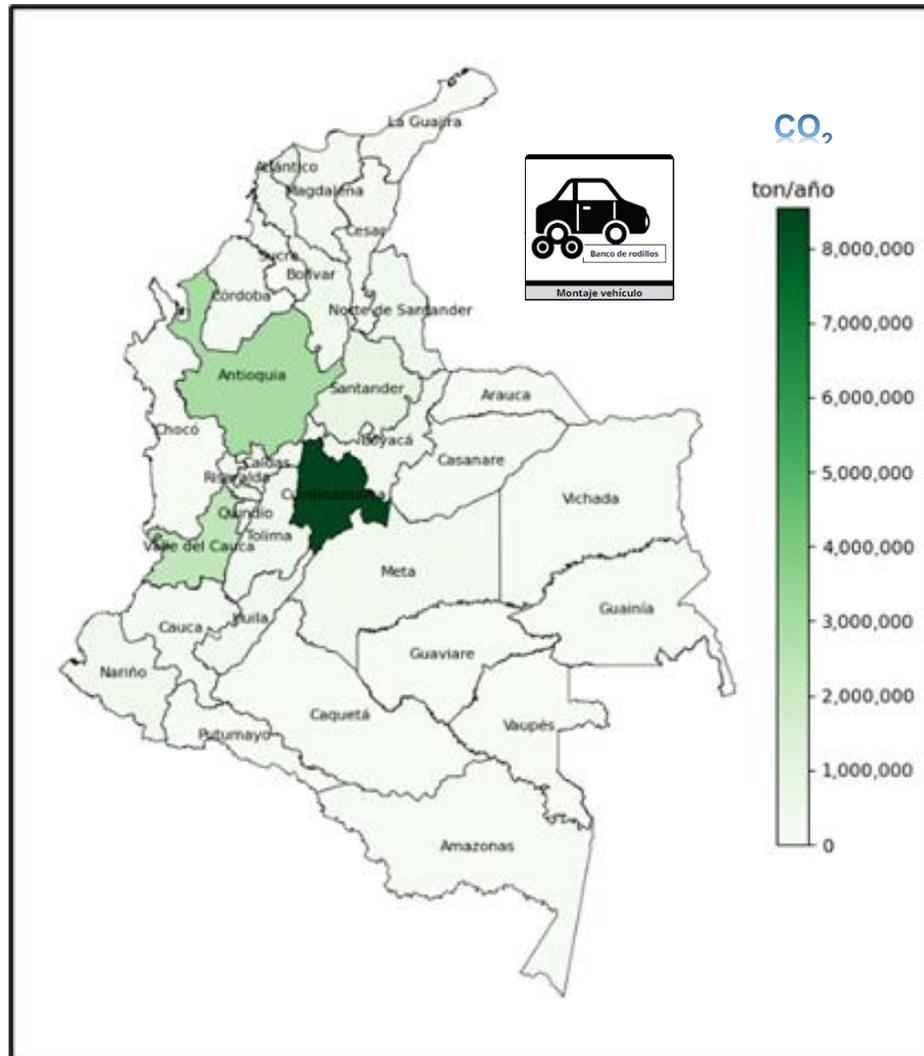


Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)

Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Facultad de Ingeniería

Prof. Ing.-Dr. John Ramiro Agudelo Santamaría
Grupo Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL)
Universidad de Antioquia
Medellín (Colombia)



upme

Unidad de Planeación Minero Energética

Director General Dr. Carlos Adrián Correa
Subdirector Demanda Dr. José Lenin Morillo
Av. Calle 26 # 69 D-91 Torre 1, Piso 9°
Bogotá D.C.
(+57) 601 222 0601



Dr. Carlos Adrián Correa Flórez

Director General

Unidad de Planeación Minero Energética UPME

Dr. José Lenin Morillo Carrillo

Subdirector de Demanda

Unidad de Planeación Minero Energética UPME

Jaime Fernando Andrade

Profesional especializado

Supervisor convenio CV-001-2022

Unidad de Planeación Minero Energética UPME

Ejecutó

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL)

Con el apoyo de la red **RELIEVE** (Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos), con sede central en el TEC de Monterrey (México).

Dr. John Ramiro Agudelo Santamaría

Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica

Miembro RELIEVE nodo Medellín

john.agudelo1@udea.edu.co

Dr. Andrés Felipe Agudelo Santamaría

Profesor Dpto. Ing. Mecánica

Dr. Ricardo Moreno Sánchez

Profesor Dpto. Ing. Mecánica

Dr. José Ignacio Huertas Cardozo

Profesor Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias

Equipo técnico y soporte administrativo

Jackeline Saldarriaga Alzate

Jaime Nicolás Gutiérrez Ibarra

Juan Sebastián Martínez Torres

Julián Felipe Álvarez Morales

Juan Pablo Arboleda Román

Agradecimientos

A la empresa PRIMAX Colombia por cedernos el banco de rodillos dinamométrico para pruebas de motocicletas, y por permitirnos usarlo en sus instalaciones de Puente Aranda (Bogotá), donde llevamos a cabo de forma satisfactoria las pruebas conducentes a determinar el efecto de la altitud sobre los factores de emisión y el consumo de combustible de motocicletas representativas del país.

A las empresas del sector de motocicletas:

AKT MOTOS -Grupo CORBETA-

AUTECO

HONDA Motocicletas -GRUPO FANALCA-

por facilitarnos sus motocicletas para las campañas experimentales, y por sus valiosas recomendaciones para realizar las pruebas en banco de rodillos.

Al grupo CORAUTOS ANDINO, por facilitarnos vehículos para las pruebas en banco de rodillos.

A la Universidad de Antioquia por facilitarnos las instalaciones de la sede de Apartadó, donde pudimos llevar a cabo las pruebas en motocicletas y vehículos.

A la red latinoamericana de investigación en energía y vehículos RELIEVE, nodos TEC de Monterrey, y EAFIT por su apoyo en el tratamiento de datos, revisión y análisis de resultados e informe final del proyecto. A la Dra. Jenny Díaz Ramírez del TEC de Monterrey por su apoyo en el Capítulo 6 referente al análisis de la representatividad estadística de los resultados.

¡Un reconocimiento sincero a todo el equipo de trabajo!



John Ramiro Agudelo Santamaría
Director del proyecto FECOC+
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia
Miembro de la red RELIEVE
Nodo Medellín

INTRODUCCIÓN

Este documento contiene el informe final del convenio: “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+ 3.0): Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia”, desarrollado en el marco del Convenio Interadministrativo CO1.PCCNTR.5104655, celebrado entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Universidad de Antioquia, y ejecutado por el grupo GIMEL de la Universidad de Antioquia entre el 11 de julio y el 31 de diciembre de 2023.

Este proyecto permitió complementar la base de datos de factores de emisión del sector transporte terrestre carretero, con énfasis en los de gases de efecto invernadero (GEI), de las categorías de vehículos livianos y motocicletas más representativos del parque automotor colombiano.

El proyecto FECOC (Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos), tuvo como finalidad aunar esfuerzos técnicos, administrativos y económicos para ampliar y complementar los factores de emisión de combustibles colombianos FECOC+ por actividad correspondiente al sector transporte terrestre carretero colombiano, para caracterizar sus gases de efecto invernadero.

FECOC+ se ejecutó en tres fases mediante convenios interadministrativos entre la UPME y la Universidad de Antioquia, a saber, FECOC+ Fase 1 (CV 001-2020) en el cual se logró caracterizar el parque automotor, así como determinar los ciclos de conducción (perfiles velocidad vs tiempo) de las principales categorías de vehículos terrestres del país. En la segunda fase de FECOC+ se construyó la base de datos de factores de emisión medidos a bordo de vehículos pesados (camiones de dos ejes pequeños -C2P-, camiones de dos ejes grandes -C2G-, tractocamiones y buses), medidos bajo ciclos de conducción en tres ciudades ubicadas a distintas altitudes sobre el nivel del mar, a saber, Bucaramanga (Fase 2.1, con la colaboración de la Empresa Colombiana de Petróleos CV-003-2021), Bogotá y Barranquilla (Fase 2.2, CV001-2022), y este informe que constituye, como se mencionó, la tercera y última fase del proyecto FECOC+.

En esta Fase 3 se determinaron los factores de emisión de 40 motocicletas y 30 vehículos livianos a la altitud de la ciudad de Medellín (1500 msnm) mediante la reproducción del ciclo de conducción respectivo en un banco de rodillos usando un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS por sus siglas en inglés: *portable emissions measurement system*). Para este proyecto se cuenta con un PEMS parSYNC Flex marca 3DATX (N.Y., USA). Adicionalmente, con el objetivo de determinar el efecto de la altitud sobre el nivel del mar en el consumo y emisiones de los vehículos y motocicletas, se realizaron mediciones sobre 2 motocicletas y 2 vehículos livianos en tres altitudes, a saber, Apartadó (nivel del mar), Medellín (1500 msnm) y Bogotá (2600 msnm).

Este informe final consta de 6 capítulos, uno por cada producto comprometido en la Cláusula Cuarta del convenio en cuestión, a saber:

1. Capítulo 1: “**Metodología**” que da respuesta al primer producto: “Documento metodológico para realizar la medición de los factores de emisión Fase 3, considerando los resultados de las anteriores fases”.
2. Capítulo 2: “**Factores de emisión medidos en Motocicletas**” que da respuesta al segundo producto: “Informe con los respectivos factores de emisión”.
3. Capítulo 3: “**Factores de emisión medidos en Vehículos livianos**” que da respuesta al segundo producto: “Informe con los respectivos factores de emisión”.
4. Capítulo 4: “**Impacto de la tecnología sobre los factores de emisión medidos**” que da respuesta al tercer producto: “Informe con la determinación del impacto de la tecnología sobre los factores de emisión (asumiendo equivalentes tecnológicos, según aplique).”
5. Capítulo 5: “**Impacto de los diferentes modos y eventos de conducción sobre los factores de emisión**”, que da respuesta al cuarto producto: Informe con la cuantificación del impacto de los diferentes modos y eventos de conducción sobre los factores de emisión”.
6. Capítulo 6: “**Representatividad estadística de los resultados**”, que da respuesta a los productos 5 y 6 de dicha cláusula: “Informe con el grado de representatividad estadística que tiene la muestra probada respecto a la población total de vehículos”, e “Informe con los factores estadísticos de expansión, de manera que sea posible caracterizar las emisiones de la población nacional del parque automotor de vehículos livianos y motocicletas desde los resultados obtenidos con la muestra”.
7. Capítulo 7: “**Efecto de la altitud sobre los factores de emisión medidos en vehículos livianos y motocicletas**”, que da respuesta al séptimo producto: “Informe con el análisis de la altitud sobre los factores de emisión en vehículos livianos y motocicletas”.
8. Capítulo 8: “**Conclusiones y Recomendaciones**”, que recoge los principales hallazgos, y con base en la experiencia ganada a lo largo de cerca de 4 años de trabajo, nos atrevemos a proponer algunas líneas de trabajo que quedan abiertas con este programa FECOC+.

CAPÍTULO 1

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

METODOLOGÍA



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. PASO 1: SELECCIÓN DE VEHÍCULOS (FECOC+ FASE 1)	9
3. INSTRUMENTACIÓN DE VEHÍCULOS Y ADECUACIÓN DE LOS BANCOS DE RODILLOS 15 Determinación del grado de carga en el dinamómetro de rodillos de motocicletas.....	16
4. MEDICIÓN EN BANCO DE RODILLOS.....	20
5. DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN	24
5.1 Estructura de organización de datos medidos	24
5.2 Librería y base de datos	25
5.3 Etapa 1: Revisión de pruebas	25
5.4 Etapa 2: Unificación de pruebas	27
5.5 Etapa 3: Filtrado y Sincronización de señales.....	28
5.6 Etapa 4: Cálculo de los factores de emisión	30
5.7 Aproximación al cálculo de incertidumbres de los factores de emisión	31
6. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FACTORES DE EMISIÓN	33
7. REFERENCIAS	¡Error! Marcador no definido.

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología adoptada por el grupo ejecutor de la Universidad de Antioquia, consistente en medir los vehículos livianos y las motocicletas en banco de rodillos usando los ciclos de conducción determinados en FECOC+ Fase 1 (Cv 001-2020). Estas mediciones se llevaron a cabo sobre una muestra de 40 motocicletas y 30 vehículos livianos en la ciudad de Medellín (1500 msnm). Además, se describe cómo se realizó la campaña experimental que permitió determinar el efecto de la altura sobre el nivel del mar en los factores de emisión de dos vehículos livianos y dos motocicletas.

Se midieron los factores de emisión de contaminantes gaseosos regulados: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (THC) y óxidos de nitrógeno (NO_x) obtenido como la suma de NO + NO₂, así como el bióxido de carbono (CO₂), y material particulado (en masa PM, y en número PN).

La conversión de las unidades de concentración de cada contaminante se llevó a masa emitida mediante la medición del flujo instantáneo de gases de escape. Para ello, utilizamos la medida de la relación aire combustible de los gases de escape (equipo Horiba Mexa 370λ), y del flujo másico de aire (sensor MAF), que se ubicó en el múltiple de admisión de los vehículos/motocicletas de prueba, según método recomendado por *Masanobu Akita, 2014, [Masanobu Akita, Real-time Fuel Consumption Measurement Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor, Readout, English Edition No.42 July 2014]*. La instrumentación de estas variables permitió obtener los factores de emisión en términos de masa (gramos/km) y de número de partículas (#/km). A modo de ejemplo, en la **Figura 1.1** se muestra de forma esquemática la metodología adoptada para una motocicleta.

En la **Figura 1.2** se muestra esquemáticamente la metodología que adoptó el grupo ejecutor para llevar a cabo la ejecución técnica de este convenio.

El cuadro metodológico 1 de la Figura 1.2: “Selección de vehículos de pruebas” se realizó con base en la información suministrada por el convenio 001-2020 (FECOC+ Fase 1) entre la UPME y la Universidad de Antioquia.

Dado que dicho informe contiene información a diciembre de 2020, el grupo ejecutor actualizó la base de datos de los vehículos y motocicletas matriculados en el país según el RUNT a octubre de 2023 con los reportes de matriculación publicados mensualmente por ANDI y FENALCO. La **Tabla 1.1** presenta el consolidado de la cantidad de motocicletas y vehículos matriculados actualmente en el país.

Las características generales de las fuentes móviles seleccionadas para este proyecto se muestran en la **Tabla 1.2**.

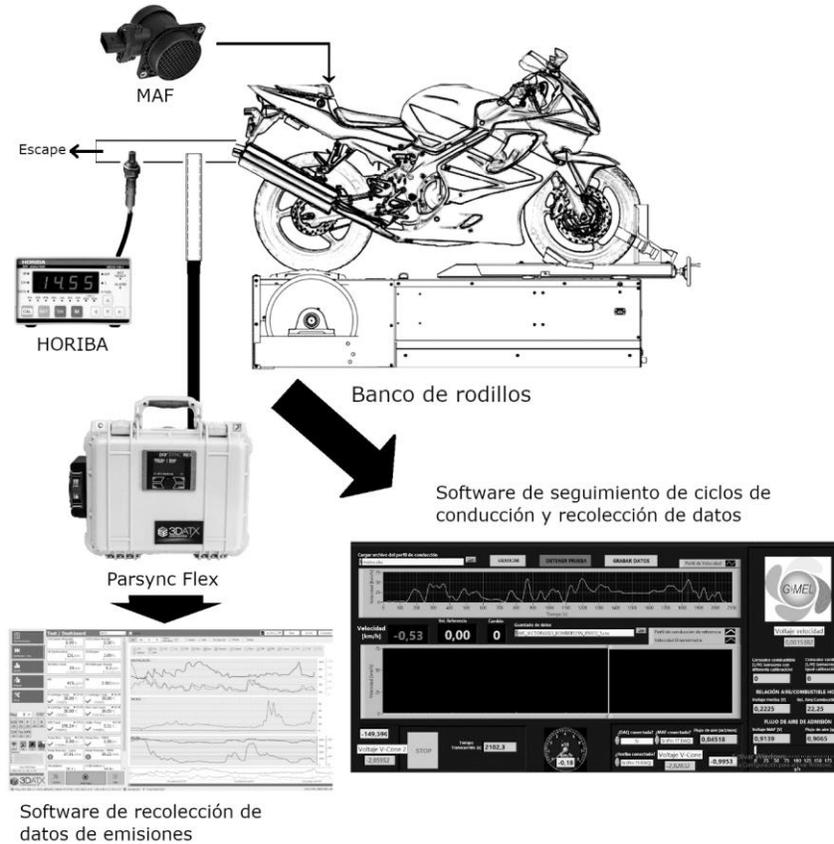


Figura 1.1. Esquema del montaje de motocicleta en banco de rodillos en la Universidad de Antioquia

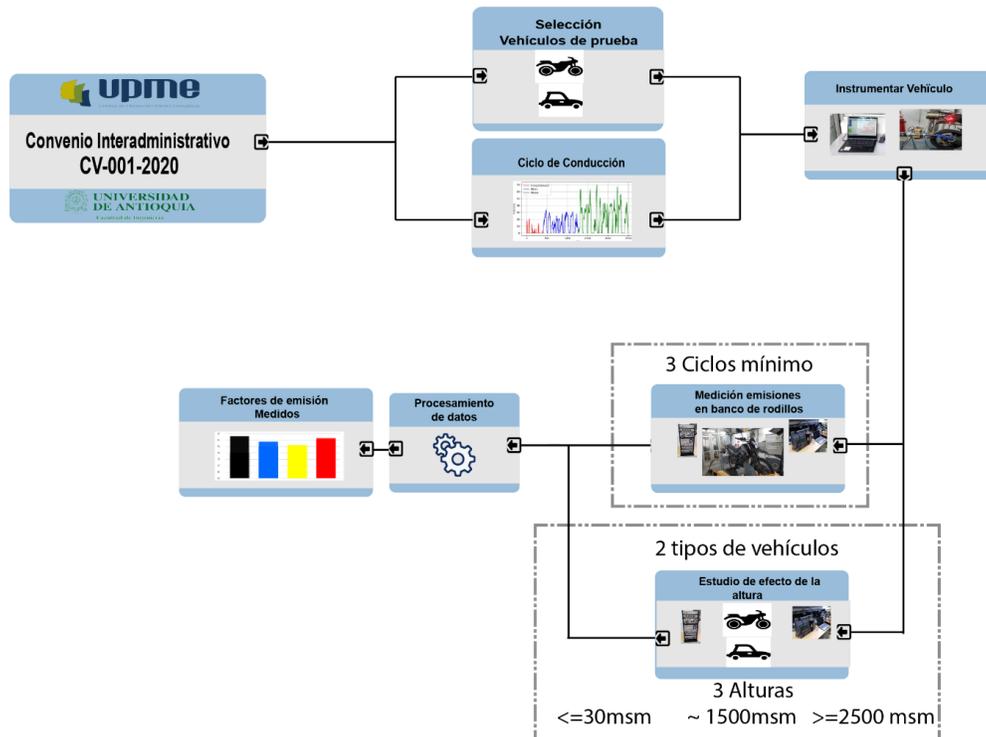


Figura 1.2. Resumen de la metodología adoptada en FECOC+ Fase 3

Tabla 1.1 Actualización de la cantidad de motocicletas y vehículos livianos matriculados en Colombia a octubre de 2023. Datos obtenidos de: FECOC+ Fase 1 (cv 001-2020), ANDI y FENALCO

Departamento	Cantidad de Motocicletas
Cundinamarca (incluye Bogotá)	1.803.749
Antioquia (Incluye Medellín)	1.797.697
Valle del Cauca	1.387.052
Santander	719.987
Córdoba	529.470
Meta	452.419
Huila	398.994
Tolima	328.011
Bolívar	326.613
Nariño	326.314
Norte de Santander	310.404
Atlántico	303.430
Cauca	297.986
Magdalena	284.811
Risaralda	269.528
Caldas	262.029
Caquetá	200.685
Quindío	179.348
Putumayo	171.579
Cesar	169.182
Sucre	151.159
Boyacá	126.133
Casanare	103.610
Guaviare	82.415
Arauca	63.742
Chocó	41.250
San Andrés	20.752
La Guajira	19.749
Amazonas	18.325
Vichada	5.656
Guainía	3.907
Vaupés	2.624
TOTAL	11.158.610

Departamento	Cantidad de Vehículos livianos
Cundinamarca (incluye Bogotá)	1.824.991
Antioquia (Incluye Medellín)	645.282
Valle del Cauca	496.410
Santander	196.337
Atlántico	154.972
Caldas	93.059
Risaralda	94.909
Tolima	80.463
Bolívar	74.196
Boyacá	71.174
Nariño	67.438
Huila	61.831
Quindío	56.469
Norte de Santander	79.341
Meta	54.341
Cauca	36.386
Magdalena	30.077
Cesar	26.813
Córdoba	27.851
Sucre	17.564
Casanare	14.031
Caquetá	4.289
La Guajira	3.783
San Andrés	1.669
Arauca	1.509
Putumayo	1.189
Chocó	548
Guaviare	416
Amazonas	173
Vichada	90
Vaupés	0
Guainía	0
TOTAL	4.217.601

El paso metodológico 2: “Instrumentación de los vehículos”, se realizó de acuerdo con la experiencia suministrada por el convenio CV 003-2021 (FECOC+ Fase 2.1 con Ecopetrol) y CV 001-2022 (FECOC+ Fase 2.2), donde se instrumentaron los vehículos y se modificó el *software* de ciclos de conducción desarrollado por el grupo ejecutor para mediciones a bordo.

En el paso metodológico 3: “medición bajo ciclos de conducción en banco de rodillos”, se procedió tal como se hizo en el convenio CV 003-2021, en el que se contó con la participación de Ecopetrol. Los vehículos montados en el banco de rodillos y debidamente instrumentados (sensor MAF, sensor de la relación Aire/Combustible, sensores de régimen de giro del motor, sensores de velocidad del vehículo, y PEMS), se sometieron a la reproducción de por lo menos cuatro ciclos de conducción, con el fin de obtener datos estadísticamente repetitivos. Con esto se buscó garantizar la confiabilidad de los resultados de factores de emisión.

El cuarto y último paso metodológico: “Procesamiento y análisis de resultados” se realizó de la misma forma como se llevó a cabo en el convenio CV 001-2022 (FECOC+ Fase 2.2), debido a que se utilizó la misma instrumentación, a saber, un equipo portable para medir emisiones a bordo de vehículos (*parSYNC Flex de 3DATX, USA*), sensores de flujo de aire instalados en el múltiple de admisión (*MAF*), y un sensor de relación aire/combustible (*Horiba Mexa 730 Lamda*), instalado en el tubo de escape.

2. SELECCIÓN DE VEHÍCULOS (FECOC+ FASE 1)

Se tomó como punto de partida la información sobre los vehículos livianos y motocicletas más representativos del parque automotor colombiano de acuerdo con la información obtenida en el convenio CV-001-2020 (FECOC+ Fase 1), actualizada a octubre de 2023 con los datos de matriculación de motocicletas y vehículos livianos proporcionados por ANDI y FENALCO. Esta base de datos se adjunta al informe final como archivo:

2023-11-30_Base_de_datos_RUNT_a_octubre_2023 + Inv Emisiones Colombia.xlsx.

Tabla 1.2. Vehículos y motocicletas medidos en este contrato (FECOC+ Fase 3)

Tipo de Vehículo	Número de vehículos
Motocicletas \leq 150 c.c.	30
Motocicletas $>$ 150 c.c.	10
Automóviles \geq 2000 c.c	22
Camperos	4
Camioneta entre 2000 y 4000 c.c.	4

En la **Tabla 1.3** y en la **Tabla 1.4** se muestran los listados de motocicletas y vehículos livianos a los que se les midieron los factores de emisión en este convenio. Se midieron 40 motocicletas, 30 de ellas con cilindradas menores a 150 cm³, y 10 mayores a 150 cm³ (ver **Figura 1.3**).

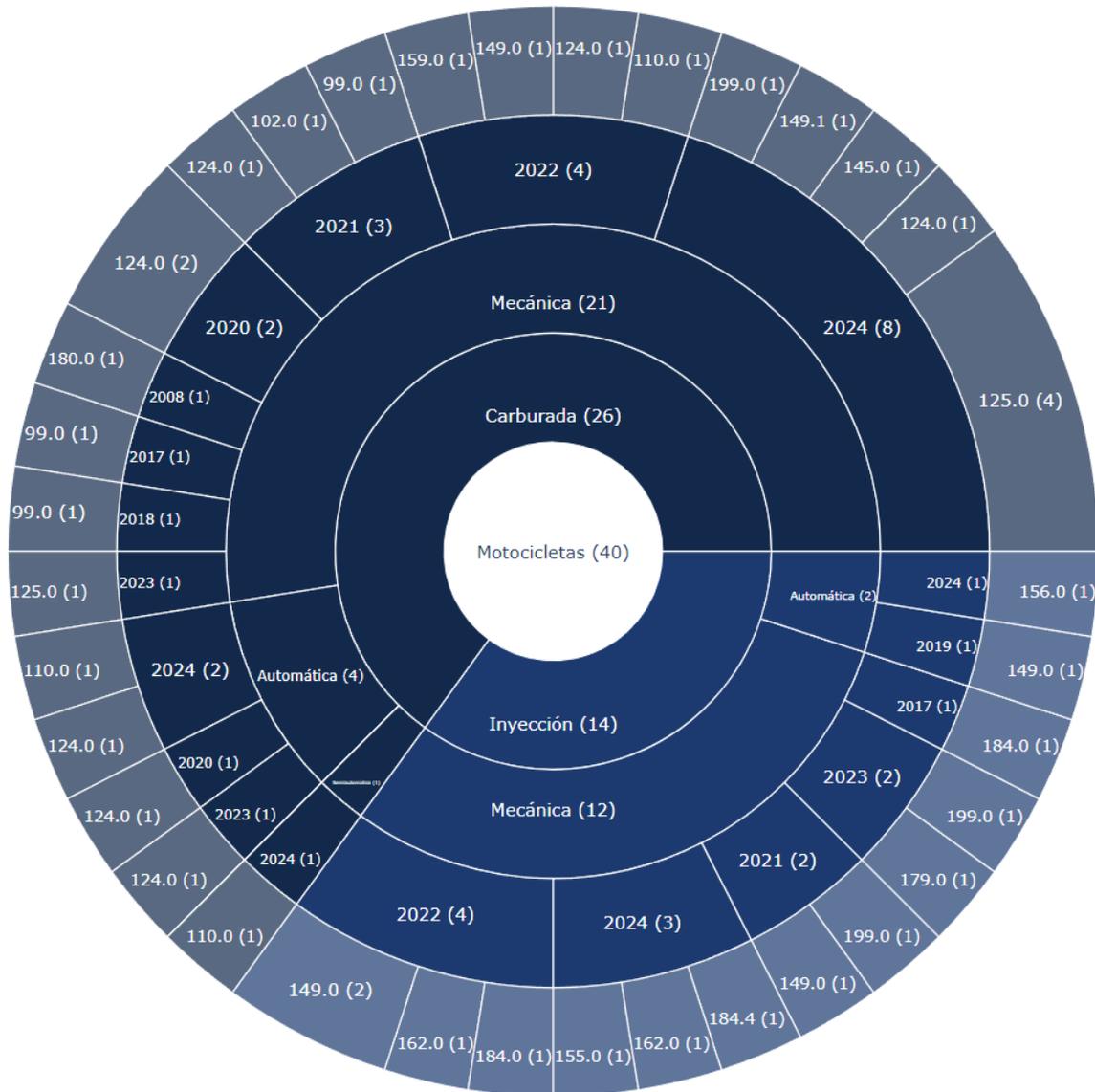


Figura 1.3 Muestra de las motocicletas medidas en este convenio

El análisis de la base de datos actualizada del RUNT permitió identificar las motocicletas más vendidas entre 2020 y 2023 en el mercado nacional. La dinámica del sector de motocicletas hizo que varias marcas desaparecieran del mercado o se fusionaran. Por esta razón optamos por consultar directamente con las empresas.

En comunicación enviada a través de la UPME, se les pidió a las empresas del sector su apoyo al proyecto, facilitando las cinco motocicletas nuevas, y las cinco usadas con menos de 36.000 km más vendidas por cada marca.

En la **Tabla 1.3** se muestra un listado de las 40 motocicletas medidas en este proyecto con sus características más relevantes.

Tabla 1.3. Motocicletas a las que se le midieron los factores de emisión en este proyecto (en orden alfabético de marca)

#	Estado	Alimentación/ Transmisión	Modelo	Cilindrada (cc)	Kilometraje (km)
1	Nueva	Carburada / Mecánica	2024	197	0
2				124	0
3					0
4					0
5	Usada		2020	124	20.000
6			2020		32.883
7	Usada	Carburada / Mecánica	2018	99	73.323
8			2023	125	17.286
9		I.E. / Mecánica	2023	179	5.275
10			2017	99	299.902
11			2024	145	6.330
12			2021	102	16.013
13			2008	180	NA
14			2021	99	39.379
15	Usada	I.E. / Mecánica	2023	199	2.760
16			2021	199	36.500

#	Estado	Alimentación/ Transmisión	Modelo	Cilindrada (cc)	Kilomet. (km)
17	Usada	I.E. / Mecánica	2017	184	27.413
18		I.E. / Automática	2019	149	26.830
19	Nueva	I.E. / Mecánica	2024	162	0

20	Usada		2022	162	1.576
21	Nueva	Carburada / Mecánica	2024	125	0
22		I.E. / Mecánica	2024	184	0
23	Usada	I.E. / Mecánica	2022	184	4.332
24		I.E. / Automática	2024	156	622
25	Nueva	Carburada / Mecánica	2024	110	0
26		Carburada/Automática	2024	110	0
27		Carburada / Mecánica	2024	149	0
28	Usada	Carburada/Automática	2020	124	25.672
29			2024	124	1.459
30		Carburada / Mecánica	2022	159	22.204
31			2022	149	15.840
32			2022	124	8.506
33		Carburada/Automática	2023	124	n.d.
34		Carburada / Mecánica	2024	124	1.335
35		Usada	I.E. / Mecánica	2022	149
36	22.269				
37	I.E. / Mecánica		2021	149	34.941
38	Carburada / Mecánica		2022	110	12.155
39			2021	124	26.181
40	I.E. / Mecánica		2024	155	1.158

En la **Tabla 1.4** y en la **Figura 1.4** se muestran los 30 vehículos livianos a los que se les midieron los factores de emisión. En la **Figura 1.5** se muestra un resumen de las categorías de motocicletas y vehículos seleccionados en función de su cilindrada y año de modelo de acuerdo con su mayor representatividad en el mercado nacional.

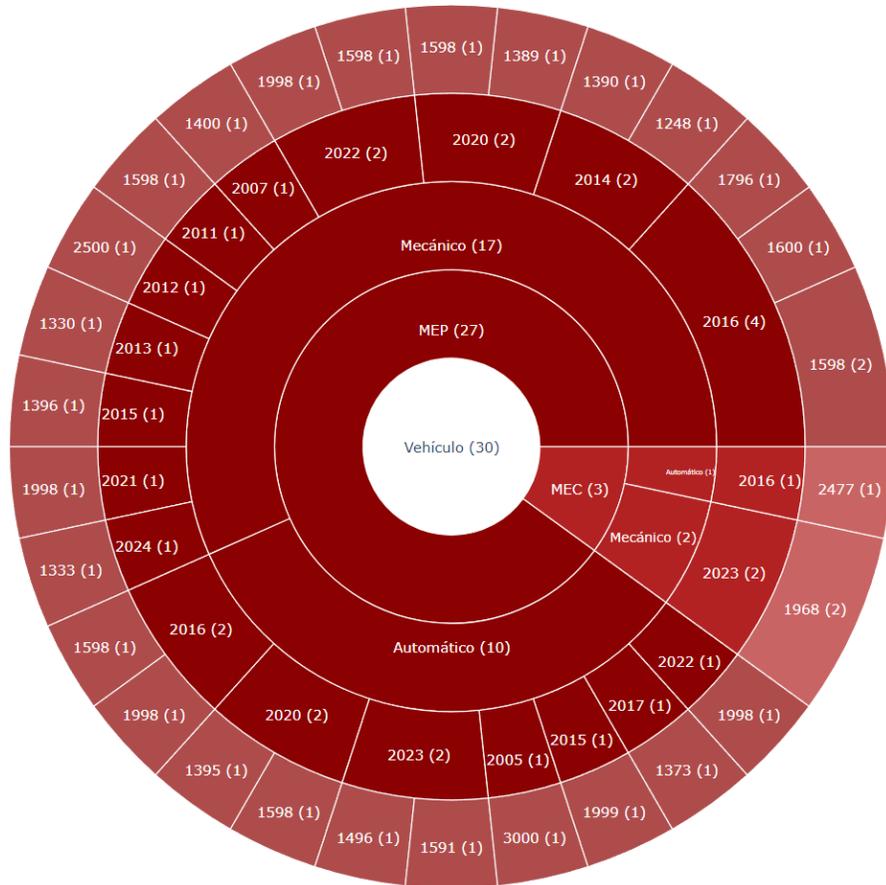


Figura 1.4 Muestra de los vehículos livianos medidos en este convenio. M: Mecánico, A: Automático

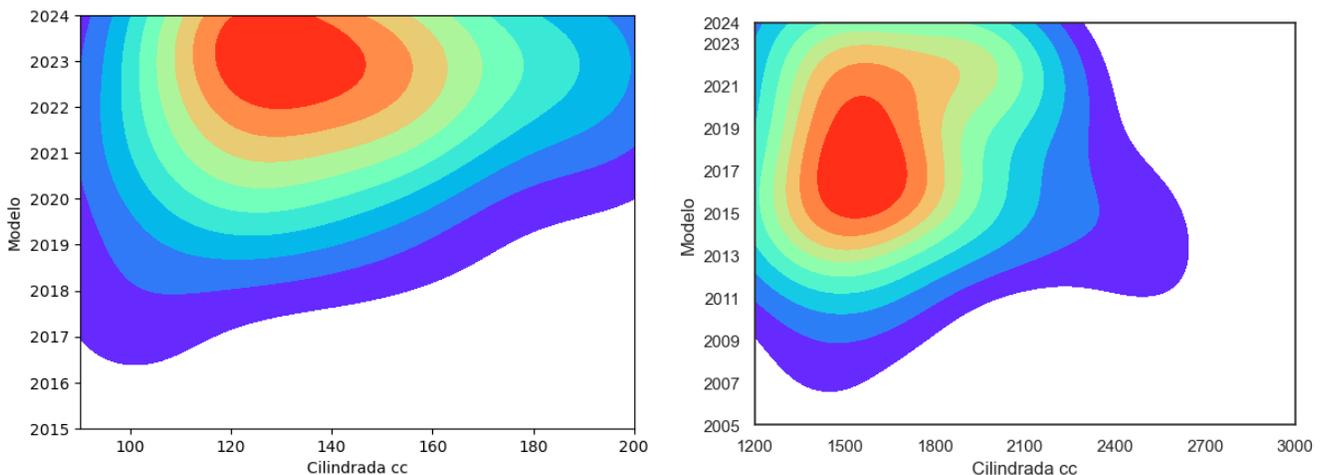


Figura 1.5 Diagrama de calor de la representatividad de las muestras de motocicletas (izq.) y vehículos livianos (der.) medidos en este proyecto

Tabla 1.4. Vehículos livianos a las que se le midieron los factores de emisión

#	Ciclo	Inyección	Transmisión	Modelo	Cilindrada (cc)	Kilometraje
1	MEP	Multipunto	Mecánico	2016	1600	3.428
2				2012	2500	n.d.
3				2011	1598	86.470
4			Automático	2016	1598	45.706
5			Mecánico	2021	1998	44.135
6				2014	1390	137.074
7				2016	1598	60.912
8				2016	1598	80.331
9		GDI	Mecánico	2024	1333	1.143
10		Multipunto	Mecánico	2022	1598	12.363
11				2022	1998	29.970
12	MEP	Multipunto	Automático	2015	1999	93.010
13			Mecánico	2015	1396	115.919
14				2014	1248	67.925
15	MEC	Directa/Euro 5	Mecánico	2023	1968	7.841
16		Directa/Euro 6		2024	1968	5.988
17	MEC	Directa/Euro 4	Automático	2016	2477	173.130
18	MEP	GDI	Automático	2023	1496	9.646
19				2022	1998	11.550
20				2016	1998	88.516
21	MEP	Multipunto	Mecánico	2007	1400	125.264
22				2016	1796	70.065
23				2020	1389	32.233
24				2013	1330	184.578
25	MEP	Multipunto	Automático	2023	1591	13.597
26	MEP	Multipunto	Automático	2020	1598	27.767
27				2005	3000	165.041
28			Mecánico	2020	1598	52.809
29	MEP	GDI	Automático	2017	1373	51.228
30	MEP	Multipunto	Automático	2020	1395	35.099

La empresa CORAUTOS ANDINO se vincularon voluntariamente a la Fase 3.

3. INSTRUMENTACIÓN DE VEHÍCULOS Y ADECUACIÓN DE LOS BANCOS DE RODILLOS

Los factores de emisión de las motocicletas se midieron siguiendo los ciclos de conducción específicos para esta categoría vehicular en el banco de rodillos dinamométrico ubicado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia (**Figura 1.6, izq.**). Por su parte los vehículos livianos se midieron en el banco de rodillos de la Institución Universitaria Pascual Bravo (**Figura 1.6, der.**). Para medir los factores de emisión de las dos categorías de fuentes móviles se ejecutaron los ciclos de conducción que se habían sintetizado en el convenio CV-001-2020 (FECOC+ Fase 1) para motocicletas (**Figura 1.7, izq.**) y vehículos livianos (**Figura 1.7, der.**).



Figura 1.6. Bancos de rodillos utilizados para medir factores de emisión siguiendo ciclos de conducción. Izq.: para motocicletas. Der.: para vehículos livianos

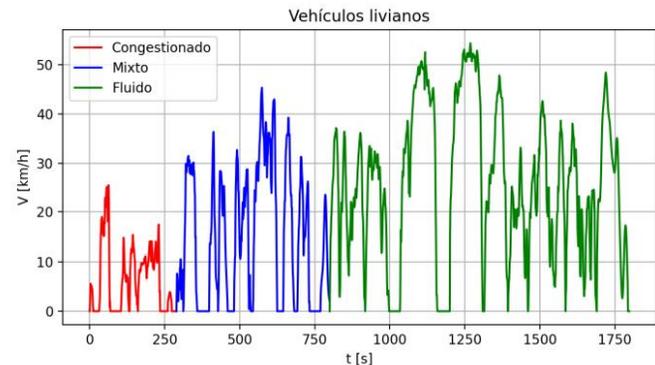
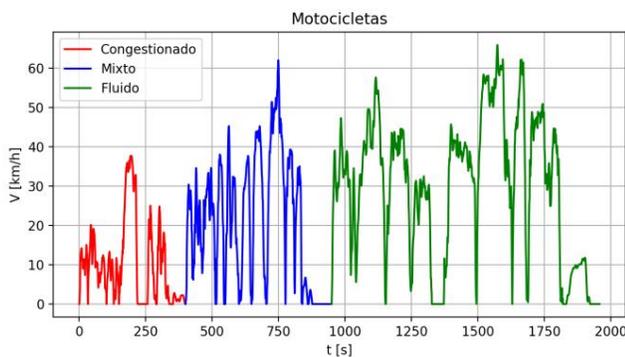


Figura 1.7. Ciclos de conducción utilizados para determinar factores de emisión. Izq.: Ciclo de motocicletas. Der.: Ciclo de vehículos livianos

Los factores de emisión para los vehículos livianos y las motocicletas se determinaron usando equipos de medición a bordo (ver sección 3 abajo). Estos ciclos incluyeron las condiciones específicas de carga que simulaban condiciones de manejo real.

En la reproducción de los ciclos de conducción en los bancos de rodillos se intentó seguir lo más fielmente posible la estrategia de cambios de marcha establecida en la norma brasilera NBR6601. Las velocidades se muestran en la **Tabla 1.5**.

Tabla 1.5. Umbrales de velocidad para las estrategias de cambio de marcha

Cambio de marchas	NBR 6601 (km/h)
1 ^a – 2 ^a	25
2 ^a – 3 ^a	40
3 ^a – 4 ^a	65
4 ^a – 5 ^a	72

Los ciclos de conducción locales: UPME, o AMVA y AMVA + Pendiente (AMVA + P) desarrollados estos dos últimos por el grupo ejecutor para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) en el marco de los convenios interadministrativos 1096-2016 y 888 de 2017, conllevan un aumento en el consumo de combustible y en los factores de emisión en comparación con el ciclo internacional usado para homologación de vehículos nuevos WLTC (*worldwide harmonized light duty test cycle*). Este comportamiento se evidencia con la distribución de las condiciones de operación del motor (presión media efectiva vs régimen de giro del motor) requeridas por el vehículo para seguir cada ciclo de conducción, como se muestra en la **Figura 1.8** para el caso de la estrategia de cambios de marcha de la norma de Brasil NBR 6601 aplicada a un motor *Cummins ISF 2.8* instalado en la camioneta Foton Tunland, ubicado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia.

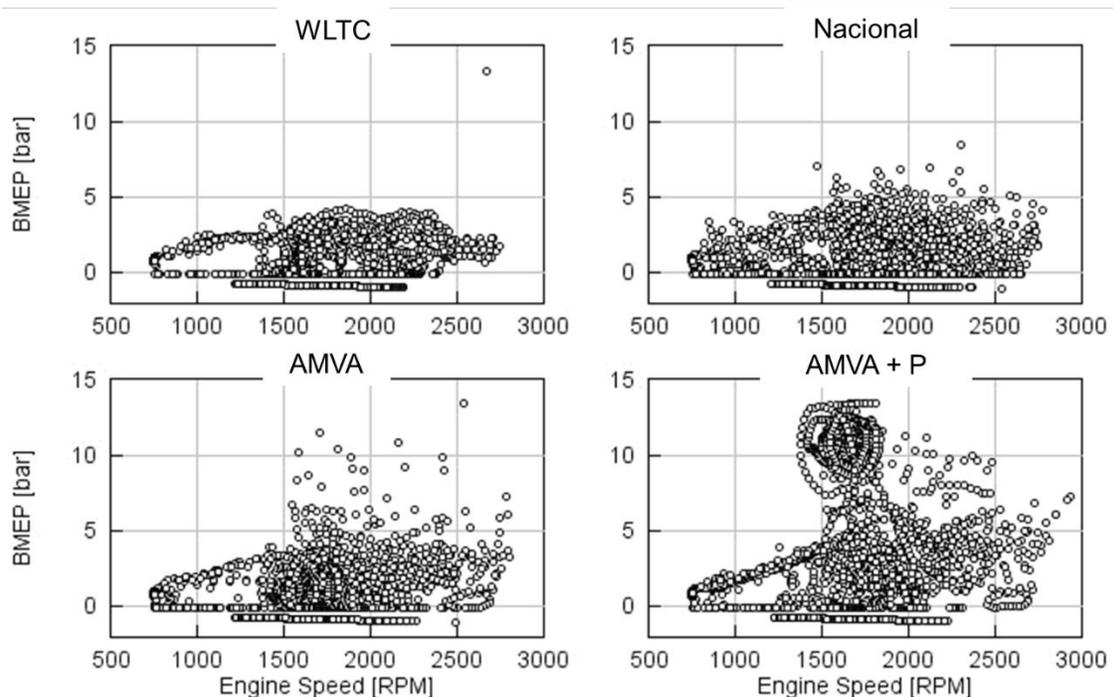


Figura 1.8. Puntos de operación del motor Cummins ISF 2.8 para diferentes ciclos de conducción usando la estrategia de cambios de marcha de la norma brasileña NBR 6601.

Determinación del grado de carga en el dinamómetro de rodillos de motocicletas

En el banco de rodillos, el perfil de velocidad del ciclo de conducción es aproximadamente la velocidad tangencial que debe tener la parte externa de la rueda (y por ende la velocidad tangencial del rodillo del banco) en cada instante del ciclo de conducción.

Conociendo la variación de la velocidad (aceleración) de la motocicleta en el ciclo, el coeficiente aerodinámico, el coeficiente de rodadura, la masa de la moto (con el conductor), se logró estimar la fuerza tractora requerida (F_x) para que la motocicleta siguiera el ciclo de conducción según:

$$F_x = F_{inercial} + F_{aero} + F_{rod}$$

Donde:

- F_x : Fuerza de tracción en la rueda
- $F_{inercial}$: Fuerza inercial. Producto de la masa (m) por la aceleración longitudinal (a)
- F_{aero} : Fuerza aerodinámica.
- F_{rod} : Fuerza de rodadura.

Fuerza inercial:

La fuerza inercial está dada por el producto

$$F_{inercial} = m * a$$

La aceleración promedio (considerando el valor absoluto de las aceleraciones segundo a segundo en el ciclo) FECOC+ Fase 1, es 0.13 m/s². Luego, la fuerza inercial es:

$$F_{inercial} = m * a = 0.13 * m \text{ [N]}$$

Fuerza aerodinámica:

La fuerza aerodinámica promedio, en nuestro caso, para el ciclo FECOC+ Fase 1, se tomó para la velocidad promedio del ciclo: 23 km/h. El área frontal proyectada estimada fue de: 0.6 m de ancho x 1.6 m de alto (conductor sentado), es decir, $A=0.96\text{m}^2$.

El coeficiente aerodinámico para motocicletas puede variar drásticamente, especialmente por el tipo de parabrisas y protectores laterales que direccionan el flujo del aire. Sin embargo, para nuestro caso, supusimos que el conductor iba sentado, y con una maleta trasera. Por tal motivo, supusimos un coeficiente aerodinámico de $C_d = 0.8$, de modo que la fuerza aerodinámica se obtuvo como:

$$F_{aero} = \rho C_d A v^2 / 2 = 0.99 * 0.8 * 0.96 * (233.6)^2 / 2 = 15.5 \text{ N}$$

Siendo:

- ρ : densidad del aire en las condiciones del lugar.
- C_d : coeficiente aerodinámico
- A : Área proyectada frontal
- v : velocidad longitudinal.

Fuerza de rodadura

$$F_{rod} = f * m * g$$

Donde:

- m : masa de la motocicleta + conductor
- g : aceleración de la gravedad
- f : coeficiente de rodadura

El coeficiente de rodadura se asumió alrededor de $f = 0.01134$, tomando el promedio de los coeficientes de 5 ruedas evaluadas acorde a la norma ISO18164-2005 en el estudio realizado por *Kengkamon Wiraykasem y Somchai Pattana* (The effect of motorcycle tyre rolling resistance coefficient on the saving of fuel consumption. September 2021. Energy Reports 7(2017):248-252. DOI:10.1016/j.egy.2021.06.042).

El valor de la fuerza de rodadura, para nuestro caso dependió de la masa de la moto + el conductor y estuvo dada por la formula:

$$F_{rod} = f * m * g = 0.01134 * 9.8 * m = 0.1111 * m [N]$$

El torque requerido en el rodillo, para obtener la fuerza de tracción en el contacto con la rueda equivalente fue:

$$T_{rod} = F_x * r_{rod}$$

Donde:

- T_{rod} : torque rodillo
- F_x : fuerza de tracción en la rueda
- r_{rod} : radio rodillo.

El torque requerido en el rodillo será:

$$T_{rod} = (15.5 + 0.1111 * m + 0.13 * m) * r_{rod} \quad T_{rod} = (15.5 + 0.2411N) * r_{rod}$$

Como el radio del rodillo en el banco de pruebas es de 22.5 cm, obtuvimos una tabla de torques (**Tabla 1.6**) según la masa de la motocicleta + peso del conductor, así:

Tabla 1.6. Torques programados en el banco de rodillos de motocicletas para la medición de factores de emisión

Masa [kg]	Torque [Nm]
Moto+conductor	Rodillo
150	11.6
155	11.9
160	12.2
165	12.4
170	12.7
175	13.0
180	13.3
185	13.5
190	13.8
195	14.1
200	14.3
205	14.6
210	14.9
215	15.2
220	15.4
225	15.7

Antes de realizar la medición de los factores de emisión, se llevó a cabo una inspección meticulosa según un protocolo de verificación del estado de cada motocicleta/vehículo de prueba. Este protocolo fue realizado con la colaboración de las empresas del sector de motocicletas. Entre otros parámetros, se registraba:

Fecha/hora de prueba, estado Nueva/Usada, tipo de transmisión Mecánica/Automática, Fabricante, Marca, línea, matrícula/No. Motor/VIN, cilindrada, potencia, fecha de revisión técnico-mecánica, kilometraje, revoluciones al ralentí, rango cambios rpm, lubricación de la cadena, tensión de la cadena, calibración de presión en neumáticos, nivel de combustible, nivel de aceite lubricante, temperatura inicial del motor, responsable de la prueba, peso de la motocicleta + conductor, grado de carga en el dinamómetro, y observaciones.

4. MEDICIÓN EN BANCO DE RODILLOS

Para la determinación de las emisiones contaminantes gaseosas (monóxido de carbono – CO, bióxido de carbono – CO₂, hidrocarburos totales – THC y óxidos de nitrógeno – NO_x) y de material particulado en número y masa (PM), se usó un equipo de análisis de gases y partículas de la marca 3DATX (Nueva York, USA), serie parSYNC FLEX (Figura 1.9 y **Tabla 1.7**).

Cada vez que el equipo PEMS de 3DATX se encendía realizábamos un procedimiento de precalentamiento y puesta a cero con aire ambiente, antes de cada ciclo de conducción se hizo verificación de CO/CO₂ con gas certificado, mientras que la verificación de NO_x se llevó a cabo al comienzo de cada semana con 3 puntos de medición (diferentes diluciones aire/ NO_x).

Para medir la relación de aire / combustible se utilizó un equipo de la marca Horiba Mexa 730λ (**Figura 1.10**) cuyos datos técnicos aparecen en la **Tabla 1.8**.



Figura 1.9. PEMS para gases regulados y partículas de la marca 3DATX parSYNC FLEX.



Figura 1.10. Sensor de relación Aire/Combustible en gases de escape (izq.) con su sistema de calibración (der.)

Tabla 1.7. Especificaciones técnicas del equipo para medición de gases de escape.

BASIC GASMOD CARTRIDGE	3 ELECTRODE ELECTRO-CHEMICAL			
Linear meas. range	Nitric Oxide (NO)		Nitrogen Dioxide (NO₂)	
T90 response time	0-5000 ppm		0-300 ppm	
Resolution	< 5 seconds		< 35 seconds	
Operating temperature	-20°C to 50°C		-20°C to 50°C	
Repeatability	2% of signal		2% of signal	
ADVANCED GASMOD CARTIDGE	NON-DISPERSIVE INFRARED SPECTROMETER (NDIR)			ELECTRO-GALVANIC
	Carbon Dioxide (CO₂)	Carbon Monoxide (CO)	Hydrocarbon (HC)	Oxygen (O₂)
Measurement range	0-20 %	0-15 %	0-30000 ppm	--
Accuracy	+/- 0.3% absolute +/- 3% relative	+/- 0.02% absolute +/- 3% relative	+/- 8ppm absolute +/- 3% relative	--
Repeateability	+/- 0.1% absolute +/- 2% relative	+/- 0.02% absolute +/- 2% relative	+/- 6ppm absolute +/- 2% relative	--
BASIC PARTICULATES CARTRIDGE				
Details	Data			
Particle Size	10 to 10000 nm			
Optimal Particle Size Range				
Ionization Range	Ultra-fine	10 to 250 nm / peak @ < 80 nm		
Opacity Sensor	Medium	80 to 7000 nm / peak @ ~ 800 nm		
Scattering Sensor	Coarse	250 to 10000 nm / peak @ ~ 2500 nm		

Notas:

1. La señal del sensor de oxígeno no se utilizó para calcular ningún factor de emisión en este proyecto
2. Los factores de emisión de partículas tanto en masa (PM), como en concentración del número de partículas (PN) corresponden al rango de ultra-finas en tamaños de 10 a 250 nm, con la media en 80 nm (ver fila resaltada en color azul claro en la **Tabla 1.5**).

Tabla 1.8. Especificaciones técnicas del sensor A/F de gases de escape

■ Control unit	
Model name	MEXA-730λ
Display range	A/F : 3.99 to 500.0 λ : 0.275 to 30.00 O ₂ : 0.00 to 99.99 vol%
Accuracy of A/F (Guarantee range is from 9.5 to 200 A/F) (Model gas at room temperature, atmospheric pressure is used): With 3-point calibration at 9.5 A/F, stoichiometric point and 60.0 A/F	
	9.50 A/F to stoichiometric point: within ±0.3 A/F
	at stoichiometric point: within ±0.1 A/F
	stoichiometric point to 20.00 A/F: within ±0.3 A/F
	20.01 to 30.00 A/F: within ±0.7 A/F
	30.01 to 40.00 A/F: within ±1.0 A/F
	40.01 to 50.00 A/F: within ±1.5 A/F
	50.01 to 60.00 A/F: within ±2.0 A/F
	60.01 to 80.00 A/F: within ±6.0 A/F
	80.01 to 100.0 A/F: within ±9.0 A/F
	100.1 to 150.0 A/F: within ±20.0 A/F
	150.1 to 200.0 A/F: within ±38.0 A/F
Response time	Typically 0.08 s (Max. 0.15 s)
Digital input-output	RS-232C (standard)
Analog output	0 to 5 V DC (scaling possible)
H/C setting range	0.00 to 9.99 (key selectable)
O/C setting range	0.000 to 6.811 (key selectable)
Calibration gas	Ambient air or standard gas
Acceptable vibration	0 to 294 m/s ²
Power	10-30 V DC, 50 W
Dimensions	130 (W) × 170 (D) × 75 (H) mm
Mass	Approx. 1.1 kg (Control unit)
■ UEGO Sensor (Data sheet supplied with each UEGO sensor)	
Sample gas temperature	-7°C to 900°C
Heater temperature control	PID
Hexagonal nut size	22 mm
Torque	40±4N · m

El procedimiento adoptado por el grupo ejecutor de este convenio (GIMEL) para determinar el consumo instantáneo de combustible (con una frecuencia de 1 Hz) a partir de las señales de flujo de aire en la admisión (MAF), y de la relación aire/combustible (AFR), se basó en el trabajo realizado por *Masanobu Akita* en 2014 (**Figura 1.11**). Este método fue contrastado con la medición directa de flujo de combustible y flujo de aire en un motor *Cummins ISF 2.8* turboalimentado (Euro 4) montado en el banco de ensayos de motores del laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia. El sensor de flujo de combustible es una balanza (Shimadzu, Japón) de ±0.01 g de precisión, mientras que el flujo de aire fue obtenido con un sensor calibrado de hilo caliente (Magnetrol, USA). En el Anexo 8 (Protocolos de verificación y calibración de equipos) se describe el procedimiento y los resultados de este procedimiento.

Feature Article

Application

Real-time Fuel Consumption Measurement Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor

Masanobu AKITA

The improvement of fuel efficiency is one of the most important issues in the R&D of powertrain system. The real-time fuel consumption can be determined by AFR (air-to-fuel ratio) and raw exhaust gas flow rate and can be easily obtained without delay time by the in-situ measuring devices which can be installed at the same location. Integrated fuel consumption by this method showed a good correlation with that by the carbon balance method. On the other hand, when a fuel-cut is operated, the difference in transient behavior of the fuel consumption has been also observed due to the response time difference between these two methods. The result suggests that this method has a large potential for measuring the real-time fuel consumption.

Figura 1.11. Imagen del artículo tomado como base para la determinación del consumo instantáneo de combustible a partir de las señales de flujo de aire (MAF) y de la relación aire / combustible (AFR).

5. DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN

A continuación, se describe la metodología empleada para el cálculo de los factores de emisión de los vehículos livianos y motocicletas medidos en el marco del proyecto FECOC+ fase 3 (Convenio CO1.PCCNTR.5104655 de 2023), así como su posterior almacenamiento y análisis.

5.1 Estructura de organización de datos medidos

Con el fin de facilitar el procesamiento y trazabilidad de los datos, se desarrolló una estructura organizada para almacenarlos, la cual consistió en varias clasificaciones con las que se puede acceder fácilmente a cada dato. La estructura se muestra de manera general en la **Figura 1.12**.

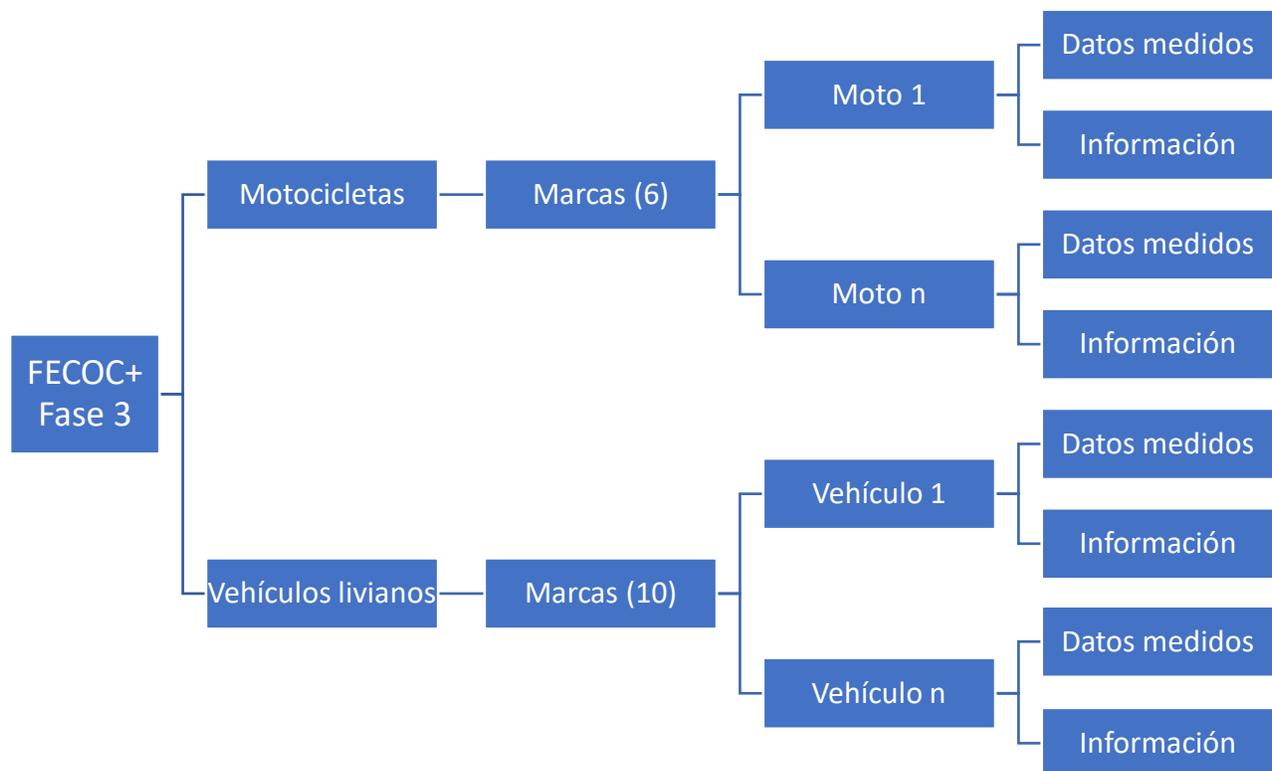


Figura 1.12. Estructura de almacenamiento y organización de datos medidos.

Dentro de los datos medidos, existen archivos en formato *csv* y *txt* provenientes de los diferentes sensores y sistemas de adquisición de datos utilizados. El PEMS mide la concentración gases contaminantes en el escape con una frecuencia de 1Hz (una muestra/segundo): dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), hidrocarburos sin quemar (HC), material particulado (PM) y número de partículas (PN). Estos datos de concentración de emisiones fueron almacenados en un archivo *csv* usando al programa del fabricante del equipo (3DATX).

Para las motocicletas se utilizó un sensor de flujo másico de aire en la admisión (MAF), una sonda de medición de la relación aire/combustible HORIBA 730λ y los sensores propios del banco de rodillos que arrojaban los datos de velocidad y revoluciones instantáneas del motor (régimen de giro en rpm), los cuales fueron registrados con una frecuencia de 10 Hz y almacenados en un archivo *csv* mediante un programa informático desarrollado por el grupo ejecutor GIMEL, el cual está en plataforma *LabView*.

Para los vehículos livianos se utilizaron los mismos sensores para la medición de flujo de aire y relación aire-combustible con la misma frecuencia, almacenados también en *csv* mediante el mismo software en plataforma *LabView*. Estos vehículos fueron medidos en el banco de rodillos de la Institución Universitaria Pascual Bravo, que tiene su propio software que arroja los datos de velocidad y régimen de giro de motor con una frecuencia de 2 Hz y los guarda en un archivo *txt*. Así, para cada prueba realizada (cada ciclo de conducción) en cada fuente móvil, se tenían 2 archivos para las motocicletas y 3 archivos para los vehículos livianos, almacenados de acuerdo con la estructura seguida, descrita en la **Figura 1.12**.

5.2 Librería y base de datos

Para llevar a cabo el procesamiento de los datos, se utilizó el programa informático *Python* como herramienta principal. Para esto, se creó una librería con la base de datos de todos los vehículos medidos, siguiendo la estructura de organización mencionada anteriormente mediante una estructura de datos de tipo diccionario de *Python*. En este, se almacenó la información relevante de cada vehículo, como su cilindrada, kilometraje, modelo, tecnología de alimentación o combustible que utiliza y también se almacenaron las rutas de acceso a los archivos de datos separados por prueba.

En esta librería se almacenaron además funciones utilizadas posteriormente en cada etapa del cálculo de los factores de emisión.

5.3 Etapa 1: Revisión de pruebas

Una vez que los datos estuvieron almacenados siguiendo un orden establecido y disponibles para su acceso, se realizó la lectura de los archivos utilizando la librería *Pandas* de *Python*, seleccionando los datos de interés para la verificación de que hubiera repetibilidad en las pruebas seguidas y que el ciclo de conducción se hubiera seguido de manera adecuada. Para las verificaciones, se graficaron los datos obtenidos en el tiempo con el fin de obtener una comparación visual y se realizó la integral en el tiempo, para visualizar de forma rápida qué tan alejados estaban los resultados entre una prueba y otra.

El primer parámetro revisado fue la velocidad (km/h) de cada vehículo. En esta, se compararon las velocidades instantáneas seguidas en los ciclos de conducción con el ciclo de referencia, se calculó el factor de correlación entre cada prueba con la referencia y se calculó la distancia total recorrida en el

ciclo mediante la integral en el tiempo. El objetivo era verificar que todas las pruebas realizadas siguieran de manera adecuada el ciclo de conducción para garantizar la repetibilidad en las demás variables medidas. En la **Figura 1.13**, a modo de ejemplo, se puede ver una comprobación de los 5 ciclos de conducción seguidos para uno de los vehículos, con los datos de la distancia total recorrida y la correlación con el ciclo de referencia para cada prueba.

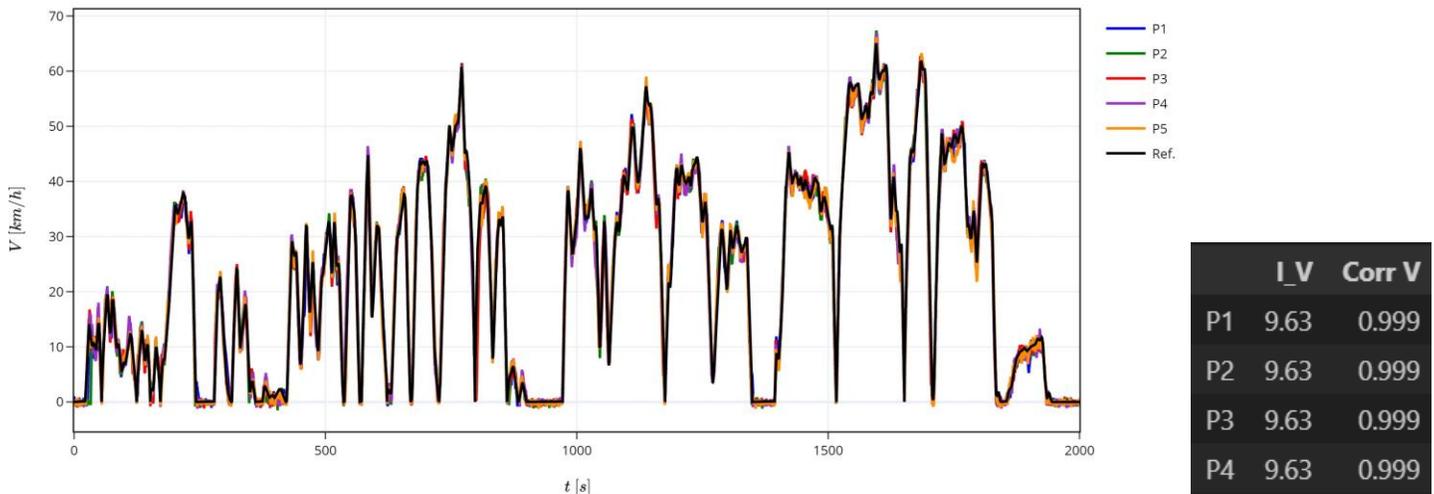


Figura 1.13. Verificación de la velocidad para un vehículo. Integral de velocidad (I_V) y Factor de correlación de la velocidad (Corr V)

De la misma manera se evaluaron las variables de: flujo de aire, flujo de combustible calculado a partir de la relación aire combustible, y las emisiones contaminantes.

Al obtener todas las gráficas y las integrales en el tiempo, se exportaron estos datos a un archivo de *Excel*, con el fin de comparar los resultados obtenidos en las pruebas y tomar decisiones sobre si era necesario rechazar una prueba completa o una variable específica de las emisiones contaminantes de alguna prueba (dato espurio). Este archivo se organizó mediante código de colores para las pruebas aprobadas, rechazadas, o que se consideraba que tenían alguna observación, y se dejaba un comentario explicando las decisiones tomadas para la correcta comunicación con el equipo de trabajo.

En la **Figura 1.14** se muestra a modo de ejemplo un registro de datos de material particulado (PM) medido en 5 ciclos de conducción para un vehículo, donde una prueba se comportó diferente a las demás, por lo que se tomó la decisión de rechazar dicha variable para dicha prueba (se rechazó la prueba P1 de color azul).

En la **Figura 1.15** se muestra un archivo de *Excel* con las decisiones tomadas con respecto a la prueba de la **Figura 1.14**. Las columnas con 1 y 0 en cada variable indican si la prueba fue aprobada o rechazada. Se registra un código de colores violeta para pruebas rechazadas, naranja para pruebas con alguna observación, y blanco para pruebas aprobadas, además de comentarios realizados en cada situación.

Finalmente, después de una revisión exhaustiva de las pruebas realizadas para cada vehículo, se registraban los resultados de las pruebas rechazadas en la librería, para que no fueran tenidas en cuenta posteriormente en el cálculo de los factores de emisión.

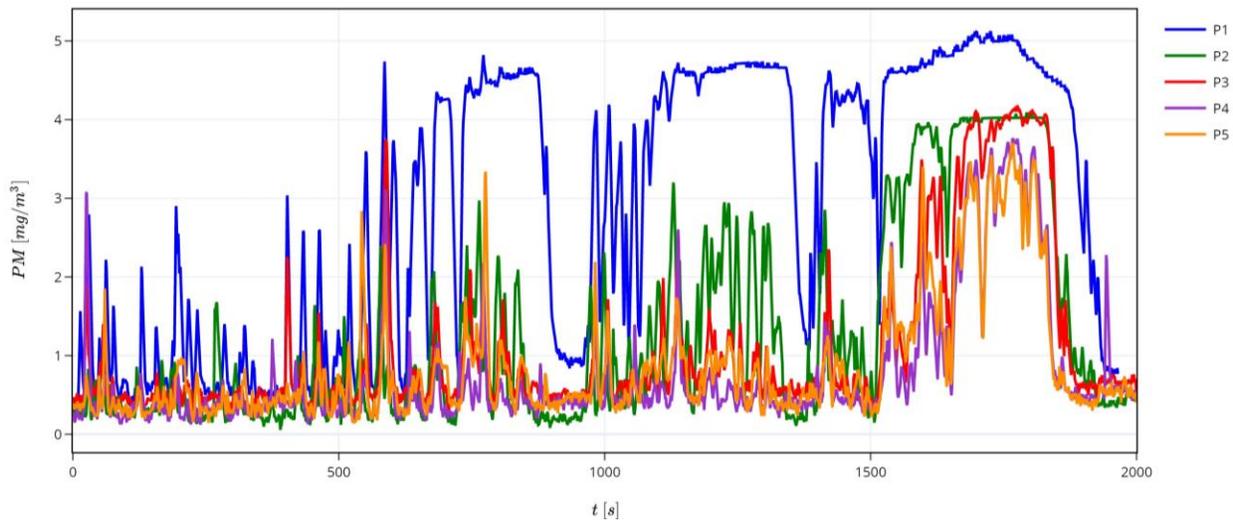


Figura 1.14. Prueba rechazada de PM para un vehículo. Prueba 1 (color azul) descartada

	V	I_V	Corr V	I_NO	NO2	I_NO2	HC	I_HC	PM	I_PM
P1	1	12,52	0,995	610,1	1	7,1	0	170,5	0	5,7
P2	1	12,55	0,996	588,2	1	8	1	248,1	1	2,5
P3	1	12,54	0,996	546,4	1	9,9	1	362	1	2,2
P4	1	12,63	0,997	613,3	0	12,9	1	332,3	1	1,5
P5	1	12,53	0,997	636,2	0	14,4				

P6 ...

Valores anormalmente altos

14/08/2023 4:12 p. m.

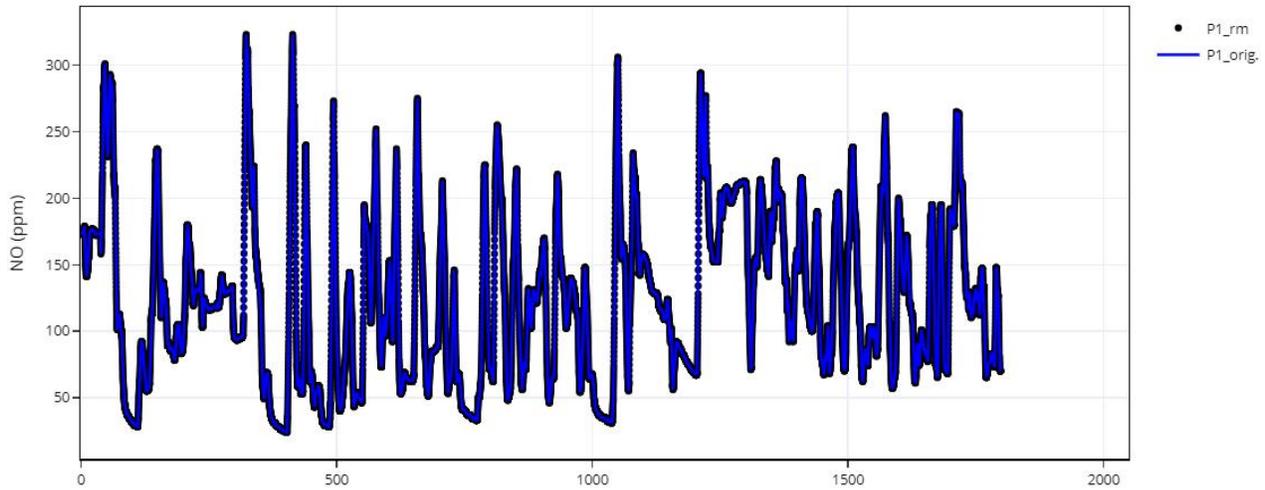
Figura 1.15. Archivo de consolidado con resumen de decisiones tomadas con respecto a pruebas

5.4 Etapa 2: Unificación de pruebas

Una vez concluida la etapa de verificación, una función establecida previamente en la librería se encargó de depurar las pruebas rechazadas para cada vehículo, dejando en el espacio de trabajo de *Python* solamente las pruebas aprobadas, sin modificar los datos originales.

Como se mencionó anteriormente, algunos datos tenían frecuencias de muestreo diferentes entre sí, por lo que resultaba necesario reorganizarlos todos a la misma frecuencia de 1 Hz. Para esto se realizó un remuestreo de los datos a la frecuencia máxima tomada, que fue de 10 Hz tanto para motocicletas como para vehículos livianos.

Una vez realizado el remuestreo, se realizó una comprobación tanto gráfica como por integral de que este proceso no hubiera tenido un efecto negativo que alterase la validez de los datos. En la **Figura 1.16** se presenta un ejemplo de este remuestreo con sus respectivos resultados.



	e_CO2 [%]	e_CO [%]	e_NO [%]	e_HC [%]	e_NO2 [%]	e_PM [%]	e_PN [%]
P1	0.05	-1.00	0.04	-1.0	0.08	0.06	0.07
P2	0.04	0.05	0.03	-1.0	0.07	0.04	0.05
P3	0.02	0.03	0.02	-1.0	0.04	0.02	0.03
P4	0.01	0.01	0.01	-1.0	0.01	0.01	0.01

Figura 1.16. Remuestreo de datos en una prueba. En la tabla inferior se muestra el error porcentual entre la integral original y el factor de emisión después de llevar a cabo el reprocesamiento de datos

En la **Figura 1.16** se presenta en color azul la curva original, y en puntos negros el remuestreo a una frecuencia mayor. También se observa una tabla con los errores porcentuales al evaluar la integral original respecto a los valores reprocesados. Los datos que aparecen con valor de -1, corresponden a pruebas rechazadas en la etapa 1.

Con los datos reorganizados a la misma frecuencia de muestreo, se procedió a unificar aquellos de interés correspondientes a una prueba en un solo *DataFrame* de *Python* para guardarlos en un diccionario que seguía la misma estructura. Este diccionario resultante se guardó en un archivo de tipo *Pickle* para leerlo en la siguiente etapa de sincronización.

5.5 Etapa 3: Filtrado y Sincronización de señales

Es necesario filtrar algunas señales que vienen desde la toma de datos con elevado ruido, lo que dificulta identificar puntos correspondientes a un cambio en un evento de conducción (aceleración brusca). Para esto, se utilizó el filtro de *Savitzky-Golay*, el cual disminuye el ruido en la señal

conservando las características de la distribución inicial tales como máximos y mínimos. Con los datos filtrados, se procedió con la etapa de sincronización de señales.

Debido al uso de un sistema de muestreo de emisiones portátil (PEMS) para medir la concentración de contaminantes en el tubo de escape, así como al uso de diferentes sensores de velocidad del vehículo, régimen de giro del motor, flujos de aire y relación aire/combustible, entre otros, se hace necesario llevar a cabo un proceso de sincronización de señales. Esto obedece a los diferentes principios físicos de medición de cada parámetro, así como al tiempo que transcurre desde que se producen las emisiones en la cámara de combustión y viajan por el sistema de escape hasta el sensor.

Para llevar a cabo este proceso, se implementó en la librería una función para calcular los puntos que se consideraba que correspondían a un evento de aceleración súbita, es decir, cuando el vehículo aumenta repentinamente su velocidad después de salir de un ralentí. Durante este evento de conducción, se sabe que el flujo de combustible debe aumentar, por lo que también aumentarán el flujo de aire y la concentración de los contaminantes y disminuirá la relación aire/combustible.

La función de “puntos críticos” (color rojo en la **Figura 1.17**) se implementó en la librería para buscar de forma automática los puntos en los primeros minutos de la prueba que correspondían a este evento. Sin embargo, no siempre era del todo efectivo, por lo que era necesario identificar algunos puntos y realizar la corrección manualmente.

En la **Figura 1.18** se muestra la implementación de esta función de sincronización por eventos en las señales de tiempo (que se normalizaron para tener todas en la misma escala), donde los puntos críticos se ven en color rojo para cada curva.

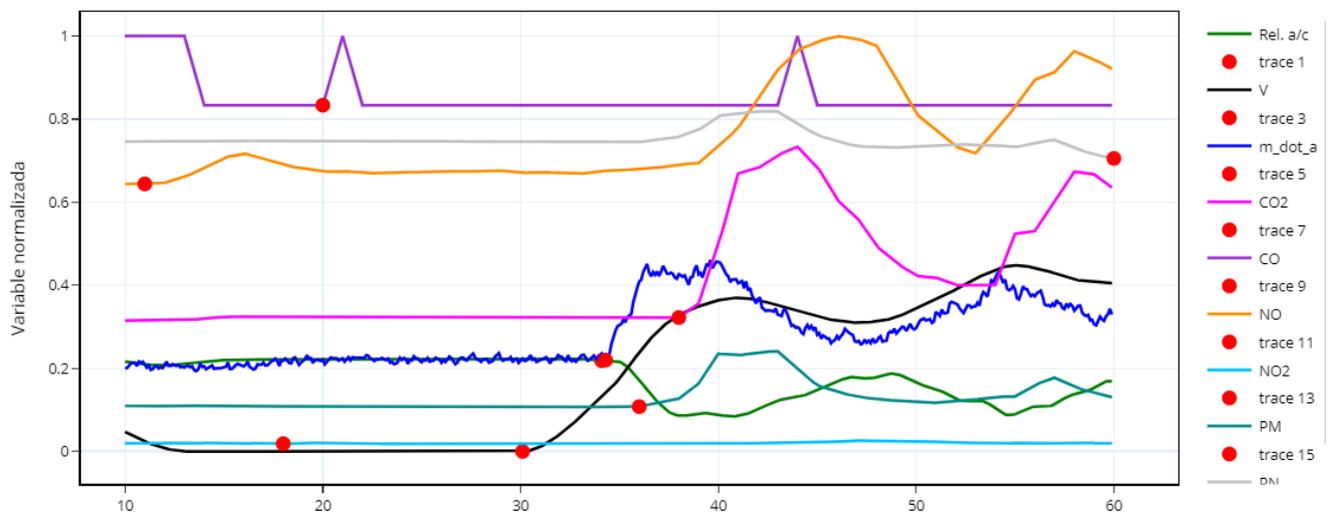


Figura 1.17. Puntos críticos (color rojo) localizados en una prueba de un vehículo

Estos puntos críticos no siempre se ubicaban de forma automática, por lo que fue necesario ajustarlos manualmente. Una vez ubicados correctamente, se desplazaban las curvas de flujo de aire, relación aire/combustible y emisiones hacia la izquierda o derecha según fuera el caso para que quedaran en fase con la velocidad. Así, se aseguraba que el evento de aceleración súbita coincidiera con los

comportamientos esperados de las emisiones contaminantes y flujos de aire y combustible como se muestra a modo de ejemplo en la **Figura 1.18**.

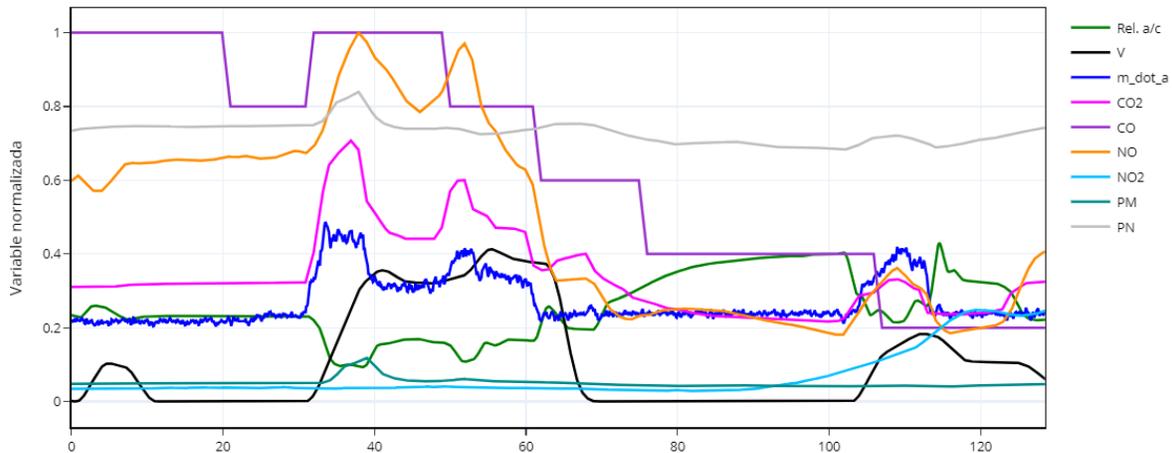


Figura 1.18. Curvas sincronizadas para una prueba de un vehículo

Una vez que se tuvieran todas las pruebas de un vehículo sincronizadas, se guardaban en otro archivo de tipo *Pickle* para facilitar llevar estos datos a la etapa final del cálculo de los factores de emisión que se describe a continuación.

5.6 Etapa 4: Cálculo de los factores de emisión

Una vez tratados los datos según los procedimientos descritos en las etapas 1 a 3, se garantizaba la confiabilidad de los datos, y en consecuencia se procedió con el cálculo de los factores de emisión para cada fuente móvil. Para esto, se utilizaron datos conocidos, como las masas molares de los contaminantes, la densidad del combustible y temperatura y presión en el sistema de escape.

Teniendo en cuenta que el equipo de medición de emisiones *ParSync Flex* entrega concentraciones volumétricas de los contaminantes, y que para el cálculo de los factores de emisión es necesario obtener el flujo másico del contaminante en cada instante de tiempo, se realizó la conversión a unidades másicas utilizando el flujo de gases de escape, calculado como la suma entre el flujo de aire y el flujo de combustible en la admisión. Esto teniendo en cuenta que CO₂ y CO estaban en %, NO, NO₂ y HC en ppm, PM en mg/m³ y PN en billones de partículas/cm³.

Se midieron al menos cuatro ciclos de conducción, y en todo caso se garantizó un mínimo tres repeticiones para cada una de las fuentes móviles, con el fin de garantizar confianza estadística en los resultados.

El flujo másico de cada contaminante se determina a partir de la medición del flujo de gases de escape la ecuación 1.

$$\dot{m}_i = \dot{V}_g \times \rho_i \times X_i \quad (1)$$

Donde \dot{V}_g es el caudal de gases de escape (m^3/s), determinado a partir de las dos señales, aire (MAF) y aire/combustible (Horiba Mexa 730 Lambda), ρ_i es la densidad del contaminante i (kg/m^3), obtenida mediante la instalación de sensores de presión y temperatura en el tubo de escape, y X_i es la concentración volumétrica medida para cada contaminante con el PEMS. Esta última se expresó como fracción molar, de modo que si se medía en % vol. (como el CO y el CO₂), se dividía por 100, y si se medía en ppm (como HC, NO y NO₂), se dividió por 1 millón.

En el caso del material particulado, la masa o el número de partículas por unidad de tiempo se determinaron multiplicando la respectiva concentración arrojada por el PEMS (mg/m^3 o $\#/cm^3$) por el flujo volumétrico de gases de escape, según se muestra en la ecuación 2.

$$\dot{P}M, \dot{P}N = X_{PM,PN} \times \dot{V}_g \quad (2)$$

La masa total de cada contaminante para una prueba se obtuvo integrando matemáticamente los respectivos flujos máxicos en el tiempo de la prueba (ecuación 3):

$$m_i = \int_{t=0}^{t_f} \dot{m}_i dt \quad PM, PN = \int_{t=0}^{t_f} (\dot{P}M, \dot{P}N) dt \quad (3)$$

Finalmente, cada factor de emisión se obtuvo al dividir la masa total entre la distancia recorrida en la prueba a lo largo del ciclo de conducción, según la ecuación 4:

$$FE_i = \frac{m_i, PM, PN}{distancia} \quad (4)$$

5.7 Aproximación al cálculo de incertidumbres de los factores de emisión

Para determinar las incertidumbres de los factores de emisión en este proyecto se empleó la norma técnica ASME PTC 19.1-2013 (*The American Society of Mechanical Engineers. "Test Uncertainty, Performance Test Codes". ASME PTC 19.1, New York 2013*).

Se distinguen principalmente dos tipos de incertidumbres asociados a una medida repetitiva realizada: La primera corresponde a efectos aleatorios (σ) que pueden generarse por falta de repetibilidad en sistemas de medición, y la segunda a efectos sistemáticos (b) que se tienen en cuenta cuando se conocen las fuentes de errores de los instrumentos, métodos de medición, condiciones ambientales o cuando se elaboran técnicas de adquisición de datos.

En este proyecto se tuvieron en cuenta los dos tipos de errores (aleatorios y sistemáticos) de las mediciones dependiendo de su origen y se realizó su cálculo para un nivel de confianza del 95%. En este caso, la incertidumbre se define como:

$$U(X) = 2\sqrt{\sigma(X)^2 + b(X)^2}$$

Donde:

U : Incertidumbre total.

