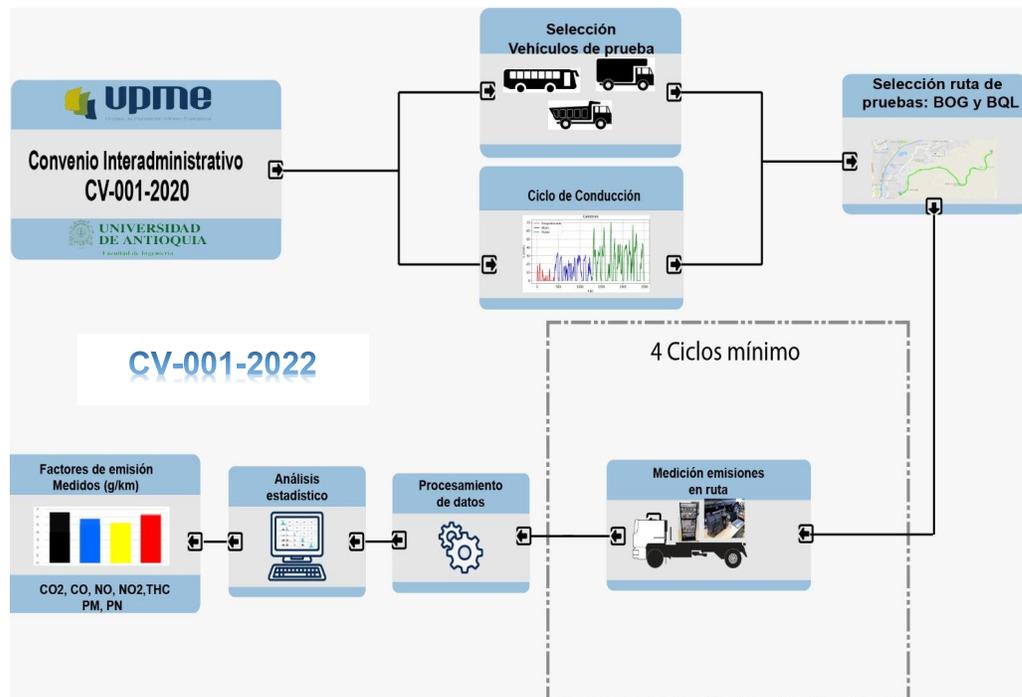


## Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)

Fase 2.2: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud de Bogotá y Barranquilla



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



**Unidad de Planeación Minero Energética  
 UPME**

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)

**Dr. John Ramiro Agudelo Santamaría**

Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica

Miembro RELIEVE nodo Medellín

[john.agudelo1@udea.edu.co](mailto:john.agudelo1@udea.edu.co)

**Dr. Andrés Felipe Agudelo Santamaría**

Profesor Dpto. Ing. Mecánica

**Dr. Andrés Felipe López García**

Director Laboratorio de Máquinas Térmicas

**Dr. Nicolás Giraldo Peralta**

Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica

Universidad Nacional de Colombia

Miembro RELIEVE nodo Bogotá

**Equipo técnico y soporte administrativo**

Jaime Nicolás Gutiérrez Ibarra

Cristian Londoño Echeverri

Ángel David Salcedo Obando

Juan Sebastián Martínez Torres

Jackeline Saldarriaga Alzate

Julián Felipe Álvarez Morales

## Agradecimientos

Al grupo empresarial COORDINADORA MERCANTIL, especialmente a su presidente Dra. María Elena Obando, nuestro sincero agradecimiento por vincularse a este convenio mediante el préstamo de vehículos de prueba, incluyendo tractocamiones, camiones grandes de dos ejes, y camiones pequeños de dos ejes, por facilitarnos conductores profesionales para reproducir los ciclos de conducción, y por permitirnos usar sus centros logísticos de Bogotá y Barranquilla para nuestras operaciones. Gracias al Ingeniero Jorge Ariza, gerente nacional de mantenimiento de Coordinadora Mercantil, por su apoyo incondicional y compromiso con FECOC+.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, por facilitarnos dos de sus buses para las pruebas.

A la empresa *Sunshine Bouquet* en Bogotá por facilitarnos uno de sus camiones para las pruebas.

A la empresa INTECCON Colombia S.A.S., en especial a su representante legal, Químico Gustavo Adolfo Palacio Zapata, por facilitarnos el acceso a un equipo de medición de gases y de partículas portátil (PEMS) de la empresa 3DATX de Estados Unidos.

A *David Miller*, CEO de la empresa 3DATX (N.Y. USA) por facilitarnos amablemente un equipo de medición de gases y de partículas portátil iPEMS ParSync plus.

Al prof. Dr.-Ing. José Ignacio Huertas, del Tecnológico de Monterrey (México), coordinador de la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos (RELIEVE), por brindarnos la posibilidad de interactuar con su prestigiosa universidad, y especialmente con sus estudiantes posgraduados Oscar Serrano y Gabriel Evangelista, quienes nos compartieron amable y abiertamente sus consejos y experiencias con los modelos IVE y MOVES, y por desarrollar el modelo para la conversión de los factores de emisión de unidades g/km a g/kWh para todos los vehículos medidos a bordo.

¡Un reconocimiento sincero a todo el equipo de trabajo!



**John Ramiro Agudelo Santamaría**  
Director del proyecto FECOC+ Fases 1 y 2  
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Antioquia  
Miembro de la red RELIEVE  
Nodo Medellín

## ENTREGABLE No. 1

**Documento con los factores de emisión medidos en la Fase 2.2 considerando los resultados de la Fase 1**



Campaña experimental en la ciudad de Bogotá. FECOC+ Fase 2.2

## Tabla de Contenido

1. Resumen ejecutivo .....	4
2. Contexto del proyecto Factores de Emisión de Combustibles Colombianos FECOC+: impacto del sector transporte terrestre .....	7
2.1 Aproximaciones generales para una comprensión del origen de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático (UNFCCC) .....	7
2.2 UNFCCC: estabilización de concentraciones e informes periódicos .....	8
2.3 Colombia en el contexto de UNFCCC .....	8
2.4 La Conferencia de las Partes (COP) y los Informes Bienales de Actualización (BUR).....	9
2.5 Colombia en el Marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	11
3. Antecedentes de este convenio (FECOC+ Fase 2.2).....	14
3.1 Resumen de resultados de FECOC+ Fase 1 .....	16
3.2 Resumen de resultados de FECOC+ Fase 2.1 .....	20
4. FECOC+ Fase 2.2 .....	22
5. Factores de emisión Fase 2.2 considerando los resultados de la Fase 1.....	24
5.1 Determinación de la población muestral de vehículos a medir .....	25
5.2 Representatividad de la muestra de vehículos medidos .....	31
5.3 Factores de emisión promedio (g/km) de los vehículos pesados medidos.....	31
6. Índices de emisión (g/kWh).....	35
7. Conclusiones Entregable No. 1 .....	39
8. Referencias bibliográficas .....	40

## Contenido de Figuras

<b>Figura 1. 1.</b> Participación por clase de vehículos según el RUNT a 2020. ....	16
<b>Figura 1. 2.</b> Caracterización de la categoría Camiones en el RUNT a diciembre de 2020. ....	17
<b>Figura 1. 3.</b> Número de vehículos livianos en función de su cilindrada y año de modelo. ....	18
<b>Figura 1. 4.</b> Distribución del número de camiones pesados en Colombia por departamento. ....	18
<b>Figura 1. 5.</b> Ciclo de conducción y parámetros característicos para motocicletas. ....	19
<b>Figura 1. 6.</b> Comparación de parámetros característicos de ciclos de conducción de motocicletas. ....	20
<b>Figura 1. 7.</b> Metodología adoptada para determinar factores de emisión. ....	21
<b>Figura 1. 8.</b> Factores de emisión de la categoría de vehículos pesados y buses en Bucaramanga ....	21
<b>Figura 1. 9.</b> Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.2 (CV 001-2022). ....	24
<b>Figura 1. 10 .</b> Zonas de medición en Bogotá (izq.) y Barranquilla (der.). ....	31
<b>Figura 1. 11 .</b> Índices de emisión (g/kWh) calculados a partir de pruebas en carretera en Bogotá y Barranquilla, siguiendo ciclo de conducción desarrollados en FECOC+ Fase 1. ....	38

## Contenido de Tablas

<b>Tabla 1. 1.</b> Vehículos pesados representativos para medición de factores de emisión de acuerdo con el Convenio 001-2020 (FECOC+ Fase 1) .....	25
<b>Tabla 1. 2.</b> Número y tipo de vehículos pesados recomendados para medir en todo Colombia según el convenio CV 001-2020 (FECOC+ Fase 1).....	26
<b>Tabla 1. 3.</b> Tamaño muestral de vehículos a medir por nivel de confianza y error por cada categoría de vehículos pesados según CV 001-2020 (FECOC+ Fase 1).....	27
<b>Tabla 1. 4.</b> Vehículos pesados medidos por categoría. —SCR: Sistema catalítico de Reducción de NOx.....	28
<b>Tabla 1. 5.</b> Representatividad de la muestra de vehículos medidos frente al número total, por cada categoría.....	31
<b>Tabla 1. 6.</b> Factores de Emisión (g/km) medidos en ruta para categoría de vehículos pesados de carga y pasajeros en Bogotá y Barranquilla (FECOC+ Fase 2.2.).....	34
<b>Tabla 1. 7.</b> Límites máximos permisibles de emisión para vehículos pesados. Tomado de la resolución 0762 de 2022 del Ministerio del ambiente y desarrollo sostenible de Colombia. ....	36
<b>Tabla 1. 8.</b> Índices de emisión en g/kWh obtenidos para los vehículos evaluados en este convenio .....	37

## 1. Resumen ejecutivo

A continuación, se presentan los Factores de Emisión (g/km) promedio y su desviación estándar obtenida a partir de mínimo 4 mediciones del mismo vehículo bajo el mismo ciclo de conducción para vehículos pesados M2, N2 y N3 en las ciudades de Bogotá y Barranquilla. A manera informativa, especialmente para posible comparaciones con la resolución 0762 del 18 de julio de 2022, se presentan los índices de emisión (g/kWh). Estos últimos fueron calculados a partir de un modelo de dinámica vehicular tomando como referencia las características de cada vehículo y los FE medidos en carretera. En la Sección 4 de este informe se encuentra el desarrollo metodológico para la obtención de los FE.

Factores de Emisión (g/km) medidos en ruta para categoría de vehículos pesados de carga y pasajeros en Bogotá y Barranquilla (FECOC+ Fase 2.2.)

Categoría	Ciudad	PBV o pasajeros	Estándar de emisión	Prueba	R. Comb. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	PM [mg/km]	PN x 10 <sup>12</sup> [# /km]	
N3 (Tractocamiones C3S2)	Bogotá	26 - 28 ton	EPA 98	Prom.	6,4	1554,5	68,12	0,25	17,35	16,46	0,89	1543,6	177,4	
				D.Est.	0,6	170,1	5,35	0,02	1,68	1,55	0,20	--	10,0	
			Euro V (SCR)	Prom.	6,7	1303,0	7,28	0,19	6,62	6,45	0,30	48,2	195,4	
				D.Est.	0,7	208,8	2,24	0,09	1,42	1,46	0,20	10,3	31,1	
	Barranquilla		EPA 98	Prom.	11,25	1465,0	13,41	0,15	15,50	14,20	1,30	621,6	340,5	
				D.Est.	2,75	248,6	1,41	0,02	1,65	1,46	0,20	90,7	61,8	
			Euro V (SCR)	Prom.	10,68	1464,2	5,63	0,07	11,53	10,72	0,87	58,7	192,0	
				D.Est.	0,80	108,7	0,89	0,03	3,33	2,89	0,47	14,9	56,7	
N2 (Camiones grandes de dos ejes C2G)	Bogotá	14,7 ton	pre Euro	Prom.	9,06	1147,30	20,29	0,31	8,21	7,34	0,87	114,80	189,12	
				D.Est.	1,04	136,02	1,09	0,02	0,76	0,78	0,07	20,54	19,87	
		8 ton	Euro II	Prom.	11,03	861,31	7,72	n.d.	5,21	4,63	0,63	84,66	205,20	
				D.Est.	0,82	99,68	2,57	n.d.	0,66	0,62	0,09	8,26	10,32	
		14,6 ton	Euro IV	Prom.	9,42	1100,80	9,89	0,13	7,03	6,56	0,54	38,44	128,60	
				D.Est.	0,70	93,58	0,95	0,01	1,02	0,88	0,23	6,90	9,02	
	N2 (Camiones medianos de dos ejes C2M)	Bogotá	6 ton	Euro V	Prom.	13,18	712,24	n.d.	n.d.	4,86	4,81	0,05	30,88	89,50
					D.Est.	0,38	20,91	n.d.	n.d.	0,36	0,38	0,03	9,20	8,75
N2 (Camión grande de dos ejes C2G)	Barranquilla	13	Euro II	Prom.	12,85	1127,89	4,31	0,17	8,05	6,97	1,08	72,60	217,81	
				D.Est.	0,46	43,60	1,45	0,07	2,96	2,65	0,32	6,69	40,91	
		13,9	Euro IV	Prom.	15,62	961,25	7,69	0,14	9,16	8,35	0,81	28,88	110,15	
				D.Est.	1,37	59,28	2,12	0,08	1,43	0,78	0,77	3,57	6,08	

**Notas:**

**Categoría:** según Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022. **PBV:** Peso Bruto Vehicular, incluye el peso del vehículo más el de la carga. **R. Combust.:** rendimiento promedio de consumo de combustible en km/gal. **Prom.:** promedio. **D.Est.:** Desviación estándar.

Categoría	Ciudad	PBV o pasajeros	Estándar de emisión	Prueba	R. Comb. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	PM [mg/km]	PN x 10 <sup>12</sup> [# /km]
N2 (Camión de dos ejes pequeño C2P)	Bogotá	5 ton.	pre Euro	Prom.	20,36	460,33	4,96	0,22	4,99	4,38	0,62	103,29	105,33
				D.Est.	1,68	42,36	2,25	0,00	0,90	0,89	0,05	19,20	8,80
			Euro IV	Prom.	23,64	416,33	4,64	0,24	2,36	2,23	0,16	31,65	66,31
				D.Est.	4,91	84,47	0,85	0,00	0,45	0,48	0,04	9,68	11,10
	Barranquilla	5 ton.	pre Euro	Prom.	32,31	458,86	1,75	0,07	3,82	3,29	0,54	32,62	92,46
				D.Est.	2,801	21,262	0,606	0,015	0,483	0,636	0,157	3,586	3,506
			Euro IV	Prom.	33,84	428,84	1,28	0,05	1,99	1,61	0,38	9,42	41,82
				D.Est.	1,43	14,94	0,27	0,01	0,22	0,24	0,03	0,94	3,38
M2 (Autobuses urbanos)	Bogotá	20 pas.	pre Euro	Prom.	22,54	423,02	6,39	0,21	4,03	3,67	0,40	51,28	98,75
				D.Est.	2,52	58,02	2,71	0,01	1,64	1,43	0,20	15,20	14,04
			Euro IV	Prom.	20,92	490,48	4,81	0,27	2,74	2,53	0,20	39,23	78,68
				D.Est.	1,42	53,48	1,34	0,01	0,28	0,34	0,13	10,45	11,79
		38 pas.	Euro IV	Prom.	14,31	661,25	5,43	n.d.	4,99	4,94	0,07	18,72	69,69
				D.Est.	1,28	74,27	0,76	n.d.	0,46	0,46	0,03	5,28	7,70
	Barranquilla	20 pas.	pre Euro	Prom.	28,43	476,57	1,86	0,08	4,02	3,44	0,57	41,81	100,93
				D.Est.	3,93	31,76	0,61	0,01	0,47	0,57	0,13	9,39	4,93
			Euro IV	Prom.	32,35	451,16	1,17	0,05	2,11	1,73	0,38	9,58	43,08
				D.Est.	1,88	27,05	0,37	0,01	0,20	0,23	0,04	0,98	4,24
		38 pas.	Euro IV	Prom.	34,47	454,06	2,63	0,04	4,05	3,96	0,09	14,70	56,25
				D.Est.	2,04	25,28	0,85	n.d.	0,21	0,19	0,02	1,53	5,27

Notas:  
**Categoría:** según Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022. **PBV:** Peso Bruto Vehicular, incluye el peso del vehículo más el de la carga. **R. Combust.:** rendimiento promedio de consumo de combustible en km/gal. **Prom.:** promedio. **D.Est.:** Desviación estándar.

Índices de Emisión (g/kWh) medidos en ruta para categoría de vehículos pesados de carga y pasajeros en Bogotá y Barranquilla (FECOC+ Fase 2.2.)

