppm. Con la característica de ventanas cerradas y la activación del aire acondicionado, los vehículos KR y JX70 presentan un cambio en las medias de 9,6 y 5,8 ppm para cada caso. Este patrón se repite para los demás vehículos de la muestra. Este cambio evidencia la influencia de mayor CO cuando se activa el aire acondicionado.

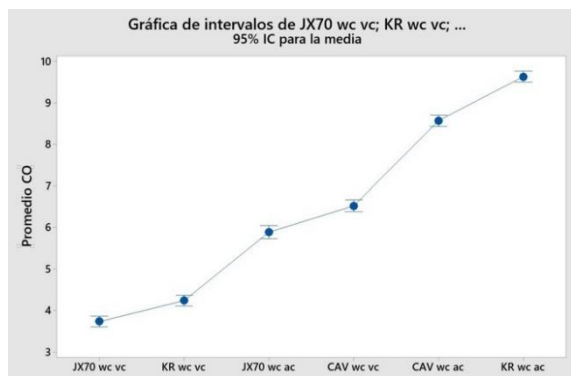


Figura 12. Gráfica de Intervalos entre WC VC -WC AC

En el modo de ventilación WC VC – WC AC, visto en la Figura 12, los vehículos con mayores concentraciones de CO son CAV y KR, con valores de 8,5 y 9,6 ppm respectivamente. Estas concentraciones se reducen en un 56,5 y 61,5% en comparación con el vehículo JX70, debido a la influencia del tipo de carrocería considerada alta. En concordancia con [14], que menciona que el tipo de carrocería y la proximidad al escape de otros vehículos, provocan altos niveles de CO.

Asimismo, en esta sección se lleva a cabo otro análisis de varianza, esta vez centrado en los modos de ventilación WC VC y W1/20 VC, con el objetivo de demostrar la influencia que tienen las ventanas cerradas en comparación con las ventanas semiabiertas. En este caso el aire acondicionado se considera desactivado.

En la Figura 13, se presentan las comparativas de Tukey para las muestras, bajo las condiciones de ventana cerrada y semiabierto. A través de esta gráfica, se determinan que los vehículos JX 70 , KR y CAV representan las comparaciones más alejadas de la línea central de puntos. El análisis de los intervalos de comparación de estos vehículos, se presentan en la Figura 14. Los mismos, presentan características diferentes, como las mencionadas en el análisis anterior.

Por otra parte, los vehículos que demuestran similitud en sus medias corresponden a KS y CSD, por lo que se descartan de este análisis.

En el vehículo JX70, los modos de ventilación WC VC y W1/20 VC, presenta aumento en los valores promedios de 3,7 y 4 ppm respectivamente. De igual manera el vehículo KR, mantuvo el mismo comportamiento con valores de 4,2 ppm y 5,2 ppm. Esto indica que al tener las ventanas semi abiertas, se permite una mayor entrada de CO y otros contaminantes del aire exterior, al interior del vehículo