X : Valor de la medición realizada.

σ : Incertidumbre asociada a efectos aleatorios.

b : Incertidumbre asociada a efectos sistemáticos.

A su vez las incertidumbres aleatorias y sistemáticas se definen respectivamente como:

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \sum_{j=1}^{N_p} (X_j - \bar{X})^2} \quad \wedge \quad b(X) = \sqrt{\sum_{k=1}^K (b(X_k))^2}$$

Donde, para σ :

N_p : Total de veces que se repitió la medición X .

\bar{X} : Valor promedio de la población de medidas realizadas.

Y, para b :

K : Total de veces que un error sistemático es conocido en la medida.

$b(X_k)$: Desviaciones estándar asociadas a cada error sistemático.

Para mayor detalle sobre el tratamiento de incertidumbres en este proyecto referirse al Anexo 6.

6. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FACTORES DE EMISIÓN

Este análisis se llevó a cabo midiendo en tres altitudes: sobre el nivel del mar (municipio de Apartadó, Antioquia), a 1500 msnm (Medellín), y en Bogotá a 2600 msnm. Se utilizaron las mismas dos fuentes móviles (2 motocicletas y 2 vehículos livianos) para llevar a cabo esta campaña experimental en cada altitud.

Para las pruebas en las dos motocicletas, una carburada y la otra de inyección electrónica, se trasladó el banco de rodillos dinamométrico del Laboratorio de Máquinas Térmicas a la sede de Apartadó de la Universidad de Antioquia (**Figura 1.19**), y a la sede de Primax en Puente Aranda (Bogotá).



Figura 1.19. Montaje y puesta a punto del banco de rodillos para pruebas de motocicletas en la sede de Apartadó de la Universidad de Antioquia (0 msnm)

7. BIBLIOGRAFÍA

- Factores de emisión de los combustibles colombianos – FECOC+. Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia. Convenio CV 001-2020 entre la UPME y la Universidad de Antioquia
- Caracterización del Transporte en Colombia: Diagnóstico y Proyectos de Transporte e Infraestructura. Ministerio de Transporte. 2005.
- CONPES 3943 de 2018, Política para el mejoramiento de la calidad del aire
- The American Society of Mechanical Engineers. "Test Uncertainty, Performance Test Codes". ASME PTC 19.1, New York 2013
- ABNT NBR 6601. *Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escape*. (Light road vehicles–Determination of hydrocarbon, carbon monoxide, nitrogen oxide, carbon dioxide and particulate material on exhaust gas). Actualización 18-10-2012.
- Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de fuentes móviles en el Valle de Aburrá – FEVA. Protocolo para construir los ciclos de conducción de vehículos livianos y motocicletas para el Valle de Aburrá. Convenio 1096-2016 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad de Antioquia. Universidad de Antioquia (2017).
- Hincapié O. David (2020). *“Diseño e implementación de un modelo para el cálculo de incertidumbres de emisiones contaminantes en pruebas dinámicas y estáticas de fuentes móviles”*. Trabajo de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. Medellín.
- Portal logístico de Colombia <https://plc.mintransporte.gov.co/>
- RNDC <https://rndc.mintransporte.gov.co/>
- 3DATX <https://3datx.com/parsync-flex/>
- HORIBA <https://www.horiba.com/>

CAPÍTULO 2

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

**Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+).
Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos
livianos y motocicletas**

FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS EN MOTOCICLETAS

CONTENIDO

CONTENIDO.....	36
INTRODUCCIÓN	37
BASE DE DATOS DE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS EN MOTOCICLETAS	38
ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) MULTIFACTORIAL	47
FACTORES DE EMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR.....	59
COMPARACIÓN CON RESULTADOS REPORTADOS EN LA LITERATURA.....	62
Factores de emisión de motocicletas reportados en la literatura	62
Análisis comparativo frente este proyecto	65
Comparativo de los factores de emisión con la Resolución 0762 del 2022	70
INVENTARIO DE EMISIONES NACIONAL PARA MOTOCICLETAS	74
CONCLUSIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA	86

BASE DE DATOS DE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS EN MOTOCICLETAS

En la **Tabla 2.1** se muestra la base de datos de factores de emisión de motocicletas medidas en este convenio, incluye las mediciones en Medellín (1500 m.s.n.m.), Apartadó y Bogotá (2600 m.s.n.m.).

Tabla 2.1. Base de datos de factores de emisión de motocicletas

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
1	Carburada	2024	199	0	1500	P1	104,91	--	7,57	--	--	--	0,19254	--	--
						P2	103,89	65,4	7,36	0,01317	0,01296	0,00021	0,17959	0,743	1,939
						P3	104,64	61,9	7,00	0,00901	0,00875	0,00026	0,19376	0,586	1,916
						P4	105,95	59,3	7,65	0,01034	0,01005	0,00029	0,20718	0,569	1,782
						Promedio	104,8	62,2	7,40	0,01084	0,01059	0,00025	0,19327	0,633	1,88
						Desv. Estándar	0,85	3,1	0,29	0,00212	0,00215	0,00004	0,01128	0,096	0,085
						Coef. Variación	1%	4,9%	3,9%	19,6%	20,3%	15,9%	5,8%	15,1%	4,5%
						(u_A)	0,42	1,8	0,14	0,00122	0,00124	0,00002	0,00564	0,012	0,048
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,8	0,14	0,00122	0,00124	0,00002	0,00564	0,012	0,048
Incert. total (U)	0,85	3,5	0,29	0,00245	0,00249	0,00005	0,01128	0,024	0,096						
2	Carburada	2024	125	0	1500	P1	120,70	55,8	3,82	0,03168	0,03128	0,00039	0,09756	0,304	--
						P2	120,96	55,4	3,90	0,03059	0,03015	0,00044	0,09448	0,287	1,388
						P3	119,18	55,5	4,39	0,03798	0,03756	0,00042	0,10171	0,272	1,258
						P4	121,39	54,3	4,46	0,03205	0,03167	0,00038	0,12028	0,325	1,298
						Promedio	120,6	55,2	4,14	0,03307	0,03267	0,00041	0,10351	0,297	1,31
						Desv. Estándar	0,96	0,6	0,33	0,00333	0,00333	0,00003	0,01157	0,023	0,067
						Coef. Variación	1%	1,2%	8,0%	10,1%	10,2%	6,6%	11,2%	7,6%	5,1%
						(u_A)	0,48	0,3	0,17	0,00166	0,00166	0,00001	0,00578	0,007	0,038
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,3	0,17	0,00166	0,00166	0,00001	0,00578	0,007	0,038
Incert. total (U)	0,96	0,6	0,33	0,00333	0,00333	0,00003	0,01157	0,014	0,076						
3	Carburada	2024	125	0	1500	P1	86,61	64,5	14,40	0,0299	0,0297	0,0002	0,4351	--	--
						P2	86,57	68,1	14,06	0,0356	0,0356	--	0,4902	0,844	3,771
						P3	93,56	62,7	10,79	0,0242	0,0238	0,0004	0,4135	0,768	3,306
						Promedio	88,9	65,1	13,08	0,0300	0,0297	0,0003	0,4463	0,806	3,54
						Desv. Estándar	4,03	2,8	1,99	0,0041	0,0059	0,0001	0,0396	0,054	0,329
						Coef. Variación	5%	4,3%	15,2%	13,5%	19,9%	37,3%	8,9%	6,7%	9,3%
						(u_A)	2,33	1,6	1,15	0,0033	0,0034	8,8E-05	2,3E-02	0,046	0,229
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,6	1,15	0,0033	0,0034	8,8E-05	0,0228	0,046	0,229
						Incert. total (U)	4,03	3,2	2,30	0,0066	0,0068	0,0002	0,0457	0,092	0,458

Notas: Cilind. = cilindraje de la motocicleta en centímetros cúbicos; Kilom. = kilometraje de la motocicleta en miles; (u_A) = incertidumbre aleatoria; (u_C) = incert. combinada; U = incert. total.

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ⁶ /12/km]
4	Carburada	2024	125	0	1500	P1	113,5	66,1	3,50	0,1349	0,1327	0,0022	--	--	--
						P2	118,4	62,8	2,80	0,1241	0,1217	0,0024	0,0824	0,463	2,248
						P3	122,6	58,9	3,54	0,1191	0,1163	0,0028	0,1117	0,362	1,608
						P4	121,4	58,0	2,86	0,1268	0,1268	--	0,1038	0,263	1,225
						P5	121,9	58,8	2,74	0,1322	0,1322	--	0,1120	0,304	1,455
						Promedio	119,6	60,9	3,09	0,1284	0,1259	0,0025	0,1025	0,348	1,634
						Desv. Estándar	3,7	3,5	0,40	0,0081	0,0070	0,0003	0,0139	0,087	0,439
						Coef. Variación	3%	5,7%	12,9%	6,3%	5,6%	11,4%	13,6%	24,9%	26,8%
						(u_A)	1,7	1,5	0,18	0,0028	0,0031	0,0002	0,0069	0,085	0,216
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,5	0,18	0,0028	0,0031	0,0002	0,0069	0,085	0,216
						Incert. total (U)	3,7	3,1	0,35	0,0057	0,0063	0,0003	0,0139	0,171	0,431
5	Carburada	2020	124	0	1500	P1	118,4	26,4	19,92	--	--	--	0,6316	0,750	2,898
						P2	117,0	26,1	18,67	0,0402	0,0390	0,0011	0,5950	0,850	2,913
						P3	110,7	28,7	18,36	0,0345	0,0331	0,0014	0,6283	0,824	3,079
						P4	111,1	29,1	17,20	0,0317	0,0302	0,0016	0,6532	0,795	3,152
						Promedio	114,3	27,6	18,54	0,0355	0,0341	0,0014	0,6270	0,805	3,011
						Desv. Estándar	4,0	1,5	1,12	0,0043	0,0045	0,0002	0,0240	0,043	0,125
						Coef. Variación	3%	5,6%	6,0%	12,1%	13,2%	15,5%	3,8%	5,4%	4,1%
						(u_A)	2,0	0,8	0,56	0,0025	0,0026	0,0001	0,0120	0,064	0,061
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,8	0,56	0,0025	0,0026	0,0001	0,0120	0,064	0,061
						Incert. total (U)	4,0	1,5	1,12	0,0050	0,0052	0,0002	0,0240	0,128	0,123
						6	Carburada	2020	124	0	1500	P1	109,4	42,6	--
P2	121,1	40,1	13,55	0,0457	0,0455							0,0002	0,6760	0,654	2,594
P3	108,9	41,0	15,76	0,0394	0,0394							--	0,7361	0,851	2,993
P4	107,7	41,0	15,08	0,0456	0,0456							--	0,9694	0,966	3,298
Promedio	111,8	41,2	14,80	0,0437	0,0435							0,0002	0,8262	0,819	3,034
Desv. Estándar	6,3	1,1	1,13	0,0036	0,0035							--	0,1421	0,129	0,323
Coef. Variación	6%	2,6%	7,6%	8,2%	8,1%							--	17,2%	15,7%	10,6%
(u_A)	3,1	0,5	0,65	0,0021	0,0020							--	0,0710	0,065	0,159
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	0,5	0,65	0,0021	0,0020							--	0,0710	0,065	0,159
Incert. total (U)	6,3	1,1	1,30	0,0042	0,0041							--	0,1421	0,130	0,317
7	Carburada	2022	159	22.204	1500							P1	178,1	35,8	3,40
						P3	166,7	38,7	4,42	0,0003	--	0,0003	0,1491	0,242	0,654
						P4	164,9	39,4	4,79	0,0048	0,004446215	0,0004	0,1539	--	0,709
						P2	174,5	36,5	--	0,0052	0,00490176	0,0003	0,1192	0,248	0,641
						Promedio	171,0	37,6	4,20	0,0046	0,004324856	0,0003	0,1357	0,245	0,648
						Desv. Estándar	6,3	1,7	0,72	0,0023	0,0006	0,00004	0,0183	0,004	0,051
						Coef. Variación	4%	4,5%	17,1%	48,6%	14,9%	13,0%	13,5%	1,8%	7,9%
						(u_A)	3,1	0,8	0,42	0,0011	0,0004	0,00002	0,0091	0,011	0,025
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,8	0,42	0,0011	0,0004	0,00002	0,0091	0,011	0,025
						Incert. total (U)	6,3	1,7	0,83	0,0023	0,0007	0,00004	0,0183	0,022	0,050
						8	Carburada	2020	124	25.672	1500	P1	81,7	45,9	31,23
P2	84,5	43,9	27,36	0,0224	0,0221							0,0003	0,7875	1,053	3,808
P3	87,5	42,7	25,47	0,0272	0,0270							0,0002	0,7496	0,969	3,538
P4	87,5	42,5	24,31	0,0163	0,0159							0,0004	--	1,004	3,470
Promedio	85,3	43,7	27,09	0,0220	0,0217							0,0003	0,7970	1,009	3,605
Desv. Estándar	2,8	1,5	3,03	0,0055	0,0055							0,0001	0,0527	0,042	0,179
Coef. Variación	3%	3,5%	11,2%	24,8%	25,5%							21,9%	6,6%	4,2%	5,0%
(u_A)	1,4	0,8	1,51	0,0031	0,0032							0,00004	0,0305	0,021	0,102
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	0,8	1,51	3,1E-03	3,2E-03							4,0E-05	0,0305	0,021	0,102
Incert. total (U)	2,8	1,5	3,03	6,3E-03	6,4E-03							8,1E-05	0,0609	0,042	0,203
9	Carburada	2018	99	73.323	1500							P1	214,8	--	--
						P2	191,4	22,8	7,09	0,1309	0,1309	--	0,6889	0,476	1,279
						P3	192,8	22,7	6,13	0,1165	0,1161	0,0004	0,6070	0,427	1,173
						P4	200,8	20,6	6,25	0,1003	0,1000	0,0003	0,6624	0,484	1,206
						Promedio	199,9	22,0	6,49	0,1160	0,1157	0,0004	0,6528	0,462	1,210
						Desv. Estándar	10,7	1,3	0,53	0,0114	0,0155	0,0000	0,0418	0,031	0,048
						Coef. Variación	5%	5,7%	8,1%	9,9%	13,4%	13,8%	6,4%	6,7%	4,0%
						(u_A)	5,3	0,7	0,30	0,0088	0,0089	0,00003	0,0241	0,018	0,024
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,7	0,30	0,0088	0,0089	3,4E-05	0,0241	0,018	0,024
						Incert. total (U)	10,7	1,5	0,61	0,0177	0,0179	6,8E-05	0,0483	0,036	0,047

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]						
10	Carburada	2023	125	17.286	1500	P1	144,7	32,6	8,73	--	--	--	0,971722854	--	2,11152488						
						P2	150,4	31,1	7,89	0,080174946	0,080174946	--	0,916926093	--	2,243656932						
						P3	142,0	33,7	8,21	0,09785625	0,09785625	--	1,023139853	0,539209282	2,096717772						
						P4	152,7	31,2	7,19	0,082376437	0,08202052	0,000355917	0,82623608	0,428324411	1,896518107						
						Promedio	147,4	32,2	8,01	0,0870	0,0867	0,0004	0,9345	0,484	2,087						
						Desv. Estándar	4,9	1,2	0,65	0,009635868	0,00971944	--	0,084207052	0,078407444	0,143181148						
						Coef. Variación	3%	3,8%	8,1%	11,1%	11,2%	--	9,0%	16,2%	6,9%						
						(u_A)	2,5	0,6	0,32	0,005562205	0,00561045	--	0,042105841	0,039203722	0,070390646						
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%						
						(u_C)	--	0,6	0,32	0,005562229	0,005610474	1,13E-07	0,042106071	0,039206017	0,070406457						
						Incert. total (U)	4,9	1,2	0,65	0,011124458	0,011220949	2,25E-07	0,084212142	0,078412035	0,140812913						
						11	Inyección	2023	179	5.275	1500	P1	174,8	44,0	0,81	0,170030499	0,169753343	0,000277155	--	0,142174213	1,004292752
P2	143,0	53,4	--	0,161688461	0,161327237							0,000361224	0,141724602	0,323868596	1,437247335						
P3	171,7	50,0	0,83	0,154935918	0,154935918							--	0,120766775	--	0,916747854						
P4	173,7	49,7	0,73	0,147867395	0,147867395							--	0,115850061	--	0,95813507						
Promedio	165,8	49,2	0,79	0,1588	0,1585							0,0003	0,1261	0,233	1,079						
Desv. Estándar	15,2	3,9	0,05	0,005898712	0,009316341							5,94456E-05	0,013741037	0,12847733	0,241423812						
Coef. Variación	9%	7,91%	6,42%	3,71%	5,88%							18,62%	10,90%	55,14%	22,37%						
(u_A)	7,6	1,9	0,03	0,004731912	0,004657185							4,20268E-05	0,007931732	0,021976948	0,118684092						
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%						
(u_C)	--	1,9	0,0292783	0,004731993	0,004657268							4,20268E-05	0,007931761	0,02198082	0,118687662						
Incert. total (U)	15,2	3,9	0,0585565	0,009463986	0,009314535							8,40537E-05	0,015863521	0,04396164	0,237375323						
12	Carburada	2008	180	n.a	1500							P2	154,8	37,5	--	0,120785585	0,120602263	0,000183323	1,065605042	0,760373632	2,92582133
						P3	150,2	38,6	6,5028367	0,139681638	0,139420658	0,00026098	1,008667828	0,74098201	3,050866513						
						P4	172,7	32,8	5,9877014	0,12151355	0,121333563	0,000179987	1,012318532	0,705759917	2,700421203						
						Promedio	159,3	23,8	6,25	0,1273	0,1271	0,0002	1,0289	0,736	2,892						
						Desv. Estándar	11,9	3,1	0,3642557	0,010705685	0,01065997	4,58288E-05	0,013871163	0,027686605	0,177601347						
						Coef. Variación	7%	13,0%	5,8%	8,4%	8,4%	22,0%	3,1%	3,8%	6,1%						
						(u_A)	5,9	1,8	0,2575776	0,006180045	0,006153653	2,64583E-05	0,018405728	0,013835755	0,100829369						
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%						
						(u_C)	--	1,8	0,2575835	0,006180095	0,006153702	2,64583E-05	0,018406514	0,013840825	0,100856008						
						Incert. total (U)	11,9	3,6	0,5151669	0,012360189	0,012307405	5,29166E-05	0,036813028	0,027681649	0,201712016						
						13	Carburada	2017	99	299.902	1500	P1	164,4	--	--	0,319035271	0,319035271	--	--	--	--
												P2	141,7	43,1	5,769634	0,326706885	0,326706885	--	1,379827541	--	--
P3	122,9	45,9	5,3660798	0,347908489	0,343449249							0,004459239	1,800127598	5,391839226	--						
P4	116,3	49,0	5,3067157	0,300292136	0,294910766							0,00538137	1,711543883	5,736010703	--						
Promedio	136,3	46,0	5,48	0,3259	0,3210							0,0049	1,6305	5,564	--						
Desv. Estándar	21,6	2,9	0,251884	0,033669846	0,020174596							0,000652045	0,22156073	0,243365985	--						
Coef. Variación	16%	6,4%	4,6%	10,3%	6,3%							13,3%	13,6%	4,4%	--						
(u_A)	10,8	1,7	0,1454959	0,009849309	0,010085213							0,000461005	0,127915337	0,241072054	--						
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%						
(u_C)	--	1,7	0,1455004	0,009849481	0,010085381							0,000461007	0,127915608	0,241124937	--						
Incert. total (U)	21,6	3,4	0,2910007	0,019698962	0,020170762							0,000922013	0,255831215	0,482249873	--						
14	Inyección	2019	149	26.830	1500							P1	158,1	60,8	0,9112073	0,049116707	0,049116707	--	0,075976138	0,372515153	--
						P2	139,8	57,3	0,9546398	0,045033533	0,044694214	0,000339318	0,081680855	--	0,854398064						
						P3	130,5	56,2	0,8800059	0,042038068	0,041628552	0,000409516	0,080897148	0,362002435	0,884866575						
						P4	145,2	56,6	0,9179446	0,050613087	0,050270035	0,000343052	0,075950321	0,330727113	0,778398502						
						Promedio	143,4	57,7	0,92	0,0468	0,0464	0,0004	0,0786	0,355	0,839						
						Desv. Estándar	11,5	2,1	0,0306341	0,004351919	0,004001295	3,94949E-05	0,003091455	0,021736694	0,054832646						
						Coef. Variación	8%	3,6%	3,3%	9,3%	8,6%	10,9%	3,9%	6,1%	6,5%						
						(u_A)	5,8	1,0	0,0153172	0,001950309	0,002000238	2,28003E-05	0,001545635	0,011922888	0,031126719						
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%						
						(u_C)	--	1,0	0,0153184	0,001950328	0,002000256	2,28004E-05	0,001545677	0,011923669	0,031133408						
						Incert. total (U)	11,5	2,1	0,0306368	0,003900656	0,004000512	4,56007E-05	0,003091355	0,023847339	0,062266816						
						15	Inyección	2017	184	27.413	1500	P1	199,9	49,2	0,7165954	0,027739707	0,027739707	--	--	0,425129526	2,137994993
P2	209,3	48,8	0,7343012	0,030585079	0,030259505							0,000325573	0,039736434	0,4085556	1,956122143						
P3	202,6	47,9	0,9464397	0,034654125	0,034333099							0,000321026	0,04710352	0,368187556	1,792019777						
P4	190,6	48,4	0,8634001	0,033671037	0,033339177							0,00033186	0,043104412	0,440565242	1,949385779						
Promedio	200,6	48,6	0,82	0,0317	0,0314							0,0003	0,0433	0,411	1,959						
Desv. Estándar	7,7	0,5	0,109262	0,002123155	0,003003369							5,44052E-06	0,003688046	0,031155615	0,141447588						
Coef. Variación	4%	1,1%	13,4%	6,7%	9,6%							1,7%	8,5%	7,6%	7,2%						
(u_A)	3,9	0,2672088	0,0546302	0,001568338	0,001501245							3,14138E-06	0,002129218	0,001642712	0,069545198						
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%						
(u_C)	--	0,3	0,0546304	0,00156835	0,001501257							3,1418E-06	0,002129229	0,001661571	0,069562338						
Incert. total (U)	7,7	0,5	0,1092608	0,003136699	0,003002514							6,28361E-06	0,004258459	0,003323142	0,139124675						

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
16	Inyección	2024	162	0	1500	P1	123,9	55,8	0,543159	--	--	--	--	--	--
						P2	125,3	55,5	0,5595023	0,005041427	0,004772211	0,000269211	0,027673856	0,593227461	2,100901609
						P3	125,5	55,4	0,5819706	0,004322056	0,00405703	0,000265026	0,024027089	0,424396452	2,104155876
						P4	124,5	55,8	0,7149068	0,004095685	0,003874756	0,000220929	0,031654331	0,545746704	2,067086767
						Promedio	124,8	55,7	0,60	0,0045	0,0042	0,0003	0,0278	0,521	2,091
						Desv. Estándar	0,7	0,2	0,0783146	0,000493823	0,000474368	2,67494E-05	0,003814837	0,08706723	0,020527025
						Coef. Variación	1%	0,4%	13,1%	11,0%	11,2%	10,6%	13,7%	16,7%	1,0%
						(u_A)	0,4	0,1	0,0391582	0,000285057	0,000273826	1,5441E-05	0,002202823	0,008074498	0,011642797
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,1	0,0391584	0,000285058	0,000273828	1,5441E-05	0,002202829	0,00807982	0,01178761
						Incert. total (U)	0,7	0,2	0,0783168	0,000570116	0,000547655	3,0882E-05	0,004405658	0,016159639	0,023575219
17	Inyección	2022	162	1.575	1500	P2	134,8	56,7	1,2231502	0,005918303	0,005725988	0,000192315	0,046786327	0,257087447	1,04590906
						P3	140,3	53,3	1,1264284	0,004783749	0,004564844	0,000218906	0,046317954	0,288334217	1,090289845
						P4	140,7	52,4	1,1324599	0,005681944	0,005440893	0,000241052	0,050421426	0,285891277	1,140598046
						Promedio	138,6	54,1	1,16	0,0055	0,0052	0,0002	0,0478	0,277	1,092
						Desv. Estándar	3,3	2,3	0,0541852	0,000598586	0,000605117	2,44021E-05	0,002246175	0,017378095	0,047375404
						Coef. Variación	2%	4,2%	4,7%	11,0%	11,5%	11,2%	4,7%	6,3%	4,3%
						(u_A)	1,7	1,3	0,0312823	0,000345516	0,000349286	1,40868E-05	0,001296991	0,007366391	0,026894024
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,3	0,0312834	0,000345519	0,000349289	1,40869E-05	0,001297021	0,007367676	0,026906884
						Incert. total (U)	3,3	2,6	0,0625667	0,000691037	0,000698578	2,81738E-05	0,002594042	0,014735352	0,053813768
						18	Inyección	2024	184,4	0	1500	P1	134,0	--	0,22
P2	137,8	63,0	0,24	0,067188884	0,067061303							0,00012758	0,040310553	--	2,600515491
P3	137,3	60,4	0,25	0,059886937	0,059759691							0,000127246	0,041408442	0,723539054	2,620423613
P4	136,1	59,5	0,26	0,060877248	0,060716507							0,000160741	0,042892344	0,630095831	2,337029968
Promedio	136,3	61,0	0,24	0,0619	0,0618							0,0001	0,0415	0,677	2,519
Desv. Estándar	1,7	1,8	0,02	0,003960974	0,003535854							1,92425E-05	0,0001295696	0,066074337	0,158183918
Coef. Variación	1%	0,0	7,64%	6,39%	5,72%							13,89%	3,12%	9,76%	6,28%
(u_A)	0,8	1,0	0,0092482	0,001779137	0,001767721							1,11082E-05	0,000747756	0,005808765	0,089797311
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	1,0	0,01	0,001779189	0,001767774							1,11082E-05	0,000747803	0,005816624	0,089823016
Incert. total (U)	1,7	2,1	0,02	0,003558378	0,003535547							2,22164E-05	0,001495605	0,011633247	0,179646032
19	Carburada	2024	125	0	1500	P1	121,8	45,4	8,96	0,000371121	--	0,000371121	--	0,553207737	2,394432719
						P2	119,0	43,8	10,02	0,000356693	--	0,000356693	0,237216013	0,429786884	2,205647585
						P3	118,5	44,5	8,69	0,000389183	--	0,000389183	0,276279316	0,52844198	2,026974254
						P4	116,2	44,4	9,51	0,000284527	--	0,000284527	0,269522774	0,766864034	2,340973406
						Promedio	118,9	44,5	9,29	0,0004	--	0,0004	0,2610	0,570	2,242
						Desv. Estándar	2,3	0,7	0,59	4,58703E-05	--	4,58703E-05	0,020877896	0,14191957	0,163899398
						Coef. Variación	2%	1,5%	6,3%	13,1%	--	13,1%	8,0%	24,9%	7,3%
						(u_A)	1,1	0,3322966	0,2950287	2,2936E-05	--	2,2936E-05	0,012052406	0,011993845	0,080560151
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,3	0,30	2,2936E-05	--	2,2936E-05	0,012052495	0,01199672	0,080577031
						Incert. total (U)	2,3	0,7	0,59	4,58721E-05	--	4,58721E-05	0,024104989	0,02399344	0,161154062
20	Inyección	2022	184	4.332	1500	P1	153,6	48,8	1,03	0,021013033	0,02084739	0,000165643	0,083484589	0,348507147	1,572529714
						P2	152,6	49,6	0,79	0,019069963	0,018876497	0,000193466	0,08611436	0,323220684	1,535165057
						P3	155,8	48,4	0,87	0,023477891	0,023283947	0,000193944	0,081481971	0,262569064	1,319406011
						P4	155,2	48,5	0,89	0,025338058	0,025110014	0,00028044	0,085640139	0,288059877	1,432795568
						Promedio	154,3	48,8	0,89	0,0222	0,0220	0,0002	0,0842	0,306	1,465
						Desv. Estándar	1,5	0,6	0,10	0,002749787	0,002732643	2,55401E-05	0,002132034	0,037907029	0,113608255
						Coef. Variación	1%	1,2%	11,2%	12,4%	12,4%	13,1%	2,5%	12,4%	7,8%
						(u_A)	0,7	0,2850407	0,0500166	0,001374638	0,001366067	1,27692E-05	0,001065854	0,006677362	0,055845504
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,3	0,05	0,001374648	0,001366077	1,27692E-05	0,001065931	0,006679187	0,055858266
						Incert. total (U)	1,5	0,6	0,10	0,002749296	0,002732153	2,55385E-05	0,002131862	0,013358375	0,111716531
21	Inyección	2024	156	622	1500	P1	162,2	47,6	0,17	0,012677335	0,012549156	0,000128179	--	--	
						P2	151,5	50,3	--	0,010559213	0,010406421	0,000152793	0,032130415	0,16875519	0,821683719
						P3	153,3	49,3	0,16	0,011669204	0,011526028	0,000143176	0,035381737	0,178450636	--
						P4	150,7	50,0	0,17	0,013573834	0,013423606	0,000150228	0,036278927	0,16764856	0,864854825
						Promedio	154,4	49,3	0,16	0,0121	0,0120	0,0001	0,0346	0,172	0,843
						Desv. Estándar	5,3	1,2	0,00	0,00129917	0,001302577	1,10517E-05	0,002182743	0,005942939	0,030526582
						Coef. Variación	3%	2,40%	2,52%	10,72%	10,88%	7,70%	6,31%	3,46%	3,62%
						(u_A)	2,7	0,5926254	0,0024029	0,000649418	0,000651122	5,52351E-06	0,001260385	0,002889332	0,021225797
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,6	0,002	0,000649	0,000651	0,000006	0,001260	0,003	0,021
						Incert. total (U)	5,3	1,2	0,005	0,001299	0,001302	0,000011	0,002521	0,006	0,042

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]	
22	Carburada	2024	110	0	1500	P1	208,1	26,0	7,50	--	--	--	0,192415671	--	--	
						P2	161,8	33,2	9,95	--	--	--	--	--	0,88627459	2,461372135
						P3	159,2	34,0	8,97	0,007146435	0,007146435	--	0,246141415	0,857516264	2,442964372	
						P4	155,2	33,5	9,14	0,006839742	0,006839742	--	0,272991818	0,807011465	2,441283633	
						Promedio	171,1	31,7	8,89	0,0070	0,0070	--	0,2372	0,850	2,449	
						Desv. Estándar	24,8	3,8	1,02	0,000216865	0,000216865	--	0,041028273	0,040125675	0,011144644	
						Coef. Variación	15%	12,0%	11,5%	3,1%	3,1%	--	17,3%	4,7%	0,5%	
						(u_A)	12,4	1,9016975	0,5116289	0,000153318	0,000153318	--	0,02368666	0,020062838	0,006322767	
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%	
						(u_C)	--	1,9	0,51	0,000153326	0,000153326	--	0,023686704	0,020063302	0,006638409	
						Incert. total (U)	24,8	3,8	1,02	0,000306653	0,000306653	--	0,047373408	0,040126604	0,013276818	
						23	Carburada	2024	110	0	1500	P1	117,7	44,6	9,75	--
P2	125,1	39,1	10,02	--	--							--	0,089164915	0,830249866	2,46149228	
P3	125,8	37,8	10,57	0,01013947	0,009988885							0,0002	0,096816375	0,696783581	2,393792987	
P4	133,5	33,9	10,71	0,008767202	0,008603261							0,0002	0,11942769	0,601707423	2,42467459	
Promedio	125,5	38,8	10,26	0,0095	0,0093							0,0002	0,1032	0,710	2,427	
Desv. Estándar	6,5	4,4	0,45	0,00097034	0,000979784							9,44468E-06	0,013128864	0,114807356	0,033892993	
Coef. Variación	5%	11,4%	4,4%	10,3%	10,5%							6,0%	12,7%	16,2%	1,4%	
(u_A)	3,2	2,2097577	0,2261778	0,000685964	0,000692642							6,6782E-06	0,006564795	0,003492213	0,019235245	
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%	
(u_C)	--	2,2	0,23	0,00068597	0,000692648							6,67833E-06	0,006564829	0,003526161	0,019373856	
Incert. total (U)	6,5	4,4	0,45	0,00137194	0,001385296							1,33567E-05	0,013129657	0,007052322	0,038747712	
24	Inyección	2022	149	13.677	1500							P1	171,7	--	1,67	--
						P2	191,0	39,4	1,59	0,100191272	0,100191272	--	0,271645447	0,238384333	1,15533904	
						P3	210,8	33,7	1,50	0,084471677	0,084030433	0,000441244	0,243225867	0,25510867	0,919036001	
						P4	226,3	30,0	1,35	0,07012923	0,06973068	0,000398551	0,206937132	0,233022336	1,122484329	
						Promedio	199,9	34,4	1,53	0,0851	0,0847	0,0004	0,2548	0,242	1,029	
						Desv. Estándar	23,7	4,7	0,14	0,010141641	0,015239769	3,01888E-05	0,038839973	0,011519987	0,127604301	
						Coef. Variación	12%	13,8%	9,0%	11,9%	18,0%	7,2%	15,2%	4,8%	12,4%	
						(u_A)	11,9	2,7340895	0,0689682	0,008679516	0,008796994	2,13346E-05	0,019420916	0,011156435	0,062734223	
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%	
						(u_C)	--	2,7	0,07	0,008679534	0,008797012	2,13348E-05	0,019420953	0,011157836	0,062740254	
						Incert. total (U)	23,7	5,5	0,14	0,017359068	0,017594023	4,26696E-05	0,038841907	0,022315672	0,125480508	
						25	Inyección	2021	149	34.941	1500	P1	136,9	54,6	1,21	0,089787156
P2	144,1	51,3	--	0,089448943	0,089154695							0,000294249	0,273516792	0,242673423	1,185665511	
P3	142,3	51,4	1,66	0,110531562	0,110301186							0,000230376	0,272196612	0,229320818	1,402372481	
P4	141,1	50,2	1,61	0,082694507	0,082694507							--	0,289169094	0,262911184	1,223328197	
Promedio	141,1	51,9	1,49	0,0932	0,0930							0,0003	0,2783	0,245	1,270	
Desv. Estándar	3,0	1,9	0,24	0,014907663	0,011981124							4,51649E-05	0,009441068	0,016912381	0,115785178	
Coef. Variación	2%	3,6%	16,4%	16,0%	12,9%							17,2%	3,4%	6,9%	9,1%	
(u_A)	1,5	0,9460712	0,1414352	0,006029549	0,005989375							3,19337E-05	0,005450854	0,016699008	0,065725995	
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%	
(u_C)	--	0,9	0,14	0,006029571	0,005989397							3,19338E-05	0,00545108	0,016699897	0,065735354	
Incert. total (U)	3,0	1,9	0,28	0,012059142	0,011978795							6,38675E-05	0,01090216	0,033399793	0,131470708	
26	Inyección	2023	199	2.760	1500							P1	115,0	69,0	1,67	0,020493549
						P2	119,9	63,9	1,65	0,021820193	0,021263741	0,000556452	--	0,518203589	1,832367972	
						P3	123,4	60,1	1,47	0,022744946	0,022224254	0,000520692	0,141979409	0,373144985	1,458891562	
						P4	124,1	58,5	1,45	0,019824576	0,019238927	0,000585649	0,172995211	0,49395836	1,597605287	
						P5	123,4	58,3	1,49	0,020259214	0,019731774	0,000527439	0,16176549	0,337479852	1,510316346	
						Promedio	122,7	62,0	1,55	0,0211	0,0206	0,0005	0,1579	0,437	1,637	
						Desv. Estándar	1,9	4,5	0,11	0,001359248	0,001193311	2,97579E-05	0,012991592	0,078328646	0,165901003	
						Coef. Variación	2%	7,3%	6,9%	6,4%	5,8%	5,4%	8,2%	17,9%	10,1%	
						(u_A)	0,9	2,0303389	0,0480171	0,000543091	0,000533603	1,48771E-05	0,006495685	0,007779646	0,072951303	
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%	
						(u_C)	--	2,0	0,05	0,000543101	0,000533613	1,48773E-05	0,006495744	0,007782045	0,072958134	
						Incert. total (U)	1,9	4,1	0,10	0,001086202	0,001067226	2,97546E-05	0,012991488	0,01556409	0,145916268	
27	Inyección	2021	199	36.500	1500	P1	127,6	44,5	6,11	0,027352371	0,027352371	--	0,376870353	--	--	
						P2	142,1	42,7	4,37	0,0224518	0,021979228	0,000472572	0,417225482	0,375978337	1,113397989	
						P3	155,9	37,7	4,17	0,019671073	0,019240956	0,000430117	0,375995754	0,334882681	1,028891152	
						P4	150,9	38,7	4,72	--	--	--	--	0,357979918	1,068071456	
						Promedio	144,1	40,9	4,84	0,0233	0,0229	0,0005	0,3900	0,356	1,070	
						Desv. Estándar	12,4	3,2	0,88	0,001966271	0,004126416	3,002E-05	0,023555579	0,020600479	0,042290653	
						Coef. Variación	9%	7,87%	0,18	8,44%	18,05%	6,65%	6,04%	5,78%	3,95%	
						(u_A)	6,2	1,6111176	0,44	0,002244917	0,002381918	2,12246E-05	0,01359982	0,011098939	0,024001655	
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%	
						(u_C)	--	1,6	0,44	0,002244921	0,002381922	2,12248E-05	0,013600037	0,011100612	0,024014855	
						Incert. total (U)	12,4	3,2	0,88	0,004489841	0,004763844	4,24496E-05	0,027200074	0,022201225	0,04802971	

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
28	Carburada	2021	102	16.013	1500	P1	199,9	--	2,35	0,205091595	0,205091595	--	0,348473524	--	--
						P2	209,3	32,5	2,47	0,19442901	0,19442901	--	0,378698234	0,883629032	2,179869529
						P3	202,6	33,2	2,46	0,175712131	0,175712131	--	0,305187656	--	2,319251091
						P4	190,6	34,4	2,90	0,186280122	0,185762832	0,00051729	0,391567096	0,845545267	2,583389858
						Promedio	200,6	33,4	2,55	0,1908	0,1902	0,0005	0,3560	0,865	2,361
						Desv. Estándar	7,7	1,0	0,24	0,012446966	0,012506283	0	0,038378679	0,026929289	0,204949247
						Coef. Variación	4%	2,9%	9,5%	6,5%	6,6%	0,0%	10,8%	3,1%	8,7%
						(u_A)	3,9	0,5600462	0,1210672	0,006222777	0,006252434	0	0,019189268	0,013464644	0,116343149
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,6	0,12	0,006222867	0,006252524	1,74E-07	0,019189356	0,013489608	0,11636367
						Incert. total (U)	7,7	1,1	0,24	0,012445735	0,012505048	3,47E-07	0,038378712	0,026979216	0,232727341
						29	Carburada	2024	124	1.459	1500	P1	104,6	--	4,57
P2	106,0	66,7	5,64	0,113799601	0,113799601							0,000345332	0,091523661	0,576246741	3,229875706
P3	107,0	64,6	5,53	0,120118025	0,119747996							0,000370028	0,087879668	0,544361084	2,745800243
P4	106,4	64,7	--	0,000352242	--							0,000352242	0,091147891	0,568699163	2,597795944
Promedio	106,0	65,3	5,25	0,1222	0,1219							0,0004	0,0902	0,563	2,858
Desv. Estándar	1,0	1,2	0,59	0,067488637	0,009342303							1,27412E-05	0,002004211	0,016663349	0,330595209
Coef. Variación	1%	1,8%	11,2%	55,2%	7,7%							3,6%	2,2%	3,0%	11,6%
(u_A)	0,5	0,6935334	0,3388951	0,03066575	0,005393334							7,35592E-06	0,001156955	0,003846612	0,187670668
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	0,7	0,34	0,030665756	0,005393394							7,35616E-06	0,001157211	0,003861	0,187686882
Incert. total (U)	1,0	1,4	0,68	0,061331512	0,010786788							1,47123E-05	0,002314422	0,007722001	0,375373764
30	Inyección	2022	149	22.269	1500							P1	179,0	--	1,41
						P2	194,2	34,7	1,27	0,219905088	0,219075804	0,000829285	0,199531978	0,114701826	0,455861499
						P3	203,9	32,7	1,21	0,181079774	0,180419445	0,000660329	0,18403701	0,105726686	0,435317034
						P4	202,6	33,2	1,16	0,183751995	0,183108814	0,000643181	0,196184551	0,088481523	0,387965475
						Promedio	194,9	33,5	1,26	0,2041	0,2034	0,0007	0,2010	0,102	0,450
						Desv. Estándar	11,5	1,1	0,11	0,025553792	0,025526106	9,35607E-05	0,016875493	0,011099888	0,055492728
						Coef. Variación	6%	3,1%	8,4%	12,5%	12,5%	13,6%	8,4%	10,9%	12,3%
						(u_A)	5,7	0,6078338	0,0527994	0,01277405	0,012760208	4,67753E-05	0,008437771	0,024460067	0,027280964
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,6	0,05	0,012774098	0,012760256	4,67754E-05	0,00843782	0,024460117	0,027282914
						Incert. total (U)	11,5	1,2	0,11	0,025548196	0,025520512	9,35509E-05	0,016875641	0,048920234	0,054565828
						31	Inyección	2024	155	1.158	1500	P1	170,5	41,9	0,60
P2	171,9	41,1	0,69	0,043464713	0,043464713							--	0,127322385	0,310676543	1,392877544
P3	173,1	41,0	0,63	0,040546733	0,040340841							0,000205892	0,12380017	0,319775383	1,377798545
P4	175,0	40,1	0,69	0,043419883	0,043215309							0,000204574	0,122853906	0,354091495	1,41004315
Promedio	172,6	41,0	0,65	0,0426	0,0424							0,0002	0,1254	0,328	1,398
Desv. Estándar	1,9	0,7	0,04	0,002031623	0,00141828							9,32554E-07	0,002465362	0,022895569	0,015664298
Coef. Variación	1%	1,7%	6,8%	4,8%	3,3%							0,5%	2,0%	7,0%	1,1%
(u_A)	1,0	0,354157	0,0221876	0,000682486	0,000708977							6,57849E-07	0,001232904	0,000344007	0,007704068
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	0,4	0,02	0,000682554	0,000709043							6,59284E-07	0,001233041	0,000413917	0,007779384
Incert. total (U)	1,9	0,7	0,04	0,001365108	0,001418086							1,31857E-06	0,002466082	0,000827834	0,015558768
32	Carburada	2021	124	26.181	1500							P1	99,9	62,8	6,88
						P2	105,4	58,7	6,96	0,009451223	0,009451223	--	0,339544384	--	1,985032968
						P3	112,9	55,7	--	0,007869987	0,007540446	0,000329541	--	0,370440868	1,617434788
						P4	109,2	57,1	6,38	0,009539522	0,009177626	0,000361897	--	0,399889637	1,712525389
						Promedio	106,9	58,6	6,74	0,0091	0,0088	0,0003	0,3438	0,427	1,867
						Desv. Estándar	5,6	3,1	0,31	0,001180539	0,000853049	2,28788E-05	0,005964721	0,074064005	0,246878555
						Coef. Variación	5%	5,3%	4,6%	12,9%	9,7%	6,6%	1,7%	17,3%	13,2%
						(u_A)	2,8	1,5391716	0,1798218	0,000383495	0,000426442	1,61758E-05	0,004213156	0,008458769	0,121371999
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,5	0,18	0,000383498	0,000426445	1,6176E-05	0,004213392	0,008461875	0,121378477
						Incert. total (U)	5,6	3,1	0,36	0,000766995	0,00085289	3,23519E-05	0,008427983	0,016923751	0,242756954
						33	Carburada	2022	110	12.155	1500	P1	138,0	50,4	7,45
P2	142,2	45,4	6,98	0,026583276	0,026498834							8,44424E-05	0,22590134	0,680025068	1,821442915
P3	131,1	50,0	7,09	0,029040968	0,028902741							0,000138227	0,229850196	--	1,817977576
P4	156,6	40,9	5,81	0,02905517	0,02895774							9,74306E-05	0,214274819	0,527525344	1,485050299
Promedio	142,0	46,7	6,83	0,0290	0,0289							0,0001	0,2233	0,604	1,725
Desv. Estándar	10,8	4,5	0,71	0,001423067	0,001961232							2,80648E-05	0,008096931	0,107833589	0,161398634
Coef. Variación	8%	9,6%	10,4%	4,9%	6,8%							26,3%	3,6%	17,9%	9,4%
(u_A)	5,4	2,2278328	0,3564479	0,000963573	0,000980427							1,62011E-05	0,004674212	0,008472015	0,079341109
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	2,2	0,36	0,000963586	0,00098044							1,62012E-05	0,0046744	0,008476341	0,079352859
Incert. total (U)	10,8	4,5	0,71	0,001927172	0,00196088							3,24023E-05	0,009348801	0,016952681	0,158705717

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
34	Carburada	2021	99	39.379	1500	P1	254,8	26,4	0,80	0,265530395	0,262001672	0,003528723	0,53368835	0,739302135	2,368127577
						P2	264,8	26,5	0,85	0,273657344	0,269740548	0,003916796	0,496522761	0,714095556	2,47677923
						P3	259,0	25,9	1,03	0,276156414	0,27191026	0,004246154	0,504357944	0,608779008	2,407501947
						P4	277,4	23,7	1,06	0,278042853	0,273652978	0,004389875	0,469455458	0,558114089	2,336617143
						Promedio	264,0	25,6	0,94	0,2733	0,2693	0,0040	0,5010	0,655	2,397
						Desv. Estándar	9,9	1,3	0,13	0,00551179	0,005138702	0,000382952	0,026425415	0,085872722	0,060427531
						Coef. Variación	4%	5,1%	13,5%	2,0%	1,9%	9,5%	5,3%	13,1%	2,5%
						(u_A)	4,9	0,6499021	0,063368	0,002753859	0,00256733	0,000191449	0,013212748	0,100113741	0,029706715
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,6	0,06	0,00275434	0,002567845	0,00019145	0,013212956	0,100114327	0,02976472
						Incert. total (U)	9,9	1,3	0,13	0,005508679	0,00513569	0,0003829	0,026425912	0,0200228655	0,059529439
35	Carburada	2023	124	n.a	1500	P1	104,6	41,3	22,65	0,00202989	--	0,000202989	0,645931346	0,423170988	2,056232423
						P2	107,8	38,7	19,83	0,033937706	0,033715293	0,00022413	0,505467128	0,273830588	1,416967748
						P3	106,2	38,7	18,89	0,031344878	0,031129546	0,000215332	0,44293829	0,294470729	1,230794228
						P4	105,0	38,9	18,25	0,030195471	0,030072844	0,000122627	0,435888137	0,270836756	1,105475475
						Promedio	105,9	39,4	19,91	0,0318	0,0316	0,0002	0,5076	0,316	1,452
						Desv. Estándar	1,5	1,2	1,94	0,015888795	0,00187395	4,61783E-05	0,097406076	0,072494582	0,422427421
						Coef. Variación	1%	3,2%	9,8%	49,9%	5,9%	24,2%	19,2%	23,0%	29,1%
						(u_A)	0,7	0,6230667	0,971468	0,00794289	0,001081897	2,30865E-05	0,048702131	0,012072551	0,207670088
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,6	0,07	0,007942892	0,001081921	2,30865E-05	0,048702202	0,012073652	0,207673571
						Incert. total (U)	1,5	1,2	1,94	0,015885783	0,002163842	4,6173E-05	0,097404404	0,024147304	0,415347141
36	Carburada	2022	124	8.506	1500	P1	87,9	31,7	--	--	--	--	2,436637128	--	4,817822225
						P2	109,2	29,8	22,93	0,021333957	0,021333957	--	1,124483491	--	3,731532032
						P3	103,5	29,4	21,16	0,024890763	0,024890763	--	1,544069371	0,319208668	3,84586725
						P4	96,9	27,1	23,88	--	--	--	2,121212968	0,451594327	4,175217819
						Promedio	99,4	29,5	22,66	0,0231	0,0231	--	1,807	0,385	4,143
						Desv. Estándar	9,1	1,9	1,38	0,002515042	0,002515042	--	0,585984461	0,093610798	0,487857962
						Coef. Variación	9%	6,4%	6,1%	10,9%	10,9%	--	32,4%	24,3%	11,8%
						(u_A)	4,6	0,9382922	0,7965046	0,001778041	0,001778041	--	0,292990657	0,046805399	0,239840339
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,9	0,80	0,001778048	0,001778048	--	0,292990798	0,046805683	0,239856013
						Incert. total (U)	9,1	1,9	1,59	0,003556096	0,003556096	--	0,585981596	0,093611366	0,479712027
37	Carburada	2024	124	1.335	1500	P1	105,1	68,6	9,39	0,036549448	0,036549448	--	0,162604664	0,485996026	--
						P2	96,3	75,0	10,89	0,031959484	0,031568561	0,000390923	0,202117208	0,752248217	2,495965574
						P3	95,7	73,6	11,53	0,032664017	0,032207751	0,000456266	0,213138586	0,498917121	2,343549173
						P4	93,8	76,8	10,91	0,040384672	0,039821753	0,000562919	0,224969061	0,46275749	--
						Promedio	97,7	73,5	10,68	0,0355	0,0350	0,0005	0,2007	0,550	2,420
						Desv. Estándar	5,1	3,5	0,91	0,003969091	0,003882271	8,68205E-05	0,027061465	0,135673093	0,107774671
						Coef. Variación	5%	4,8%	8,5%	11,2%	11,1%	18,5%	13,5%	24,7%	4,5%
						(u_A)	2,5	1,7541498	0,4562337	0,001946912	0,001941032	5,01306E-05	0,013530677	0,026214651	0,074824653
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,8	0,46	0,001946925	0,001941045	5,01307E-05	0,013530719	0,026216263	0,074863625
						Incert. total (U)	5,1	3,5	0,91	0,00389385	0,00388209	0,000100261	0,027061437	0,052432526	0,14972725
38	Carburada	2022	149	15.840	1500	P1	105,3	46,0	17,69	--	--	--	0,356032875	0,254006989	1,144339366
						P2	106,0	44,9	15,49	0,023079566	0,023079566	--	0,361397749	0,226243861	1,080376595
						P3	102,7	47,9	14,98	0,01846236	0,01846236	--	0,374056633	0,256717498	1,187458491
						P4	107,1	45,9	14,13	0,018872627	0,018872627	--	0,326210133	0,285687576	1,198763528
						Promedio	105,3	46,2	15,57	0,0201	0,0201	--	0,3544	0,256	1,153
						Desv. Estándar	1,9	1,2	1,52	0,002555558	0,002555558	--	0,020270539	0,024295509	0,053636342
						Coef. Variación	2%	2,7%	9,8%	12,7%	12,7%	--	5,7%	9,5%	4,7%
						(u_A)	0,9	0,615908	0,7596592	0,001475095	0,001475095	--	0,010135253	0,012147754	0,026371529
						Resolucion +/-	0,0	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%
						(u_C)	--	0,6	0,76	0,001475102	0,001475102	--	0,010135384	0,012151231	0,026382699
						Incert. total (U)	1,9	1,2	1,52	0,002950203	0,002950203	--	0,020270768	0,024302463	0,052765398
39	Carburada	2024	145	6.330	1500	P1	158,1	42,4	3,08	0,101824634	0,101824634	--	0,205776176	0,343356758	1,22850953
						P2	139,8	45,7	4,46	0,106404737	0,105207596	0,001197142	0,188929404	--	1,351705221
						P3	130,5	48,7	4,69	0,108368088	0,106984272	0,001383816	0,211904677	0,358524892	1,477958324
						P4	145,2	43,2	4,52	0,095091735	0,093718229	0,001373507	0,204027974	0,300439865	1,334099202
						Promedio	143,4	45,0	4,19	0,1033	0,1019	0,0013	0,2027	0,334	1,348
						Desv. Estándar	11,5	2,8	0,74	0,007165895	0,005880265	0,000104927	0,009756625	0,03012696	0,102264495
						Coef. Variación	8%	6,3%	17,7%	6,9%	5,8%	8,0%	4,8%	9,0%	7,6%
						(u_A)	5,8	1,4177784	0,371398	0,002947478	0,002939374	6,05706E-05	0,004877991	0,031674011	0,05027348
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
						(u_C)	--	1,4	0,37	0,002947525	0,002939422	6,05711E-05	0,004878101	0,031674332	0,05028259
						Incert. total (U)	11,5	2,8	0,74	0,005895051	0,005878844	0,000121142	0,009756202	0,063348665	0,10056518

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]						
40	Carburada	2024	149,1	0	1500	P1	124,6	69,8	--	0,07800022	0,07800022	--	--	--	--						
						P2	130,3	64,6	0,17	0,071424293	0,071424293	--	0,030140179	0,587338748	2,770102989						
						P3	129,4	62,4	0,22	--	--	--	0,02400821	0,519498445	2,439188545						
						P4	115,9	67,2	0,17	0,07990531	0,07990531	--	0,027694502	0,720724168	3,175320178						
						Promedio	125,1	66,0	0,19	0,0764	0,0764	--	0,0273	0,609	2,795						
						Desv. Estándar	6,6	3,2	0,03	0,004449716	0,004449716	--	0,003086831	0,102376567	0,368869027						
						Coef. Variación	5%	4,8%	14,2%	5,8%	5,8%	--	11,3%	16,8%	13,2%						
						(u_A)	3,3	1,6005267	0,0151599	0,002569051	0,002569051	--	0,001779495	0,051188283	0,209311569						
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u_C)	--	1,6	0,02	0,002569109	0,002569109	--	0,001779506	0,051189109	0,209326709						
						Incert. total (U)	6,6	3,2	0,03	0,005138217	0,005138217	--	0,003559012	0,102378217	0,418653419						
						41	Carburada	2008	180	n.a	0	P1	146,3	59,7	9,25	--	--	--	1,636101686	--	--
P2	147,9	58,0	9,66	--	--							--	1,451862074	1,928075358	4,133494871						
P4	149,8	54,2	11,35	0,167545412	0,167545412							--	1,170011627	1,030909077	3,507564701						
Promedio	148,0	57,3	10,09	0,1675	0,1675							--	1,4193	1,479	3,821						
Desv. Estándar	1,7	2,8	1,11	--	--							--	0,234742359	0,634392361	0,442599468						
Coef. Variación	1%	4,9%	11,0%	0,0%	0,0%							0,0%	16,5%	42,9%	11,6%						
(u_A)	0,9	1,6253652	0,6421868	0	0							0	0,135536518	0	0,307730941						
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							--	2%	15%	25%						
(u_C)	--	1,6	0,64	0	0							0	0,135536701	0	0,307753611						
Incert. total (U)	1,7	3,3	1,28	0	0							0	0,271073402	0	0,615507221						
42	Carburada	2008	180	n.a	0							P1	128,0	74,1	6,73	0,439350045	0,439350045	--	2,017876837	0,70923172	1,874259323
												P2	128,7	76,2	7,77	0,37202023	0,371810225	0,000210006	1,936718583	0,765993879	2,54088758
						P3	142,6	68,7	6,41	0,351296398	0,350986475	0,000309923	2,036833355	0,703775601	2,371719615						
						P4	172,5	60,2	5,22	0,3097006	0,309433768	0,000266832	1,757968964	0,493625186	1,62249268						
						Promedio	142,9	69,8	6,53	0,3679	0,3679	0,0003	1,9373	0,668	2,102						
						Desv. Estándar	20,8	7,1	1,05	0,054113423	0,054236415	5,01157E-05	0,12722613	0,119706901	0,427160098						
						Coef. Variación	15%	10,2%	16,1%	14,7%	14,7%	19,1%	6,6%	17,9%	20,3%						
						(u_A)	10,4	3,5606061	0,5261857	0,02705315	0,027114604	2,89136E-05	0,063891848	0,015119698	0,209988958						
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u_C)	--	3,6	0,53	0,027053212	0,027114665	2,89136E-05	0,063892393	0,015127287	0,209996463						
						Incert. total (U)	20,8	7,1	1,05	0,054106424	0,05422933	5,78273E-05	0,127784786	0,030254575	0,419992927						
						43	Inyección	2022	149	13.677	0	P1	189,7	52,6	2,48	0,100531963	0,100531963	--	0,247602283	0,518378553	1,966015088
P2	196,0	55,0	2,28	0,072993007	0,072993007							--	0,269454267	0,327222627	1,426505461						
P4	190,1	55,3	2,63	0,066984772	0,066984772							--	0,286677216	0,370739883	1,639306964						
Promedio	191,9	54,3	2,46	0,0802	0,0802							--	0,2679	0,405	1,677						
Desv. Estándar	3,5	1,5	0,18	0,017888111	0,017888111							--	0,019583112	0,100192745	0,271751515						
Coef. Variación	2%	2,8%	7,2%	22,3%	22,3%							0,0%	7,3%	24,7%	16,2%						
(u_A)	1,8	0,8677413	0,1027516	0,010325665	0,010325665							0	0,011306637	0	0,154263748						
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							--	2%	15%	25%						
(u_C)	--	0,9	0,10	0,01032568	0,01032568							0	0,011306739	0	0,154272716						
Incert. total (U)	3,5	1,7	0,21	0,02065136	0,02065136							0	0,022613477	0	0,308545431						
44	Inyección	2022	149	13.677	0							P1	207,4	46,6	2,52	0,059120256	0,059120256	--	0,201680289	0,320896716	1,587974327
												P2	216,2	46,7	2,18	0,050589708	0,050589708	--	0,197506622	0,397926689	1,561163069
						P4	214,8	48,1	1,81	0,048146989	0,048146989	--	0,163969767	0,272349451	1,117697252						
						Promedio	212,8	47,1	2,17	0,0526	0,0526	--	0,1877	0,330	1,422						
						Desv. Estándar	4,8	0,8	0,36	0,005761217	0,005761217	--	0,020672944	0,063324688	0,264115285						
						Coef. Variación	2%	1,7%	16,4%	10,9%	10,9%	0,0%	11,0%	19,2%	18,6%						
						(u_A)	2,4	0,4575184	0,2056783	0,003325803	0,003325803	0	0,011935499	0	0,149929965						
						Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u_C)	--	0,5	0,21	0,003325825	0,003325825	0	0,011935566	0	0,149938349						
						Incert. total (U)	4,8	0,9	0,41	0,00665165	0,00665165	0	0,023871132	0	0,299876697						
						45	Carburada	2008	180	n.a	2600	P1	156,0	46,6	12,94	0,000173624	--	0,000173624	1,376179696	0,46415665	2,048808251
												P2	159,2	41,8	14,36	0,084501881	0,084323094	0,000178786	1,089862022	0,526844423	2,318403675
P4	159,6	42,6	12,21	0,069003965	0,068787788							0,000216178	0,956245924	--	--						
Promedio	158,3	43,7	13,17	0,0766	0,0766							0,0002	1,1408	0,496	2,184						
Desv. Estándar	2,0	2,6	1,09	0,044886999	0,010985121							2,32219E-05	0,214544263	0,044326949	0,190632753						
Coef. Variación	1%	5,9%	8,3%	58,6%	14,3%							12,3%	18,8%	8,9%	8,7%						
(u_A)	1,0	1,4897345	0,6302233	0,025910458	0,007766044							1,34056E-05	0,123865755	0,00701017	0,132538011						
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%							--	2%	15%	25%						
(u_C)	--	1,5	0,63	0,025910461	0,007766062							1,34057E-05	0,123865906	0,007014013	0,132559462						
Incert. total (U)	2,0	3,0	1,26	0,051820922	0,015532123							2,68113E-05	0,247731812	0,014028026	0,265118924						

#	Tecnología de alimentación	Modelo	Cilind. [cc]	Kilom.	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ⁶ /12/km]						
46	Carburada	2008	180	n.a	2600	P1	132,4	65,1	10,27	0,306110847	0,306110847	--	1,61982189	0,571622833	2,454187995						
						P2	133,4	65,0	11,04	0,254857067	0,254669022	0,000188045	1,576336189	0,492105923	2,129300298						
						P3	129,4	64,7	11,22	0,242791315	0,242546455	0,00024486	1,614787977	0,427678595	1,955509876						
						P4	129,1	64,8	11,60	0,23891185	0,238560175	0,000351675	1,608190349	0,488010763	2,193782429						
						Promedio	131,1	64,9	11,03	0,2605	0,2605	0,0003	1,6048	0,495	2,183						
						Desv. Estándar	2,2	0,2	0,56	0,031046875	0,031187776	8,30781E-05	0,019554189	0,059049049	0,20679656						
						Coef. Variación	2%	0,2%	5,1%	11,9%	12,0%	31,8%	1,2%	11,9%	9,5%						
						(u A)	1,1	0,0752782	0,2792661	0,015520753	0,015591197	4,796E-05	0,009772431	0,025079565	0,101663625						
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u C)	--	0,1	0,28	0,015520807	0,015591251	4,796E-05	0,009774774	0,025080796	0,101675844						
						Incert. total (U)	2,2	0,2	0,56	0,031041614	0,031182501	9,592E-05	0,019549549	0,050161592	0,203351687						
						47	Inyección	2022	149	13.677	2600	P1	182,5	49,8	4,07	0,116651613	0,116651613	--	0,461573723	0,458374579	2,031586351
P2	187,3	49,1	3,89	0,106097463	0,109954165							0,000143298	0,448954488	0,443701917	2,023285609						
P4	192,6	48,5	3,93	0,109865142	0,109763191							0,000101951	0,465738644	0,443436228	2,066929015						
Promedio	187,5	49,1	3,96	0,1108	0,1108							0,0001	0,4588	0,449	2,041						
Desv. Estándar	5,0	0,7	0,10	0,005348546	0,005422091							2,92368E-05	0,008739752	0,008548995	0,023175968						
Coef. Variación	3%	1,3%	2,4%	4,8%	4,9%							23,8%	1,9%	1,9%	1,1%						
(u A)	2,5	0,3814863	0,0554369	0,003087225	0,003129681							2,06707E-05	0,005046104	0,010809268	0,013157075						
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							--	2%	15%	25%						
(u C)	--	0,4	0,06	0,003087315	0,00312977							2,06707E-05	0,005046723	0,010813706	0,013281107						
Incert. total (U)	5,0	0,8	0,11	0,00617463	0,00625954							4,13414E-05	0,010093446	0,021627411	0,026562213						
48	Inyección	2022	149	13.677	2600							P1	170,5	54,7	3,60	0,131645303	0,131645303	--	0,379768511	--	--
												P2	187,9	51,7	3,48	0,138132994	0,137938903	0,000194091	0,411359448	0,526147634	2,098559236
						P4	180,2	52,5	3,26	0,139504427	0,139347441	0,000156986	0,408695419	0,496072134	2,086013572						
						Promedio	179,5	53,0	3,45	0,1363	0,1363	0,0002	0,3999	0,511	2,092						
						Desv. Estándar	8,7	1,5	0,17	0,004127382	0,004101144	2,62373E-05	0,017520704	0,02126659	0,008871124						
						Coef. Variación	5%	2,8%	4,9%	3,0%	3,0%	14,9%	4,4%	4,2%	0,4%						
						(u A)	4,4	0,8698326	0,0975036	0,002422908	0,002367019	1,85513E-05	0,010115498	0,009700958	0,006176654						
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u C)	--	0,9	0,10	0,002423095	0,002367211	1,85513E-05	0,010115755	0,009708065	0,006606611						
						Incert. total (U)	17,7	1,7	0,20	0,004846191	0,004734422	3,71026E-05	0,02023151	0,019416131	0,013213222						
						49	Carburada	2008	180	n.a	1500	P1	110,0	53,7	12,23	0,145028543	0,145028543	--	1,567289016	0,379801419	1,711709152
												P2	105,6	55,6	12,96	0,130822277	0,130822277	--	1,534644344	0,459576742	2,011532383
P4	109,6	53,0	12,20	0,113860788	0,113438427							0,000422361	1,52451433	0,504793555	2,188134426						
Promedio	108,4	54,1	12,46	0,1298	0,1298							0,0004	1,5421	0,448	1,970						
Desv. Estándar	2,4	1,4	0,43	0,015604161	0,015821671							--	0,022353097	0,063287303	0,240853791						
Coef. Variación	2%	2,5%	3,4%	12,0%	12,2%							0,0%	1,4%	14,1%	12,2%						
(u A)	1,2	0,78938	0,247309	0,009007707	0,009133271							0	0,012908312	0	0,13672556						
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							--	2%	15%	25%						
(u C)	--	0,8	0,25	0,009007736	0,009133299							0	0,012910345	0	0,136738703						
Incert. total (U)	2,4	1,6	0,49	0,018015472	0,018266599							0	0,02582069	0	0,273477405						
50	Carburada	2008	180	n.a	1500							P1	198,1	33,2	4,61	0,160984577	0,160984577	--	0,823408741	0,40659636	--
												P2	131,6	50,5	6,87	0,243774471	0,243576886	0,000197585	1,182991569	0,375578135	1,671959175
						P3	123,9	55,1	7,10	0,255353344	0,255162872	0,000190473	1,609127946	0,389967415	1,657364021						
						P4	119,6	55,9	7,05	0,240146208	0,239974125	0,000172083	1,345029904	0,336826163	1,67479888						
						Promedio	143,3	48,7	6,40	0,2249	0,2249	0,0002	1,2401	0,377	1,668						
						Desv. Estándar	36,9	10,6	1,20	0,043209457	0,043116414	1,31604E-05	0,32867658	0,029775958	0,00924054						
						Coef. Variación	26%	21,8%	0,19	19,2%	19,2%	7,0%	26,5%	7,9%	0,6%						
						(u A)	18,4	5,299283	0,60	0,021599384	0,021552868	7,59724E-06	0,164345246	0,003972805	0,005237354						
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u C)	--	5,3	0,60	0,021599422	0,021552907	7,59732E-06	0,16434534	0,00398008	0,005496325						
						Incert. total (U)	36,9	10,6	1,20	0,043198845	0,043105814	1,51946E-05	0,328690679	0,00796016	0,010992649						
						51	Carburada	2022	149	13.677	1500	P1	146,3	53,4	3,67	0,123296248	0,123296248	--	0,433783015	--	1,759025004
P2	156,0	50,2	3,25	0,110502454	0,11043296							6,94938E-05	0,456596308	0,404382077	1,773838109						
P4	165,3	48,3	2,97	0,110522012	0,110442095							7,99162E-05	0,428796962	0,361782836	1,577299419						
Promedio	155,9	50,6	3,30	0,1147	0,1147							0,0001	0,4397	0,383	1,703						
Desv. Estándar	9,5	2,6	0,35	0,007431357	0,007423987							7,36973E-06	0,014821778	0,030122212	0,109446389						
Coef. Variación	6%	5,1%	10,7%	6,5%	6,5%							9,9%	3,4%	7,9%	6,4%						
(u A)	4,7	1,4793997	0,2027268	0,004261533	0,004286425							5,2179E-06	0,008541526	0,002728581	0,062118953						
Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%							--	2%	15%	25%						
(u C)	--	1,5	0,20	0,00426	0,00429							0,00001	0,0085	0,003	0,062						
Incert. total (U)	9,5	3,0	0,41	0,00852	0,00857							0,00001	0,0171	0,005	0,124						
52	Carburada	2022	149	13.677	1500							P1	132,9	60,0	3,59	0,12202	0,12191	0,00010	0,4580	0,401	1,680
												P2	123,4	65,1	3,74	0,13428	0,13415	0,00014	0,4939	0,436	1,869
						P3	124,3	63,8	4,12	0,13062	0,13047	0,00015	0,4771	0,451	1,937						
						P4	116,8	70,1	3,88	0,15962	0,15944	0,00018	0,4953	0,461	1,973						
						Promedio	124,4	64,8	3,83	0,1365	0,1365	0,0001	0,4811	0,437	1,865						
						Desv. Estándar	6,6	4,2	0,22	0,0162	0,0161	0,00003	0,0174	0,026	0,130						
						Coef. Variación	5%	6,4%	5,8%	11,8%	11,8%	23,5%	3,6%	6,0%	7,0%						
						(u A)	3,3	2,1	0,11	8,1E-03	8,1E-03	1,7E-05	0,0087	0,009	0,064						
						Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%						
						(u C)	--	2,1	0,11	8,1E-03	8,1E-03	1,7E-05	0,009	0,009	0,064						
						Incert. total (U)	6,6	4,2	0,22	1,6E-02	1,6E-02	3,4E-05	0,017	0,018	0,128						

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) MULTIFACTORIAL

Para obtener conclusiones confiables, se ha llevado a cabo un análisis estadístico de varianza (ANOVA) multifactorial (para ampliar ver Anexo 4) de los datos de factores de emisión y de rendimiento de combustible para motocicletas y vehículos livianos. Este análisis permitió predecir los valores medios del factor de emisión de una fuente móvil en Colombia considerando los parámetros que más podrían incidir sobre estos, tales como: tipo de alimentación (carburada o inyección electrónica), cilindrada, transmisión (mecánica o automática), kilometraje, marca, y año de modelo.

Las **Tablas 2.2 a 2.9** muestran el rendimiento de combustible (km/gal) y los factores de emisión promedio y con sus respectivos intervalos de confianza para motocicletas en Colombia. Se presentan los resultados de aquellos parámetros, llamados categorías en las tablas, que presentaron diferencias significativas (valor $P < 0.05$). Estos resultados son válidos y generalizables únicamente para motocicletas de cilindrada inferior a 200 cm^3 .

Tabla 2.2. Valores promedio e intervalos de confianza del rendimiento de combustible de motocicletas en Colombia

Rendimiento de combustible [km/gal]			
Rendimiento promedio de todas las motocicletas = 129.8 km/gal			
Categoría	Promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Alimentación</i>			
Carburada	119.19	110.75	127.63
Inyección	140.36	131.33	149.40
<i>Kilometraje</i>			
1K (< 10,000 km)	115.21	104.58	125.84
2K (>=10,000 km)	144.35	137.87	150.82
<i>Marca</i>			
1	121.64	109.71	133.57
2	107.72	95.65	119.79
3	174.06	163.36	184.75
4	107.17	87.97	126.36
5	136.99	128.41	145.56
6	131.10	116.48	145.73
<i>Año del Modelo</i>			
N (> 2020)	145.00	139.81	150.19
U (<= 2020)	114.56	102.18	126.93

La **Figura 2.2** muestra el rendimiento de combustible (km/gal) de las categorías (tecnología de alimentación del combustible al motor (C = Carburada; I = Inyección electrónica), kilometraje, marca, y año de modelo, que presentaron diferencias significativas (valor $P < 0.05$).

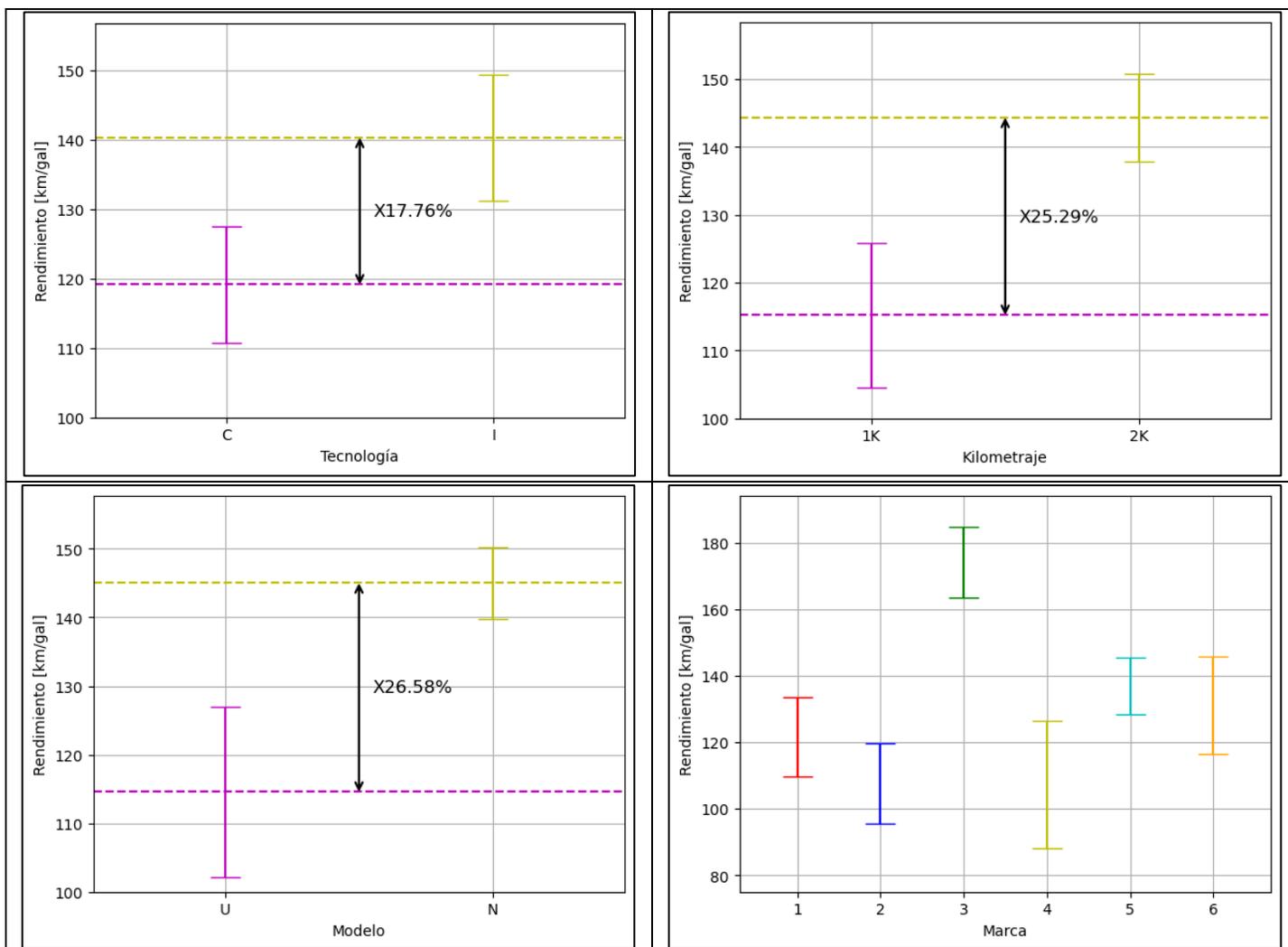


Figura 2.2. Rendimiento de combustible de motocicletas en Colombia. Efecto de la tecnología, kilometraje, año de modelo y marca.

Estos resultados de rendimiento de combustible permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ recorre alrededor de 130 km/gal de combustible, con un valor máximo cercano a 185 km/gal y uno mínimo de 88 km/gal.
2. Las motocicletas provistas con inyección electrónica de combustible mejoran el rendimiento de combustible en torno al 18%, llegando a recorrer en promedio 140 km/gal. Este resultado es válido inclusive si las motocicletas tienen el mismo sistema de control de emisiones Euro 3, y son independientes de la marca, el año de modelo y el kilometraje.

3. Las motocicletas con más de 10.000 km de recorrido alcanzar a recorrer en promedio cerca de 25% más que una con menos de 10.000 km, eso debido al efecto del “despegue” o desarrollo del motor.
4. Las motocicletas más recientes (año de modelo superiores al 2020), recorren alrededor de 27% más kilómetros por cada galón de gasolina que las anteriores a ese año.
5. Existe una marca de motocicletas (marca 3) que destacó por su mayor rendimiento de combustible sobre las demás marcas. En promedio la marca 3, recorre alrededor de 24% más kilómetros con un galón de gasolina frente a las demás.

Tabla 2.3. Valores promedio e intervalos de confianza del CO₂ de motocicletas en Colombia

CO ₂ [g/km]			
CO ₂ promedio de todas las motocicletas = 47.4 g/km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Kilometraje</i>			
1K (< 10,000 km)	52.77	50.03	55.52
2K (>=10,000 km)	42.03	39.39	44.68
<i>Marca</i>			
1	49.77	45.39	54.16
2	48.24	44.21	52.26
3	38.78	34.75	42.80
4	52.02	45.07	58.97
5	46.91	43.48	50.34
6	48.71	44.10	53.32

La **Figura 2.3** muestra el factor de emisión del CO₂ de motocicletas de las categorías: marca, y kilometraje, que presentaron diferencias significativas (valor P < 0.05).

Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio 48 gCO₂/km
2. Las motocicletas con más de 10.000 km de recorrido alcanzar a emitir en promedio cerca de 26% menos CO₂ que una con menos de 10.000 km, eso debido al efecto del “despegue” o desarrollo del motor.
3. La marca 3 de motocicletas que mejor rendimiento de combustible presentó, fue, como era de esperarse, la que menos CO₂ emitió por cada kilómetro recorrido

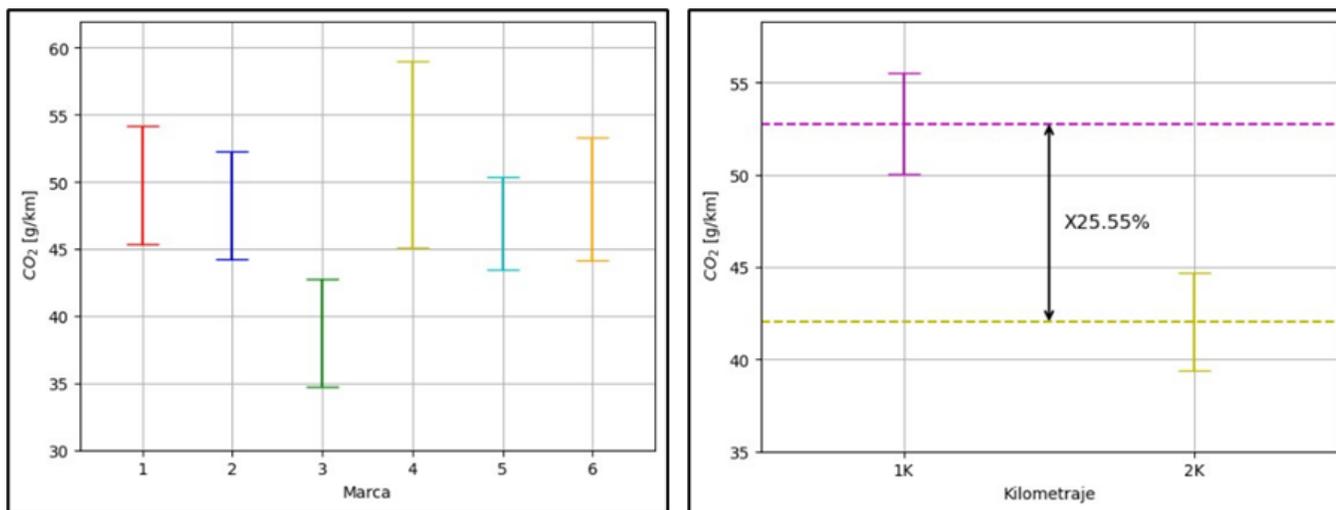


Figura 2.3. CO₂ de motocicletas en Colombia. Efecto de la marca y el kilometraje

Tabla 2.4. Valores promedio e intervalos de confianza del CO de motocicletas en Colombia

CO [g/km]			
CO promedio de todas las motocicletas = 7.59 g/km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Alimentación</i>			
Carburada	10.94	9.66	12.21
Inyección	4.24	2.79	
<i>Marca</i>			
1	7.22	5.28	9.16
2	14.02	12.09	15.95
3	2.67	0.94	4.41
4	9.01	6.00	12.01
5	5.74	4.34	7.13
6	6.86	4.88	8.83
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	4.94	4.13	5.75
U (<= 2020)	10.23	8.57	11.89

La **Figura 2.4** muestra el factor de emisión del monóxido de carbono (CO) de motocicletas de las categorías: tecnología de suministro de combustible (carburador ó inyección electrónica), y marca que presentaron diferencias significativas (valor $P < 0.05$).

Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio 7,6 gCO/km
2. Las motocicletas provistas con carburador emiten cerca de 2.8 veces más CO (en promedio 11gCO/km) por kilómetro recorrido, que una de inyección electrónica (en torno a 4 gCO/km).
3. La marca de motocicleta tuvo un efecto significativo sobre las emisiones de CO, independientemente de los demás parámetros considerados como kilometraje, año de modelo y cilindrada.

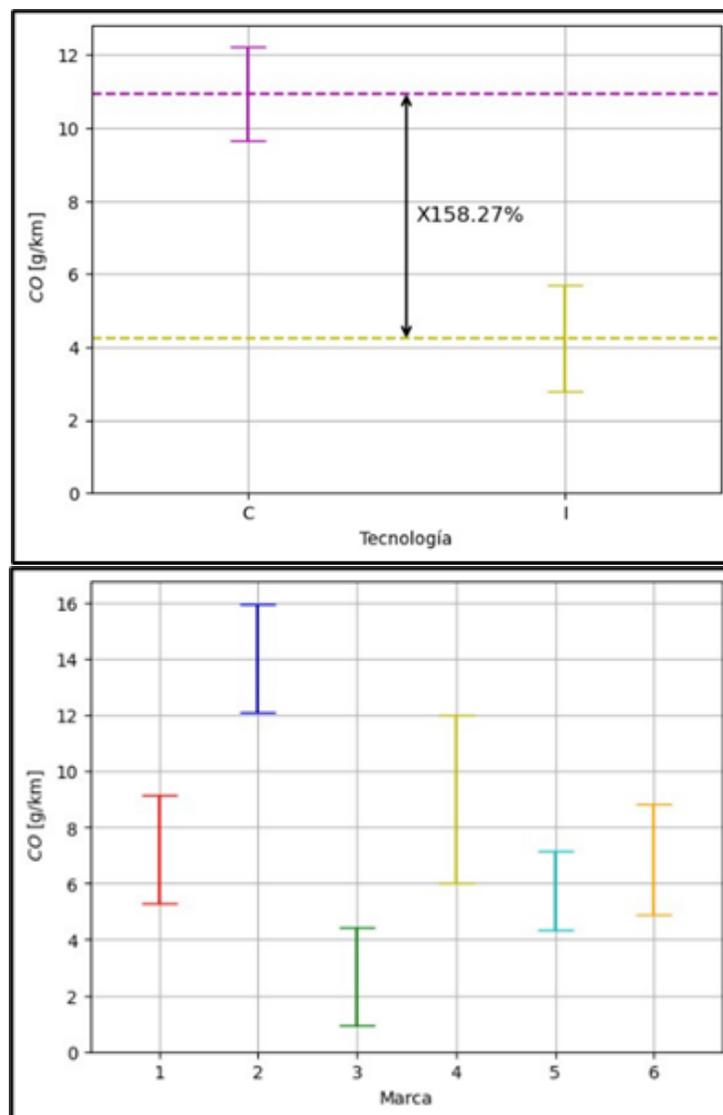


Figura 2.4. Factor de emisión de CO de motocicletas en Colombia

Tabla 2.5. Valores promedio e intervalos de confianza del HC de motocicletas en Colombia

HC [mg/km]			
HC promedio de todas las motocicletas = 378.6 mg/km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Cilindrada</i>			
1C (<150 cc)	475.93	373.39	578.47
2C (>= 150 cc)	281.17	141.46	420.89
<i>Marca</i>			
1	253.21	82.23	424.19
2	624.83	478.39	771.26
3	544.71	385.18	704.23
4	432.66	167.73	697.60
5	170.53	53.12	287.94
6	245.36	59.82	430.91
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	175.03	71.38	278.69
U (<= 2020)	582.07	436.99	727.14
<i>Transmisión</i>			
A (Automática)	252.95	79.83	426.08
M (Manual)	504.15	418.77	589.53

La **Figura 2.5** muestra el factor de emisión de hidrocarburos (HC) emitidos por motocicletas de las categorías que presentaron diferencias significativas (valor $P < 0.05$).

Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio cerca de 380 mgHC/km
2. Las motocicletas con cilindradas entre 150 y 200 cm³ emiten en torno a 70% menos HC que aquellas con cilindradas inferiores a 150 cm³. Esto se debe a que a mayor cilindrada mejor es la eficiencia de combustión debido a que disminuyen las pérdidas de calor con el tamaño.
3. Las motocicletas más nuevas (año 2020 y mayores) emitieron menos HC (cerca de 3 veces menos HC) que las anteriores al año de modelo 2020. Esto quizá pueda explicarse por el mejor estado del catalizador de 3 vías.
4. Las motocicletas con transmisión automática emitieron cerca de 2 veces menos HC por cada kilómetro recorrido que las manuales.