Categoría	Ciudad	n	CO (g/kWh)		NOx (g/kWh)		PM (g/kWh)	
			Prom.	D. Est	Prom	D. Est	Prom	D. Est
N3 (TC)	Bqlla	5	17.25	8.90	31.6	4.06	0.30	0.04
		11	33.87	44.81	46.9	6.23	0.26	0.09
		5	29.03	15.90	52.9	29.00	0.56	0.31
	Bgtá	30	9.50	8.64	13.7	7.03	0.71	3.51
		9	48.36	21.96	15.8	4.57	0.76	0.49
N2 (C2G)	Bqlla	9	25.88	8.79	43.8	12.40	0.14	0.07
		8	60.46	11.76	52.6	3.83	0.68	0.13
		4	31.99	18.00	47.5	24.03	0.17	0.09
	Bgtá	10	35.59	17.94	16.2	2.59	0.08	0.01
		14	28.29	11.16	15.3	4.59	0.29	0.10
		4	37.23	4.42	17.0	2.37	0.17	0.04
N2 (C2P)	Bqlla	17	19.60	13.69	23.6	11.28	0.18	0.13
	Bgtá	7	10.97	7.45	11.1	6.04	0.10	0.04
		19	14.35	11.65	11.8	6.67	0.25	0.23
M2 (AB)	Bqlla	17	16.29	8.99	23.1	11.31	0.23	0.19
	Bgtá	6	22.06	3.10	14.5	1.85	0.05	0.00
		16	14.96	8.06	8.1	2.91	0.35	0.95
		13	14.52	9.26	10.0	4.66	0.16	0.07

Notas:

*n*: número de ciclos de conducción que se midieron para cada vehículo. **Bqlla**: Barranquilla. **Bgtá**: Bogotá. **Prom.**: promedio. **D.Est.**: Desviación estándar.

Aclaración: Los índices de emisión en g/kWh exigidos por la Resolución 0762 de 2022, y que a su vez han sido transpuestos de las respectivas normas EURO, aplican en términos de homologación para motores nuevos, y no para vehículos usados. Las regulaciones lo exigen de esa forma, porque los vehículos pesados, provistos con un mismo tipo de motor, pueden usarse en trabajos muy distintos, y sometidos a cargas muy diferentes según la aplicación o actividad de cada vehículo. Por ejemplo, puede darse el caso de que un mismo tipo de motor sea usado en camiones de carga o en autobuses, incluso dentro de cada categoría, su uso podría variar significativamente. Es muy diferente la actividad de un camión recolector de basura, que la de un camión de carga interurbana o intraurbana. No obstante, se ha incluido el índice de emisión, a manera orientativa de cuán lejos estamos de los parámetros regulatorios.

## **2. Contexto del proyecto Factores de Emisión de Combustibles Colombianos FECOC+: impacto del sector transporte terrestre**

### **2.1 Aproximaciones generales para una comprensión del origen de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático (UNFCCC)**

A partir de la segunda mitad del siglo XX y especialmente después de la década de los 60's, tomó lugar la inclusión de los asuntos ambientales en la agenda mundial. Sin ser planteados aún como un problema, los asuntos ambientales se convirtieron en el centro de preocupaciones científicas, académicas, políticas y económicas [1, p. 62]. Movimientos como el “Mayo francés” en 1968 o el “El club Roma”, gestado por políticos y economistas del *Massachusetts Institute of Technology*, pueden ser vistos como indicadores emergentes de un momento de crítica hacia el sistema consumista, el crecimiento industrial y poblacional desmedido, el agotamiento de los recursos naturales y el aumento de la contaminación generalizada. Este último, El club Roma, bajo la dirección de *Aurelio Peccei*, promovió la realización de alarmantes y dramáticos informes durante la década de los 70's, en los cuales se estimaba el límite del crecimiento en el transcurso de los próximos cien años, significando también con ello el fin de la especie humana, de los animales y de la vida vegetal [1, pp. 63–64].

Paralelamente, la inclusión en la agenda mundial de las problemáticas ambientales estimuló, por parte de organismos como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la realización de una serie de conferencias y encuentros globales que tomaron como eje fundamental los problemas ecológicos y ambientales del planeta. Dichos eventos han sido realizados de manera sistemática desde los años 70's hasta nuestros días, y múltiples organismos han promovido también agenciamientos que responden a problemáticas más específicas pero inspirados por las iniciativas de la ONU, como la Declaración de Santa Cruz de la Sierra realizada en la Cumbre de las Américas y dirigida a avanzar hacia el “desarrollo sostenible”. Entre los eventos dirigidos por la ONU se puede contar la Conferencia de Viena en 1985, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano en 1972, la Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible en 2002, entre otros.

Al principiar la década de los 90's, y en el marco de los eventos realizados por la ONU, se llevó a cabo en 1992 la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, también conocida como Cumbre de la Tierra. Esta conferencia, realizada en Río de Janeiro, “[...] definió el desarrollo sostenible como aquel que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin que se agote la base de recursos naturales en que se sustenta, sin deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.” [1, p. 89]. También, en esta importante conferencia, se produjeron cinco documentos que deberían guiar las políticas y los planes nacionales: Declaración de Río sobre medio ambiente y desarrollo, Agenda 21, Declaración de protección de bosques, UNFCCC y Convención de biodiversidad. En líneas generales, es posible decir que la Cumbre de la Tierra dividió las problemáticas ambientales en cinco grandes ejes, algunos de carácter paradigmático o políticos como la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo, y otros mucho más prácticos y operativos como la UNFCCC.

Un antecedente más próximo para la creación de la Convención Marco se encuentra también durante la década de los 80's, cuando la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente comenzaron a reunir información científica sobre la creciente acumulación de gases termoactivos en

la atmósfera terrestre. Por su magnitud, ambos organismos decidieron conformar un grupo internacional sobre cambio climático, el IPCC. Rápidamente, en 1990, el IPCC presentaría su primer informe, haciendo evidente un incremento acelerado de la concentración atmosférica global de GEI, principalmente CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Tras los anuncios del IPCC, tanto los gobiernos como la prensa y la opinión mundial impulsaron la negociación de una convención internacional apadrinada por la ONU para lograr acuerdos en relación con el problema [2, pp. 144–45].

## 2.2 UNFCCC: estabilización de concentraciones e informes periódicos

En 1992, como queda dicho, se estableció, después de arduas negociaciones con los Estados participantes, la UNFCCC. Su objetivo, “[...] la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático” [3, p. 8]. Además, se añadía, que dicho nivel debería lograrse en un plazo suficiente que permitiera la adaptación de los ecosistemas al cambio climático, amén de asegurar la producción de alimentos y permitir el desarrollo económico sostenible. En la base política y filosófica de la Convención, las partes participantes deberían, a través de las acciones que emprendieran, proteger el sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras. En ese sentido, las medidas deberían ser próximas a reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos, teniendo derecho tanto al desarrollo sostenible como a su promoción y tendiendo a la cooperación de un sistema internacional abierto y propicio que condujera al crecimiento económico [3, pp. 8–9].

La UNFCCC entró en vigor dos años después de su establecimiento, y en 1997, tras el desarrollo de las Directrices revisadas del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y la aprobación del Protocolo de Kioto, se dieron los primeros pasos hacia la consecución de los compromisos adquiridos en la Convención. Entre los compromisos más importantes se puede contar la elaboración, actualización y publicación de inventarios nacionales de las emisiones antropógenas, teniendo especial protagonismo las emisiones señaladas en el Protocolo de Kioto: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCS) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) [4, pp. 87–88]. Su realización, además, debía contar con las directrices metodológicas señaladas por el IPCC. Algunos otros compromisos tenían que ver también con la aplicación de programas nacionales orientados a mitigar el cambio climático, la promoción de la gestión sostenible, la cooperación científica y de información, así como la educación, capacitación y sensibilización del público respecto del cambio climático, entre otros [3, pp. 10–22]. Además, los compromisos podían variar según se fuera un país desarrollado o uno en vías de desarrollo, tomando responsabilidades de mayor impacto las partes desarrolladas, pues se reconocían como aquellas de superlativa incidencia en las problemáticas ambientales.

## 2.3 Colombia en el contexto de UNFCCC

Los países en desarrollo, entre los cuales se incluyó Colombia inicialmente, no contaron en un principio con una meta concreta y obligatoria de reducción de emisiones de GEI, permitiéndoseles incluso un aumento de emisiones en razón a su derecho de avanzar en la realización de su modelo económico y social. Sin embargo, dentro de las obligaciones comunes a todos los países se encontraba la de presentar informes que incluyeran las acciones que desarrollarían para cumplir con los compromisos adquiridos en el marco de la Convención, a los cuales se les denominó Comunicación Nacional [5, p. 30]. A la fecha, Colombia ha presentado ante la UNFCCC

tres Comunicaciones Nacionales, la primera realizada en 2001, la segunda en 2010 y la tercera en el año 2017, todas ellas encargadas para su realización al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), adscrito al entonces Ministerio del Medio Ambiente. En ese sentido, el IDEAM, creado en el año de 1994, se concibió con la misión de generar conocimientos y suministrar datos de información ambiental, realizando para ello estudios, investigaciones, inventarios y actividades de seguimiento que fundamentaran la toma de decisiones en materia ambiental [5, p. 5]. Así pues, y cómo es posible deducir, dicho Instituto encuentra una condición de posibilidad para su emergencia en los compromisos internacionales adquiridos ante la ONU y la Convención Marco.

Por las condiciones que deben cumplir las Comunicaciones Nacionales según la UNFCCC, todas ellas comparten características estructuralmente similares. En términos generales, pero manteniendo las diferencias propias de cada comunicación en virtud de los avances científicos y la actualización en regulaciones, los primeros capítulos están destinados a brindar un contexto de los resultados de la comunicación a desarrollar, sustentados en los inventarios naturales y poblacionales del país, amén de las vulnerabilidades de los mismos en relación a las problemáticas ambientales. Seguidamente, también las comunicaciones nacionales realizan una actualización del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), presentan las políticas y planes de mitigación, desarrollan con amplitud la vulnerabilidad estimada y los procesos de adaptación, así como las estrategias de educación, formación y sensibilización. Todo ello desarrollado a lo largo de seis u ocho capítulos y realizado de manera mancomunada con distintas instituciones del país como la Academia Colombiana de Ciencias, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Universidad Nacional, la Universidad de los Andes, ministerios, Departamento Nacional de Planeación (DNP), Secretarías y Fundaciones a lo largo y ancho del país, Departamentos y Unidades adscritas al gobierno nacional; en últimas, toda una serie de actores que aportan con su experiencia, conocimiento y gestión y que encuentran un lugar común en el IDEAM como responsable último.

La importancia, entonces, de las llamadas Comunicaciones Nacionales consiste en su funcionalidad como elementos para la evidencia de las situaciones específicas y globales frente a los temas de cambio climático. En ese sentido, se convierten en instrumentos aptos para la evaluación de las emisiones de GEI globales y la vulnerabilidad de los países frente al cambio climático. Además, a través de las Comunicaciones Nacionales es posible el uso de la información para el desarrollo de proyectos a nivel nacional y sectorial, constituyéndose como documento esencial para la planificación nacional de cara a los retos que impone la variabilidad climática y la consecución de recursos financieros que permitan soportar la implementación de los acuerdos de la Convención [6].

## **2.4 La Conferencia de las Partes (COP) y los Informes Bienales de Actualización (BUR)**

La UNFCCC entró en vigor, como quedó dicho, en marzo del año 1994 y permitió, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública a escala mundial sobre las problemáticas ambientales. A dicha convención se incorporaron 197 países de la ONU que fueron denominadas “Partes de la Convención” y que juntas constituían la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP) [7, p. 31]. La COP, entonces, es el órgano encargado para la toma de decisiones de la Convención y, como tal, se reúne año a año —desde 1995— para fijar directrices relativas al cambio climático, a instrumentos jurídicos, administrativos o

institucionales. Documentos de valía global como el Protocolo de Kioto o el Acuerdo de París, por ejemplo, fueron el resultado de estas importantes conferencias.

Ahora bien, tras el desarrollo de la COP 16, 17 y 18, realizadas en México, Sudáfrica y Catar, respectivamente, fue posible la gestación y consolidación de nuevas responsabilidades para los estados miembros, entre las cuales se puede contar la creación, a partir del año 2012, de Informes Bienales de Actualización (BUR, por sus siglas en inglés). Así, quedaban establecidas por lo menos dos formas en que las partes o países participantes podían comunicar sus perspectivas, avances y situación de emisiones a la Convención: las Comunicaciones Nacionales y los BUR, siendo requisitos para todos los firmantes de la UNFCCC, pero con exigencias diferenciadas.

Para una mejor comprensión de los BUR, es necesario establecer un contraste que permita ilustrar su significado. Las Comunicaciones Nacionales incluyen toda la información relevante de un país en relación con el cambio climático. Adicionalmente, este documento es utilizado como la base fundamental para el desarrollo de planes y estrategias de adaptación y mitigación en los países y para el financiamiento por parte de donantes. Por ello, las Comunicaciones Nacionales incluyen medidas para facilitar la adecuada adaptación al cambio climático, medidas para abordar la mitigación del cambio climático, la relación de obstáculos, carencias y necesidades, inventario nacional de emisiones o la descripción de medidas adoptadas y previstas para aplicar la Convención [8, p. 1]. Por su parte, los BUR constituyen un esfuerzo por mejorar aspectos específicos de las Comunicaciones Nacionales, particularmente, mejorar la información relativa a las acciones de mitigación y sus efectos, además de la información concomitante a las necesidades y los apoyos recibidos para implementar acciones en las Comunicaciones Nacionales. Así, los BUR incluyen un plan exhaustivo de mitigación con su respectivo seguimiento de implementación y, para los países en vías de desarrollo —las partes no incluidas en Anexo 1— [8, p. 2], un registro con información actualizada sobre los INGEI [9, p. 74]. En ese sentido, a diferencia de las Comunicaciones Nacionales, el BUR queda enfocado sobre la mitigación, particularmente en la presentación de una evaluación del potencial de mitigación del país y de sus sectores, así como los desafíos financieros, tecnológicos, institucionales y políticos que enfrenta para su implementación [8, p. 3]. También, se puede entender los BUR como una suerte de herramienta que allana el camino hacia la consolidación de la siguiente Comunicación Nacional. El primer BUR realizado por Colombia, por ejemplo, brindó parte de los insumos en la construcción de la tercera Comunicación Nacional. Además, en tanto que la presentación de los BUR es dada de manera regular, contrario a las Comunicaciones Nacionales, se convierte en una herramienta apta para el seguimiento de emisiones, por un lado, y de vigilancia respecto de estrategias de mitigación, por otro, alineándose así con los objetivos de los Acuerdos de París que buscan un mayor compromiso para combatir y limitar el cambio climático y sus consecuencias. De hecho, tras dichos Acuerdos la UNFCCC afirmó su compromiso por el establecimiento de una mayor ambición en las acciones para enfrentar el cambio climático y un sistema más riguroso de reporte de dichas acciones, razón por la cual el BUR 3 presentado en 2021 no solamente es el último por ser el más reciente, sino también porque esta clase de informes será reemplazado por un Informe Bienal de Transparencia (BTR, por sus siglas en inglés), con mayores exigencias de seguimiento, y para el cual Colombia se prepara [9, p. 5].

Para el caso colombiano, a la fecha han sido publicados y presentados tres Informes Bienales de Actualización. El primero de ellos en el año 2015, el segundo en el año 2018 y el tercero y último en el año 2021. Para su realización, todos los informes bienales han tenido como actor principal el IDEAM, en tanto que es la institución encargada de brindar apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, generando para ello conocimientos e información confiable sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio

ambiente. Además, desde su inicio en 1994 y a la fecha, el IDEAM ha logrado acumular experiencia a través de la realización de bastos informes e interacciones con distintas instituciones de carácter continental y global, liderando el desarrollo para los sistemas de monitoreo, el reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional y el monitoreo y evaluación de adaptación a través de distintos canales, como el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (RENARE), el Sistema Nacional de Inventarios de GEI (SINGEI) y el Sistema Integrador de Información sobre Vulnerabilidad, Riesgo y Adaptación (SIIVRA), facultándolo así como el actor ideal para la consecución de los BUR o los siguientes BTR. Por supuesto, tanto como en la creación de las distintas Comunicaciones Nacionales, dicha institución ha contado con la alianza de múltiples dependencias o establecimientos como la DNP, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (MADS), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la Cancillería, universidades, entre muchos otros.

## 2.5 Colombia en el Marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Una revisión a la historia de la UNFCCC y su desarrollo a través de las veintiséis COP habidas hasta la fecha, deja ver con claridad dos hitos fundamentales: el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, siendo posiblemente este último el de mayor importancia por su intención de lograr acciones radicales sobre el cambio climático y la implementación de las distintas estrategias por parte de los países miembros. Adicionalmente, también allí quedó establecida la Agenda 30 para el Desarrollo Sostenible. Este importante documento sentó las bases de una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Estados Miembros, convirtiéndose en la guía de referencia para el trabajo institucional durante los siguientes quince años —la Agenda 30 fue aprobada en 2015 [10, p. 5].