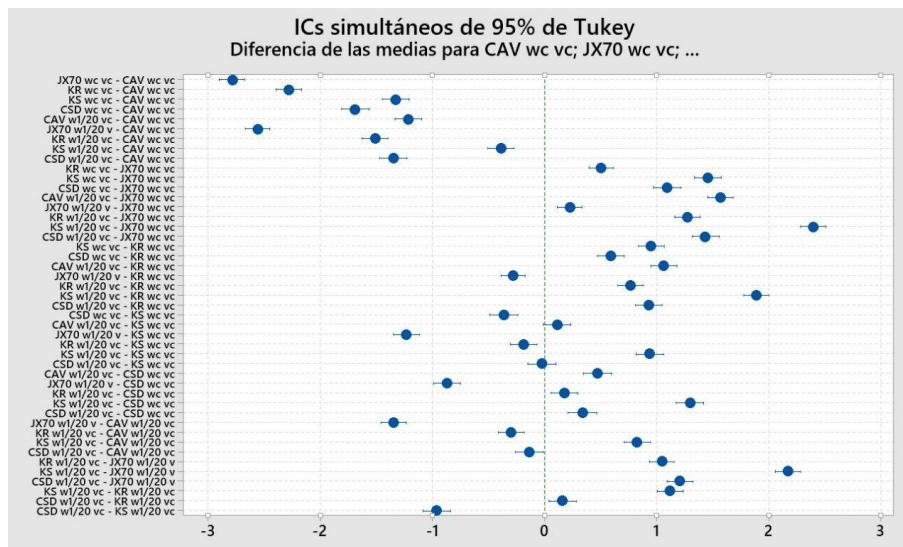


Figura 13. Comparación en parejas, de Tukey; WC VC - W1/20 VC

Por el contrario, en el vehículo CAV, el modo WC VC presenta un mayor promedio de CO con respecto al modo W1/20 VC, con valores de 6,5 y 5,3 ppm respectivamente. En este caso, se evidencia una mayor concentración de CO cuando las ventanas están cerradas, probablemente debido a las características del vehículo como año y kilometraje que difieren significativamente con JX70 y KR. Estas características se encuentran detalladas en la Tabla 5.

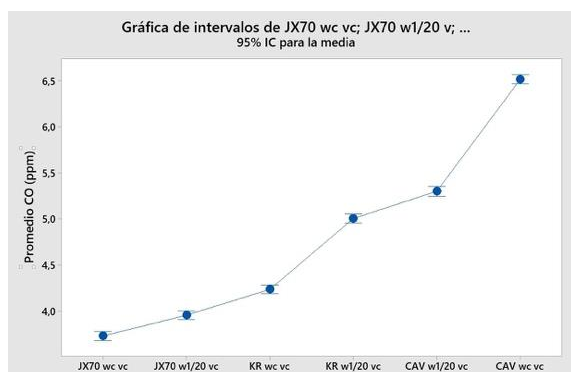


Figura 14. Gráfica de Intervalos WC VC – W1/20.

Si bien, los niveles mostrados en el estudio no excedieron los límites permisibles, ni los tiempos de exposición máximos admitidos, es necesario abordar ciertas medidas para mantener una buena calidad del aire interior.

Cuando el caso amerita, para mitigar las altas concentraciones de CO en el interior de los vehículos, durante la conducción, es importante enfocarse en la ventilación adecuada. En zonas de alto flujo vehicular, al activar el aire acondicionado, las Figuras 9 y 10 registraron picos significativos y un aumento del 141% (aproximado de 5.4 ppm) en los niveles de CO. Estos

valores sugieren evitar el uso del aire acondicionado en recirculación en estas zonas. Cuando el vehículo mantiene paradas prolongadas en el tráfico, el entreabrir una ventana mostró un aumento del 8,1 % (aproximado de 0,3 ppm) en las concentraciones de CO. Este incremento no afecta significativamente al estado de salud del habitáculo con respecto al CO y contribuye al confort térmico con la disminución de la temperatura. Por todo esto, es recomendable mantener las ventanas semi- abiertas en este caso, para facilitar una mejor circulación de aire y reducir la acumulación de CO en el interior de la cabina.

Con el propósito de establecer la relación entre las concentraciones de CO en el habitáculo y factores como tipo de carrocería, año, kilometraje, cilindrada y porcentaje de CO en el escape, se ha realizado un análisis de correlación de variables, cuyos resultados se presentan en la Figura 15. En cuanto a las variables de estudio, se han identificado tres factores con una influencia directamente proporcional y significativa en la cantidad de CO en el habitáculo. Estos factores son, carrocería baja, kilometraje y porcentaje de CO en el escape, con una correlación de r mayor a 0,6. En contraste, se han encontrado relaciones inversamente proporcionales y lógicas entre las concentraciones de CO en cabina y los factores de, carrocería alta, año del vehículo y cilindrada. Esto indica que, los factores tienen una influencia mínima en las concentraciones de CO en el interior del vehículo. De hecho, en el caso de carrocería alta, se observa un comportamiento positivo, ya que disminuye el CO en cabina. Así mismo, los resultados demuestran que, para vehículos más nuevos, las cantidades de CO son menores.