5. Curiosamente la marca 3, identificada como la que mejor rendimiento de combustible y por ende menor emisión de CO₂ presentó, en este caso tuvo una emisión significativa de HC frente a las demás marcas. Esto probablemente esté indicando que el catalizador de 3 vías de las marcas 2 y 3 es susceptible de mejora.

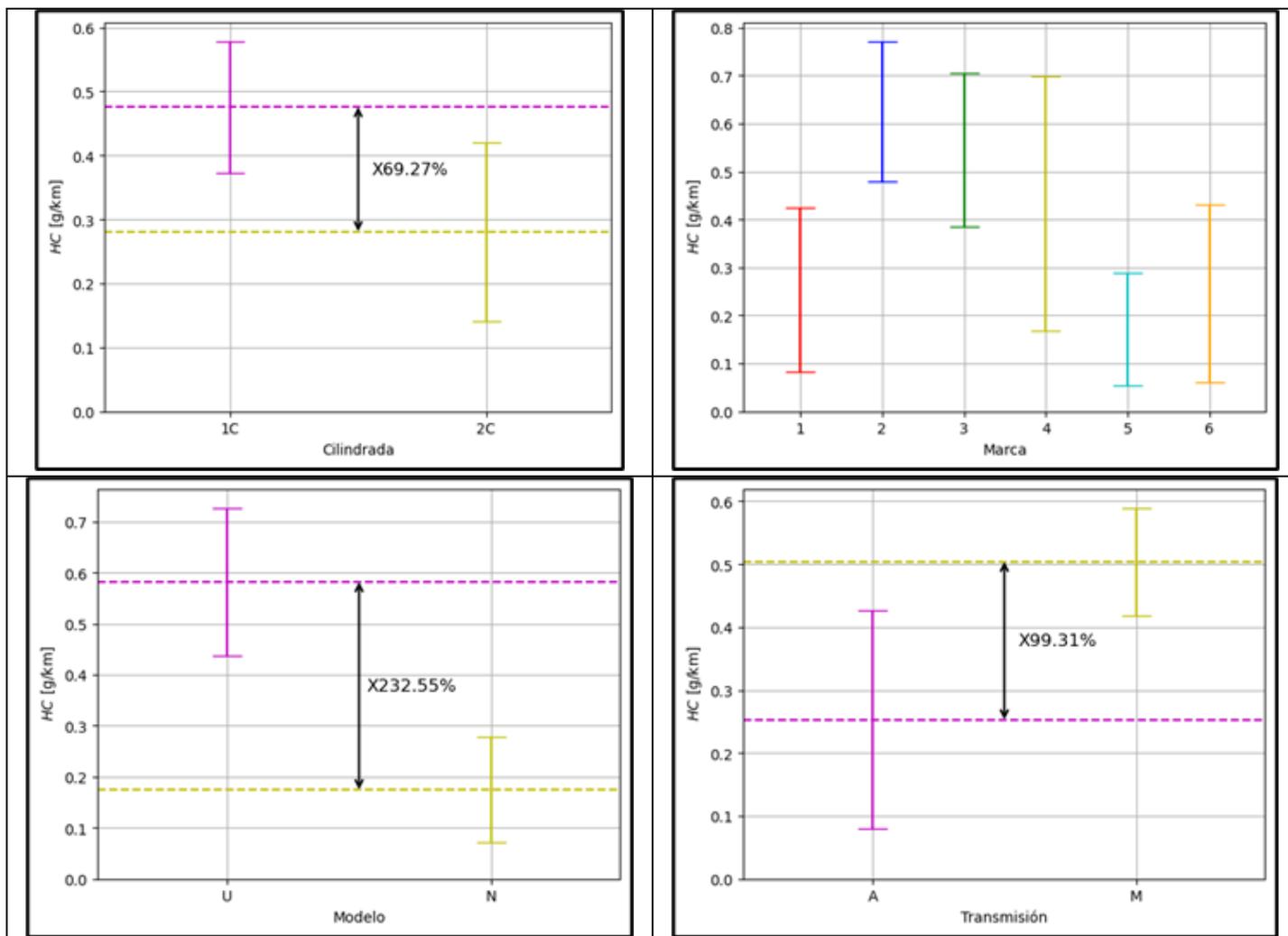


Figura 2.5. HC de motocicletas en Colombia. Efecto de la cilindrada, marca, el año del modelo y tipo de transmisión (automática ó mecánica)

Tabla 2.6. Valores promedio e intervalos de confianza del NO de motocicletas en Colombia

NO [mg/km]			
NO promedio de todas las motocicletas = 63.98 mg/km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Alimentación</i>			
Carburada	32.89	15.55	50.23
Inyección	95.07	76.45	113.70
<i>Cilindrada</i>			
1C (<150 cc)	94.24	79.73	108.75
2C (>= 150 cc)	33.72	16.83	50.62
<i>Marca</i>			
1	62.52	37.60	87.44
2	46.88	21.96	71.80
3	184.53	164.14	204.93
4	20.61	0.00	57.70
5	22.03	3.49	40.57
6	47.32	24.07	70.57

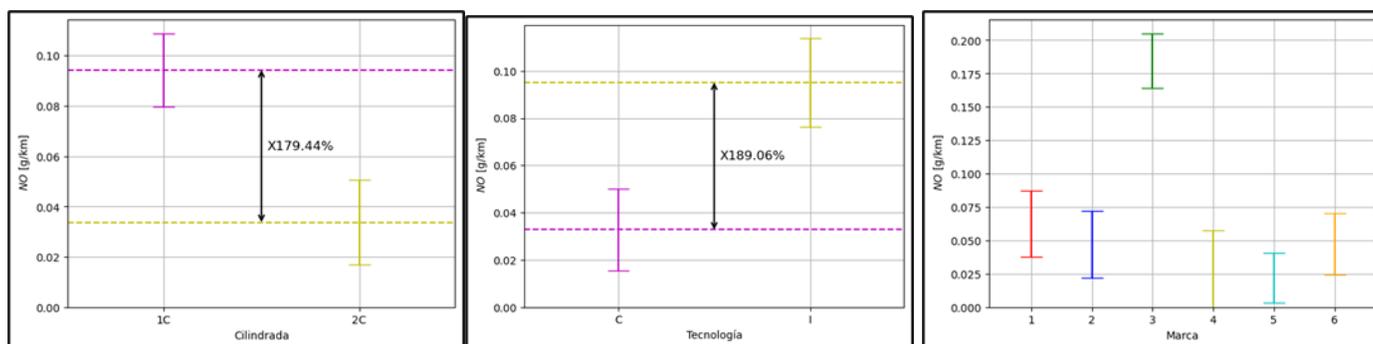


Figura 2.6. NO de motocicletas en Colombia. Efecto de la cilindrada, marca, y tipo de suministro de combustible (carburada ó inyección electrónica)

La **Figura 2.6** muestra el factor de emisión de monóxido de nitrógeno (NO) emitido por motocicletas. Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio cerca de 64 mgNO/km
2. Las motocicletas provistas de inyección electrónica emiten en promedio 190% más NO que las carburadas. Esto es porque la combustión se lleva a más alta temperatura, lo que se refleja en su mayor rendimiento de combustible.
3. Al igual que con los hidrocarburos, la marca 3 fue la que mayor emisión de NO presentó. Esto parece confirmar que esta marca podría mejorar su sistema de catalizador de 3 vías.

Tabla 2.7. Valores promedio e intervalos de confianza del NO₂ de motocicletas en Colombia

NO ₂ [mg/km]			
NO ₂ promedio de todas las motocicletas = 0.65 mg/km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Cilindrada</i>			
1C (<150 cc)	0.97	0.71	1.22
2C (>= 150 cc)	0.33	0.03	0.63
<i>Marca</i>			
1	0.73	0.29	1.16
2	0.15		0.57
3	1.68	1.27	2.08
4	0.83	0.12	1.55
5	0.36	0.04	0.68
6	0.14		0.59

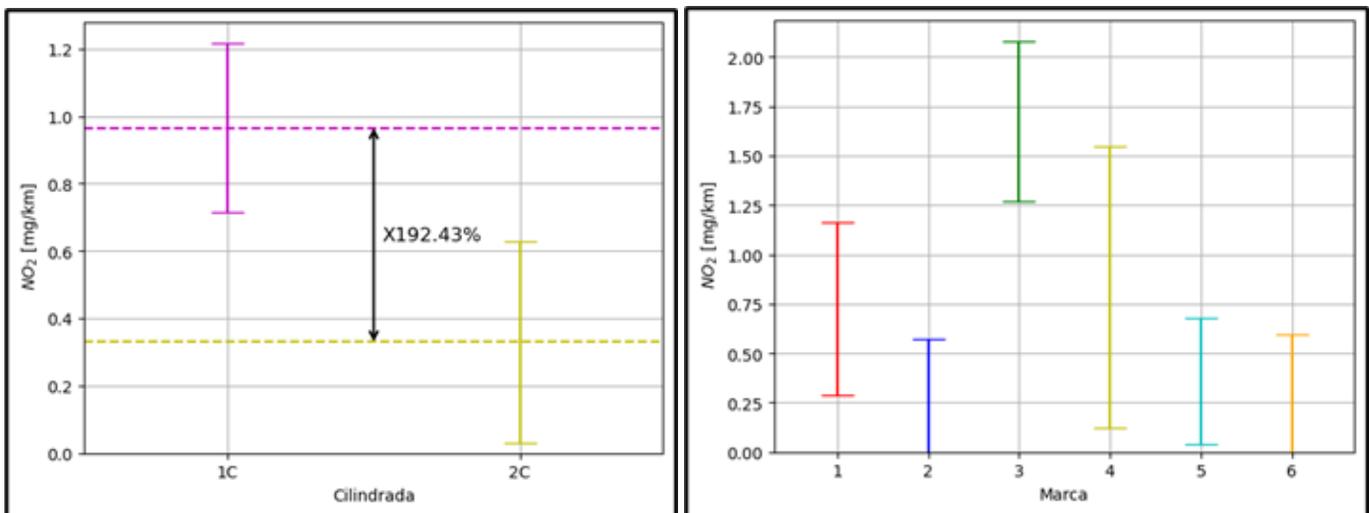


Figura 2.7. NO₂ de motocicletas en Colombia. Efecto de la cilindrada, y marca

La **Figura 2.7** muestra el factor de emisión de dióxido de nitrógeno (NO₂) emitido por motocicletas. Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio cerca de 0.65 mg NO₂/km
2. Las motocicletas con cilindradas entre 150 y 200 cm³ emiten en torno a 2 veces menos NO₂ que aquellas con cilindradas inferiores a 150 cm³.
3. Al igual que con los HC, y NO la marca 3 fue la que mayor emisión de NO₂ presentó. Esto parece confirmar que esta marca podría mejorar su sistema de catalizador de 3 vías.

Tabla 2.8. Valores promedio e intervalos de confianza del PM de motocicletas en Colombia

PM [mg/km]			
PM promedio de todas las motocicletas = 0.68 mg/km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Alimentación</i>			
C (Carburada)	0.84	0.69	0.99
I (Inyección)	0.52	0.32	0.73
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	0.40	0.27	0.53
U (<= 2020)	0.96	0.72	1.21

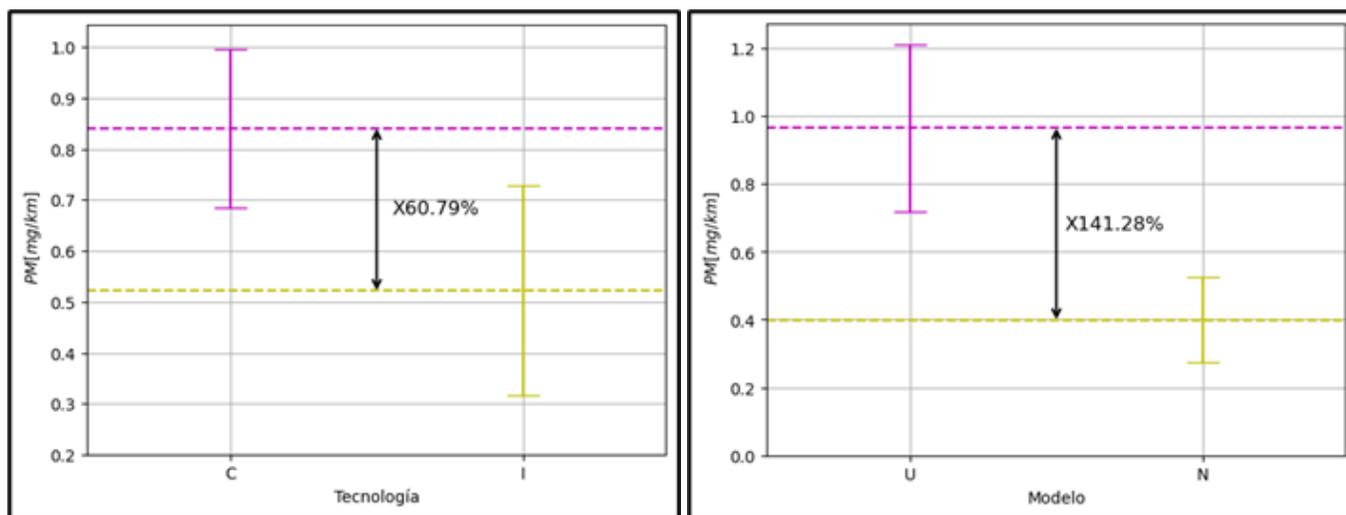


Figura 2.8. PM de motocicletas en Colombia. Efecto del tipo de suministro de combustible (carburada ó inyección electrónica) y del año del modelo

La **Figura 2.8** muestra el factor de emisión de material particulado (PM) emitido por motocicletas. Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio cerca de 0.68 mg PM / km
2. Las motocicletas provistas de inyección electrónica emiten en promedio cerca de 60% menos PM que las carburadas.
3. Las motocicletas más nuevas (año 2020 y mayores) emitieron menos PM (cerca de 2.5 veces menos) que las anteriores al año de modelo 2020.

Tabla 2.9. Valores promedio e intervalos de confianza del PN de motocicletas en Colombia

PN [# 10 ¹² /km]			
PN promedio de todas las motocicletas = 2.06 # 10 ¹² /km			
Nivel o categoría	Valor promedio	Límite inferior	Límite superior
<i>Alimentación</i>			
C (Carburada)	2.50	2.32	2.68
I (Inyección)	1.61	1.38	1.84
<i>Kilometraje</i>			
1K (< 10,000 km)	2.39	2.15	2.63
2K (>=10,000 km)	1.72	1.54	1.90
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	1.62	1.48	1.76
U (<= 2020)	2.49	2.19	2.80

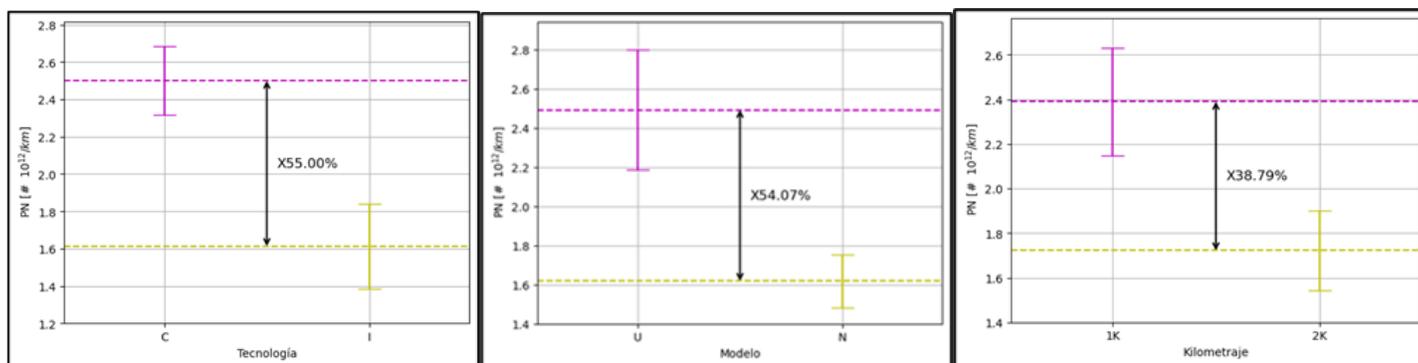


Figura 2.9. PN de motocicletas en Colombia. Efecto del tipo de suministro de combustible (carburada ó inyección electrónica), del kilometraje, y del año del modelo

La **Figura 2.9** muestra el factor de emisión de concentración del número de partículas (PN) emitido por motocicletas. Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Una motocicleta de menos de 200 cm³ emite en promedio cerca de 2 billones de partículas / km
2. Las motocicletas provistas de inyección electrónica emiten en promedio 55% menos PN que las carburadas. Esto es porque la combustión se lleva a cabo de manera más eficiente por la mejor distribución de tamaño de gotas en el chorro atomizado de gasolina.
3. Las motocicletas más nuevas (año 2020 y mayores) emitieron cerca de 54% menos PN que las anteriores al año de modelo 2020.
4. Las menos de 10.000 km de recorrido emitieron en torno a 40% más número de partículas que las que tenían más de 10.000 km. Esto se debe al proceso natural de despegue o “desarrollo” de las piezas metálicas del motor.

Tabla 2.9. Valores promedio de los factores de emisión de las motocicletas más representativas en Colombia (cilindradas entre 100 cc y 200 cc)

Parámetro	Unidades	Motocicletas
Rendimiento de combustible	km/gal	130
	L/100km	2,4
	kWh/100 km	26,2
CO ₂	g/km	47
CO		7,6
HC	mg/km	378
NO		64
NO ₂		0,65
PM		0,68
PN	x 10e12 #/km	2

Nota: el rendimiento del combustible en kWh/100 km se obtuvo a partir del poder calorífico inferior de la gasolina PCI = 43000 kJ/kg = 12 kWh/kg

FACTORES DE EMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

En La Tabla 2.10 se presenta la base de datos de factores de emisión medidos en tres altitudes distintas sobre el nivel del mar:

- Apartadó a 0 msnm
- Medellín a 1500 msnm
- Bogotá a 2600 msnm

Las pruebas para determinar los factores de emisión de las motocicletas con la altitud se realizaron en el mismo banco de ensayos, para lo cual debió ser transportado desde Medellín. Tanto en Apartadó como en Bogotá, fue necesario llevar a cabo el proceso de arme, instrumentación, y puesta a punto del banco de rodillos dinamométrico.

En Apartadó, el banco fue ubicado en la sede de la Universidad de Antioquia, mientras que en la ciudad de Bogotá fue instalado en la sede de Primax de Puente Aranda. En todos los ensayos de altitud se utilizó gasolina comercial disponible en la zona de pruebas.

Las pruebas se realizaron sobre dos motocicletas de tecnologías y años de modelo diferentes.

En la Tabla 2.10 se presentan en color rojo los valores promedio, mediana, desviación estándar, y el rango de confianza estadístico al 95% de una distribución *t-student*. Como se observa, la mayoría de los datos no presentaron distribución normal, por lo que, para efectos de comparación entre ciudades, y entre las dos motocicletas, se optó por graficar los valores de las medianas y los rangos de confianza del 95%.

Estos resultados se presentarán en el capítulo 6, donde se complementa el análisis de varianza multifactorial de la altura sobre el nivel del mar de forma detallada.

Tabla 2.10 Factores de emisión de motocicletas en las tres altitudes sobre el nivel del mar

Lugar	Prueba	Rend. comb [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO _x [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
Apartadó (0 msnm)	P1	128,0	74,1	6,73	0,4394	0,4394	--	2,018	0,71	1,87
	P2	128,7	76,2	7,77	0,3720	0,3718	0,0002	1,937	0,77	2,54
	P3	142,6	68,7	6,41	0,3513	0,3510	0,0003	2,037	0,70	2,37
	P4	172,5	60,2	5,22	0,3097	0,3094	0,0003	1,758	0,49	1,62
	Prom	142,9	69,8	6,53	0,3681	0,3679	0,0003	1,937	0,67	2,10
	Mediana	135,6	71,4	6,57	0,3617	0,3614	0,0003	1,977	0,71	2,12
	Desv. Est.	20,8	7,1	1,05	0,0541	0,0542	0,0001	0,127	0,12	0,43
	Int. Conf. (t)	33,2	11,3	1,67	0,0861	0,0863	0,0001	0,202	0,19	0,68
Medellín (1500 msnm)	P2	154,8	37,5	--	0,1208	0,1206	0,0002	1,066	0,76	2,93
	P3	150,2	38,6	6,50	0,1397	0,1394	0,0003	1,009	0,74	3,05
	P4	172,7	32,8	5,99	0,1215	0,1213	0,0002	1,012	0,71	2,70
	P1	198,1	33,2	4,61	0,1610	0,1610	--	0,823	0,41	--
	P2	131,6	50,5	6,87	0,2438	0,2436	0,0002	1,183	0,38	1,67
	P3	123,9	55,1	7,10	0,2554	0,2552	0,0002	1,609	0,39	1,66
	P4	119,6	55,9	7,05	0,2401	0,2400	0,0002	1,345	0,34	1,67
	Prom	150,1	43,4	6,35	0,1832	0,1830	0,0002	1,150	0,53	2,28
	Mediana	150,2	38,6	6,69	0,1610	0,1610	0,0002	1,066	0,41	2,19
	Desv. Est.	28,3	10,2	0,95	0,0608	0,0608	0,0000	0,259	0,19	0,68
Int. Conf. (t)	26,2	9,4	1,00	0,0563	0,0563	0,0000	0,240	0,18	0,71	
Bogotá (2600 msnm)	P1	132,4	65,1	10,27	0,3061	0,3061	--	1,620	0,57	2,45
	P2	133,4	65,0	11,04	0,2549	0,2547	0,0002	1,576	0,49	2,13
	P3	129,4	64,7	11,22	0,2428	0,2425	0,0002	1,615	0,43	1,96
	P4	129,1	64,8	11,60	0,2389	0,2386	0,0004	1,608	0,49	2,19
	Prom	131,1	64,9	11,03	0,2607	0,2605	0,0003	1,605	0,49	2,18
	Mediana	130,9	64,9	11,13	0,2488	0,2486	0,0002	1,611	0,49	2,16
	Desv. Est.	2,2	0,2	0,56	0,0310	0,0312	0,0001	0,020	0,06	0,21
	Int. Conf. (t)	3,4	0,2	0,89	0,0494	0,0496	0,0002	0,031	0,09	0,33

Lugar	Prueba	Rend. comb [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]	
Apartadó (0 msnm)	P1	207,4	46,6	2,52	0,0591	0,0591	--	0,202	0,32	1,59	
	P2	216,2	46,7	2,18	0,0506	0,0506	--	0,198	0,40	1,56	
	P4	214,8	48,1	1,81	0,0481	0,0481	--	0,164	0,27	1,12	
	Prom	212,8	47,1	2,17	0,0526	0,0526	--	0,188	0,33	1,42	
	Mediana	214,8	46,7	2,18	0,0506	0,0506	--	0,198	0,32	1,56	
	Desv. Est.	4,8	0,8	0,36	0,0058	0,0058	--	0,021	0,06	0,26	
	Int. Conf. (t)	11,8	2,0	0,89	0,0143	0,0143	--	0,051	0,16	0,66	
Medellín (1500 msnm)	P1	171,7	--	1,67	--	--	--	0,297	--	0,92	
	P2	191,0	39,4	1,59	0,1002	0,1002	--	0,272	0,24	1,16	
	P3	210,8	33,7	1,50	0,0845	0,0840	0,0004	0,243	0,26	0,92	
	P4	226,3	30,0	1,35	0,0701	0,0697	0,0004	0,207	0,23	1,12	
	P1	132,9	60,0	3,59	0,1220	0,1219	0,0001	0,458	0,40	1,68	
	P2	123,4	65,1	3,74	0,1343	0,1341	0,0001	0,494	0,44	1,87	
	P3	124,3	63,8	4,12	0,1306	0,1305	0,0002	0,477	0,45	1,94	
	P4	116,8	70,1	3,88	0,1596	0,1594	0,0002	0,495	0,46	1,97	
	Prom	162,1	51,7	2,68	0,1145	0,1143	0,0002	0,368	0,35	1,45	
	Mediana	152,3	60,0	2,63	0,1220	0,1219	0,0002	0,378	0,40	1,42	
	Desv. Est.	43,5	16,7	1,24	0,0311	0,0312	0,0001	0,124	0,11	0,46	
	Int. Conf. (t)	36,4	15,5	1,04	0,0288	0,0289	0,0002	0,104	0,10	0,39	
	Bogotá (2600 msnm)	P1	170,5	54,7	3,60	0,1316	0,1316	--	0,380	--	--
		P3	187,9	51,7	3,48	0,1381	0,1379	0,0002	0,411	0,53	2,10
P4		180,2	52,5	3,26	0,1395	0,1393	0,0002	0,409	0,50	2,09	
Prom		179,5	53,0	3,45	0,1364	0,1363	0,0002	0,400	0,51	2,09	
Mediana		180,2	52,5	3,48	0,1381	0,1379	0,0002	0,409	0,51	2,09	
Desv. Est.		8,7	1,5	0,17	0,0042	0,0041	0,0000	0,018	0,02	0,01	
Int. Conf. (t)		21,7	3,7	0,42	0,0104	0,0102	0,0002	0,044	0,19	0,08	

COMPARACIÓN CON RESULTADOS REPORTADOS EN LA LITERATURA

Queremos contextualizar estos resultados de factores de emisión medidos en motocicletas en Colombia, haciendo un comparativo con resultados de investigaciones en otras partes del mundo. A continuación, se presentan cinco estudios encontrados en la literatura donde reportan factores de emisión de motocicletas.

Factores de emisión de motocicletas reportados en la literatura

En 2016, en la ciudad de Teherán, *Amin Hassani* y *Vahid Hosseini* [1], utilizaron un dinamómetro para medir factores de emisión de 60 motocicletas con estándar Euro 3. El ciclo de conducción utilizado tenía una velocidad promedio en movimiento de 24,6 km/h, ligeramente mayor a la del ciclo de conducción de Colombia (23 km/h). Para 2016, Irán contaba con 3.5 millones de vehículos livianos a gasolina y 1 millón de motocicletas 4 tiempos. La cilindrada más representativa era de 125 cc. En la Tabla 2.11 muestran los los resultados del factor de emisión del CO, HC y NO_x respecto a cada cilindrada. Los autores resaltaron que el CO era del orden de 7 veces mayor al límite de certificación aprobado por la norma Euro 3 para motocicletas de esta cilindrada.

Tabla 2.11. Factores de emisión de motocicletas en Teherán [1].

Cilindrada [cc]	CO [g/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
125	15.63	504	74
150	16.78	327	242
180	12.43	258	127
200	12.99	330	263

También en 2016, en la ciudad Chennai, sexta ciudad más poblada de la India, *Srinath Mahesh*, *Gitakrishnan Ramadurai* y *S.M. Shiva Nagendra* [2] reportaron los factores de emisión de motocicletas medidos en condiciones de conducción real. La india contaba con más de 100 millones de motocicletas para ese entonces, mientras que los inventarios de emisión de la ciudad de Chennai reportaban que alrededor del 64% a la contaminación total en el área de transporte provenía del sector de las motocicletas. Los autores usaron 4 tipos de motocicletas altamente representativas de la ciudad, desde 70 cc hasta 125 cc, con estándar de emisión Euro 2 y Euro 3, cuyas características se resumen en la Tabla 2.12, mientras que los factores de emisión se reportan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.12. Motocicletas usadas para el estudio de la ciudad de Chennai.

Especificación	Motocicleta 1	Motocicleta 2	Motocicleta 3	Motocicleta 4
Cilindrada [cc]	70	100	109	125
Motor (tiempos)	2 t	4 t	4 t	4 t
Estándar de emisión	Euro 2	Euro 2	Euro 3	Euro 3
Año del modelo	2011	2008	2013	2010
Kilometraje	9243	17321	14345	12147

Tabla 2.13. Factores de emisión de motocicletas de la ciudad de Chennai.

Motocicleta	CO [g/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
1	18.44	3120	110
2	4.77	240	240
3	9.71	460	230
4	5.84	290	180

En 2013 *Adolfo Senatore* y colaboradores [3] reportaron los resultados de factores de emisión medidos sobre banco de rodillos de tres motocicletas medidas en la ciudad de Campania, Italia. Para ese entonces se tenían un total de 577.000 motocicletas en la ciudad. La muestra se presenta en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Motocicletas medidas en Campania (Italia) [3]

Motocicleta	A	B	C
Cilindrada [cc]	50	244	982
Alimentación	Carburada	Inyección	Inyección
Legislación	Euro 2	Euro 3	Euro 3

Cada motocicleta fue conducida en condiciones de carretera siguiendo ciclos de conducción para determinar el factor de emisión en zona urbana, rural y en carretera, los resultados, para la zona urbana se muestran en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Factores de emisión para el estudio en Campania [3]

Motocicleta	CO [g/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
A	4.11	740	210
B	1.63	70	80
C	0.61	60	80

Jiun-Horng Tsai y colaboradores [4] reportaron factores de emisión de CO, HC y NO_x medidos en banco de rodillos dinamométrico sobre una muestra de 19 motocicletas (7 nuevas y 12 usadas) en el sur de Taiwán. De las 7 nuevas, 4 eran dos tiempos con catalizador y 3 cuatro tiempos sin catalizador; de las 12 usadas, 8 eran dos tiempos. Ninguna de las motocicletas usadas excedía los 45000 km recorridos. Para el estudio, los autores siguieron un ciclo de conducción estandarizado similar al ciclo europeo ECE. En la Tabla 2.16 se muestran los resultados reportados por *Tsai* y colabores.

Tabla 2.16. Factores de emisión en el sur de Taiwán [4]

Motocicleta	Característica	CO [g/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
2 tiempos	Nueva con catalizador	2.63	3280	35
	En uso con catalizador	21.72	15160	16
	En uso sin catalizador	39.22	20040	15
4 tiempos	Nueva sin catalizador	5.66	1500	460
	En uso sin catalizador	36.1	3200	250

También en Taiwán, *K.S. Chen* y colabores [5], reportaron factores de emisión de motocicletas para tres ciudades (*Taipei, Taichung y Kaohsiung*), además del condado de *Pingtung*. Para el tiempo del estudio, hacia comienzos del año 2000, cada ciudad contaba respectivamente con 968.891, 484.389, 990.447, mientras que el condado de *Pingtung* tenía 522.110 motocicletas. Los autores utilizaron un un dinamómetro específico en cada ciudad, con un ciclo de conducción diferente, aunque con un porcentaje de diferencia insignificante.

En la Tabla 2.17 se muestra el número de motocicletas medidas en cada lugar según fueran de 50 cc y 125 cc de cilindrada. Los resultados de factores de emisión para cada lugar analizado se presentan en la Tabla 2.18.

Tabla 2.17. Muestra de motocicletas medidas para diferentes lugares en Taiwán [5]

Ciclo de conducción	Motocicletas 50 cc	Motocicletas 125 cc
Taipei	1	2
Taichung	2	4
Kaohsiung	1	2
Pingtung	6	9

Tabla 2.18. Factores de emisión promedio de motocicletas en las ciudades de Taiwán según referencia [5]

Ciclo de conducción	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]
Taipei	55.98	8.24	2530	120
Taichung	54.31	7.81	2280	120
Kaohsiung	54.03	6.53	1620	130
Pingtung	41.42	6.79	1630	130

Análisis comparativo frente este proyecto

Con base en el análisis exploratorio presentado en el apartado anterior, se recolectaron los valores promedio de los factores de emisión de CO, HC y NO_x (NO + NO₂), para cada categoría de motocicleta según varias categorías como: tipo de alimentación de combustible (carburada/inyección), transmisión (manual/automática), modelo, cilindrada y kilometraje (Tabla 2.19). Estos valores promedio nos permiten hacer un comparativo para darnos cuenta de cómo estamos frente a los factores de emisión que se han publicado en las cinco investigaciones mostradas en el apartado anterior.

Por simplicidad y claridad, consideremos la siguiente notación para cada reporte:

- A. “An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution” [1].
- B. “Real-world emissions of gaseous pollutants from motorcycles on Indian urban arterials” [2].

- C. “Road Transport Emission Inventory in a Regional Area by Using Experimental Two Wheelers Emission Factors” [3].
- D. “Air pollutant emission factors from new and in-use motorcycles” [4].
- E. “Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions” [5].

Tabla 2.19. Características de los reportes encontrados en la literatura y los de este proyecto

Reporte	País (Ciudad)	Año	Motocicletas medidas (estándar de emisión)	# motos país	Cilindrada representativa (cm ³)
Este proyecto	Colombia	2023	40 (Euro 2 y Euro 3)	11'158.610	100 a 200
A	Irán (Teherán)	2016	60 (Euro 3)	1'000.000	125
B	India (Chennai)	2016	4 (Euro 2 y Euro 3)	100 millones	100 y 125
C	Italia (Campania)	2013	3 (Euro 2 y Euro 3)	577,000 (ciudad)	50, 250 y 1000
D	Taiwán (sur)	2000	19	-	-
E	Taiwán (Taipei, Taichung y Kaohsiung – Provincia rural de Pingtung)	2003	27	3'000,000 (en las 3 ciudades + la provincia)	50 y 125

Para una visualización clara, presentamos los resultados del factor de NO_x en su valor por 10⁻¹, por ejemplo (1.77 corresponde a 0.177 gNO_x/km). En la Figura 2.10 se presentan barras de escala de color, donde podremos observar todos los valores considerados en las publicaciones referencias en este capítulo, frente a los valores promedio de los factores de emisión reportados en nuestro proyecto FECOC+ Fase 3.

Se puede observar que en emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y en hidrocarburos (HC), nuestro proyecto presenta los factores de emisión aparentemente más bajos que otras investigaciones, mientras que el CO tiene un comportamiento ligeramente mayor a la investigación C, pero menor a las demás.

En la Figura 2.12 representamos los valores promedio de los factores de emisión de cada investigación en forma de mapas de calor, para observar las diferencias entre los resultados reportados en la literatura con los obtenidos en este proyecto.

En las Figuras 2.13 a 2.15 se presentan a continuación los diagramas de cajas y bigotes para los factores de emisión de CO, HC y NO_x, respectivamente, comparando los resultados de este proyecto con los reportados en la literatura.

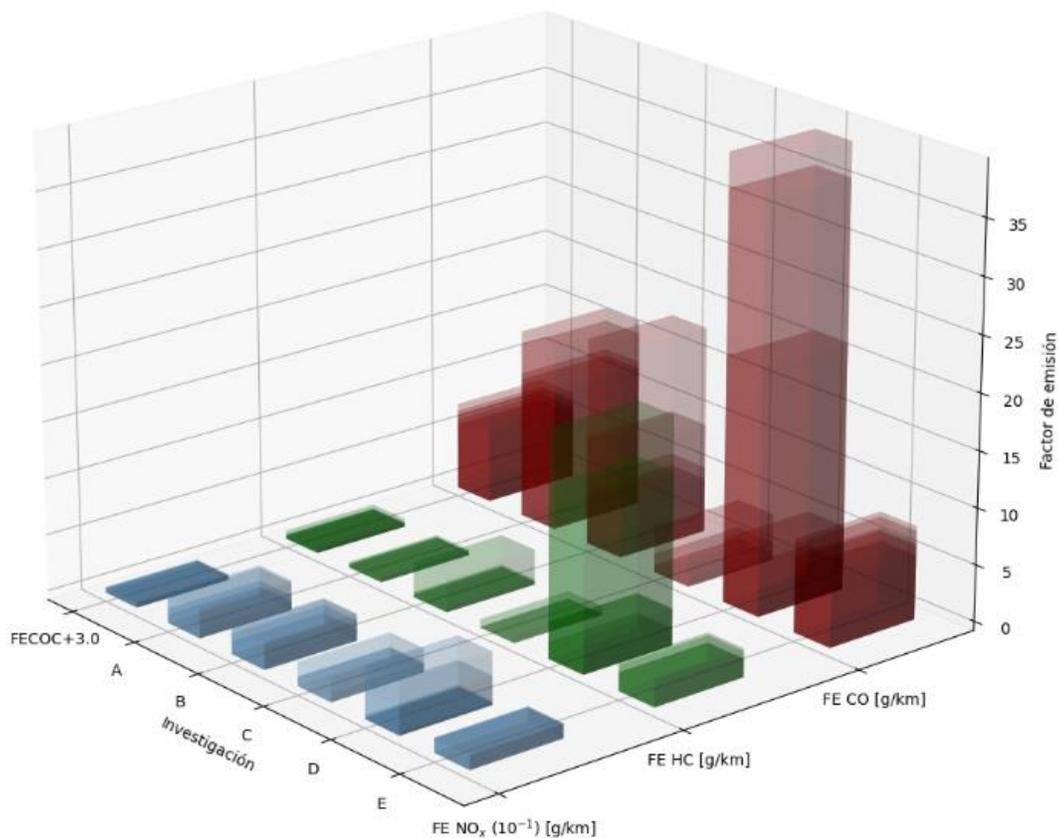


Figura 2.10. Comparativo gráfico de los resultados FECOC+ Fase 3 vs otros estudios

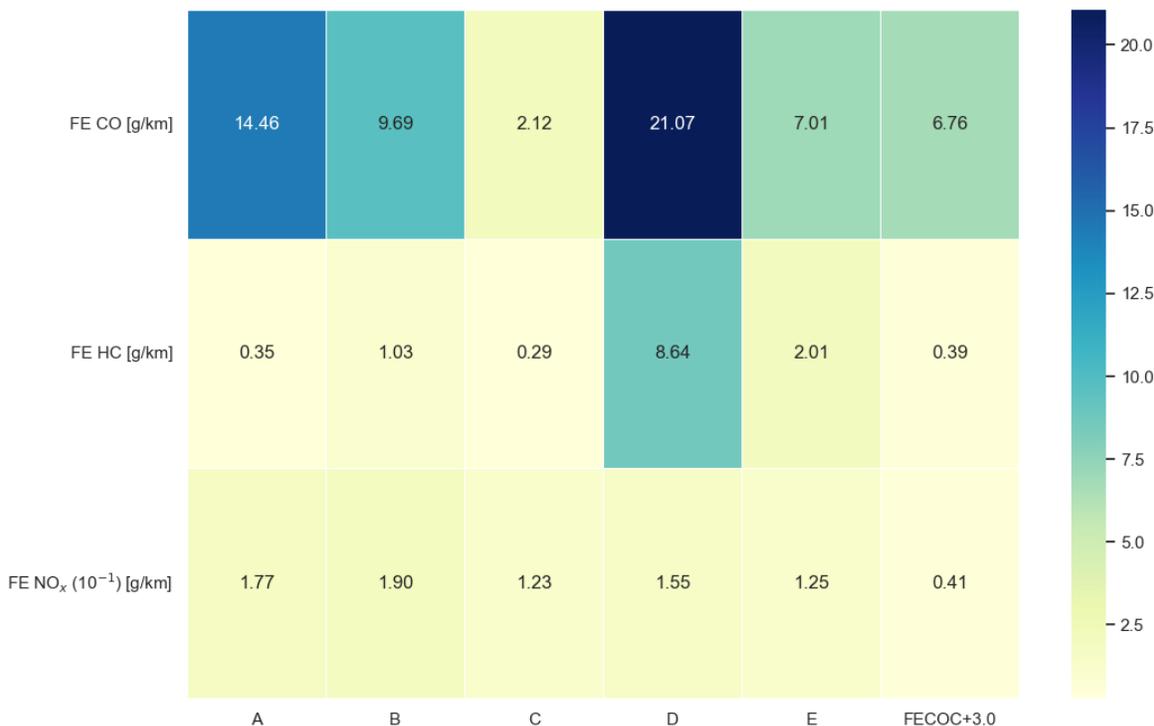


Figura 2.12. Mapa de calor de los factores de emisión promedio para todos los estudios

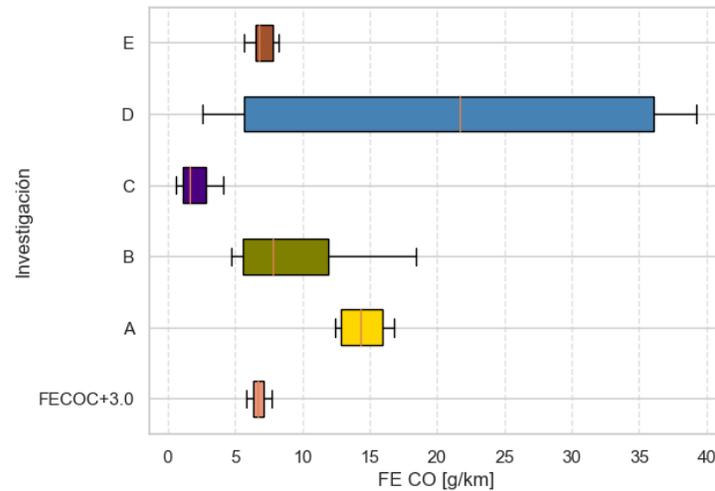


Figura 2.13. Diagrama de cajas y bigotes para el factor de emisión de CO

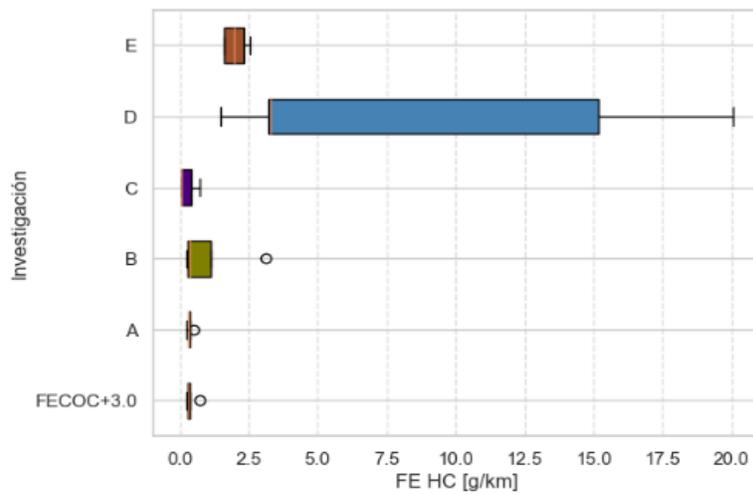


Figura 2.14. Diagrama de cajas y bigotes para el factor de emisión de HC

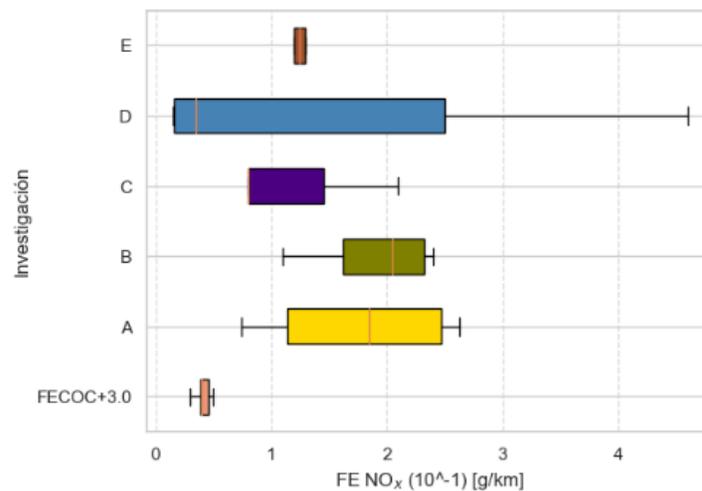


Figura 2.15. Diagrama de cajas y bigotes para el factor de emisión de NOx

Únicamente la investigación que hemos denominado “E”, correspondiente a tres ciudades y una región rural de Taiwán, reportó el factor de emisión del CO₂. En la Figura 2.16 se presentan los resultados en barras de las 40 motocicletas medidas en este proyecto, mientras que, en las barras horizontales a trazos, se presentan los factores de emisión del reporte E. En la Figura 2.17 se han representado los resultados en forma de cajas y bigotes para visualizar la dispersión de los datos.

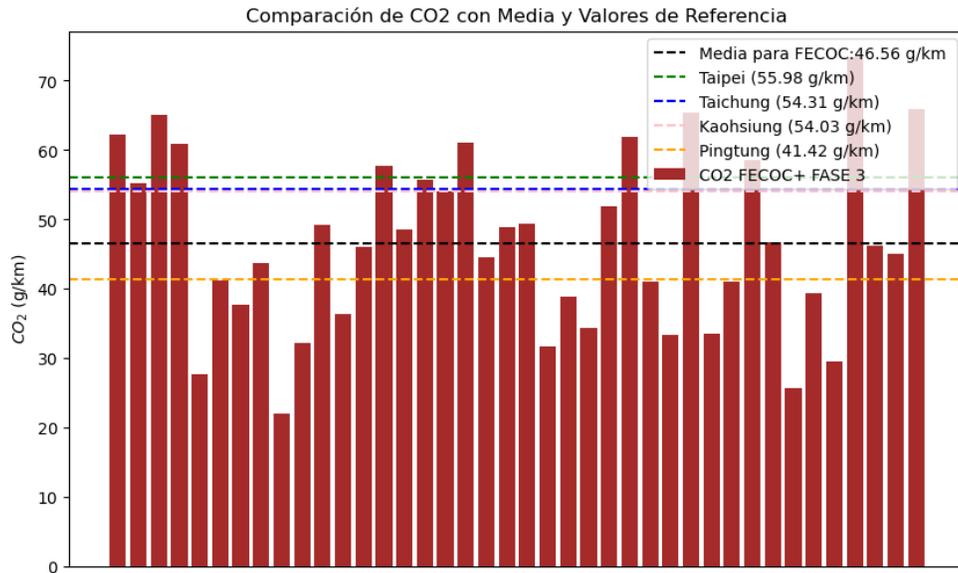


Figura 2.16. Factor de emisión de CO₂ de este proyecto frente a los del reporte E

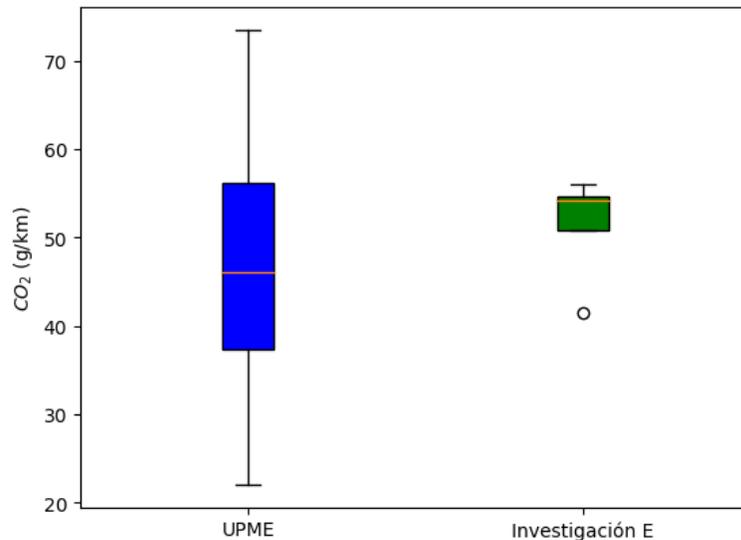


Figura 2.17. Diagrama de cajas y bigotes para el CO₂

Podemos ver que a diferencia de la zona rural de Taiwán, la media del factor de emisión de FECOC+ FASE 3, se encuentra por debajo de lo medido en la investigación “E”, incluso, la gran mayoría de las motos medidas en nuestro estudio, que tiene un promedio de 48 g CO₂/km, se encuentran por debajo de los valores registrados en dicha investigación.

Comparativo de los factores de emisión con la Resolución 0762 del 2022

En la Parte II de la Resolución 0762 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia se expone la forma para obtener el certificado de emisiones en prueba dinámica (CEPD) y el visto bueno del Protocolo de Montreal para la obtención de los factores de emisión de homologación de vehículos nuevos que van a ingresar al país.

En la Parte III de dicha Resolución, se presentan los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para fuentes móviles terrestres de carretera en prueba dinámica. En la Tabla 7 del Artículo 13, en el Capítulo I se especifican los factores de emisión de homologación en prueba dinámica de motocicletas que se vendan (ensambladas, fabricadas o importadas) en el país a partir del 1° de enero de 2023.

En la Tabla 2.20 se comparan los factores de emisión con los exigidos por la Resolución 0762 de 2022 en Colombia. Mientras que la Resolución exige prueba dinámica según ciclos de conducción de homologación europeos (ECE -R40 para menores a 150 cc, y ECE R40 EUDC para mayores o iguales a 150 cc), los reportados en este proyecto corresponden a los obtenidos según ciclo de conducción propio de motocicletas en Colombia, determinado en FECOC+ Fase 1 (CV 001-2020 de la UPME).

Tabla 2.20. Límites de emisión según la resolución 0762 del 2022 comparados con este proyecto

Categoría	Ciclo	CO (g/km)	HC (mg/km)	NO _x (mg/km)
Cilindraje < 150 cc	ECE R-40	2,0	800	150
	UPME Motocicletas	8.4	446.7	84.6
Cilindraje ≥ 150 cc	ECER-40 EUDC	2,0	300	150
	UPME Motocicletas	2.2	173.1	39.1

Las Figuras 2.18 a 2.20 se presentan los resultados de CO, HC y NOx de nuestras pruebas para observar qué tan cerca o distante están los factores de emisión medidos en este proyecto frente a los límites permitidos por la Resolución 0762 de 2022. Se intentó hacer un degradado de color para visualizar la dispersión de los datos con respecto a la línea que indica el límite exigido, Debido a que se midieron 40 motocicletas, y a cada una de ellas se les realizaron 4 ciclos de conducción, se presentan las 160 pruebas totales para todas motocicletas.

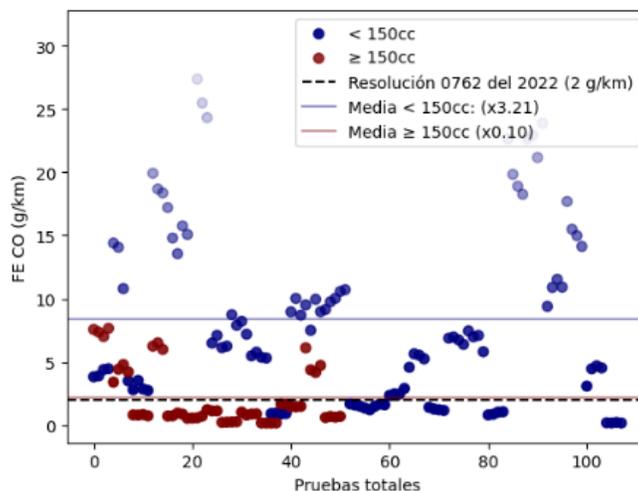


Figura 2.18. Comparación del factor de emisión de CO de este proyecto frente a la Resolución 0762

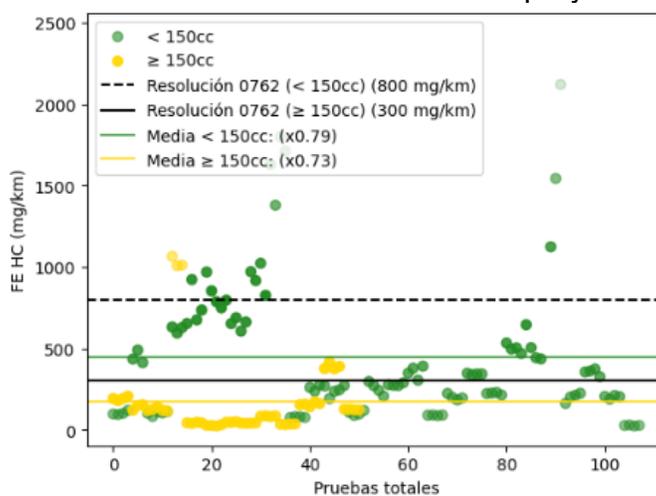


Figura 2.19. Comparación del factor de emisión de HC de este proyecto frente a la Resolución 0762

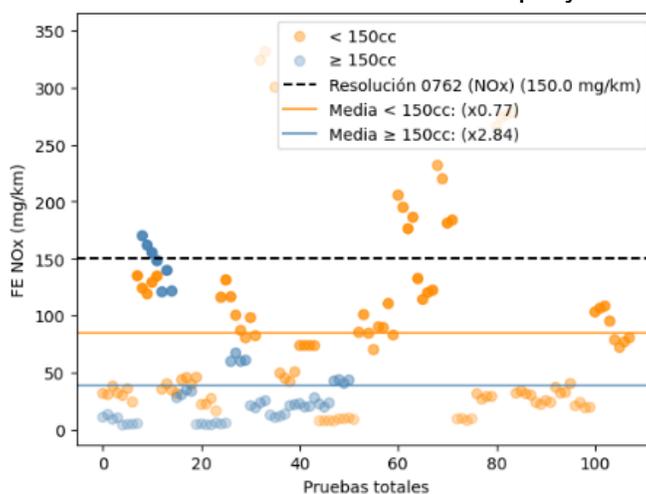


Figura 2.19. Comparación del factor de emisión de NOx de este proyecto frente a la Resolución 0762

A continuación, se presenta además un análisis comparativo del factor de emisión promedio de CO que estarían emitiendo las motocicletas en Colombia según los límites exigidos por la legislación colombiana en prueba estática en marcha mínima o ralentí (Resolución 0762 de 2022, Parte IV, Capítulo III, Artículo 31, Tabla 27)

Monóxido de carbono (CO) máximo permisible en prueba estática = 3.5%

1. Determinamos los gramos de CO / gramo de combustible según el límite de la Resolución:

$$3,5 \% CO = \frac{3 \text{ moles } CO}{100 \text{ moles}_{gases}} \cdot \frac{28 \text{ gCO}}{1 \text{ mol}_{CO}} \cdot \frac{1 \text{ mol}_{gases}}{29 \text{ g}_{gases}} = 0.0338 \frac{gCO}{g_{gases}}$$

$$\frac{g_{gases}}{g_{combustible}} = \frac{(\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{combustible})}{\dot{m}_{combustible}} = \frac{1 + F}{F}$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico (g/s)

F = dosado (relación combustible/aire): $F = \frac{\dot{m}_{combustible}}{\dot{m}_{aire}}$, en un motor de ciclo Otto, que usa gasolina comercial, el dosado de operación F , es igual al dosado estequiométrico F_{estq} . Esta condición es necesaria para el buen funcionamiento de conversión de CO, HC y NOx en el catalizador de 3 vías ($F_{estq} = 1/14.7$).

Por tanto, la masa de CO por cada gramo de combustible consumido es:

$$\frac{gCO}{g_{combustible}} = 0.0338 \frac{gCO}{g_{gases}} \cdot \left(\frac{1 + F}{F} \right) \frac{g_{gases}}{g_{combustible}}$$

$$\frac{gCO}{g_{combustible}} = 0.0338 \frac{gCO}{g_{gases}} \cdot \left(\frac{1 + \frac{1}{14.7}}{\frac{1}{14.7}} \right) \frac{g_{gases}}{g_{combustible}} = 0.531 \frac{gCO}{g_{combustible}}$$

Es decir, que según la Resolución 0762 de 2022, una motocicleta no puede emitir más de 531 g de CO por cada kilogramo de gasolina comercial en Colombia.

2. Determinamos el factor de emisión en función del rendimiento de consumo de combustible

Ahora bien, según los datos medidos en este proyecto, una motocicleta recorre en promedio 130 km/gal de gasolina comercial, es decir:

$$\frac{130 \text{ km}}{\text{gal}_{comb}} \cdot \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} \cdot \frac{1 \text{ l}_{comb}}{750 \text{ g}_{comb}} = 0.04579 \frac{\text{km}}{\text{g}_{comb}} = 21.84 \frac{\text{g}_{comb}}{\text{km}}$$

Es decir, según los resultados obtenidos en este proyecto, una motocicleta consume cerca de 22 gramos de gasolina comercial por cada kilogramo recorrido.

Así pues, el factor de emisión de CO promedio según el límite regulatorio (3.5%) y la autonomía (130 km/gal), sería:

$$CO \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) = 0.531 \frac{\text{gCO}}{\text{g}_{comb}} \cdot 21.84 \frac{\text{g}_{comb}}{\text{km}} = 11.6 \frac{\text{gCO}}{\text{km}}$$

Obsérvese de la Tabla 2.20, los valores promedio de los factores de emisión, para motocicletas menores a 150 cc (8.4 gCO/km), y para mayores o iguales a 150 cc (casi todas de inyección electrónica, 2.2 gCO/km).

Estos resultados se obtuvieron de comparar la emisión en prueba estática (ralentí), con los del rendimiento de consumo de combustible en prueba dinámica (130 km/gal), por lo que no es completamente una comparación justa, debido a que una motocicleta recorre 0 km/gal en condición de ralentí. Lo que sí es completamente correcto, es que según la Resolución 0792 de 2022, se permite que una motocicleta en Colombia emita máximo 531 gCO/kg_gasolina.

INVENTARIO DE EMISIONES NACIONAL PARA MOTOCICLETAS

Con la base de datos de factores de emisión obtenidos en este proyecto FECOC+ Fase 3, se propone conocer la cantidad de toneladas emitidas por dichas fuentes móviles en Colombia al año, con base en la cantidad de motocicletas matriculadas en el RUNT por departamentos a octubre de 2023. En la Tabla 2.21 se presenta la base de datos de la cantidad de motocicletas actualizada.

Tabla 2.21. Cantidad de motocicletas en Colombia a octubre de 2023

Departamento	Cantidad
Cundinamarca (incluye Bogotá)	1.803.749
Antioquia (Incluye Medellín)	1.797.697
Valle del Cauca (Incluye Cali)	1.387.052
Santander	719.987
Córdoba	529.470
Meta	452.419
Huila	398.994
Tolima	328.011
Bolívar	326.613
Nariño	326.314
Norte de Santander	310.404
Atlántico (Incluye Barranquilla)	303.430
Cauca	297.986
Magdalena	284.811
Risaralda	269.528
Caldas	262.029
Caquetá	200.685
Quindío	179.348
Putumayo	171.579
Cesar	169.182
Sucre	151.159
Boyacá	126.133
Casanare	103.610
Guaviare	82.415
Arauca	63.742
Chocó	41.250
San Andrés	20.752
La Guajira	19.749
Amazonas	18.325
Vichada	5.656
Guainía	3.907
Vaupés	2.624
TOTAL	11.158.610

Con la información reportada en el convenio CV 001-2020: “FECOC+ Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia” [6], partimos de una base de datos de Motocicletas actualizada a diciembre de 2020, luego, a partir del boletín mensual que realizan las organizaciones ANDI y FENALCO [7] se tiene el número de motocicletas matriculadas en total en el territorio colombiano. Estas organizaciones reportan en sus publicaciones mensuales los datos de matriculación de motocicletas para 10 departamentos del país. El porcentaje de error en la estimación es bajo debido a que los datos publicados por estas dos organizaciones concentran cerca del 98% del parque automotor del país.

En la Tabla 2.22 se muestran los factores de emisión promedio medidos en este proyecto para las categorías de motocicletas menores a 200 cc. Estos datos fueron usados para la estimación de escenarios de inventario de emisión de motocicletas en el país en función de su cantidad por departamento.

Tabla 2.22. Factores de emisión promedios medidos para motocicletas en FECOC+ Fase 3

Parámetro	Unidades	Valor
CO ₂	g/km	47
CO		7,6
HC	mg/km	378
NO		64
NO ₂		0,65
PM		0,68
PN	x 10e12 #/km	2

Con base en los factores de emisión promedio reportados en la Tabla 2.22, y la cantidad de fuentes móviles reportados en la Tabla 2.21, se calculan las toneladas emitidas al año en Colombia de CO₂, CO, HC, NO y NO₂ para cada departamento como sigue:

$$\frac{Ton}{año} = Z * FE \left(\frac{g}{km} \right) * \left(\frac{1 ton}{1000000g} \right) * X \left(\frac{km}{año} \right)$$

Las toneladas anuales de material particulado (PM) emitidas por motocicletas se obtienen así:

$$\frac{Ton}{año} = Z * FE \left(\frac{mg}{km} \right) * \left(\frac{1 g}{1000mg} \right) * \left(\frac{1 ton}{1000000g} \right) * X \left(\frac{km}{año} \right)$$

Finalmente, la emisión del número de partículas (PN) emitidas en el país se obtienen como:

$$\frac{\#}{\text{año}} = Z * FE \left(\frac{\#10^{12}}{\text{km}} \right) * X \left(\frac{\text{km}}{\text{año}} \right) * \left(\frac{1}{10^{18}} \right) \text{ "en trillones"}$$

Donde:

- Z = Número de motocicletas.
- X = 12000 km/año para motocicletas.
- FE = Factor de emisión de Tabla 2.22

La Tabla 2.23 muestra las toneladas emitidas de cada contaminante en un año en Colombia por las motocicletas, mientras que las Figuras 2.20 a 2.27 muestran los mapas de calor de cada emisión por departamento del país.

Tabla 2.23 Inventario de emisión en toneladas / año generadas por motocicletas menores a 200 cc
(Número de partículas al año para PN en trillones/km)

Toneladas emitidas al año en Colombia por las motocicletas (< 200 cc)									
Departamento	Cantidad de Motos	CO ₂	CO	HC	NO _x	NO	NO ₂	PM	PN
Cundinamarca (incluye Bogotá)	1.803.749	1.007.791	140.476	7.892	1.508	1.494	15	13	41.991
Antioquia (Incluye Medellín)	1.797.697	1.004.409	140.005	7.865	1.503	1.489	15	13	41.850
Valle del Cauca	1.387.052	774.974	108.024	6.069	1.160	1.149	11	10	32.291
Santander	719.987	402.271	56.073	3.150	602	596	6	5	16.761
Córdoba	529.470	295.825	41.235	2.317	443	438	4	4	12.326
Meta	452.419	252.776	35.234	1.979	378	375	4	3	10.532
Huila	398.994	222.926	31.074	1.746	334	330	3	3	9.289
Tolima	328.011	183.266	25.545	1.435	274	272	3	2	7.636
Bolívar	326.613	182.485	25.437	1.429	273	270	3	2	7.604
Nariño	326.314	182.318	25.413	1.428	273	270	3	2	7.597
Norte de Santander	310.404	173.429	24.174	1.358	260	257	3	2	7.226
Atlántico	303.430	169.532	23.631	1.328	254	251	3	2	7.064
Cauca	297.986	166.491	23.207	1.304	249	247	2	2	6.937
Magdalena	284.811	159.130	22.181	1.246	238	236	2	2	6.630
Risaralda	269.528	150.591	20.991	1.179	225	223	2	2	6.275
Caldas	262.029	146.401	20.407	1.146	219	217	2	2	6.100
Caquetá	200.685	112.127	15.629	878	168	166	2	1	4.672
Quindío	179.348	100.205	13.968	785	150	149	1	1	4.175
Putumayo	171.579	95.865	13.363	751	143	142	1	1	3.994
Cesar	169.182	94.525	13.176	740	141	140	1	1	3.939
Sucre	151.159	84.456	11.772	661	126	125	1	1	3.519
Boyacá	126.133	70.473	9.823	552	105	104	1	1	2.936
Casanare	103.610	57.889	8.069	453	87	86	1	1	2.412
Guaviare	82.415	46.047	6.418	361	69	68	1	1	1.919
Arauca	63.742	35.614	4.964	279	53	53	1	0	1.484
Chocó	41.250	23.047	3.213	180	34	34	0	0	960
San Andrés	20.752	11.595	1.616	91	17	17	0	0	483
La Guajira	19.749	11.034	1.538	86	17	16	0	0	460
Amazonas	18.325	10.239	1.427	80	15	15	0	0	427
Vichada	5.656	3.160	440	25	5	5	0	0	132
Guainía	3.907	2.183	304	17	3	3	0	0	91
Vaupés	2.624	1.466	204	11	2	2	0	0	61

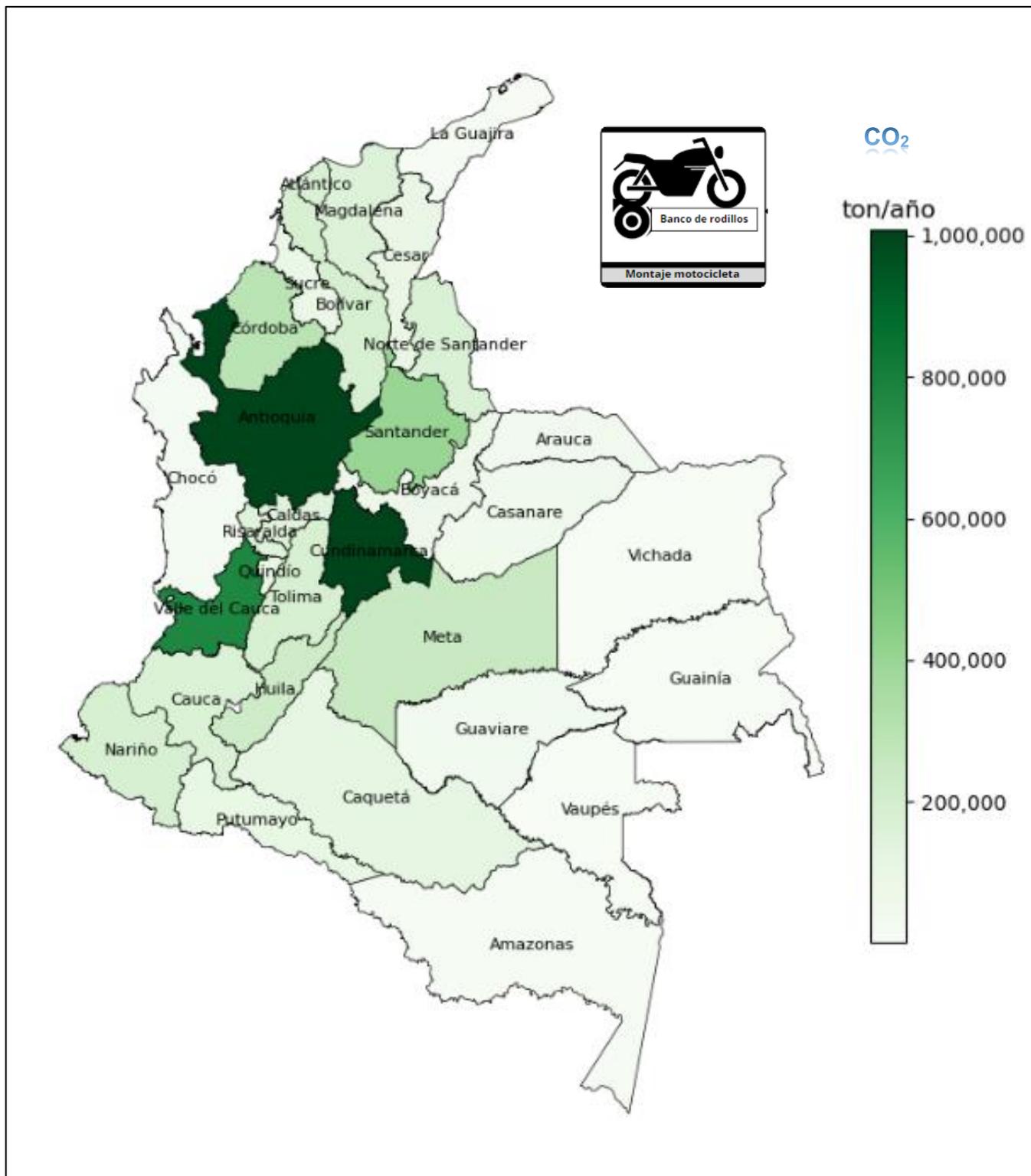


Figura 2.20 Inventario de emisión de CO₂ (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

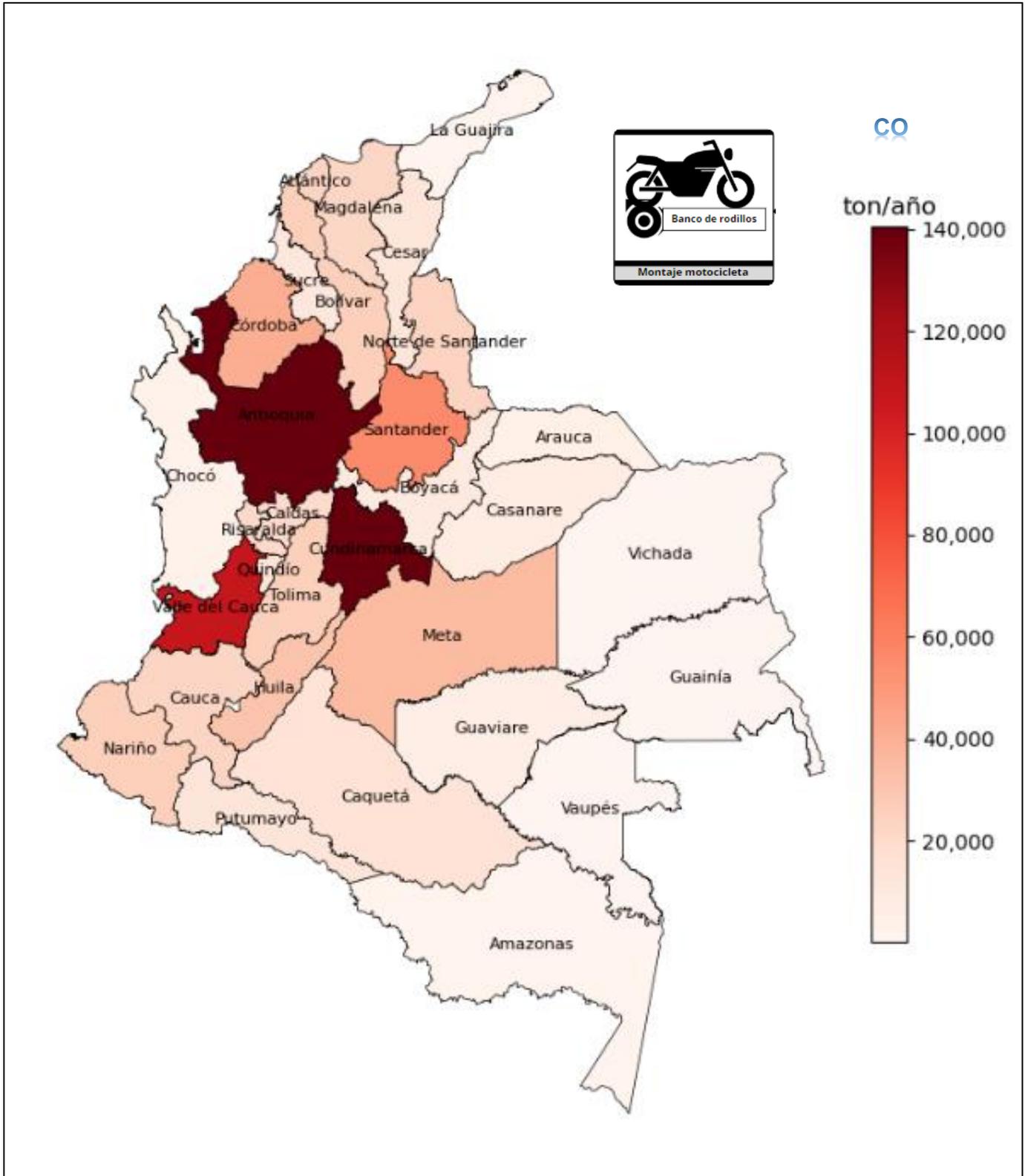


Figura .2.21 Inventario de emisión de CO (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

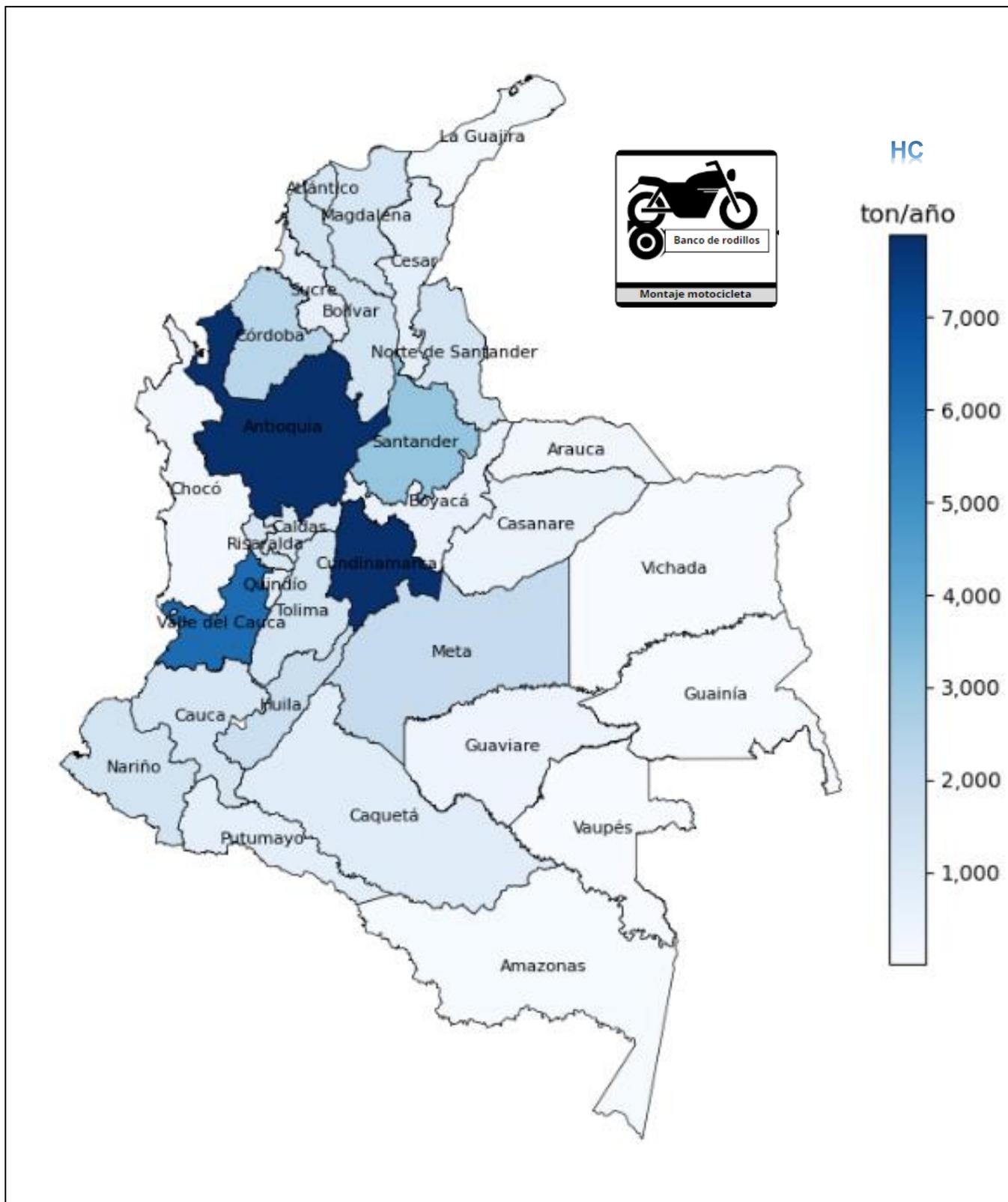


Figura 2.22 Inventario de emisión de HC (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

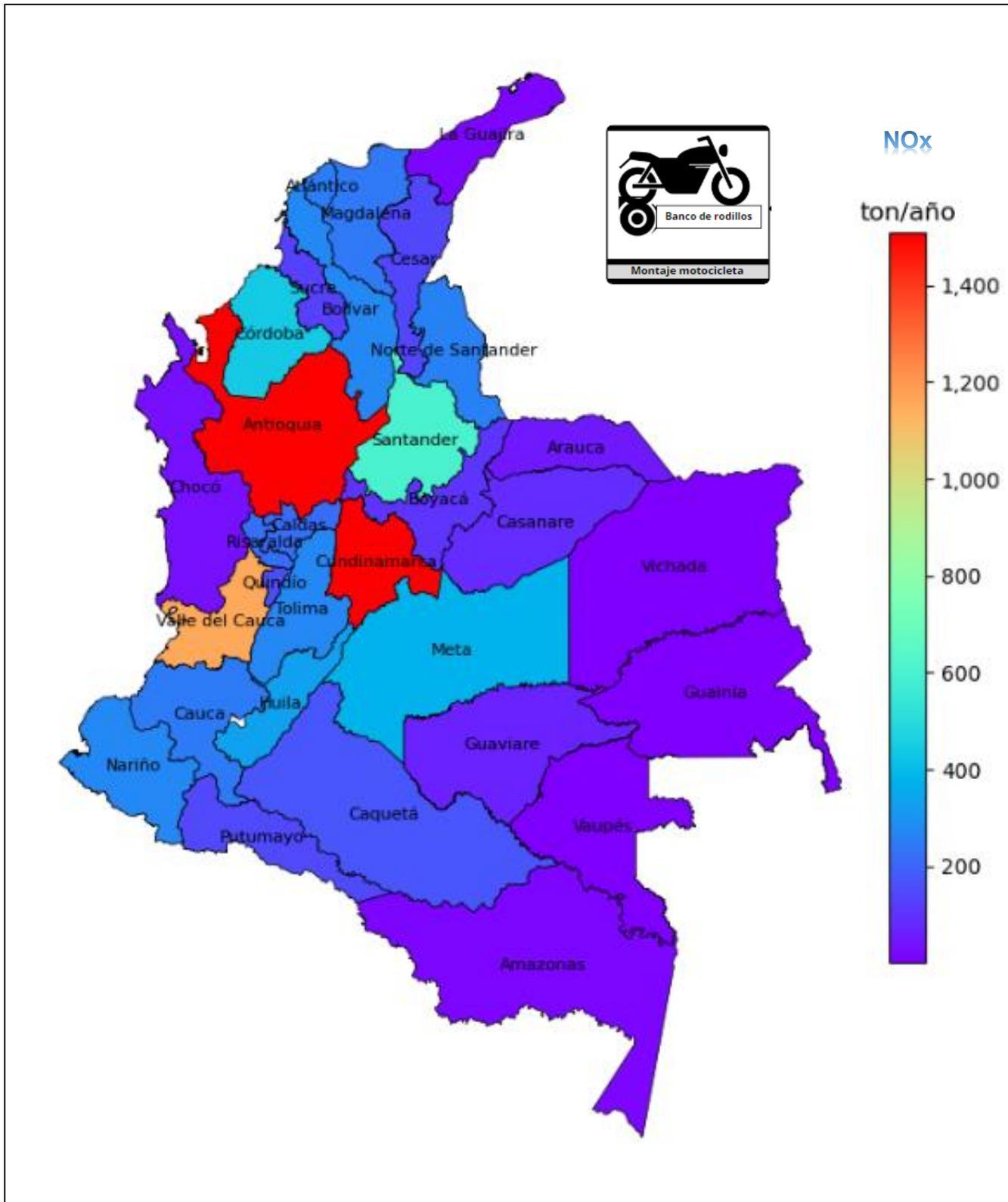


Figura 2.23 Inventario de emisión de NO_x (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

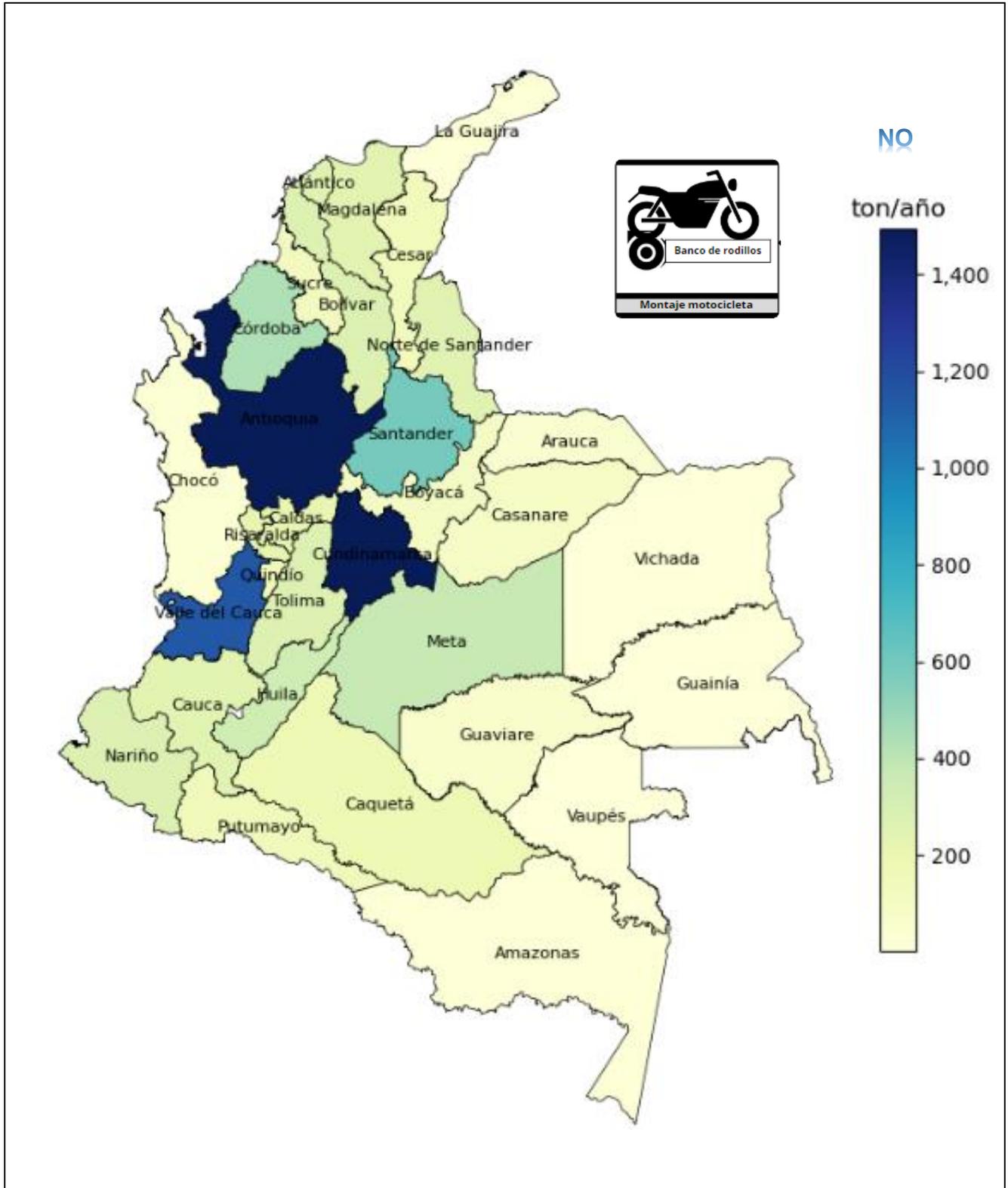


Figura 2.24 Inventario de emisión de NO (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