La Agenda 30 está compuesta por 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), cuya consecución corresponde a cada una de las partes. Por lo extenso que puede resultar, no se citan aquí los 17 ODS, sin embargo, para su conocimiento se remite al lector al texto La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe, o bien podría el lector ojear los distintos informes de los ODS producidos por la ONU actualizados a 2022. Una mirada, entonces, a los 17 objetivos, aunque fuese solo superficial, deja ver la amplitud del concepto “Desarrollo sostenible”. Cada uno de los 17 apartados son plenamente diferenciables unos de otros y buscan combatir circunstancias que impiden una sostenibilidad en el desarrollo, como la pobreza, la desigualdad, la carencia de agua limpia o de trabajo decente, entre otras. En ese sentido, se comprende que tomar acciones por el medio ambiente significa mucho más que aquellas acciones que parecen obvias, como cuidar los ecosistemas terrestres, la vida submarina o mitigar las emisiones de GEI. Significa una interconexión de múltiples aspectos de la vida social, esto es, una armonía del ecosistema humano también como condición para la creación de relaciones sanas con los demás ecosistemas o con la naturaleza en su totalidad.

Por su parte, Colombia ha llevado a cabo una serie de acciones dirigidas a cumplir con los ODS como queda referido en el BUR 3. Según se puede leer allí, desde la implementación del Conpes 3918 de 2018 “Estrategia para la implementación de los ODS en Colombia”, el país ha avanzado al 2020 en un 72% en la consecución de los objetivos trazados, con estrategias de diversos tipos que han implicado aumentos en los presupuestos para la alimentación escolar, el acceso al agua potable, la investigación científica, la incorporación de criterios de cambio climático en las ciudades capitales y departamentos o inversiones cercanas a los 830 mil millones de pesos para la modernización del parque automotor de carga pesada [9, p. 33].

Se comprende, pues, que hablar de desarrollo sostenible significa apuntar a la creación de sociedades capaces de crear sinergias internas que redunden en una relación equilibrada con todo aquello que las rodea, impulsando dicho equilibrio desde la base que suponen los ODS. Sin embargo, dadas las condiciones actuales de calentamiento global y su relación directa con las emisiones de GEI de acuerdo con el IPCC [11], resulta imperativo actuar con celeridad, posiblemente más que con cualquier otro objetivo, en la mitigación de dichos gases, formulando metas a mediano plazo que reduzcan significativamente la emisión de GEI, con miras a una carbono-neutralidad. Tal como resulta de una revisión del último Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2022, es evidente que el objetivo número trece, “Acción por el clima”, es el aspecto de mayor preocupación, razón por la cual se le ve acompañado de un alarmante “Código Rojo”. De acuerdo con la comunidad internacional, el mundo se encuentra “[...] al borde de un desastre climático y la ventana para evitarlo se está cerrando rápidamente” [12, p. 52]. Por tanto, es menester limitar el calentamiento global a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales tal y como lo establece el Acuerdo de París. Para tales efectos, las emisiones de GEI en el mundo deberían alcanzar su pico antes de 2025 para luego reducirse en un 43% para el año 2030 y llegar al cero al 2050 [12, p. 52].

De acuerdo con el E2050 “Estrategia climática de largo plazo de Colombia para cumplir con el acuerdo de París”, publicado en 2021, Colombia representa el 0.6% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> [13], principal GEI que impulsa el cambio climático y resultante de la quema de combustibles fósiles utilizados en diferentes sistemas energéticos: terrestres, industriales, urbanos y de infraestructura (transporte y edificaciones) [14]. Como parte de su meta de mitigación, Colombia se compromete a emitir como máximo 169.44 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq en 2030, lo que equivale a una reducción del 51% de las emisiones respecto a la proyección de emisiones del mismo año, iniciando, entre 2027 y 2030, un decrecimiento tendiente hacia la carbono-neutralidad a mediados de siglo. Para tales metas, los puntos de enfoque son variados, en tanto que los objetivos de mitigación comprenden todos los sectores de la economía. Mejoras en los combustibles líquidos, eficiencia en el sector de hidrocarburos y metas de electrificación vehicular son algunas de las medidas en sintonía con las tendencias actuales. Sin embargo, se prevén cambios más radicales con miras a la carbono-neutralidad, como el hidrogeno verde, pequeños reactores nucleares, electrificación de los sectores de transporte e industria, cambios de estufas a gas por inducción, entre otros [13, pp. 112–115].

Todo lo anterior, si bien puede ser transversal a otros ODS, es justo decir que se encuentra en especial sintonía con el objetivo “Acción por el clima”, visto como el asunto más apremiante de cara a la supervivencia de las sociedades. Como resulta procedente pensar, una acción por el clima eficiente debe ir de la mano de un Inventario de GEI debidamente desarrollado, que permita, entre otras cosas, acciones congruentes y por tanto en línea con objetivos de mitigación. En Colombia, la coordinación técnica de dicho inventario se encuentra en cabeza también del IDEAM, mas los responsables para generar o recopilar la información requerida para el inventario son los distintos ministerios, con el apoyo, por supuesto, de sus entidades de investigación o planeación. Según se puede observar en el tercer BUR, un actor esencial para la recopilación de información lo constituye el Ministerio de Minas y Energía (MME), especialmente desde su Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). En efecto, al comprobar las distintas fuentes de información en la obtención de los FE para las diferentes categorías incluidas en el INGEI, es posible comprobar que esta Unidad ha jugado un rol capital en la medición para sectores como la industria energética, la industria manufacturera y de construcción, de transporte, o lo resultante del uso comercial, institucional y residencial. Así pues, y como queda señalado el

mismo BUR, la UPME es la principal fuente de información de datos de actividad para la estimación de GEI en las actividades de quema de combustible [9].

Anualmente, esta entidad genera, además, el Balance Energético Colombiano (BECO) que da cuenta de la información de producción, oferta interna y consumos nacionales de todos los combustibles en los sectores económicos del país. Así, por ejemplo, el BECO presenta información de consumo de combustible desagregado en transporte terrestre, aéreo, ferroviario, marítimo y fluvial, apoyándose también en otras entidades para la consolidación de datos como ECOPELROL, la Aeronáutica Civil, RUNT, Swisscontact, entre otros. De igual manera, para la estimación de emisiones fugitivas, esto es, aquellas emisiones procedentes de descargas accidentales, fugas de equipos, pérdidas en almacenamiento, venteo, etc. [15], y tenidas también en cuenta para los INGEI, la UPME cuenta con el Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) para el caso de los combustibles sólidos —especialmente el carbón—, y con el Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano (SIPG). En consecuencia, estas y otras estrategias de seguimiento y planeación llevadas a cabo desde esta Unidad, han permitido dotar al país y a sus INGEI de información valiosa y calificada para la consolidación en el estimado de liberación de GEI.

Para el año **2018**, fecha de corte del último BUR, el país reportó un total de 302.974 Gg de CO<sub>2</sub>eq de GEI directos, de los cuales 70,2% correspondieron a CO<sub>2</sub>, el 24,3% a CH<sub>4</sub>, el 4,4% a N<sub>2</sub>O, el 1,1% a HFC – PFC y el 0,1% a SF<sub>6</sub>. Teniendo en cuenta una absorción de CO<sub>2</sub> de -23.776 Gg de CO<sub>2</sub>eq, **las emisiones netas se estimaron en 279.198 Gg de CO<sub>2</sub>eq**. Específicamente, **el sector transporte**, subcategoría del sector energético, contó con una participación del 12,5% sobre el total del GEI liberado, esto es, **37.827 Gg de CO<sub>2</sub>eq**. Con relación al estimado en las emisiones del año 1990, fecha inicial en el histórico de emisiones, el sector transporte tuvo un aumento en la liberación de GEI de 91.3%, pasando de 19,773 Gg de CO<sub>2</sub>eq a las 37, 827 referidas anteriormente. Es menester aclarar, además, que, dentro del sector transporte, la subcategoría **“transporte terrestre”** domina con una participación promedio histórica del 83,1%, cuyas emisiones se estimaron en 17,680 Gg de CO<sub>2</sub>eq para el año 1990 y **de 29,602 Gg de CO<sub>2</sub>eq en el año 2018**, lo que representa un incremento del 67% para el periodo de inventario [9]. Así pues, con lo dicho queda de manifiesto, por un lado, la importancia de contar con un INGEI que permita observar un desarrollo histórico, revelando, a la vez, las tendencias de los movimientos actuales. Por tal razón, cobra especial relevancia proyectos como FECOC, liderados también por la UPME, y que propenden por la creación de inventarios más precisos. Por otro lado, el conocimiento de cifras como las mencionadas anteriormente y de muchas otras susceptibles de ser observadas en los distintos BUR, permiten el establecimiento de estrategias de mitigación más acordes con la realidad del país, tal como queda referido en el E2050, por mencionar un ejemplo.

También, para el caso colombiano, se han llevado a cabo otra serie de acciones que responden a los compromisos adquiridos por el país tras el Acuerdo de París y que se encuentran alineados con el objetivo “Acción por el clima”. Tales procesos han sido liderados, como se ha mostrado, por la UPME y han consistido, entre otros aspectos, en la caracterización del parque automotor colombiano por representatividad y actividad, caracterización también de la movilidad de las diferentes categorías vehiculares en las principales áreas metropolitanas del país, el desarrollo de ciclos de conducción aplicables a distintas categorías vehiculares [16, p. 6] y la obtención de FE aceptables dadas las características del país. Es de esperarse, entonces, que a través de dichas estrategias el país pueda profundizar en el grado de detalle de los INGEI, de las emisiones de material particulado y de las tecnologías vehiculares empleadas en las actividades de transporte, sin escatimar en esfuerzos para la medición a bordo y en carretera en distintos pisos térmicos y distintos inventarios de

categorías vehiculares, pues, según se ha demostrado, los FE son los indicadores idóneos para soportar técnicamente la toma de decisiones en lo que respecta a la renovación tecnológica, al establecimiento de líneas de consumo de combustible y emisiones, a la planificación de escenarios de reducción, al delineamiento de zonas geográficas de aire protegido en centros urbanos, a la aplicabilidad de restricciones o programas de ecoetiquetado o de financiación estatal y privada en materia de cambio climático y calidad de aire [17, p. 6]. Todo, finalmente, con miras a aportar en las acciones por el clima, con inventarios más sólidos y aptos para la toma de decisiones efectivas.

### 3. Antecedentes de este convenio (FECOC+ Fase 2.2)

Como se mostró en el numeral anterior, dentro de los compromisos adquiridos por Colombia como suscriptor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), se encuentra el de remitir a la Conferencia de las Partes (COP), mediante los llamados Informes Bienales de Actualización (BUR por sus siglas en inglés), los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas de todos los gases de efecto invernadero (GEI) no controlados por el protocolo de Montreal, empleando para su desarrollo la metodología planteada por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

La construcción de dichos inventarios requiere cuantificar las emisiones generadas por el consumo de los diferentes energéticos. Este cálculo demanda que, para cada tipo de energético usado en el país, se tengan en cuenta las características de los procesos en el cual se consumen, así como las especificaciones de la tecnología empleada para su combustión. Para este fin se utilizan los **Factores de Emisión (FE)** por combustible, proceso y tecnología, de tal manera que, en la medida en que se avanza en el grado de detalle de estos tres elementos, el inventario de emisiones resulta más exacto. Los **FE** se definen como la masa de emisión contaminante por cada unidad característica de la fuente que lo genera, es decir, distancia recorrida en el caso de los vehículos —g/km—, o energía del combustible para las fuentes fijas/industria —ton/MJ—. Además de ser usados para los inventarios, los FE han mostrado ser una herramienta idónea para soportar técnicamente decisiones como por ejemplo: la renovación de tecnología, el establecimiento de líneas base de consumo de combustible y emisiones tendientes a la planificación de escenarios de reducción, la delimitación de zonas geográficas de aire protegido en grandes centros urbanos, la implementación de restricciones de circulación/funcionamiento por motivos ambientales, los programas de eco-etiquetado y las bases de programas de financiación estatal y privada en materia de cambio climático y calidad del aire, entre otras. También, los FE son una herramienta potente para el sector empresarial, puesto que les permite valorar sus programas de autorregulación de emisiones, así como validar las mejores tecnologías disponibles para sus actividades.

Para la construcción de estos inventarios, el IPCC recomienda emplear información local, es decir, usar información característica de los combustibles de cada país, así como de los procesos y equipos empleados, pues estas características pueden variar considerablemente de un país a otro.

Si bien los FE de vehículos se pueden determinar a partir de modelos como los propuestos por el *International Vehicle Emissions model* (IVE), por la Agencia Europea de Medioambiente (AEM) —llamado modelo COPERT— o por la Agencia de Protección del Medioambiente (EPA) de los Estados Unidos —llamado MOVES—, los datos proporcionados están condicionados por un número importante de parámetros de corrección y por supuestos que intentan recoger la realidad de cada país o región que los quiera utilizar. Las diferencias entre los FE medidos localmente y los obtenidos con estos modelos puede llegar a ser de varios órdenes de magnitud, por lo que lo más recomendable es medirlos localmente con el fin de tener inventarios de emisiones más representativos. Las diferencias suelen estar asociadas con las tecnologías vehiculares, calidad de combustible, condiciones

climatológicas, topográficas, de altitud sobre el nivel del mar, y cultura de conducción propias de cada ciudad, región o país.

En 2016, la UPME contrató una consultoría técnica con la Universidad de Antioquia, quien a través de su Red de Investigación en Combustión Avanzada – Incombustion, actualizó la base de datos de los FE de los Combustibles Colombianos -FECOC-, contabilizando en total 57 combustibles dentro de la calculadora, de los cuales 21 fueron nuevos y caracterizados en laboratorio, y 34 de los existentes fueron actualizados con datos trazables en concordancia con las normas del IPCC. Los índices de emisión que suministra actualmente la calculadora FECOC, se fundamentan en las bases teóricas suministradas por la estequiometría de cada uno de los combustibles (masa de contaminante / masa de combustible). Si bien esta aproximación arrojó resultados claves para el sector industrial intensivo en consumo de combustibles en el país, también dejó en evidencia la necesidad de cuantificar en los inventarios la eficiencia de conversión del combustible en energía útil según la actividad y tecnología donde es usado.

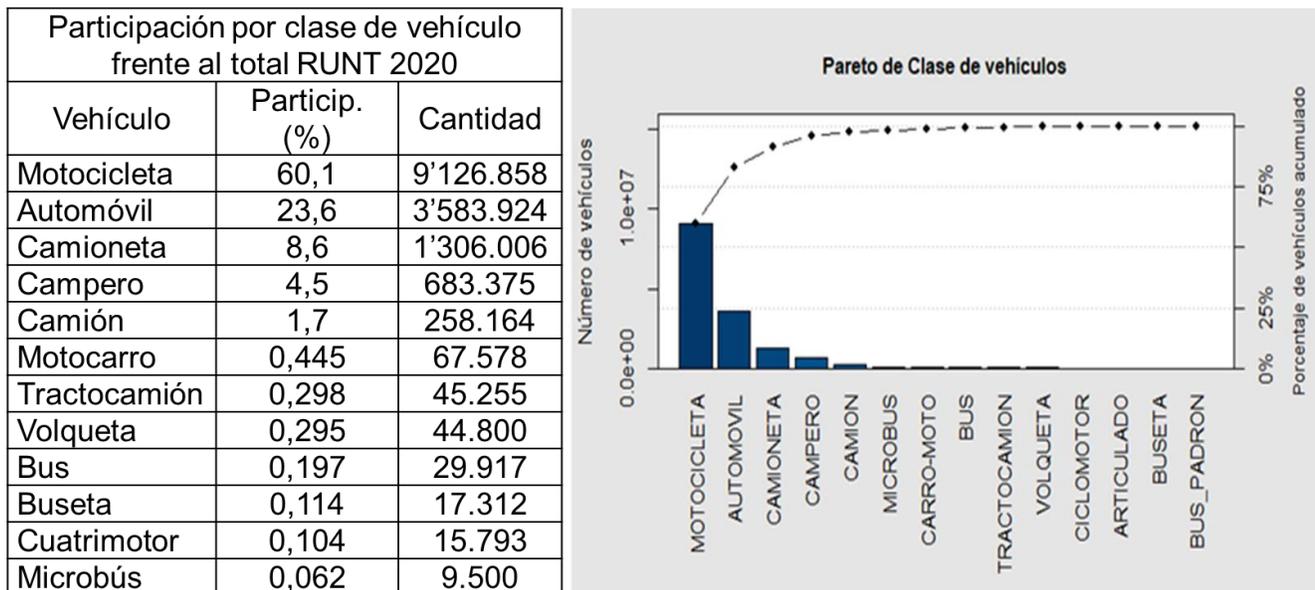
Respondiendo a esta necesidad, la UPME ha venido realizando una serie de convenios con la Universidad de Antioquia con el fin de determinar los FE de combustibles colombianos usados en el sector transporte, altamente intensivo en consumo de combustibles y con el mayor potencial de mejora en eficiencia, integrando información detallada correspondiente a los procesos y tecnologías en los que son usados. A este proyecto se le denominó FECOC+, y fue concebido en tres fases, a saber:

- Fase 1 (convenio interadministrativo CV-001-2020), en la que se caracterizó el parque automotor del país y se sintetizaron los ciclos de conducción por actividad en cada categoría vehicular (motocicletas, vehículos livianos y vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros).
- Fase 2 (desarrollada en dos partes, a saber: Fase 2.1 -CV 003-2021- y Fase 2.2 -CV 001-2022-), en la que se determinaron, mediante medición a bordo, los FE de los vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros en tres altitudes representativas de la topografía colombiana. Se eligió esta categoría, porque a pesar de contar con menos vehículos que las motocicletas y los vehículos livianos, es la que más combustible consume entre todas las que conforman este sector.
  - En la Fase 2.1 (CV 003-2021) se determinaron los FE de GEI ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ), de gases regulados ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{THC}$  y  $\text{NMHC}$ ) y de material particulado (en masa —PM— y número de partículas —PN—) de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud de Bucaramanga (aproximadamente 1000 metros sobre el nivel del mar —msnm-).
  - En la Fase 2.2 (CV 001-2022) se determinaron los FE de GEI ( $\text{CO}_2$ ), de gases regulados ( $\text{CO}$ ,  $\text{THC}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ , y  $\text{NO}_x$ ) y de material particulado (PM y PN) de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) en las ciudades de Bogotá y Barranquilla.
- Fase 3, determinación mediante medición a bordo de los FE de los vehículos livianos y motocicletas en tres altitudes representativas del país, aún pendiente por ejecución.