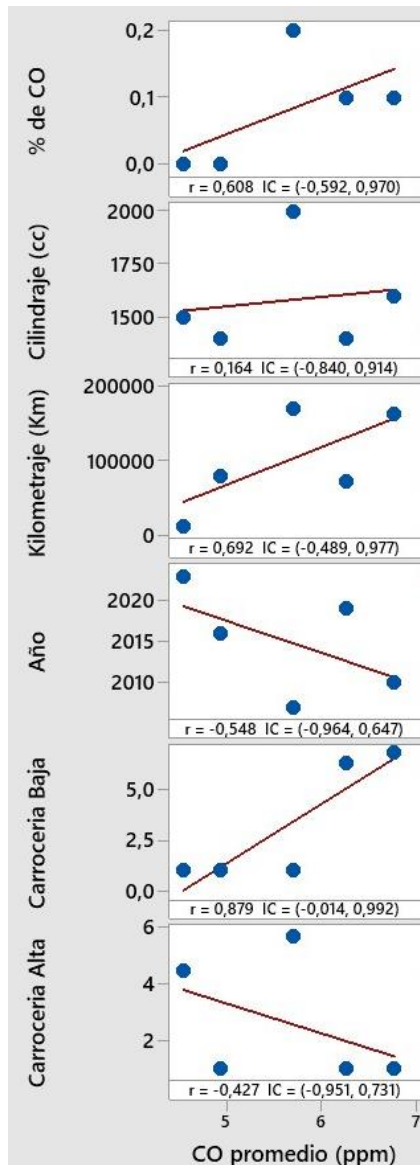


Figura 15. Correlación de factores y CO en cabina.

A continuación, se presenta el análisis de la correlación entre la cantidad de CO (ppm) y los distintos modos de ventilación, como se muestra en la Figura 16. Los resultados demuestran que el modo de ventilación con ventanas semi abiertas muestra una correlación cercana a 1 ( $r= 0,802$ ), lo que sugiere que los gases de escape tienen una mayor influencia en las concentraciones de CO dentro del habitáculo.

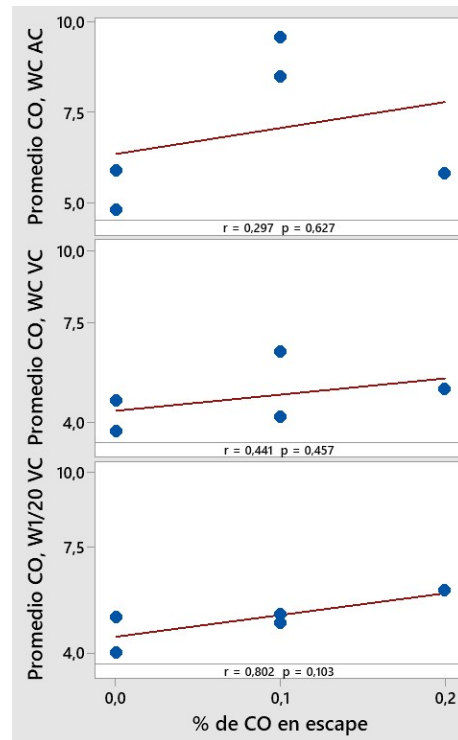


Figura 16. Correlación de modos de ventilación y CO en escape.

## 5. Conclusiones

La metodología aplicada en este estudio, para el análisis de los niveles de CO en vehículos M1 en ruta, ha demostrado ser eficaz en la evaluación del estado de salud del habitáculo. Al comparar el total de resultados, con la normativa y directrices para la calidad del aire interior, se determinó que, el 53,33 % de muestras se mantenían en niveles considerados buenos para los pasajeros. Por otro lado, el 16,33% de las muestras exceden el rango considerado peligroso, lo que aumenta la probabilidad de generar efectos adversos, en la salud de los ocupantes.