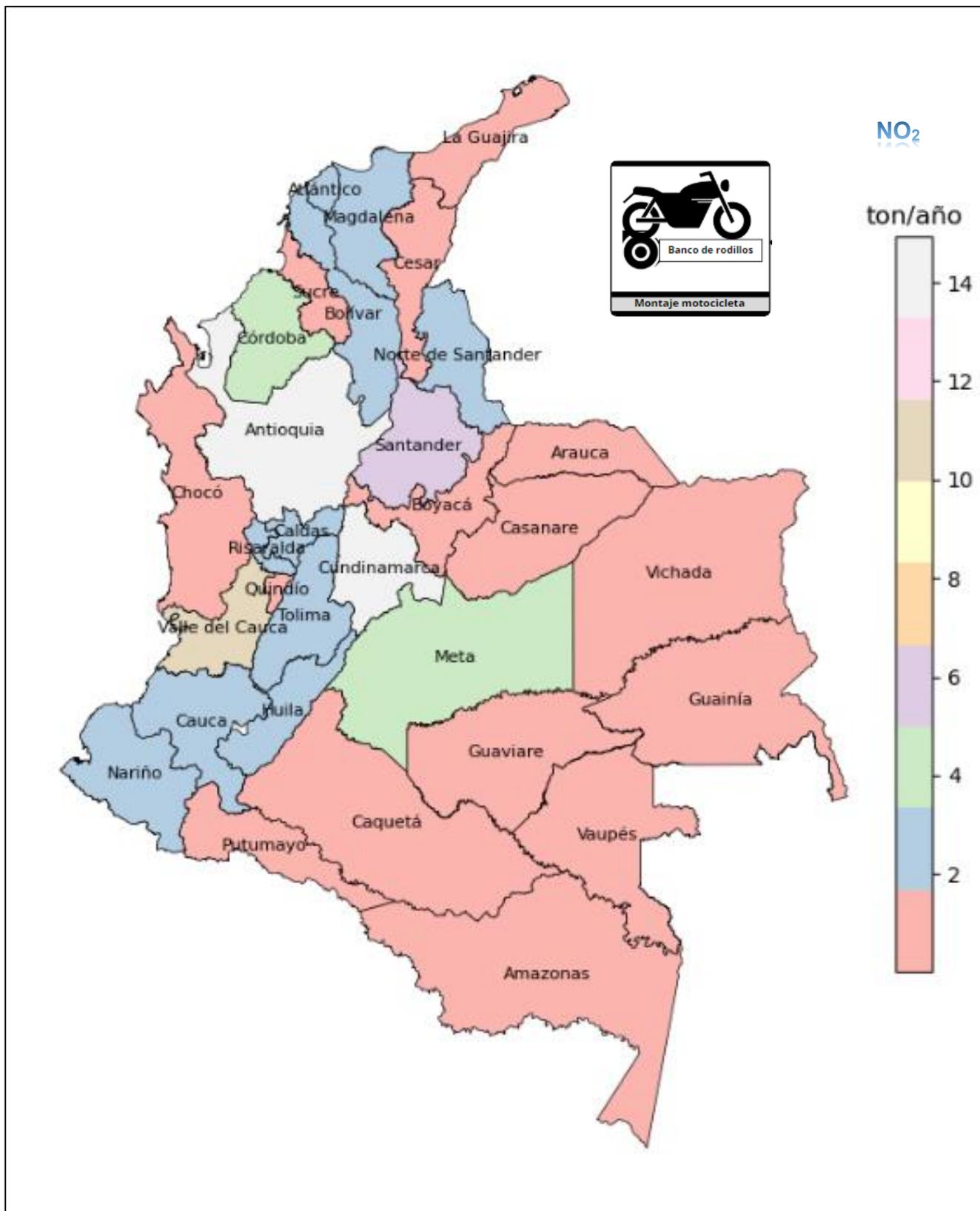


Figura 2.25. Inventario de emisión de NO₂ (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

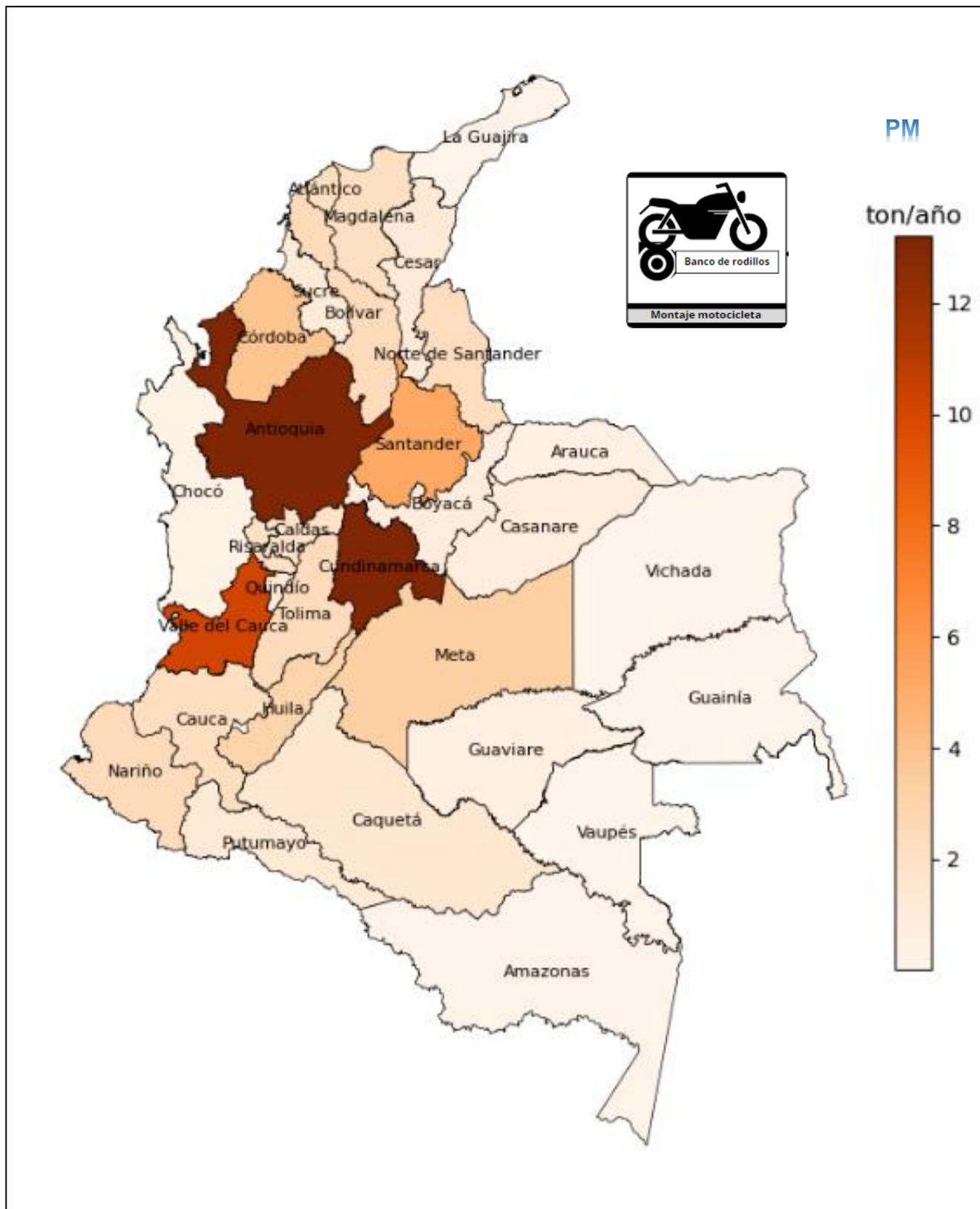


Figura 2.26. Inventario de emisión de PM (ton/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

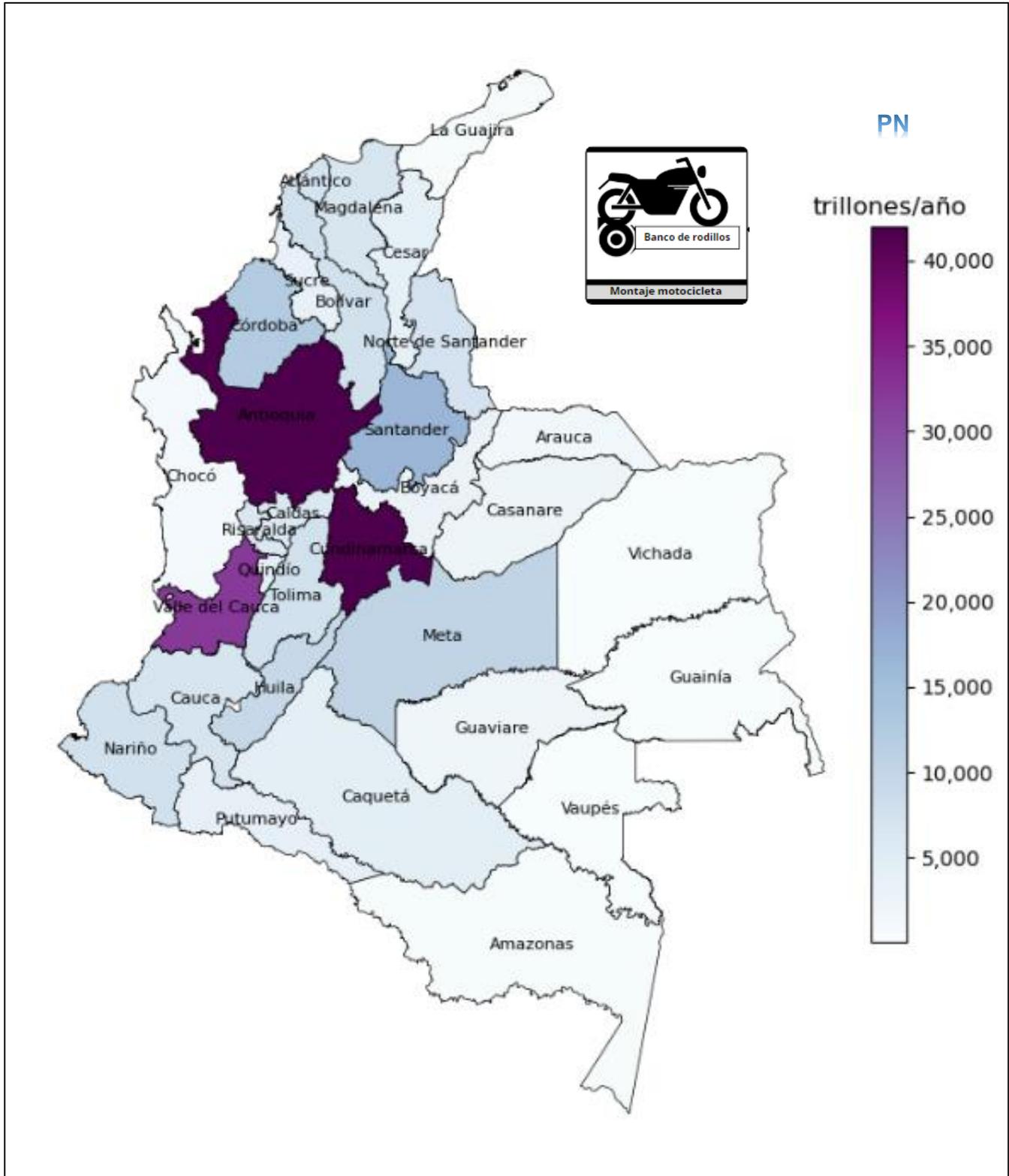


Figura 2.27. Inventario de emisión de PN (#/año) en Colombia por departamento: Motocicletas

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, y bajo las condiciones en las cuales se llevaron a cabo las mediciones en este convenio, se concluye que:

1. Colombia cuenta con la base de datos de factores de emisión medidos para las categorías de motocicletas menores a 200 cc de cilindrada.
2. A mejor tecnología de suministro de combustible (inyección electrónica frente a carburación), más bajos son los factores de emisión y mayor el rendimiento de combustible en kilómetros/galón.
3. Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el consumo de combustible y en los factores de emisión entre las diferentes marcas de motocicletas. En particular la marca 3 de motocicletas es la que ofreció mejor rendimiento de combustible (km/gal), y menores emisiones de CO; sin embargo, las emisiones de HC y óxidos de nitrógeno (NO + NO₂) fueron de las más elevadas para esta marca. Este resultado muestra una de las características importantes de este proyecto, que consistiría en ayudarle a las marcas, por ejemplo, en una selección más idónea de sus sistemas de catalizadores de 3 vías.
4. El gas NO₂, altamente tóxico y peligroso al ser humano, es emitido en cantidades del orden de 0,65 mg/km por las motocicletas, independientemente de su año de modelo, kilometraje, cilindrada y marca.
5. Los factores de emisión de motocicletas medidos en este proyecto son comparables con los reportados en la literatura técnica para motocicletas con cilindradas y estándares de emisión similares.
6. Las motocicletas del país con cilindrada mayor o igual a 150 cc están justo en el límite de emisión de CO exigido por la Resolución 0762 del 2022, mientras que las menores a 150 cc emiten alrededor de tres veces más del límite permisible. Por su parte, los hidrocarburos, para ambas cilindradas están ligeramente por debajo de los límites, mientras que los NO_x también presentan el mismo comportamiento, e incluso, para motocicletas con cilindrada mayor o igual a 150 cc los NO_x estuvieron alrededor de 3 veces por debajo del límite exigido.
7. Los Departamentos de Colombia más críticos en términos de mayores concentraciones de contaminantes en el ambiente por toneladas emitidas al año por motocicletas son en su orden: Antioquia (incluye Medellín) > Cundinamarca (incluye Bogotá) > Valle del cauca (incluye Cali) > Santander (incluye Bucaramanga), siendo Antioquia el departamento en el que más emisiones producen las motocicletas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Amin Hassani y Vahid Hosseini. “An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution”. *Transportation research part D: Transport and environment* 47 (2016), págs. 1-12.
- [2] Srinath Mahesh, Gitakrishnan Ramadurai y S.M. Shiva Nagendra. “Real-world emissions of gaseous pollutants from motorcycles on Indian urban arterials”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 76 (2019), págs. 72-84
- [3] Adolfo Senatore, Paolo Iodice, et al. “Road transport emission inventory in a regional area by using experimental two-wheelers emission factors”. *Lecture notes in engineering and computer science* (2013), págs. 681-685.
- [4] Jiun-Horng Tsai et al. “Air pollutant emission factors from new and in-use motorcycles”. *Atmospheric Environment* 34.28 (2000), págs. 4747-4754.
- [5] K.S. Chen et al. “Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions”. *Science of the total Environment* 312.1-3 (2003), págs. 113-122
- [6] FECOC+ Fase 1, 2020. John Ramiro Agudelo. Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+) Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_final_FECOC.pdf
- [7] FENALCO. 2023. Recuperado de <https://www.fenalco.com.co/blog/gremial-4/tag/informe-de-vehiculos-20>

CAPÍTULO 3

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

**Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+).
Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos
livianos y motocicletas**

FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS EN VEHÍCULOS LIVIANOS

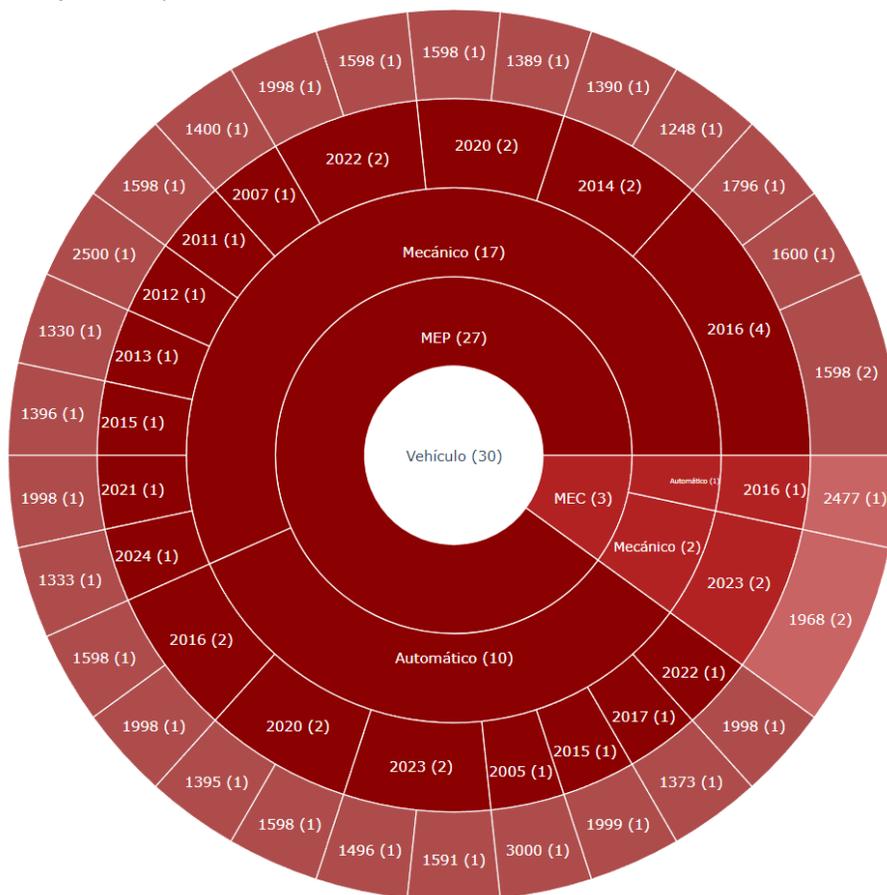
CONTENIDO

CONTENIDO.....	88
INTRODUCCIÓN	89
BASE DE DATOS DE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS EN VEHÍCULOS LIVIANOS.....	90
ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) MULTIFACTORIAL PARA VEHÍCULOS LIVIANOS	101
Análisis estadístico de varianza simple por subcategoría de vehículos livianos	112
CONCLUSIONES.....	137

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la base de datos de factores de emisión de vehículos livianos (**Tabla 3.1**) más representativos del país. Fueron medidos en banco de rodillos usando los ciclos de conducción sintetizados en FECOC+ Fase 1 (Cv 001-2020), sobre una muestra de 30 vehículos livianos en la ciudad de Medellín (1500 msnm). La base de datos incluye los resultados de las mediciones llevadas a cabo en la ciudad de Apartadó (Antioquia, nivel del mar), y Bogotá (2600 msnm). Los vehículos medidos se eligieron buscando la mayor representatividad del parque automotor del país, para tal fin se tuvieron en consideración los resultados del convenio CV-001-2020 entre la UPME y la Universidad de Antioquia, en la cual se hizo una caracterización del parque automotor colombiano con datos del RUNT a diciembre de 2020, y adicionalmente se realizó una actualización de dicha base de datos a octubre de 2023 haciendo un seguimiento detallado a las fuentes de información proporcionadas mensualmente por ANDI y FENALCO.

En la **Figura 3.1** se aprecian las características más relevantes de los vehículos livianos medidos tales como: tipo de transmisión (Mecánica y Manual), año de modelo, cilindrada, tipo de alimentación del combustible (inyección electrónica multipunto -MPI-, o inyección directa de gasolina -GDI-) y tipo de encendido o tecnología (para vehículos livianos: MEP -Motor de Encendido Provocado y MEC -Motor de Encendido por Compresión).



BASE DE DATOS DE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS EN VEHÍCULOS LIVIANOS

En la **Tabla 3.1** se muestra la base de datos de factores de emisión de vehículos livianos medidos en este convenio, incluye las mediciones en Medellín (1500 m.s.n.m.), Apartadó (0 m.s.n.m.) y Bogotá (2600 m.s.n.m.).

Tabla 3.1. Base de datos de factores de emisión de vehículos livianos

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m.]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
1	MEP	2016	1598	60.912	Multipunto	Mecánico	1500	P4	28,24	315,6	0,40	0,086501702	0,085470894	0,001030808	0,055050126	0,517434308	3,742251159
								P5	25,37	349,5	0,56	0,094647157	0,093533735	0,001113422	0,09779392	0,887677332	5,719559964
								P6	28,67	309,8	0,30	0,139454292	0,139454292	--	0,052591506	0,741977411	4,117670819
								Promedio	27,4	325,0	0,42	0,1072	0,1062	0,0011	0,0685	0,716	4,526
								Desv. Estándar	1,8	21,4	0,13	0,005759706	0,029120194	5,84168E-05	0,025417629	0,186515401	1,050137996
								Coef. Variación	6,5%	6,6%	31,0%	5,4%	27,4%	5,4%	37,1%	26,1%	23,2%
								(u_A)	1,0	12,4	0,07	0,016457663	0,016808082	4,13034E-05	0,014676779	0,021598667	0,596141116
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	12,4	0,07	0,016457717	0,016808136	4,13041E-05	0,014676788	0,021603002	0,596152124
								Incert. total (U)	1,8	24,7	0,15	0,032915434	0,033616271	8,26081E-05	0,029353575	0,043206005	1,192304248
2	MEP	2012	2500	n.a	Multipunto	Mecánico	1500	P1	21,90	404,5	8,47	0,147275854	0,147275854	--	0,083981173	1,323818175	5,961524309
								P2	21,48	411,3	10,69	0,198386745	0,196713934	0,001672811	0,109853898	1,567067974	6,488854909
								P3	21,61	408,8	10,26	0,166066932	0,164343864	0,001723068	0,110276496	1,426451575	6,071653739
								P4	22,18	397,5	9,10	0,141274576	0,139656158	0,001618418	0,084984662	1,576520873	6,254033973
								Promedio	21,8	405,5	9,63	0,1637	0,1620	0,0017	0,0973	1,473	6,194
								Desv. Estándar	0,3	6,0	1,02	0,028638643	0,025341656	5,23388E-05	0,014776624	0,121087385	0,230620214
								Coef. Variación	1,4%	1,5%	10,6%	17,5%	15,6%	3,1%	15,2%	8,2%	3,7%
								(u_A)	0,2	3,0	0,51	0,012843924	0,012667617	2,98702E-05	0,00737914	0,015619954	0,113745078
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	3,0	0,51	0,012843978	0,012667672	2,98717E-05	0,007379156	0,015642887	0,11383945
Incert. total (U)	0,3	6,0	1,02	0,025687955	0,025335343	5,97434E-05	0,014758312	0,031285774	0,2276789								
3	MEP	2016	1598	45.706	Multipunto	Automático	1500	P1	24,6	372,8	0,30	0,028645511	0,028645511	--	0,026837023	--	2,8211941
								P2	24,4	374,6	0,28	0,03423515	0,033157191	0,001077959	0,026858028	0,543877549	3,02830641
								P3	24,6	371,7	0,39	0,04218456	0,04095377	0,00123079	0,038045282	0,803462248	3,358540119
								P4	24,2	375,9	0,41	0,036139751	0,034713474	0,001426277	0,027904504	1,035042477	3,701327501
								Promedio	24,4	373,8	0,35	0,0356	0,0344	0,0012	0,0299	0,794	3,227
								Desv. Estándar	0,2	1,8	0,24	0,004150509	0,005089357	0,000174594	0,005445565	0,245715487	0,385766114
								Coef. Variación	0,9%	0,5%	69,9%	11,7%	14,8%	14,0%	18,2%	30,9%	12,0%
								(u_A)	0,11	0,92518	0,031	0,002791123	0,002544198	0,000100788	0,002722894	0,052704908	0,189650603
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	0,92736	0,031	0,002791176	0,002544255	0,000100788	0,002722902	0,0527065	0,18966394
Incert. total (U)	0,2	1,85472	0,062	0,005582351	0,00508851	0,000201577	0,005445803	0,105413	0,37932788								

MEP: Motor de encendido por chispa o provocado; MEC: Motor a ciclo diésel; Cilindrada en cm^3

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
4	MEP	2021	1998	44.135	Multipunto	Mecánico	1500	P1	22,6	401,4	1,10	0,037856289	0,036621493	0,001234795	0,01988134	0,759123702	3,584010217
								P2	23,5	382,5	1,83	0,028650027	0,027281875	0,001368152	0,0291459	0,695719646	3,613805558
								P3	23,7	376,2	2,09	0,034493126	0,032993926	0,0014992	0,026610082	0,967970316	3,512589995
								P4	23,7	376,5	3,24	0,021262652	0,019581794	0,001680858	0,043225294	1,161761299	4,074044744
								Promedio	23,4	384,1	2,06	0,0306	0,0291	0,0014	0,0297	0,896	3,696
								Desv. Estándar	0,5	11,8	0,89	0,007275389	0,007430473	0,000190312	0,009818236	0,211861632	0,255509064
								Coef. Variación	2,2%	3,1%	43,0%	23,8%	25,5%	13,2%	33,0%	23,6%	6,9%
								(u_A)	0,3	5,9	0,444	0,003636978	0,003714511	9,5146E-05	0,004909338	0,049754427	0,125615675
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	5,9	0,44	0,003636983	0,003714516	9,51463E-05	0,004909341	0,04975611	0,125642925
Incert. total (U)	0,5	11,8	0,89	0,007273966	0,007429033	0,000190293	0,009818683	0,09951222	0,25128585								
5	MEP	2014	1390	137.074	Multipunto	Mecánico	1500	P1	34,6	267,4	1,84	0,202208341	0,201506711	0,00070163	0,196790321	--	--
								P2	34,9	263,3	2,75	0,129622617	0,128752084	0,000870533	0,229869033	0,796380244	3,022340978
								P3	36,0	255,4	2,58	0,106964935	0,105900055	0,001064879	0,168278163	0,799276337	3,070044933
								P4	37,1	248,0	3,02	0,127951578	0,12677593	0,001175647	0,206042934	0,853373567	--
								Promedio	35,7	258,5	2,55	0,1417	0,1407	0,0010	0,2002	0,816343383	3,046192956
								Desv. Estándar	1,1	8,6	0,50	0,04164399	0,041813555	0,000209822	0,025462475	0,032101756	0,03373179
								Coef. Variación	3,1%	3,3%	19,8%	29,4%	29,7%	22,0%	12,7%	3,9%	1,1%
								(u_A)	0,56	4,3	0,252	0,02081559	0,020900368	0,000104899	0,012728463	0,054854392	0,02365385
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	4,3	0,25	0,020815626	0,020900404	0,000104899	0,012728504	0,054855083	0,023809528
Incert. total (U)	1,1	8,6	0,50	0,041631251	0,041800808	0,000209798	0,025457007	0,109710167	0,047619056								
6	MEP	2016	1598	80.331	Multipunto	Mecánico	1500	P2	42,3	215,8	2,40	0,078883945	0,078241997	0,000641949	0,019316634	0,440898389	2,056452532
								P3	42,2	216,0	2,77	0,094574569	0,093930191	0,000644378	0,02614816	0,65481579	2,270927672
								P4	42,1	214,9	2,71	0,097978282	0,097143682	0,0008346	0,031588383	--	--
								Promedio	42,2	215,6	2,62	0,0905	0,0898	0,0007	0,0257	0,548	2,164
								Desv. Estándar	0,1	0,6	0,20	0,010184748	0,010113684	0,000110533	0,006149005	0,151262445	0,151656826
								Coef. Variación	0,2%	0,3%	7,6%	11,3%	11,3%	15,6%	23,9%	27,6%	7,0%
								(u_A)	0,0	0,3	0,12	0,005879887	0,005838849	6,38189E-05	0,003550342	0,03337262	0,105410832
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	0,3	0,12	0,005879938	0,0058389	6,3819E-05	0,003550346	0,033373348	0,105429975
								Incert. total (U)	0,1	0,7	0,23	0,011759875	0,0116778	0,000127638	0,007100692	0,066746696	0,210859951
7	MEP	2016	1600	3.428	Multipunto	Mecánico	1500	P1	35,1	265,0	1,61	0,047954229	0,04755003	0,000404199	0,067035467	--	1,817752652
								P2	35,7	258,7	1,09	0,029207491	0,028706971	0,00050052	0,055490787	0,566114146	2,0512946
								P3	36,7	252,3	1,24	0,038268991	0,037690911	0,000578079	0,052843249	0,527836543	2,031424864
								P4	35,9	258,0	1,29	0,040872314	0,040214902	0,000657411	0,057063853	0,535918542	2,128216338
								Promedio	35,8	258,5	1,31	0,0391	0,0385	0,0005	0,0581	0,543	2,007
								Desv. Estándar	0,7	5,2	0,22	0,007747869	0,007775932	0,000108225	0,006201003	0,020175349	0,132999281
								Coef. Variación	1,8%	2,0%	16,8%	19,8%	20,2%	20,2%	10,7%	3,7%	6,6%
								(u_A)	0,33	2,61	0,11	0,003872941	0,003886996	5,40951E-05	0,00310064	0,028287781	0,065358852
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	2,6	0,11	0,003872951	0,003887006	5,40951E-05	0,003100653	0,028288408	0,065371805
Incert. total (U)	0,7	5,2	0,22	0,007745902	0,007774012	0,00010819	0,006201305	0,056576816	0,13074361								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
8	MEP	2011	1598	86.910	Multipunto	Mecánico	1500	P1	39,7	234,5	--	0,029602087	0,029284738	0,000317349	--	--	1,38329788
								P2	39,8	234,2	0,21	0,024197096	0,023914688	0,000282408	--	0,253964591	1,167640033
								P3	41,5	224,7	0,20	0,036765002	0,036526475	0,000238527	0,062620397	0,253812346	1,029708518
								P4	41,3	225,2	--	0,031898703	0,031712305	0,000186398	0,05613092	0,278517452	1,10462298
								Promedio	40,6	229,7	0,20	0,0306	0,0304	0,0003	0,0594	0,262	1,171
								Desv. Estándar	0,9	5,5	0,01	0,005218106	0,005245708	5,66E-05	0,004588753	0,014219754	0,152151754
								Coef. Variación	2,3%	2,4%	2,8%	17,0%	17,3%	22,1%	7,7%	5,4%	13,0%
								(u_A)	0,5	2,7	0,004	0,002607835	0,002621627	2,83008E-05	0,003246089	0,014799252	0,074806917
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	2,7	0,004	0,002607869	0,002621661	2,83008E-05	0,003246118	0,014799684	0,074813588								
Incert. total (U)	0,9	5,5	0,008	0,005215739	0,005243322	5,66017E-05	0,006492236	0,029599368	0,149627175								
9	MEP	2024	1333	1.143	Directa	Mecánico	1500	P1	23,5	392,7	0,59	0	--	--	--	--	--
								P2	25,9	355,9	--	0,012123574	0,010551738	0,001571836	--	0,981929505	3,814700517
								P3	25,8	355,5	--	0,001530375	--	0,001530375	0,194170114	1,013135397	4,11193464
								P4	24,5	375,8	0,80	0,013184201	0,011567671	0,00161653	0,218351439	1,00126271	4,176211525
								Promedio	24,9	370,0	0,69	0,0126	0,0111	0,0016	0,2063	0,999	4,034
								Desv. Estándar	1,2	17,9	0,15	0,006444021	0,000718373	4,30878E-05	0,017098779	0,015750879	0,192859988
								Coef. Variación	4,6%	4,8%	21,5%	51,0%	6,5%	2,7%	8,3%	1,6%	4,8%
								(u_A)	0,58	8,94	0,11	0,003719658	0,000507914	2,48715E-05	0,012089583	0,013005996	0,109530493
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	8,9	0,11	0,003719658	0,000507921	2,4873E-05	0,01208966	0,013015954	0,109581334								
Incert. total (U)	1,2	17,9	0,21	0,007439317	0,001015842	4,97459E-05	0,024179319	0,026031908	0,219162669								
10	MEP	2022	1598	12.363	Multipunto	Mecánico	1500	P1	33,6	269,6	--	0,059746647	0,058854193	0,000892454	--	--	1,86166271
								P2	33,1	269,6	4,85	0,05361329	0,052791951	0,000821339	0,154524658	0,478775794	1,785591872
								P3	33,4	266,8	6,13	0,045178423	0,044180856	0,000997567	--	0,588451348	2,089665719
								P4	33,4	269,3	5,45	0,081471161	0,080778087	0,000693075	0,166391673	0,496625334	1,931479117
								Promedio	33,4	268,8	5,48	0,0600	0,0592	0,0009	0,1605	0,521	1,917
								Desv. Estándar	0,2	1,4	0,64	0,015508537	0,015624358	0,000127828	0,008391247	0,058849172	0,129554837
								Coef. Variación	0,6%	0,5%	11,7%	25,8%	26,4%	15,0%	5,2%	11,3%	6,8%
								(u_A)	0,1	0,68	0,37	0,007752713	0,007810614	6,39052E-05	0,005932448	0,033417745	0,063691352
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	0,7	0,37	0,007752762	0,007810663	6,39053E-05	0,005932549	0,033418302	0,063705517								
Incert. total (U)	0,2	1,4	0,74	0,015505523	0,015621326	0,000127811	0,011865098	0,066836604	0,127411035								
11	MEP	2022	1998	29.970	Multipunto	Mecánico	1500	P1	28,5	317,1	1,94	--	--	--	0,160552221	0,711297511	2,903247657
								P2	28,8	312,3	2,00	0,028041815	0,027158922	0,000882893	0,160105018	0,649610686	2,606085815
								P3	29,6	301,8	1,93	0,016350821	0,015592997	0,000757824	--	0,655150333	2,871442523
								P4	29,3	306,9	1,86	0,016966068	0,016403177	0,00056289	0,154348849	0,597770726	2,593652755
								Promedio	29,1	309,6	1,93	0,0205	0,0197	0,0007	0,1583	0,653	2,744
								Desv. Estándar	0,5	6,6	0,0584	0,006579388	0,006456432	0,000161267	0,003459655	0,046418916	0,166558711
								Coef. Variación	1,8%	2,1%	3,0%	32,2%	32,7%	22,0%	2,2%	7,1%	6,1%
								(u_A)	0,26	3,3	0,03	0,003797874	0,003726893	9,3097E-05	0,001996808	0,048682952	0,081871152
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	3,3	0,03	0,003797886	0,003726905	9,30971E-05	0,001997001	0,048684016	0,081894707								
Incert. total (U)	0,5	6,6	0,06	0,007595773	0,007453811	0,000186194	0,003994002	0,097368033	0,163789413								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
12	MEP	2015	1396	115.919	Multipunto	Mecánico	1500	P1	40,9	213,1	5,81	0,416545005	0,415570334	0,000974671	0,219905187	0,704633667	2,603437399
								P2	41,1	210,4	5,95	0,400531385	0,399477203	0,001054182	0,246351573	--	--
								P3	40,7	210,5	5,90	0,406786531	0,405724118	0,001062413	0,253928841	--	--
								P4	40,7	211,2	5,23	0,428891137	0,428891137	--	0,251788011	0,765543818	2,890380114
								Promedio	40,9	211,3	5,72	0,4134	0,4124	0,0010	0,2430	0,735	2,747
								Desv. Estándar	0,2	1,2	0,33	0,008070426	0,012826713	4,84568E-05	0,015719117	0,043069981	0,20289914
								Coef. Variación	0,52%	0,58%	5,84%	1,95%	3,11%	4,70%	6,47%	5,86%	7,39%
								(u_A)	0,1	0,6	0,17	0,006186624	0,006415167	2,7985E-05	0,007862198	0,014634099	0,141154478
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	0,6	0,17	0,006187126	0,006415652	2,79855E-05	0,007862286	0,014635413	0,141178442
Incert. total (U)	0,2	1,2	0,33	0,012374253	0,012831304	5,5971E-05	0,015724572	0,029270827	0,282356885								
13	MEP	2014	1248	67.925	Multipunto	Mecánico	1500	P1	42,9	214,0	0,87	0,121996217	0,121996217	--	--	0,455513139	--
								P2	43,5	210,8	0,81	0,125820142	0,125011541	0,000808601	0,103869905	0,483689944	2,28721191
								P3	43,3	213,4	0,97	0,138510984	0,137651535	0,000859449	0,116017899	0,500428937	2,412158511
								P4	43,4	211,7	0,96	0,139963263	0,139118291	0,000844972	0,122740951	0,559022061	2,665419432
								Promedio	43,3	212,5	0,90	0,1318	0,1309	0,0008	0,1142	0,500	2,455
								Desv. Estándar	0,2	1,5	0,08	0,007780258	0,008699941	2,6198E-05	0,009564601	0,043697573	0,192697378
								Coef. Variación	0,57%	0,68%	8,59%	5,90%	6,64%	3,13%	8,37%	8,75%	7,85%
								(u_A)	0,12	0,7	0,04	0,004502522	0,004349332	1,51242E-05	0,005522545	0,007908877	0,109394427
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	0,7	0,04	0,004502606	0,004349419	1,5125E-05	0,005522584	0,007914956	0,109419547
Incert. total (U)	0,2	1,5	0,08	0,009005212	0,008698837	3,025E-05	0,011045167	0,015829912	0,218839093								
14	MEP	2015	199	94.133	Multipunto	Automático	1500	P1	29,4	309,9	6,09	0,493420797	0,493420797	--	0,106273853	0,447693938	1,950416484
								P2	29,3	310,2	6,31	0,428166528	0,428166528	--	0,132301544	0,398282776	1,708466932
								P3	29,3	311,1	6,33	0,41495461	0,41495461	--	0,117997598	0,393049434	1,654850155
								P4	29,6	306,5	6,18	0,38992816	0,38992816	--	0,132011724	0,422451417	1,791503335
								Promedio	29,4	309,4	6,23	0,4316	0,4316	--	0,1221	0,415	1,776
								Desv. Estándar	0,1	2,0	0,11	0,044148272	0,044148272	--	0,012511353	0,025067671	0,128969093
								Coef. Variación	0,45%	0,65%	1,82%	10,23%	10,23%	--	10,24%	6,04%	7,26%
								(u_A)	0,1	1,0	0,06	0,02206444	0,02206444	--	0,006256782	0,012533835	0,06339346
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	--	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,0	0,06	0,022064613	0,022064613	--	0,006256811	0,0150522746	0,063406463
Incert. total (U)	0,1	2,0	0,11	0,044129226	0,044129226	--	0,012513623	0,0301045492	0,126812927								
15	MEC	2023	1968	2.309	Directa	Mecánico	1500	P1	20,4	494,2	--	--	--	--	--	7,947938527	
								P2	24,3	411,3	0,32	0,528537039	0,3820772	0,146459839	0,062785586	--	6,07823835
								P3	23,1	438,0	0,25	0,581519244	0,388215424	0,19330382	0,060924747	0,816561986	6,147614521
								P4	25,0	390,1	0,28	0,520515827	0,325661825	0,194854001	0,06170361	--	6,257756533
								Promedio	23,2	433,4	0,28	0,5435	0,3653	0,1782	0,0618	0,817	6,608
								Desv. Estándar	2,0	45,0	0,04	0,03314833	0,034480248	0,027503808	0,000934525	--	0,896420267
								Coef. Variación	8,78%	10,39%	0,13	6,10%	9,44%	15,43%	1,51%	0,00%	13,57%
								(u_A)	1,02	22,5	0,02	0,019134552	0,019904111	0,015878257	0,000539673	8,303170678	0,440695131
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	22,5	0,02	0,019134798	0,019904308	0,015878289	0,000539779	8,303172966	0,440718389
Incert. total (U)	2,0	45,0	0,04	0,038269596	0,039808616	0,031756578	0,001079558	16,60634593	0,881436778								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
16	MEC	2023	1968	7.841	Directa	Mecánico	1500	P1	32,1	349,1	--	0,003992351	0,001420259	0,002572092	0,04792948	--	4,031855727
								P2	31,2	355,2	0,54	0,004578624	0,002468011	0,002110613	0,042085258	0,685593279	3,554100049
								P3	31,2	336,4	--	0,001923653	--	0,001923653	0,030704695	1,031993787	3,608417537
								Promedio	31,5	346,9	0,54	0,0041	0,0019	0,0022	0,0402	0,859	3,731
								Desv. Estándar	0,5	9,6	0,00	0,001877348	0,000740872	0,000333763	0,008759427	0,244942148	0,261566046
								Coef. Variación	1,66%	2,76%	0,00%	45,28%	38,11%	15,16%	21,77%	28,52%	7,01%
								(u_A)	0,3	5,5	0,00	0,000805428	0,000524262	0,000192877	0,005050901	0,100860558	0,148770523
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	5,5	0,00	0,000805429	0,000524264	0,000192877	0,005050914	0,100861145	0,148797656
Incert. total (U)	0,5	11,1	0,00	0,001610858	0,001048528	0,000385755	0,010101827	0,201722289	0,297595313								
17	MEP	2023	1496	9.646	Directa	Automático	1500	P1	55,1	163,9	0,54	0,000178766	--	0,000178766	--	0,350372161	1,457878961
								P2	55,9	--	0,44	0,00812808	0,007850316	0,000277763	--	--	
								P3	57,7	154,7	0,47	0,008648966	0,008564635	8,43306E-05	0,063148472	--	--
								P4	54,2	165,2	--	2,12721E-05	--	2,12721E-05	0,05524683	--	--
								Promedio	55,7	161,2	0,49	0,0083	0,0082	0,0001	0,0592	0,350	1,458
								Desv. Estándar	1,5	5,7	0,05	0,004790524	0,000505099	0,000112065	0,005587305	0	0
								Coef. Variación	2,71%	3,54%	10,46%	57,39%	6,15%	79,74%	9,44%	0,00%	0,00%
								(u_A)	0,75	3,3	0,03	0,002394834	0,000357154	5,60287E-05	0,003951067	0,029298913	0
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	3,3	0,03	0,002394834	0,000357176	5,60287E-05	0,003951089	0,029299104	0,002222184								
Incert. total (U)	1,5	6,6	0,06	0,004789669	0,000714353	0,000112057	0,007902178	0,058598209	0,004444369								
18	MEP	2022	1998	11.550	Directa	Automático	1500	P1	34,2	269,5	1,20	0,021518741	0,021518741	--	--	--	--
								P2	35,4	259,1	0,63	0,019805454	0,019327332	0,000478122	0,123212656	--	0,858903319
								P3	35,7	256,9	1,19	0,014858564	0,014277018	0,000581546	0,134188001	0,325482235	0,848920908
								P4	35,0	262,2	0,99	0,015237839	0,014668324	0,000569515	0,14643671	0,347896547	1,047807269
								Promedio	35,1	261,9	1,01	0,0180	0,0174	0,0005	0,1346	0,337	0,919
								Desv. Estándar	0,7	5,5	0,27	0,00275314	0,003553616	5,65596E-05	0,011617844	0,015849312	0,112056634
								Coef. Variación	1,86%	2,10%	26,51%	15,30%	20,37%	10,41%	8,63%	4,71%	12,20%
								(u_A)	0,3	2,7	0,13	0,001659658	0,001776732	3,26413E-05	0,006703346	0,017069036	0,063583625
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	2,7	0,13	0,001659665	0,001776739	3,26415E-05	0,006703393	0,01706966	0,063589136								
Incert. total (U)	0,7	5,5	0,27	0,00331933	0,003553477	6,5283E-05	0,013406786	0,03413932	0,127178273								
19	MEP	2016	1998	88.516	Directa	Automático	1500	P1	29,7	310,8	--	--	--	--	--	--	
								P2	30,5	299,8	1,55	0,015901749	0,015219078	0,00068267	--	0,454385703	1,599894058
								P3	30,5	300,9	1,42	0,016318555	0,015424217	0,000894338	0,123338796	0,445009898	1,650713933
								P4	31,4	292,0	1,09	0,015690018	0,014646522	0,001043496	0,135849839	0,41445645	1,656378833
								Promedio	30,5	300,9	1,35	0,0160	0,0151	0,0009	0,1296	0,438	1,636
								Desv. Estándar	0,7	7,7	0,24	0,000319796	0,000403054	0,000181313	0,008846643	0,020879672	0,031105414
								Coef. Variación	2,21%	2,56%	17,75%	2,00%	2,67%	20,76%	6,83%	4,77%	1,90%
								(u_A)	0,34	3,9	0,14	0,000185312	0,000233519	0,000104645	0,006249472	0,054721719	0,017628782
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	3,9	0,14	0,000185359	0,000233557	0,000104645	0,006249534	0,054722172	0,017681742								
Incert. total (U)	0,7	7,7	0,28	0,000370718	0,000467113	0,00020929	0,012499068	0,109444343	0,035363483								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m.]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
20	MEP	2007	1400	125.264	Multipunto	Mecánico	1500	P1	22,8	400,6	--	0,071794313	0,071350165	0,000444148	--	--	--
								P2	24,3	382,3	2,39	0,080669294	0,080179892	0,000489402	0,193900261	0,758061859	2,662761368
								P3	24,1	381,5	2,02	0,083321361	0,082823315	0,000498046	0,200813338	0,797426672	2,90217179
								P4	24,2	381,8	2,40	0,086464757	0,086131955	0,000332802	0,202898854	0,741533206	2,617907469
								Promedio	23,8	386,6	2,27	0,0806	0,0801	0,0004	0,1992	0,766	2,728
								Desv. Estándar	0,7	9,4	0,22	0,006307151	0,006334169	7,59685E-05	0,004710178	0,028713715	0,152826387
								Coef. Variación	2,89%	2,43%	9,57%	7,83%	7,91%	17,22%	2,36%	3,75%	5,60%
								(u_A)	0,3	4,7	0,13	0,003152569	0,003166079	3,79794E-05	0,002719638	0,019860481	0,086748551
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	4,7	0,13	0,003152617	0,003166127	3,79795E-05	0,00271986	0,019862254	0,086772683
Incert. total (U)	0,7	9,4	0,25	0,006305234	0,006332254	7,5959E-05	0,00543972	0,039724508	0,173545365								
21	MEP	2016	1796	70.065	Multipunto	Mecánico	1500	P1	19,7	462,8	2,45	0,093596442	0,093044227	0,000552215	--	0,989270287	3,794147239
								P2	21,4	423,6	1,67	0,058485745	0,057749281	0,000736464	0,184796379	0,859410045	3,264991291
								P3	20,5	442,3	2,24	0,065388597	0,064755372	0,000633224	0,210533662	0,849497938	3,153025125
								P4	20,1	449,5	2,37	0,057055167	0,056399198	0,000655969	0,227400692	0,939831149	3,610202159
								Promedio	20,4	444,6	2,18	0,0686	0,0680	0,0006	0,2076	0,910	3,456
								Desv. Estándar	0,7	16,3	0,35	0,017036359	0,017101619	7,57906E-05	0,021455504	0,06681449	0,297992894
								Coef. Variación	3,61%	3,68%	16,24%	24,82%	25,15%	11,76%	10,34%	7,35%	8,62%
								(u_A)	0,37	8,2	0,18	0,008515724	0,008548345	3,78882E-05	0,012387364	0,019812771	0,146506776
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	8,2	0,18	0,008515757	0,008548377	3,78883E-05	0,012387417	0,019817632	0,146534437
Incert. total (U)	0,7	16,3	0,35	0,017031513	0,017096755	7,57767E-05	0,024774834	0,039635265	0,293068874								
22	MEP	2020	1389	32.233	Multipunto	Mecánico	1500	P1	25,6	359,8	3,49	0,029177295	0,029177295	--	--	0,250627364	--
								P2	26,1	351,5	3,34	0,037988548	0,037243786	0,000744762	0,088331961	0,370766623	1,844046038
								P3	25,9	354,3	3,33	0,036088335	0,035230549	0,000857786	0,099006674	0,261122247	1,617377818
								P4	26,1	352,7	3,00	0,041007737	0,040082392	0,000925345	0,109025691	0,295817568	1,82873768
								Promedio	25,9	354,6	3,29	0,0363	0,0354	0,0008	0,0988	0,295	1,763
								Desv. Estándar	0,2	3,7	0,20	0,002480821	0,00462135	9,12401E-05	0,010348596	0,054335957	0,126679266
								Coef. Variación	0,91%	1,04%	0,06	6,84%	13,04%	10,83%	10,48%	18,45%	7,18%
								(u_A)	0,1	1,8	0,10	0,002509024	0,002310191	5,26554E-05	0,005972686	0,027534955	0,071911927
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,8	0,10	0,00250904	0,002310208	5,26556E-05	0,005972707	0,027535429	0,071925678
Incert. total (U)	0,2	3,7	0,20	0,00501808	0,004620417	0,000105311	0,011945414	0,055070857	0,143851356								
23	MEP	2013	1330	184.578	Multipunto	Mecánico	1500	P1	27,4	335,0	2,07	--	--	--	--	0,620968237	3,464594832
								P2	27,4	334,6	2,33	0,045749653	0,044664023	0,00108563	0,163347668	0,692778425	3,910074742
								P3	27,1	339,6	2,31	0,047290949	0,04597006	0,001320889	0,175856433	0,7598565	4,169953571
								Promedio	27,3	336,4	2,24	0,0465	0,0453	0,0012	0,1696	0,691	3,848
								Desv. Estándar	0,2	2,8	0,14	0,00108986	0,000923508	0,000166353	0,008845032	0,069457566	0,356725924
								Coef. Variación	0,65%	0,83%	6,36%	2,34%	2,04%	13,83%	5,22%	10,05%	9,27%
								(u_A)	0,09	1,6	0,08	0,000770534	0,000652919	0,000117615	0,006254549	0,061504274	0,202508857
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,6	0,08	0,000770732	0,000653152	0,000117616	0,006254652	0,061505773	0,20253141
								Incert. total (U)	0,2	3,2	0,16	0,001541464	0,001306303	0,000235231	0,012509303	0,123011547	0,40506282

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
24	MEP	2023	1591	13.597	Multipunto	Automático	1500	P1	37,7	238,1	2,58	0,113629669	0,113528165	0,000101504	0,044953372	0,21814447	1,054659052
								P2	37,6	240,7	2,71	0,13382753	0,133624385	0,000203144	0,061837572	0,189578743	1,026101256
								P3	37,6	239,8	2,37	0,131063938	0,130826211	0,000237727	0,061495887	0,219170155	1,322883068
								P4	38,1	233,7	2,76	0,159488057	0,15917614	0,000311918	0,069120975	0,230051917	1,42414001
								Promedio	37,8	238,1	2,61	0,1345	0,1343	0,0002	0,0594	0,214	1,207
								Desv. Estándar	0,2	3,1	0,17	0,018905312	0,018822103	8,74134E-05	0,010222976	0,017298801	0,197070865
								Coef. Variación	0,63%	1,31%	6,67%	14,06%	14,02%	40,93%	17,22%	8,07%	16,33%
								(u_A)	0,1	1,6	0,09	0,009451088	0,009409491	4,36994E-05	0,005111991	0,022851579	0,096894877
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,6	0,09	0,009451139	0,009409542	4,36994E-05	0,005111999	0,022851769	0,096898599
Incert. total (U)	0,2	3,1	0,17	0,018902279	0,018819085	8,73987E-05	0,010223998	0,045703538	0,193797198								
25	MEP	2020	1598	27.767	Multipunto	Automático	1500	P1	32,4	276,9	2,64	0,029070879	0,029070879	--	--	0,00507714	0,075138344
								P2	33,7	264,8	1,67	0,02575951	0,025377027	0,000382483	--	0,013240683	0,19355677
								P3	33,2	270,7	2,49	0,027598536	0,027150118	0,000448418	0,092624065	0,034369392	0,375254477
								P4	32,3	278,8	2,29	0,026494146	0,025893459	0,000600688	0,099544269	--	0,433586155
								Promedio	32,9	272,8	2,27	0,0274	0,0269	0,0005	0,0961	0,018	0,269
								Desv. Estándar	0,7	6,4	0,43	0,000925687	0,001643665	0,000111913	0,004893323	0,015116777	0,164976816
								Coef. Variación	2,04%	2,33%	18,72%	3,38%	6,12%	23,45%	5,09%	86,07%	61,24%
								(u_A)	0,34	3,2	0,21	0,000720313	0,000821692	6,4606E-05	0,003460068	0,033784239	0,081105786
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	3,2	0,21	0,000720368	0,00082174	6,46061E-05	0,003460133	0,033784253	0,081106278
Incert. total (U)	0,7	6,4	0,43	0,001440736	0,00164348	0,000129212	0,006920266	0,067568505	0,162212555								
26	MEP	2005	3000	165.041	Multipunto	Automático	1500	P1	16,9	543,5	5,12	0,00128533	--	0,00128533	0,280317029	1,790022537	5,822287204
								P2	17,0	544,3	5,23	0,325115181	0,32358678	0,001528401	0,263277819	1,430155361	6,403361544
								P3	17,0	540,0	4,94	0,327248243	0,325624984	0,001623259	0,270731488	1,431518033	6,34039911
								P4	16,9	539,6	4,54	0,347498896	0,346081829	0,001417067	0,247322063	1,261590908	5,482316838
								Promedio	17,0	541,9	4,96	0,3332	0,3318	0,0015	0,2654	1,478	6,012
								Desv. Estándar	0,0	2,4	0,30	0,16630722	0,012440954	0,000145643	0,013931468	0,222590976	0,438772909
								Coef. Variación	0,24%	0,44%	6,06%	49,91%	3,75%	9,95%	5,25%	15,06%	7,30%
								(u_A)	0,0	1,2	0,15	0,083135796	0,007189248	7,27958E-05	0,006962882	0,038066918	0,215595448
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,2	0,15	0,083135815	0,007189644	7,27962E-05	0,006962996	0,038075575	0,215654978
Incert. total (U)	0,0	2,4	0,30	0,16627163	0,014379288	0,000145592	0,013925992	0,076151151	0,431309956								
27	MEP	2020	1598	52.809	Multipunto	Mecánico	1500	P1	36,2	247,6	1,41	0,022173805	0,022173805	--	--	0,157624269	--
								P2	36,0	255,2	1,61	0,000463354	--	0,000463354	0,075409143	0,229399964	1,108733326
								P3	36,5	251,4	1,91	0,023760328	0,023207862	0,000552466	0,093204718	0,21233317	1,048982971
								P4	36,2	252,5	1,65	0,00075928	--	0,00075928	--	0,175626288	0,912835437
								Promedio	36,2	251,7	1,65	0,0233	0,0227	0,0006	0,0843	0,194	1,024
								Desv. Estándar	0,2	3,2	0,21	0,013365907	0,000731189	0,000151814	0,012583372	0,032912973	0,100401061
								Coef. Variación	0,65%	1,26%	0,13	57,41%	3,22%	25,66%	14,93%	16,99%	9,81%
								(u_A)	0,12	1,6	0,10	0,006460653	0,000516688	8,76427E-05	0,00889846	0,04583074	0,056986554
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,6	0,10	0,006460654	0,000516736	8,76428E-05	0,008898485	0,045830921	0,056995532
Incert. total (U)	0,2	3,2	0,21	0,012921308	0,001033473	0,000175286	0,01779697	0,091661841	0,113991063								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
28	MEP	2020	1395	35.099	Multipunto	Automático	1500	P1	29,6	304,2	2,59	0,040057485	0,039389078	0,000668407	0,12368946	0,380316477	--
								P2	26,8	333,9	3,77	0,000790551	--	0,000790551	0,122707779	0,304062984	0,667992106
								P3	25,7	342,5	--	0,000717001	--	0,000717001	0,140482359	0,334279414	0,8323636
								P4	25,8	346,5	4,32	0,000779937	--	0,000779937	0,126830197	0,289211361	0,674413761
								Promedio	27,0	331,8	3,56	0,0401	0,0394	0,0007	0,1284	0,327	0,725
								Desv. Estándar	1,8	19,1	0,88	0,019647521	0	5,71566E-05	0,008226689	0,040206635	0,093101537
								Coef. Variación	6,78%	5,77%	24,82%	48,96%	0,00%	7,73%	6,41%	12,30%	12,84%
								(u_A)	0,9	9,6	0,51	0,009823594	0	2,8575E-05	0,004113243	0,014942622	0,052849245
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	9,6	0,51	0,009823595	1,19188E-05	2,85752E-05	0,004113286	0,014943483	0,052856094
Incert. total (U)	1,8	19,1	1,02	0,01964719	2,38376E-05	5,71503E-05	0,008226572	0,029886966	0,105712188								
29	MEP	2017	1373	51.228	Directa	Automático	1500	P1	53,2	173,0	--	0,02431146	0,02431146	--	--	--	--
								P2	54,2	168,9	1,07	0,029521782	0,02929164	0,000230142	--	0,094926112	--
								P3	54,9	166,4	1,28	0,000381694	--	0,000381694	0,06470095	0,070577733	--
								P4	55,7	164,0	1,19	0,024874658	0,024406123	0,000468534	0,074774921	0,098918487	0,351586413
								Promedio	54,5	168,1	1,18	0,0264	0,0260	0,0004	0,0697	0,088	0,352
								Desv. Estándar	1,1	3,8	0,10	0,015655914	0,002848375	0,000120651	0,007123373	0,015340474	0
								Coef. Variación	1,96%	2,29%	8,74%	59,39%	10,95%	33,50%	10,21%	17,40%	0,00%
								(u_A)	0,53	1,9	0,06	0,006566891	0,001644954	6,96451E-05	0,005034723	0,036419334	0
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,9	0,06	0,006566895	0,001644982	6,96452E-05	0,005034745	0,036419375	0,000605141
Incert. total (U)	1,1	3,9	0,12	0,013133791	0,003289964	0,00013929	0,01006949	0,072838749	0,001210281								
30	MEC	2016	2477	173.130	Directa	Automático	1500	P1	27,4	396,4	--	0,956508026	0,646518453	0,309989574	--	21,85168558	60,14544751
								P2	27,2	394,8	0,85	0,986039704	0,69982085	0,286218853	--	23,17840305	60,34611257
								P3	26,3	407,2	0,93	1,032066876	0,709825365	0,322241511	--	22,42690782	61,8233114
								P4	26,6	410,3	0,92	0,986189532	0,667603806	0,318585726	--	22,20860507	60,78807595
								Promedio	26,9	402,2	0,90	0,9902	0,6809	0,3093	--	22,416	60,776
								Desv. Estándar	0,5	7,7	0,04	0,031205642	0,029175034	0,016195838	--	0,560606867	0,748199251
								Coef. Variación	1,82%	1,93%	4,84%	3,15%	4,28%	5,24%	--	2,50%	1,23%
								(u_A)	0,2	3,9	0,03	0,015602334	0,014589214	0,008095676	--	4,233448594	0,36782373
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	--	15%	25%
								(u_C)	--	3,86994	0,03	0,015602811	0,014589609	0,008095801	--	4,233476437	0,369684971
Incert. total (U)	0,5	7,7	0,05	0,031205621	0,029179219	0,016191602	--	8,466952875	0,739369942								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
31	MEP	2016	1598	80.331l	Multipunto	Mecánico	0	P1	42,1	243,1	1,57	0,074812074	0,074528299	0,000283775	0,061549283	0,074382368	0,549777491
								P2	36,2	247,0	0,86	0,000300688	--	0,000300688	0,05034666	0,079213272	0,462206309
								P3	42,4	248,8	1,39	0,079211888	0,078958758	0,000253131	0,068741167	0,221341604	1,019590023
								Promedio	40,2	246,3	1,28	0,0770	0,0767	0,0003	0,0602	0,125	0,677
								Desv. Estándar	3,5	2,9	0,37	0,044343888	0,003132808	2,4107E-05	0,009269842	0,083487342	0,299741314
								Coef. Variación	8,71%	1,18%	28,83%	57,57%	4,08%	8,63%	15,40%	66,80%	0,00%
								(u_A)	2,02	--	--	--	--	--	--	--	--
								Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
								(u_C)	--	1,4	0,18	0,022171944	0,001566404	1,20535E-05	0,004634921	0,041743671	0,149870657
								Incert. total (U)	3,5	2,9	0,37	0,044343888	0,003132808	2,4107E-05	0,009269842	0,083487342	0,299741314
32	MEP	2005	3000	165.041	Multipunto	Automático	0	P1	23,4	390,3	--	--	--	--	--	0,850568039	2,782534595
								P2	22,5	400,1	2,39	0,184517524	0,183967464	0,00055006	0,122172379	1,039924139	3,240213009
								P3	21,5	420,2	2,49	0,168379937	0,167763335	0,000616602	0,135787941	0,910697359	3,186050849
								P4	21,6	419,8	2,52	0,238507874	0,23802727	0,000480604	0,145033673	--	--
								P5	22,1	412,6	2,58	0,146099386	0,14571696	0,000382426	0,109589692	0,947310323	2,953763906
								P6	22,0	413,7	3,75	0,163291976	0,162741254	0,000550722	0,136534437	0,77744343	3,042284978
								Promedio	22,2	409,5	2,75	0,1802	0,1796	0,0005	0,1298	0,905	3,041
								Desv. Estándar	0,7	11,9	0,57	0,035379683	0,035373704	8,88558E-05	0,01396341	0,099071295	0,183808133
								Coef. Variación	3,20%	2,90%	20,68%	19,64%	19,69%	17,22%	--	10,94%	6,04%
								(u_A)	0,3	4,8	0,25	0,015822487	0,015819803	3,97391E-05	0,006244282	0,020780646	0,080855887
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%								
(u_C)	--	4,8	0,25	0,015822527	0,015819843	3,97392E-05	0,006244309	0,020784994	0,080894675								
Incert. total (U)	0,7	9,7	0,51	0,031645053	0,031639686	7,94783E-05	0,012488619	0,041569987	0,161789349								
33	MEP	2016	1598	80.331l	Multipunto	Mecánico	2600	P1	43,6	219,8	1,07	0	--	--	--	--	1,536705946
								P2	46,5	204,5	0,66	0,000334585	--	0,000334585	0,008998968	0,319036106	1,2834227
								P3	41,9	229,3	1,78	0,027537205	0,027128178	0,000409026	0,015312173	0,34034716	1,412716544
								P4	45,9	207,6	0,88	0,000372931	--	0,000372931	0,01177314	0,453347165	1,591551453
								P5	43,7	222,0	--	0,045077508	0,044736498	0,000341009	0,015356031	0,329267181	1,895397068
								P6	47,7	202,9	1,08	0,013302622	0,012952093	0,00035053	0,013486201	0,244578465	1,493271403
								Promedio	44,9	214,3	1,09	0,0286	0,0283	0,0004	0,0130	0,337	1,536
								Desv. Estándar	2,2	10,8	0,42	0,019148872	0,015923059	3,02242E-05	0,002676088	0,074952664	0,206432127
								Coef. Variación	4,83%	5,05%	38,25%	66,87%	56,32%	8,36%	--	22,22%	13,44%
								(u_A)	0,9	4,4	0,19	0,008561052	0,009189717	1,3516E-05	0,001196979	0,007067871	0,082857535
Resolucion +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%								
(u_C)	--	4,4	0,19	0,008561057	0,009189731	1,35161E-05	0,001196981	0,007069123	0,082862259								
Incert. total (U)	2,2	8,8	0,37	0,017122114	0,018379461	2,70322E-05	0,002393961	0,014138245	0,165724518								

#	Tipo	Modelo	Cilindrada	Kilomet.	Tecnología de inyección	Transmisión	Altura [m.s.n.m]	Prueba	Rend. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO ₂ [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
34	MEP	2005	3000	165.041	Multipunto	Automático	2600	P1	22,8	379,3	2,68	0,156461046	0,156461046	--	--	--	--
								P2	24,1	369,2	2,71	0,125934317	0,125349848	0,000584469	--	0,564729725	3,122612956
								P3	21,2	416,4	2,67	0,119559997	0,118906976	0,000653021	--	0,46686716	2,95683451
								P4	24,4	356,0	2,48	0,120951811	0,120394415	0,000557396	0,07873108	0,644299212	3,552257638
								P5	22,3	394,0	1,83	0,107543009	0,106883054	0,000659956	0,045821326	0,593984177	3,416479634
								P6	25,0	339,1	1,68	0,084595874	0,084003935	0,000591939	0,045858631	0,594908913	3,354361445
								Promedio	23,3	375,7	2,34	0,1193	0,1187	0,0006	0,0568	0,573	3,281
								Desv. Estándar	1,5	27,5	0,46	0,01659747	0,023733863	4,4971E-05	0,018989696	0,065834037	0,238477386
								Coef. Variación	6,33%	7,31%	19,85%	13,92%	20,00%	7,38%	--	11,49%	7,27%
								(u_A)	0,6	11,2	0,1898	0,009607791	0,00968762	2,01089E-05	0,010964449	0,010515513	0,10487099
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	11,2	0,19	0,009607816	0,009687645	2,01091E-05	0,010964455	0,010518378	0,104893265								
Incert. total (U)	1,5	22,4	0,38	0,019215632	0,019375289	4,02182E-05	0,021928911	0,021036757	0,209786531								
35	MEP	2016	1598	80.331	Multipunto	Mecánico	1500	P1	0,9	888,1	14,47	0,001865116	--	0,001865116	--	1,502754051	9,295612654
								P2	28,2	242,0	1,98	0,083914392	0,083469724	0,000444669	0,078886674	0,678124493	3,099116557
								P3	45,7	219,8	3,23	0,123058916	0,122549507	0,000509409	0,122208942	0,751193276	3,179220413
								P4	9,8	273,1	4,92	0,120966115	0,120740374	0,000225741	0,110540766	0,547754431	3,148985034
								P5	43,1	233,0	2,30	0,079508808	0,078833712	0,000675096	0,113466018	0,492014478	2,716669376
								P6	47,6	213,5	2,20	0,086979567	0,086979567	--	--	--	--
								Promedio	34,9	344,9	4,85	0,0993	0,0985	0,0007	0,1063	0,794	4,288
								Desv. Estándar	16,0	23,4	4,84	0,049080467	0,021321377	0,000647085	0,018920169	0,409091467	2,805595102
								Coef. Variación	45,78%	6,78%	99,73%	49,45%	21,64%	86,97%	--	51,50%	65,43%
								(u_A)	7,1413	--	--	--	--	--	--	--	--
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	11,7	2,42	0,024540233	0,010660688	0,000323542	0,009460085	0,204545733	1,402797551								
Incert. total (U)	16,0	23,4	4,84	0,049080467	0,021321377	0,000647085	0,018920169	0,409091467	2,805595102								
36	MEP	2005	3000	165.041	Multipunto	Automático	1500	P1	21,2	423,9	4,34	0,296169417	0,295344037	0,000825379	0,138759573	1,483063982	6,62264235
								P2	21,5	417,0	3,04	0,172245109	0,171416216	0,000828893	0,115330361	1,337704532	5,559295455
								P3	22,3	398,4	3,07	0,167653004	0,166624893	0,001028111	--	1,579849886	6,588594526
								P4	22,0	414,9	3,50	0,177575811	0,177096367	0,000479444	--	1,199833128	6,243998335
								P5	22,5	397,1	3,51	0,148715829	0,148715829	--	0,145744708	1,194398486	6,153310492
								P6	21,9	405,9	4,67	0,167872783	0,166643019	0,001229764	0,258192338	1,368262981	6,522210295
								Promedio	21,9	409,5	3,69	0,1885	0,1876	0,0009	0,1645	1,361	6,282
								Desv. Estándar	0,5	10,8	0,67	0,055972963	0,053613689	0,000278522	0,063797173	0,153048851	0,402006155
								Coef. Variación	2,16%	2,63%	18,21%	29,69%	28,57%	31,71%	--	11,25%	6,40%
								(u_A)	0,2	3,4	0,2659	0,020102112	0,020070184	0,000125402	0,032351022	0,065576215	0,148123367
								Resolución +/-	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	15%	25%
(u_C)	--	3,4	0,27	0,020102156	0,020070228	0,000125402	0,032351035	0,065579425	0,148184482								
Incert. total (U)	0,5	6,7	0,53	0,040204312	0,040140456	0,000250805	0,06470207	0,13115885	0,296368963								

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) MULTIFACTORIAL PARA VEHÍCULOS LIVIANOS

Este análisis permitió predecir los valores medios del factor de emisión de cualquier vehículo liviano (automóvil, campero o camioneta) independientemente del ciclo termodinámico (Otto o de encendido por chispa -MEP-, y diésel o de encendido por compresión MEC), considerando los parámetros que más podrían incidir sobre éstos, tales como: tipo de suministro de combustible (multipunto o inyección directa de gasolina), cilindrada, transmisión (mecánica o automática), kilometraje, marca, y año de modelo. Al final del capítulo se presenta un análisis estadístico en el que se han separado las diferentes subcategorías de automóviles, camperos y camionetas.

La **Tabla 3.2** muestra el rendimiento de combustible. Se presentan los resultados de aquellas categorías que exhibieron diferencias significativas (valor $P < 0.05$). Estos resultados son válidos y generalizables independientemente de la subcategoría (automóviles, camperos o camionetas), así como del tipo de combustible que utilicen (gasolina o diésel comerciales). Se ha resaltado en color azul las dos camionetas Foton Tunland G7 (Euro 5 y Euro 6) y la Mitsubishi Nativa (Euro 4, de 2016), porque son de ciclo diésel (MEC).

Tabla 3.2. Rendimiento de combustible (km/gal) de vehículos livianos

Rendimiento promedio = 34.7 km/gal			
	Media	Límite inferior	Límite superior
<i>Cilindrada</i>			
1C (< 1500 cc)	37.47	35.1	39.84
2C (>= 1500 cc)	31.98	29.92	34.04
<i>Marca</i>			
	29.14	26.28	32
	35.64	32.14	39.14
	23.79	18.4	29.17
	45.25	41.3	49.2
	19	15.35	22.65
	44.4	38.07	50.72
	32.74	28.98	36.5
	28.13	21.49	34.76
	55.64	49.01	62.28
	33.51	27.19	39.84
<i>Transmisión</i>			
A (Automática)	30.83	28.56	33.1
M (Manual)	38.62	35.78	41.46

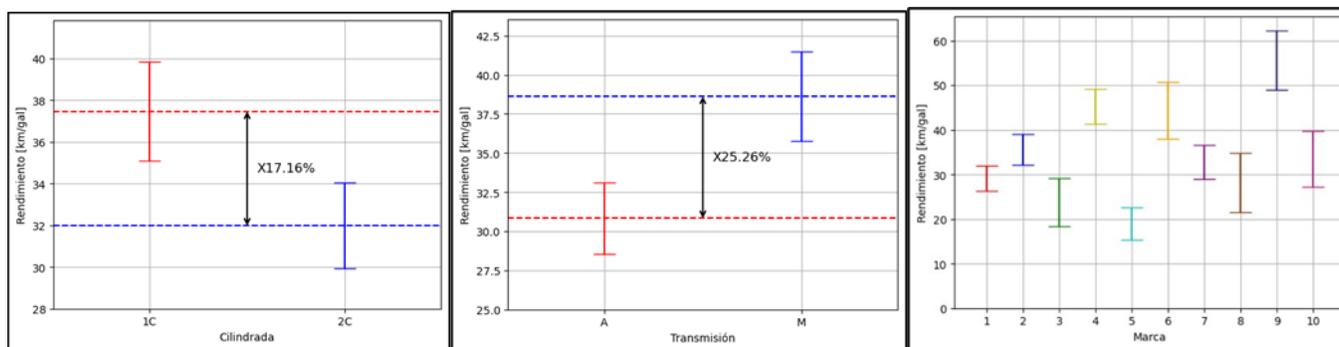


Figura 3.2. Rendimiento de combustible (km/gal) de vehículos livianos

La **Figura 3.2** muestra el rendimiento de combustible para los vehículos livianos. Estos resultados permiten concluir que en Colombia:

1. Un vehículo liviano en Colombia recorre cerca de 35 km por cada galón de gasolina comercial. Sin embargo, los vehículos con cilindradas inferiores a 1500 cc y provistos con sistema de inyección directa de gasolina (GDI), lograron alcanzar entre 50 y 60 km/gal.
2. Los vehículos livianos de transmisión manual en promedio mejoran el rendimiento de combustible frente a los automáticos en torno al 25%.
3. Las marcas de vehículos con tecnologías GDI (marca 4, 6 y 7) fueron las que mayor rendimiento de combustible exhibieron.
4. Como era de esperarse, el rendimiento de combustible es inversamente proporcional al tamaño del motor. Los vehículos con mayor cilindrada fueron los que exhibieron menor rendimiento de combustible.
5. Ni el kilometraje, ni el año de modelo exhibieron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de combustible de los vehículos livianos.

En el caso de las camionetas *Foton Tunald*, (ambas de transmisión mecánica con cilindrada de 2000 cc, del año 2023) se observó que la provista con tecnología de control de emisiones Euro 6, exhibió el mayor rendimiento de combustible (29 km/gal), frente a la *Foton Tunland* Euro 5, cuyo valor promedio estuvo en 19 km/gal, lo que confirma que la mejora tecnológica influye sobre el ahorro de combustible. La camioneta Mitsubishi Nativa (año 2016) tenía 2500 cc de cilindrada y era tecnología Euro 4.

La **Tabla 3.3** muestra el factor de emisión de CO₂ de vehículos livianos en Colombia. Se muestran resaltados en color azul claro la marca 3 (Foton Tunland, 2000 cc), y la marca 10 (Mitsubishi Nativa, 2500 cc), por operar con combustible diésel.

Tabla 3.3. Factor de emisión de CO₂ (g/km) de vehículos livianos

CO ₂ promedio = 296.6 g/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
<i>Marca</i>			
	352.74	327.71	377.78
	261.66	225.79	297.53
	448.05	397.63	498.48
	196.87	154.81	238.93
	435.23	397.71	472.75
	186.31	121.99	250.63
	338.19	302.32	374.06
	280	215.68	344.32
	116.31	51.99	180.63
	350.4	286.08	414.72
<i>Transmisión</i>			
A (Automática)	348.34	326.53	370.14
M (Manual)	244.82	215.84	273.79

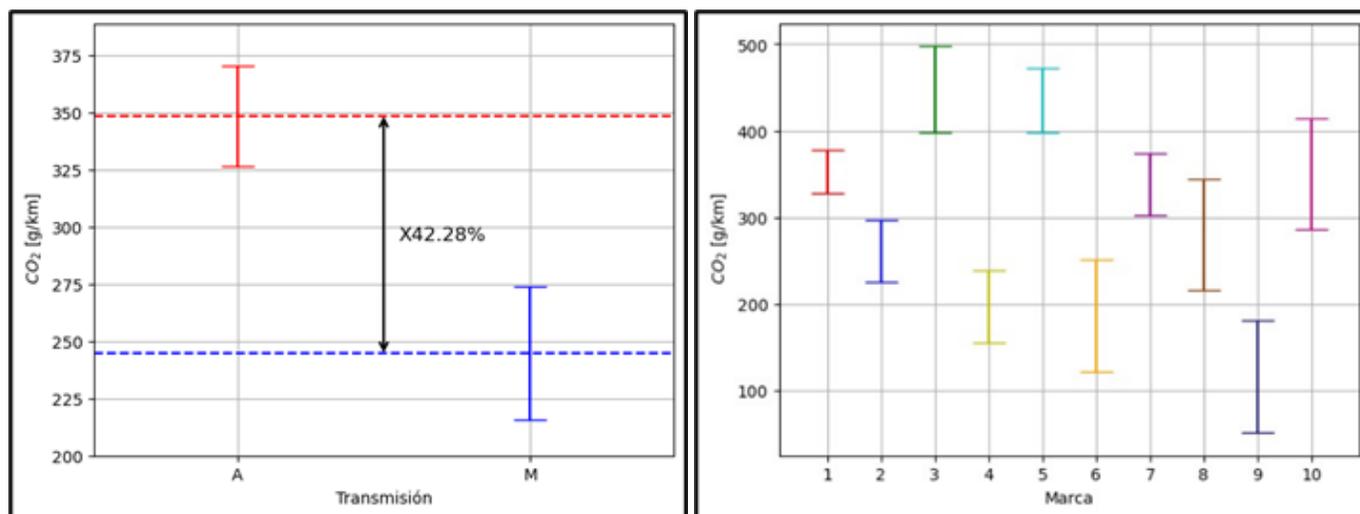


Figura 3.3. Factor de emisión de CO₂ (g/km) de vehículos livianos

La **Figura 3.3** muestra el impacto significativo del tipo de transmisión (manual/automática) y la marca sobre el CO₂ de los vehículos livianos. Estos resultados permiten concluir que:

1. Un vehículo liviano (incluye automóviles, camperos y camionetas) emite cerca de 297 g CO₂ / km. La subcategoría: automóvil, campero y camioneta mostró una diferencia estadística significativa, como se discute al final del capítulo.
2. Los vehículos livianos de transmisión manual en promedio reducen la emisión de CO₂ en torno a 40% (promedio ligeramente inferior a 250 gCO₂/km).

En la **Tabla 3.4** se muestra el factor de emisión de CO para todos los vehículos livianos medidos. Destacan los dos vehículos con motor diésel por sus bajas emisiones promedio de CO debido a su manera de operación con exceso de aire en mezclas pobres.

La **Figura 3.4** muestra que el único parámetro que influyó de manera estadísticamente significativa en la emisión de CO de los vehículos livianos fue la marca. Las camionetas con motor diésel (MEC), tanto Foton como Mitsubishi emitieron la menor masa de CO por cada kilómetro entre todos los vehículos. Este resultado era de esperarse, puesto que los motores diésel operan con mezclas pobres (exceso de aire), además ambas marcas estaban provistas con catalizador de oxidación diésel (DOC).

Tabla 3.4. Factor de emisión de CO (g/km)de vehículos livianos

CO promedio = 2.2 g/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
	2.67	1.99	3.34
	4.28	3.09	5.47
	0.35	0	2.41
	0.95	0	2.25
	2.53	1.43	3.63
	2.61	0.55	4.66
	2.96	1.77	4.15
	3.56	1.18	5.93
	1.18	0	3.56
	0.9	0	3.27

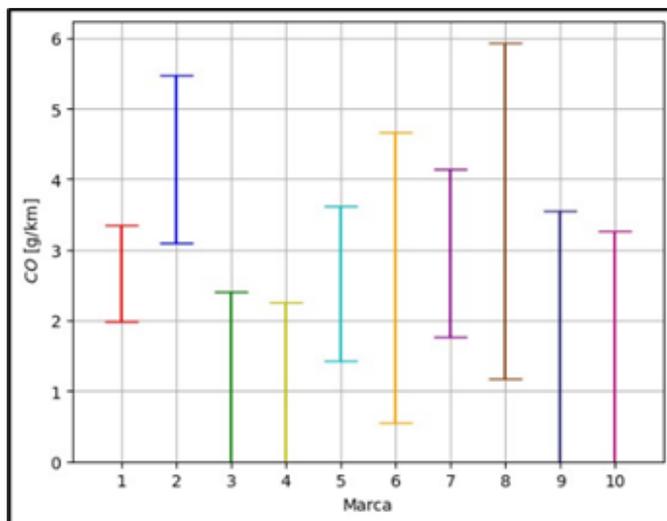


Figura 3.4. Factor de emisión de CO (g/km) de vehículos livianos

En la **Tabla 3.5** y en la **Figura 3.5** se observa que las camionetas Foton Tunland fueron las que menos HC emitieron debido a su forma de operar con exceso de aire, y a la operación catalítica de su DOC. Los vehículos con mayor cilindrada y más kilometraje acumulado emitieron en torno a 40% más HC que sus contrapartes, debido probablemente al envejecimiento del catalizador de 3 vías.

Tabla 3.5. Factor de emisión de HC (mg/km) de vehículos livianos

HC promedio =130 mg/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
<i>Cilindrada</i>			
1C (< 1500 cc)	150	120	170
2C (>= 1500 cc)	100	80	130
<i>Marca</i>			
	120	90	140
	140	100	180
	90	40	140
	130	90	170
	160	130	200
	100	40	160
	200	160	240
	130	70	190
	70	0	150
<i>Kilometraje</i>			
1K (< 80,000 km)	110	90	120
2K (>= 80,000 km)	140	120	170

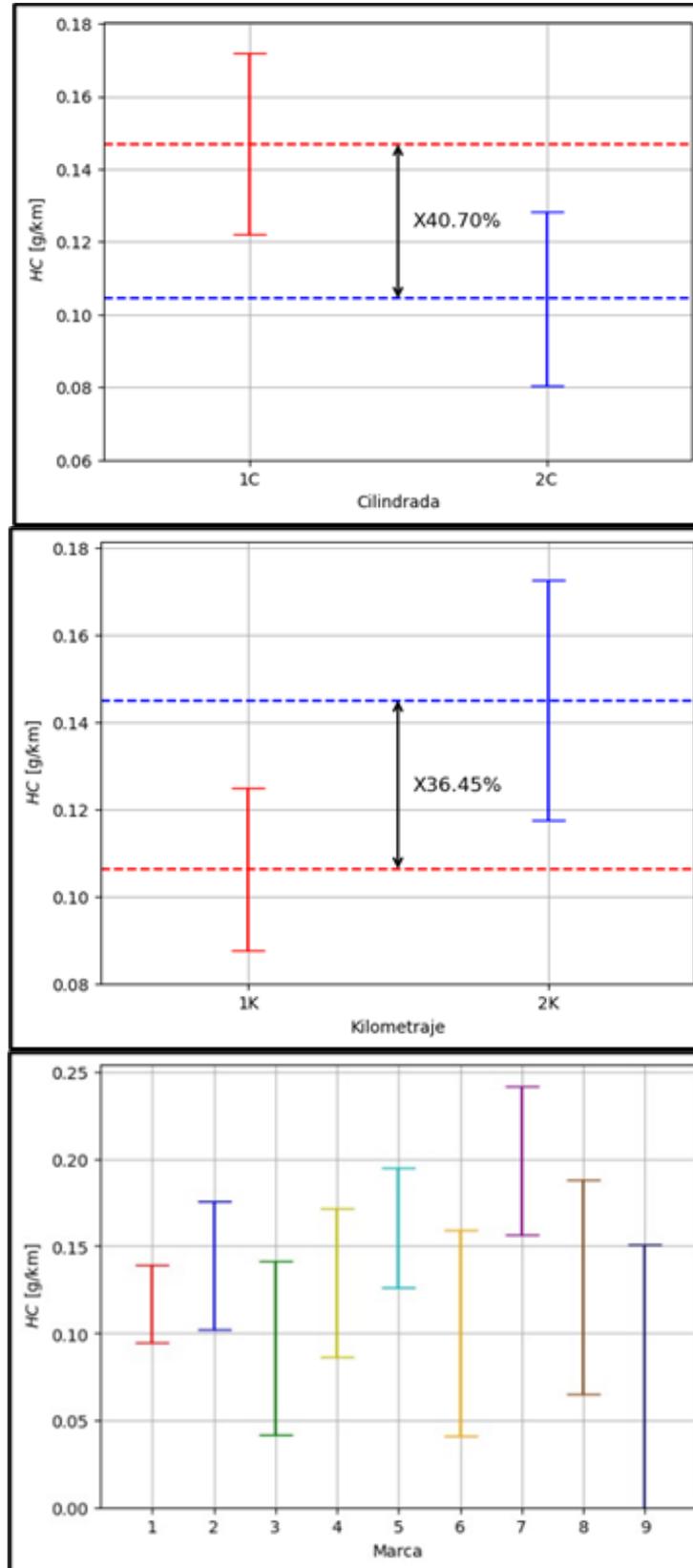


Figura 3.5. Factor de emisión de HC (g/km) de vehículos livianos

En los factores de emisión de NO y NO₂ (**Tablas 3.6 y 3.7 y Figuras 3.6 y 3.7**) se apreció un marcado efecto de los motores diésel, llegando a ser del orden de 7 veces más elevados para el vehículo Mitsubishi Nativa que para el resto de los vehículos livianos, excepción hecha de los vehículos de la marca *Kia*, de los cuales se sospecha que su catalizador podría estar presentando problemas por las elevadas emisiones de NO, NO₂, CO y CO₂ frente a las demás marcas de automóviles.