Para la ejecución de la Fase 2 se vincularon al convenio: la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), el grupo empresarial Coordinadora Mercantil (COORDINADORA), la empresa Intecon S.A., y la empresa 3DATX ubicada en Nueva York (Estados Unidos).

### 3.1 Resumen de resultados de FECOC+ Fase 1

En la **Figura 1. 1** se muestra la participación por clase de vehículos de transporte terrestre de Colombia, obtenida a través de la base de datos del RUNT a diciembre de 2020. De los cerca de 16 millones de vehículos que había en ese momento, el 60% eran motocicletas. Este segmento crece a una tasa aproximada de 850.000 cada año, lo que significa que en el país se vende una motocicleta cada 37 segundos. Por su parte, los vehículos pesados representan cerca del 2,3 % de la flota (alrededor de 330.000), siendo, aún así, los principales consumidores de combustible en comparación con las demás categorías vehiculares.



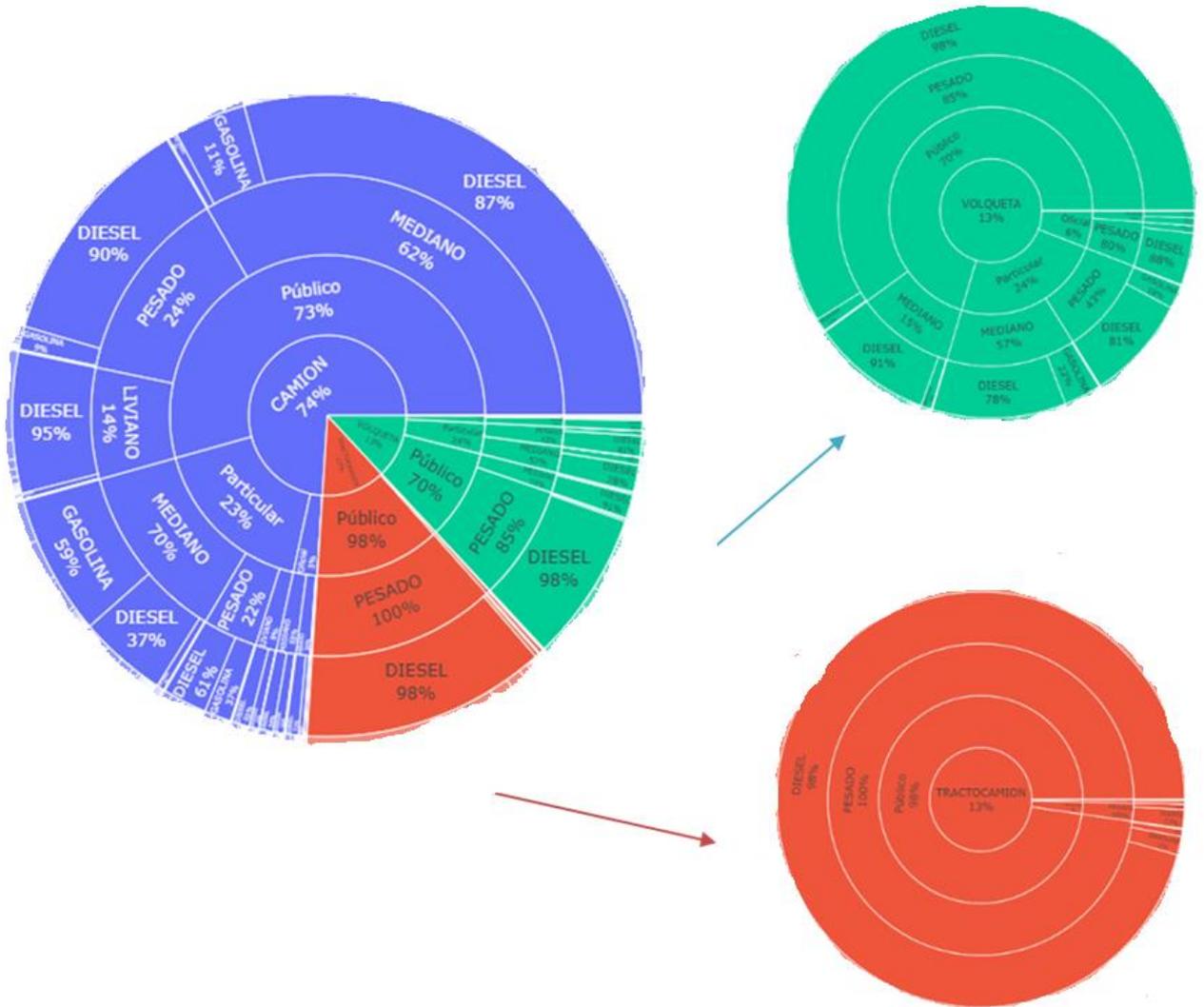
**Figura 1. 1.** Participación por clase de vehículos según el RUNT a 2020.

En este proyecto se clasificaron todas las categorías vehiculares en función de su vocación (particular/público), su tamaño (livianos, medianos y pesados), tipo de combustible (Diésel, Gas natural y gasolina), y marca, tal como se muestra a modo de ejemplo en la **Figura 1. 2**.

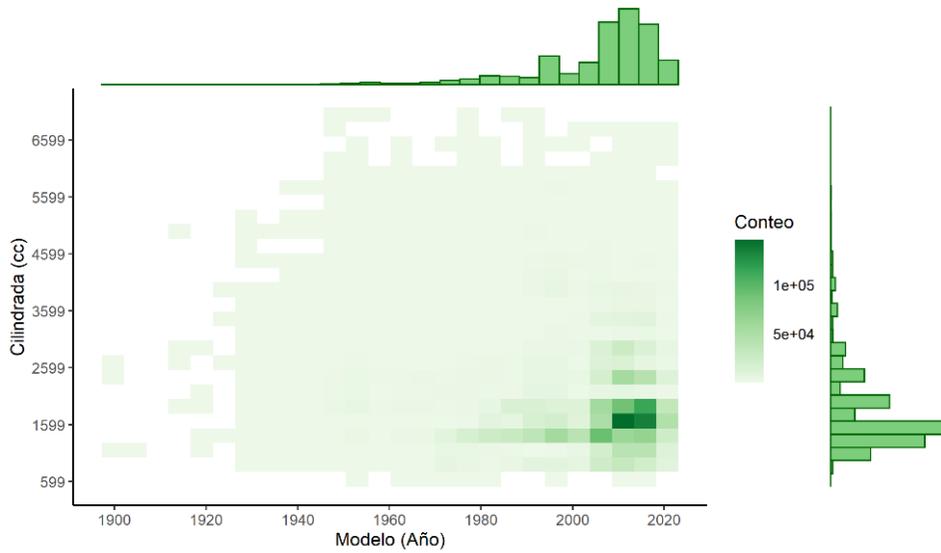
Adicionalmente, se realizaron mapas de calor que permitieron identificar a mayor nivel de detalle el número de vehículos en cada categoría según su cilindrada, año de modelo y capacidad de carga, como se muestra a modo de ejemplo en la **Figura 1. 3**.

**Figura 1. 2. Caracterización de la categoría Cami**

CATEGORIA CARGA (2.28% Total Nacional)

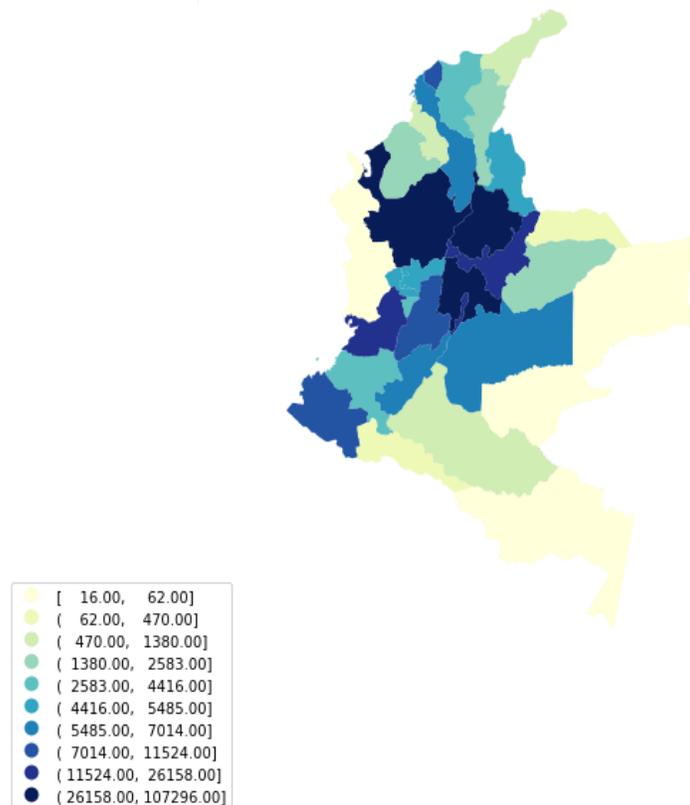


ones en el RUNT a diciembre de 2020.



**Figura 1. 3.** Número de vehículos livianos en función de su cilindrada y año de modelo.

Así mismo, el análisis estadístico de la base de datos del RUNT permitió identificar, para cada departamento del país, el número de vehículos registrados en cada categoría, tal como lo muestra, para la categoría de camiones pesados, la **Figura 1. 4.**



**Figura 1. 4.** Distribución del número de camiones pesados en Colombia por departamento.

Con la información obtenida del análisis estadístico de la base de datos del RUNT, presentada parcialmente en las Figuras **1.1** a **1.4**, se lograron identificar los vehículos más representativos, a los cuáles se les deberían medir

los FE en las Fases 2 y 3 de FECOC+. Así pues, fueron identificadas tanto marcas, como cilindradas, años de modelo y peso bruto vehicular para cada categoría.

En el segundo bloque metodológico de FECOC+ Fase 1, se logró sintetizar los ciclos de conducción de las 5 categorías vehiculares más representativas del país. Para este fin, se caracterizaron los patrones de movilidad por cada categoría. Para el transporte de carga, se contó con la colaboración del Ministerio de Transporte, quien brindó el acceso a la información del Sistema de Información Costo Eficiente de Transporte de Carga (SICE-TAC) y del Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC), permitiendo identificar los principales corredores viales del país, el número de viajes por cada categoría vehicular, la carga promedio para las principales configuraciones vehiculares, así como el tipo de combustible utilizado. Así mismo, el grupo empresarial EQUITEL, a través de su empresa LAP TECHNOLOGIES, suministró información de la dinámica vehicular (velocidad y ubicación) con una precisión de 1 segundo, lo que posibilitó la obtención de más de 4'000.000 de segundos y cerca de 12.000 micro viajes, con los cuales se sintetizaron los ciclos de conducción para las categorías de camiones y tractocamiones.

Para las motocicletas, vehículos livianos y buses urbanos, se llevaron a cabo campañas de medición durante el segundo semestre de 2020 en Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla. Los días de medición, las rutas elegidas, la información origen-destino de los viajes, así como las franjas horarias, fueron obtenidas con la colaboración de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Universidad del Valle (Cali), y la Universidad del Norte (Barranquilla). Con los cerca de 3'000.000 de segundos y los más de 28.000 micro viajes, fue posible sintetizar los ciclos de conducción para estas categorías vehiculares. Adicionalmente, el análisis estadístico clásico, hizo posible la obtención de un único ciclo de conducción para cada categoría, mientras que el análisis estadístico de clústeres, permitió identificar tres patrones claves de movilidad por actividad vehicular, a saber, Congestionado, Mixto y Fluido. A modo de ejemplo, en la **Figura 1. 5** se representa el ciclo de conducción para motocicletas, así como los principales descriptores de dicho ciclo.

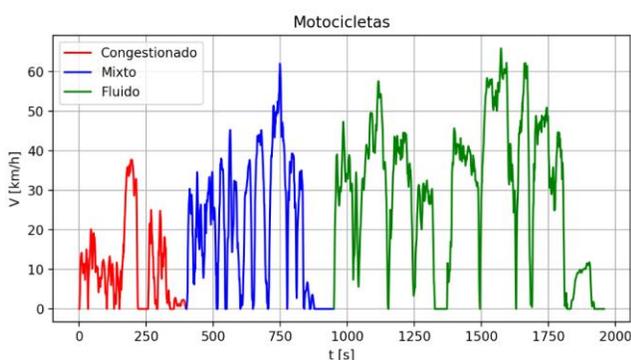


Figura 3.7..Ciclo de conducción de motocicletas en Colombia

Parámetro	Motocicletas
Duración [s]	1958
Distancia recorrida [km]	12,68
Velocidad promedio [km/h]	23,31
Velocidad promedio en mov. [km/h]	26,86
Velocidad máxima [km/h]	65,90
Tiempo en ralentí [%]	13,18
Tiempo en aceleración [%]	32,69
Tiempo en deceleración [%]	30,29

**Figura 1. 5.** Ciclo de conducción y parámetros característicos para motocicletas.

La **Figura 1. 6** muestra, a modo de ejemplo, la comparación de ciclos de conducción para motocicletas.

Ciclo de Conduccion		L (km)	t (s)	Vel. Prom. (km/h)	Vel. Prom movimiento (km/h)	Tiempo Ralentí (%)	Referencias
Regulatorio	ECE R47	1.014	195	18,7	27,1	30,8	(Tsai, Chiang, Hsu, Peng, & Hung, 2005)
	FTP 75	17.788	1.877	34,1	41,6	18,0	(Tong, Hung, & Cheung, 1999)
	WMTC P1	4.065	600	24,4	28,9	15,7	(Barlow, Latham, Mccrae, & Boulter, 2009)
	WMTC P1 Reducido	3.937	600	23,6	27,0	12,5	
	WMTC P2	9.111	600	54,7	58,8	7,0	
	WMTC P2 Reducido	8.972	600	53,8	57,4	6,2	
	WMTC P3	15.736	600	94,4	96,7	2,3	
WMTC P3 Reducido	14.436	600	86,6	88,4	2,0		
No Regulatorio	Taipei Cycle (TMDC)	5.109	950	19,4	23,8	19,5	(Tzeng & Chen, 1998)
	Kaohsiung Cycle (KHM)	6.568	1.126	21,0	29,0	27,7	(Tsai, Chiang, Hsu, Peng, & Hung, 2005)
	Hanoi Cycle (CEMDC)	11.510	2.061	20,3	21,7	7,7	(Chiang, Huang, Lai, & Lee, 2014)
	Hong Kong (HK Cycle)	6.330	1.471	15,4	22,2	31,4	(Chiang, Huang, Lai, & Lee, 2014)
	AMVA Motocicletas	14.000	2.045	23,0	23,1	8,4	Informe final Convenio 1096 de 2016 AMVA-UdeA
	<b>COLOMBIA Motocicletas</b>	<b>12.680</b>	<b>1.958</b>	<b>23,3</b>	<b>26,9</b>	<b>13,2</b>	Este proyecto

Figura 1. 6. Comparación de parámetros característicos de ciclos de conducción de motocicletas.