Asimismo, se identificaron las variantes de experimentación que influyeron en las concentraciones de CO al interior de la cabina siendo estos; los modos de ventilación y el tipo de carrocería. En este contexto, se determinó que el activar el aire acondicionado produjo un aumento de 4,2 ppm a 9,6 ppm. (141 %). Mientras que al entreabrir una ventana produjo un aumento de 3,7 ppm a 4 ppm (8,1 %). Por lo que se infiere que el modo de ventilación WC AC es más significativo que el segundo modo. En el caso de los vehículos CAV y KR, se observó una infiltración de contaminantes mayor en un 21,5% en comparación con otros vehículos en el experimento.

Aunque la mayoría de los vehículos muestreados cumplen con los estándares de concentraciones máximas de CO. Es importante prestar atención a los

niveles de CO en el habitáculo de los vehículos y así garantizar un ambiente seguro para todos los ocupantes. Por consiguiente, es importante ampliar el tamaño de la muestra, y analizar otras variables de experimentación, con el fin de precautelar el bienestar de los pasajeros.

El análisis de correlación encontró que carrocería baja, kilometraje y porcentaje de CO en el escape tienen relación directa y significativa con el CO en el habitáculo ( $r > 0,6$ ). Carrocería alta, año del vehículo y cilindrada tienen relación inversa. Los resultados muestran influencia mínima de estos factores en el CO interior. Vehículos más nuevos tienen menores cantidades de CO en cabina.

## 1. Referencias

- [1] S. Kaur, M. Nieuwenhuijsen y R. Colville, «Personal exposure of street canyon intersection users to PM<sub>2.5</sub>, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK,» *Atmospheric Environment*, pp. 2-3, 2005.
- [2] H. Xianglu y L. P. Naeher, «A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world,» *Environment International*, p. 15, 2005.
- [3] M. Repetto, Toxicología Fundamental, Sevilla: Díaz de Santos, 1997.
- [4] E. Orche, «Calidad del aire en las minas museo subterráneas,» *Medio Ambiente minero y minería*, vol. 2, p. 20, 2020.
- [5] OMS, «Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire, Materia particulada (MP<sub>2,5</sub> y MP<sub>10</sub>), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono,» Ginebra, 2021.
- [6] L. C. Marr, G. C. Morrison, W. W. Nazaroff y R. A. Harley, «Reducing the Risk of Accidental Death Due to Vehicle - Related Carbon Monoxide Poisoning,» *Air & waste management association*, vol. 48, pp. 899 - 906, 2011.
- [7] CDC, «Unintentional Deaths from Carbon Monoxide Poisoning - Michigan, 1987-1989,» Michigan, 1992.
- [8] SA, «Dos policías aparecen muertos en un patrullero en el norte de Quito,» *El Comercio*, p. 1, 15 01 2019.
- [9] SN, «Dos policías fueron hallados muertos en el interior de un patrullero, en el norte de Guayaquil,» *El Universo*, p. 2, 21 08 2020.
- [10] SN, «Padre e hijo murieron en automóvil al inhalar monóxido de carbono,» *El Mercurio*, p. 1, 14 08 2022.
- [11] L. Abi-Esber y M. El-Fadel, «In-vehicle CO ingressión: Validation through field measurements and mass balance simulations,» *Science of The Total Environment*, vol. 394, pp. 75-89, 2008.
- [12] L. Abi-Esber, M. El-Fadela, I. Nuwayhidb y N. Saliba, «In-vehicle exposure to carbon monoxide in a commercial/residential region of Beirut,» *Environmental Science and Technology*, vol. 39, pp. 1547-6537, 2009.
- [13] M. Hadei, A. Shahsavani, P. K. Hopke, M. Kermani, M. Yarahmadi y B. Mahmoudi, «Comparative health risk assessment of in-vehicle exposure to formaldehyde and acetaldehyde for taxi drivers and passengers: Effects of zone, fuel, refueling, vehicle's age and model,» *Environmental Pollution*, vol. 254, p. 112943, 2019.
- [14] L. Chan, C. Chan y. Qin, «The effect of commuting microenvironment on commuter exposures to vehicular emission in Hong Kong,» *Atmospheric Environment*, vol. 33, p. 1777-1787, 1999.
- [15] G. Harik, M. El-Fadel, A. Shihadeh, I. Alameddine y M. Hatzopoulou, «Is in-cabin exposure to carbon monoxide and fine particulate matter amplified by the vehicle's self-pollution potential? Quantifying the rate of exhaust intrusion,» *Transportation Research Part D*, pp. 225-238, 2017.
- [16] D. Campagnolo, A. Cattaneo, L. Corbella, F. Borghi, L. Del Buono y S. Rovelli, «In-vehicle airborne fine and ultra-fine particulate matter exposure: The impact of leading vehicle emissions,» *Environment International*, vol. 123, p. 407-416, 2019.
- [17] I. Alameddine, L. Abi Esber, E. Bou Zeid, M. Hatzopoulou y M. ElFadel, «Operational and environmental determinants of in-vehicle CO and PM<sub>2.5</sub> exposure,» *Science of The Total Environment*, Vols. %1 de %2551-552, pp. 42-50, 2016.
- [18] L. Frederickson, S. Lim, H. Russell, S. Kwiatkowski, J. Bonomally, J. Schmidt, O. Hertel, I. Mudway, B. Barratt y M. Johnson, «Monitoring Excess Exposure to Air Pollution for Professional Drivers in London Using Low-Cost Sensors,» *Atmosphere*, vol. 11, pp. 11-18, 2020.
- [19] P. Kumar y N. Gupta, «Commuter exposure to inhalable, thoracic and alveolic particles in various transportation modes in Delhi,» *Science of The Total Environment*, vol. 541, pp. 535-541, 2016.
- [20] A. Leavey, N. Reed, S. Patel, K. Bradley, P. Kulkarni y P. Biswas, «Comparing on-road real-time simultaneous in-cabin and outdoor particulate and gaseous concentrations for a