Tabla 3.6. Factor de emisión de NO (mg/km) de vehículos livianos

NO Promedio =170 mg/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
<i>Marca</i>			
	60	30	80
	290	240	340
	260	180	330
	30	0	80
	40	0	90
	170	90	260
	140	80	200
	80	0	240
	0	0	90
	640	560	730
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	130	100	170
U (<=2020)	210	170	240

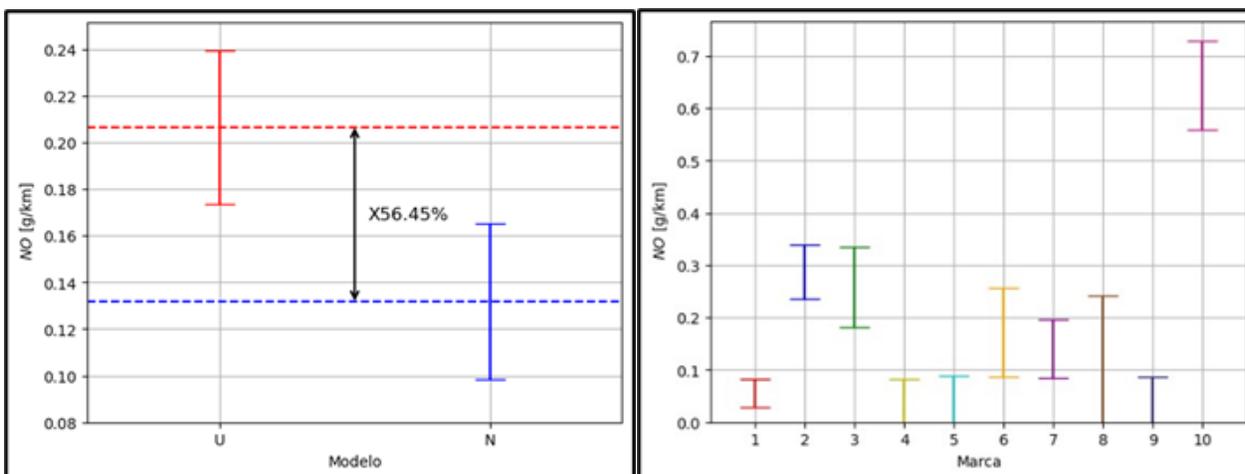


Figura 3.6. Factor de emisión de NO (g/km) de vehículos livianos

Tabla 3.7. Factor de emisión de NO₂ (mg/km) de vehículos livianos

NO ₂ Promedio =40.5 mg/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
<i>Marca</i>			
	0.976	0	8.713
	0.934	0	20.148
	90.2	70.9	109.42
	0.481	0	15.364
	0.714	0	13.767
	0.214	0	23.745
	0.906	0	15.789
	0.739	0	24.271
	0.36	0	27.532
	309.3	285.7	332.8

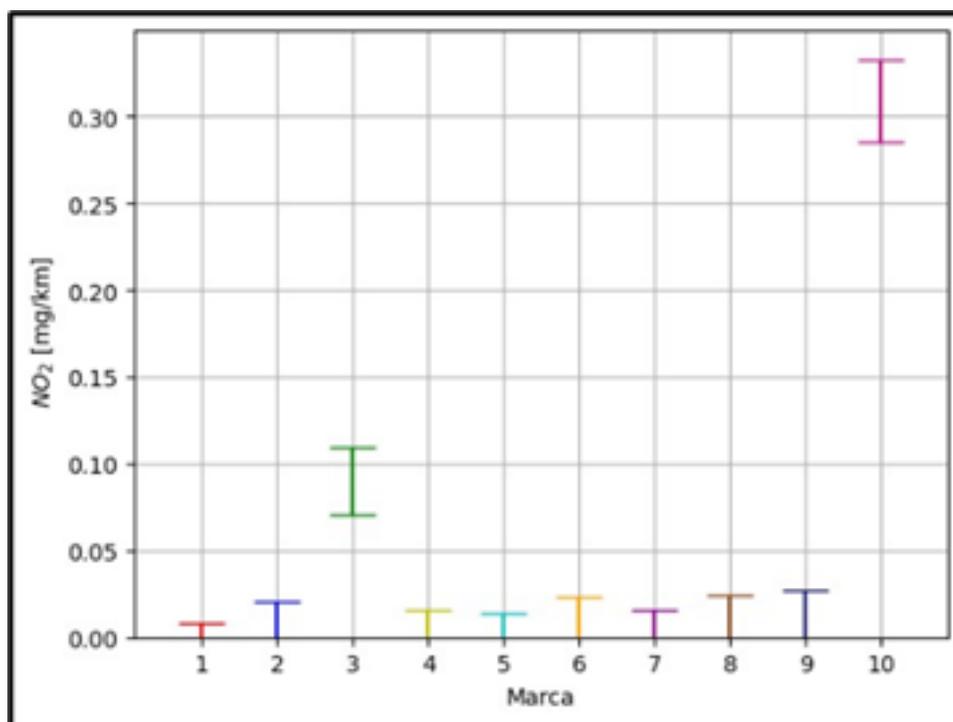


Figura 3.7. Factor de emisión de NO₂ (g/km) de vehículos livianos. Sobresalen las mayores emisiones de NO₂ por cada kilómetro de los motores MEC (marca 3 y 10) frente a los MEP

En las **Tablas 3.8 y 3.9**, así como las **Figuras 3.8 y 3.9** se muestran los factores de emisión de partículas (en masa y en número). El motor diésel Euro 4 de la camioneta Mitsubishi Nativa (año 2016) no venía equipado con filtro de partículas diésel, por el contrario las dos camionetas *Foton Tunland* se destacan por su baja emisión de partículas, tanto en masa (PM) como en número (PN). Este resultado permite concluir que la actualización tecnológica de los motores diésel a estándar de emisiones Euro 6, conlleva una reducción drástica en la emisión de partículas, llegando a niveles similares a los de los vehículos con motor de encendido por chispa.

Tabla 3.8. Factor de emisión de PM de vehículos livianos

PM promedio = 2.7 mg/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
	0.74	0.63	0.85
	0.34	0.12	0.57
	1.01	0.62	1.4
	0.39	0.12	0.66
	0.58	0.4	0.76
	0.38	0.04	0.72
	0.66	0.46	0.86
	0.5	0.16	0.84
	0	0	0.31
	22.25	21.91	22.59
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	2.51	2.38	2.63
U (<=2020)	2.85	2.72	2.97

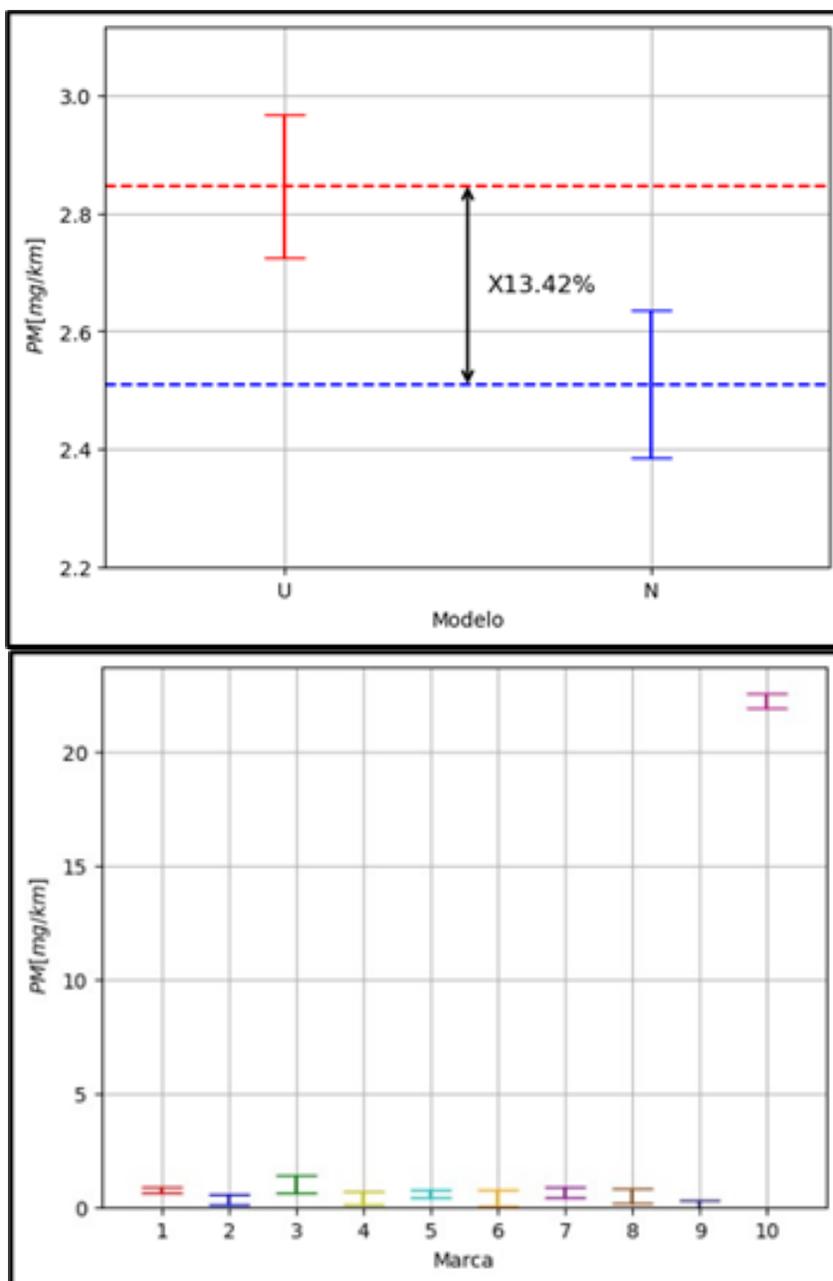


Figura 3.8. Factor de emisión de PM (mg/km) de vehículos livianos

Las tres camionetas diésel emitieron mayor número de partículas que el resto de los vehículos con motor de encendido por chispa.

El hecho de que la camioneta Foton Tunland Euro 6 haya emitido PN del orden de 5 billones #/km, y PM sólo 0.6 mg/km, significa que la gran mayoría de las partículas que está emitiendo son de tamaños pequeños que tienen poca masa, pero que son de alta concentración en número.

Tabla 3.9. Factor de emisión de PN de vehículos livianos

PN promedio = $8.04 \cdot 10^{12}$ #/km			
	Media	Límite inferior	Límite superior
<i>Marca</i>			
	3.02	2.58	3.46
	1.57	0.61	2.53
	6.02	4.95	7.1
	1.4	0.37	2.42
	2.64	1.87	3.41
	1.85	0.46	3.25
	2.74	1.92	3.56
	1.37	0	2.97
	0	0	2.43
	60.13	58.73	61.52
<i>Modelo</i>			
N (> 2020)	7.4	6.85	7.95
U (<=2020)	8.69	8.16	9.23

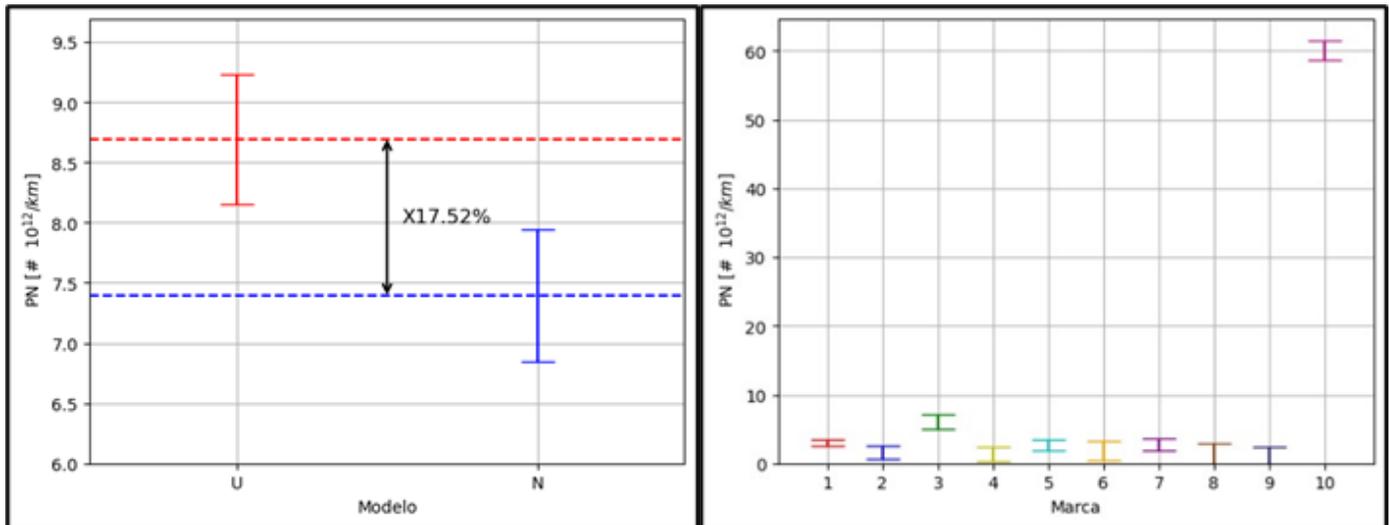


Figura 3.9. Factor de emisión de PN (#/km) de vehículos livianos

Análisis estadístico de varianza simple por subcategoría de vehículos livianos

A continuación, se presenta el análisis de varianza simple por subcategoría de vehículos livianos, a saber: automóviles (incluyendo inyección directa de gasolina -GDI- e inyección multipunto de gasolina -MPI-), camionetas y camperos. Se midieron 4 camperos, 4 camionetas y 22 vehículos livianos.

Se presenta un análisis tipo ANOVA simple comparando medias y valores P de cada subcategoría, así como un análisis ANOVA multivariado *Kruskal-Wallis* para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los grupos de datos, partiendo de la hipótesis nula. El objetivo consistió en comprobar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las diferentes subcategorías de vehículos en cuanto a los factores de emisión y el rendimiento de combustible. Para tal fin, en la **Tabla 3.10** se aplicó la prueba estadística *t-Student* a cada subcategoría mencionada. Se han resaltado en color verde claro aquellos parámetros que presentaron diferencias estadísticas significativas (valor $P < 0.05$). Únicamente los factores de CO y HC no fueron afectados por la subcategoría de tipo de vehículo liviano.

La subcategoría de camionetas está conformada por tres con motor diésel y uno con motor MEP.

Tabla 3.10. Prueba *t-student* para cada subcategoría de vehículos livianos.

Factor	Valor P		
	Vehículo liviano - Campero	Vehículo liviano - Camioneta	Campero - Camioneta
Rendimiento [km/gal]	0.0000	0.0001	0.8072
CO ₂ [g/km]	0.0000	0.0000	0.0336
CO [g/km]	0.1743	0.3739	0.7119
HC [mg/km]	0.1869	0.2155	0.9814
NO _x [g/km]	0.0576	0.0000	0.0001
NO [g/km]	0.0741	0.0000	0.0000
NO ₂ [mg/km]	0.0000	0.0000	0.0032
PM [mg/km]	0.0008	0.0000	0.0096
PN [# 10 ¹² /km]	0.0006	0.0000	0.0210

En las Figuras 3.10 y 3.11 se muestran los resultados de rendimiento de combustible y factor de emisión de CO₂ obtenidos para las mediciones realizadas sobre cada vehículo de manera comparativa. En las leyendas se muestran las medias de cada categoría.

La dispersión de los datos de rendimiento de combustible de los automóviles fue elevada, variando desde cerca de 20 km/gal, hasta cerca de 62 km/gal en el mejor vehículo.

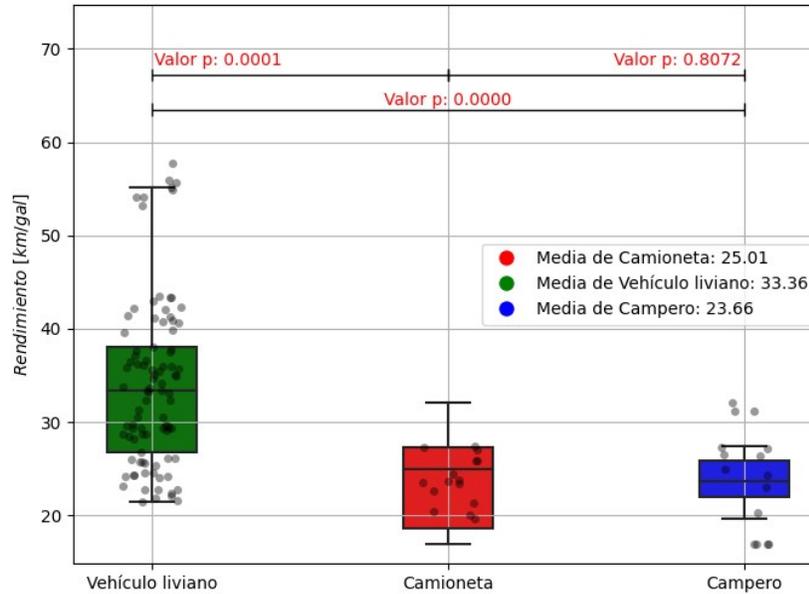


Figura 3.10. Rendimiento de combustible en km/gal por subcategoría de vehículo liviano. Verde: automóviles, Rojo: camionetas y Violeta: camperos (SUV)

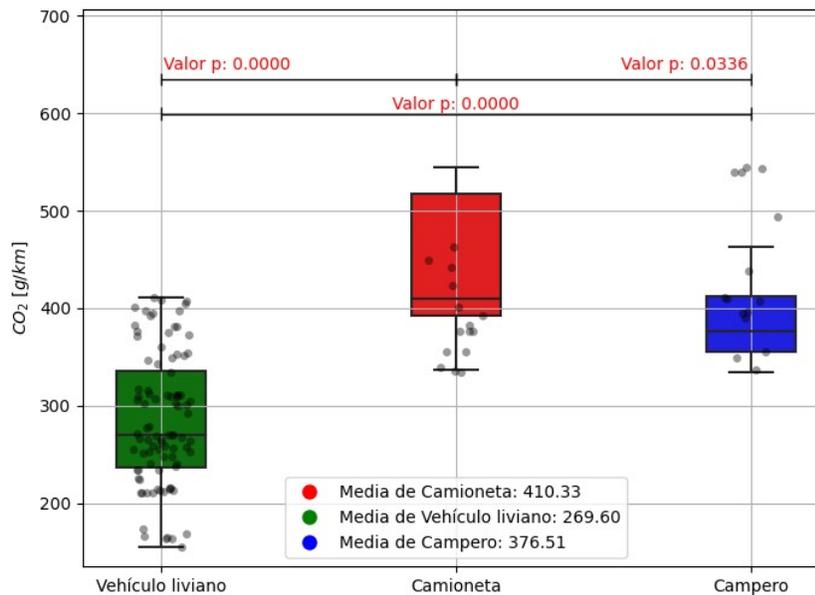


Figura 3.11. Factor de emisión de CO₂ por subcategoría de vehículo liviano. Verde: automóviles, Rojo: camionetas y Violeta: camperos (SUV)

En el análisis ANOVA multifactorial presentado arriba se había observado que los vehículos diésel (MEC), clasificados en las camionetas, mostraron emisiones significativamente elevadas de NO_x (NO + NO₂) y de material particulado tanto en masa (PM) como en número (PN).

La **Figura 3.12** muestra de forma gráfica resumida la comparación entre las diferentes subcategorías de vehículos livianos medidos, tomando como base los promedios normalizados de las mediciones de forma general. El color azul claro corresponde a los automóviles, mientras que el naranja a los campero, y el gris a las camionetas.

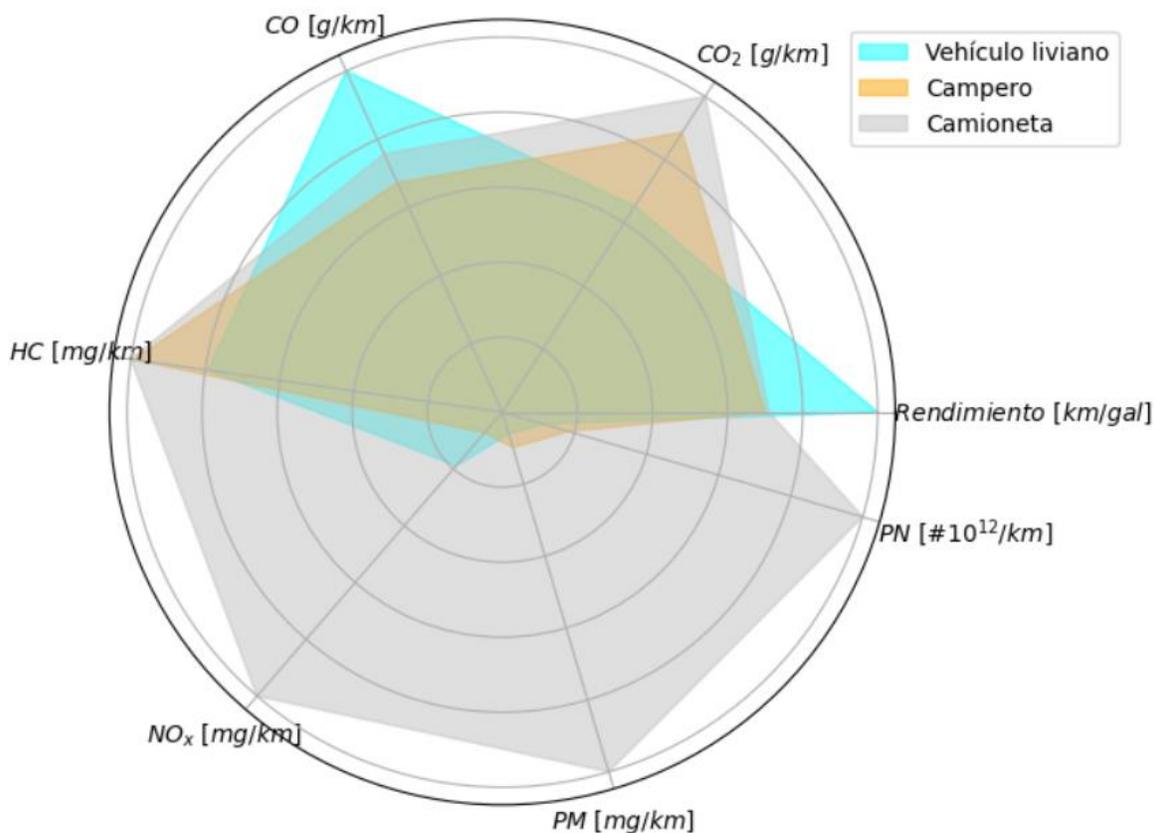


Figura 3.12. Comparación visual de factores de emisión en categorías de vehículos.

FACTORES DE EMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Las pruebas para determinar los factores de emisión de los vehículos livianos (automóviles, camperos y camionetas) con la altitud se realizaron en carretera en las tres localidades siguiendo el respectivo ciclo de conducción. En todos los ensayos de altitud se utilizó gasolina comercial disponible en la zona de pruebas.

En La Tabla 3.11 se presenta la base de datos de factores de emisión medidos en tres altitudes distintas sobre el nivel del mar:

- Apartadó a 0 msnm
- Medellín a 1500 msnm
- Bogotá a 2600 msnm

Las pruebas se realizaron sobre dos vehículos, un automóvil y una camioneta, ambos con motor de encendido provocado (ciclo Otto) de tecnologías y años de modelo diferentes:

Se presentan en color rojo los valores promedio, mediana, desviación estándar, y el rango de confianza estadístico al 95% de una distribución *t-student*. Como se observa, la mayoría de los datos no presentaron distribución normal, por lo que, para efectos de comparación entre ciudades, y entre los dos vehículos, se optó por graficar los valores de las medianas y los rangos de confianza del 95%.

Estos resultados se presentarán en el capítulo 6, donde se complementa el análisis de varianza multifactorial de la altura sobre el nivel del mar de forma detallada.

Tabla 3.11. Factores de emisión de vehículos livianos en las tres altitudes sobre el nivel del mar

Lugar	Prueba	Rend. comb [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹² /km]
Apartadó	P4	42,0	243,1	1,57	0,07482	0,07453	0,00028	0,06156	0,07	0,55
	P5	34,8	247,5	0,87	0,00030	--	0,00030	0,05045	0,08	0,46
	P6	42,3	248,8	1,39	0,07924	0,07898	0,00025	0,06875	0,22	1,02
	Prom	39,7	246,5	1,28	0,0515	0,0768	0,0003	0,0603	0,13	0,68
	Mediana	42,0	247,5	1,39	0,0748	0,0768	0,0003	0,0616	0,08	0,55
	Desv. Est.	4,3	3,0	0,37	0,0444	0,0031	0,0000	0,0092	0,08	0,30
	Int. Conf. (t)	10,6	7,4	0,91	0,1102	0,0078	0,0001	0,0229	0,21	0,74
	P1	23,4	390,3	--	0,00000	--	--	--	0,85	2,78
	P2	22,5	400,1	2,39	0,18452	0,18397	0,00055	0,12217	1,04	3,24
	P3	21,5	420,2	2,49	0,16838	0,16777	0,00062	0,13579	0,91	3,19
	P4	21,6	419,8	2,52	0,23851	0,23803	0,00048	0,14503	--	--
	P5	22,1	412,6	2,58	0,14610	0,14572	0,00038	0,10959	0,95	2,95
	P6	22,0	413,7	3,75	0,16329	0,16274	0,00055	0,13653	0,78	3,04
	Prom	22,2	409,5	2,75	0,1501	0,1796	0,0005	0,1298	0,91	3,04
	Mediana	22,0	413,2	2,52	0,1658	0,1678	0,0006	0,1358	0,91	3,04
	Desv. Est.	0,7	11,9	0,57	0,0801	0,0354	0,0001	0,0140	0,10	0,18
	Int. Conf. (t)	0,7	12,4	0,70	0,0840	0,0439	0,0001	0,0173	0,12	0,23
Medellín	P4	45,7	219,8	3,23	0,12306	0,12255	0,00051	0,12221	0,75	3,18
	P6	43,1	233,0	2,30	0,07952	0,07884	0,00068	0,11349	0,49	2,72
	P1	47,6	213,5	2,20	0,08698	0,08698	--	--	--	--
	Prom	45,5	222,1	2,58	0,0965	0,0961	0,0006	0,1179	0,62	2,95
	Mediana	45,7	219,8	2,30	0,0870	0,0870	0,0006	0,1179	0,62	2,95
	Desv. Est.	2,3	10,0	0,57	0,0233	0,0232	0,0001	0,0062	0,18	0,33
	Int. Conf. (t)	5,6	24,8	1,42	0,0578	0,0577				
	P1	21,4	420,9	4,32	0,29359	0,29277	0,00082	0,13758	1,47	6,57
	P2	21,5	417,0	3,04	0,17225	0,17142	0,00083	0,11533	1,34	5,56
	P3	22,3	398,4	3,07	0,16768	0,16665	0,00103	--	1,58	6,59
	P4	22,0	414,9	3,50	0,17758	0,17710	0,00048	--	1,20	6,24
	P5	22,5	397,1	3,51	0,14872	0,14872	--	0,14574	1,19	6,15
	P6	21,9	405,9	4,67	0,16787	0,16664	0,00123	0,25819	1,37	6,52
Prom	21,9	409,0	3,69	0,1879	0,1872	0,0009	0,1642	1,36	6,27	
Mediana	21,9	410,4	3,50	0,1701	0,1690	0,0008	0,1417	1,35	6,38	
Desv. Est.	0,4	10,0	0,67	0,0527	0,0526	0,0003	0,0640	0,15	0,39	
Int. Conf. (t)	0,5	10,5	0,70	0,0553	0,0552	0,0003	0,1018	0,16	0,41	
Bogotá	P1	43,6	219,7	1,07	0,00000	--	--	--	--	1,54
	P2	46,5	204,5	0,66	0,00033	--	0,00033	0,00900	0,32	1,28
	P3	41,9	229,3	1,78	0,02754	0,02713	0,00041	0,01531	0,34	1,41
	P4	45,9	207,6	0,88	0,00037	--	0,00037	0,01177	0,45	1,59
	P5	43,7	222,0	--	0,04508	0,04474	0,00034	0,01536	0,33	1,90
	P6	47,7	202,9	1,08	0,01330	0,01295	0,00035	0,01349	0,24	1,49
	Prom	44,9	214,3	1,09	0,0144	0,0283	0,0004	0,0130	0,34	1,54
	Mediana	44,8	213,7	1,07	0,0068	0,0271	0,0004	0,0135	0,33	1,51
	Desv. Est.	2,2	10,8	0,42	0,0185	0,0159	0,0000	0,0027	0,07	0,21
	Int. Conf. (t)	2,3	11,4	0,52	0,0194	0,0396	0,0000	0,0033	0,09	0,22
	P1	22,8	379,3	2,68	0,15646	0,15646	--	--	--	--
	P2	24,1	369,2	2,71	0,12593	0,12535	0,00058	--	0,56	3,12
	P3	21,2	416,4	2,67	0,11956	0,11891	0,00065	--	0,47	2,96
	P4	24,4	356,0	2,48	0,12094	0,12038	0,00056	0,07873	0,64	3,55
	P5	22,3	394,0	1,83	0,10754	0,10688	0,00066	0,04582	0,59	3,42
P6	25,0	339,1	1,68	0,08459	0,08400	0,00059	0,04586	0,59	3,35	
Prom	23,3	375,7	2,34	0,1192	0,1187	0,0006	0,0568	0,57	3,28	
Mediana	23,5	374,3	2,57	0,1202	0,1196	0,0006	0,0459	0,59	3,35	
Desv. Est.	1,5	27,5	0,46	0,0235	0,0237	0,0000	0,0190	0,07	0,24	
Int. Conf. (t)	1,5	28,8	0,49	0,0247	0,0249	0,0001	0,0472	0,08	0,30	

COMPARACIÓN CON RESULTADOS REPORTADOS EN LA LITERATURA

Queremos contextualizar estos resultados de factores de emisión medidos en vehículos livianos en Colombia, haciendo un comparativo con resultados de investigaciones en otras partes del mundo. A continuación, se presentan cinco estudios encontrados en la literatura donde reportan factores de emisión de vehículos livianos.

Factores de emisión de vehículos livianos reportados en la literatura

En 2004 Sullivan y colaboradores [1] reportaron un análisis cuantitativo para determinar el comparativo del factor de emisión del CO₂ entre motores a gasolina y motores diésel para vehículos livianos y camiones. Esto se hizo para fuentes de distinta masa inercial del año de modelo 2001 para el mercado europeo (Alemania) y norteamericano. En la Tabla 3.12 se representan los factores de emisión de CO₂ reportados por los autores, utilizando el Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC). Se registran las emisiones para el caso tanque-a-rueda (*Tank-to-Wheel* -TTW) y pozo-a-rueda (*Well-to-Wheel* -WTW); el primero se refiere a las emisiones generadas netamente en carretera, mientras el segundo tiene en cuenta también el origen del combustible y otros factores externos.

Tabla 3.12. Resultados **Artículo A** (Sullivan, et al.) [1]

(Tanque-a-rueda) TTW			
	CO ₂ [g/km]	Rendimiento [L/100 km]	Rendimiento [km/gal]
Norte América	220	9.3	40.7
América	213	9	42.1
(pozo-a-rueda) WTW			
Norte América	273	9.3	40.7
América	247	9	42.1

Entre 2009 y 2011, en la ciudad de Beijín, *Zhang* y colabores [2] emplearon el ciclo NEDC para evaluar el consumo de combustible real y los factores de emisión de CO₂ para los vehículos livianos en China, discutir los impactos de las condiciones de conducción en carretera y resaltar aún más la importancia de reducir el consumo de combustible mediante medidas de tráfico efectivas. Para esto, los autores recopilaron pruebas en carretera con un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS) sobre una muestra de **41 vehículos livianos a gasolina**, 16 a diésel y 3 a gas licuado de petróleo (GLP). Se realizaron las pruebas en rutas típicas diseñadas en tres ciudades: Guangzhou, Beijing y Macao [2].

En la Tabla 3.11 se presentan los resultados para los 41 vehículos livianos con motor de encendido provocado.

Tabla 3.11. Resultados **Artículo B** (Zhang, et al) [2]

CO ₂ [g/km]	Rendimiento [L/100km]	Rendimiento [km/gal]
257 ± 63	6.1 ± 2.7	62

Wallington, Sullivan y colaboradores [3] reportaron en 2008 los factores de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x) provenientes de vehículos livianos (Tabla 3.12), describiendo la química involucrada en su formación y su evolución a lo largo del tiempo, para un parque automotor norteamericano donde prevalecen los vehículos con motor de ciclo Otto (encendido provocado).

Los autores presentaron registros históricos a partir del año 1957 y hasta el año 2007. Para efectos comparativos con nuestro proyecto se tuvieron en cuenta los registros a partir del año 2004 [3].

Tabla 3.12. Resultados **Artículo C** (Wallington, Sullivan, et al) [3]

Año	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
1957 – 1962	51	5.5	2.3
1963 – 1967	58	5.7	2.2
1963 – 1967	37	2.9	3.1
1975 – 1976	9.4	0.94	1.9
1991	2.1	0.26	0.6
1994	2.1	0.26	0.25
2000	2.4	0.20	0.15
2004	1.1	0.08	0.13
2005	1.0	0.10	0.08
2007	2.1	0.05	0.03

En 2012, Habib y colabores [4] llevaron a cabo un estudio de factores de emisión en vehículos livianos en la ciudad de Delhi. Los autores reportaron factores de emisión de CO, CO₂ y NO_x a partir de mediciones en carretera usando PEMS, a una muestra de **14 automóviles** de pasajeros de diferentes tipos de combustible y antigüedad. La Tabla 3.13 muestra las características de los vehículos medidos con motor de encendido provocado (8 de los 14 medidos), mientras la Tabla 3.14 reporta los resultados de factores de emisión de la investigación [4].

Tabla 3.13. Muestra de vehículos a ciclo Otto en el **artículo D** (Habib, et al) [4]

Vehículo	Modelo	Kilometraje [km]	Cilindrada [cc]
1	2001	43250	1086
2	2003	40105	1947
3	2005	65800	1197
4	2008	55623	1197
5	2010	56228	1086
6	2010	45345	1599
7	2010	25678	1197
8	2013	15234	1496

Tabla 3.14. Resultados **Artículo D** (Habib, et al) [4]

Anteriores a 2010		
CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO _x [g/km]
512 ± 640	0,14 ± 0,18	2,2 ± 2,8
Después del 2010		
196 ± 19	3,70 ± 2,70	0,80 ± 0,76

Dimaratos y colabores [5] presentaron los resultados del efecto de varias tecnologías de eficiencia en el consumo de combustible sobre las emisiones certificadas de CO₂ de vehículos livianos en Europa. Estos vehículos operaron bajo dos ciclos de conducción diferentes: el Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC) y el Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros (*Worldwide Light Duty Test Protocol* -WLTP), considerado más cercano a la conducción real y que se convirtió en la nueva prueba de aprobación de tipo (*type approval*) en Europa a partir de 2017. El trabajo se centró en la evaluación comparativa del efecto de cada tecnología sobre las emisiones de CO₂ bajo estos dos ciclos de conducción. Entre los 9 vehículos medidos 5 eran con motor de encendido provocado, los datos se muestran en la Tabla 3.15. El factor de emisión para la tecnología “*start – stop*” se presenta en la Tabla 3.16 para [5].

Tabla 3.15. Muestra de vehículos con motor de encendido provocado **artículo E** (Dimaratos, et al) [5]

Vehículo	Cilindrada [cc]
1	1197
2	1368
3	1798
4	875
5	1368

Tabla 3.16. Factor de emisión de CO₂ **Artículo E** (Dimaratos, et al) [5]

Ciclo de conducción	CO ₂ [g/km]
NEDC	153
WLTP	162

Un artículo publicado en el año 2018, Yang y colabores [6] reportaron resultados de la ejecución de pruebas en un dinamómetro de rodillos usando equipos PEMS para dos vehículos con transmisión automática, con el fin de conocer los factores de emisión de CO₂, CO, NO_x y PN. Los autores siguieron los ciclos de conducción WLTP y NEDC en China. Las características de los vehículos medidos y los resultados de los factores de emisión se muestran en las Tablas 3.17 y 3.18 respectivamente [6].

Tabla 3.17. Muestra de vehículos livianos **Artículo F** (Yang, et al.) [6]

Parámetro	Vehículo A	Vehículo B
Modelo	2016	2016
Cilindrada [cc]	1600	2400
Transmisión	Automática	Automática

Tabla 3.181. Factores de emisión **Artículo F** (Yang, et al.) [6]

CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO _x [g/km]	PN [# /km]
<i>NEDC</i>			
186	0.55	0.07	5.4*10 ¹¹
<i>WLTP</i>			
203	2.1	0.1	6.6*10 ¹¹

En la ciudad de Hanoi, en 2011, Tung y colabores [7], compilaron una base de datos para motocicletas y vehículos livianos (LDV) a través de una encuesta. Seleccionaron una muestra de 12 vehículos de prueba representativos para determinar el consumo de combustible y los factores de emisión (CO, HC, NO_x y CO₂) para cada vehículo. Estos factores de emisión se desarrollaron por primera vez teniendo en cuenta las características locales de conducción en Hanoi (Tabla 3.19).

Tabla 3.19. Resultados **Artículo G** (Tung, et al.) [7]

Rendimiento [L/100 km]	Rendimiento [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]	PM [mg/km]
13.09	28.9	230.27	1.88	160	310	300

Park y colaboradores [8] se enfocaron en las emisiones gaseosas provenientes de vehículos livianos en Corea. El objetivo era comprender los patrones de emisión de gases regulados, gases de efecto invernadero y gases precursores con potencial de formar aerosoles secundarios en la atmósfera, en vehículos que utilizaban diferentes tecnologías de motor: inyección multipunto (MPI) e inyección directa de gasolina (GDI), y diferentes tipos de combustible: gasolina, gas licuado de petróleo (GLP) y diésel.

Los autores utilizaron cuatro ciclos de conducción desarrollados por el Instituto Nacional de Investigación Ambiental (NIER) de Corea cuyas características principales se muestran en la Tabla 3.20. Los datos de los vehículos medidos a gasolina se visualizan en la Tabla 3.21, mientras que en la Tabla 3.22 se presentan los resultados de los factores de emisión reportados por los autores [8]

Tabla 3.20. Ciclos de conducción usados en el **Artículo H** (Park, et al.) [8]

Ciclo	Duración [s]	Distancia [km]	Velocidad promedio [km/h]
1	873	1.1	4.7
2	864	4.2	17.3
3	926	8.3	34.1
4	840	15.3	65.4

Tabla 3.21. Muestra de vehículos **Artículo H** (Park, et al.) [8]

Vehículo	Modelo	Cilindrada [cc]	Kilometraje [km]
1	2015	1999	44238
2	2015	2999	69057
3	2016	1591	25944
4	2015	1591	24570

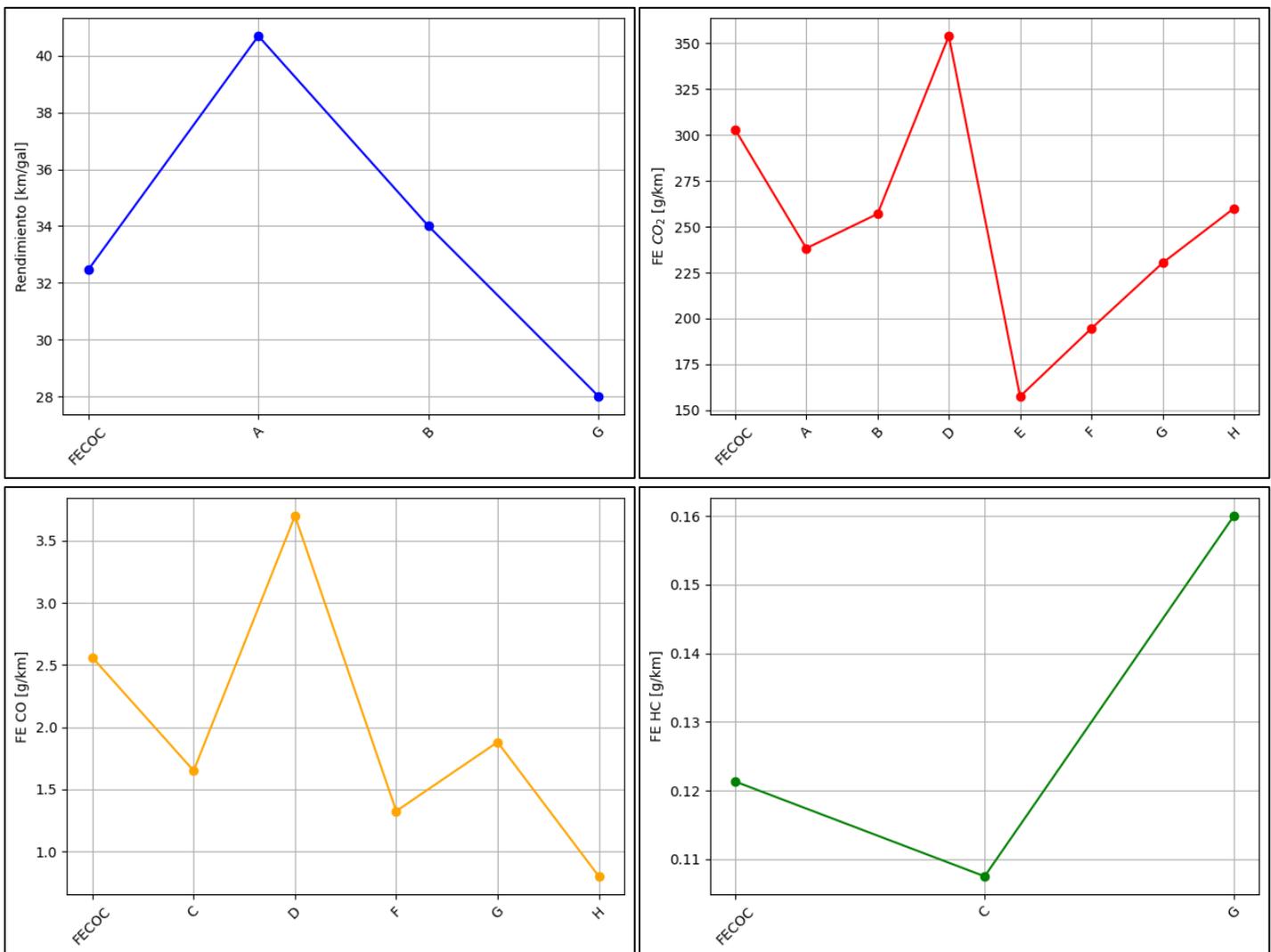
Tabla 3.22. Factores de emisión **Artículo H** (Park, et al.) [8]

CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO _x [mg/km]
260	0.8	3

Comparativo con los factores de emisión obtenidos en este proyecto

En la Figura 3.13 se muestra el comportamiento de los factores de emisión promedio obtenidos en este proyecto (FECOC+ Fase 3), frente a las investigaciones mencionadas anteriormente en las referencias [1 a 8], mientras que la Figura 3.14 ilustra el comportamiento de los factores de emisión de todos los vehículos livianos a gasolina que se midieron en este proyecto respecto a los datos de la bibliografía.

Podemos ver que, en su mayoría, los factores de emisión promedio de FECOC + Fase 3, están por encima de la literatura consultada, sin embargo, cuando comparamos el comportamiento vehículo a vehículo, nos damos cuenta que la dispersión de los datos medidos está dentro de los valores respecto en los artículos citados.



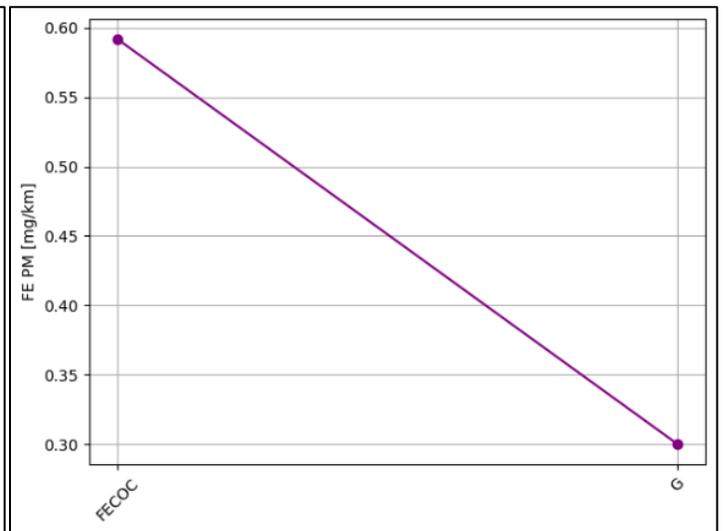
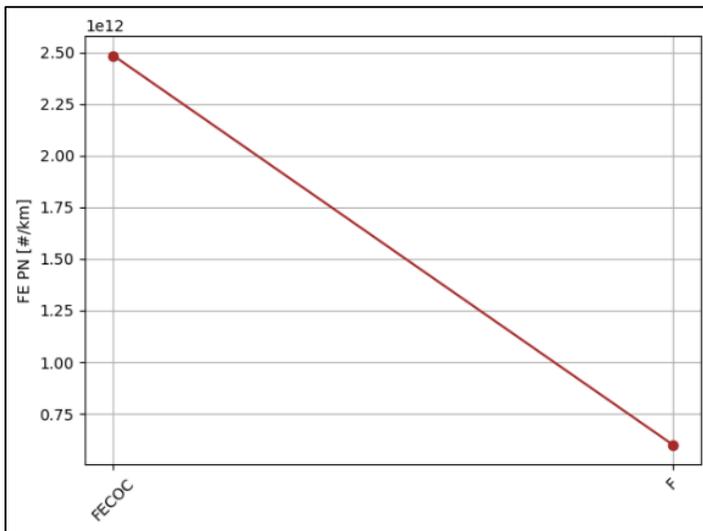
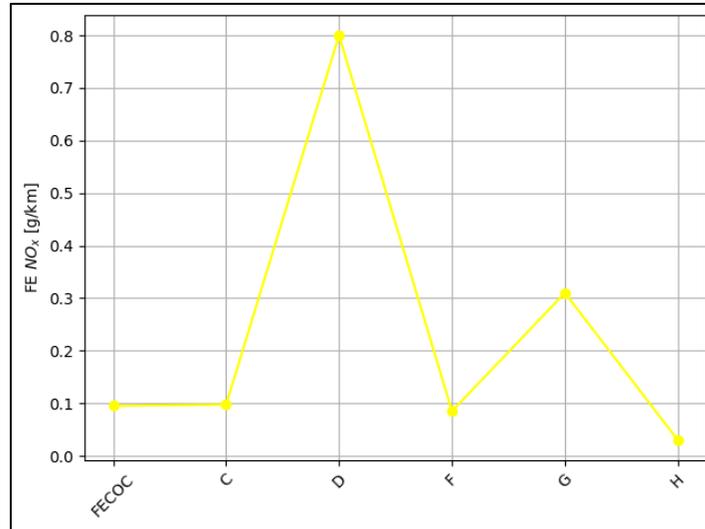
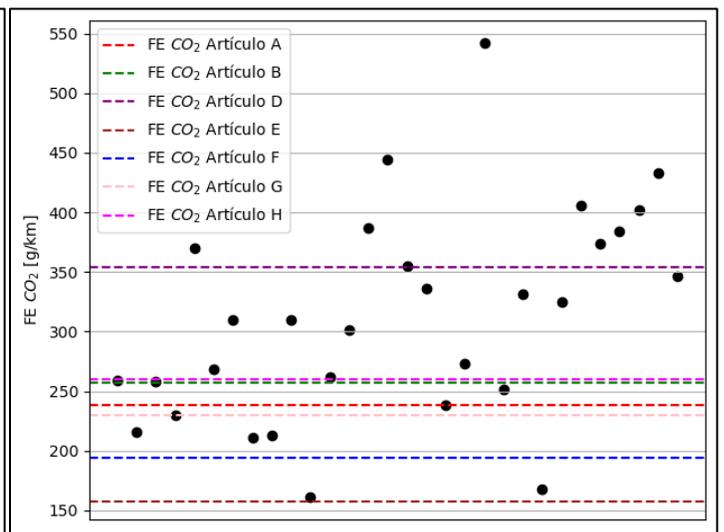
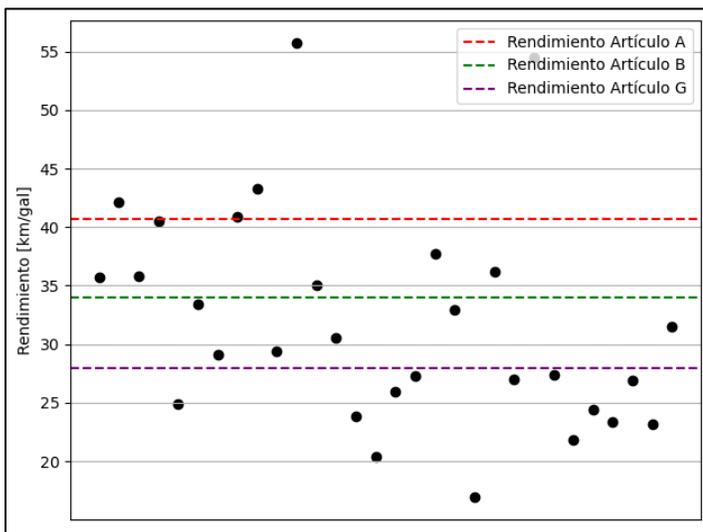


Figura 3.13. Comparación de los factores de emisión de FECOC+ 3 con otros estudios



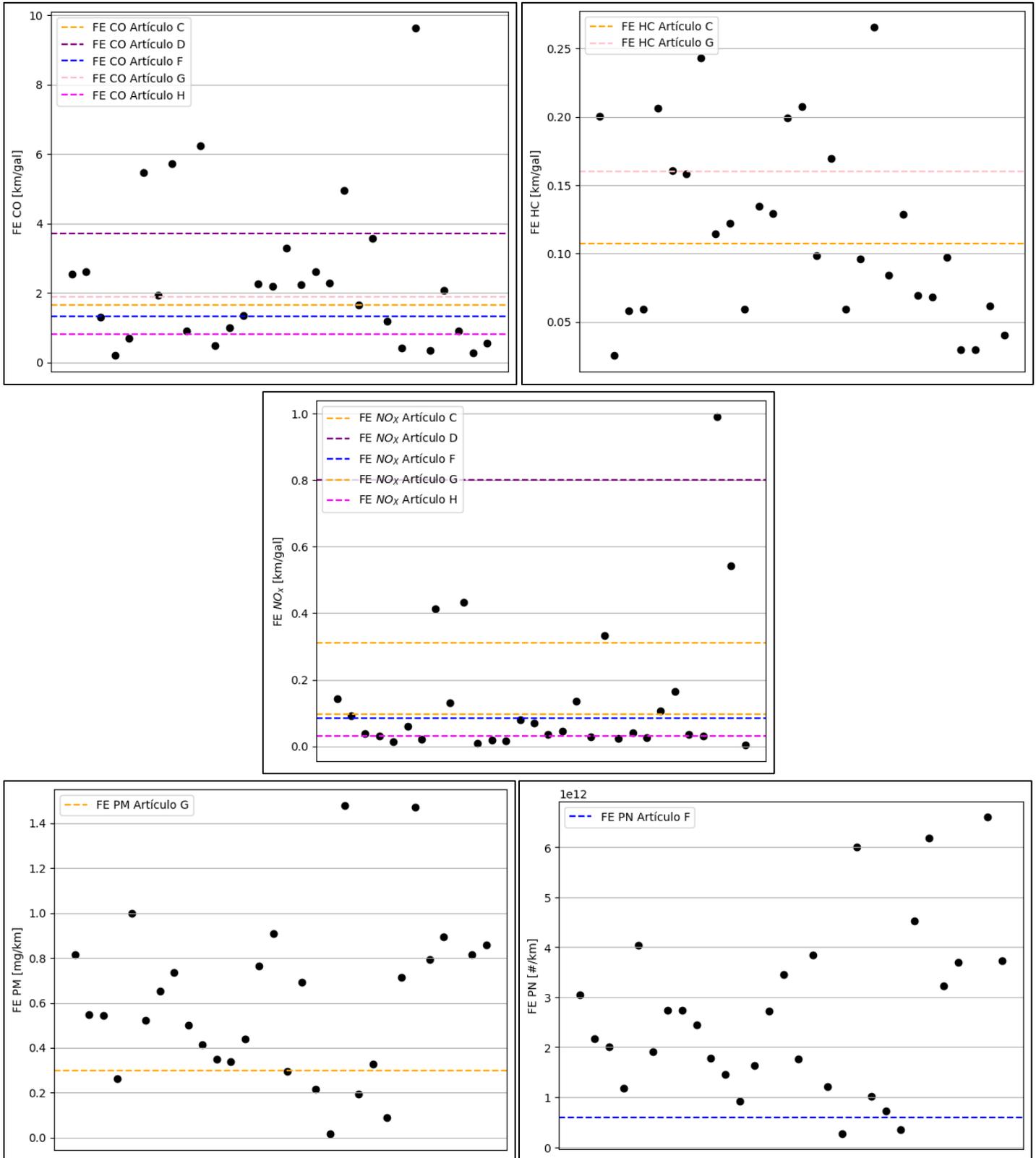


Figura 3.14. Comportamiento de cada vehículo a gasolina de FECOC+ 3 respecto a la literatura

INVENTARIO DE EMISIONES NACIONAL PARA VEHÍCULOS LIVIANOS

Con la base de datos de factores de emisión obtenidos en este proyecto (FECOC+ Fase 3), se propone conocer la cantidad de toneladas emitidas por dichas fuentes móviles en Colombia al año, con base en la cantidad de vehículos livianos matriculados en el RUNT por cada departamento, actualizado a octubre de 2023. En la Tabla 3.23 se presenta la base de datos actualizada.

Tabla 3.23. Cantidad de vehículos livianos en Colombia a octubre de 2023

Departamento	Cantidad
Cundinamarca (incluye Bogotá)	1.824.991
Antioquia (Incluye Medellín)	645.282
Valle del Cauca	496.410
Santander	196.337
Atlántico	154.972
Caldas	93.059
Risaralda	94.909
Tolima	80.463
Bolívar	74.196
Boyacá	71.174
Nariño	67.438
Huila	61.831
Quindío	56.469
Norte de Santander	79.341
Meta	54.341
Cauca	36.386
Magdalena	30.077
Cesar	26.813
Córdoba	27.851
Sucre	17.564
Casanare	14.031
Caquetá	4.289
La Guajira	3.783
San Andrés	1.669
Arauca	1.509
Putumayo	1.189
Chocó	548
Guaviare	416
Amazonas	173
Vichada	90
Vaupés	0
Guainía	0
TOTAL	4.217.601

Con la información reportada en el convenio CV 001-2020: “FECOC+ Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia” [9], partimos de una base de datos de Motocicletas actualizada a diciembre de 2020, luego, a partir del boletín mensual que realizan las organizaciones ANDI y FENALCO [10] se tiene el número de vehículos livianos matriculados en total en el territorio colombiano. Estas organizaciones reportan en sus publicaciones mensuales los datos de matriculación de vehículos livianos para 10 departamentos del país.

En la Tabla 3.24 se muestran los factores de emisión promedio medidos en este proyecto para las categorías de vehículos livianos (automóviles, camperos y camionetas). Estos datos fueron usados para la estimación de escenarios de inventario de emisión de vehículos livianos en función de su cantidad por departamento.

Tabla 3.24. Factores de emisión promedios medidos para vehículos livianos en FECOC+ Fase 3

Parámetro	Unidades	Vehículos
Rendimiento de combustible	km/gal	35
	L/100 km	8,8
	kWh/100 km	97,3
CO ₂	g/km	297
CO		2,2
HC	mg/km	130
NO		170
NO ₂		40
PM		2,68
PN	x 10e12 #/km	8

Al igual como se procedió con las motocicletas en el Capítulo 2, con base en los factores de emisión promedio reportados en la Tabla 3.24, y la cantidad de vehículos livianos reportados en la Tabla 3.23, se calcularon las toneladas emitidas al año en Colombia de CO₂, CO, HC, NO y NO₂ para cada departamento como sigue:

$$\frac{Ton}{año} = Z * FE \left(\frac{g}{km} \right) * \left(\frac{1 ton}{1000000g} \right) * X \left(\frac{km}{año} \right)$$

Las toneladas anuales de material particulado (PM) emitidas por vehículos livianos se obtuvieron así:

$$\frac{Ton}{año} = Z * FE \left(\frac{mg}{km} \right) * \left(\frac{1 g}{1000mg} \right) * \left(\frac{1 ton}{1000000g} \right) * X \left(\frac{km}{año} \right)$$

Finalmente, la emisión del número de partículas (PN) emitidas se obtuvieron como:

$$\frac{\#}{\text{año}} = Z * FE \left(\frac{\#10^{12}}{\text{km}} \right) * X \left(\frac{\text{km}}{\text{año}} \right) * \left(\frac{1}{10^{18}} \right) \text{ "en trillones"}$$

Donde:

- Z = Número de vehículos livianos (Tabla 3.23)
- X = 15.000 km/año para vehículos livianos.
- FE = Factor de emisión promedio de Tabla 3.24

La Tabla 3.25 muestra las toneladas emitidas de cada contaminante en un año en Colombia por los vehículos livianos, mientras que las Figuras 3.15 a 3.22 muestran los mapas de calor de cada emisión por departamento del país.

Tabla 3.25 Inventario de emisión en toneladas / año generadas por vehículos livianos (Número de partículas al año para PN en trillones/km)

Toneladas emitidas al año en Colombia por Vehículos livianos (< 3,5 ton PBV)									
Departamento	Cantidad de vehículos	CO ₂	CO	HC	NO _x	NO	NO ₂	PM	PN
Cundinamarca (incluye Bogotá)	1.824.991	8.545.612	64.605	3.197	3.765	3.280	485	37	126.198
Antioquia (Incluye Medellín)	645.282	3.021.565	22.843	1.130	1.331	1.160	171	13	44.621
Valle del Cauca	496.410	2.324.465	17.573	869	1.024	892	132	10	34.327
Santander	196.337	919.358	6.950	344	405	353	52	4	13.577
Atlántico	154.972	725.664	5.486	271	320	279	41	3	10.716
Caldas	93.059	435.753	3.294	163	192	167	25	2	6.435
Risaralda	94.909	444.416	3.360	166	196	171	25	2	6.563
Tolima	80.463	376.772	2.848	141	166	145	21	2	5.564
Bolívar	74.196	347.426	2.627	130	153	133	20	1	5.131
Boyacá	71.174	333.276	2.520	125	147	128	19	1	4.922
Nariño	67.438	315.782	2.387	118	139	121	18	1	4.663
Huila	61.831	289.527	2.189	108	128	111	16	1	4.276
Quindío	56.469	264.419	1.999	99	117	102	15	1	3.905
Norte de Santander	79.341	371.518	2.809	139	164	143	21	2	5.486
Meta	54.341	254.454	1.924	95	112	98	14	1	3.758
Cauca	36.386	170.379	1.288	64	75	65	10	1	2.516
Magdalena	30.077	140.837	1.065	53	62	54	8	1	2.080
Cesar	26.813	125.553	949	47	55	48	7	1	1.854
Córdoba	27.851	130.414	986	49	57	50	7	1	1.926
Sucre	17.564	82.244	622	31	36	32	5	0	1.215
Casanare	14.031	65.701	497	25	29	25	4	0	970
Caquetá	4.289	20.083	152	8	9	8	1	0	297
La Guajira	3.783	17.714	134	7	8	7	1	0	262
San Andrés	1.669	7.815	59	3	3	3	0	0	115
Arauca	1.509	7.066	53	3	3	3	0	0	104
Putumayo	1.189	5.568	42	2	2	2	0	0	82
Chocó	548	2.566	19	1	1	1	0	0	38
Guaviare	416	1.948	15	1	1	1	0	0	29
Amazonas	173	810	6	0	0	0	0	0	12
Vichada	90	421	3	0	0	0	0	0	6
Vaupés	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Guainía	0	0	0	0	0	0	0	0	0

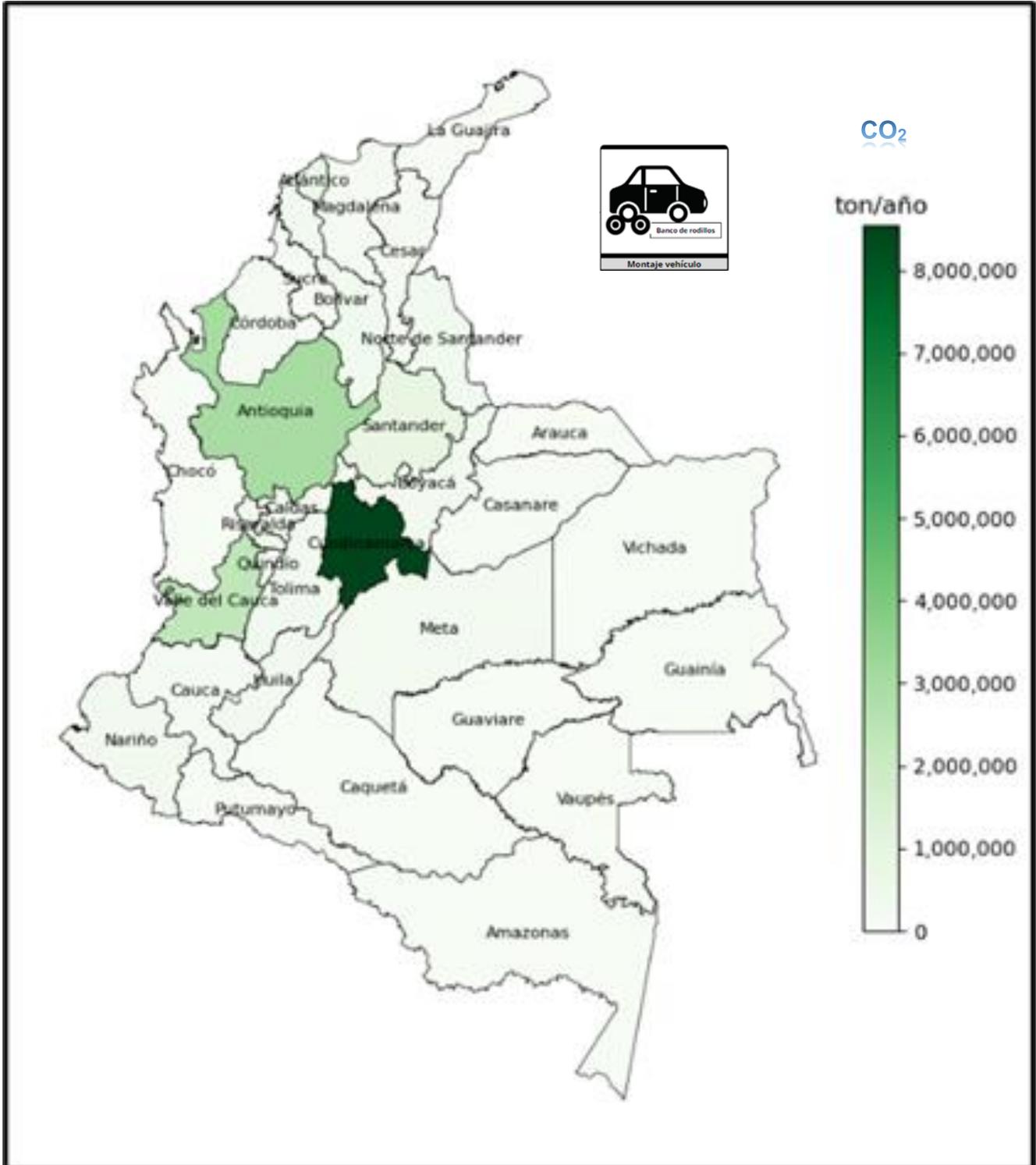


Figura 3.15. Inventario de emisión de CO₂ (ton/año) por departamento: vehículos livianos

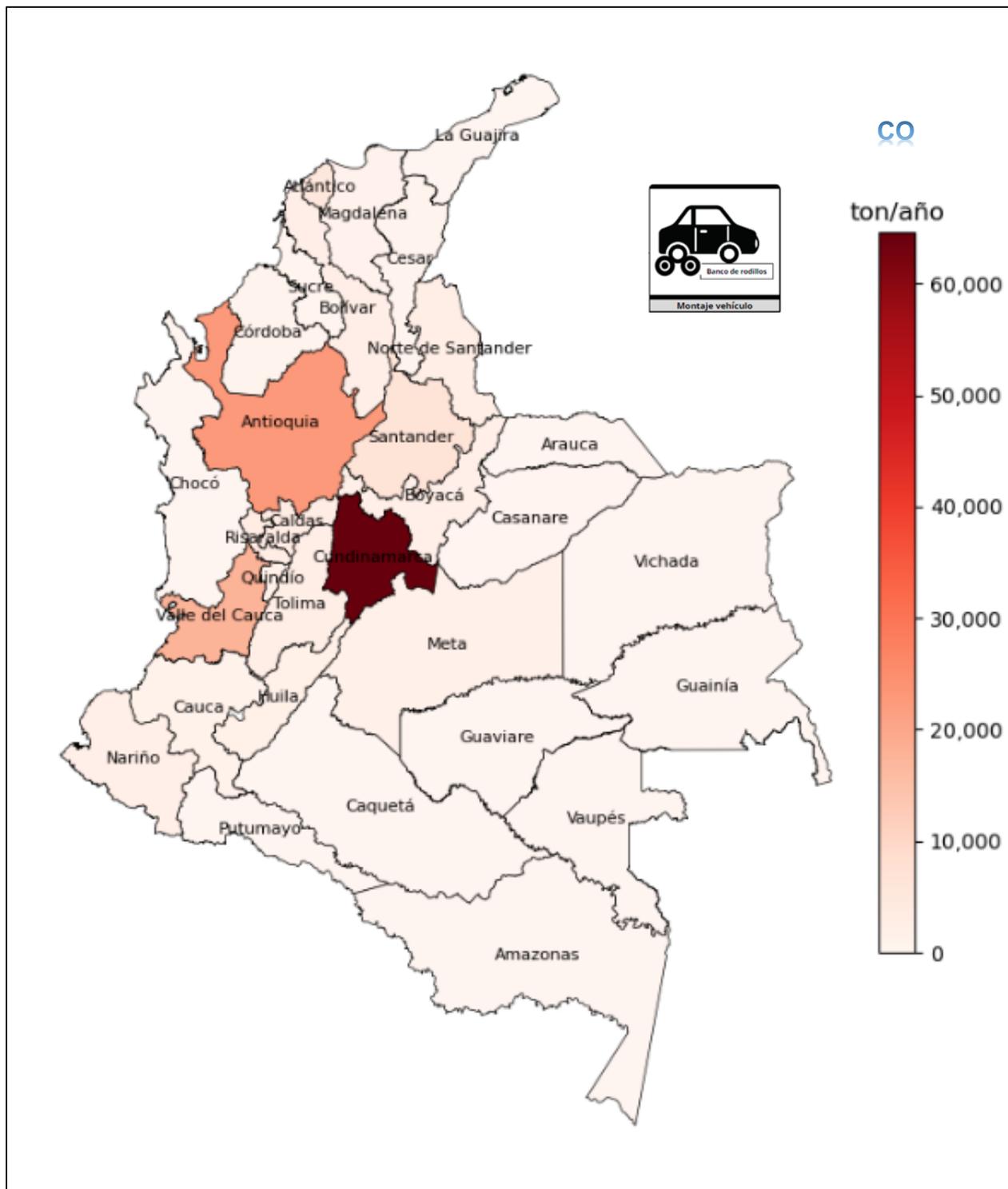


Figura 3.16. Inventario de emisión de CO (ton/año) por departamento: vehículos livianos

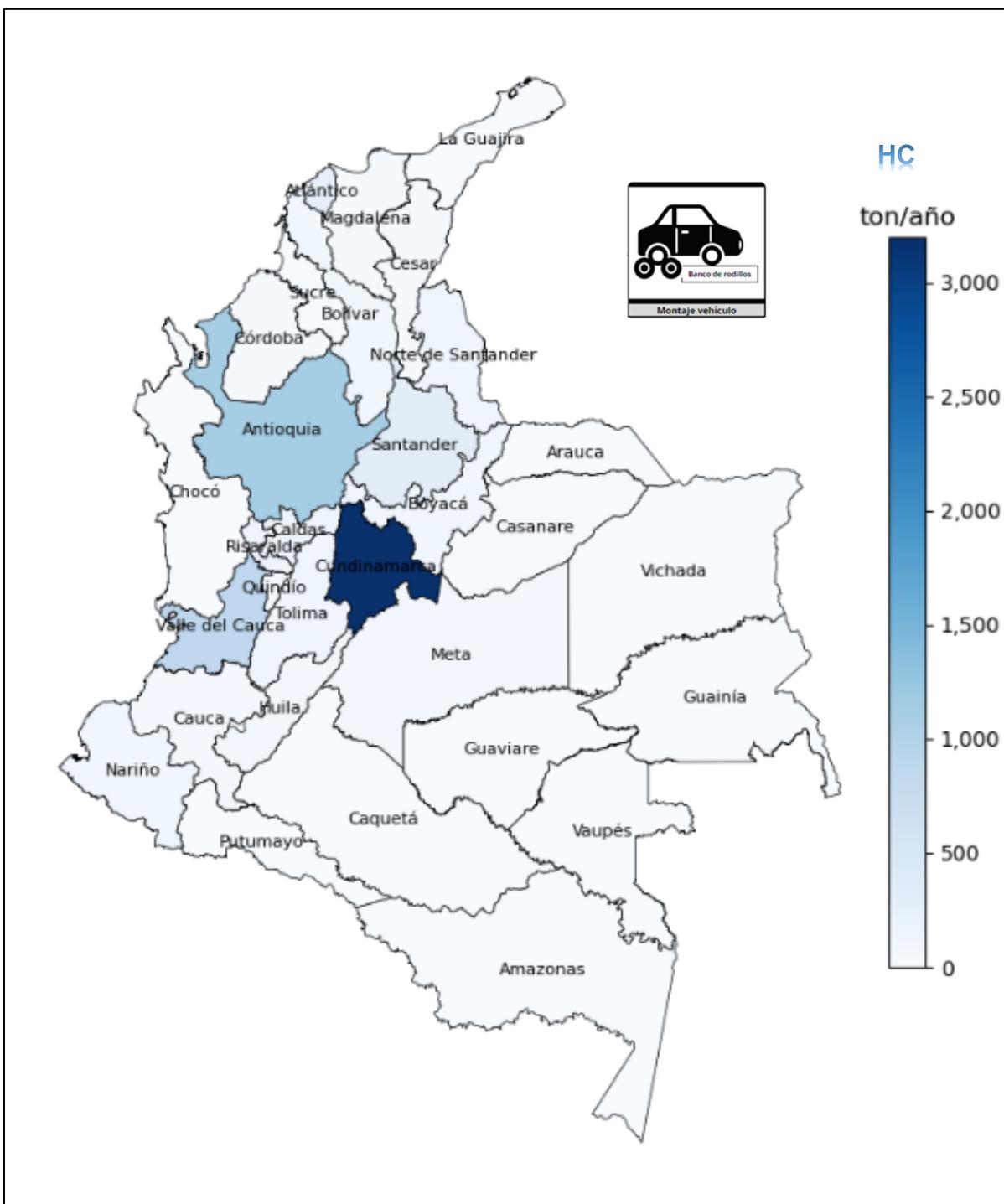


Figura 3.17. Inventario de emisión de HC (ton/año) por departamento: vehículos livianos

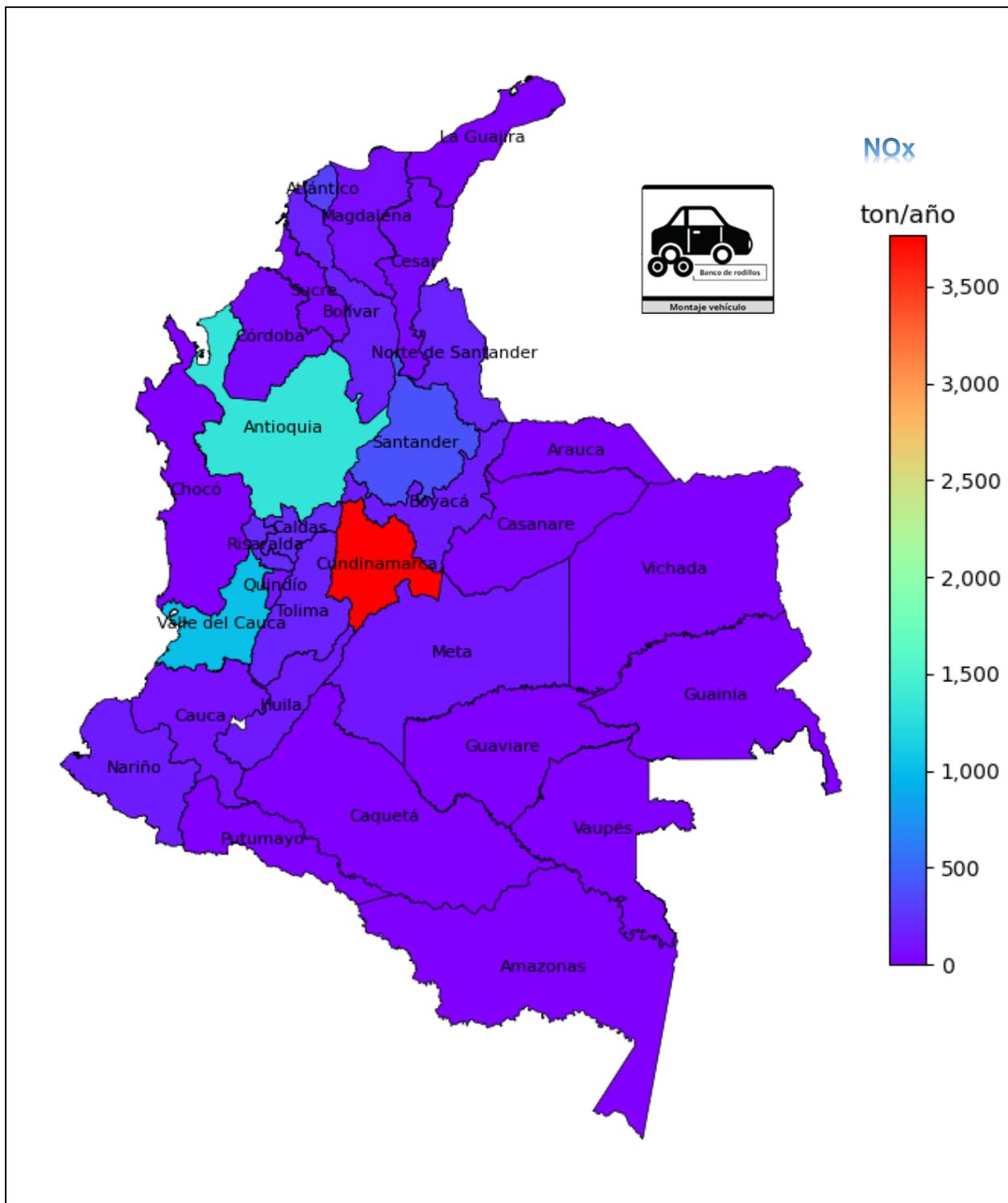


Figura 3.18. Inventario de emisión de NOx (ton/año) por departamento: vehículos livianos

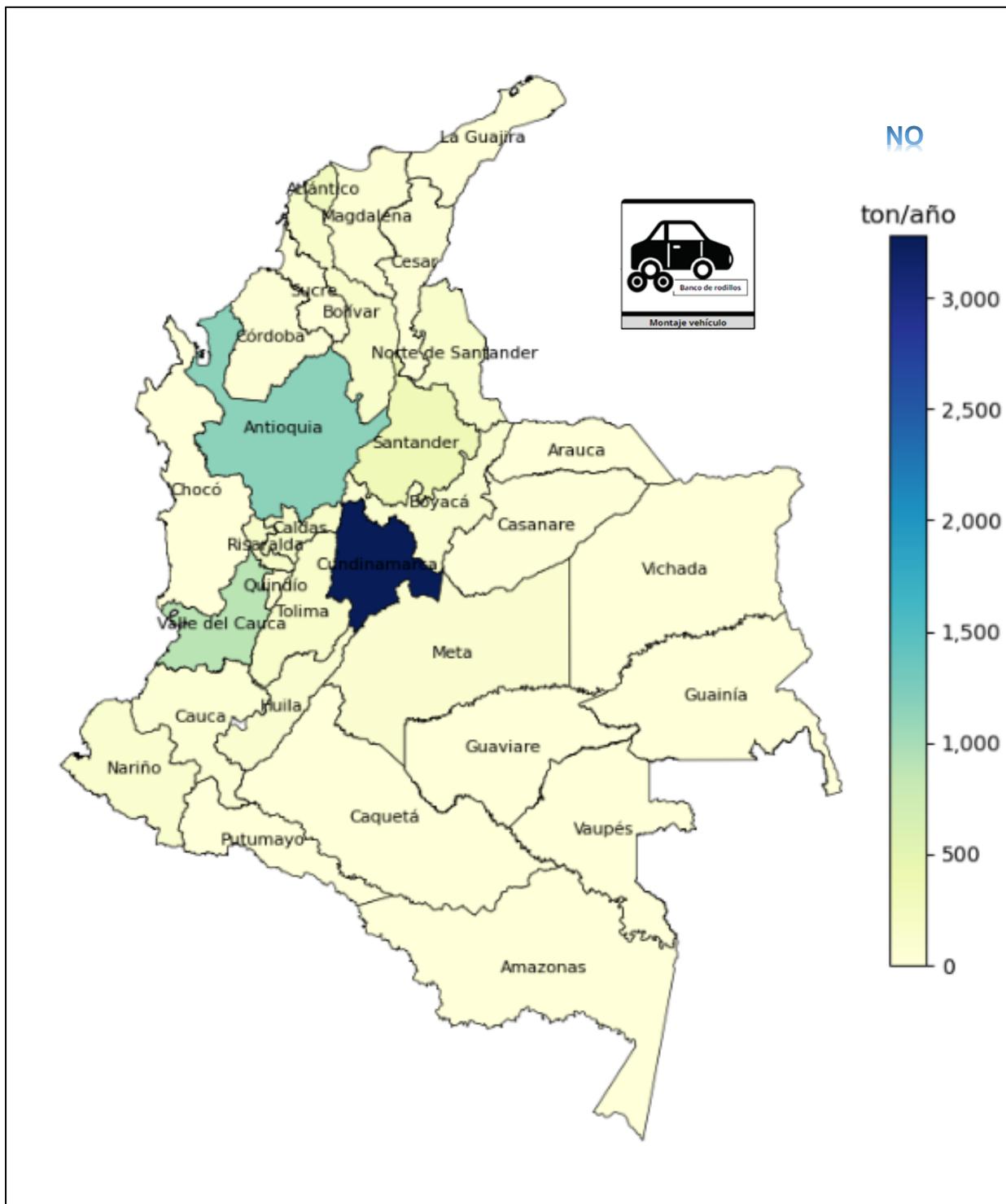


Figura 3.19. Inventario de emisión de NO (ton/año) por departamento: vehículos livianos

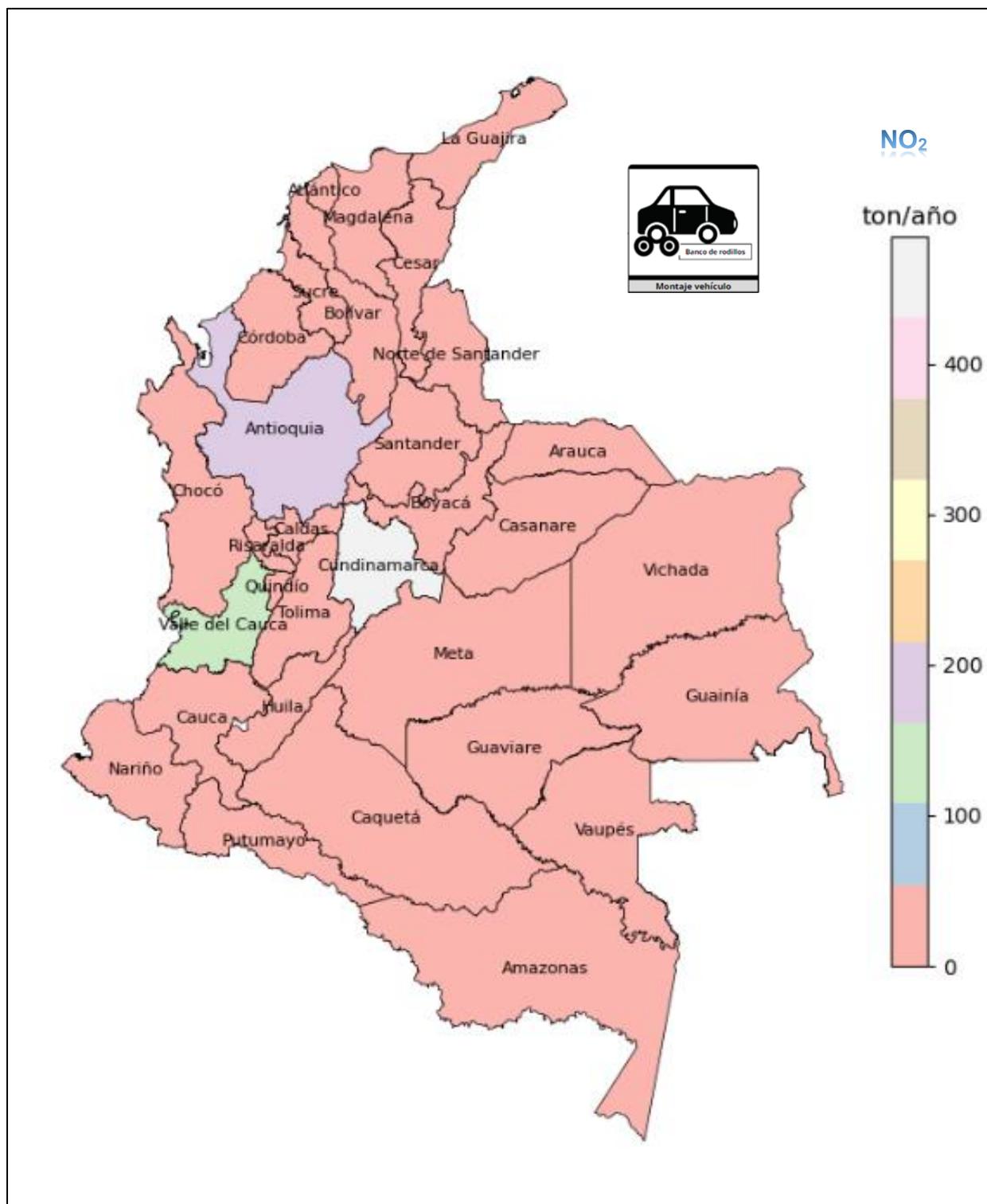


Figura 3.20. Inventario de emisión de NO₂ (ton/año) por departamento: vehículos livianos

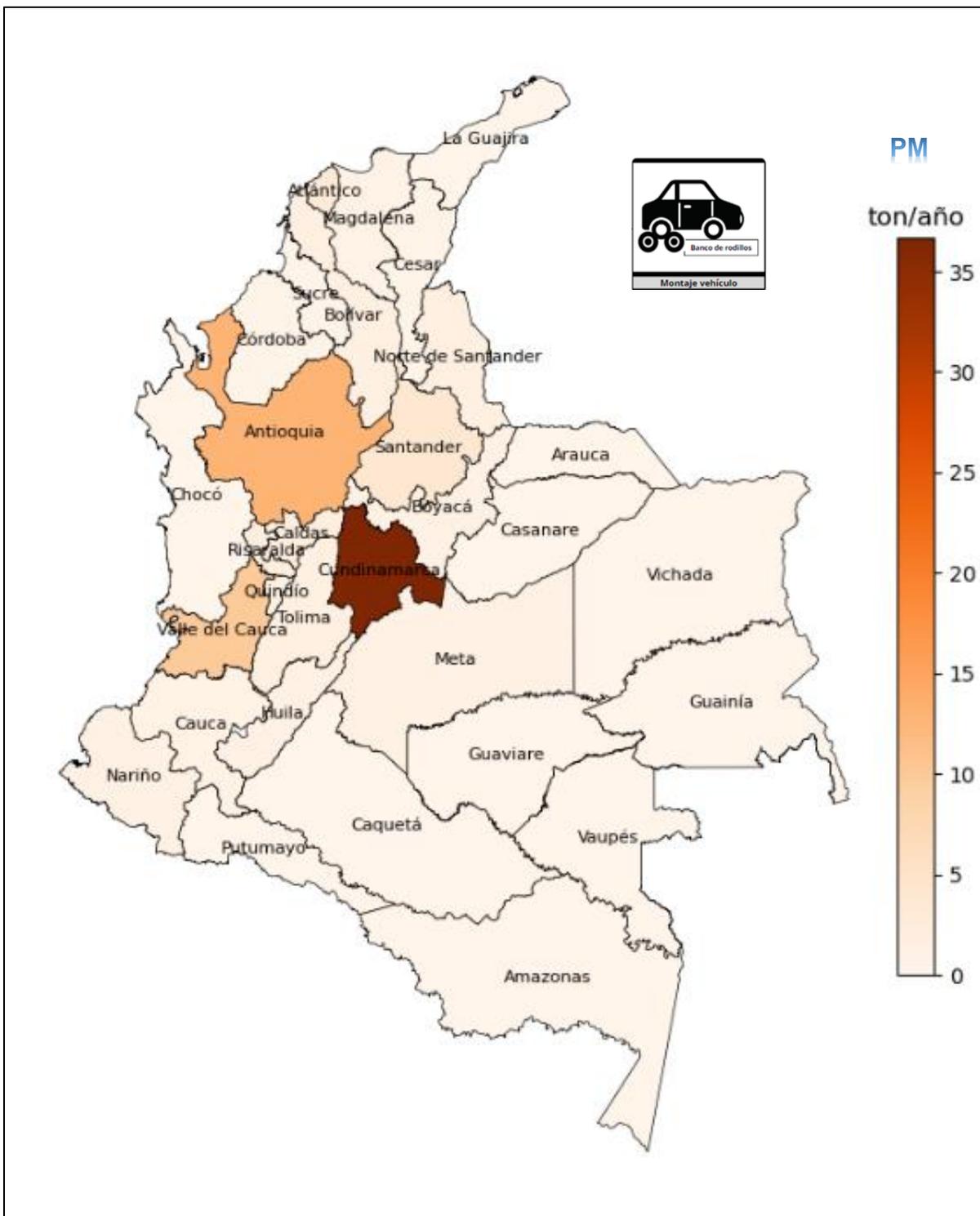


Figura 3.21. Inventario de emisión de PM (ton/año) por departamento: vehículos livianos

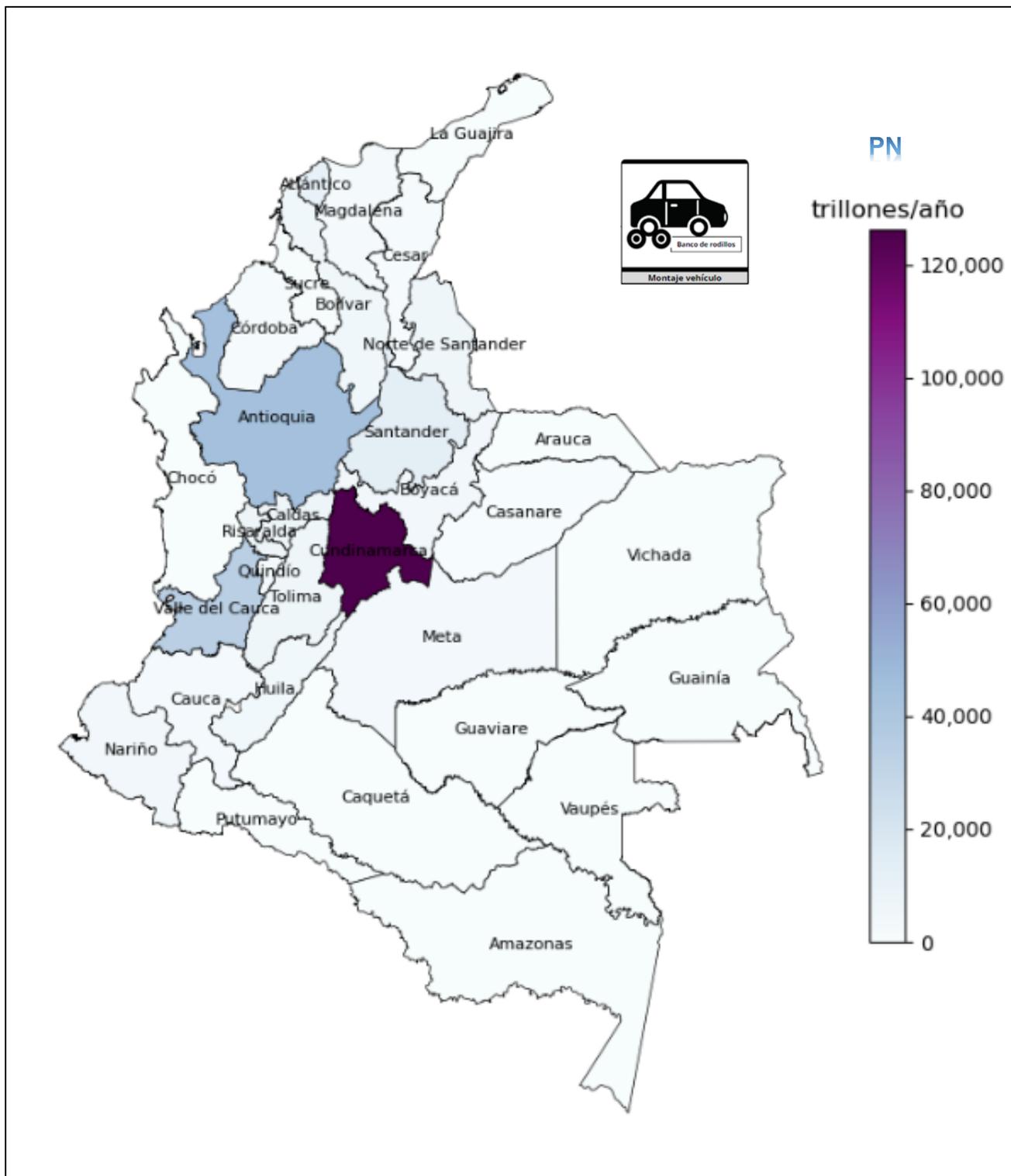


Figura 3.22. Inventario de emisión de PN (# trillones/año) por departamento: vehículos livianos

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, y bajo las condiciones en las cuales se llevaron a cabo las mediciones en este convenio, se concluye que

1. Colombia cuenta con la base de datos de factores de emisión medidos para las categorías de vehículos livianos incluidos automóviles, camperos y camionetas.
2. A mejor tecnología de suministro de combustible (inyección directa de gasolina -GDI-, y Euro 6 en diésel), más bajos son los factores de emisión y mayor el rendimiento en kilómetros/galón.
3. Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el consumo de combustible y en los factores de emisión entre las diferentes marcas de vehículos livianos.
4. El gas NO_2 , altamente tóxico y peligroso al ser humano, es emitido en cantidades del orden de 0,9 mg/km por vehículos livianos provistos con motor de encendido provocado (ciclo Otto), independientemente de su año de modelo, kilometraje, cilindrada y marca; mientras que los vehículos livianos diésel con tecnología Euro 5 y Euro 6 emitieron alrededor de 109 y 70 mg/km, respectivamente. Por su parte, el vehículo diésel Euro 4 emitió del orden de 300 mg/km. Como referencia, los vehículos diésel Euro 6 están limitados bajo prueba de homologación a emitir máximo 80 mg/km de óxidos de nitrógeno ($\text{NO} + \text{NO}_2$), mientras que los de ciclo Otto (encendido por chispa) se limitan a máximo 60 mg/km, de los cuales el monóxido de nitrógeno (NO) puede alcanzar a representar alrededor del 80%. Por lo anterior, se recomienda, a la luz de estos resultados, que el gobierno explore la posibilidad de incluir el control de emisiones de óxidos de nitrógeno en pruebas técnicas periódicas de revisión de gases a los vehículos diésel.
5. Los vehículos con motor de encendido por compresión (ciclo diésel) emitieron significativamente menos CO y HC que su contraparte con motor de encendido provocado (ciclo Otto), no obstante, sus emisiones de óxidos de nitrógeno ($\text{NO} + \text{NO}_2$), y partículas, tanto en masa (PM), como PN, destacaron frente a toda la muestra de vehículos livianos medidos.
6. Si bien las motocicletas emiten del orden de 50 g CO_2 /km, y recorren alrededor de 130 km/gal de combustible (Capítulo 2), frente a los vehículos livianos que emiten del orden de 297 g CO_2 /km, y recorren en promedio 35 km/gal de combustible, la comparación por cada centímetro cúbico de cilindrada muestra que son más ineficientes las motocicletas. Es decir, se esperaría que una motocicleta de 150 cc emitiera 10 veces menos contaminantes, o recorriera 10 veces más kilómetro por cada galón de combustible que un vehículo que tuviera una cilindrada de 1500 cc.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sullivan, J. L., Baker, R. E., Boyer, B. A., Hammerle, R. H., Kenney, T. E., Muniz, L., Wallington, T. J. (2004). CO2 emission benefit of diesel (versus gasoline) powered vehicles.
- [2] Zhang, S., Wu, Y., Liu, H., Huang, R., Un, P., Zhou, Y., Hao, J. (2014). Real-world fuel consumption and CO2 (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China. *Energy*, 69, 247-257.
- [3] Wallington, T. J., Sullivan, J. L., Hurley, M. D. (2008). Emissions of CO2, CO, NOx, HC, PM, HFC-134a, N2O and CH4 from the global light duty vehicle fleet. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(2), 109-116.
- [4] Habib, G., Kumar, A., Sharma, A., Haider, M. (2017). On-road emissions of CO, CO2 and NOX from four wheeler and emission estimates for Delhi. *Journal of Environmental Sciences*, 53, 39-47.
- [5] Dimaratos, A., Tsokolis, D., Fontaras, G., Tsiakmaki, S., Ciuffo, B., Samaras, Z. (2016). Comparative evaluation of the effect of various technologies on light-duty vehicle CO2 emissions over NEDC and WLTP. *Transportation Research Procedia*, 14, 3169-3178.
- [6] Yang, L., Bernard, Y., Posada, F., German, J. (2018). Laboratory and on-road testing of exhaust emissions of two modern China 5 light-duty gasoline vehicles. ICCT: Hamburg, Germany.
- [7] Tung, H. D., Tong, H. Y., Hung, W. T., Anh, N. T. N. (2011). Development of emission factors and emission inventories for motorcycles and light duty vehicles in the urban region in Vietnam. *Science of the Total Environment*, 409(14), 2761-2767.
- [8] Park, G., Mun, S., Hong, H., Chung, T., Jung, S., Kim, S., Lee, T. (2019). Characterization of emission factors concerning gasoline, LPG, and diesel vehicles via transient chassis-dynamometer tests. *Applied Sciences*, 9(8), 1573.
- [9] FECOC+ Fase 1, 2020. John Ramiro Agudelo. Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+) Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_final_FECOC.pdf
- [10] FENALCO. 2023. Recuperado de <https://www.fenalco.com.co/blog/gremial-4/tag/informe-de-vehiculos-20>

CAPÍTULO 4

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA SOBRE LOS FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	140
2. IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA EN MOTOCICLETAS	141
3. IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA EN VEHÍCULOS LIVIANOS.....	145
3.1 Impacto de la tecnología de control de emisiones en motores diésel	147
4. CONCLUSIONES	149

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el análisis realizado sobre el impacto de la tecnología en el rendimiento de combustible y los factores de emisión de las 40 motocicletas y los 30 vehículos livianos medidos. La **Tabla 4.1** clasifica las categorías utilizadas en el análisis estadístico que se desarrollará en este capítulo. Como se busca evaluar únicamente el efecto de la Tecnología, se ha realizado un análisis de varianza simple, en el que parámetros como cilindrada, kilometraje y año de modelo no han sido considerados. En el caso de las motocicletas se analizó la tecnología de suministro de combustible (carburador o inyección electrónica) y el tipo de transmisión (Mecánica y Automática), mientras que en los vehículos livianos se evaluó la tecnología de suministro de combustible (inyección multipunto / inyección directa de gasolina), y tipo de transmisión.