Una vez caracterizado el parque automotor terrestre colombiano, y sintetizados sus ciclos de conducción, se procedió a medir los FE para la categoría de vehículos pesados. Dadas las diferencias de altitud sobre el nivel del mar tan marcadas en Colombia, se decidió medir en tres pisos térmicos claves: Bogotá, Bucaramanga y Barranquilla.

Por las dificultades logísticas asociadas a esta Fase 2, se decidió subdividirla en una Fase 2.1 en la que se midieron los FE en el área metropolitana de Bucaramanga (1000 msnm) de 4 Tractocamiones (C3S2), 4 Camiones grandes de 2 ejes (C2G) con capacidad de carga de 10 toneladas, 4 Camiones medianos/pequeños de dos ejes (C2P) con capacidad de carga inferior a 5 toneladas, y 4 buses. Para este fin, se contó con la participación de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), quien facilitó el equipo de medición de emisiones a bordo (PEMS) marca HORIBA OBS-ONE y puso a disposición un equipo de ingenieros calificados para este fin, y el grupo empresarial Coordinador Mercantil, quien facilitó una parte de los camiones de transporte de carga.

### 3.2 Resumen de resultados de FECOC+ Fase 2.1

A través de la metodología presentada en la Figura 1. 7 se determinaron los FE para el área metropolitana de Bucaramanga. Para los Tractocamiones y los camiones C2G, las mediciones se hicieron en carretera (circunvalar Girón-Floridablanca), mientras que, para los camiones C2P y los buses, los ciclos se reprodujeron en el banco de rodillos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) – Ecopetrol ubicado en Piedecuesta.

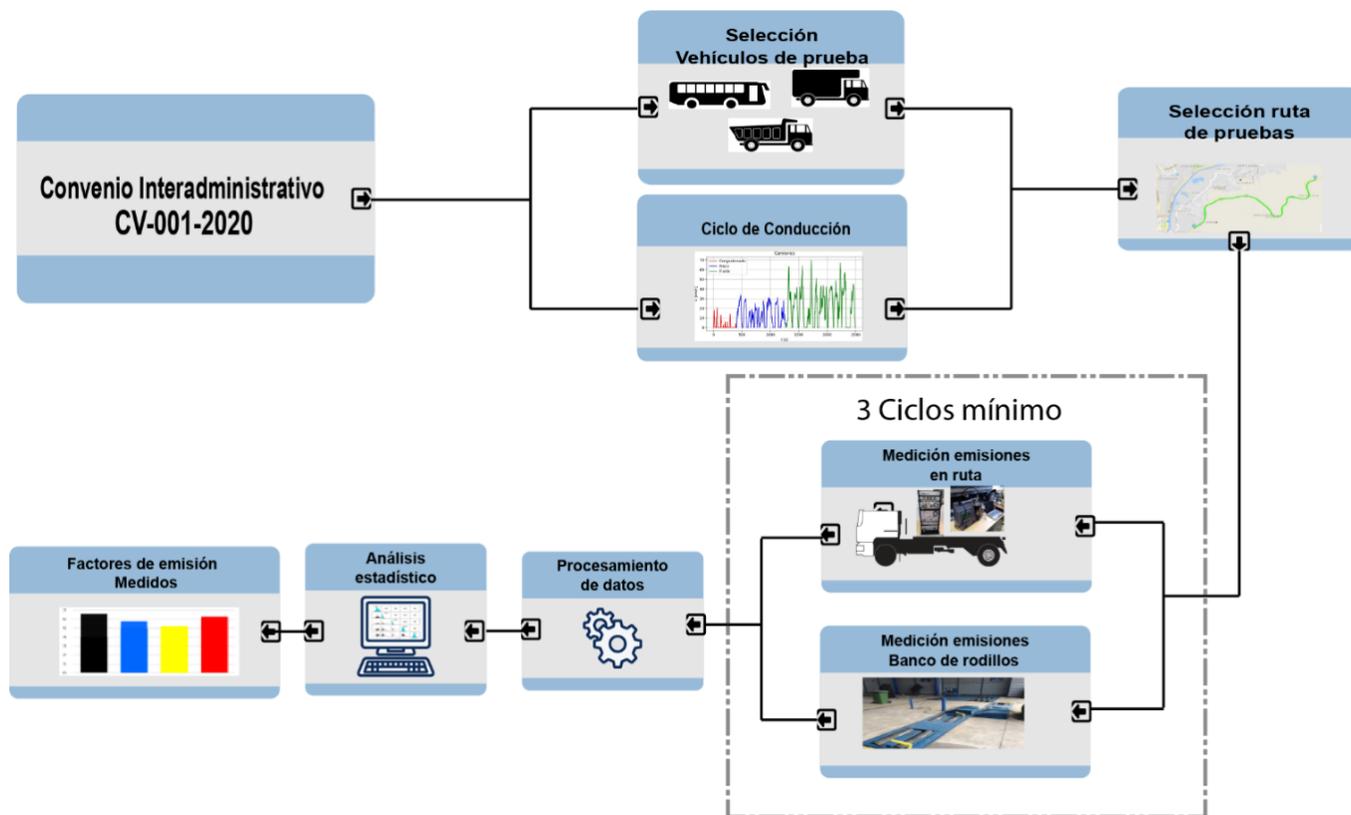


Figura 1. 7. Metodología adoptada para determinar factores de emisión.

En la Figura 1.8 se resumen los FE promedio de las categorías de vehículos pesados a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga.

Categoría	Modelo	Norma emisión	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	Carga (Ton)	Rend. (km/gal)	CO <sub>2</sub> (g/km)	CH <sub>4</sub> (mg/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO <sub>2</sub> (g/km)	PM (mg/km)	PN x10e12 (#/km)	THC (g/km)	NMHC (g/km)	CO (g/km)
Tractocamiones C3S2	2012	EPA 98	13000	28	5,5	1555,0	15,48	24,79	15,44	9,36	162,50	48,83	0,78	0,76	3,62
	2013	EPA 98	14945		5,1	1726,0	16,47	25,01	15,05	9,96	1392,03	0,38	0,83	0,81	17,07
	2020	Euro V	12777		5,5	1748,0	4,24	10,44	6,32	4,12	165,97	22,88	0,21	0,21	13,32
	2020	Euro V	12777		5,5	1747,0	2,90	10,97	6,56	4,41	126,95	87,86	0,15	0,14	11,69
Camiones de 2 ejes C2 grande	2012	Euro II	7790	12,8	11,0	873,6	17,87	8,32	4,76	3,56	168,90	45,94	0,89	0,88	2,51
	2005	Euro II	8270		11,1	871,4	36,55	8,84	4,80	4,03	1493,70	263,52	1,91	1,87	7,67
	2021	Euro IV	7790		11,5	998,4	11,20	6,69	3,61	3,08	67,40	51,58	0,56	0,55	2,59
	2022	Euro V	7684		11,2	773,9	2,45	8,47	5,05	3,44	130,19	69,15	0,12	0,12	13,37
C2 liviano	2006	Euro II	2771	5	22,8	410,0	7,23	5,72	3,19	2,56	339,0	49,50	1,48	1,45	4,69
	2011	Euro II	2771		29,5	319,4	40,80	3,39	1,70	1,69	245,0	71,55	2,04	2,00	2,55
	2016	Euro IV	2999		20,8	471,6	11,77	2,59	1,27	1,33	41,4	2,67	0,55	0,54	1,98
C2 mediano	2018	Euro IV	5192	7	17,0	571,4	30	4,64	2,03	2,60	123,0	43,80	1,51	1,48	11,15
Buses	2006	Euro II	2771	20 pas.	23,0	421,0	35	5,87	3,09	2,78	303,0	52,40	1,74	1,70	5,05
	2011	Euro II	2771		28,0	342,0	51,50	3,65	1,60	2,05	245,30	72,00	2,63	2,52	2,59
	2016	Euro IV	2999		20,2	475,7	13,88	2,58	1,21	1,37	41,27	30,33	0,70	0,68	2,41
	2018	Euro IV	5192	40 pas.	15,4	614,0	38,60	4,90	2,04	2,86	138,40	39,40	1,93	1,89	15,10

Figura 1. 8. Factores de emisión de la categoría de vehículos pesados y buses en Bucaramanga

El proyecto FECOC+ Fase 2.1, ejecutado en 2021 con la colaboración de ECOPETROL, permitió:

- Obtener los FE medidos a bordo en el área metropolitana de Bucaramanga (1000 msnm), además de tener registro de datos de consumo de combustible instantáneo y promedio para vehículos pesados.
- Demostrar que a mejor tecnología de control de emisiones en los camiones pesados y buses, más bajas son sus emisiones contaminantes. En el caso de los Tractocamiones con tecnología Euro V, el sistema de reducción catalítica (SCR), que opera con úrea automotriz, alcanzó a reducir hasta de 50% las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx).
- Aclarar que el Transporte de carga y pasajeros no conviene atomizarlo en vehículos de menor tamaño, puesto que sus FE (en g/km-ton) son significativamente más elevados al disminuir la cilindrada del motor.
- Los buses presentaron mayor consumo de combustible y más elevados FE que los camiones C2 pequeños a pesar de tener la misma cilindrada de motor. El carácter más transitorio de operación por la actividad propia de ciudad y paradas constantes para recoger pasajeros, hace que su nivel de contaminación sea mayor.
- El modelo IVE, propuesto para estimar FE y utilizado para levantar los Inventarios de Emisión, no es recomendable mientras se puedan realizar mediciones a bordo, ya que en algunos casos las diferencias con las mediciones son de varios órdenes de magnitud.

#### 4. FECOC+ Fase 2.2

Este documento constituye el informe final del convenio interadministrativo CV-001 de 2022 (FECOC+ Fase 2.2) entre la UPME y la Universidad de Antioquia, que tuvo por objeto determinar los FE de vehículos pesados en las ciudades de Bogotá (2600 msnm) y Barranquilla (nivel del mar). Está estructurado en cuatro capítulos, dando respuesta a cada uno de los entregables comprometidos, a saber:

##### **Entregable No. 1:**

Documento con la base de datos resultado de la medición de los FE de la Fase 2.2, considerando los resultados de la Fase 1 del convenio CV-001-2020.

##### **Entregable No. 2:**

Informe con los respectivos factores de emisión de monóxido de carbono (CO), Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos totales (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado (PM) y número de partículas (PN) para camiones (C2 grandes y C2 pequeños), buses de transporte urbano y tractocamiones, con una muestra total de 32 vehículos para dos altitudes, Bogotá (2600 metros sobre el nivel del mar) y Barranquilla (nivel del mar).

Adicional: se incluyó en este entregable una comparación de los Factores de Emisión medidos en este convenio frente a los estimados a través de los modelos IVE, MOVES y COPERT.

**Entregable No. 3:**

Informe con la determinación del impacto de la tecnología de control de emisiones (EURO) de los vehículos pesados de carga y de pasajeros sobre los factores de emisión, con énfasis en los gases de efecto invernadero.

Adicional: se incluyó en este entregable el análisis de varianza (ANOVA) asociado al efecto de la altitud sobre el nivel del mar sobre los factores de emisión medidos en este convenio.

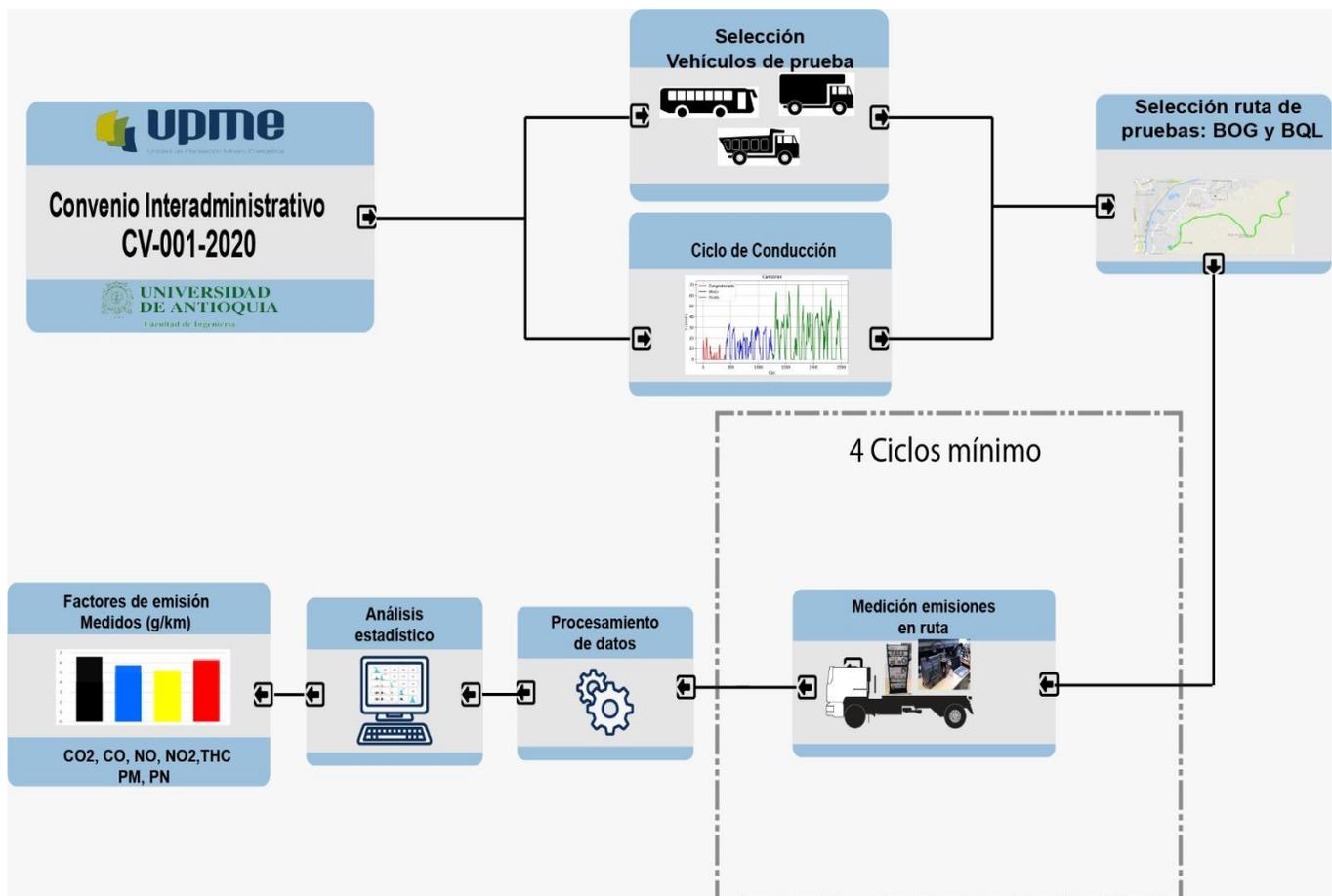
**Entregable No. 4:**

Informe con la cuantificación del impacto de los diferentes eventos de conducción sobre los factores de emisiones vehiculares, tales como tiempos con vehículo parado con motor encendido y aceleraciones agresivas, para buscar recomendaciones de mínimo impacto ambiental.

Esperamos que este informe sirva como insumo de consulta de los factores de emisión de vehículos pesados y buses para cada ciudad medida y para el país. Los FE fueron medidos a bordo en condiciones propias de la altitud correspondiente a Bogotá y Barranquilla, un reto que la UPME y la Universidad de Antioquia asumieron y que esperamos tenga impactos positivos de cara al levantamiento de los inventarios de emisiones, en especial los de efecto invernadero, que constituyen una base clave para los Informes de actualización bienales que el país debe remitir a la conferencia de las partes como suscriptor del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

## 5. Factores de emisión Fase 2.2 considerando los resultados de la Fase 1.

Se realizaron tres campañas experimentales de medición de emisiones a bordo en carretera siguiendo los ciclos de conducción para la categoría de vehículos pesados y buses, que fueron sintetizados en el proyecto FECOC+ Fase 1 (CV 001-2020). Dos campañas se llevaron a cabo en Bogotá (junio-agosto de 2022 y febrero 2023) y una en Barranquilla (enero 2023), teniendo como finalidad determinar los FE (g/km) de gases (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, HC, y CO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM en mg/km, y PN en #/km), así como el consumo de combustible (km/gal). Se adoptó la metodología mostrada en la **Figura 1. 9**, metodología que fue consistente y similar a la adoptada por Ecopetrol y la Universidad de Antioquia en el desarrollo del convenio interadministrativo CV-003-2022 (FECOC+ Fase 2.1), en la que se determinaron los factores de emisión de vehículos pesados de carga y de pasajeros para el área metropolitana de Bucaramanga.