- range of ventilation scenarios,» *Atmospheric Environment*, vol. 166, pp. 130-141, 2017.
- [21] A. Chan, «Indoor–outdoor relationships of particulate matter and nitrogen oxides under different outdoor meteorological conditions,» *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 1543-1551, 2002.
- [22] A. Chan y M. Chung, «Indoor–outdoor air quality relationships in vehicle: effect of driving environment and ventilation modes,» *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 1543-1551, 2002.
- [23] M. Nayeb Yazdi, M. Arhami, M. Delavarrafiee y M. Ketabchy, «Developing air exchange rate models by evaluating vehicle in-cabin air pollutant exposures in a highway and tunnel setting: case study of Tehran, Iran,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, p. 501–513, 2018.
- [24] L. Abi Esbera, M. El-Fadela, Nuwayhidbi y N. Saliba, «The effect of different ventilation modes on in-vehicle carbon monoxide exposure,» *Atmospheric Environment*, vol. 41, p. 3644–3657, 2007.
- [25] GOST 33554-2015, «Content of Pollutants in the interior of driver’s cab and passenger compartment,» Russian Federation, Moscow, 2016.
- [26] Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), Quito, 2022.
- [27] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), *Boletín Sector Automotriz*, 2017.
- [28] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), *Anuario Sector Automotriz*, Quito, 2018.
- [29] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), 2019.
- [30] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, *Anuario Sector Automotriz*, Quito, 2020.
- [31] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), «Anuario Sector Automotriz,» Quito.
- [32] Municipalidad de Cuenca, «Plan de Movilidad y espacios públicos,» Cuenca, 2015.
- [33] L. Perez y S. Quito, *Determinación de los ciclos de conducción de un vehículo categoría M1 para la ciudad de Cuenca*, Cuenca, 2018.
- [34] C.-C. Chan, H. Ozkaynak, J. D. Spengler y L. Sheldon, «Driver Exposure to Volatile Organic Compounds, CO, Ozone, and NO, under Different Driving Conditions,» *Environment Science Technology*, vol. 25, n° 964-972, 1991.
- [35] J. Almeida y L. Barreno, «ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CO Y CO2 EN EL HABITÁCULO DE UN VEHÍCULO TIPO TODO TERRENO Y TIPO SEDÁN CON RELACIÓN A SU INCIDENCIA EN LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR,» Riobamba, 2022.
-