Tabla 4.1. Categorías y niveles para análisis estadístico para evaluación del impacto de la tecnología sobre el rendimiento de combustible y los factores de emisión

Categoría	Motocicletas		Vehículos livianos	
	Niveles		Niveles	
Alimentación	Carburadas (C)	Inyección (I)	Inyección Multipunto (MPI)	Inyección Directa de Gasolina (GDI)
Transmisión	Mecánica (M)	Automática (A)	Mecánica (M)	Automática (A)

Con base en las categorías y niveles de la **Tabla 4.1** se realizó el análisis estadístico de varianza simple (ANOVA) de la base de datos de factores de emisión y rendimiento de combustible medidos en este proyecto, donde se obtuvieron los valores **P** de la prueba *t* - *Student* mostrados en la **Tabla 4.2** (motocicletas) y **Tabla 4.3** (vehículos livianos). Se resaltan en color amarillo claro aquellos parámetros que mostraron efecto estadístico significativo (valor $P < 0.05$). En la **Figura 4.1** se muestran estos resultados de forma gráfica.

Tabla 4.2. Valores **P** – Prueba *t* – *Student* para las motocicletas medidas

Parámetro	Alimentación	Transmisión
Rendimiento [km/gal]	0,11	0,13
CO ₂ [g/km]	0,35	0,61
CO [g/km]	0,00	0,12
HC [mg/km]	0,00	0,54
NO [mg/km]	0,49	0,31
NO ₂ [mg/km]	0,09	0,25
PM [mg/km]	0,12	0,77
PN [10 ¹² #/km]	0,00	0,84

Tabla 4.3. Valores **P** – Prueba **t** – **Student** para los vehículos livianos medidos

Factor de emisión	Tecnología	Transmisión
Rendimiento [km/gal]	0.0436	0,40
CO ₂ [g/km]	0.1546	0,76
CO [g/km]	0.0654	0,85
HC [mg/km]	0.9596	0,72
NO [mg/km]	0.0948	0,32
NO ₂ [mg/km]	0.4715	0,41
PM [mg/km]	0.3185	0,25
PN [# 10 ¹² /km]	0.2023	0,33

De este resultado se deduce que los parámetros de Tecnología que afectan de forma significativa fueron:

1. Para motocicletas: el tipo de alimentación de combustible (carburada/inyección electrónica) afectó al CO, HC y PN.
2. Para vehículos livianos, el tipo de alimentación de combustible (inyección multipunto/inyección directa de gasolina) afectó al rendimiento de combustible.

2. IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA EN MOTOCICLETAS

Las **Figura 4.1** a **4.3** muestran de manera esquemática el análisis estadístico de varianza simple (ANOVA) realizado sobre la muestra total de 40 motocicletas al parámetro alimentación de combustible (carburador o inyección electrónica), como forma de valorar el impacto de la tecnología sobre aquellos factores de emisión que fueron afectados significativamente (valores $P < 0.05$), es decir, CO, HC y PN.

La **Figura 4.1** muestra que las motocicletas menores a 200 cc de cilindrada, provistas con carburador, emiten alrededor de 7 veces más masa de monóxido de carbono (CO) por cada kilómetro recorrido que las de inyección electrónica de combustible bajo el ciclo de conducción colombiano, independientemente de la marca de la motocicleta, del kilometraje y del año de modelo. Esto es válido inclusive, a pesar de que las motocicletas cumplan el mismo estándar de emisiones Euro 3, como es este caso.

La **Figura 4.2** muestra que las motocicletas menores a 200 cc de cilindrada, provistas con carburador, emiten alrededor de 3 veces más masa de hidrocarburos (HC) por cada kilómetro recorrido que las de inyección electrónica de combustible.

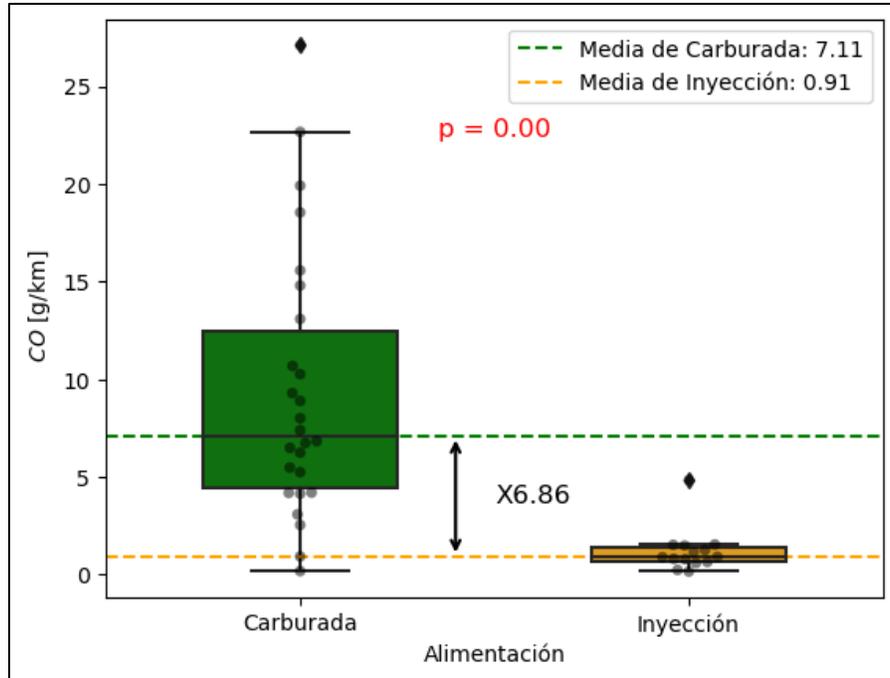


Figura 4.1. Impacto del tipo de tecnología de suministro de combustible sobre el factor de emisión de CO en motocicletas

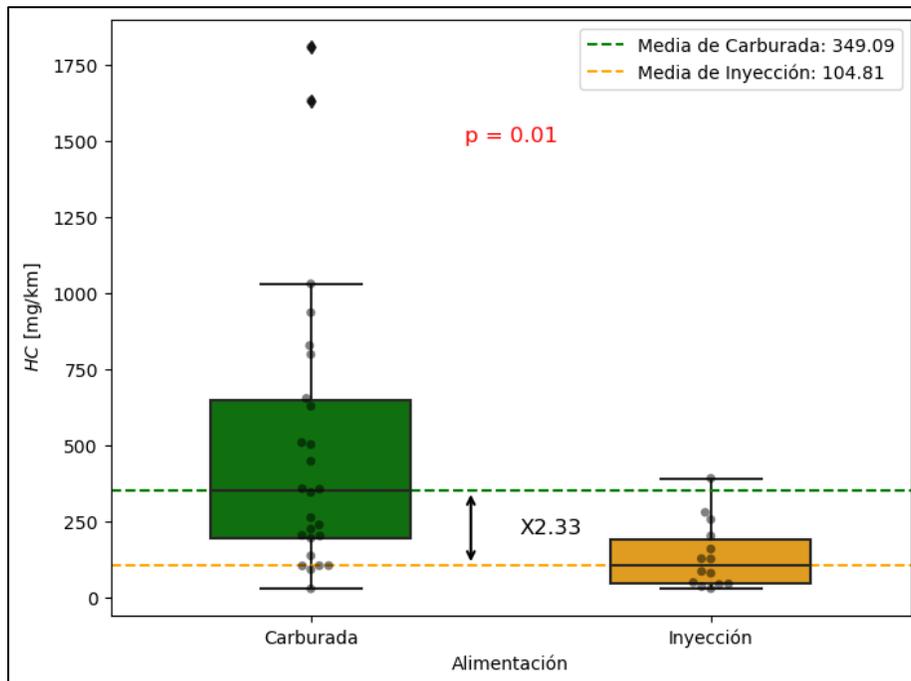


Figura 4.2. Impacto del tipo de tecnología de suministro de combustible sobre el factor de emisión de HC en motocicletas

La Resolución 0762 de julio de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, en su Capítulo I, Artículo 13 (Tabla 7) establece que las motocicletas nuevas que se vendan en el país a partir del 1º de enero de 2023 deben cumplir con los límites de emisiones que se muestran en la siguiente tabla (**Tabla 4.4**):

Tabla 4.4. Límites máximos permisibles de emisión para motocicletas (dos ruedas) con motor de encendido por chispa en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de la Unión Europea (ECE R-40 y ECE R-40 + EUDC, según corresponda) -Euro 3-

Categoría	Ciclo	CO	HC	NOx
		(g/km)	(g/km)	(g/km)
Cilindraje < 150cc	ECE R-40	2,0	0,8	0,17
Cilindraje ≥ 150 cc	ECE R-40 + EUDC	2,0	0,3	0,15

Los límites exigidos por la Resolución 0762 de 2022 corresponden a motocicletas nuevas, y se deben cumplir bajo los ciclos de conducción ECE R-40 (< 150cc) y ECE R-40 + EUDC (≥ 150 cc). Estos ciclos de conducción son diferentes a los de la UPME, los cuales recogen las pautas de conducción y particularidades de la malla vial y niveles de congestión de las principales ciudades colombianas, a saber, Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla. Normalmente, los ciclos de conducción locales son más agresivos que los de homologación, por eso, los factores de emisión suelen ser mayores. No obstante, los resultados de la **Figura 4.1** están mostrando que incluso bajo condiciones más exigentes, las motocicletas provistas con sistemas de inyección electrónica cumplirían sobradamente las exigencias de la regulación actual colombiana (Euro 3). Por su parte, la **Figura 4.2** muestra que ambos tipos de tecnología de suministro de combustible (carburada e inyección), cumplirían sobradamente con los estándares de emisión Euro 3. En promedio las motocicletas carburadas emitieron del orden de 0.35 g/km de HC, mientras que las de inyección del orden de 0.1 g/km.

Finalmente, la **Figura 4.3** muestra las emisiones de la concentración del número de partículas PN por cada kilómetro recorrido por las motocicletas. Una vez más, las motocicletas provistas con carburador emitieron más PN (del orden del doble en promedio) que las de inyección electrónica de combustible. Nuestro equipo PEMS mide partículas sólidas entre 10 y 250 nm por el método de descarga iónica en corona. Esto significa que una motocicleta emite entre 1 y 2 billones #/km de partículas de esos tamaños al ambiente. Probablemente, estas partículas se forman en la cámara de combustión por el aceite lubricante que no alcanza a quemarse, ya que la combustión premezclada de mezclas gasolina/aire, o gasolina mezclada con etanol + aire, no suele formar material particulado sólido.

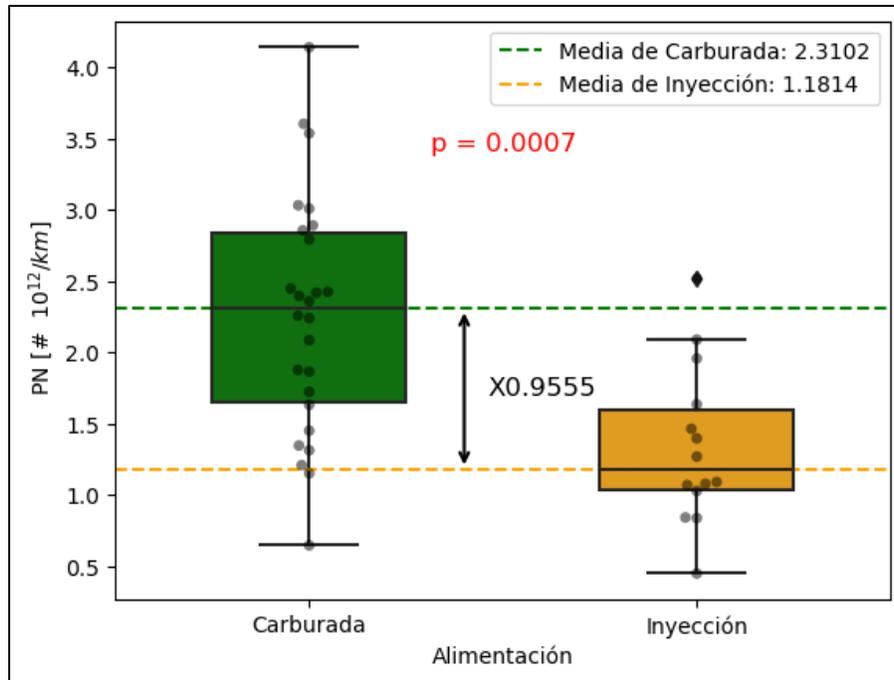
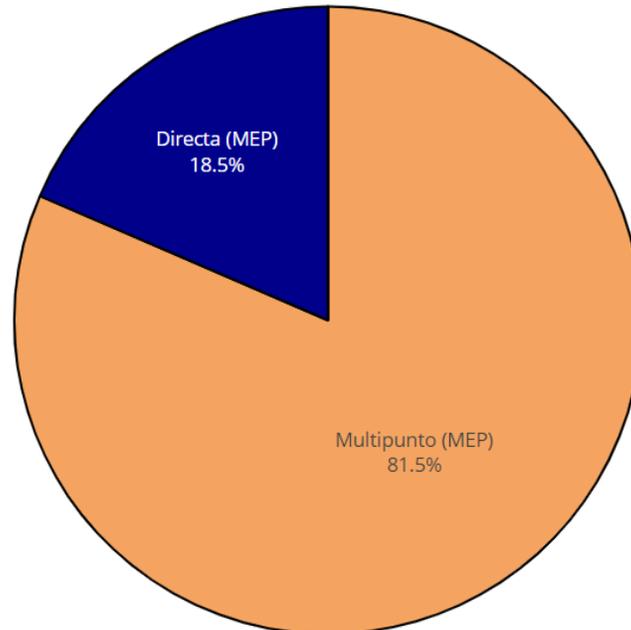


Figura 4.3. Impacto del tipo de tecnología de suministro de combustible sobre el factor de emisión de PN en motocicletas

De estos resultados se concluye que la tecnología de suministro de combustible NO afecta el rendimiento de combustible (km/gal) de las motocicletas, que en promedio según se mostró en el capítulo 2, para una motocicleta con menos de 200 cc de cilindrada suele ser del orden de 130 km/gal bajo ciclo de conducción UPME con estrategia de cambios de marcha NBR 6601. No obstante, los parámetros que se afectaron fueron los factores de emisión de CO, HC y PN, siendo menores para las motocicletas provistas con sistema de inyección electrónica.

3. IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA EN VEHÍCULOS LIVIANOS

La **Figura 4.4** muestra esquemáticamente los porcentajes de vehículos de inyección multipunto (81%) y de inyección directa de gasolina (19%) medidos en este proyecto, y que son representativos del mercado nacional.



Figurar 4.4. Distribución porcentual de los vehículos livianos con motor de encendido provocado (MEP) por tecnología de suministro de combustible

El análisis estadístico de varianza simple (ANOVA) arrojó que el único parámetro que se vio afectado (valor $P < 0.05$) fue el rendimiento de combustible (**Figura 4.5**). Si bien el valor medio de los vehículos provistos con sistema GDI (inyección directa de gasolina) es cercano a 35 km/gal, los datos presentaron amplia dispersión, destacando tres vehículos con valores mayores a 50 km/gal (Suzuki Baleno, Mazda 2 y Mazda 3). Los tres valores menores a 35 km/gal correspondieron a la categoría de camperos.

En la **Figura 4.6**, se muestra una comparación entre los resultados promedios obtenidos para los factores de emisión y rendimiento para vehículos livianos en función de la tecnología de inyección de combustible. Todos los factores de emisión y el rendimiento de vehículos con GDI presentan un mejor comportamiento que los vehículos MPI. Además, esto significa los vehículos GDI presentan mejor rendimiento de combustible y emiten menos masa de contaminantes por cada kilómetro que los de inyección multipunto (MPI).

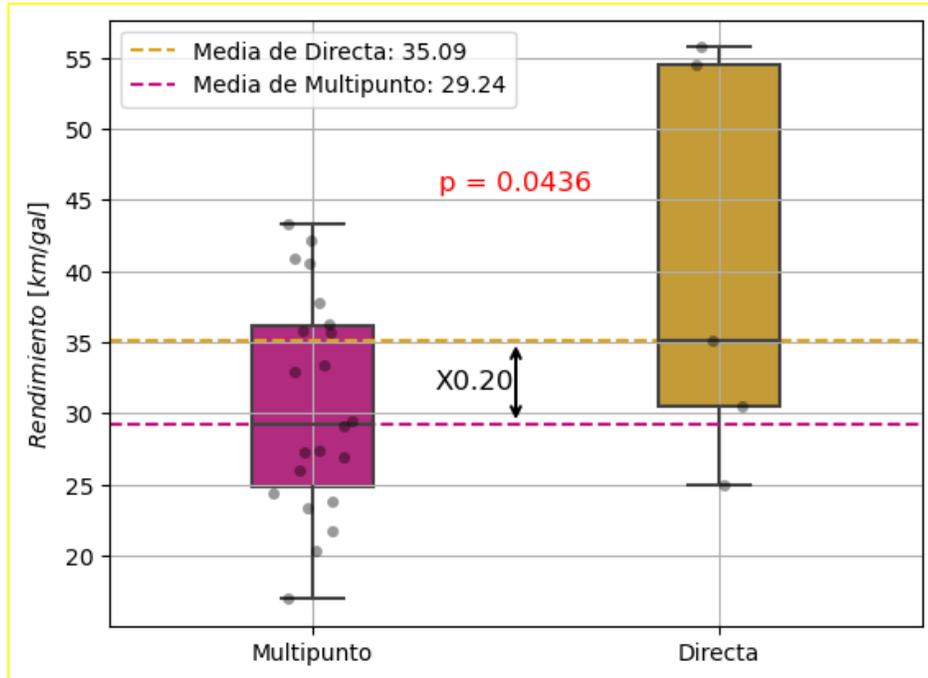


Figura 4.5. Impacto de la tecnología de suministro de combustible sobre el rendimiento de combustible en vehículos livianos con motor a ciclo Otto.

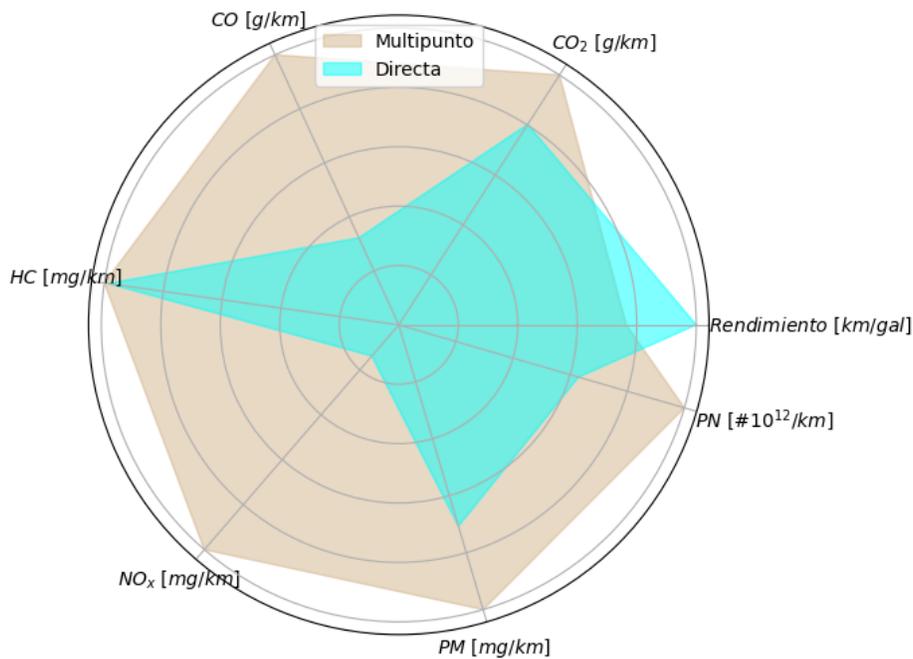


Figura 4.6. Vista esquemática del impacto de la tecnología de suministro de combustible sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos livianos con motor a ciclo Otto.

3.1 Impacto de la tecnología de control de emisiones en motores diésel

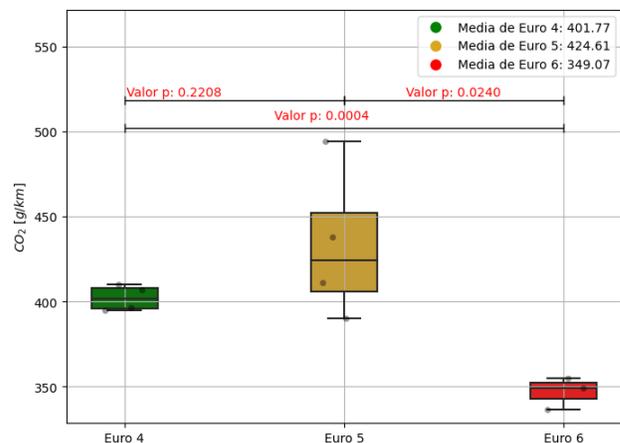
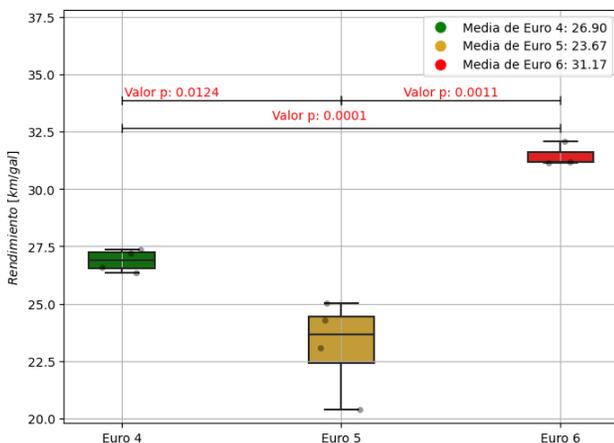
Se llevó a cabo un análisis estadístico de varianza simple (ANOVA) con el objetivo de determinar la existencia de diferencias significativas entre las medias de los factores de emisión y el rendimiento de combustible de los vehículos provistos con motores de encendido por compresión (MEC ó diésel), que se midieron durante el desarrollo del proyecto.

Se analizaron tres vehículos, los cuales se clasificaron según su tecnología de emisión: un Euro 4 (Mitsubishi Nativa), un Euro 5 y un Euro 6, los dos últimos corresponden a camionetas Foton Tunland.

Se aplicó la prueba estadística *t-Student* para cada categoría de camioneta MEC. El interés principal reside en entender el impacto de la tecnología de control de emisiones basada en las normas Euro, entre las tres camionetas. Los valores estadísticos del estudio se muestran en la **Tabla 4.5**. En este contexto, la norma de emisiones Euro fue estadísticamente significativa (valor $P < 0.05$) para todos los parámetros, excepto en el factor de emisión de material particulado al comparar la camioneta Euro 6 frente a la camioneta Euro 5. En la **Figura 4.7** se muestran los resultados gráficos obtenidos para las mediciones realizadas sobre cada vehículo de manera comparativa.

Tabla 4.5. Prueba *t-student* por categorías de vehículos MEC

Factor	Valor p		
	Euro 6 – Euro 5	Euro 6 – Euro 4	Euro 5- Euro 4
Rendimiento [km/gal]	0.0011	0.0001	0.0124
CO ₂ [g/km]	0.0240	0.0004	0.2208
CO [g/km]	0.0251	0.0196	0.0000
HC [mg/km]	0.0133	n.d.	n.d.
NO _x [g/km]	0.0000	0.0000	0.0054
NO [g/km]	0.0008	0.0000	0.0000
NO ₂ [mg/km]	0.0004	0.0000	0.0005
PM [mg/km]	0.9110	0.0000	0.0001
PN [# 10 ¹² /km]	0.0033	0.0000	0.0000



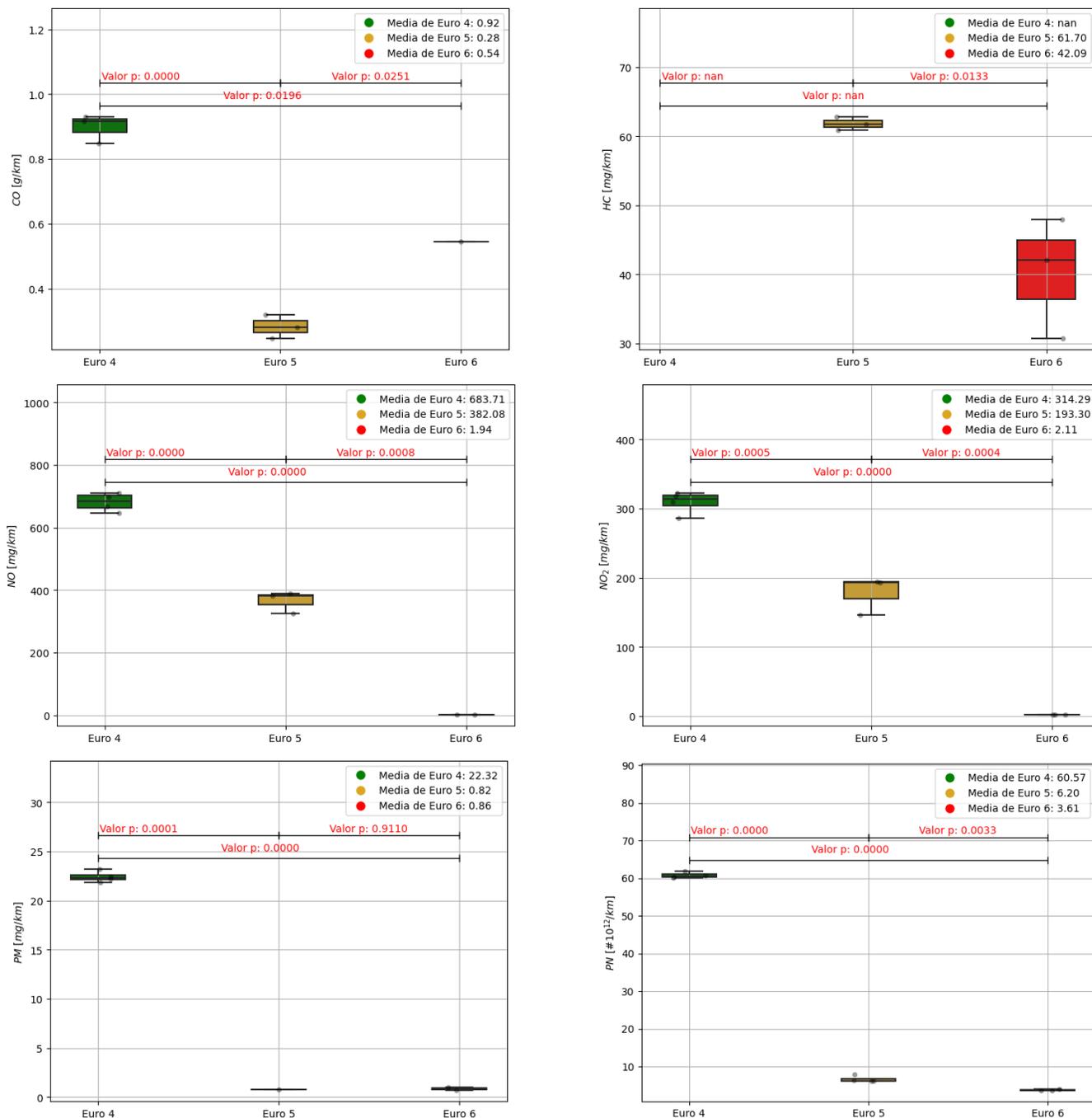


Figura 4.6. Rendimiento de combustible y factores de emisión por tecnología de control de emisiones Euro para las camiones con motor MEC.

4. CONCLUSIONES

Con base en los datos obtenidos, y bajo las condiciones en las que se llevaron a cabo las pruebas en este proyecto, se concluye que:

1. La tecnología de suministro de combustible NO afectó el rendimiento de combustible (km/gal) de las motocicletas, que en promedio según se mostró en el capítulo 2, para una motocicleta con menos de 200 cc de cilindrada es del orden de 130 km/gal bajo ciclo de conducción UPME con estrategia de cambios de marcha NBR 6601. No obstante, los parámetros que se afectaron fueron los factores de emisión de CO, HC y PN, siendo menores para las motocicletas provistas con sistema de inyección electrónica.
2. La tecnología de inyección directa de gasolina (GDI) para vehículos livianos tipo automóviles mostró bondades de rendimiento de combustible significativamente en comparación con las clásicas tecnologías de inyección multipunto (MPI). No obstante, los camperos generaron una dispersión importante en los datos, bajando el valor promedio de consumo frente a los automóviles.
3. Aunque no mostraron diferencias estadísticamente significativas (valor $P < 0.05$), los factores de emisión (CO_2 , CO, HC, NO, NO_2 , PM y PN) fueron menores con los vehículos GDI en comparación con los MPI.
4. A excepción de las emisiones de CO, que de por sí son bajas para los motores diésel, el vehículo Euro 6 presenta mejores resultados en todos los factores de emisión y en rendimiento de combustible con diferencias estadísticamente significativas con respecto a las camionetas Euro 4 y Euro 5.
5. Las emisiones de partículas se reducen drásticamente para los motores diésel con tecnología Euro 6 frente a las tecnologías Euro 4, disminuyendo en más de 90%.
6. Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) disminuyen de manera lineal con la mejora en la tecnología, siendo significativamente reducidas por la tecnología Euro 6.

CAPÍTULO 5

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

IMPACTO DE LOS DIFERENTES EVENTOS DE CONDUCCIÓN SOBRE LOS FACTORES DE EMISIÓN

CONTENIDO

1. Determinación de eventos de conducción.....	152
2. Efecto de los eventos de conducción – Flujos máxicos.....	153
3. Efecto de los eventos de aceleración	159
4. CONCLUSIONES.....	167

1. Determinación de eventos de conducción

Se comenzó por filtrar la señal de velocidad, la cual presenta cambios discretos, los cuales conducen a valores irreales de aceleración. Una vez se tienen datos de velocidad filtrada, es posible calcular la aceleración para cada prueba, lo cual se hizo mediante diferenciación numérica con un esquema de diferencias finitas de segundo orden.

Una vez se calcula la aceleración, es posible usarla en la determinación de los eventos de conducción, según las reglas mostradas en la **Tabla 5.1**, donde a se refiere a aceleración, y V a velocidad.

Tabla 5.1. Reglas para identificar los eventos de conducción.

Tipo de evento	Condición
Ralenti	$V = 0$
Aceleración	$a > 0$
Deceleración	$a < 0$

Los eventos identificados son ralenti (marcha mínima: vehículo detenido con el motor encendido), aceleración (el vehículo se mueve aumentando su velocidad), y deceleración (el vehículo se mueve disminuyendo su velocidad).

Usando estos criterios anteriores pudo discriminar cada prueba realizada en los tres tipos de eventos mencionados. Después de discriminar los datos por eventos de conducción, se hizo una depuración, para considerar en la etapa posterior, únicamente aquellos eventos que tengan una duración mayor o igual a 5 segundos. Esto se debe a que las emisiones contaminantes se miden con una frecuencia de un dato por segundo, y de este modo se garantiza que haya suficiente información para caracterizar cada evento de conducción.

La **Tabla 5.2** presenta un resumen con el total de eventos de conducción relevantes para las pruebas del proyecto realizadas en la ciudad de Medellín, pues como se muestra más adelante, en el capítulo 6, no hubo un efecto significativo de la altitud sobre el rendimiento de combustible y sobre las emisiones contaminantes de las motocicletas y los vehículos livianos.

Tabla 5.2. Resumen de los eventos de conducción.

Categoría	Cant. Ev. ralenti	Cant. Ev. acel.	Cant. Ev. decel.
Motocicletas	1532	9688	9622
Vehículos livianos	1543	6879	6608
Total	3075	16567	16230

Como se observa en la tabla anterior, en total hay 3075 eventos de ralenti, 16567 de aceleración y 16230 de deceleración, todos con una duración mínima de 5 segundos. Se tienen 1532 eventos de ralenti para motocicletas y 1543 para vehículos livianos. Por otro lado, se identificaron 9688 eventos de aceleración para motocicletas y 6879 para vehículos livianos, mientras que los eventos de

deceleración fueron 9622 para motocicletas y de 6608 para vehículos livianos. En total se identificaron 35872 eventos de conducción, cada uno con suficientes datos instantáneos para caracterizar su recorrido, consumo de combustible, y emisiones contaminantes.

Para cada uno de estos eventos se identificaron los flujos másicos y la distancia recorrida, para calcular los valores totales de cada emisión (en gramos, miligramos, y número) y determinar los valores característicos para el evento, dividiendo estos totales por la duración, lo cual resulta en unidades de flujo másico (g/s), y por la distancia recorrida (g/km). Los totales de cada variable se determinaron mediante integración numérica, usando las reglas de integración de Simpson.

En el caso de los eventos de ralenti, la distancia recorrida es cero, debido que durante éstos los vehículos están detenidos. Por lo tanto, en este caso sólo es posible calcular las variables en unidades de g/s (para consumo de combustible y emisiones de CO₂), mg/s (para las demás emisiones gaseosas y masa de partículas, PM), y #/s (para número de partículas, PN). Con el fin de comparar con los eventos de aceleración y deceleración, se hace un primer análisis basado en los flujos másicos.

Los eventos de aceleración y deceleración tienen asociados desplazamientos de los vehículos, por lo que en estos casos si es posible usar las unidades de km/gal (para el rendimiento de combustible), g/km (para CO₂) y mg/km (para las demás emisiones gaseosas y PM), y #/km (para PN). En este caso se calcularon también algunos parámetros dinámicos de los eventos de conducción, tales como velocidades y aceleraciones medias y máximas, así como su duración y la distancia recorrida.

2. Efecto de los eventos de conducción – Flujos másicos

En esta sección se comparan los flujos másicos de combustible y emisiones contaminantes para los eventos de ralenti, aceleración y deceleración. La comparación se realiza mediante análisis de varianza, para determinar si los valores representativos de cada tipo de evento son diferentes entre sí con significancia estadística (del 95%).

Dada la gran cantidad de datos, no es recomendable usar pruebas estadísticas para determinar si la distribución de los residuales es normal. En este caso lo más conveniente es usar el diagrama cuartiles (*qq plot* en inglés), ya que éste permite identificar de forma rápida y sin incertidumbres, si los residuales tienen distribución normal. En la **Figura 5.1** se muestran los diagramas *q-q* para las variables de interés, correspondientes a la categoría de motocicletas, y en la **Figura 5.2** se muestran los correspondientes a vehículos livianos.

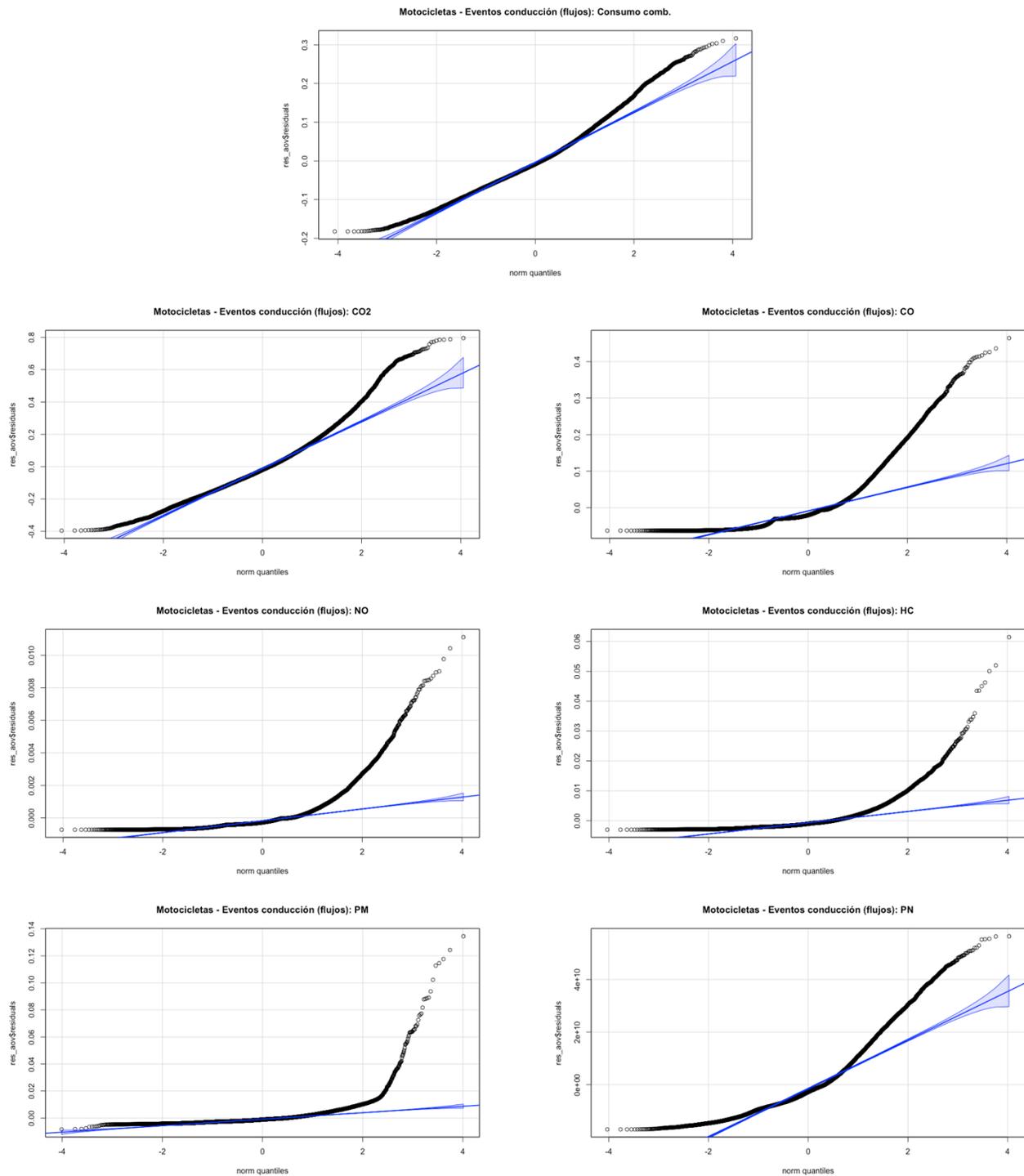


Figura 5.1. Diagramas qq-plot para motocicletas

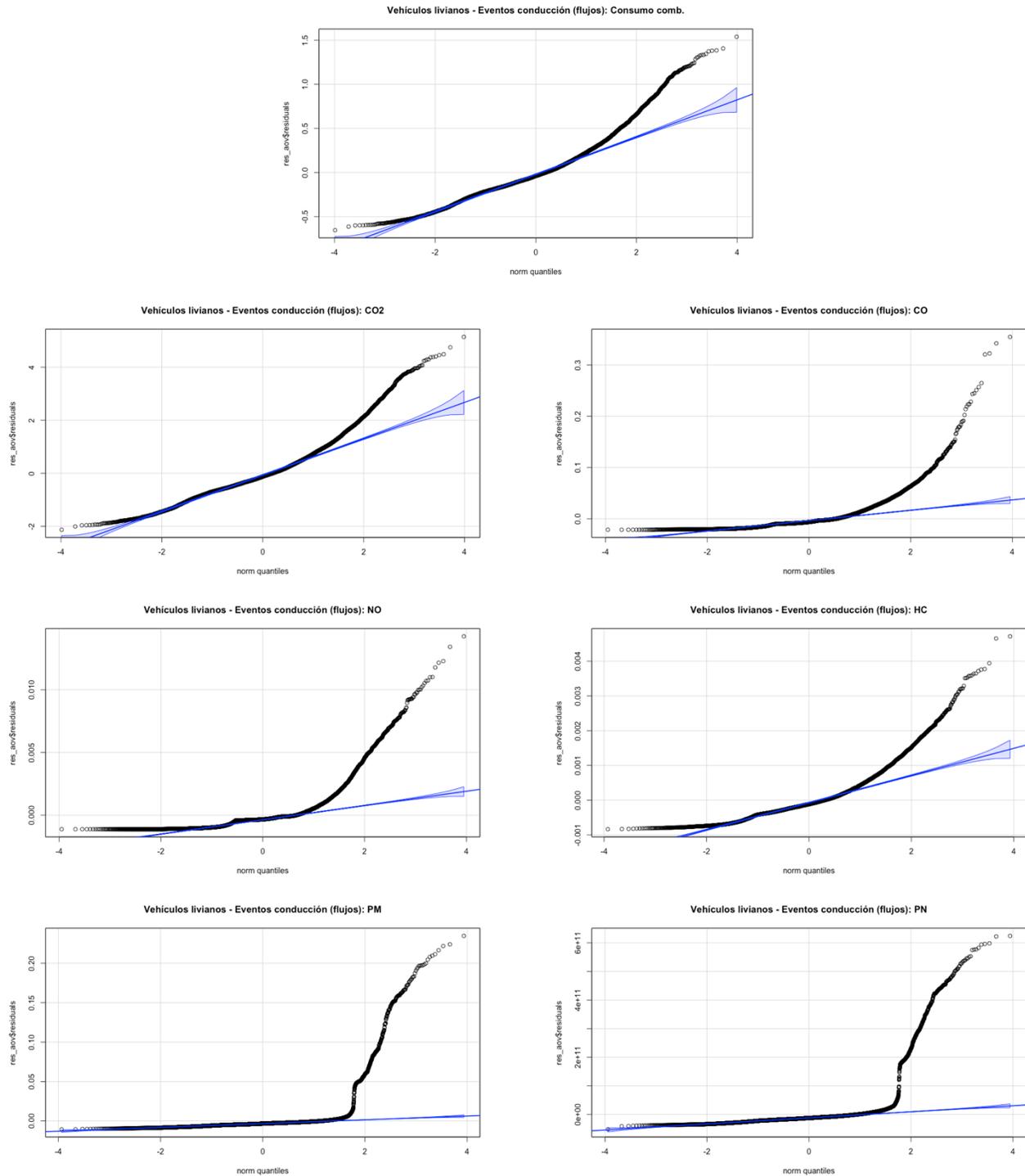


Figura 5.2. Diagramas qq-plot para vehículos livianos

Los resultados de estas dos figuras permiten concluir con seguridad que ninguna de las variables tiene sus residuales distribuidos de forma normal, ya que en todos los casos se observan desviaciones significativas de la línea diagonal (normalidad teórica) y gran cantidad de datos están por fuera de la banda de tolerancia, especialmente en los extremos.

Debido que no se cumple normalidad en la distribución, se empleó una prueba no paramétrica (*Kruskal-Wallis*) para determinar si hay diferencia significativa entre al menos dos de las medianas que representan cada evento de conducción. En todos los casos se obtuvo un valor p por debajo de 0.05, lo cual significa que al menos dos de las medianas fueron diferentes con una confianza del 95%.

El siguiente paso consistió en realizar un análisis *post-hoc*, mediante otra prueba no paramétrica (prueba de Dunn), para determinar la diferencia significativa entre ralenti y aceleración, ralenti y deceleración, y aceleración y deceleración. En este caso, cuando la diferencia es significativa, el valor p resultante es menor a 0.05, y mayor a este valor en caso contrario.

Se analizó cada una de las variables para cada categoría vehicular, y en todos los casos se obtuvieron los resultados numéricos y gráficos de los análisis. A modo de ejemplo, en la **Figura 5.3** se presentan los resultados para el consumo de combustible de los eventos de conducción en motocicletas.

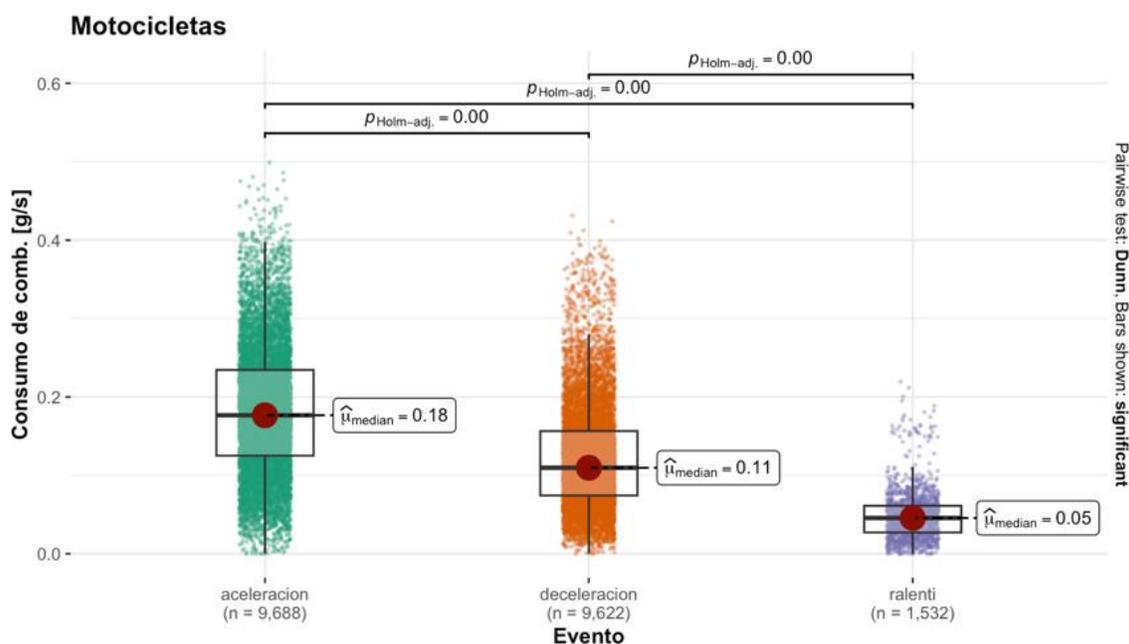


Figura 5.3. Emisiones de PM de tractocamiones

A pesar de que hay una dispersión significativa en cada grupo de datos, se observa una tendencia clara, y existe diferencia estadística significativa entre las medianas de los tres eventos de conducción, ya que los valores p hallados son todos menores a 0.05.

En la **Tabla 5.3** se presentan los resultados de los flujos para todas las variables analizadas. Los valores reportados en esta tabla corresponden a las medianas de cada muestra, ya que no se cumplió en ningún caso la hipótesis de distribución normal de los residuales. Se observa que los flujos siempre son significativamente mayores para los eventos de aceleración que para los de deceleración, y estos flujos a su vez, son mayores que los correspondientes a los eventos de ralenti.

Tabla 5.3. Resultados de flujos máxicos de los eventos de conducción

Categoría	Evento	Comb. [mg/s]	CO ₂ [mg/s]	CO [mg/s]	NO [mg/s]	HC [mg/s]	PM [mg/s]	PN [# x 10 ¹⁰ /s]
Motocicletas	Acel.	177	387	25.4	0.295	1.66	0.0031	1.261
	Decel.	110	241	10.3	0.168	1.06	0.0018	0.711
	Ralenti	45.7	99.9	1.4	0.025	0.29	0.0006	0.233
Vehículos livianos	Acel.	685	2230	9.30	0.284	0.659	0.0042	1.885
	Decel.	333	1080	4.35	0.114	0.360	0.0021	0.950
	Ralenti	193	627	1.73	0.034	0.203	0.0012	0.526

La **Tabla 5.4** presenta los valores p de las comparaciones de las medianas de los flujos de los tres eventos de conducción. Un valor p menor que 0.05 significa que las medianas son diferentes con una confianza estadística del 95%, y que no lo son en caso contrario.

Tabla 5.4. Diferencia estadística entre los flujos para los eventos de conducción.

Categoría	Comparación	Combustible	CO ₂	CO	NO	HC	PM	PN
Motocicletas	Acel. – Decel.	0	0	2.03×10^{-191}	1.42×10^{-110}	1.21×10^{-78}	1.81×10^{-197}	1.89×10^{-229}
	Acel. – Ral.	0	0	0	0	1.19×10^{-285}	0	0
	Decel. – Ral.	0	6.45×10^{-281}	2.37×10^{-169}	5.31×10^{-281}	6.19×10^{-152}	1.87×10^{-207}	2.74×10^{-261}
Vehículos livianos	Acel. – Decel.	0	0	1.63×10^{-143}	2.95×10^{-142}	1.38×10^{-212}	4.90×10^{-243}	5.05×10^{-248}
	Acel. – Ral.	0	0	4.54×10^{-307}	0	4.24×10^{-301}	1.26×10^{-306}	0
	Decel. – Ral.	7.46×10^{-178}	5.23×10^{-176}	1.37×10^{-105}	2.13×10^{-109}	1.52×10^{-72}	2.94×10^{-65}	2.72×10^{-69}

Los resultados de esta tabla son todos significativamente menores a 0.05. Por lo tanto, se puede concluir con una confianza estadística del 95%, que los flujos para los eventos de aceleración son diferentes a los correspondientes a deceleración y a los correspondientes a ralenti. También se puede decir lo mismo de los flujos correspondientes a deceleración, con respecto a los de ralenti. Este resultado permite usar directamente las medianas reportadas en la **Tabla 5.3** para analizar el comportamiento según el modo de conducción y la categoría vehicular. A continuación, se presentan gráficamente los principales resultados del análisis de flujos para los eventos de conducción. En la **Figura 5.4** se muestran los resultados para consumo de combustible y flujo de CO₂.

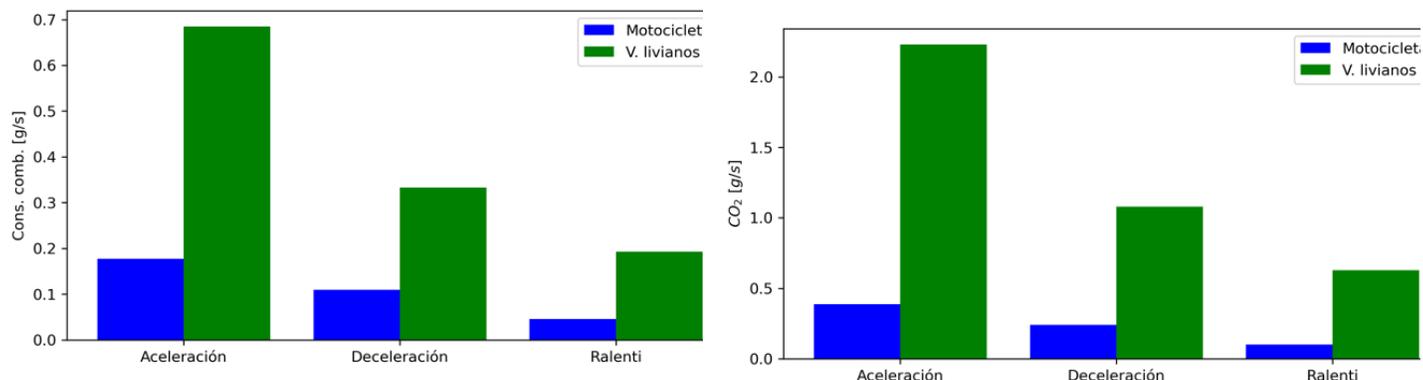


Figura 5.4. Efecto sobre flujos de combustible y de CO₂

Se observa que, para ambas categorías vehiculares, tanto el consumo de combustible como las emisiones de CO₂ son significativamente mayores para los eventos de aceleración, con respecto a deceleración. Además, los valores correspondientes a los eventos de deceleración son también mayores que los correspondientes a Ralenti. Este comportamiento es común a todas las variables analizadas. Durante los eventos de aceleración, no sólo se emite la mayor cantidad de CO₂ en todas las categorías, si no que se refleja la cilindrada del motor, la cual es mayor para vehículos livianos (más de 10 veces la cilindrada que para las motocicletas). La diferencia en el consumo de combustible entre motocicletas y vehículos livianos para los eventos de aceleración y deceleración es menor que la diferencia en cilindrada, lo cual muestra que en general, las motocicletas son menos eficientes que aquellos.

En el caso de los eventos de ralenti, se observa que, aunque el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ son las más bajas, están lejos de ser despreciables, por lo que influyen de forma significativa sobre el consumo y las emisiones totales de un viaje de un vehículo, de forma proporcional al tiempo que éste pase detenido con el motor encendido.

La **Figura 5.5** presenta los resultados de flujos máscicos (en mg/s) de emisiones de CO y de HC, ambas emisiones altamente perjudiciales para la salud humana.

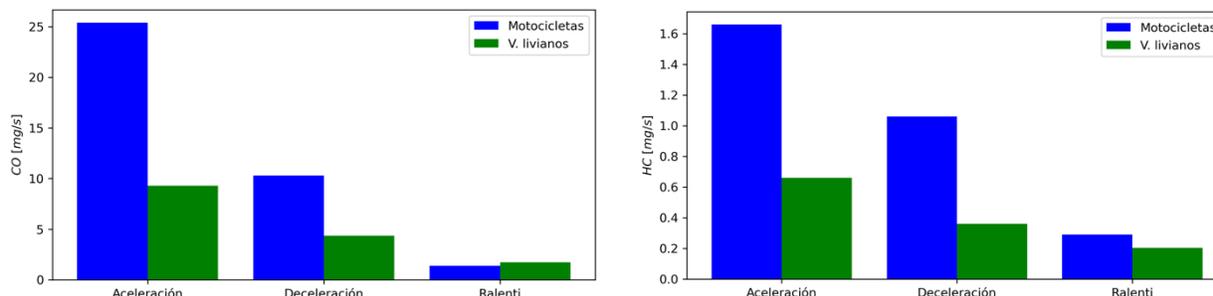


Figura 5.5. Efecto sobre flujos de CO y HC.

Se observa que los flujos de CO son significativamente más bajas que las de CO₂ (entre 15 y 70 veces menores). Sin embargo, son mayores en relación con vehículos pesados, en los cuales esta diferencia es superior a 150 veces. En el caso de los flujos de HC, éstos son alrededor de 230 veces menores que los de CO₂. En el caso de motores diesel, en vehículos pesados, esta diferencia es mayor a 1000 veces. Esto se debe a que los motores diesel tienen alta eficiencia de combustión, y a que operan con alto exceso de aire la mayor parte del tiempo (sólo dos los vehículos livianos de este proyecto tienen motor diesel), mientras que en los motores de encendido provocado (todas la motocicletas y todos los vehículos livianos, excepto dos, tienen este tipo de motor) la relación aire combustible es cercana a la estequiométrica, por lo cual estas emisiones son mayores que en motores diesel, pero gracias a los catalizadores, se mantienen en valores razonablemente bajos. A diferencia de lo que ocurre con vehículos pesados con motor diesel, se observa que las emisiones de HC varían de forma significativa con el tipo de evento de conducción, lo cual significa que se ven afectadas de forma significativa por la forma de conducir.

La **Figura 5.6** presenta los resultados correspondientes a NO (las emisiones NO₂ en todos los vehículos fueron muy bajas, de modo que no se incluyen en este análisis). Se observa que, para todos los eventos de conducción, el flujo de NO es muy bajo, lo cual es característico de los motores de encendido provocado.

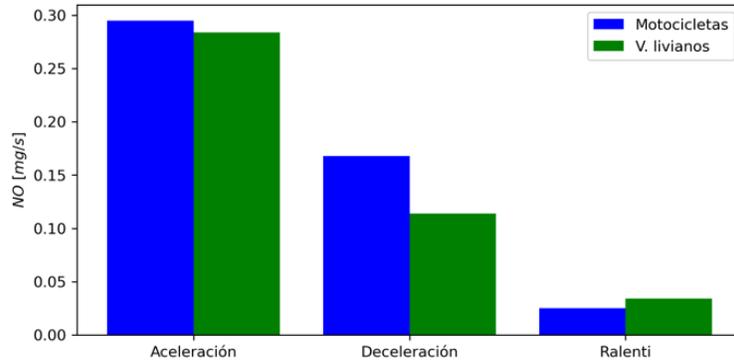


Figura 5.6. Efecto sobre flujos de NO.

Las emisiones de partículas se muestran en la **Figura 5.7**. Se observa que los flujos de partículas también están significativamente afectados por los eventos de conducción, y presentan la misma tendencia observada para las demás emisiones contaminantes, con relación al tipo de evento.

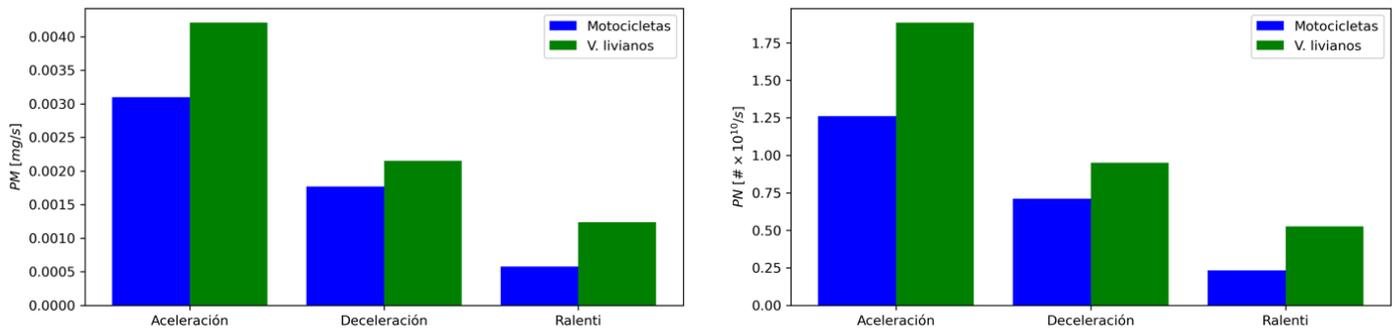


Figura 5.7. Efecto sobre flujos de partículas.

Los valores de flujo de partículas obtenidos para vehículos ligeros son aproximadamente 100 veces menores que los correspondientes a vehículos pesados de transporte de carga (camiones grandes y tractocamiones). Adicionalmente, se observa bastante similitud entre los flujos de partículas de motocicletas y vehículos livianos, lo cual es relevante, dada la gran diferencia en el tamaño de los motores.

3. Efecto de los eventos de aceleración

Como se vio en la sección anterior, con diferencia la mayor cantidad de emisiones contaminantes y de consumo de combustible ocurre en los eventos de aceleración de los vehículos. Por este motivo se realizó un análisis más detallado de dichos eventos. Considerando que el vehículo está en movimiento

cuando está acelerando, se puede tener en cuenta el recorrido de cada evento, y definir factores de emisión (FE) y rendimiento de combustible para cada evento, ya que se cuenta con la masa total de combustible / contaminante, así como con la distancia total recorrida durante el evento. Estos índices pueden tener valores atípicos cuando se comparan con los totales del ciclo de conducción, ya que los recorridos durante un evento en particular (recordar que éstos pueden durar pocos segundos) pueden ser de pocos metros, lo cual conduce a factores de emisión o rendimientos de combustible más altos de lo normal para un recorrido típico. Sin embargo, el comportamiento relativo entre eventos sigue siendo de valor para analizar cómo la agresividad en la conducción afecta al consumo de combustible y a las emisiones contaminantes.

Un análisis exploratorio de los datos de todos los eventos de aceleración mostró que éstos se pueden agrupar por intervalos de una variable adimensional, definida de la siguiente forma:

$$I_{accel} = \frac{a \times \Delta t}{V}$$

Este índice de aceleración tiene en el numerador el producto de la aceleración máxima (a) de cada evento de aceleración y su duración (Δt), y en el denominador la velocidad máxima del evento (V). Un mayor valor de este índice implica mayores aceleraciones relativas a la velocidad del vehículo, y por lo tanto más agresividad en la conducción. Por el contrario, un valor más bajo implica conducción más sosegada. Se encontró que hay un comportamiento diferenciado de los datos para ciertos rangos de valores de este índice, como se muestra a continuación. Esto se usó como criterio para definir tres tipos de eventos de aceleración: bajo, medio y alto.

Rango de I_{accel}	Evento
$I_{accel} > 1$	Alto
$0.3 \leq I_{accel} \leq 1$	Medio
$I_{accel} < 0.3$	Bajo

Para determinar la significancia estadística de los resultados, se siguió el mismo procedimiento que en la sección anterior: análisis de varianza y verificación de normalidad a los residuales de las muestras (diagramas *qq-plot*). En la **Figura 5.8** se presentan los diagramas usados para verificar el ajuste a una distribución normal en los residuales de los datos correspondientes a motocicletas, y en la **Figura 5.9** se muestran los correspondientes a vehículos livianos.

Ambas figuras muestran desviaciones significativas de la normalidad para una gran cantidad de datos, especialmente en los extremos, por lo cual se concluye que en ningún caso los residuales se distribuyen de forma normal. Por este motivo, se procede el análisis realizando pruebas no paramétricas, y usando las medianas de cada muestra como valores representativos.

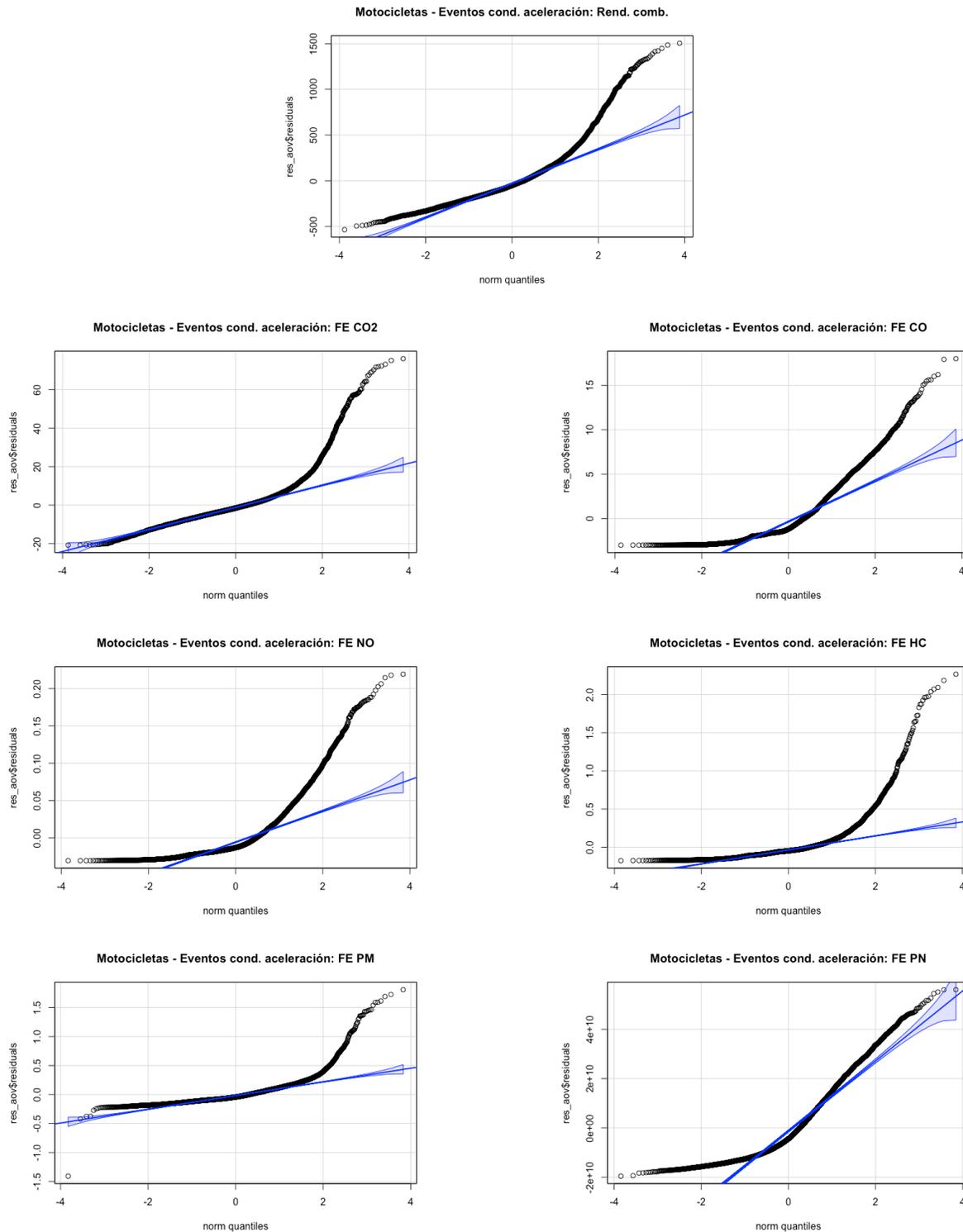


Figura 5.8. Diagramas qq-plot para motocicletas

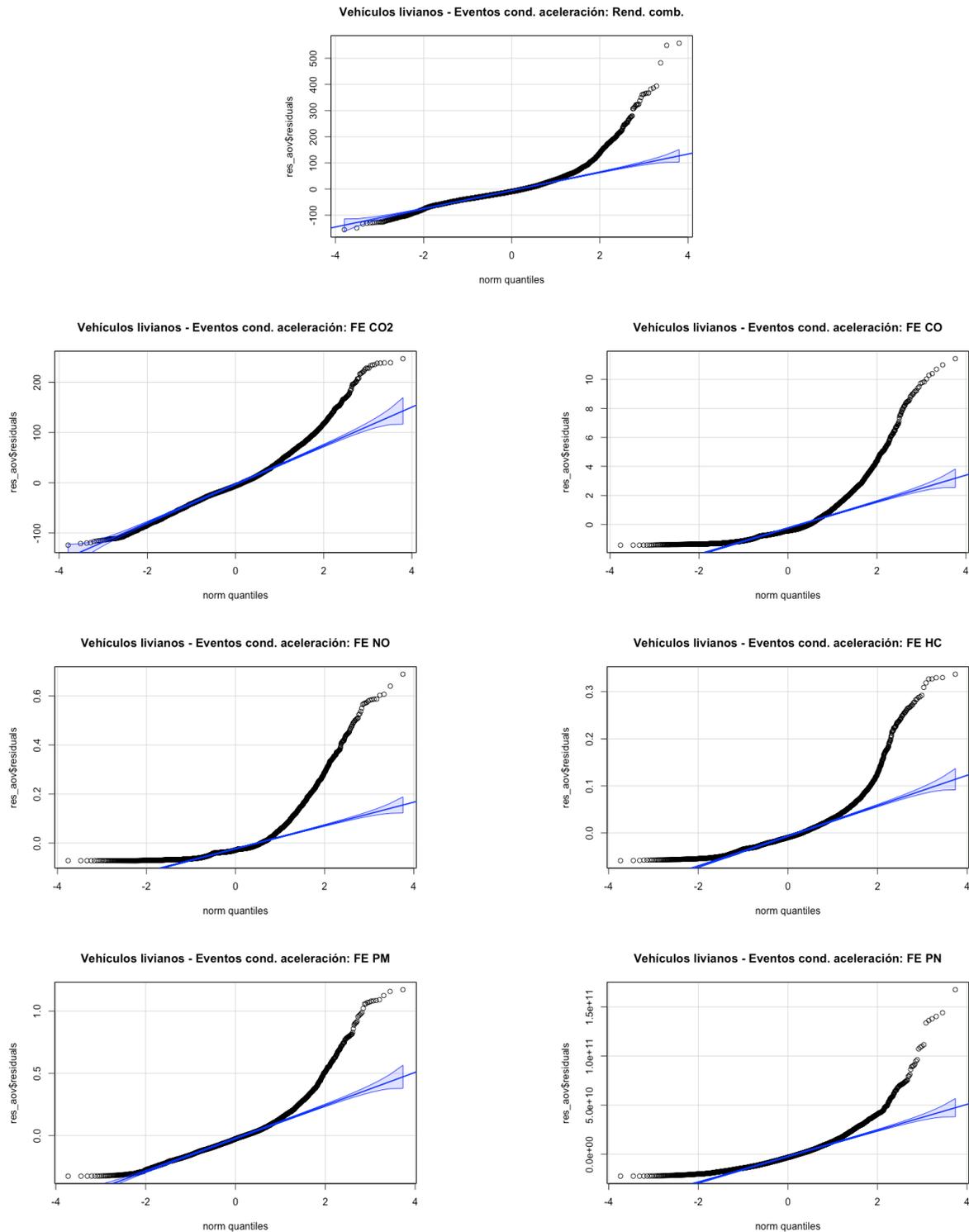


Figura 5.9. Diagramas qq-plot para vehículos livianos

Se usó la prueba de *Kruskal-Wallis* para identificar la existencia de diferencia entre las medianas, así como un análisis *post-hoc* mediante la prueba de Dunn, para determinar la diferencia en pares de medianas. El nivel de confianza estadístico usado es 95%, por lo cual cualquier valor p por debajo de

0.05 indica que hay diferencias estadísticas significativas. Como ejemplo de los resultados del análisis, en la **Figura 5.10** se muestran las emisiones de CO₂ para vehículos livianos.

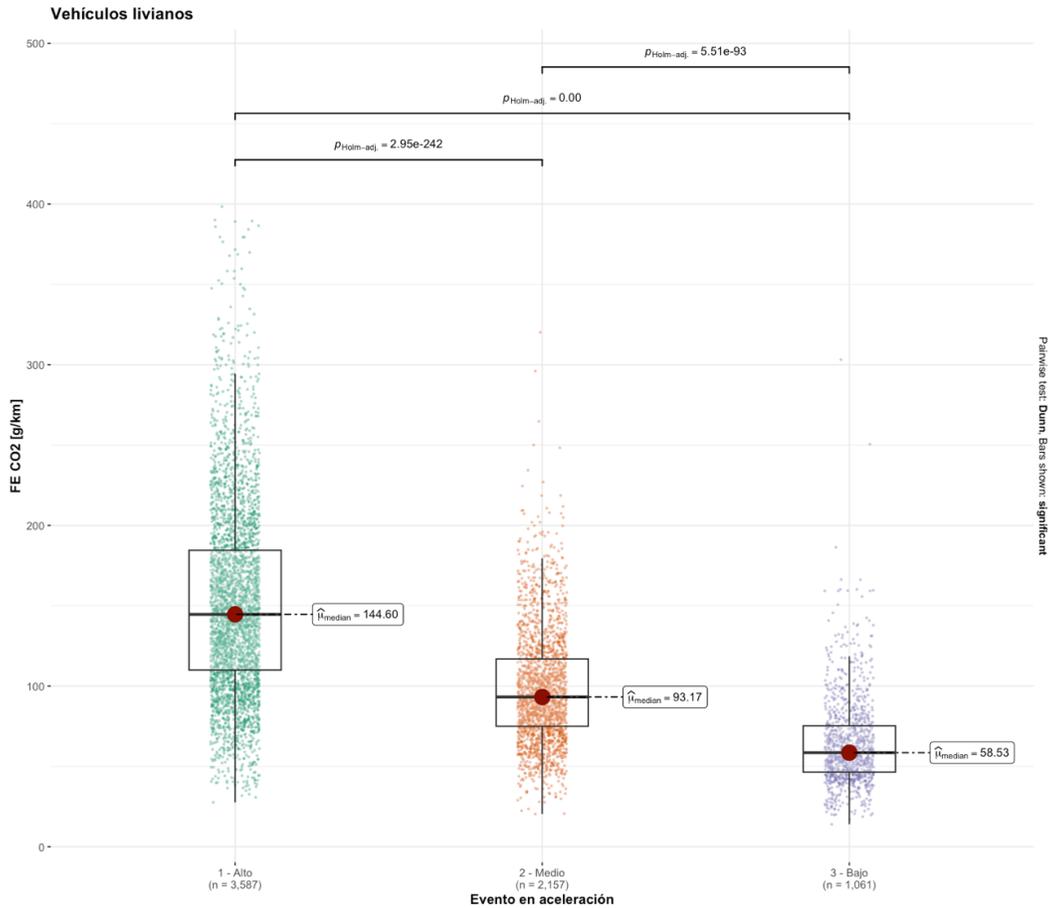


Figura 5.10. Efecto sobre los FE de CO₂ para vehículos livianos.

Esta figura evidencia que las emisiones de CO₂ tienden a ser directamente proporcionales al valor del índice de aceleración. Aunque hay traslape entre los datos de los eventos, las medianas de cada uno son significativamente diferentes de las de los demás, como lo muestran los valores *p* sobre las barras en la parte superior del gráfico. Esto permite concluir sobre el comportamiento del rendimiento de combustible y de los factores de emisión, usando las medianas de cada evento, siempre que los valores *p* sean menores a 0.05. Los resultados consolidados de las medianas de los eventos de conducción en aceleración se presentan en la **Tabla 5.5**.

Tabla 5.5. Resultados de los FE asociados con los eventos de aceleración.

Categoría	Evento	Rend. comb. [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO [mg/km]	HC [mg/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 ¹⁰ /km]
Motocicletas	Alto	361	18.3	1.53	15.6	97.8	0.165	1.16
	Medio	523	13.1	0.895	10.2	58.2	0.112	1.27
	Bajo	663	10.6	0.744	8.38	36.7	0.0886	1.45
Vehículos livianos	Alto	71.9	144.6	0.624	18.9	45.8	0.280	1.92
	Medio	111	93.17	0.377	11.5	29.1	0.183	1.75
	Bajo	177	58.53	0.226	8.27	17.6	0.115	1.73

La **Tabla 5.6** presenta los valores p de las comparaciones de las medianas de los FE de los tres eventos de conducción en aceleración. Un valor p menor que 0.05 significa que las medianas son diferentes con una confianza estadística del 95%, y que no lo son en caso contrario.

Tabla 5.6. Diferencia estadística entre los FE asociados con los eventos de aceleración.

Categoría	Evento	Rend. comb.	CO ₂	CO	NO	HC	PM	PN
Motocicletas	Alto - Medio	1.59×10^{-215}	2.22×10^{-168}	3.46×10^{-31}	5.80×10^{-21}	1.35×10^{-51}	5.53×10^{-57}	3.26×10^{-5}
	Alto - Bajo	0	0	1.32×10^{-55}	3.68×10^{-34}	1.44×10^{-152}	1.21×10^{-106}	5.83×10^{-22}
	Medio - Bajo	1.02×10^{-79}	1.16×10^{-66}	2.21×10^{-6}	8.33×10^{-4}	1.76×10^{-31}	6.29×10^{-12}	6.26×10^{-8}
Vehículos livianos	Alto - Medio	5.50×10^{-241}	2.95×10^{-242}	3.19×10^{-33}	9.01×10^{-22}	3.23×10^{-48}	2.82×10^{-81}	0.002413
	Alto - Bajo	0	0	2.11×10^{-80}	4.96×10^{-40}	1.54×10^{-119}	2.32×10^{-192}	0.000479
	Medio - Bajo	2.12×10^{-92}	5.51×10^{-93}	5.13×10^{-19}	8.33×10^{-8}	4.12×10^{-28}	2.19×10^{-42}	0.2403

El único valor p mayor a 0.05 (resaltado en la tabla) es el correspondiente PM para vehículos livianos, entre los eventos de aceleración medio y bajo, lo cual significa que para esta emisión no hay una diferencia significativa entre dichos eventos. Todos los demás eventos de todas las emisiones son estadísticamente diferentes entre sí para los tres eventos de aceleración, por lo cual se puede proceder con el análisis de las tendencias usando las medianas correspondientes.

A continuación, se presentan de forma gráfica los resultados de la **Tabla 5.5**, para identificar más fácilmente los comportamientos. En la **Figura 5.11** se presentan el rendimiento de combustible y las emisiones de CO₂ para los eventos de conducción en aceleración en ambas categorías vehiculares. El comportamiento de ambas variables es inverso, es decir, que a menor rendimiento de combustible (mayor consumo por unidad de distancia), mayores emisiones de CO₂.