**Figura 1. 9.** Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.2 (CV 001-2022).

Como se muestra en la **Figura 1. 9**, los vehículos medidos fueron seleccionados según la metodología desarrollada en la primera fase de este proyecto (FECOC+ Fase 1, CV 001-2020), en la que se establecieron el año de modelo, las marcas y tecnologías de control de emisiones más representativas del país, así como los

ciclos de conducción utilizados para cada categoría vehicular. Los FE de los buses de 20 y 38 pasajeros se obtuvieron utilizando los mismos camiones pequeños, pero medidos de acuerdo con el ciclo de conducción de buses (FECOC+ Fase 1), debido a que en Colombia se ensamblan sobre el mismo tipo de chasis. Para ampliar sobre el desarrollo metodológico del proyecto se recomienda consultar el **ANEXO 1**.

### 5.1 Determinación de la población muestral de vehículos a medir

En la **Tabla 1.1** se presenta la población de vehículos pesados y buses más representativos del parque automotor colombiano a diciembre de 2020, según los resultados del convenio Interadministrativo No. 001-2020 entre la UPME y la Universidad de Antioquia, FECOC+ Fase 1. La categoría de vehículos pesados, cuya clasificación según el Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es N2, y que fueron medidos en este convenio representa el **2.28% del total del Parque Automotor Colombiano**, es decir, 348.219 vehículos En ésta se agrupan Camiones (74%), Volquetas (13%) y Tractocamiones (13%), tal como se muestra en las Figura 1.1 y Figura 1.2.

**Tabla 1. 1.** Vehículos pesados representativos para medición de factores de emisión de acuerdo con el Convenio 001-2020 (FECOC+ Fase 1)

Categoría	Clase	% participación del total nacional	Cantidad	Combustible	Cilindraje mapa de calor	Modelo mapa de calor	% participación en la categoría	Cantidad
Buses	Microbús	0,373	56.640	Diésel	2.800	1998	42%	23.771
				Gasolina	2.400	1997	12%	6.815
	Bus - Buseta			Diésel	5.200	2014	34%	19.432
				Gasolina	5.900	1978	12%	6.622
Vehículos de carga	Camión	1,7	258.147	Diésel	5.200	2012	68%	206.175
				Gasolina	5.700	1979	17%	51.972
	Tractocamión	0,298	45.252	Diésel	15.000	2012	15%	44.375
				Gasolina	14.000	1980	0%	877

*NOTA: esta tabla recoge los combustibles más representativos para vehículos pesados en Colombia, a saber, diésel, y minoritariamente gasolina. En la base de datos del RUNT, a diciembre de 2020, no se encontraron registros de vehículos pesados operando con combustible gas metano (llamado gas natural -GNC-) o gas licuado de petróleo (GLP). Estos dos combustibles, considerados estratégicos en la hoja de ruta hacia la transición energética del gobierno colombiano, deberían ser considerados en futuros proyectos de actualización de los factores de emisión de vehículos pesados.*

En la **Tabla 1.2.** se presenta el número de vehículos a medir en función del nivel de confianza (NC, %), y el error en el que se incurriría. Cuanto más grande el NC y menor el error, se obtienen datos más representativos del factor de emisión. Si se desea medir con un nivel de confianza del 90%, y un error de 0.1, el tamaño de la muestra es de 68 vehículos pesados por cada categoría, que para las correspondientes a este convenio son cuatro: Tractocamiones, Camiones de dos ejes grandes C2G, Camiones de dos ejes pequeños C2P y Autobuses. Esto

implica que se deberían medir 272 vehículos en total. Según la experiencia del grupo ejecutor, quien realizó, en conjunto con la empresa colombiana de petróleos ECOPETROL, las campañas de medición para determinar los factores de emisión de vehículos pesados del Área Metropolitana de Medellín y sus alrededores (Convenio 888 de 2017 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad de Antioquia, FEVA-2) y los factores de emisión de vehículos pesados del Área Metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores (convenio CV 003-2021, FECOC+ Fase 2.1), la determinación confiable y representativa del factor de emisión de un solo vehículo pesado en carretera puede llegar a requerir en un caso extremo aproximadamente 1 semana que se distribuye en las siguientes actividades:

1. Recepción e inspección del vehículo y su documentación
2. Instrumentación e instalación de la carga simulada en el vehículo de prueba
3. Calibración y puesta a punto de los sensores de medición de emisiones, partículas y flujos de aire y combustible
4. Realización de pruebas en carretera
5. Desmontaje de instrumentación y carga simulada del vehículo
6. Entrega del vehículo a satisfacción del propietario

Si se cuenta con un equipo PEMS como el utilizado en este proyecto, y con el soporte logístico adecuado, se podrían reducir los tiempos a máximo 2-3 días por cada vehículo medido. Con estos datos, se requerirían entre 2 y 5 años para terminar las mediciones de este convenio, lo cual es irreal e impráctico. A modo de ejemplo, los factores de emisión de vehículos pesados para centro Europa, incluyendo Austria, Alemania y Suiza, se suelen medir cada 5 años con un número aproximado de 75 camiones [24]. Los factores de emisión del Corredor Económico China-Pakistán, se determinaron con una muestra de 70 camiones [25]. Otro ejemplo de un tamaño muestral representativo corresponde al metaanálisis de emisiones de PEMS de vehículos Euro 6 y TIER 2 BIN 5/ULEV II para vehículos diésel medidos bajo condiciones de conducción real, donde el ICCT (*International Council for Clean Transportation*) utilizó una muestra de 15 vehículos [26].

**Tabla 1. 2.** Número y tipo de vehículos pesados recomendados para medir en todo Colombia según el convenio CV 001-2020 (FECOC+ Fase 1)

NC (%)	Error															
	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
90	68	56	47	40	35	30	27	24	21	19	17	15	14	13	12	11
85	52	43	36	31	26	23	20	18	16	14	13	12	11	10	9	8
80	41	34	28	24	21	18	16	14	12	11	10	9	8	8	7	7
75	33	27	23	20	17	15	12	11	10	9	8	7	7	6	6	5
70	27	22	19	16	14	12	11	9	8	7	7	6	6	5	5	4

Por lo anterior, en el convenio CV 001-2020 (FECOC+ Fase 1) se recomendó medir 12 vehículos por cada categoría vehicular para obtener los factores de emisión para el país, esto significa un total de **48 vehículos**. Dicho tamaño muestral fue calculado para un nivel de confianza del 90% y un error de 0.24 tal como se muestra en la **Tabla 1.2.**

En la **Tabla 1.3** se presenta el tamaño muestral recomendado en FECOC+ Fase 1, donde el cilindraje y el año de modelo fueron obtenidos mediante diagramas de flujo de calor para cada categoría vehicular con base en la base de datos del RUNT a diciembre de 2020. Con base en esto, se decidió medir para tres ciudades ubicadas en tres altitudes diferentes sobre el nivel del mar: Bogotá (2600 metros sobre el nivel del mar -msnm-), Bucaramanga (1000 msnm) y Barranquilla (nivel del mar) un total de cuatro vehículos para las cuatro categorías, para un total de 16 vehículos por ciudad (**muestra total = 48 vehículos pesados**).

En cada categoría se intentaron seleccionar los vehículos de forma tal que la mitad fueran de tecnología antigua (pre Euro o Euro II) y la otra mitad de tecnología de control de emisiones reciente, que, en caso colombiano correspondían a Euro IV y Euro V.

**Tabla 1. 3.** Tamaño muestral de vehículos a medir por nivel de confianza y error por cada categoría de vehículos pesados según CV 001-2020 (FECOC+ Fase 1)

Categoría	Clase	Cilindraje (cc)	Modelo (aprox.)	Cantidad
Buses (M2)	Microbús, Bus - Buseta	2.800 a 5200	1998 y 2016	12
Vehículos de carga (N2)	Camión pequeño de dos ejes (C2P)	2.800 a 4.000	2006 y 2016	12
	Camión grande de dos ejes (C2G)	> 6.000	1995 y 2020	12
	Tractocamión	13.000 a 15.000	2012 y 2020	12
<b>TOTAL muestra de vehículos pesados a medir para el país</b>				<b>48</b>

*NOTA: los 12 vehículos por cada categoría son para el país, se proyectó medir en 3 ciudades a diferentes altitudes (Bogotá, Bucaramanga y Barranquilla), lo que correspondería a 4 vehículos de cada categoría por cada ciudad, es decir, 16 vehículos por cada ciudad.*

En el convenio CV 003-2021 (FECOC+ Fase 2.1), el grupo ejecutor junto con ECOPEPETROL, midieron 16 vehículos pesados a la altitud del Área Metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores, equivalente a 4 vehículos por cada una de las 4 categorías. En este convenio CV 001-2022 (FECOC+ Fase 2.2), se midieron 4 vehículos por cada una de las cuatro categorías en las dos áreas metropolitanas faltantes, a saber, Bogotá (16 vehículos) y Barranquilla (16 vehículos), para un total de 48. No obstante, el grupo ejecutor realizó la medición sobre 12 vehículos adicionales, para realizar pruebas de plausibilidad, tal como se muestra en la **Tabla 1.4**.

**La población total de vehículos medidos en este convenio, denominado FECOC+ Fase 2.2 = 44 vehículos**

**Total vehículos pesados medidos incluyendo FECOC+ Fase 2.1 y Fase 2.2 = 60 vehículos**

En la primera campaña de medición realizada entre los meses de junio y agosto de 2022 se midieron 19 vehículos pesados (ver **Tabla 1.4**), a saber, 4 tractocamiones, 4 camiones de dos ejes grandes (C2G, 10 ton), 5 camiones de dos ejes pequeños (C2P, < 5ton) y 6 buses (20 Y 38 pasajeros). En la ciudad de Barranquilla se midieron también 17 vehículos pesados (las mismas categorías) durante enero de 2023. Finalmente, durante el mes de febrero de 2023 se realizaron pruebas de plausibilidad (verificación del éxito en las mediciones) en la ciudad de Bogotá sobre una muestra de 8 vehículos pesados, a saber, dos tractocamiones, dos camiones C2G, dos

camiones C2P y dos buses. Adicionalmente, es necesario mencionar que todos los vehículos se cargaron con el 70% de su peso bruto vehicular o de capacidad de pasajeros.

Se seleccionaron rutas representativas en cada ciudad que permitieran reproducir los ciclos de conducción. Así, en Bogotá se seleccionó la autopista norte a la altura del peaje de Siberia, entre la Punta y el Rosal, y en Barranquilla la circunvalar de la prosperidad (ver **Figura 1. 10**).

**Tabla 1. 4.** Vehículos pesados medidos por categoría. —SCR: Sistema catalítico de Reducción de NOx

B O G O T Á	Categoría	I.D.	Año	Norma emisión	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	PBV <sup>(1)</sup> (Ton)	Odómetro (km)	C.C. <sup>(2)</sup>
								Histórico (km/gal)
( 2 6 0 0 m s n m )	N3: Tractocamiones C3S2; Total medidos = 4	TC1_BO	2012	EPA 98	13.000	27,2	698.000	5,3
		TC2_BO	2012	EPA 98	13.000	25	699.011	
		TC3_BO	2013	EPA 98	14.945	28	1'006000	7,5
		TC4_BO	2020	Euro V	12.777	27	133.473	7 <sup>(3)</sup>
		TC5_BO	2020	Euro V	12.777	25,2	179.575	
		TC6_BO	2020	Euro V	12.777	27	137.817	7,7
	N2: Camiones de 2 ejes C2 grande; Total medidos = 4	C2G1_BO	1995	pre Euro	7.636	14,7	n.d.	n.d.
		C2G2_BO	2012	Euro II	7.790	10,8	602.637	14,4
		C2G3_BO	2012	Euro II	7.790	10,8	658.000	15,2
		C2G4_BO	2020	Euro IV	7.790	14,6	146.733	n.d.
		C2G5_BO	2021	Euro IV	7.790	14,3	89.948	n.d.
		C2G6_BO	2023	Euro V	5.123	10,9	23.012	n.d.

(1) PBV = Peso Bruto Vehicular

(2) C.C. = Consumo de Combustible

(3) Consumo de úrea automotriz = 165 km/gal

	Categoría	I.D.	Año	Norma emisión	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	PBV <sup>(1)</sup> (Ton)	Odómetro (km)	C.C. <sup>(2)</sup> Histórico (km/gal)
B O G O T Á  ( 2 6 0 0  m s n m )	N2: Camiones de 2 ejes C2 pequeño; Total medidos = 5	C2P1_BO	2006	Euro II	2.771	5,6	474.000	23,3
		C2P2_BO	2006	Euro II	2.771	5,6	253.000	26,7
		C2P3_BO	2006	Euro II	2.771	5	274.672	
		C2P4_BO	2009	Euro II	2.771	5,6	344.000	26,0
		C2P5_BO	2022	Euro IV	2.771	5,4	27.000	24,0
		C2P6_BO	2022	Euro IV	2.771	5,5	42.862	
		C2P7_BO	2022	Euro IV	2.771	5,3	29.000	22,4
	M2: Buses; Total medidos = 6	B1_BO	2006	Euro II	2.771	20 pas.	474.000	23,3
		B2_BO	2006	Euro II	2.771		253.000	26,7
		B3_BO	2006	Euro II	2.771		274.672	
		B4_BO	2009	Euro II	2.771		344.000	26
		B5_BO	2022	Euro IV	5.193	38 pas.	5.140	n.d.
		B6_BO	2022	Euro IV	2.771	20 pas.	27.000	23,1
		B7_BO	2022	Euro IV	2.771		42.862	
B8_BO	2022	Euro IV	2.771		29.000		22,4	

B A R R A N Q U I L L A  ( O  m s n m )	Categoría	I.D.	Año	Norma emisión	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	PBV (Ton)	Odómetro (km)	C.C. Histórico (km/gal)
	N3: Tractocamiones C3S2; Total medidos = 4	TC1_BA	2011	EPA 98	14.945	26,6	1'321956	7,9
		TC2_BA	2012	EPA 98	15.000	27,2	860.972	8,2
		TC3_BA	2020	Euro V	12.777	26,1	198.577	8,6
		TC4_BA	2022	Euro V	14.945	26,6	40.187	8,2
	N2: Camiones de 2 ejes C2 grande; Total medidos = 4	C2G1_BA	2007	Euro II	7.790	13,8	1'027000	13,0
		C2G2_BA	2011	Euro II	7.790	12,2	765.512	n.d.
		C2G3_BA	2022	Euro V	6.700	13,1	96.264	n.d.
		C2G4_BA	2022	Euro IV	7.790	13,9	127.936	16,5
	N2: Camiones de 2 ejes C2 pequeño; Total medidos = 4	C2P1_BA	2006	Euro II	2.771	4,9	337.122	24,5
C2P2_BA		2006	Euro II	2.771	5	385.588	24,6	
C2P3_BA		2021	Euro IV	2.999	4,9	97.578	n.d.	
C2P4_BA		2022	Euro IV	2.999	4,8	35.045	n.d.	
M2; Buses; Total medidos = 5	B1_BA	2006	Euro II	2.771	20 pas.	337.122	24,5	
	B2_BA	2006	Euro II	2.771		385.588	24,6	
	B3_BA	2021	Euro IV	2.771		97.578	n.d.	
	B4_BA	2022	Euro V	6.700	40 pas.	96.264	n.d.	
	B5_BA	2022	Euro IV	2.999	20 pas.	35.045	n.d.	

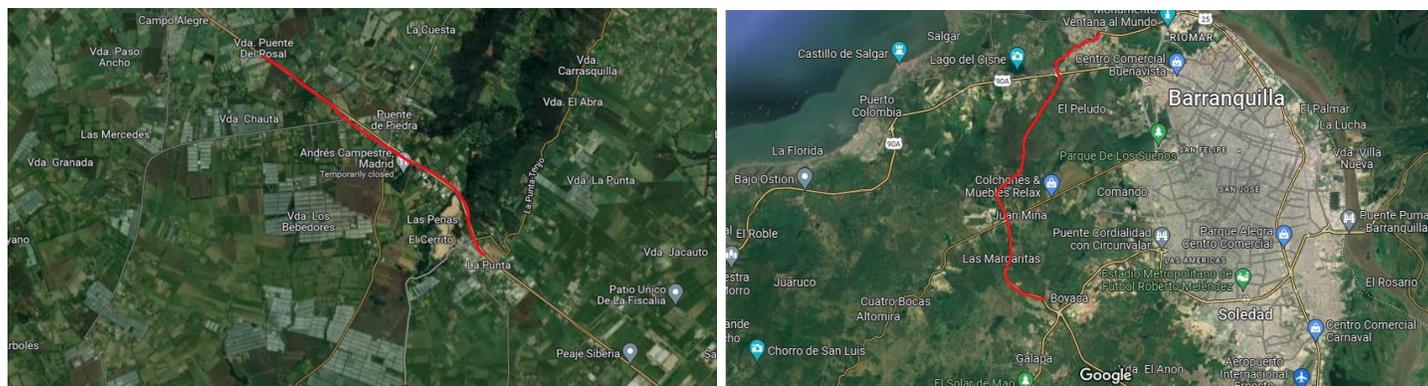


Figura 1. 10 . Zonas de medición en Bogotá (izq.) y Barranquilla (der.).