Ambas variables presentan el peor resultado para aceleración alta, seguido por aceleración baja, y el mejor resultado corresponde a deceleración. Hay dos resultados relevantes de esta figura. En primer lugar, se hace evidente como a mayor agresividad en la conducción aumentan el consumo de combustible (baja el rendimiento) y las emisiones de CO₂, incrementando a cerca del doble entre los eventos de agresividad alta y baja en ambas categorías vehiculares. En segundo lugar, las diferencias observadas entre motocicletas y vehículos livianos son significativamente menores que las respectivas diferencias en la cilindrada de los motores, la cual es aproximadamente 10 veces mayor en vehículos livianos. Esto confirma que las motocicletas son significativamente menos eficientes que los vehículos livianos, cuando se tienen en cuenta el tamaño del motor.

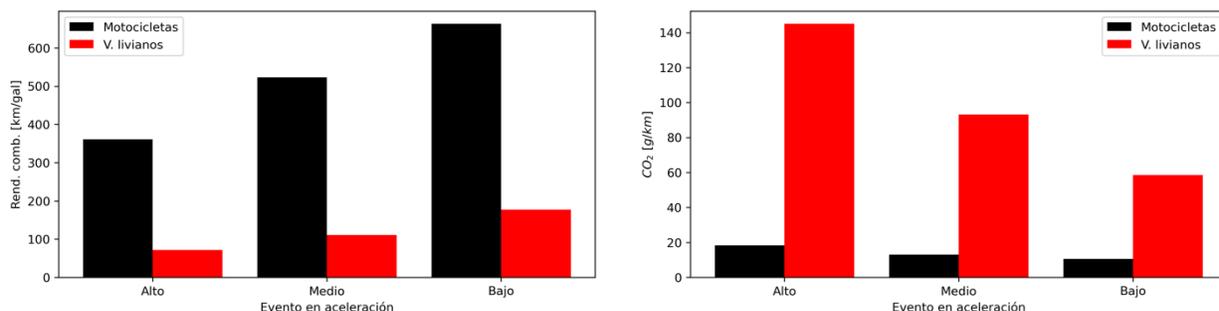


Figura 5.11. Efecto sobre el rendimiento de combustible y FE de CO₂.

En la **Figura 5.12** se presentan los FE de CO y de HC. Se observa la tendencia al aumento de las emisiones de CO y de HC para las dos categorías vehiculares a medida que los eventos de aceleración tienen agresividad más alta. Los aumentos observados son de aproximadamente el doble entre los eventos de aceleración con agresividad alta y baja, tanto para motocicletas como para vehículos livianos.

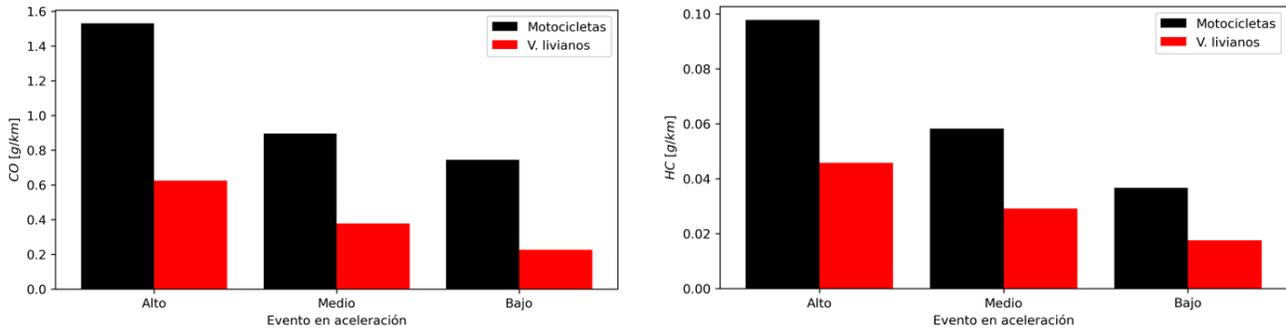


Figura 5.12. Efecto sobre FE de CO y HC

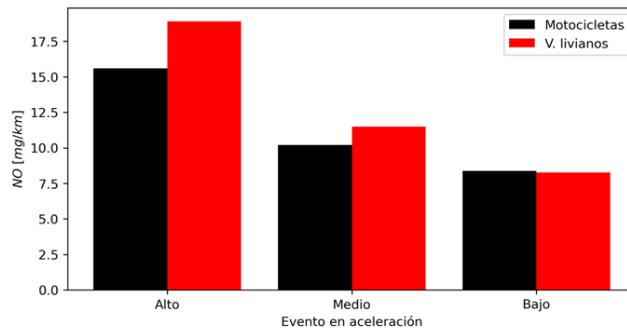


Figura 5.13. Efecto sobre emisiones de NOx

En la **Figura 5.13** se muestran los FE de NO. Como se dijo antes, estas emisiones son bajas en las dos categorías de vehículos estudiados. Sin embargo, se nota también el efecto de la agresividad en los eventos de aceleración, haciendo que se emita aproximadamente el doble de NO por cada km recorrido cuando se pasa de baja a alta agresividad en la conducción. Este comportamiento es similar en ambas categorías vehiculares.

Finalmente, en la **Figura 5.14** se presentan los resultados de FE de partículas para los eventos de aceleración y deceleración.

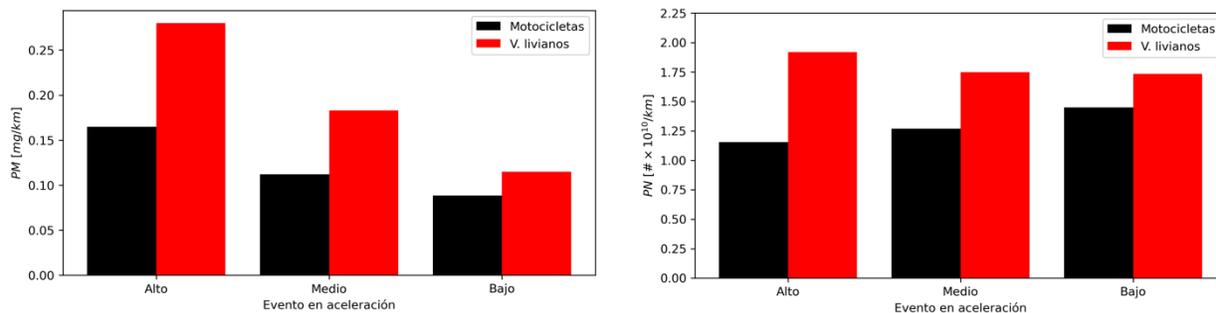


Figura 5.14. Efecto sobre los FE de partículas.

Tanto para las emisiones de PM como para las de PN se observa una diferencia clara entre los eventos de aceleración con índice alto y bajo, así como índice alto y medio. Al aumentar la agresividad de los eventos de aceleración (mayor índice), se emiten más partículas. En este caso el FE de PM en vehículos livianos se duplica aproximadamente para el evento con índice alto, con respecto al obtenido con índice bajo. En el caso de las motocicletas el incremento es menos marcado, pero sigue siendo significativo.

El FE de PN en motocicletas tiene un comportamiento contrario a las demás emisiones contaminantes, ya que se observa un aumento a medida que disminuye la agresividad del evento de aceleración. En el caso de los vehículos livianos se tiene la misma tendencia que para las demás emisiones, pero con diferencia mucho menores. Incluso, no se observa diferencia significativa entre los eventos medio y bajo. En general, el FE de PN es el menos afectado por la agresividad de los eventos de aceleración.

4. CONCLUSIONES

Con base en los datos instantáneos de velocidad fue posible identificar los eventos aislados de aceleración, deceleración y ralenti en todas las pruebas, correspondientes a la reproducción de los ciclos de conducción de las categorías de motocicletas y de vehículos livianos.

Para cada evento se determinaron los valores acumulados de distancia recorrida, consumo de combustible y emisiones contaminantes (en masa o número), y con estos resultados se determinaron flujos máxicos característicos de cada evento. Al dividir el acumulado respectivo por la duración del evento (mínimo de 5 segundos) fue posible comparar los eventos de aceleración y deceleración con los de ralenti. Por otro lado, para los eventos en los cuales el vehículo estaba acelerando, también se calculó el cociente entre los acumulados de cada variable y el recorrido total de cada evento, para tener unidades de masa o número sobre distancia (las mismas de los factores de emisión).

Esta información se estudió primero mediante análisis de varianza, y posteriormente se verificó si los residuales de cada muestra (datos de cada evento de conducción) se ajustaban a una distribución normal, para saber cómo proceder en la comparación para determinar diferencias estadísticas. Para esto se usaron los diagramas de cuartiles de los residuales (*qq-plot*), dada la gran cantidad de datos en las muestras. En todos los casos se obtuvo un valor p menor a 0.05, con lo cual en ningún caso se cumplió la hipótesis de normalidad. Como consecuencia, las muestras se representaron por su mediana, en lugar del promedio, y en los análisis posteriores se emplearon pruebas no paramétricas.

El siguiente paso consistió en utilizar la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis*, con la cual se sabe si hay diferencia estadística significativa con una confianza del 95%, en al menos dos de las medianas de las muestras comparadas. De nuevo se observó que en todos los casos el valor p estuvo por debajo de 0.05, con lo cual se procedió con un análisis posterior (*post-hoc*) para identificar si había diferencia estadística significativa entre cada par de medianas. Esto se realizó mediante la prueba no paramétrica de *Dunn*, nuevamente usando un nivel de confianza del 95%.

A continuación, se mencionan las principales conclusiones de este estudio del impacto de los eventos de conducción sobre el rendimiento de combustible y los factores de emisión de motocicletas y vehículos livianos:

- Se identificaron 35.872 eventos de conducción para todas las pruebas realizadas, lo cual requirió procesar los datos originales de velocidad registrados en campo.
- Hay una dispersión significativa en los flujos máxicos de combustible y emisiones. Sin embargo, el análisis estadístico realizado permitió identificar que en todos los casos hay diferencias significativas entre las medianas de los flujos máxicos de las muestras, con una confianza del 95%.
- Cuando se comparan los flujos máxicos, se encontró en todas las categorías vehiculares, que para el consumo de combustible y todas las emisiones contaminantes, los valores siempre son mayores para los eventos de aceleración que para los de deceleración, y éstos a su vez son mayores que

los valores para los eventos de ralenti. Por este motivo se centró el análisis siguiente en los eventos de aceleración, responsables de las mayores emisiones y consumo de combustible.

- El tamaño del motor, indicado por su cilindrada, tuvo un efecto directo sobre el consumo de combustible y sobre el flujo másico de CO₂ en todos los eventos de conducción. Este comportamiento es igual para las emisiones de CO, NO, PM y PN. Sin embargo, las emisiones y el consumo de motocicletas son mayores que las de vehículos livianos cuando se expresan por cada unidad de cilindrada, ya que las diferencias observadas siempre son menores que las respectivas diferencias de cilindrada existentes (alrededor de 10 veces menos en motocicletas).
- Hay una dispersión significativa en el rendimiento de combustible y en los factores de emisión de cada evento de conducción. Sin embargo, el análisis estadístico realizado permitió identificar que en la mayoría de los casos hay diferencias significativas entre las medianas de las muestras, con una confianza del 95%. El único caso sin diferencia entre medianas corresponde al FE de PN para vehículos livianos, y sólo entre dos de los eventos estudiados.
- Se definió un índice adimensional para agrupar los eventos de aceleración, y se encontró que hay ciertos rangos de valores de este índice para los cuales hay diferencias significativas de todas las variables estudiadas. En general se observó que, a mayor valor de este índice, se obtienen mayor consumo de combustible y emisiones contaminantes.
- En general, la diferencia del rendimiento de combustible y de los FE entre los eventos de aceleración con índice alto y bajo es de aproximadamente el doble. Esto demuestra que el mismo vehículo puede reducir significativamente sus emisiones contaminantes y consumo de combustible si se conduce de forma menos agresiva.
- EL FE de número de partículas fue el menos sensible a la agresividad en la conducción, sobre todo para vehículos livianos. Además, en motocicletas, este FE mostró una tendencia contraria a las demás emisiones con los eventos de aceleración.

En resumen, los resultados de este estudio permiten concluir que hay efecto significativo de los eventos de conducción sobre el consumo de combustible y sobre las emisiones en motocicletas y en vehículos livianos. Este resultado revela el potencial de beneficio económico y ambiental de introducir técnicas de conducción eficiente.

Por otro lado, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible en condiciones de ralenti no son despreciables, a pesar de que son menores a cuando el vehículo se mueve. Por lo tanto, se debe evitar tener los vehículos encendidos por periodos prolongados cuando están estacionados, con lo cual se pueden tener ahorros significativos en el consumo de combustible y en las emisiones contaminantes.

CAPÍTULO 6

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

REPRESENTATIVIDAD ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS

CONTENIDO	170
1. Representatividad estadística de la muestra	171
2. Resultados	173
2.1 Representatividad como un solo grupo de vehículos.....	173
2.2 Representatividad segmentando los grupos.....	175
2.3 Representatividad cambiando unidades de reporte.....	180
3. Conclusiones	183

1. Representatividad estadística de la muestra

A continuación, se describe el grado de representatividad estadística que tiene la muestra empleada en este proyecto (FECOC+ Fase 3) respecto a la población total de motocicletas y vehículos livianos en circulación en Colombia.

Dado que el tema de representatividad genera frecuentes confusiones cuando se aplica a la evaluación de vehículos, inicialmente se incluyen las definiciones relevantes aplicadas al presente proyecto.

- Población: conjunto total de vehículos.
- Muestra: subconjunto de vehículos de la población.
- Muestra representativa. Muestra que posee las mismas características de la población.
- Precisión de los resultados. Dispersión o variabilidad de los resultados respecto al valor estimado de la media (\bar{x}). Se puede describir como:
 - El intervalo de confianza del valor estimado de la media ($IC\mu$) con un nivel de confianza ($1-\alpha$) (ecuación 1).
 - La incertidumbre (I , Ecuación 2), la cual corresponde al medio rango del intervalo de confianza. Para estimaciones de medias equivale al error estándar de la media (EE) por el valor crítico de la distribución normal o la distribución t .
 - El error porcentual (e), el cual es la proporción de la incertidumbre I con respecto al valor estimado de la media (Ecuación 3).

$$IC\mu = \bar{x} \pm I \quad (1)$$

$$I = t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$e = \frac{I}{\bar{x}} \quad (3)$$

- Grado de representatividad estadística. Se mide mediante el error porcentual. Valores cercanos a cero corresponden a mejores niveles de representatividad. Se resalta que el verdadero valor promedio de la población, con cero incertidumbre o 100% representatividad, solo se puede obtener muestreando el 100% de la población.

El primer paso en la aplicación de estas definiciones al caso de evaluación de vehículos es recordar el objetivo del estudio o de las pruebas. En el caso de FECOC+ Fase 3, el objetivo es la determinación de los valores promedio de consumo de combustible y de los factores de emisión de motocicletas y vehículos livianos.

En adelante haremos referencia exclusivamente a vehículos y consumo de combustible para facilitar la explicación. Sin embargo, estas explicaciones aplican a cualquier segmento de vehículos, incluyendo los vehículos livianos y motocicletas. Similarmente, las explicaciones relacionadas con el consumo de combustible aplican a los factores de emisión, en particular de CO₂, CO, HC, NO_x y PM.

Muestra representativa

Temporalmente asumamos que toda la población de motocicletas en Colomba exhibe el mismo nivel de consumo de combustible. Para lograr el objetivo de determinar este nivel de consumo se seleccionó una muestra representativa de la población. Se empleó la técnica de muestreo aleatorio para asegurar la representatividad de la muestra. Nótese que esta definición de muestra representativa no impone exigencias sobre el tamaño de muestra. También es importante resaltar que esta definición no permite cuantificar el grado de representatividad de la muestra con un único indicador estadístico.

Tamaño de muestra

En la fase de diseño experimental, el tamaño de muestra se seleccionó, usando la ecuación 4, como aquella que condujera a un nivel de error relativo aceptable (Por ejemplo, $e < 15\%$) con un nivel de confianza del 95%.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 N p q}{e^2 (N-1) + Z_{\alpha}^2 p q} \quad (4)$$

Donde n es el tamaño de muestra, N es el tamaño de la población, Z_{α} es el valor crítico para un nivel de confianza $(1-\alpha)$, p es la proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio. q : proporción de individuos que no poseen esa característica, es decir, es $1-p$. Estos datos son generalmente desconocidos y se suele suponer que $p=q=0.5$. Esta ecuación se usa cuando se desconoce la desviación estándar.

Acorde a las ecuaciones 1 a 4, entre más grande sea el tamaño de la muestra usada, menor es el error de la estimación. Es importante notar que en la ecuación 4, con un nivel de confianza del 95%, a partir de un tamaño de población (N) mayor a $\sim 7,500$, el tamaño de la muestra se vuelve insensible a N . De manera que con una incertidumbre o error relativo deseado (por ejemplo, $e < 15\%$) se requieren 68 vehículos. De nuevo, esto este resultado es cierto asumiendo que todos los vehículos exhiben un mismo nivel de consumo de combustible.

Asumiendo que todos los vehículos pertenecen a una misma población homogénea en términos de:

- Mismo nivel de consumo de combustible medido en términos de L/100 km (o km/gal)
- Mismo nivel de emisiones contaminantes medidas en términos de g/km

La **Tabla 1.2** (Capítulo 1) reportó los tipos de vehículos muestreados en este proyecto (40 motocicletas y 30 vehículos livianos). Se estimaba en la fase de diseño experimental que con 40 motocicletas y 30 vehículos livianos se pudiera obtener incertidumbres relativas de aproximadamente $e \sim 12\%$ y 15% , para las motocicletas y vehículos livianos, respectivamente.

El inconveniente es que, en la fase de planeación, la distribución que exhibe el nivel de consumo de combustible de los vehículos es desconocida. Usualmente se realiza una primera fase de experimentos con tamaños de muestra arbitrarios y posteriormente se usan los resultados obtenidos para recalculer el tamaño de muestra necesario para lograr el nivel de incertidumbre deseada.

Posteriormente se realizaron las pruebas de determinación de consumo de combustible sobre la muestra seleccionada. Con los resultados de consumo de combustible sobre la muestra seleccionada, se buscó determinar, el tipo de distribución que exhiben las variables de interés (consumo de combustible e índices de emisión) y en especial el valor promedio de toda la población. Adicionalmente se calculó el grado de representatividad estadística obtenido a través del nivel de incertidumbre relativo (e) obtenido

2. Resultados

El Capítulo 1 describió el proceso de selección de la muestra usada en este estudio para asegurar una muestra representativa de la población de motocicletas y vehículos livianos en Colombia. A continuación, se describe los resultados obtenidos evaluando la representatividad estadística del tamaño de muestra finalmente usado.

2.1 Representatividad como un solo grupo de vehículos

La **Tabla 6.1** muestra las incertidumbres obtenidas usando los datos de la campaña de medición para el caso de motocicletas. La **Tabla 6.1** muestra que consumo y las emisiones de CO₂ y de PN satisfacen el criterio de $e < 15\%$, indicando que el valor reportado de consumo promedio o emisiones de CO₂ y PN posee un alto nivel de representatividad estadística con un nivel de confianza del 95%. En los demás casos, el nivel de representatividad estadística o alternativamente nivel de confianza es menor. El uso de estos valores como representativos de toda la flota de motocicletas en Colombia debe realizarse con cuidado. Ellos pueden ser usados en forma aceptable dependiendo de la aplicación. Para estas variables se recomienda usar valores reportados por segmentos de motocicletas (ver próxima sección).

Tabla 6.1. Incertidumbre o errores relativos (e) de la estimación estadística del valor promedio del factor de emisión por tipo de contaminante, asumiendo que toda la población de **motocicletas** en Colombia exhibe un nivel similar de emisiones

Variable	Unidades	n	media	EE	e (%)
SFC	L/100 km	40	2.871	0.108	7.6
EI CO ₂	[g/km]	40	46.25	2.07	9.1
EI CO	[g/km]	40	6.49	1.07	33.3
EI NO	[g/km]	39	0.0689	0.012	35.3
EI NO ₂	[g/km]	36	0.00065	0.00017	54.4
EI HC	[g/km]	40	0.3646	0.0646	35.8
EI PM	[mg/km]	40	0.614	0.132	43.5
EI PN	[# x 10 ¹² /km]	39	1.929	0.141	14.8

Tabla 6.2 Errores de estimación por factor de emisión, asumiendo población homogénea para el caso de **vehículos livianos**

Contaminante	Unidades	n	media	EE	e (%)
SFC	L/100 km	30	13.11	0.292	4.4
EI CO ₂	[g/km]	30	312.2	16.1	10.5
EI CO	[g/km]	30	2.362	0.394	34.1
EI NO	[g/km]	30	0.1198	0.0296	50.5
EI NO ₂	[g/km]	29	0.0176	0.0121	140.8
EI HC	[g/km]	29	0.1165	0.0125	22.0
EI PM	[mg/km]	30	1.336	0.73	111.8
EI PN	[# x 10 ¹² /km]	30	4.61	1.96	87.0

Similarmente, en el caso de los vehículos livianos, asumiendo que toda la población pertenece a un grupo homogéneo, se obtienen los errores de estimación para un nivel de confianza del 95% que se presentan en la **Tabla 6.2**. De nuevo se observa que CO₂ es el único contaminante donde el supuesto de una misma población homogénea puede ser aplicable.

2.2 Representatividad segmentando los grupos

Los resultados anteriores se obtuvieron asumiendo que las poblaciones exhiben el mismo nivel de la variable de interés (consumo de combustible expresada en L/100km e índices de emisiones expresados en gr/km). Sin embargo, este supuesto tiene sus limitaciones, lo cual se ve directamente reflejado en el alto nivel de incertidumbre observado.

El consumo de combustible de los vehículos depende de múltiples variables (**Figura 6.1**) que están asociadas al factor humano, condiciones externas (condiciones meteorológicas, tráfico, estado de las vías, etc.) y propias del vehículo (tecnología, edad, peso, tamaño de motor medido como cilindrada o potencia máxima, etc.). En este estudio se elimina el efecto de todas estas variables, excepto las relacionadas al vehículo (peso, marca, tipo de inyección, cilindrada, etc), al evaluar el consumo de combustible siguiendo el mismo protocolo de pruebas sobre dinamómetro de chasis o pruebas de carretera.

La segmentación de la población se debe realizar acorde al consumo de combustible. Cada segmento de vehículos debe ser un grupo homogéneo. Es decir, dentro de cada segmento de vehículos, el consumo de combustible debe exhibir la misma distribución con la misma media y varianza. Por tanto, una muestra representativa, seleccionada para que represente el consumo de combustible de los vehículos en Colombia, debe incluir los segmentos de vehículos con diferentes niveles de consumo de combustible.

Dado que el desempeño de los vehículos en términos de consumo de combustible no se conocía *a priori*, la segmentación se realizó con base en las variables que se presumía determinaban el consumo de combustible, tal y como el peso o la cilindrada. Los resultados obtenidos permiten verificar la correcta segmentación de la población. Probablemente sea necesario una segmentación para el consumo de combustible y otra para cada uno de los factores de emisión.

A continuación, se explora la correcta segmentación para propósitos de describir el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

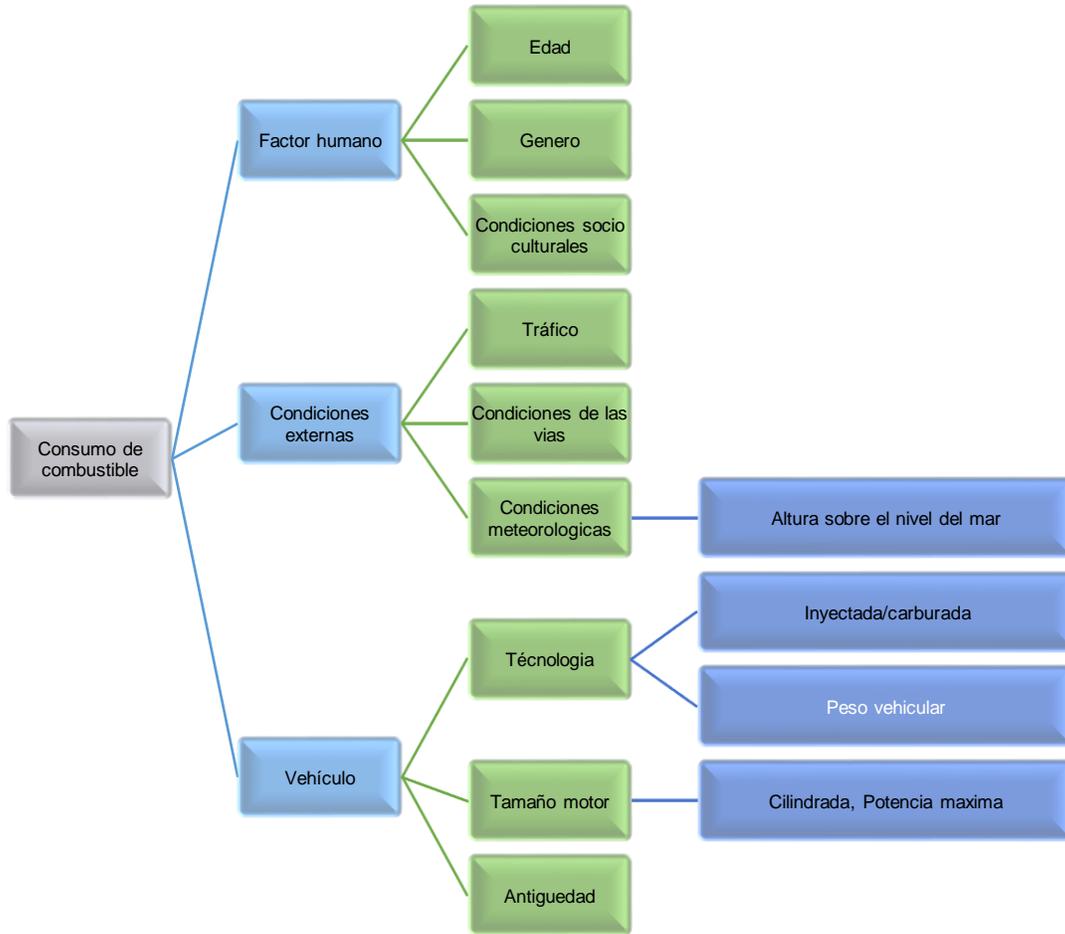


Figura 6.1. Variables que afectan al consumo de combustible en vehículos

Para el caso de motocicletas, se hicieron entre 3 y 5 pruebas independientes con cada vehículo. En total se realizaron 163 pruebas, de las cuales se mantuvieron 159 después de eliminación de *outliers* de la variable de rendimiento de combustible.

Asumiendo que estas 159 pruebas son independientes entre sí, se decidió verificar la segmentación por tecnología a través de un análisis de varianza (ANOVA) de la variable de rendimiento de combustible en función de la tecnología (marca). Usando el método de mínimas diferencias significativas de *Fisher*, y con una confianza del 95%, se obtuvo una segmentación por marcas en tres segmentos, que serán referidos en adelante como grupos A, B y C (**Tabla 6.3**). Los intervalos de confianza de las medias de rendimiento de combustible se observan en la **Figura 6.2**. Esto significa que para propósitos de rendimiento de combustible las motocicletas en Colombia pueden ser agrupadas en 3 segmentos de población homogénea (segmentos A, B, C).

Tabla 6.3. Segmentación de las pruebas de motocicletas por marca

Marca	n	Media (L/100 km)	Grupo			No. del grupo
1	28	3.58	A			52
2	24	3.44	A			
3	9	2.91		B		52
4	43	2.74		B		
5	24	2.49			C	55
6	31	2.24			C	

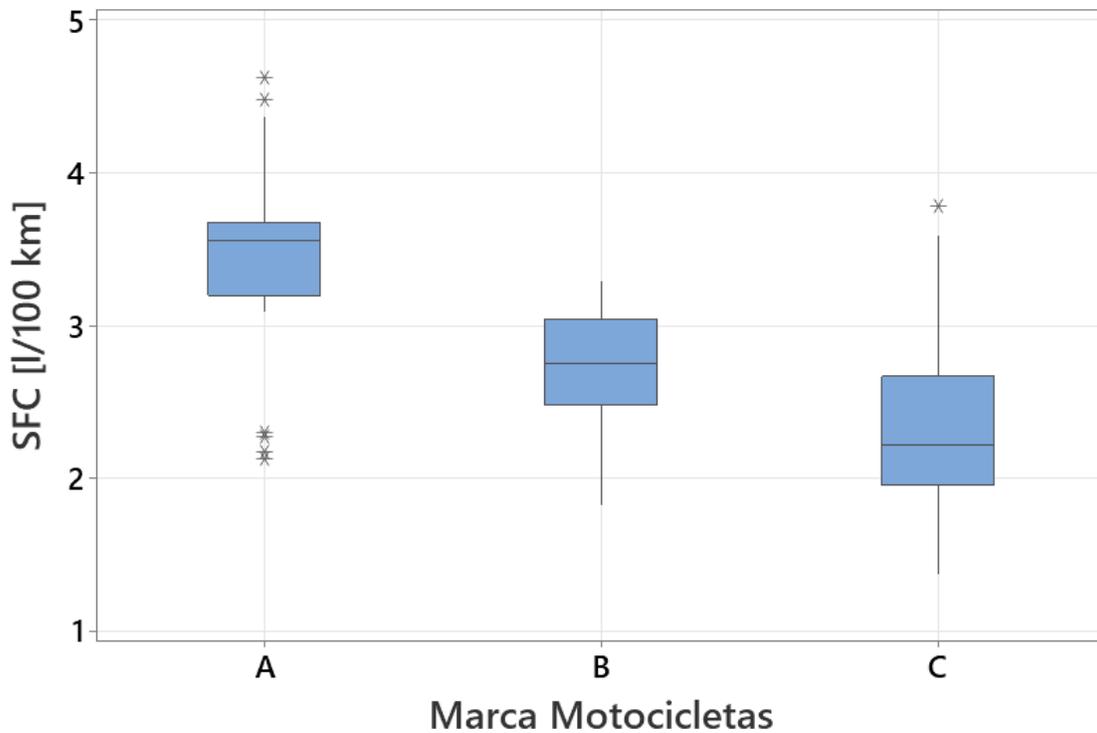


Figura 6.2. Consumo específico de combustible de las motocicletas, por segmentos de población homogénea A, B y C (Tabla 6.3).

A partir de esta segmentación, se calcularon nuevamente los factores de emisión y los errores de estimación para cada grupo con un nivel de confianza del 95%. Adicionalmente se verificó la segmentación verificando que estos segmentos exhiben factores de emisión significativamente diferentes entre sí.

Tabla 6.4. Emisiones y errores de estimación por factor de emisión y por grupo para el caso de Motocicletas

Contaminante		A			B			C		
		media	EE	e (%)	media	EE	e (%)	media	EE	e (%)
SFC	[L/100km]	3.518	0.0756	4.3	2.770	0.044	3.2	2.351	0.0735	6.3
EI CO ₂	[g/km]	49.56	0.888	3.5	49.56	0.888	3.5	49.56	0.888	3.5
EI CO	[g/km]	5.221	0.387	14.7	3.098	0.54	35	13.25	1.15	17.5
EI NO	[g/km]	0.142	0.01	14.2	0.028	0.003	24.7	0.048	0.006	26.9
EI NO ₂	[g/km]	5E-04	1E-04	52.1	3E-04	2E-05	16.4	7E-04	1E-04	41.7
EI HC	[g/km]	0.714	0.064	17.8	0.115	0.016	28.8	0.509	0.076	29.9
EI PM	[mg/km]	0.608	0.021	35	0.471	0.029	12.5	0.55	0.04	14.5
EI PN	[# x 10 ¹² /km]	1.69	0.062	7.3	1.823	0.097	10.7	2.465	0.164	13.4

De la **Tabla 6.4** se observa que los valores reportados de e para CO₂ son los mismos en los tres grupos. Esto es debido a que fue el único contaminante en el que las emisiones no fueron estadísticamente diferentes entre grupos, de manera que se pueden reportar los datos de factores de emisión de CO₂ como una única población homogénea y normalmente distribuida. Este resultado coincide con lo reportado en la sección anterior.

Para los demás contaminantes, se obtuvieron diferencias estadísticas de al menos uno de los grupos. La **Tabla 6.4** resalta las variables por grupo que satisfacen el criterio de e < 15%. Excepto por el NO₂, los errores obtenidos van del 7% al 35%, con un promedio de error del 23%.

En el caso de los vehículos livianos se disponen de 153 pruebas. De nuevo se evaluó la segmentación usando como criterio la marca como discriminante. La **Tabla 6.5** muestra los grupos obtenidos utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%. Las medias del consumo de combustible de los grupos que no comparten una letra son significativamente diferentes. Se observa que la segmentación obtenida es apropiada para consumo de combustible y emisiones de CO₂. Sin embargo,

para las otras variables se debe explorar nuevas segmentaciones o el efecto de otras variables que influyen cada una de las emisiones.

Tabla 6.5 Grupos homogéneos de SFC obtenidos usando marca como variable discriminante en vehículos livianos

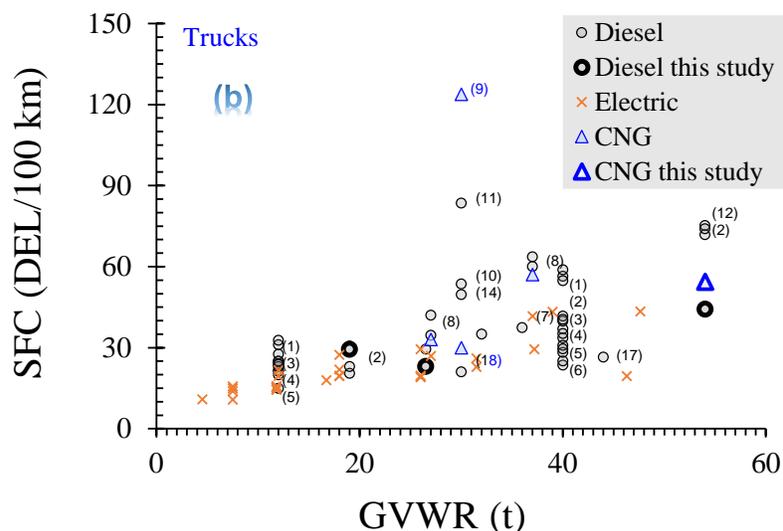
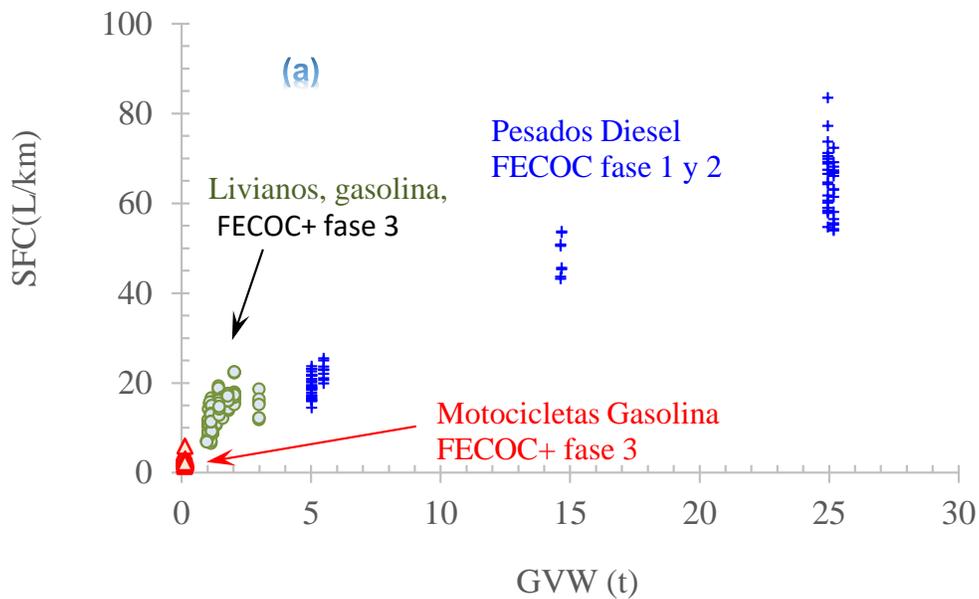
Marca	n	Media (L/100 km)	Agrupación		
1	30	16.0	A		
2	15	15.9	A		
3	7	14.5	A		
4	4	14.1	A		
5	4	14.1	A		
6	57	12.2		B	
7	16	11.9		B	
8	4	10.0			C
9	12	10.0			C
10	4	6.9			C

Tabla 6.6. Incertidumbre relativa de los valores promedio de SFC y EI de vehículos livianos segmentados por marca acorde a Tabla 5.5

Variable		A			B			C		
		Media	EE	e (%)	Media	EE	e (%)	Media	EE	e (%)
SFC	[l/100 km]	15.6	0.4	4.9	12.1	0.4	5.8	9.4	0.5	11.3
CO ₂	[g/km]	381.6	9.1	4.8	295.5	9.1	6.1	229.4	12.6	11.5
CO	[g/km]	2.56	0.17	13.1	3.16	0.36	22.6	1.38	0.19	28.7
NOx	[g/km]	0.182	0.035	38	0.111	0.015	26.6	0.040	0.012	62.4
NO	[g/km]	0.171	0.026	30.5	0.120	0.016	25.9	0.047	0.013	60.7
NO ₂	[g/km]	0.035	0.013	72.1	0.001	0.000	13.3	0.000	0.000	36.8
HC	[g/km]	0.136	0.011	16	0.097	0.009	17.6	0.089	0.010	24.9
PM	[mg/km]	2.404	0.811	67.7	0.6865	0.043	12.5	0.2661	0.037	30.3
PN	[# x 10 ¹² /km]	7.76	2.08	53.8	2.912	0.182	12.5	1.192	0.115	21.2

2.3 Representatividad cambiando unidades de reporte

El supuesto de un mismo nivel de consumo dentro de cada segmento también debe tener en cuenta la variable usada para describir el fenómeno observado. Por ejemplo, para el caso de consumo de combustible en vehículos frecuentemente se usa el rendimiento de combustible (km/gal) o su inverso, el consumo específico de combustible SFC en L/100 km. Esta forma de expresar consumo elimina el efecto de la distancia recorrida sobre el consumo. Sin embargo, esta variable depende aproximadamente linealmente del peso del vehículo (**Figuras 6.3a-b**) lo cual obliga a segmentar la población acorde a grupos de vehículo con pesos similares. Alternativamente, se puede reportar el consumo de combustible por kilómetro recorrido y por peso bruto vehicular (SFC* en unidades L/t km **Figura 6.3c-d**). Esta alternativa permite agrupar segmentos, reducir el tamaño de muestra e incrementar el nivel de certidumbre de los resultados obtenidos.



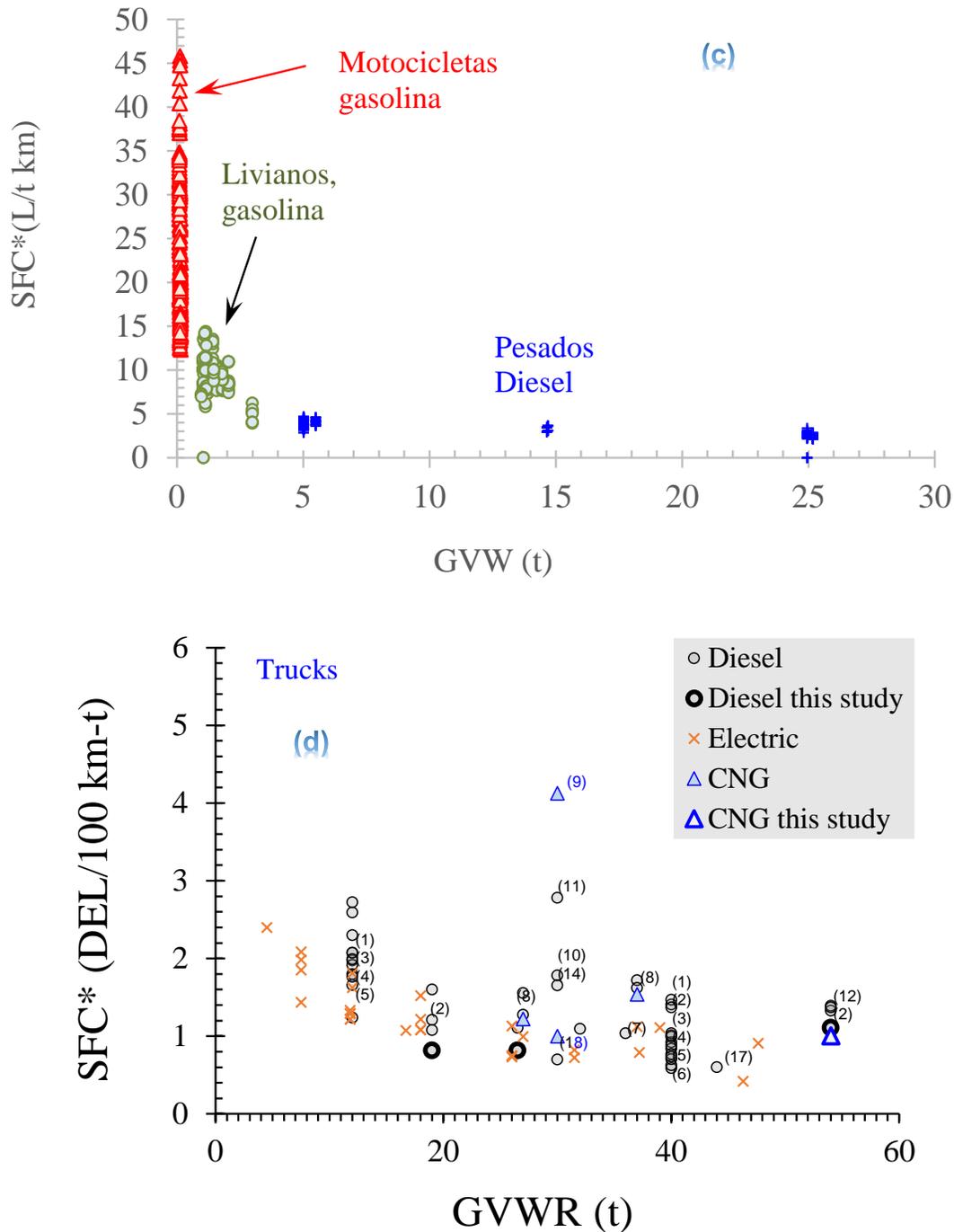


Figura 6.3 Consumos energéticos de vehículos expresados por kilómetro recorrido (SFC en L/100 km, a y b) y por kilómetro recorrido y peso bruto vehicular (c y d). Figuras a y c corresponden a este estudio. Figuras d y b fueron obtenidos de: Serrano-Guevara, O.S.; Huertas, J.I.; Quirama, L.F.; Mogro, A.E. *Energy Efficiency of Heavy-Duty Vehicles in Mexico. Energies* 2023, 16, 459. <https://doi.org/10.3390/en16010459>

Expresando las variables de consumo y emisiones en términos de estas nuevas unidades se obtuvieron los valores reportados en la siguiente tabla. Se observan valores satisfactorios (<23%) de e para cada una de las variables con el tamaño de muestra utilizado en el presente estudio, excepto para PM y PN medido en los vehículos. En este caso se requiere segmentar la población según la descripción de la sección anterior.

Tabla 6.7. Motocicletas. Incertidumbre relativa de los valores promedio de SFC* e EI* asumiendo que todas las motocicletas exhiben un mismo nivel de consumo o emisiones

Parámetro		n	Media	EE	e (%)
SFC*	[l/t 100km]	159	23.926	0.588	5
CO2*	[g/t km]	151	2204	40.5	3.7
CO*	[g/t km]	147	269.9	19.7	14.8
NOx*	[g/t km]	142	4.05	0.46	22.9
HC*	[g/t km]	140	17.27	1.53	17.9
PM*	[mg/t km]	125	26.41	2.63	20.1
PN*	[# x 10 ¹² /t km]	136	90.18	3.49	7.8

Tabla 6.8. Vehículos livianos. Incertidumbre relativa de los valores promedio de SFC* e EI* asumiendo que todos los vehículos exhiben un mismo nivel de consumo o emisiones.

Parámetro		n	media	EE	e (%)
SFC	[l/100km]	153	13.11	0.292	4.4
SFC*	[l/t 100km]	155	9.21	0.191	4.1
CO2*	[g/km]	152	3239.2	14.8	0.9
CO*	[g/km]	139	25.75	1.69	13.0
NOx*	[g/km]	145	1.309	0.157	23.7
HC*	[g/km]	118	1.1325	0.0672	11.8
PM*	[mg/km]	126	12.84	3.24	49.9
PN*	[# x 10 ¹² /km]	130	44.92	8.39	37

3. Conclusiones

El grado de representatividad estadística se mide mediante la incertidumbre relativa (e , ecuación 3) del valor promedio obtenido con las mediciones experimentales. Valores cercanos a cero corresponden a mejores niveles de representatividad. La ecuación 3 aplica cuando se espera que los vehículos exhiban un mismo nivel de consumo de combustible o de emisiones. Esto se logra expresando consumo de combustible en términos de L/t km y las emisiones en términos de masa generada por unidad de masa de combustible consumido. Adicionalmente se puede lograr segmentando la población de sub-grupos de mismo nivel de consumo y emisiones.

En esta capítulo se verificó que la variable usada para describir el consumo de combustible o factores de emisión fuera expresada en unidades que no son afectadas por otras variables que inciden directamente en el consumo o factores de emisión.

Se recomienda usar L/t km (litros consumidos por kilómetro recorrido y peso bruto vehicular) para el caso de consumo y g/kg (masa emitida por unidad de combustible consumido) para el caso de factores de emisión.

Los resultados muestran que el tamaño de muestra usado en el presente estudio (40 y 30 para motocicletas y vehículos livianos, respectivamente) fueron adecuados ($e < 15\%$) para obtener valores promedio de consumo de combustible (L/100 km o L/t km) y de factor de emisión de CO₂ (g/km o g/kg) asumiendo que toda la población exhibe niveles similares tanto de consumo como de emisiones de CO₂.

Sin embargo, para los demás contaminantes, el tamaño de muestra es satisfactoria ($e < 15\%$) cuando las emisiones se expresan en términos de g/kg. Lo anterior excluye a NO_x, PM y PN para el caso de vehículos livianos. En este caso se requiere segmentar la población de vehículos livianos, tal y como la marca.

CAPÍTULO 7

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

EFFECTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FACTORES DE EMISIÓN

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	186
2. RESULTADOS PARA MOTOCICLETAS	187
3. RESULTADOS PARA VEHÍCULOS LIVIANOS	197
3.1 Investigaciones sobre el efecto de la altitud en vehículos livianos	207
3.2 Comparativo del efecto de la altitud en vehículos livianos con este proyecto	209
4. CONCLUSIONES	213
5. REFERENCIAS	214

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad no existe consenso sobre efecto de la altitud sobre el nivel del mar en el consumo de combustible y en las emisiones contaminantes de vehículos. Esto se debe a la evolución de los sistemas de control de los motores, los cuales buscan que éstos se adapten a las condiciones de operación, en parte impuestas por el entorno, manteniendo niveles óptimos de consumo y de emisión de contaminantes.

En este capítulo se realizó el análisis del efecto de la altitud sobre el rendimiento de combustible y los factores de emisión en motocicletas y vehículos livianos. Las altitudes evaluadas corresponden a:

- Apartadó (aproximadamente 0 msnm)
- Medellín (1500 msnm) y
- Bogotá (2600 msnm).

Se realizaron mediciones para 2 motocicletas y 2 vehículos livianos en cada ubicación. Las motocicletas se midieron en banco de rodillos de manera similar a como se midieron en el desarrollo del proyecto FECOC+ Fase 3, mientras que los vehículos livianos se midieron en ruta, y en ambos casos se siguieron los ciclos de conducción respectivos.

Las motocicletas y vehículos livianos medidos en las tres altitudes fueron:

- Motocicleta con carburador, transmisión mecánica, año de modelo 2008, y cilindrada 180 cc.
- Motocicleta de inyección electrónica de combustible, transmisión mecánica, año de modelo 2022, y cilindrada 149 cc.
- Camioneta con motor de encendido provocado (ciclo Otto), año de modelo 2005, inyección electrónica multipunto, cilindrada 3500 cc y 165.000 kilómetros de recorrido.
- Automóvil con motor de encendido provocado (ciclo Otto), año de modelo 2016, cilindrada de 1598 cc, y 80.300 kilómetros de recorrido, de inyección electrónica multipunto (MPI).

A continuación se presenta un análisis estadístico de los resultados de los factores de emisión y del rendimiento de combustible de estas fuentes móviles en función de la altitud sobre el nivel del mar.

2. RESULTADOS PARA MOTOCICLETAS

Se realizó un análisis exploratorio con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias del rendimiento de combustible y de los factores de emisión para las diferentes altitudes estudiadas. En la **Tabla 7.1** se muestran los valores p obtenidos para la prueba de Kruskal-Wallis. Se usa esta prueba no paramétrica, debido a que no se cumple la hipótesis de normalidad en la distribución de residuales (verificada mediante la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*), a causa del tamaño reducido de la muestra. Se resaltan los valores $p < 0.05$ que sugieren diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos niveles de altitud, sobre las medianas de la variable dependiente, con una confianza estadística de 95%.

Tabla 7.1. Valor p para prueba de *Kruskal -Wallis* en Motocicletas

Variable Dependiente	Valor P
Rendimiento [km/gal]	0.04039
CO ₂ [g/km]	0.9434
CO [g/km]	0.3543
HC [g/km]	0.8586
NO _x [g/km]	0.7756
PM [mg/km]	0.09845
PN [# 10 ¹² /km]	0.04678

Estos valores P identifican variables con posibles diferencias significativas entre al menos dos altitudes. Para confirmarlo, y para identificar las altitudes que conducen a dichas diferencias, se realizó un análisis *post-hoc*, mediante otra prueba no paramétrica (prueba de *Dunn*). En las figuras siguientes se muestran únicamente aquellos valores p que corresponden a una diferencia significativa. Cuando no se muestra un valor p entre dos altitudes, significa que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre éstas.

En la **Figura 7.1** se observa que hubo una diferencia significativa con el rendimiento de combustible al cambiar la altitud de 0 msnm (con una mediana de rendimiento de 172 km/gal) a 1500 msnm (mediana de 124.1 km/gal), con un valor p de 0.046. Esta disminución del 28% de las medianas del rendimiento de combustible sugiere que las motocicletas (con carburador) se deben calibrar para la altitud en la que van a trabajar la mayor parte del tiempo.

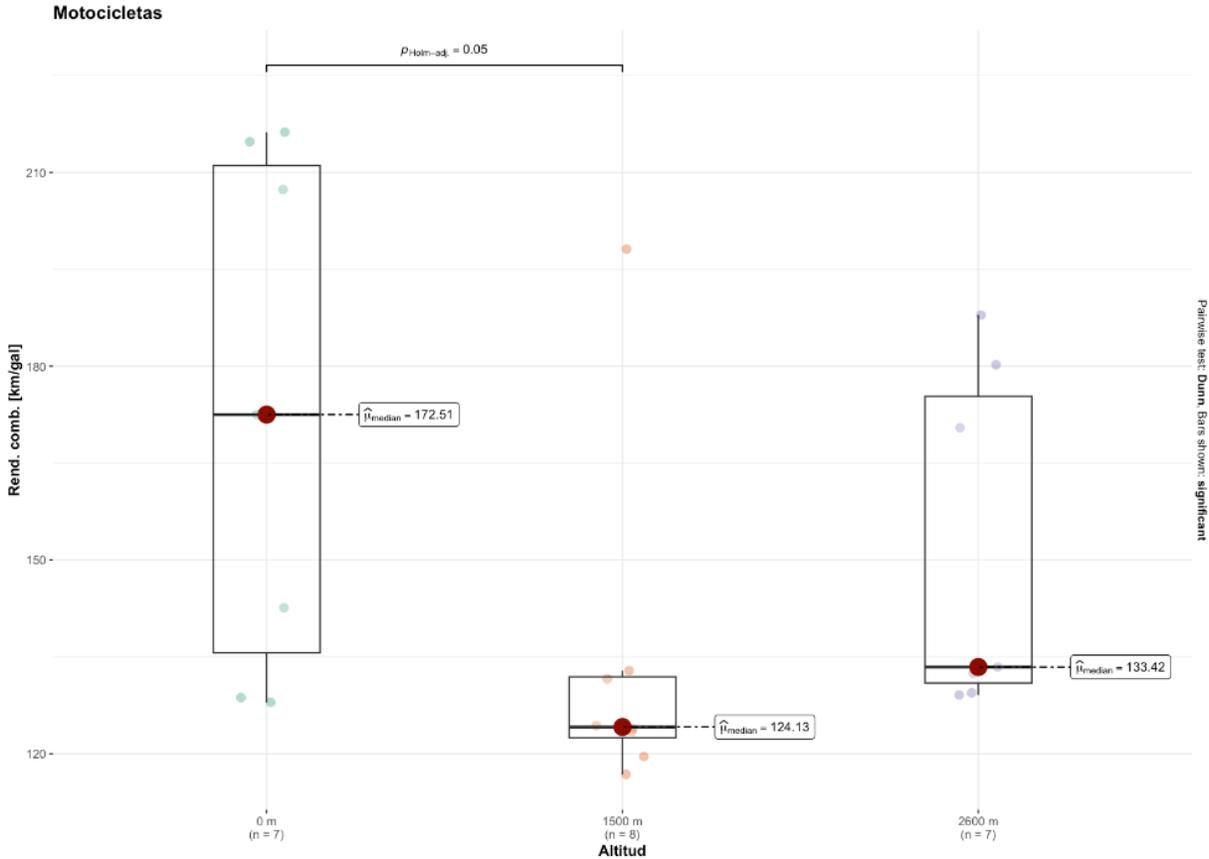


Figura 7.1. Impacto de la altitud sobre el rendimiento de combustible en motocicletas

La prueba de *Dunn* mostró que no hay otras diferencias entre medianas estadísticamente significativas (Tabla 7.2).

Tabla 7.2. Resultados de la prueba de *Dunn*

Altitudes comparadas	Valor <i>p</i>
0 m – 1500 m	0.96396751
0 m – 2600 m	0.08516943
1500 m – 2600 m	0.06335538

La altitud tuvo efecto estadísticamente significativo sólo sobre el rendimiento de combustible y el factor de emisión de número de partículas (PN). Este efecto sobre el rendimiento de combustible en las motocicletas se puede deber a que, para la motocicleta con carburador, en la cual no hay un sistema de control electrónico que regule con precisión el suministro de combustible, no se compensan los cambios de la relación aire/combustible y del rendimiento volumétrico del motor, a medida que cambia la altitud.

En la **Figura 7.2** se observa la tendencia del aumento de la mediana del número de partículas al aumentar la altitud. Sin embargo, el análisis *post-hoc*, confirma que realmente no existe una diferencia significativa entre las emisiones de PN para las diferentes altitudes, como se ve en los valores *p* mostrados en la Tabla 7.2.

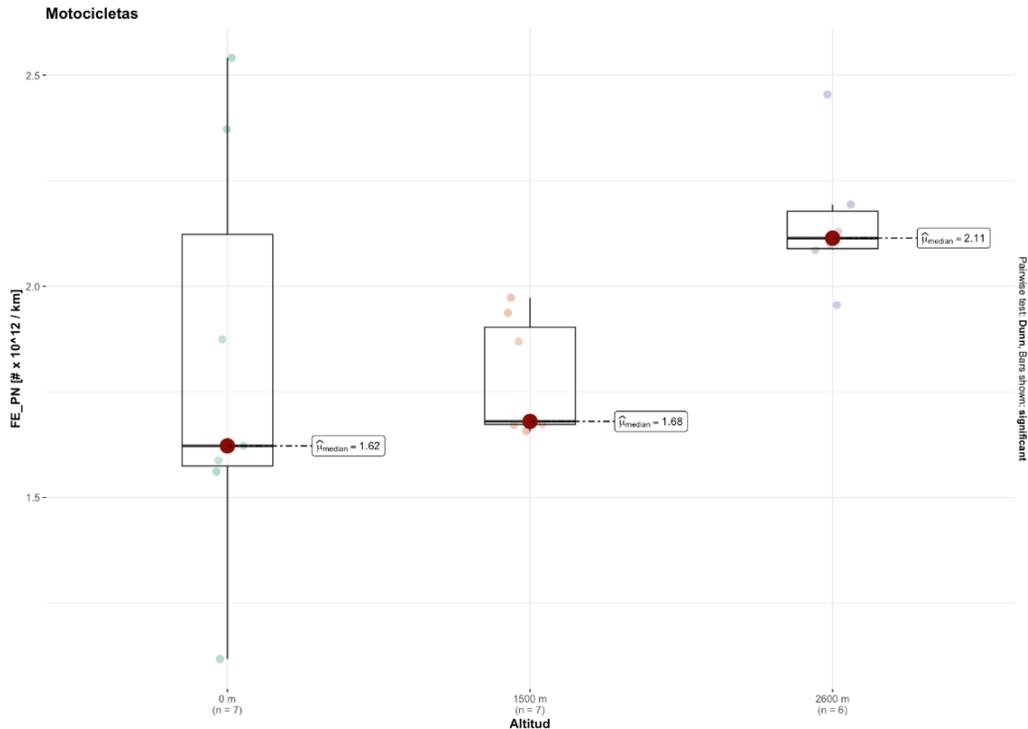


Figura 7.2. Efecto de la altitud sobre el FE de PN en motocicletas

En las Figuras 7.3 a 7. 9 se muestran los resultados comparativos entre las dos motocicletas.

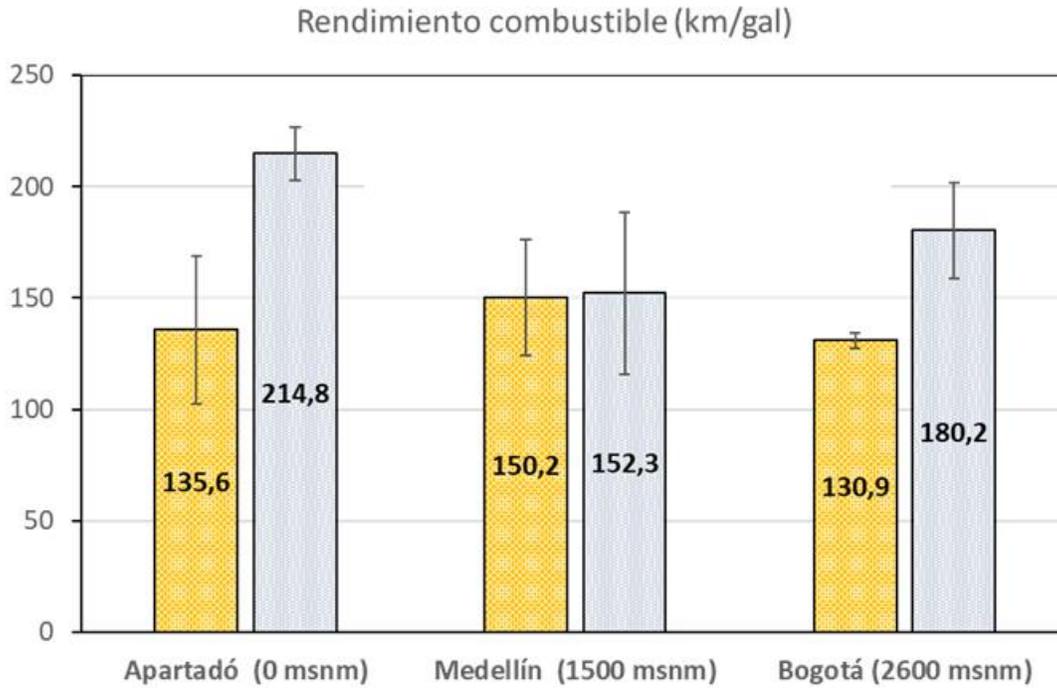


Figura 7.3 Efecto de la altitud en el rendimiento de combustible. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

CO₂ [g/km]

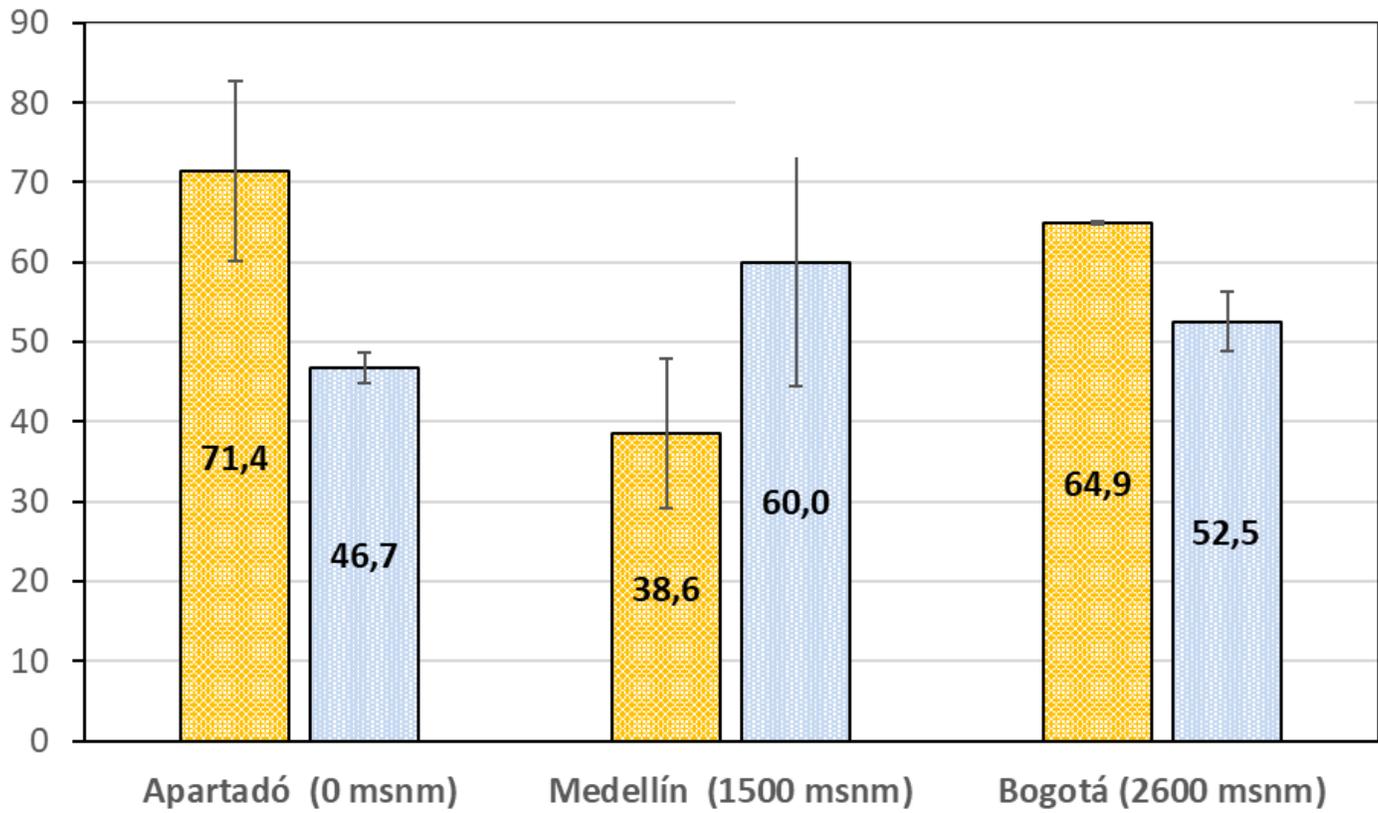


Figura 7.4 Efecto de la altitud en el CO₂. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

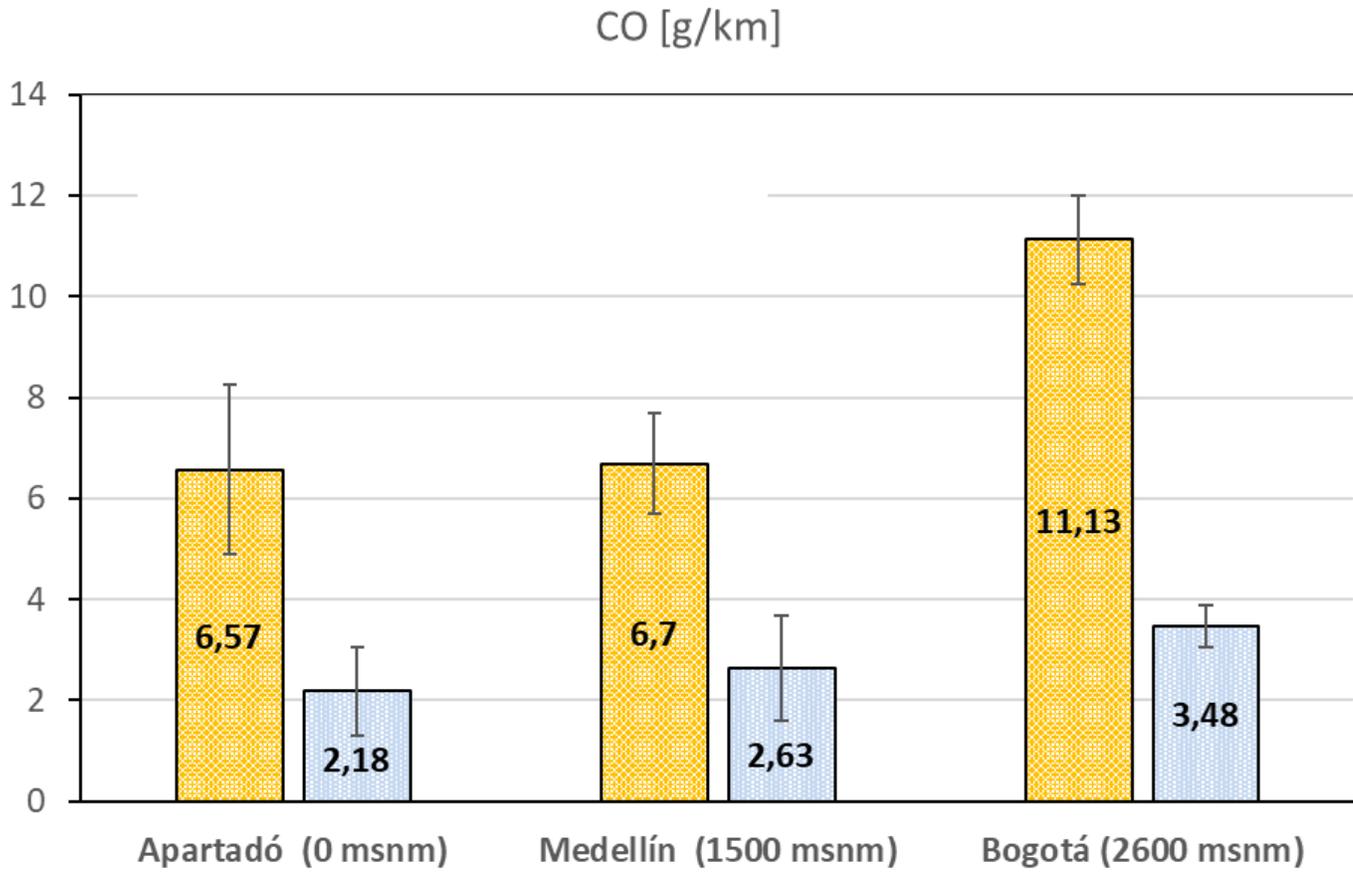


Figura 7.5 Efecto de la altitud en el CO. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

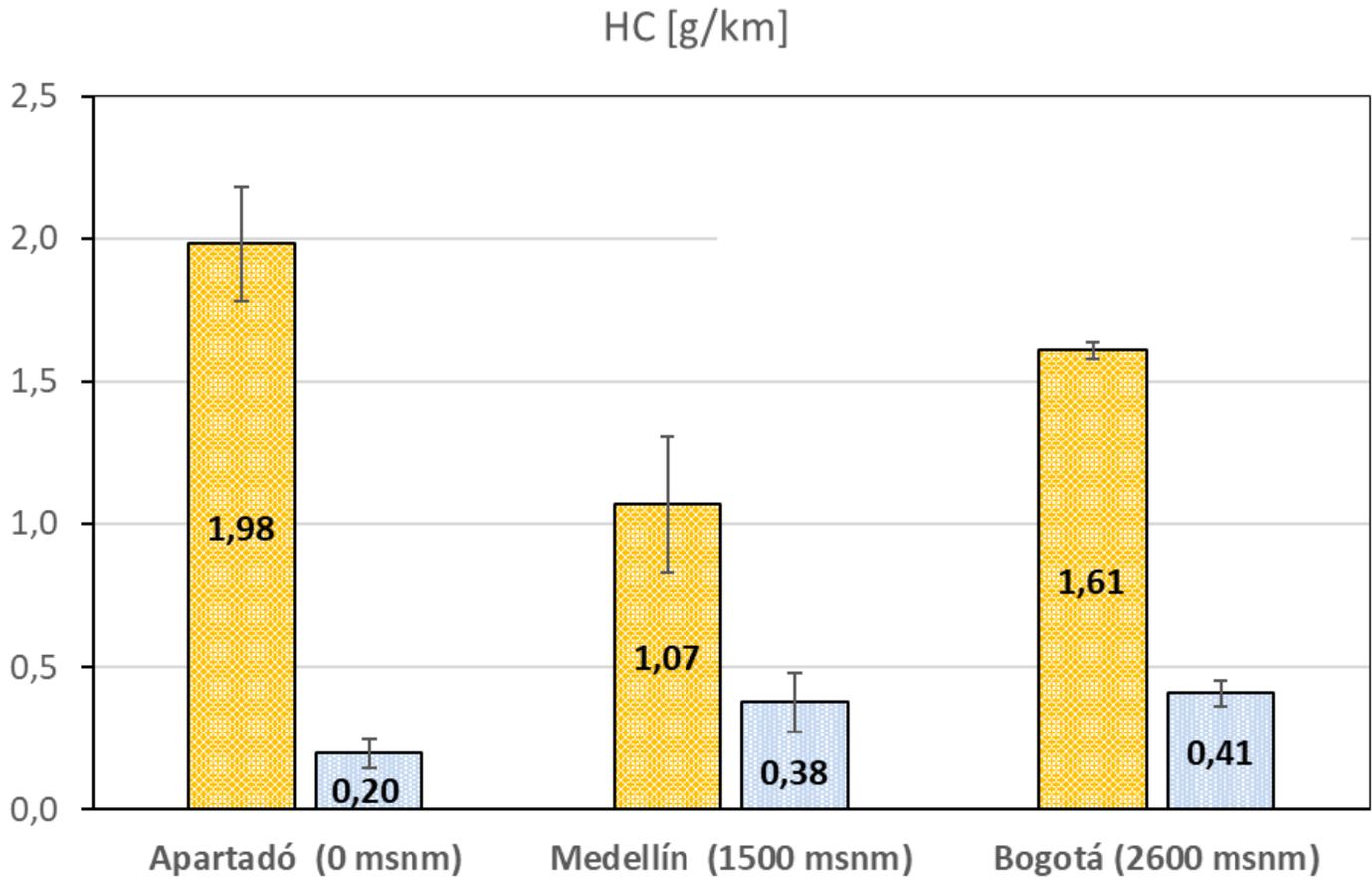


Figura 7.6 Efecto de la altitud en el HC. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

NOx [mg/km]

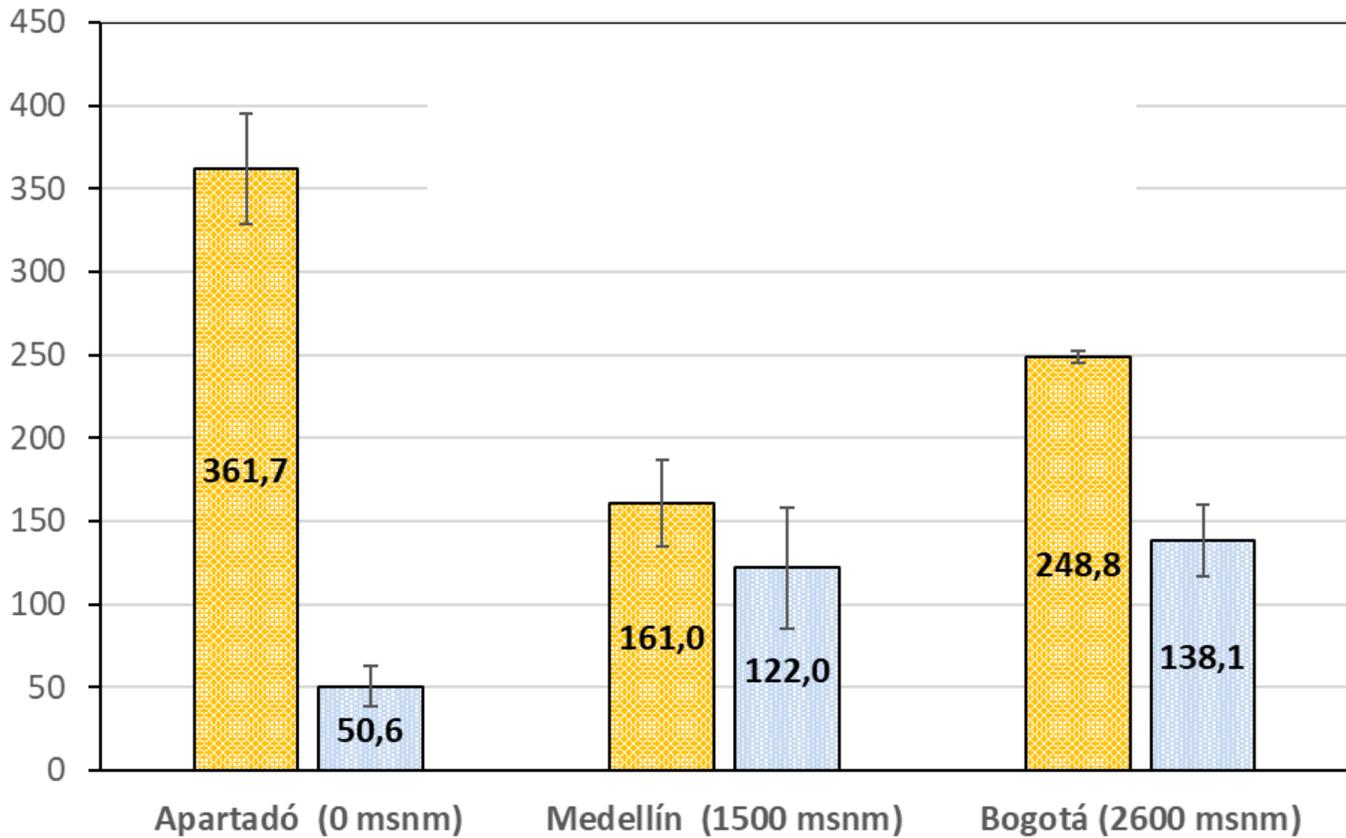


Figura 7.7 Efecto de la altitud en el NOx. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

PM [mg/km]

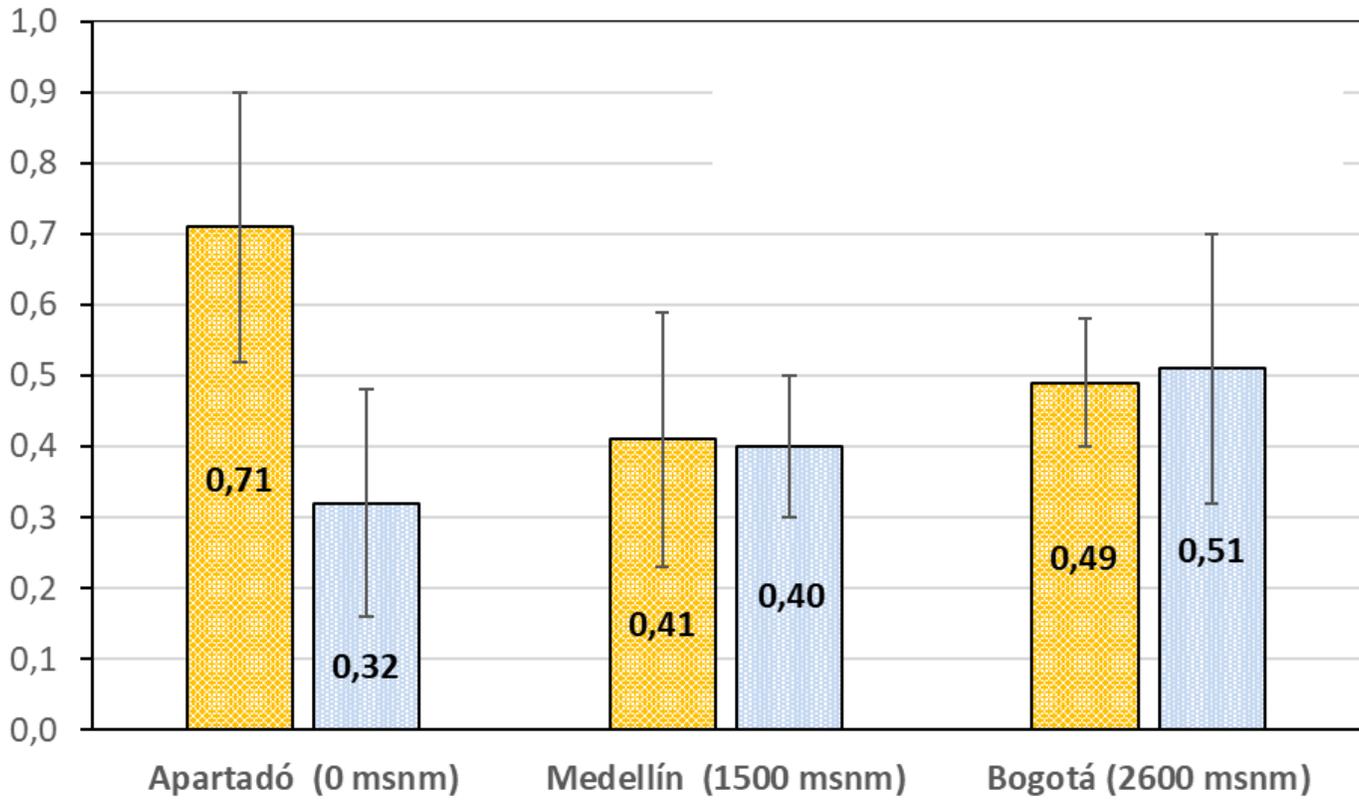


Figura 7.8 Efecto de la altitud en el PM. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

PN [# * 10e12 /km]

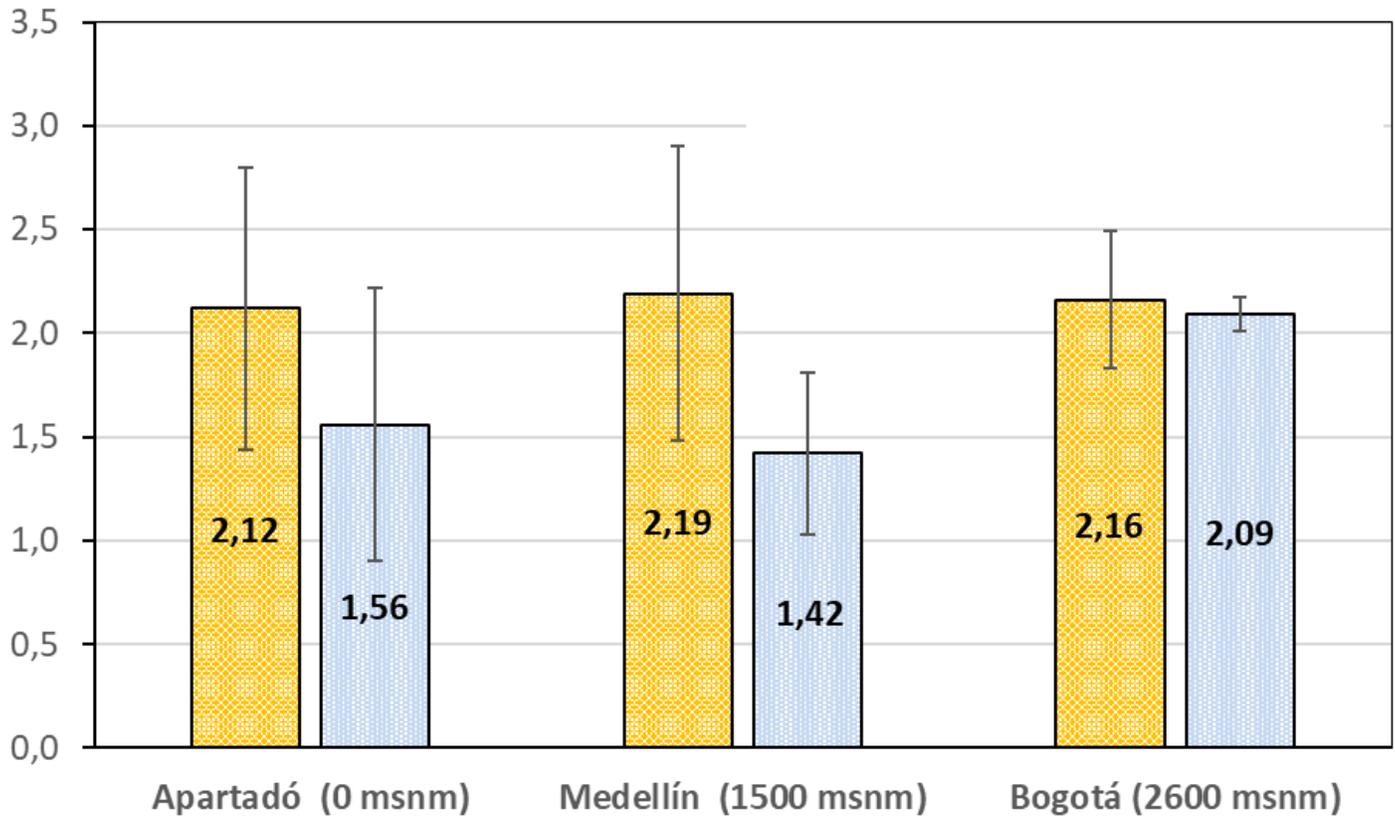


Figura 7.9 Efecto de la altitud en el PN. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

3. RESULTADOS PARA VEHÍCULOS LIVIANOS

Se realizó un análisis exploratorio con el objetivo de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las variables medidas en las diferentes altitudes. En la **Tabla 7.3** se muestran los valores p obtenidos para la prueba de *Kruskal-Wallis*. Se resaltan los valores $p < 0.05$ que sugieren diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos niveles de altitud, sobre las medianas de la variable dependiente.

Tabla 7.3. Valor p para prueba de *Kruskal -Wallis* en vehículos livianos

Variable Dependiente	Valor P
Rendimiento [km/gal]	0.1084
CO ₂ [g/km]	0.05956
CO [g/km]	0.005961
HC [g/km]	0.0006314
NO _x [g/km]	0.0663
PM [mg/km]	0.00381
PN [# 10 ¹² /km]	0.002973

La altitud, para vehículos livianos, no tuvo efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento de combustible ni sobre las emisiones de CO₂. Este comportamiento puede deberse a la tecnología que poseen los vehículos livianos para el control de la inyección, ya que éstos regulan el suministro de combustible, tratando de mantener la estequiometría de las reacciones. Este resultado es similar al obtenido en el estudio reciente de Wang, Y. y colaboradores [1], en el cual reportaron un estudio experimental donde midieron 21 vehículos livianos con motores de encendido provocado en seis ciudades chinas, ubicadas desde nivel de mar hasta 2400 msnm, y siguiendo el ciclo de conducción internacional armonizado WLTP (*worldwide harmonized light duty test procedure*). Según estos autores, no se presentó ninguna tendencia (aumento o disminución) clara o uniforme al incrementar la altitud sobre el nivel del mar en las emisiones de CO₂ o el consumo de combustible.

Sin embargo, para los vehículos livianos, la altitud parece tener un efecto estadísticamente significativo sobre algunos factores de emisión: CO, HC, PM y PN. Para confirmar esto, así como para identificar las altitudes que conducen a dichas diferencias, se realiza un análisis *post-hoc*, mediante la prueba no paramétrica de Dunn. Las figuras 3 a 6 muestran los resultados de la prueba de Dunn. En estas figuras se muestran únicamente aquellos valores p que corresponden a una diferencia significativa. Cuando no se muestra un valor p entre dos altitudes, significa que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre éstas.

En general, se observa una tendencia de disminución de los factores de emisión para la mayor altitud (2600 msnm). En la **Figura 7.10** se observa una diferencia significativa para el factor de emisión de CO entre las altitudes de 1500 msnm y 2600 msnm. Las emisiones de CO se redujeron de 3.23 g/km a 1.78 g/km, lo cual equivale a una disminución de 44%.

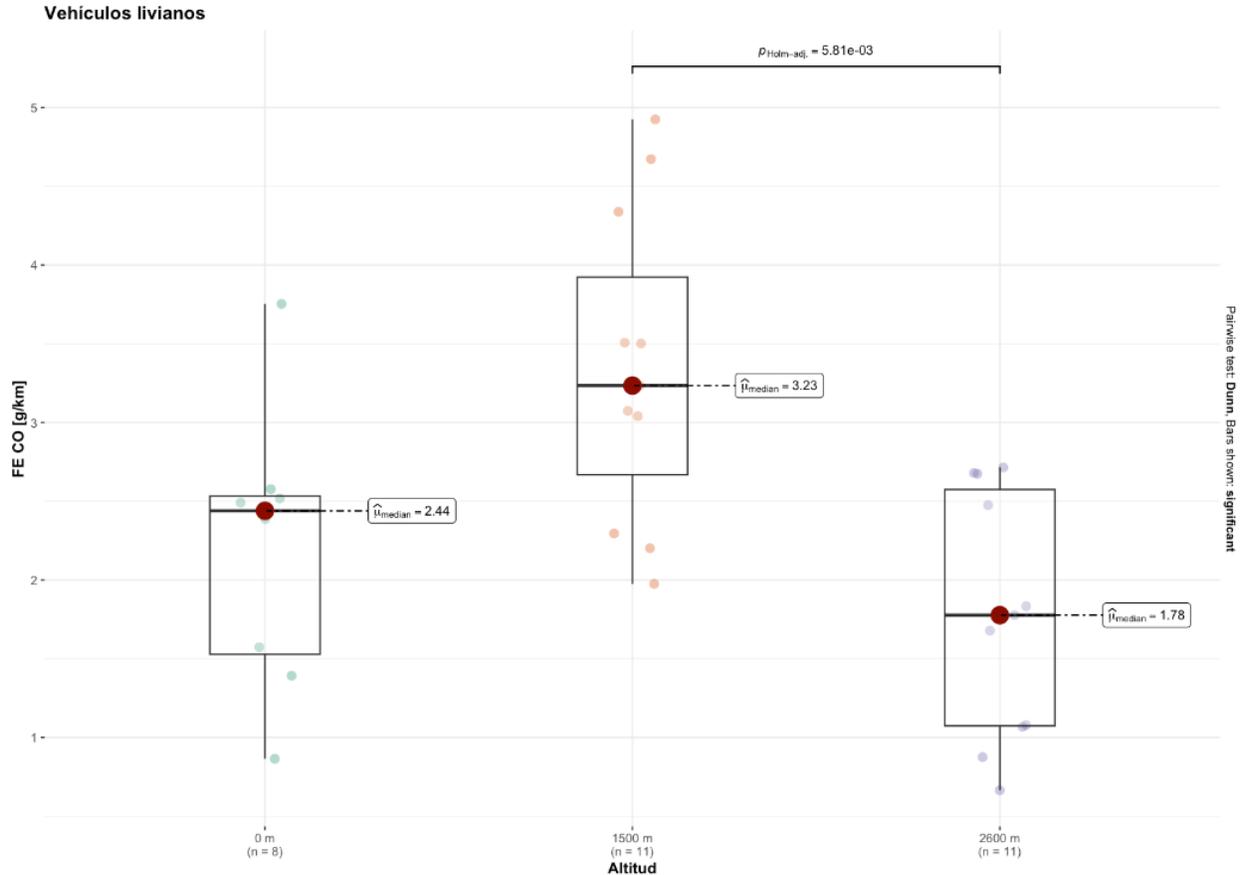


Figura 7.10. Efecto de la altitud sobre las emisiones de CO en vehículos livianos

En la **Figura 7.11** se observa una diferencia significativa en las emisiones de HC entre las altitudes de 1500 msnm y 2600 msnm, y entre las altitudes de 2600 msnm y 0 msnm. El factor de emisión de HC en ambos casos disminuyó al aumentar la altitud.

La mayor diferencia se presenta al cambiar de 0 msnm a 2600 msnm, pasando de 0.12 g/km a 0.02 g/km de HC.

En la **Figura 7.12** se observa una diferencia significativa entre las altitudes de 1500 msnm y 2600 msnm para el material particulado. El PM se reduce de 1.2 mg/km a 0.46 mg/km, lo cual equivale a una disminución del 62%.

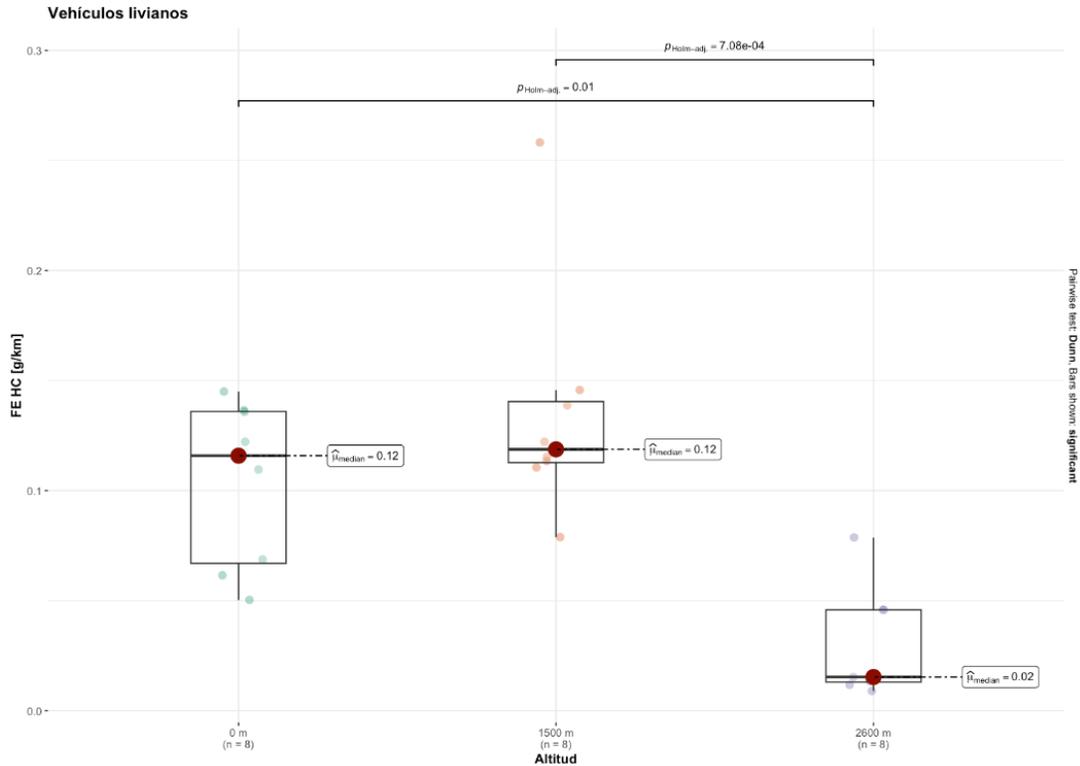


Figura 7.11. Efecto de la altitud sobre las emisiones de HC en vehículos livianos.

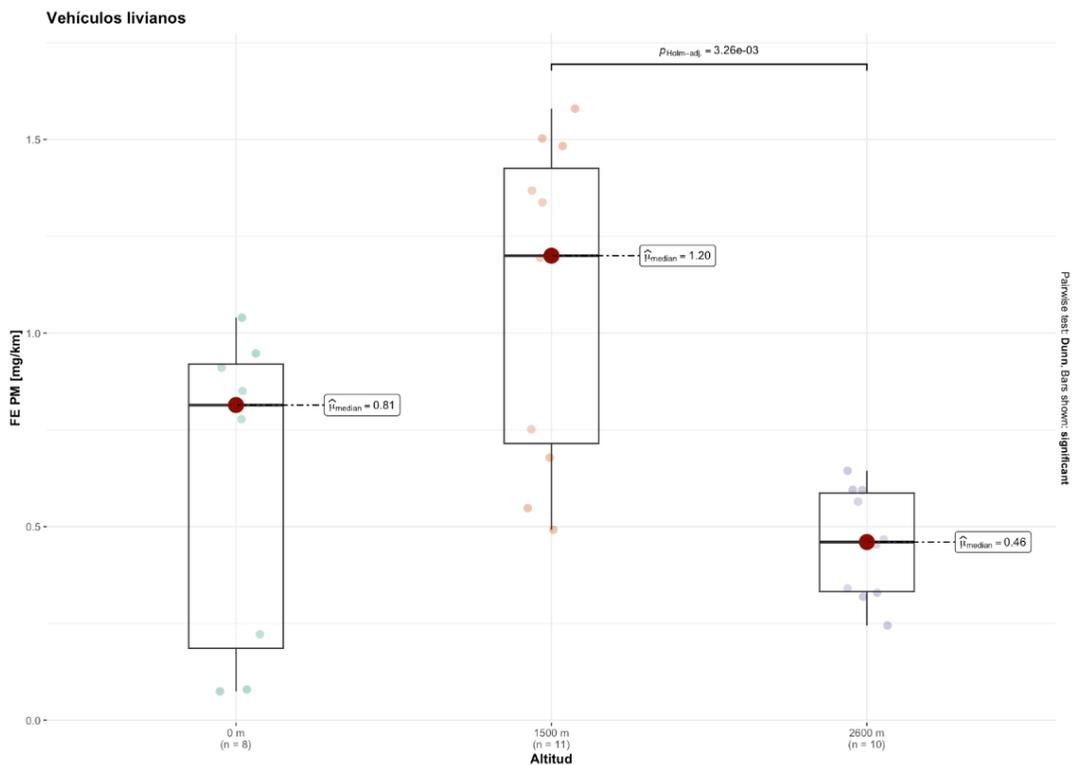


Figura 7.12. Efecto de la altitud sobre las emisiones de PM en vehículos livianos

En la **Figura 7.13** se observa una diferencia significativa entre las altitudes de 0 msnm y 1500 msnm, y entre las altitudes de 1500 msnm y 2600 msnm. Las emisiones de PN disminuyen cuando la altitud aumenta de 1500 msnm a 2600 msnm, pero aumenta el PN cuando la altitud aumenta de 0 msnm a 1500 msnm.

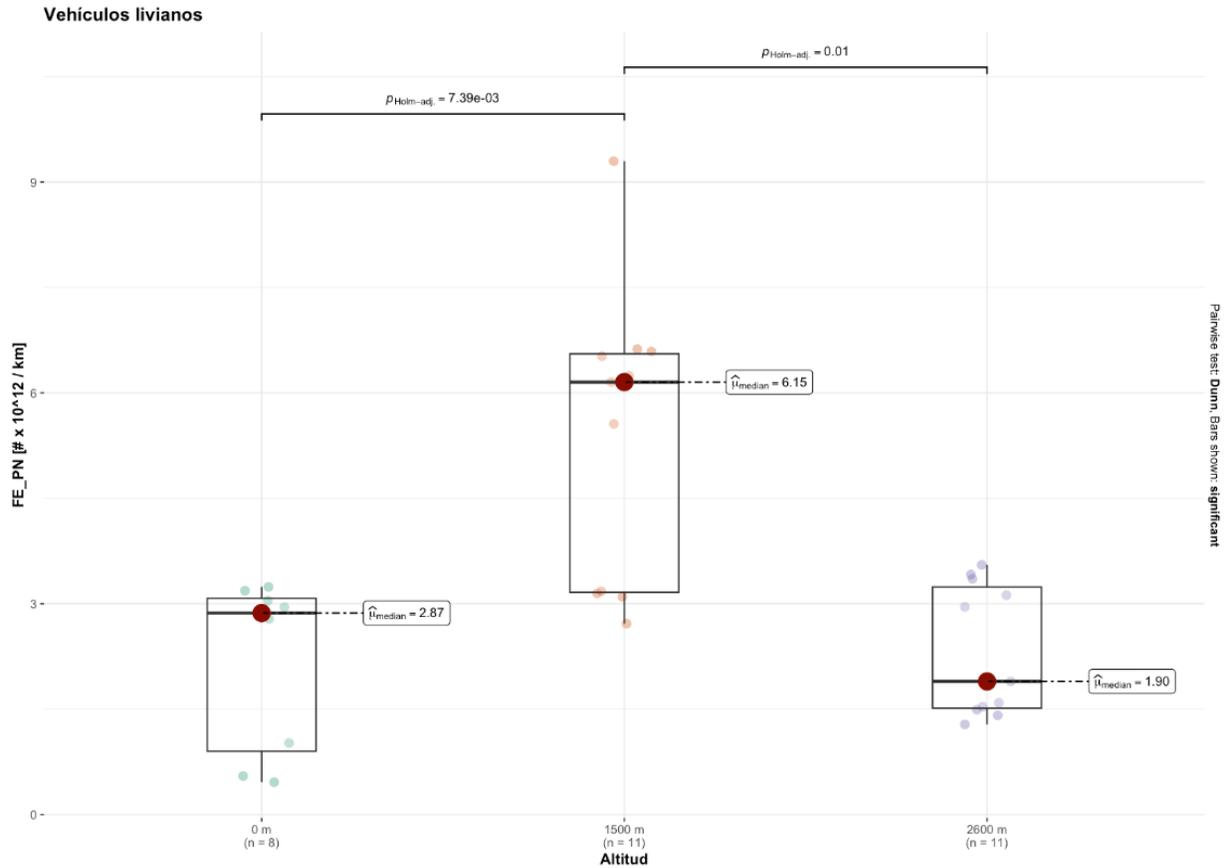


Figura 7.13. Efecto de la altitud sobre las emisiones de PN en vehículos livianos

En las Figuras 7.14 a 7.20 se muestra el impacto de la altitud sobre el nivel del mar en cada vehículo tanto en el rendimiento de combustible, como en cada factor de emisión. Se muestran las medianas y el intervalo de confianza al 95%.

Rendimiento combustible (km/gal)

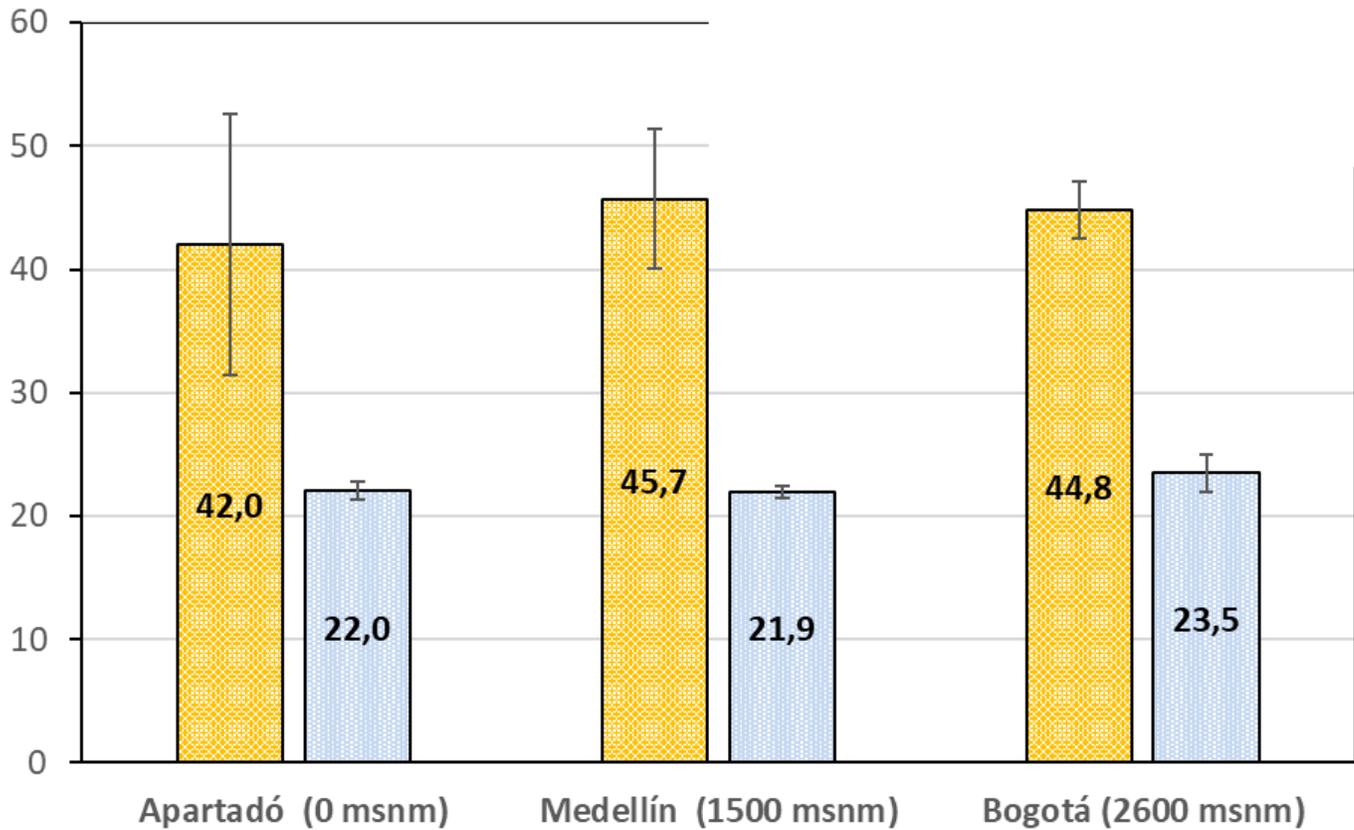


Figura 7.14. Efecto de la altitud sobre el rendimiento de combustible. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

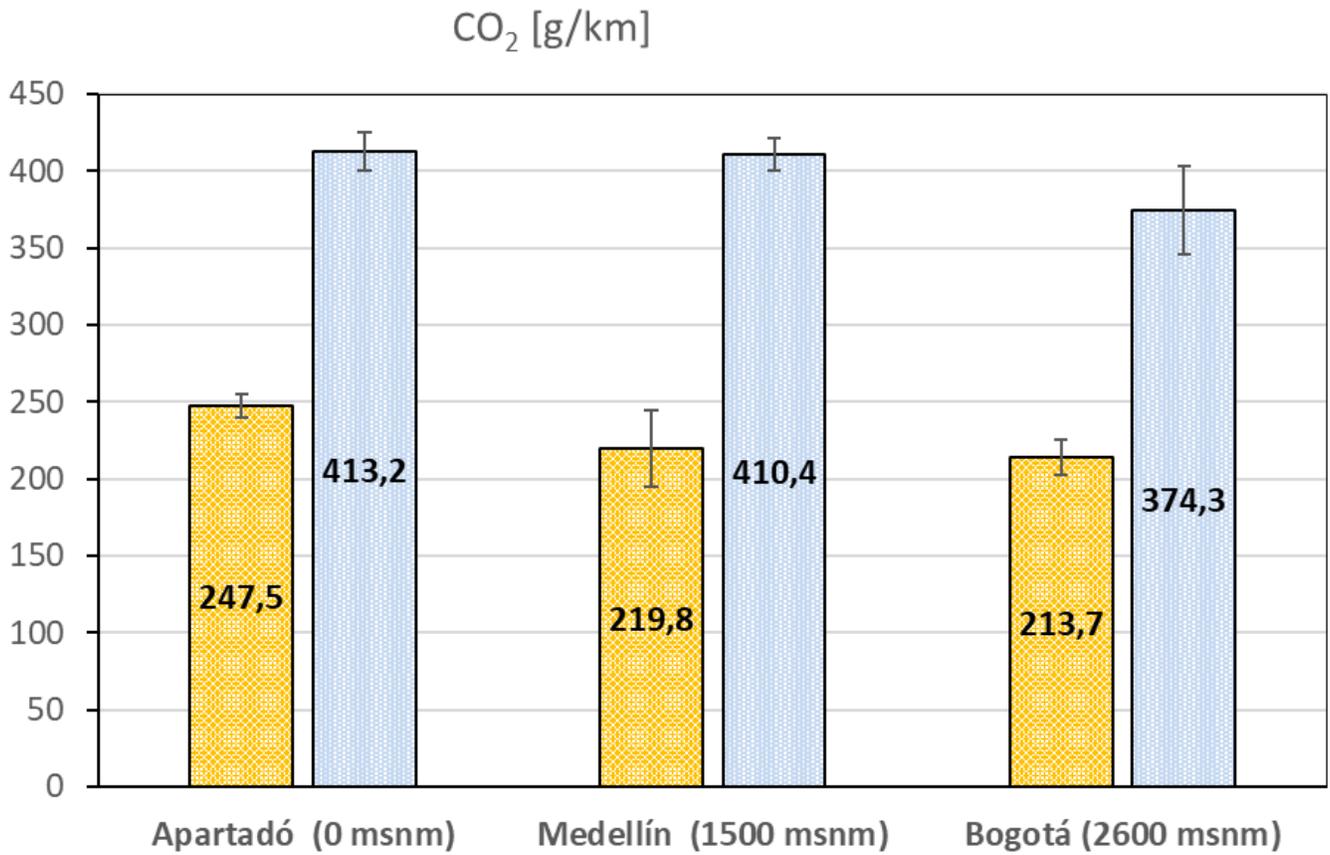


Figura 7.15. Efecto de la altitud en el CO_2 . Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

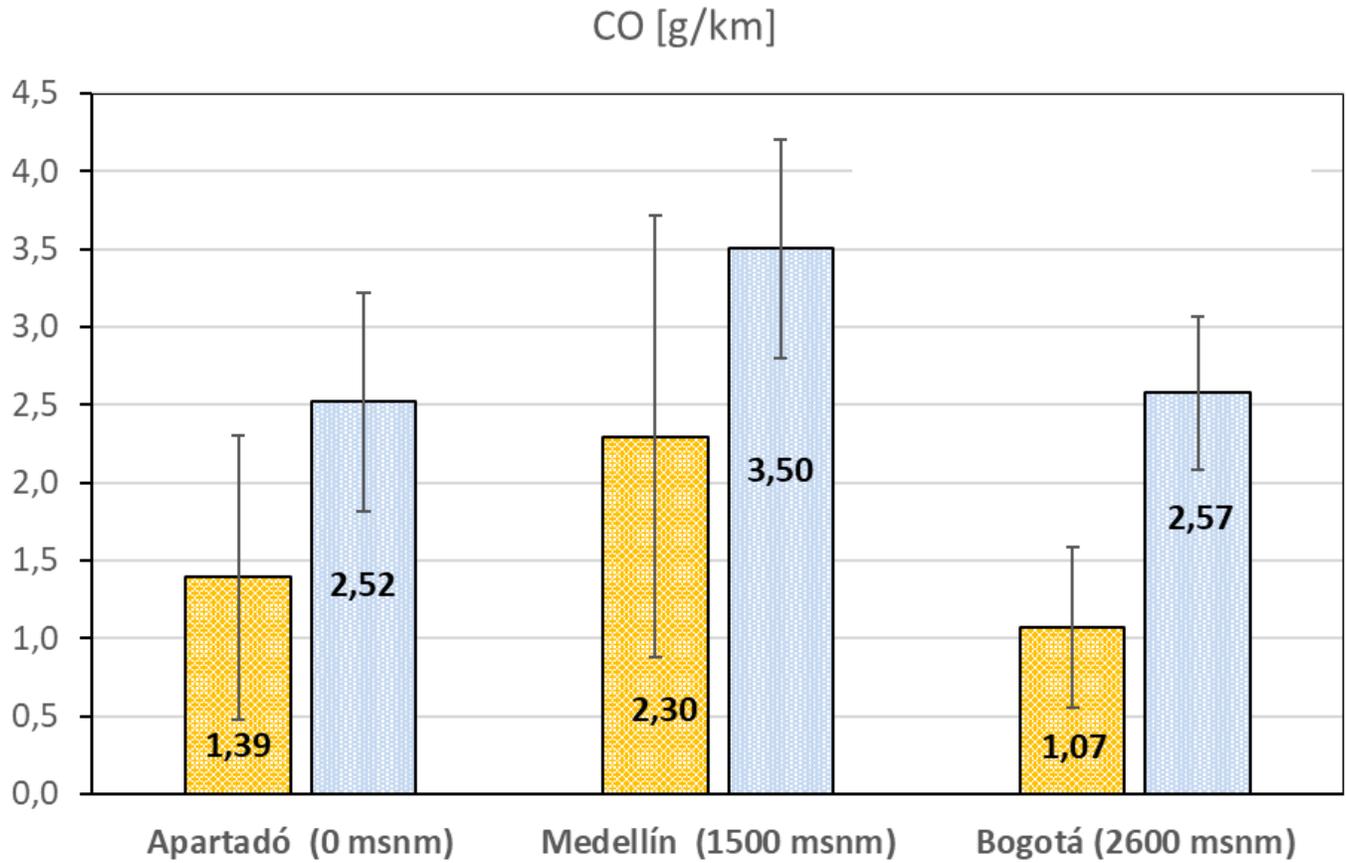


Figura 7.16. Efecto de la altitud en el CO. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

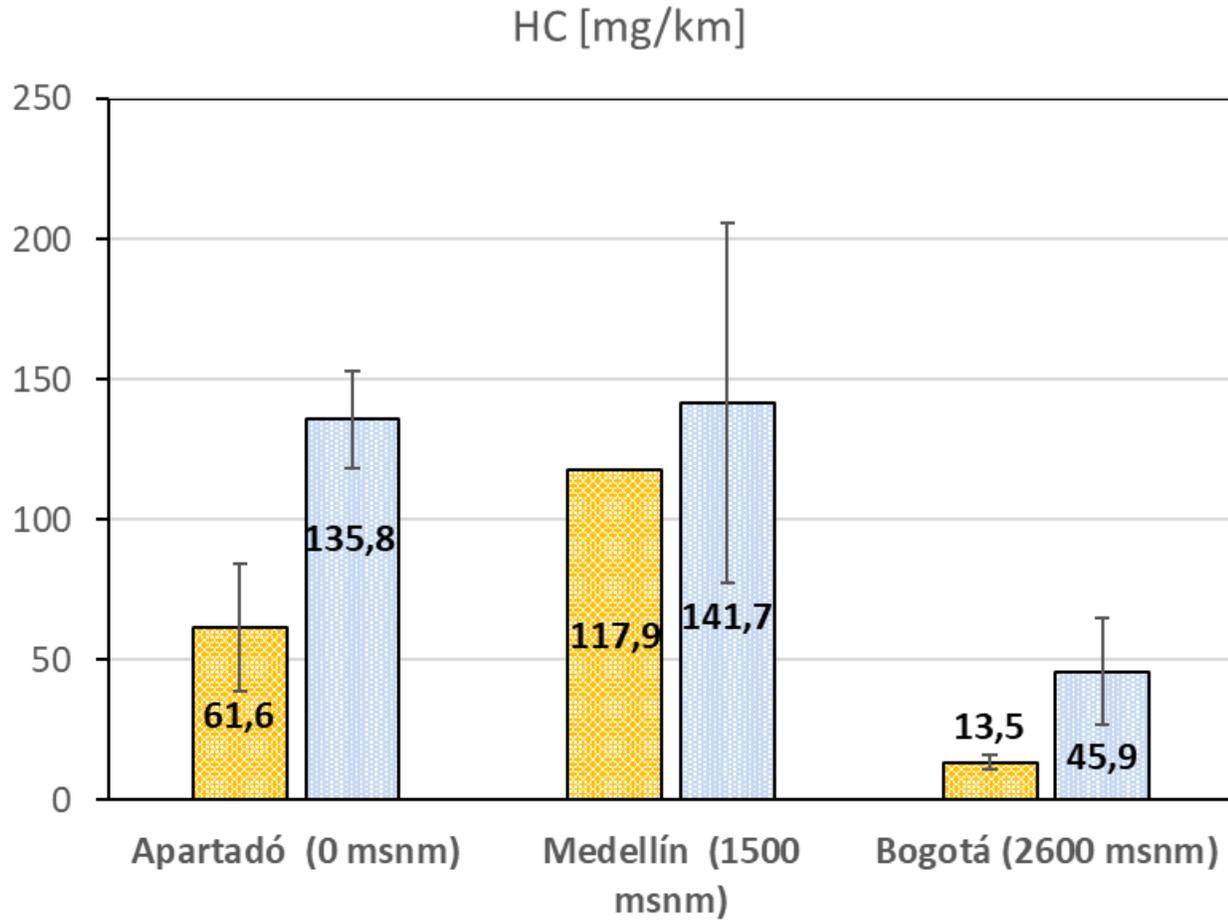


Figura 7.17. Efecto de la altitud en el HC. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

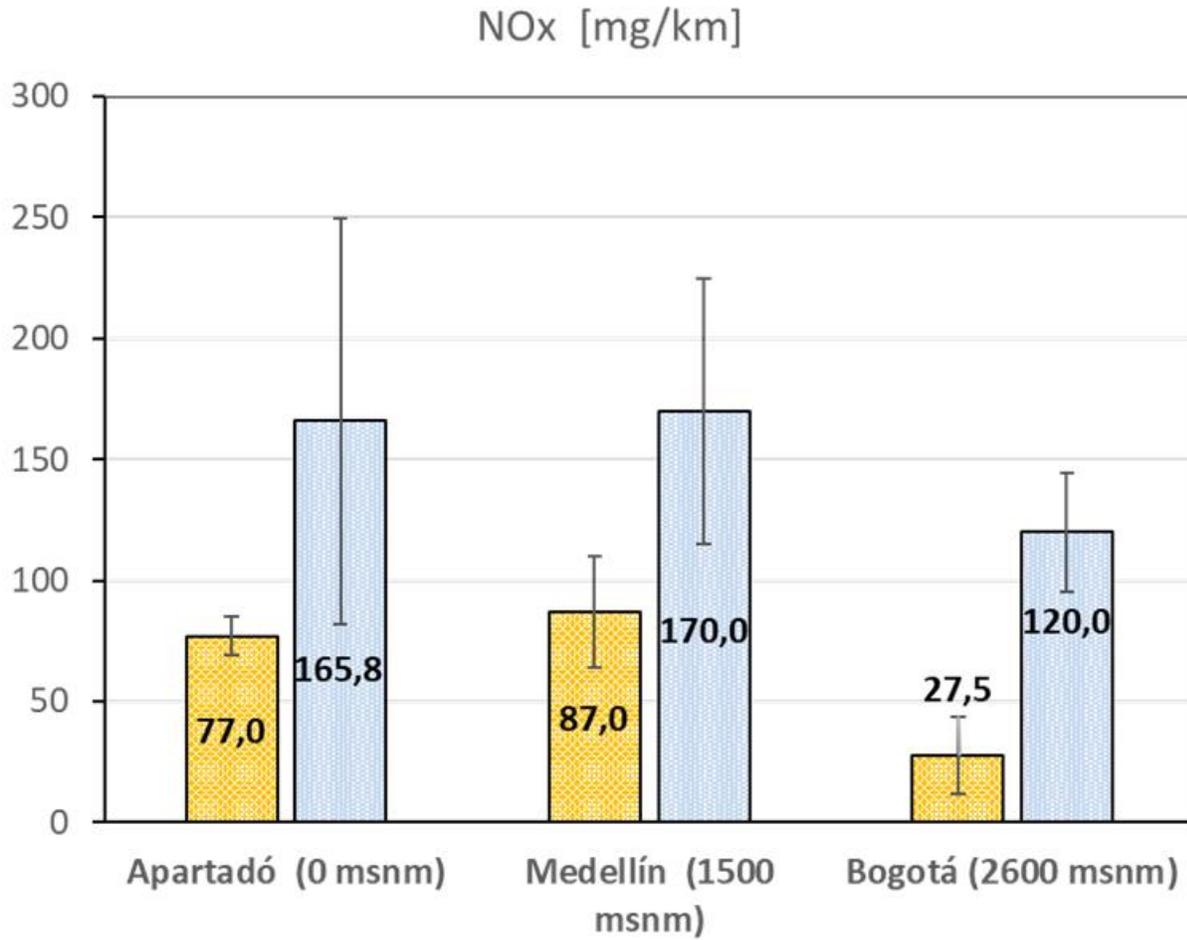


Figura 7.18. Efecto de la altitud en el NOx. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

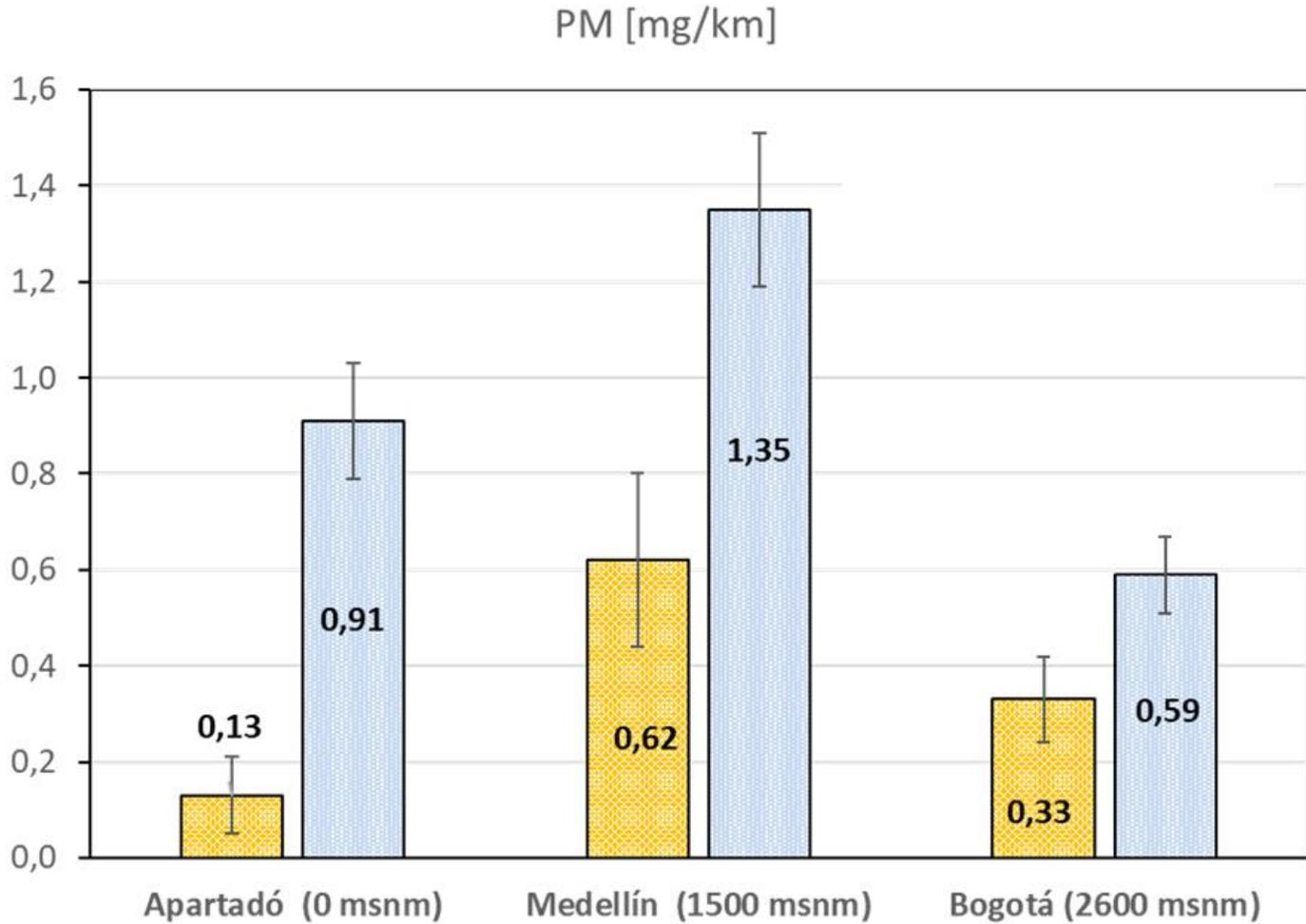


Figura 7.19. Efecto de la altitud en el PM. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

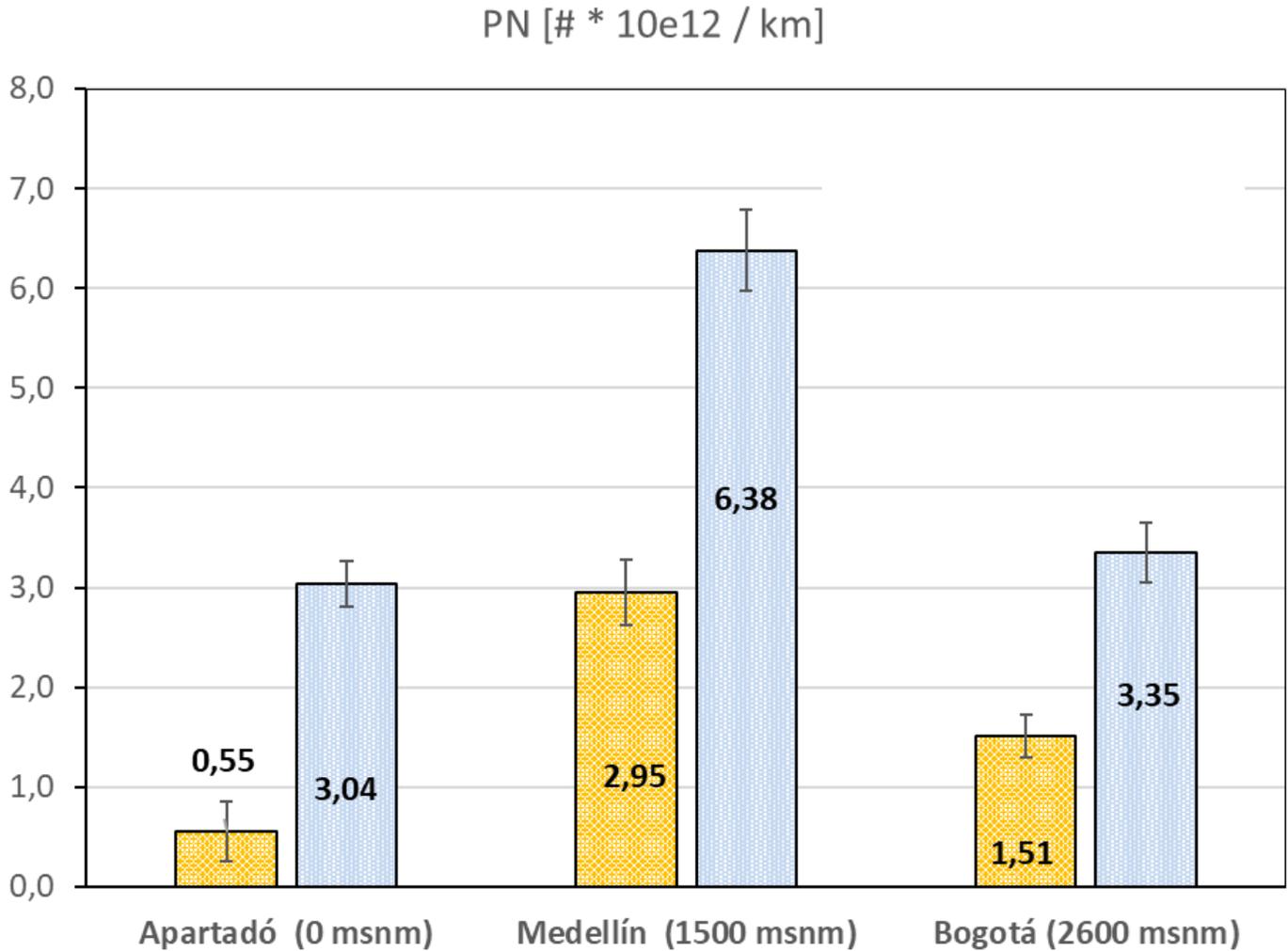


Figura 7.20. Efecto de la altitud en el PN. Se muestra la mediana y el intervalo de confianza al 95%

3.1 Investigaciones sobre el efecto de la altitud en vehículos livianos

En 2021, en China, Wang y colaboradores [1] llevaron a cabo pruebas en 21 vehículos livianos con cilindradas entre 1.6 litros y 3 litros. Estas pruebas se realizaron en condiciones reales de conducción en seis ciudades, abarcando altitudes que variaban desde 27 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta 2265 msnm. Los lugares específicos de prueba incluyeron Beijing (BJ), Chongqing (CQ), Yinchuan (YC), Kunming (KM), Lanzhou (LZ) y Xining (XN), con un total de 126 pruebas válidas. El propósito de estas pruebas fue examinar cómo las diferentes altitudes afectan las emisiones de CO₂, CO, NO_x y PM en vehículos.

Adicionalmente, se realizaron pruebas en una cámara de altitud con tres vehículos, siguiendo el procedimiento de prueba de vehículos ligeros armonizado a nivel mundial (WLTP). Estas pruebas se llevaron a cabo en cinco alturas distintas (0, 700 msnm, 1300 msnm, 1900 msnm y 2400 msnm) dentro

de la cámara de altitud. Los resultados para tres vehículos en tres altitudes diferentes de estas pruebas se detallan en la Tabla 7.4. Los autores reportan que no se encontraron patrones consistentes o uniformes entre altitudes y CO₂ y emisiones contaminantes, tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de conducción real.

Tabla 7.4: Factores de emisión obtenidos en banco de rodillos en cámara de altitud para el estudio de la ciudad de China, ciclo WLTC **Artículo A** (Wang, et al) [1]

Vehículo / altitud	CO ₂ (g/km)			CO (g/km)			NO _x (mg/km)			PN (1011#/km)		
	0	1300	2400	0	1300	2400	0	1300	2400	0	1300	2400
1	180	167	170	130	70	50	6	8.7	12	2	2.4	2.7
2	160	150	135	240	250	230	15	20	50	4.8	6	5
3	170	155	150	120	125	165	10	8	45	2.1	2.2	2.3

Por otro lado, en las pruebas de laboratorio para todos los vehículos de prueba, la altitud simulada de 2400 msnm tuvo la emisión de NO_x más alta, mientras que las emisiones de CO₂ disminuyeron con la altitud. Además, establecen que para las pruebas de laboratorio las variaciones pueden deberse a la relación aire-combustible durante los ciclos transitorios y variaciones en la operación del motor entre pruebas, por otro lado, para las pruebas con ciclo real de conducción se agrega más incertidumbre a las emisiones por factores como comportamientos de conducción, condiciones de la carretera y condiciones ambientales, entre otros.

En 2019, Wang y colaboradores [2] publicaron los resultados de mediciones de emisiones contaminantes de 3 vehículos livianos del año 2016 con motor de encendido provocado (MEP) de 1600 cc de cilindrada medidos bajo el estándar de emisión China 5, sus características se muestran en la Tabla 7.5. Los vehículos se sometieron a pruebas utilizando los Ciclos de Prueba Armonizados a Nivel Mundial para Vehículos Ligeros (WLTC)/RDE a diversas altitudes, y las pruebas RDE (emisiones bajo conducción real) se calcularon utilizando diferentes datos de referencia del WLTC. Los autores reportaron que, a mayor altitud menor era la emisión de CO₂ del vehículo, y la emisión de CO₂ del vehículo de prueba atmosférico presentaba una correlación lineal con la altitud: por cada 1000 metros de aumento en la altitud, la emisión de CO₂ del WLTC disminuía un 5.31% (Tabla 7.6) [2]

Tabla 7.5. Características vehículos medidos MEP en el estudio de China, 2019 (Wang, et al) [2]

Especificación	Vehículo 1	Vehículo 2	Vehículo 3
Kilometraje [km]	15.000	8.000	6.000
Tipo de entrada de aire	Turbo	Natural	Turbo

Tabla 7.6. Factores de emisión para el estudio de China, 2019 **Artículo B** (Wang, et al) [2]

CO ₂ (g/km)					
Altura	0	1100	1520	1840	2300
Total	157	148.5	147.5	142.7	136.4

En un estudio publicado en noviembre del 2023 Zhaoyu y colaboradores [3] reportaron la influencia de la altitud en regiones montañosas sobre las emisiones de un vehículo Tablcon motor de encendido provocado y 2360 cc de cilindrada, de aspiración natural, con 140.778 km de recorrido y que cumplía estándar de emisiones China 4. Los autores usaron un sistema portátil de medición de emisiones, para CO₂, CO y NO_x en altitudes que varían de 2270 a 4540 metros en el altiplano Qinghai-Tíbet de China. Los resultados indicaron que las emisiones aumentaron con la altitud. La presión atmosférica se identificó como el principal factor ambiental que afectaba a las emisiones, y se observó una relación cuadrática entre la velocidad del vehículo y las emisiones de CO₂.

Tabla 7.7. Resultados del estudio de China, 2023. **Artículo C** (Zhaoyu, et al) [3]

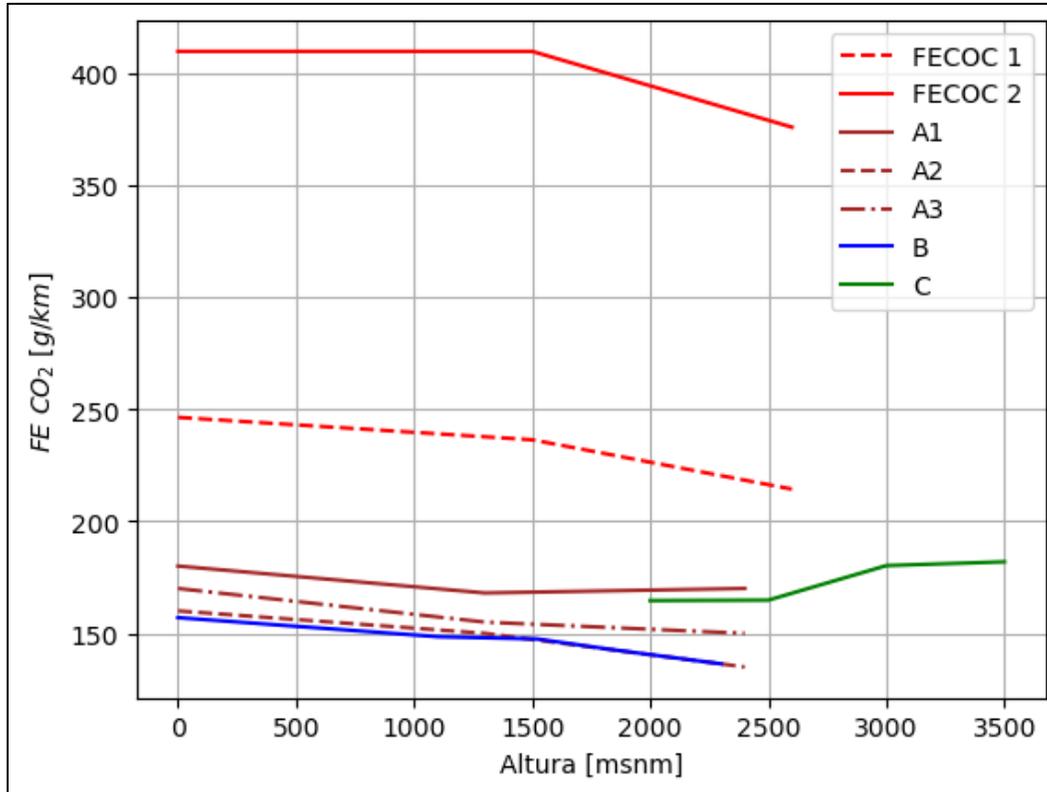
CO ₂ (g/km)				
Altitud	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000
Total	164.6	164.8	180.2	181.9
CO (g/km)				
Total	0.96	0.76	1.05	0.95
NO _x (g/km)				
Total	0.16	0.15	0.25	0.12

3.2 Comparativo del efecto de la altitud en vehículos livianos con este proyecto

En la Figura 7.21 se ilustra el comportamiento de los factores de emisión determinados en las investigaciones mencionadas frente a los determinados en este proyecto (FECOC+ Fase 3). Es importante aclarar que, así como en nuestro proyecto los estudios analizados se realizaron en carretera con lo que se tiene un criterio de comparación similar. En la Figura 7.21 la línea roja a trazos representa el vehículo 1 de FECOC+ = (año de modelo 2016), mientras que la línea roja continua representa al vehículo 2 de FECOC+ = 3500 cc (año modelo 2005). Para un mejor entendimiento de la Figura 7.21 se debe tener en cuenta que:

- FECOC 1 : 1600 cc medido en el proyecto FECOC+ Fase 3.
- FECOC 2 : 3500 cc medido en el proyecto FECOC+ Fase 3.
- A1: Vehículo 1 medido en el proyecto del **artículo A**.

- A2: Vehículo 2 medido en el proyecto del **artículo A**.
- A3: Vehículo 3 medido en el proyecto del **artículo A**.
- C: Vehículo medido en el proyecto del **artículo C**.



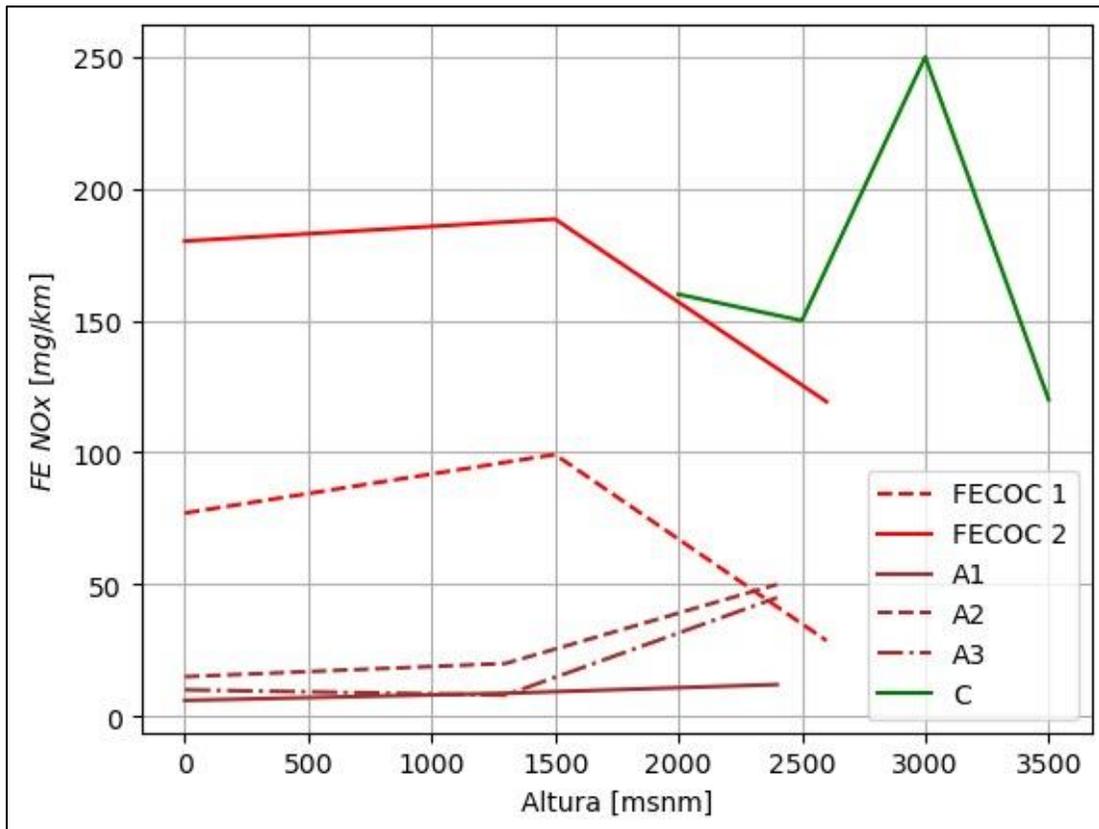
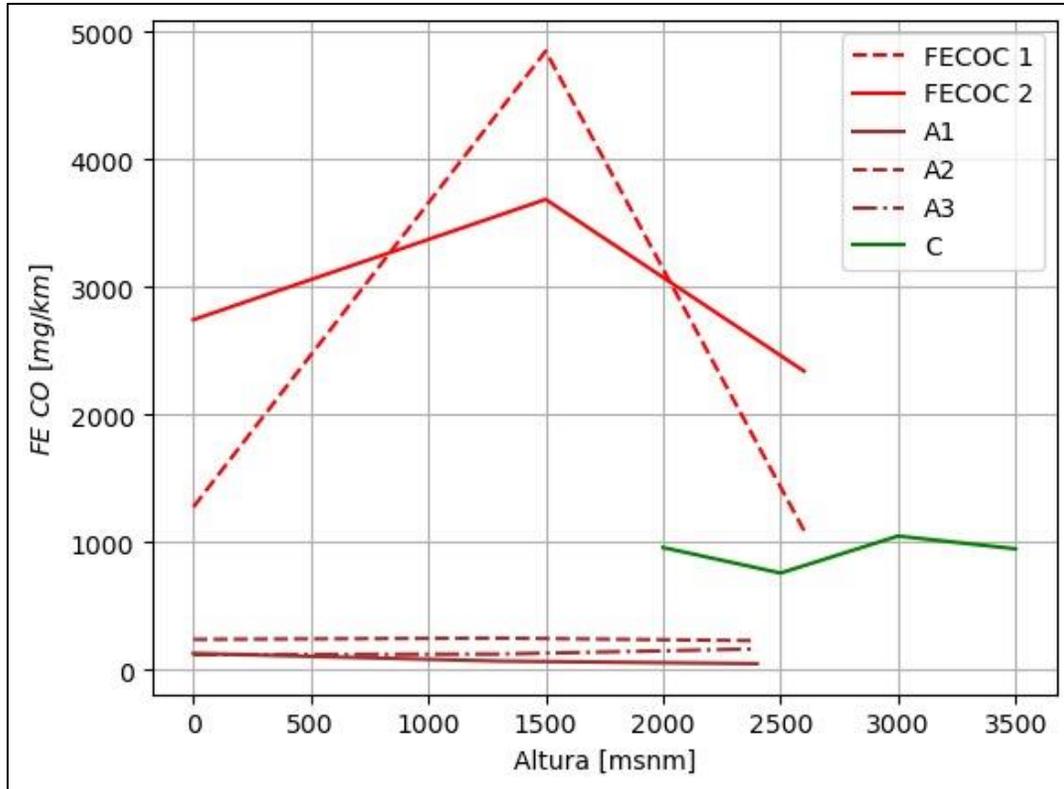


Figura 7.21. Efecto de la altitud de este proyecto comparado con la literatura

4 CONCLUSIONES

- No se observó un efecto estadísticamente significativo de la altitud sobre el nivel del mar sobre los factores de emisión de las motocicletas ni de los vehículos livianos. A la fecha tampoco existe consenso sobre este efecto en la literatura. Esto se podría deber a la evolución de los sistemas de control electrónicos de los motores, los cuales buscan que éstos se adapten a las condiciones de operación, en parte impuestas por el entorno, manteniendo niveles óptimos de consumo y de emisión de contaminantes.
- Según el estudio B, las emisiones de CO₂ disminuyen en un 5.31% por cada aumento de 1000 metros sobre el nivel del mar. Al examinar los vehículos medidos por el proyecto FECOC+ FASE 3, se evidencia un comportamiento ligeramente decreciente con el incremento de altitud; sin embargo, únicamente el vehículo 1 sigue una tendencia lineal, conforme se señaló en el estudio B. Esto podría deberse a que el estudio B únicamente evaluó vehículos con una cilindrada similar a la del vehículo 1 de nuestro proyecto. En contraste, la cilindrada del vehículo 2 era el doble. Además, el estudio C señala que los motores de cilindrada más pequeña tienden a ser más eficientes y se adaptan mejor a las condiciones de aire delgado en áreas de gran altitud. Por lo tanto, la comparativa con el vehículo 2 difiere significativamente de los resultados de los estudios anteriores.
- Por otro lado, el estudio A al presentar una muestra de 21 vehículos livianos con cilindradas entre 1600 cc y 3000 cc, resultando ser similar a las cilindradas características del parque automotor colombiano permite contrastar el comportamiento que se obtuvo con los otros contaminantes medidos dentro del proyecto, en los cuales no se encontraron patrones consistentes entre ellos y la altitud, haciendo que sea necesario ampliar la muestra de vehículos livianos medidos con el ciclo de Colombia a diferentes alturas con el fin de llegar a resultados más concluyentes.

5 REFERENCIAS

- [1] Yachao Wang, Xin Wang, Xi Feng, Haiguang Zhao, Chunxiao Hao, Lijun Hao, Jianwei Tan, Hang Yin, Junfang Wang, Yunshan Ge, Hongjie Zhang. *Experimental study of CO₂ and pollutant emission at various altitudes: Inconsistent results and reason analysis*. Fuel, No. 307, 2022.
- [2] W. Yachao, G. Yunshan, W. Junfang, W. Xin, Y. Hang, H. Lijun y T. Jianwei, *Impact of altitude on the real driving emission (RDE) results calculated in accordance to moving averaging window (MAW) method*, Fuel, vol. 277, nº 117929, 2020.
- [3] Q. Zhaoyu, G. Ming, C. Jianguo, Z. Zhiwei, Y. Chuanzhou, Z. Yue, M. Zhongwu y H. Wei, *The Effects of Varying Altitudes on the Rates of Emissions from Diesel and Gasoline Vehicles Using a Portable Emission Measurement System*. Atmosphere, vol. 14, nº 12, p. 1739, 2023.

CAPÍTULO 8

Convenio CO1.PCCNTR.5104655

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INTRODUCCIÓN

Este manuscrito corresponde al informe final del convenio: “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+ 3.0): Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia”, desarrollado en el marco del Convenio Interadministrativo CO1.PCCNTR.5104655, celebrado entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Universidad de Antioquia, y ejecutado por el grupo GIMEL de la Universidad de Antioquia entre el 11 de julio y el 31 de diciembre de 2023.

Este proyecto permitió completar la base de datos de factores de emisión (g/km) de CO₂, CO, HC, NO_x, NO, NO₂, PM y PN (#/km) de las categorías de motocicletas y vehículos livianos más representativos del parque automotor colombiano.

El proyecto FECOC (Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos), el cual nació hacia el 2003 en la UPME, tuvo como finalidad en esta nueva fase, la de aunar esfuerzos técnicos, administrativos y económicos para ampliar y complementar los factores de emisión de combustibles colombianos por actividad correspondiente al sector transporte terrestre carretero colombiano (FECOC+), para caracterizar sus gases de efecto invernadero.

FECOC+ se ejecutó en tres fases mediante convenios interadministrativos entre la UPME y la Universidad de Antioquia (ver **Figura 8.1**), a saber:

- FECOC+ Fase 1 (CV 001-2020) en el cual se logró caracterizar el parque automotor, así como sintetizar los ciclos de conducción (perfiles velocidad vs tiempo) de las principales categorías de vehículos terrestres de carretera del país. Se contó con la colaboración del Ministerio de Transporte, de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Medellín), de la Universidad del Norte (Barranquilla), así como de la empresa LAP Technologies que forma parte del grupo empresarial EQUITEL.
- FECOC+ Fase 2.1 (CV 003-2021) en el cual se generó la base de datos de factores de emisión medidos a bordo de vehículos pesados: 4 camiones de dos ejes pequeños -C2P < 5ton PBV-; 4 camiones de dos ejes grandes -C2G 10 ton PBV-; 4 tractocamiones -35 ton PBV, y 4 buses. Los ensayos fueron llevados a cabo en el área metropolitana de Bucaramanga con la colaboración de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), el grupo empresarial Coordinadora Mercantil, Intecon S.A. y la empresa 3DATX (USA). Los camiones C2G y los tractocamiones fueron medidos bajo ciclos de conducción en carretera, mientras que los camiones C2P y los buses se midieron en banco de rodillos. En todos los casos se usó equipo PEMS para medir las emisiones contaminantes, y se midieron los flujos instantáneos de combustible y gases de escape, para la obtención de los factores de emisión.

- FECOC+ Fase 2.2 (CV 001-2022) en esta fase, continuación de la anterior, se buscó determinar el impacto de la altitud sobre el nivel del mar en los factores de emisión medidos a bordo de las mismas categorías de vehículos pesados. Se contó con la colaboración de la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos (RELIEVE), sus nodos EAFIT (Medellín), Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, y nodo TEC de Monterrey (México), así como del grupo empresarial Coordinadora Mercantil, Intecon S.A. y la empresa 3DATX (USA). Con esta fase, se logró completar una base de datos de factores de emisión de 60 vehículos pesados (60 HDV) para el país.
- FECOC+ Fase 3 (CO1.PCCNTR.5104655), en esta fase, se conformó la base de datos de los factores de emisión (g/km) de CO₂, CO, HC, NO_x, NO, NO₂, PM y PN (#/km) de 40 motocicletas (entre 100 cc y 200 cc de cilindrada) y 30 vehículos livianos (automóviles, camperos y camionetas) medidos en banco de rodillos dinamométrico en la ciudad de Medellín (1500 msnm). Adicionalmente se analizó el efecto de la altitud sobre el nivel del mar en una muestra de dos motocicletas y dos vehículos livianos, medidos en banco de rodillos y en carretera, respectivamente, en las ciudades de Apartadó (aproximadamente a nivel del mar), y Bogotá (2600 msnm). En esta fase se contó con la colaboración de la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos (RELIEVE), sus nodos EAFIT (Medellín), y TEC de Monterrey (México), así como del grupo empresarial Corautos Andino, grupo empresarial FANALCA Honda, AKT, Auteco y Primax de Colombia.

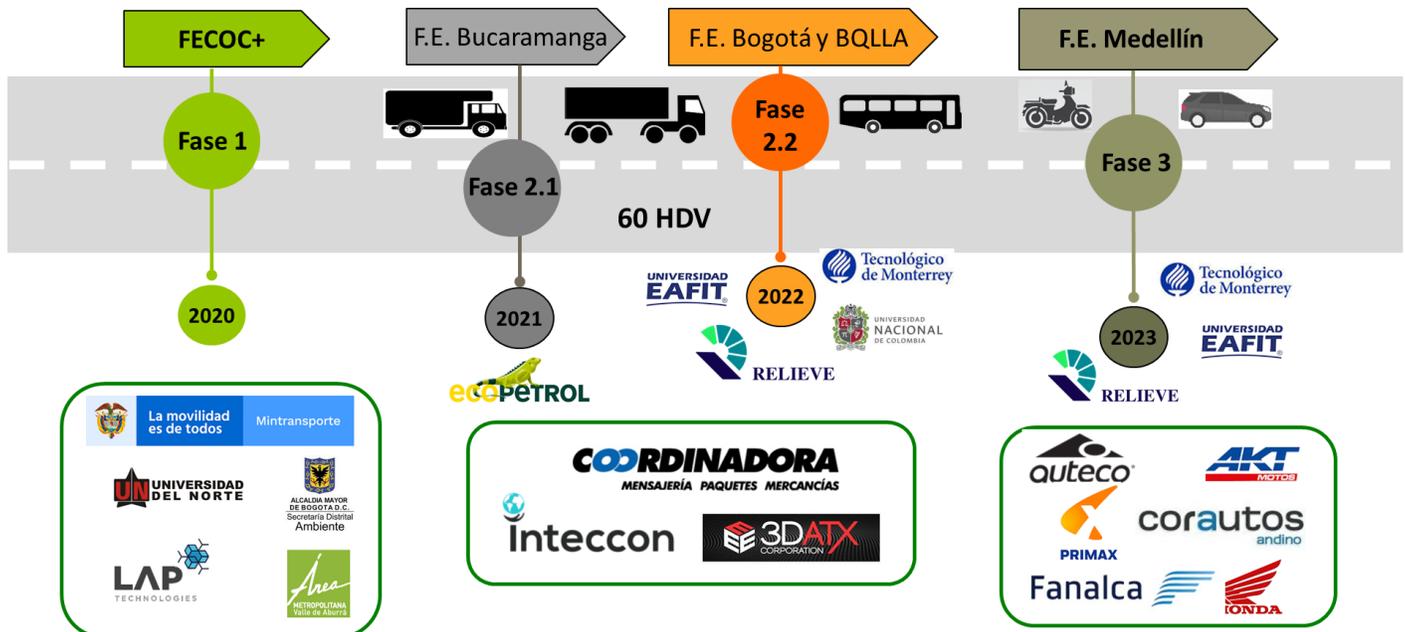


Figura 8.1. Línea de tiempo del programa FECOC+ y sus diferentes fases

En la **Figura 8.2** se presenta de forma gráfica y resumida los principales logros (hitos) de cada fase de FECOC+, en el que se destacan las siguientes contribuciones:

1. Caracterización del parque automotor terrestre carretero colombiano a diciembre de 2020, con actualización de las categorías de motocicletas y vehículos livianos (automóviles, camperos y camionetas) a octubre de 2023.
2. Síntesis de los ciclos de conducción de las categorías vehiculares: motocicletas, vehículos livianos, camiones, tractocamiones y buses.
3. Base de datos de factores de emisión (g/km) de CO₂, CO, HC, NO_x, NO, NO₂ y PM para todas las categorías vehiculares terrestres del país.
4. Base de datos del factor de emisión de la concentración del número de partículas (#/km) para todas las categorías vehiculares terrestres del país.
5. Base de datos del consumo de combustible instantáneo (L/s) y acumulado (km/gal) para todas las categorías vehiculares terrestres del país.
6. Análisis del impacto de la Altitud sobre los factores de emisión y el rendimiento de combustible para todas las categorías vehiculares terrestres del país.
7. Análisis del impacto de la Tecnología sobre los factores de emisión y el rendimiento de combustible para todas las categorías vehiculares terrestres del país.
8. Análisis del impacto de eventos y modos de conducción sobre los factores de emisión y el rendimiento de combustible para todas las categorías vehiculares terrestres del país.

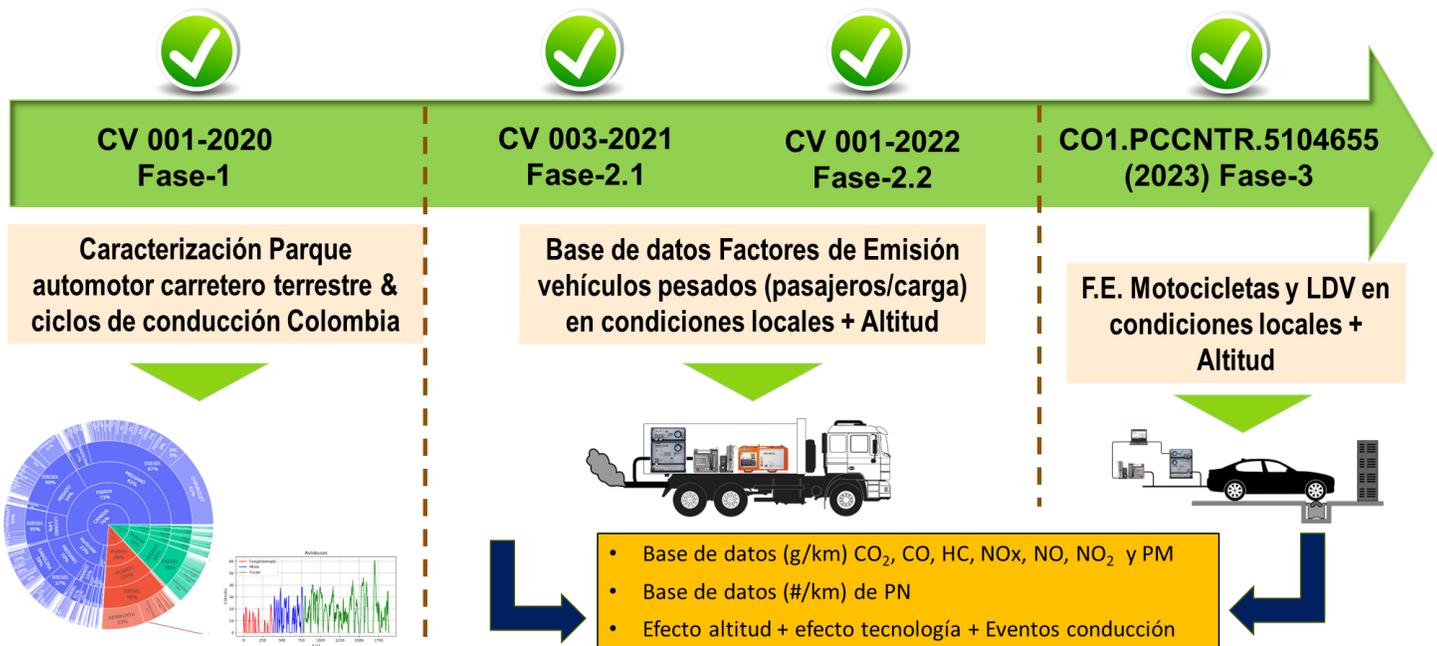


Figura 8.2. Hitos del programa FECOC+ en sus diferentes fases

CONCLUSIONES

Referentes al Capítulo 2: Base de datos de factores de emisión de motocicletas

- Colombia cuenta con la base de datos de factores de emisión medidos para las categorías de motocicletas menores a 200 cc de cilindrada:

Parámetro	Unidades	Motocicletas
Rendimiento de combustible	km/gal	130
	L/100km	2,4
	kWh/100 km	26,2
CO ₂	g/km	47
CO		7,6
HC	mg/km	378
NO		64
NO ₂		0,65
PM		0,68
PN	x 10e12 #/km	2

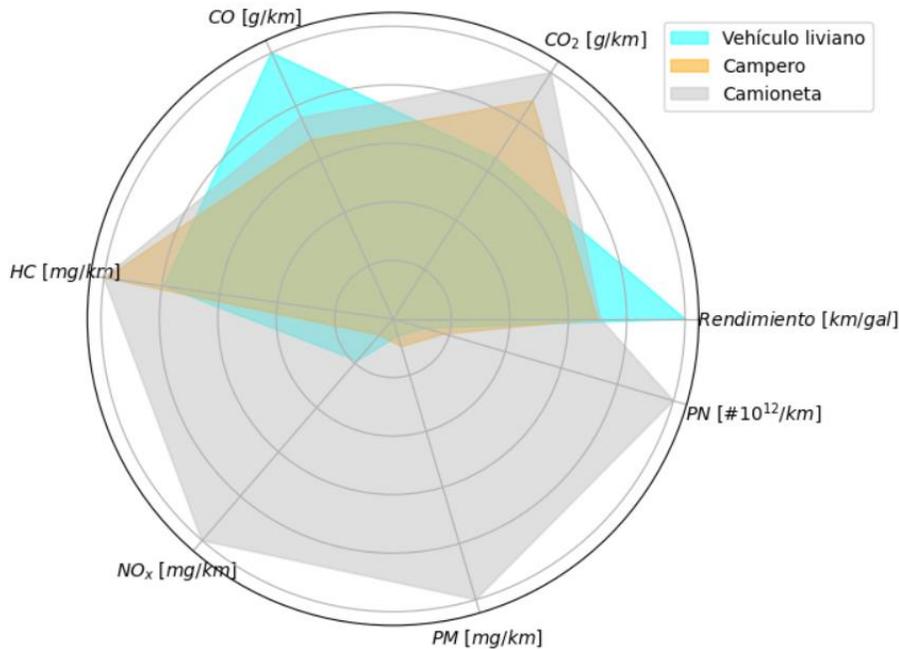
- A mejor tecnología de suministro de combustible (inyección electrónica frente a carburación), más bajos son los factores de emisión y mayor el rendimiento de combustible en kilómetros/galón.
- Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el consumo de combustible y en los factores de emisión entre las diferentes marcas de motocicletas. En particular la marca 3 de motocicletas es la que ofreció mejor rendimiento de combustible (km/gal), y menores emisiones de CO; sin embargo, las emisiones de HC y óxidos de nitrógeno (NO + NO₂) fueron de las más elevadas para esta marca.
- El gas NO₂, altamente tóxico y peligroso al ser humano, es emitido en cantidades del orden de 0,65 mg/km por las motocicletas, independientemente de su año de modelo, kilometraje, cilindrada y marca.
- Los factores de emisión de motocicletas medidos en este proyecto son comparables con los reportados en la literatura técnica para motocicletas con cilindradas y estándares de emisión similares.
- Los Departamentos de Colombia más críticos en términos de mayores concentraciones de contaminantes en el ambiente por toneladas emitidas al año por motocicletas son en su orden: Antioquia (incluye Medellín) > Cundinamarca (incluye Bogotá) > Valle del cauca (incluye Cali) > Santander (incluye Bucaramanga), siendo Antioquia el departamento en el que más emisiones producen.

Referentes al Capítulo 3: Base de datos de factores de emisión de vehículos livianos

- Colombia cuenta con la base de datos de factores de emisión medidos para las categorías de vehículos livianos incluidos automóviles, camperos y camionetas.

Parámetro	Unidades	Vehículos
Rendimiento de combustible	km/gal	35
	L/100 km	8,8
	kWh/100 km	97,3
CO ₂	g/km	297
CO		2,2
HC	mg/km	130
NO		170
NO ₂		40
PM		2,68
PN		x 10e12 #/km

- El tamaño influye sobre los factores de emisión, siendo más elevados el PM, PN y NO_x en vehículos livianos tipo camionetas, y particularmente en las provistas con motores diésel.
- Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el consumo de combustible y en los factores de emisión entre las diferentes marcas de vehículos livianos.
- El gas NO₂, altamente tóxico y peligroso al ser humano, es emitido en cantidades del orden de 0,9 mg/km por vehículos livianos provistos con motor de encendido por chispa (ciclo Otto), independientemente de su año de modelo, kilometraje, cilindrada y marca; mientras que los vehículos livianos diésel con tecnología Euro 5 y Euro 6 emitieron alrededor de 109 y 70 mg/km, respectivamente. Por su parte, el vehículo diésel Euro 4 emitió del orden de 300 mg/km. Como referencia, los vehículos diésel Euro 6 están limitados bajo prueba de homologación a emitir máximo 80 mg/km de óxidos de nitrógeno (NO + NO₂), mientras que los de ciclo Otto (encendido por chispa) se limitan a máximo 60 mg/km, de los cuales el monóxido de nitrógeno (NO) puede alcanzar a representar alrededor del 80%.



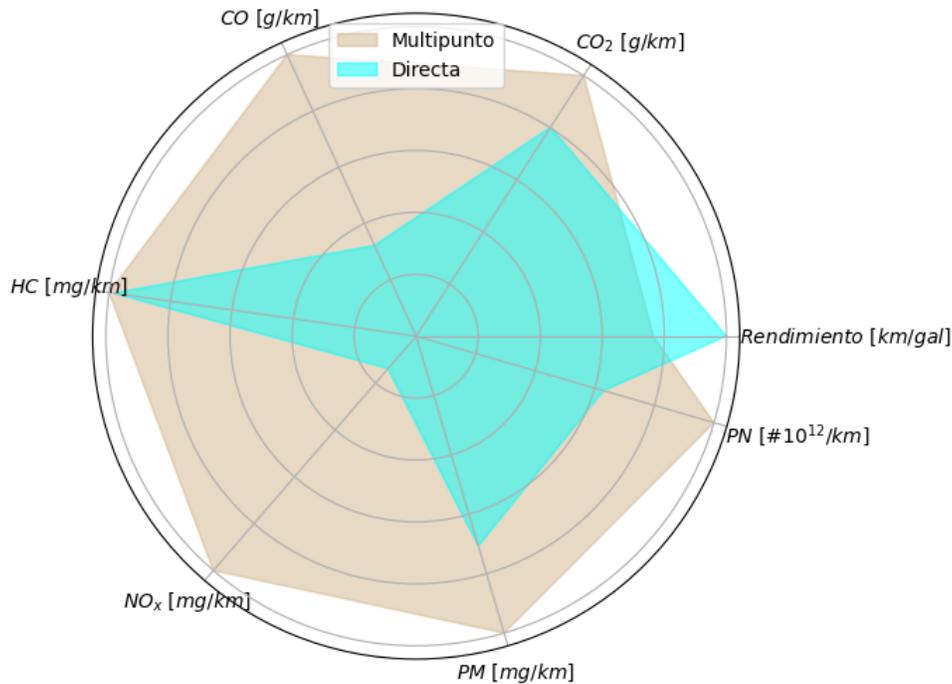
- Los vehículos con motor de encendido por compresión (ciclo diésel) emitieron significativamente menos CO y HC que su contraparte con motor de encendido provocado (ciclo Otto), no obstante, sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NO + NO₂), y partículas, tanto en masa (PM), como PN, destacaron frente a toda la muestra de vehículos livianos medidos.
- Si bien las motocicletas emiten del orden de 50 gCO₂/km, y recorren alrededor de 130 km/gal de combustible frente a los vehículos livianos que emiten del orden de 297 gCO₂/km, y recorren en promedio 35 km/gal de combustible, la comparación por cada centímetro cúbico de cilindrada muestra que son más ineficientes las motocicletas. Es decir, se esperaría que una motocicleta de 150 cc emitiera 10 veces menos contaminantes, o recorriera 10 veces más kilómetro por cada galón de combustible que un vehículo que tuviera una cilindrada de 1500 cc.

Referentes al Capítulo 4: Impacto de la tecnología sobre los factores de emisión

- La tecnología de suministro de combustible no afectó de forma estadísticamente significativa el rendimiento de combustible (km/gal) de las motocicletas, que en promedio para una motocicleta con menos de 200 cc de cilindrada es del orden de 130 km/gal bajo ciclo de conducción UPME con estrategia de cambios de marcha NBR 6601. No obstante, los parámetros que se afectaron fueron los factores de emisión de CO, HC y PN, siendo menores para las motocicletas provistas con sistema de inyección electrónica.
- La tecnología de inyección directa de gasolina (GDI) para vehículos livianos tipo automóviles mostró bondades de rendimiento de combustible significativamente en comparación con las clásicas tecnologías de inyección multipunto (MPI). No obstante, los camperos generaron una

dispersión importante en los datos, bajando el valor promedio de consumo frente a los automóviles.

- Aunque no mostraron diferencias estadísticamente significativas (valor $P < 0.05$), los factores de emisión (CO_2 , CO , HC , NO , NO_2 , PM y PN) fueron menores con los vehículos GDI en comparación con los MPI.



- A excepción de las emisiones de CO , que de por sí son bajas para los motores diésel, el vehículo Euro 6 presenta mejores resultados en todos los factores de emisión y en rendimiento de combustible con diferencias estadísticamente significativas con respecto a las camionetas Euro 4 y Euro 5.
- Las emisiones de partículas se reducen drásticamente (más de 90%) para los motores diésel con tecnología Euro 6 frente a las tecnologías Euro 4.
- En los vehículos provistos con motores diésel, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) disminuyen de manera lineal con la mejora en la tecnología, siendo significativamente reducidas por la tecnología Euro 6.

Referentes al Capítulo 5: Impacto de los eventos de conducción sobre los factores de emisión

- Hay efecto significativo de los eventos de conducción (aceleración, deceleración y ralentí) sobre el consumo de combustible y sobre las emisiones en motocicletas y en vehículos livianos. Este resultado revela el potencial de beneficio económico y ambiental de introducir técnicas de conducción eficiente.

- Por otro lado, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible en condiciones de ralenti no son despreciables, a pesar de que son menores a cuando el vehículo se mueve. Por lo tanto, se debe evitar tener los vehículos encendidos por periodos prolongados cuando están estacionados, con lo cual se pueden tener ahorros significativos en el consumo de combustible y en las emisiones contaminantes.
- Se propuso un índice adimensional de agresividad para agrupar los eventos de aceleración, y se encontró que hay ciertos rangos de valores de este índice para los cuales hay diferencias significativas de todas las variables estudiadas. En general se observó que, a mayor valor de este índice, se obtienen mayor consumo de combustible y emisiones contaminantes.

$$I_{accel} = \frac{a \times \Delta t}{V}$$

Rango de I_{accel}	Evento
$I_{accel} > 1$	Alto
$0.3 \leq I_{accel} \leq 1$	Medio
$I_{accel} < 0.3$	Bajo

Referentes al Capítulo 6: Representatividad estadística de la muestra analizada

- Los resultados mostraron que el tamaño de muestra usado en el presente estudio (40 y 30 para motocicletas y vehículos livianos, respectivamente) fueron adecuados ($e < 15\%$) para obtener valores promedio de consumo de combustible (L/100 km o L/t km) y de factor de emisión de CO₂ (g/km o g/kg) asumiendo que toda la población exhibe niveles similares tanto de consumo como de emisiones de CO₂.
- Sin embargo, para los demás contaminantes, el tamaño de muestra es satisfactoria ($e < 15\%$) cuando las emisiones se expresan en términos de g/kg. Lo anterior excluye a NO_x, PM y PN para el caso de vehículos livianos. En este caso se requiere segmentar la población de vehículos livianos, tal y como la marca.

Referentes al Capítulo 7: Impacto de la altitud sobre el nivel del mar en los factores de emisión

- No se observó un efecto estadísticamente significativo de la altitud sobre el nivel del mar en los factores de emisión de las motocicletas ni de los vehículos livianos. A la fecha tampoco existe consenso sobre este efecto en la literatura. Esto se podría deber a la evolución de los sistemas de control electrónicos de los motores, los cuales buscan que éstos se adapten a las condiciones de operación, en parte impuestas por el entorno, manteniendo niveles óptimos de consumo y de emisión de contaminantes.

RECOMENDACIONES

Con base en la experiencia ganada a lo largo de cerca de 4 años que duró la ejecución del programa FECOC + en sus 3 fases, los autores recomiendan:

1. Incluir las bases de datos de factores de emisión (g/km) de CO₂, CO, HC, NO_x, NO, NO₂ y PM, así como de la concentración del número de partículas (#/km) de las categorías de vehículos terrestres de carretera: motocicletas, vehículos livianos (automóviles, camperos y camionetas), camiones de dos ejes pequeños (< 5 ton), camiones de 2 ejes grandes (10 ton), tractocamiones (< 35 ton) y buses, dentro de un **observatorio** que permita su acceso y vigilancia continuos.
2. Utilizar las bases de datos de factores de emisión (g/km) de CO₂, CO, HC, NO_x, NO, NO₂ y PM, así como de la concentración del número de partículas (#/km) de las categorías de vehículos terrestres de carretera: motocicletas, vehículos livianos (automóviles, camperos y camionetas), camiones de dos ejes pequeños (< 5 ton), camiones de 2 ejes grandes (10 ton), tractocamiones (< 35 ton) y buses, para la construcción de los **inventarios de emisión** locales, regionales y nacionales.
3. **Mantener actualizadas** las bases de datos de factores de emisión y rendimiento de combustible para todas las categorías de vehículos terrestres de carretera del país. Éstos suelen cambiar en períodos de 5 a 6 años, debido a la actualización del parque automotor, a la densificación de la población en grandes centros urbanos, y a los cambios en infraestructura vial de las ciudades.
4. Apoyar **desarrollo de políticas públicas** a partir de estas bases de datos de factores de emisión y consumo de combustible de fuentes móviles. Se sugiere utilizar estos datos, por ejemplo, para: fortalecer programas de eco-etiquetado ambiental y energético, alimentar programas de beneficios tributarios/fiscales por mejoramiento de factores de emisión/consumo de combustible, utilización de estas bases de datos como línea base para valoración de nuevas tecnologías, utilizar estos datos para los informes bienales de transparencia que debe remitir el país a la COP, usar estos datos como línea base para delimitar zonas urbanas de aire protegido en los principales centros urbanos del país, favorecer programas de repotenciación/renovación tecnológica de fuentes móviles, entre muchas otras.
5. Explorar la posibilidad de **incluir el control de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x)** en pruebas técnicas periódicas de revisión de gases a los vehículos diésel.
6. Emplear estas bases de datos para implementar un **modelo de predicción** de factores de emisión para fuentes móviles que permita explorar escenarios de planificación del sector.

7. Promover la electromovilidad en el sector de las motocicletas y los vehículos livianos. Los resultados permitieron comprobar que una motocicleta eléctrica recorre 100 km con 4 kWh, mientras que una motocicleta en promedio utiliza alrededor de 26 kWh para el mismo recorrido.
8. Facilitar a los gremios del sector automotriz la metodología de pruebas desarrollada en FECOC+ para valorar sus beneficios económicos y ambientales mediante la introducción de **técnicas de conducción eficiente** y de emplear fuentes móviles de última tecnología.