## 5.2 Representatividad de la muestra de vehículos medidos

En la Tabla 1.5 se muestra el grado de representatividad de la muestra de vehículos medidos en cada categoría, mediante el factor de expansión, que consiste en dividir el número de vehículos totales de la muestra poblacional para cada categoría entre el número de vehículos medidos.

Tabla 1. 5. Representatividad de la muestra de vehículos medidos frente al número total, por cada categoría

Categoría <sup>1</sup>	Tipo de vehículo	Muestra FECOC+ Fase 1	Total vehículos medidos	Factor de expansión <sup>2</sup>
N2	TC	45.255	14	3.233
	C2G	58.293	14	4.164
	C2P	184.794	15	12.320
M2	AB	56.729	17	3.337

<sup>1</sup> Categoría establecida de acuerdo a la clasificación de fuentes móviles de carretera del Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia

<sup>2</sup> Factor de expansión: este valor indica el número de vehículos que representa cada vehículo medido frente a la muestra total

## 5.3 Factores de emisión promedio (g/km) de los vehículos pesados medidos

En la Tabla 1.5 se presenta la base de datos del resultado **promedio** de la medición de los FE de la Fase 2.2, lo que constituye el ENTREGABLE No. 1 de este convenio CV 001-2022.

Las emisiones se midieron a bordo con un equipo portable de medición de emisiones (PEMS) ParSync FLEX de la empresa 3DATX (Nueva York, USA), con una frecuencia de muestro 1Hz (1 muestra/segundo). El equipo fue adquirido nuevo para el proyecto. El flujo másico de gases de escape (g/s) y el consumo de combustible (g/s) se determinaron con un sensor de flujo másico de aire (MAF, 1 Hz) y con un equipo capaz de medir la relación aire/combustible HORIBA Mexa-730λ (1Hz), respectivamente. La velocidad instantánea del vehículo, así como

su geolocalización se registró a través del módulo incorporado en el PEMS PaySync FLEX, y fue verificada con un Módulo de Actividad Vehicular (MAV) desarrollado por el grupo ejecutor. Para consultar detalles de los datos de los equipos utilizados en las mediciones se recomienda consultar el **ANEXO 2**.

Las emisiones medidas a bordo fueron:

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono, considerado el GEI de referencia

NO: monóxido de nitrógeno

NO<sub>2</sub>: dióxido de nitrógeno, altamente tóxico/cancerígeno para el ser humano, con elevada capacidad de reaccionar en la atmósfera para formar compuestos denominados secundarios. La Organización Mundial de la Salud (OMS) sugiere límites de exposición máximos a este peligroso gas.

NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>), es fotoreactivo, promueve la formación de lluvia ácida, está regulado por las normas de emisiones.

PM: material particulado (masa), considerado como uno de los principales causantes de problemas de salud pública en grandes centros urbanos y protagonista en el cambio climático. La OMS sugiere límites máximos de concentración de tanto de PM<sub>10</sub> como de PM<sub>2.5</sub>, definidos como el material particulado cuyo diámetro es inferior a 10 y 2.5 micrómetros, respectivamente. Estos límites han sido recogidos en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. En el caso de la emisión de PM de los motores de combustión interna, dado que el tamaño de las partículas suele ser inferior a los 500 nanómetros (0.5 micrómetros), por lo tanto, formaría parte de ambas fracciones PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. En consecuencia, en todo el informe, nos referiremos únicamente a PM. De lo anterior se deduce, por consiguiente, que existen otros compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, diferentes a la contribución del proceso de combustión de los motores de combustión interna, que están presentes en el PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> que registran las unidades de medición de las autoridades ambientales.

PN: número de partículas (#), los motores de combustión interna modernos emiten significativamente poca masa de partículas (PM), lo que significa que las partículas son tan pequeñas (del orden de nanómetros) que apenas contribuyen en su masa. La peligrosidad de las partículas en el ser humano es inversamente proporcional a su tamaño, por ello la OMS ha sugerido en su guía de buenas prácticas más reciente (Sept. 2021), contarlas y, en la medida de lo posible, clasificarlas por su tamaño.

HC: hidrocarburos totales, producto de la combustión incompleta o bien combustible que se transforman parcialmente. Se miden en fase gaseosa a una temperatura de 190°C. Sin embargo, no todos los hidrocarburos son volátiles a esa temperatura, por lo que no es conveniente hacer la equivalencia con los compuestos orgánicos volátiles (COV), que suelen ser de bajo peso molecular. No todos los COV son necesariamente hidrocarburos.

CO: monóxido de carbono, al igual que los THC suelen ser producirse en bajas concentraciones en los motores de encendido por compresión (ciclo diésel), debido a que estos motores operan con exceso de aire. Es un gas tóxico para el ser humano, por lo que la OMS recomienda concentraciones límites máximos de exposición a este gas.



**Tabla 1. 6. Factores de Emisión (g/km) medidos en ruta para categoría de vehículos pesados de carga y pasajeros en Bogotá y Barranquilla (FECOC+ Fase 2.2.)**

Categoría	Ciudad	PBV o pasajeros	Estándar de emisión	Prueba	R. Comb. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	PM [mg/km]	PN x 10 <sup>12</sup> [# /km]		
N3 (Tractocamiones C3S2)	Bogotá	26 - 28 ton	EPA 98	Prom.	6,4	1554,5	68,12	0,25	17,35	16,46	0,89	1543,6	177,4		
				D.Est.	0,6	170,1	5,35	0,02	1,68	1,55	0,20	--	10,0		
			Euro V (SCR)	Prom.	6,7	1303,0	7,28	0,19	6,62	6,45	0,30	48,2	195,4		
				D.Est.	0,7	208,8	2,24	0,09	1,42	1,46	0,20	10,3	31,1		
	Barranquilla		EPA 98	Prom.	11,25	1465,0	13,41	0,15	15,50	14,20	1,30	621,6	340,5		
				D.Est.	2,75	248,6	1,41	0,02	1,65	1,46	0,20	90,7	61,8		
			Euro V (SCR)	Prom.	10,68	1464,2	5,63	0,07	11,53	10,72	0,87	58,7	192,0		
				D.Est.	0,80	108,7	0,89	0,03	3,33	2,89	0,47	14,9	56,7		
N2 (Camiones grandes de dos ejes C2G)	Bogotá	14,7 ton	pre Euro	Prom.	9,06	1147,30	20,29	0,31	8,21	7,34	0,87	114,80	189,12		
				D.Est.	1,04	136,02	1,09	0,02	0,76	0,78	0,07	20,54	19,87		
		8 ton	Euro II	Prom.	11,03	861,31	7,72	n.d.	5,21	4,63	0,63	84,66	205,20		
				D.Est.	0,82	99,68	2,57	n.d.	0,66	0,62	0,09	8,26	10,32		
		14,6 ton	Euro IV	Prom.	9,42	1100,80	9,89	0,13	7,03	6,56	0,54	38,44	128,60		
				D.Est.	0,70	93,58	0,95	0,01	1,02	0,88	0,23	6,90	9,02		
		N2 (Camiones medianos de dos ejes C2M)	6 ton	Euro V	Prom.	13,18	712,24	n.d.	n.d.	4,86	4,81	0,05	30,88	89,50	
					D.Est.	0,38	20,91	n.d.	n.d.	0,36	0,38	0,03	9,20	8,75	
		N2 (Camión grande de dos ejes C2G)	Barranquilla	13	Euro II	Prom.	12,85	1127,89	4,31	0,17	8,05	6,97	1,08	72,60	217,81
						D.Est.	0,46	43,60	1,45	0,07	2,96	2,65	0,32	6,69	40,91
13,9	Euro IV			Prom.	15,62	961,25	7,69	0,14	9,16	8,35	0,81	28,88	110,15		
				D.Est.	1,37	59,28	2,12	0,08	1,43	0,78	0,77	3,57	6,08		

Notas:

**Categoría:** según Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022. **PBV:** Peso Bruto Vehicular, incluye el peso del vehículo más el de la carga. **R. Combust.:** rendimiento promedio de consumo de combustible en km/gal. **Prom.:** promedio. **D.Est.:** Desviación estándar.

Categoría	Ciudad	PBV o pasajeros	Estándar de emisión	Prueba	R. Comb. [km/gal]	CO2 [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]	NO [g/km]	NO2 [g/km]	PM [mg/km]	PN x 10 <sup>12</sup> [# /km]		
N2 (Camión de dos ejes pequeño C2P)	Bogotá	5 ton.	pre Euro	Prom.	20,36	460,33	4,96	0,22	4,99	4,38	0,62	103,29	105,33		
				D.Est.	1,68	42,36	2,25	0,00	0,90	0,89	0,05	19,20	8,80		
			Euro IV	Prom.	23,64	416,33	4,64	0,24	2,36	2,23	0,16	31,65	66,31		
				D.Est.	4,91	84,47	0,85	0,00	0,45	0,48	0,04	9,68	11,10		
	Barranquilla	5 ton.	pre Euro	Prom.	32,31	458,86	1,75	0,07	3,82	3,29	0,54	32,62	92,46		
				D.Est.	2,801	21,262	0,606	0,015	0,483	0,636	0,157	3,586	3,506		
			Euro IV	Prom.	33,84	428,84	1,28	0,05	1,99	1,61	0,38	9,42	41,82		
				D.Est.	1,43	14,94	0,27	0,01	0,22	0,24	0,03	0,94	3,38		
M2 (Autobuses urbanos)	Bogotá	20 pas.	pre Euro	Prom.	22,54	423,02	6,39	0,21	4,03	3,67	0,40	51,28	98,75		
				D.Est.	2,52	58,02	2,71	0,01	1,64	1,43	0,20	15,20	14,04		
			Euro IV	Prom.	20,92	490,48	4,81	0,27	2,74	2,53	0,20	39,23	78,68		
				D.Est.	1,42	53,48	1,34	0,01	0,28	0,34	0,13	10,45	11,79		
		38 pas.	Euro IV	Prom.	14,31	661,25	5,43	n.d.	4,99	4,94	0,07	18,72	69,69		
				D.Est.	1,28	74,27	0,76	n.d.	0,46	0,46	0,03	5,28	7,70		
			Barranquilla	20 pas.	pre Euro	Prom.	28,43	476,57	1,86	0,08	4,02	3,44	0,57	41,81	100,93
						D.Est.	3,93	31,76	0,61	0,01	0,47	0,57	0,13	9,39	4,93
	Euro IV	Prom.			32,35	451,16	1,17	0,05	2,11	1,73	0,38	9,58	43,08		
		D.Est.			1,88	27,05	0,37	0,01	0,20	0,23	0,04	0,98	4,24		
	38 pas.	Euro IV	Prom.	34,47	454,06	2,63	0,04	4,05	3,96	0,09	14,70	56,25			
			D.Est.	2,04	25,28	0,85	n.d.	0,21	0,19	0,02	1,53	5,27			

Notas:

**Categoría:** según Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022. **PBV:** Peso Bruto Vehicular, incluye el peso del vehículo más el de la carga. **R. Combust.:** rendimiento promedio de consumo de combustible en km/gal. **Prom.:** promedio. **D.Est.:** Desviación estándar.

## 6. Índices de emisión (g/kWh)

La resolución 0762 del 18 de julio de 2022 del Ministerio del ambiente y desarrollo sostenible de Colombia, estableció los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para fuentes móviles terrestres de carretera en prueba dinámica (parte III). De acuerdo con esta resolución, las emisiones de los vehículos pesados (subcategorías M2, M3, N2 y N3), se deben reportar como el promedio del flujo masico de contaminante emitido por el motor del vehículo en (g/h) por unidad de potencia mecánica generada por el motor (kW). Este valor se obtiene para el motor, más no para el vehículo, y lo deben cumplir las fuentes móviles terrestres nuevas que ingresen al país. En la Tabla 1.3 se presentan los valores límites requeridos por la Resolución 0762 para vehículos nuevos que ingresaran al país hasta el 31 de diciembre de 2022 y corresponden a la norma de emisiones Euro IV de Europa. A partir del 1° de enero de 2023 los límites fueron más restrictivos, y corresponden a la norma europea Euro VI.

Para diferenciar los factores de emisión, que se reportan en unidades de masa de contaminante por cada kilómetro recorrido (g/km), hemos llamado “índices de emisión” en g/kWh a los requeridos por la Rsl 0762. La diferencia entre el factor y el índice de emisión para vehículos pesados se resume en:

1. Los factores de emisión se usan como insumo para los inventarios de emisión y se determinan para vehículos (no motores) en uso en ciclos de conducción locales.
2. Los índices de emisión (g/kWh) son límites de emisión para motores (no vehículos) nuevos y deben cumplir con ciclos establecidos por ley (homologación).

Las razones por las que a los vehículos pesados nuevos no se les realizan pruebas de homologación como las establecidas en la Resolución 0762 de 2022, ni en las normas europeas (Euro XX), radica en:

1. Los vehículos pesados pueden usarse con vocaciones diferentes: transporte de carga o de pasajeros, usos muy diversos de los vehículos como por ejemplo en largas distancias o en distribución de paquetería urbana
2. Variabilidad enorme de la carga del vehículo según su actividad y distancia

Por lo anterior, y para evitar el uso de ciclos de conducción específicos por cada tipo de vehículo pesado según su vocación y/o distancia a recorrer, las autoridades ambientales en el ámbito internacional han decidido adoptar la medición en banco de prueba de motores.

Si bien carece de sentido práctico determinar los índices de emisión para los vehículos medidos, resulta conveniente reportarlos en este informe para tener un comparativo de qué tan lejos están los valores medidos frente a los reportados en la regulación colombiana. Para tal fin se ha desarrollado un modelo de cálculo a partir de la dinámica y las características propias de cada vehículo medido en este convenio que permite obtener de forma aproximada el índice de emisión a partir de las mediciones en ruta (**ANEXO 3**).

En la **Tabla 1.7** se presentan los límites máximos permisibles de emisión para vehículos pesados (subcategorías M2, M3, N2 y N3) con motor de encendido por compresión (Artículo 18, Capítulo IV).

**Tabla 1. 7.** Límites máximos permisibles de emisión para vehículos pesados. Tomado de la resolución 0762 de 2022 del Ministerio del ambiente y desarrollo sostenible de Colombia.

Subcategoría	CO		HC		HCNM		NOx		PM		Opacidad
	(g/kW-h)		(g/kW-h)		(g/kW-h)		(g/kW-h)		(g/kW-h)		(m <sup>-1</sup> )
	ESC	ETC	ESC	ETC*	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	ELR
M2 M3 N2 N3	1,5	4,0	0,46	—	—	0,55	3,5	3,5	0,02	0,03	0,5

\*El laboratorio que realice la prueba de emisiones podrá optar por medir HC bajo el ciclo ETC en lugar de medir HCNM. En este caso, el límite para HC es el mismo que se establece para HCNM.

En la **Tabla 1.8** se presentan los resultados de los índices de emisión en g/kWh para los vehículos medidos en este convenio.

**Tabla 1. 8.** Índices de emisión en g/kWh obtenidos para los vehículos evaluados en este convenio

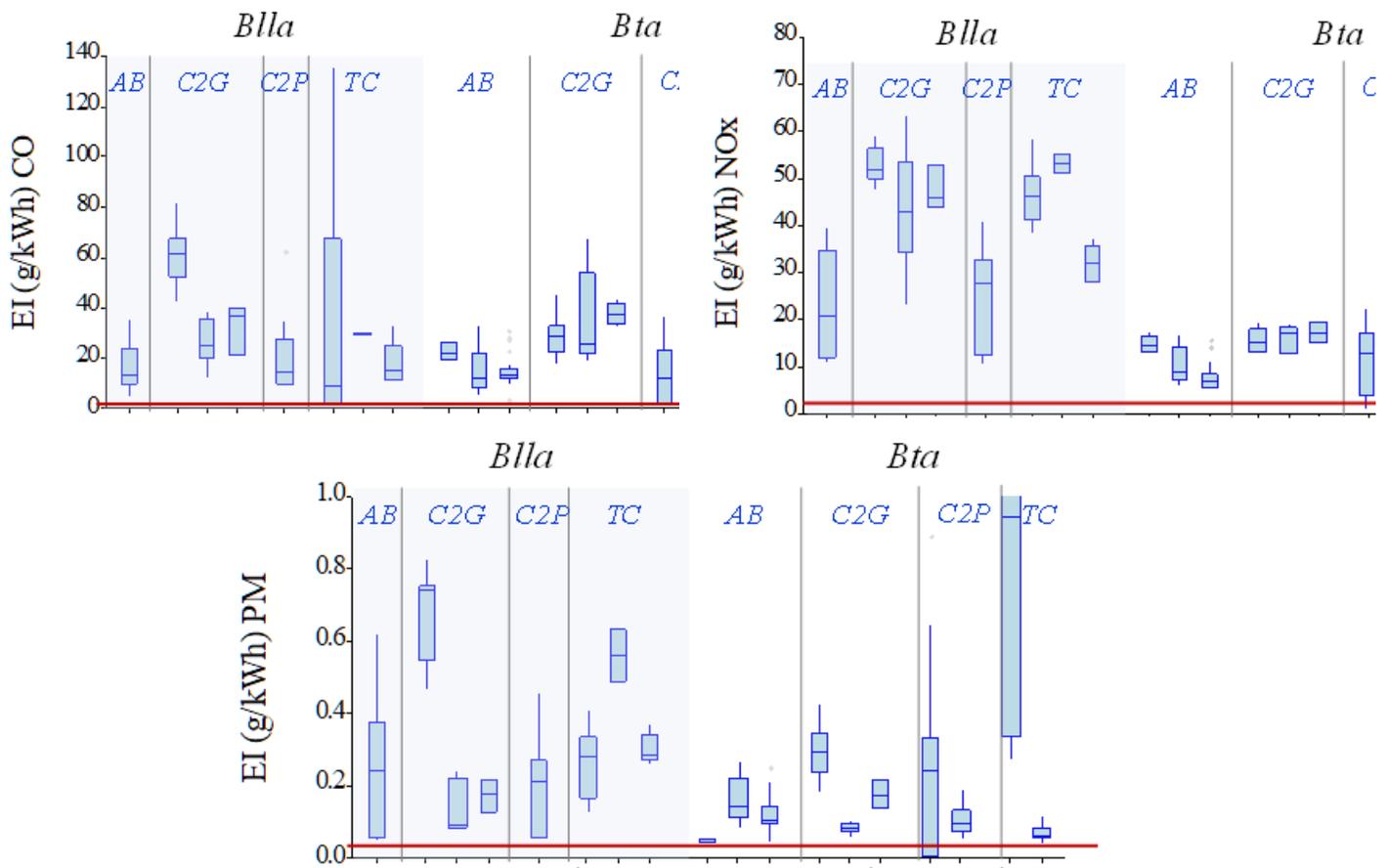
Categoría	Ciudad	n	CO g/kWh		NOx g/kWh		PM g/kWh	
			Prom.	desv st	Prom.	desv st	Prom.	desv st
N3 (TC)	Bqlla	5	17.25	8.90	31.6	4.06	0.30	0.04
		11	33.87	44.81	46.9	6.23	0.26	0.09
		5	29.03	15.90	52.9	29.00	0.56	0.31
	Bgtá	30	9.50	8.64	13.7	7.03	0.71	3.51
		9	48.36	21.96	15.8	4.57	0.76	0.49
N2 (C2G)	Bqlla	9	25.88	8.79	43.8	12.40	0.14	0.07
		8	60.46	11.76	52.6	3.83	0.68	0.13
		4	31.99	18.00	47.5	24.03	0.17	0.09
	Bgtá	10	35.59	17.94	16.2	2.59	0.08	0.01
		14	28.29	11.16	15.3	4.59	0.29	0.10
		4	37.23	4.42	17.0	2.37	0.17	0.04
N2 (C2P)	Bqlla	17	19.60	13.69	23.6	11.28	0.18	0.13
	Bgtá	7	10.97	7.45	11.1	6.04	0.10	0.04
		19	14.35	11.65	11.8	6.67	0.25	0.23
M2 (AB)	Bqlla	17	16.29	8.99	23.1	11.31	0.23	0.19
	Bgtá	6	22.06	3.10	14.5	1.85	0.05	0.00
		16	14.96	8.06	8.1	2.91	0.35	0.95
		13	14.52	9.26	10.0	4.66	0.16	0.07

**n:** número de pruebas realizadas, **Categorías** según Artículo 12 de la Resolución 0762 de 2022. **Notación** TC: Tractocamión, C2G: camión de dos ejes grande, C2P: camión de dos ejes pequeño, AB: Autobuses.

Como era de esperarse, los índices de emisión medidos en este trabajo (**Tabla 1.8**), son marcadamente diferentes a los exigidos por la Resolución 0762 de 2022: los valores de la resolución se exigen bajo ciclos de homologación para “motores nuevos”, mientras que los obtenidos en este convenio fueron calculados a partir de las mediciones en carretera bajo ciclos de conducción de vehículos usados.

**NOTA ACLARATORIA:** los factores de emisión determinados por la UPME y la Universidad de Antioquia en el convenio FECOC+ Fase 2.2 no pretenden, por consiguiente, dar respuesta al Artículo 5 de la Resolución 0762 del 18 de julio de 2022, en el cual se establece el Procedimiento para obtener el Certificado de Emisiones en Prueba Dinámica (CEPD) y Visto Bueno por Protocolo de Montreal. La prueba dinámica exigida en el Artículo 5, en el caso particular de vehículos pesados nuevos a ingresar al país, hace referencia a pruebas de homologación en banco de motores, cuyas emisiones se reportan en unidades de g/kWh bien sea bajo los ciclos definidos en el Anexo 1 de dicha resolución, a saber, ESC (Ciclo Europeo de Estado Continuo), ETC (Ciclo Europeo de Transición) y ciclo ELR (Prueba Europea de Respuesta bajo Carga).

A modo meramente ilustrativo, en la Figura 1.11 se presenta una comparación de los índices de emisión calculados en este convenio, frente a los exigidos por la Resolución 0762 (línea roja horizontal).



**Figura 1. 11 .** Índices de emisión (g/kWh) calculados a partir de pruebas en carretera en Bogotá y Barranquilla, siguiendo ciclo de conducción desarrollados en FECOC+ Fase 1.

## 7. Conclusiones Entregable No. 1

Según las condiciones experimentales y la metodología adoptada, de este convenio se puede concluir:

1. Se cuenta con los FE de gases ( $\text{CO}_2$ , HC,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , y CO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM y PN), medidos a bordo sobre 60 vehículos de categoría pesados, medianos y pequeños (tractocamiones, camiones de 2 ejes de 10 toneladas de capacidad de carga, camiones de 2 ejes menores a 5 toneladas de capacidad de carga y buses urbanos) más representativos y medidos a la altura de las ciudades de Bogotá (2600 msnm) y Barranquilla (0 msnm). Igualmente, se cuenta con la base de datos de consumo instantáneo y promedio de combustible. Se espera que estos resultados puedan ser usados para la actualización de los inventarios de emisiones nacionales y regionales.
2. A mejor tecnología de control de emisiones (vehículos más recientes), más bajas son sus emisiones contaminantes. Esto sugiere estimular políticas de renovación de flota en el sector de transporte de pasajeros y de carga. Paralelamente, y así como se comprobó en la anterior campaña experimental llevada a cabo en colaboración con Ecopetrol en el área metropolitana de Bucaramanga (FECOC+ Fase 2.1), en este proyecto se reconfirmó la importancia del uso de sistemas catalíticos selectivos —SCR— provistos en los motores Euro V. Con el SCR las emisiones de  $\text{NO}_x$  se reducen en torno al 50%.
3. La altitud sobre el nivel del mar no afectó significativamente el consumo de combustible de los vehículos pesados, ni tampoco afectó las emisiones de GEI ( $\text{CO}_2$ ). Sin embargo, sí afectó marcadamente los FE de CO, HC,  $\text{NO}_x$  y material particulado, los cuales incrementaron en Bogotá (2600 msnm) respecto a Barranquilla (0 msnm).
4. Se presentan los índices de emisión en g/kWh, los cuales fueron calculados a partir de las características de los vehículos y de los resultados de emisiones en carretera. Los índices de emisión son significativamente mayores a los exigidos en la resolución 0762 de 2022 para vehículos pesados nuevos bajo la modalidad de ciclos de conducción en prueba dinámica para homologación.
5. Las elevadas emisiones de  $\text{NO}_x$ , en particular su componente tóxico/cancerígeno al ser humano  $\text{NO}_2$ , sugieren la necesidad de incluir el uso de pruebas dinámicas para la revisión técnico-mecánica de vehículos en Colombia, tal como lo hacen Ciudad de México y Chile.

Para finalizar con la consolidación de los FE de toda la flota de vehículos de transporte carretero del país, queda por realizar la tercera y última fase de este proyecto: FECOC+ Fase 3, cuya finalidad es medir a bordo las emisiones de motocicletas, y vehículos livianos tanto a gasolina como diésel.

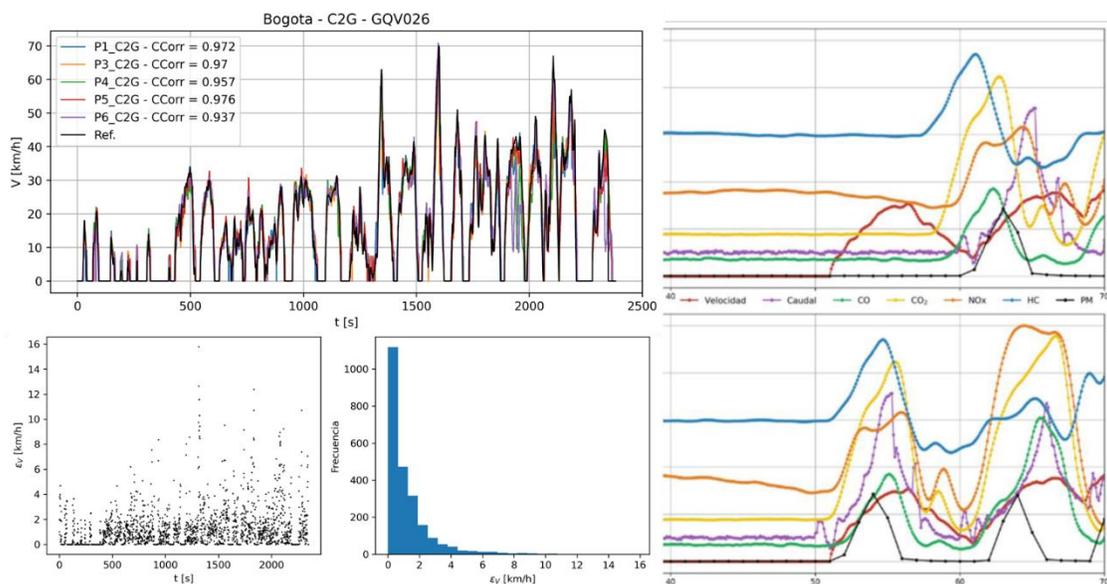
## 8. Referencias bibliográficas

- [1] D. Rodríguez Valbuena, *El medio ambiente y la salud humana*. Tunja: Editorial UPTC, 2015.
- [2] E. de Alba, “La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, en *Cambio Climático: una visión desde México*, 1a ed., J. Martínez y A. Fernández Bremauntz, Eds. México: Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004, pp. 143–155.
- [3] Naciones Unidas, “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”. 1922. Consultado: sep. 27, 2022. [En línea]. Available: [http://www.acnu.org.cu/sites/default/files/ficheros/convencion\\_marco\\_cambio\\_climatico.pdf](http://www.acnu.org.cu/sites/default/files/ficheros/convencion_marco_cambio_climatico.pdf)
- [4] D. H. Cuatecontzi y J. Gasca, “Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático”, en *Cambio Climático: una visión desde México*, J. Martínez y A. Fernández Bremauntz, Eds. México: Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004, pp. 87–98.
- [5] M. y E. A.-I.- Instituto de Hidrología, “Colombia. Primera Comunicación Nacional ante las Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, Bogotá, 2001.
- [6] Ministerio de Ambiente, “Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático”, *Cambio Climático*, oct. 04, 2022. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/comunicaciones-nacionales-de-cambio-climatico#> (consultado oct. 03, 2022).
- [7] G. Linares Fleites y M. A. Valera Pérez, “Origen y evolución de las Conferencias de las Partes (COP) sobre el cambio climático”, *RD-ICUAP*, vol. 8, núm. 22, pp. 28–41, 2022.
- [8] Á. Parra y K. Witkowski, “Comunicaciones, reportes y obligaciones nacionales”, Costa Rica, dic. 2018.
- [9] IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA, Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Bogotá D.C.: IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM, 2021.
- [10] Naciones Unidas, *La Agenda 30 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago: (LC/G.2681-P/Rev.3), 2018.
- [11] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [12] Naciones Unidas, “Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2022”, 2022.
- [13] Gobierno de Colombia, *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París*. Bogotá: MinAmbiente, DNP, Canillería, AFD, Expertise France, WRI, 2021.
- [14] IPCC, “Resumen para responsables de Políticas”, en *Calentamiento Global de 1,5 °C, informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto in*, M. T. y T. W. Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, Ed. 2018.
- [15] Grupo Consultivo de Expertos sobre las Comunicaciones Nacionales de las Partes no Incluidas en el Anexo I de la Convención, “Manual sobre el sector de la energía. Emisiones fugitivas”, 2012.

- [16] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia”, Bogotá, 2020.
- [17] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos de carga (camiones y tractocamiones) a la altura del área metropolitana de Bucaramanga”, Bogotá, 2021.
- [18] Grupo Manejo Eficiente de la Energía - GIMEL, “Informe final de convenio FECOC+ Fase 2,” 2020.
- [19] R. Smit, L. Ntziachristos, and P. Boulter, “Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis,” *Atmos. Environ.*, vol. 44, no. 25, pp. 2943–2953, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.022>.
- [20] IDEAM, “Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos.” <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/> (accessed Nov. 09, 2022).
- [21] US EPA, “MOVES2014 Technical Guidance: Using MOVES to Prepare Emission Inventories for State Implementation Plans and Transportation Conformity,” 2015.
- [22] L. Ntziachristos and Z. Samaras, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,” 2021.
- [23] Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, “Inventario de Emisiones de Bogotá, contaminantes atmosféricos,” Bogotá, 2020.
- [24] Mario Keller, Peter de Haan. *Handbuch emissionsfaktoren de Strassenverkehrs 2.1, Dokumentation.* Infrac. August 2004.
- [25] Asad Ali Shaikh, Tingkun He, Fanyuan Deng, Zhenyu Luo, Junchao Zhao, Zhining Zhang, Huan Liu. Altitude-dependent gaseous emissions from freight trucks along the China-Pakistan Economic Corridor in Pakistan. *Environmental Science and Ecotechnology*, 14 (2023). No. 100226
- [26] Vicente Franco, Francisco Posada Sánchez, John German, and Peter Mock. Real-world exhaust emissions from modern diesel cars: a meta-analysis of PEMS emissions data from EU (EURO 6) and us (tier 2 bin 5/ULEV ii) diesel passenger cars. ICCT, white paper, October 2014.

## ENTREGABLE No. 2

**Informe con los respectivos factores de emisión de monóxido de carbono (CO), Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos totales (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), material particulado (PM) y número de partículas (PN) para camiones (C2 grandes y C2 pequeños), buses de transporte urbano y tractocamiones, con una muestra total de 32 vehículos para dos altitudes, Bogotá (2600 metros sobre el nivel del mar) y Barranquilla (nivel del mar)**



Tratamiento de datos: Coeficientes de correlación y sincronización de señales. FECOC+ Fase 2.2

## Tabla de Contenido

1.	Base de datos de FE de vehículos pesados medidos en Bogotá y Barranquilla .....	43
1.1	Base de datos con FE de vehículos pesados N3 (Tractocamiones) en Bogotá.....	43
1.2	Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2G) en Bogotá .....	45
1.3	Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2P) en Bogotá .....	46
1.4	Base de datos con FE de vehículos pesados M2 (Buses) en Bogotá .....	47
1.5	Base de datos con FE de vehículos pesados N3 (Tractocamiones) en Barranquilla .....	48
1.6	Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2G) en Barranquilla.....	49
1.7	Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2P) en Barranquilla .....	50
1.8	Base de datos con FE de vehículos pesados M2 (Buses) en Barranquilla .....	51
2.	Comparación de los FE medidos vs IVE, MOVES y COPERT: caso Bogotá .....	52
2.1	Modelo IVE .....	53
2.2	Modelo MOVES.....	54
2.3	Modelo COPERT .....	55
3.	Resultados.....	56
3.1	Tractocamiones – TC (Categoría N3).....	56
3.2	Camiones grandes de dos ejes (10 ton) - C2G (categoría N2).....	58
3.3	Camiones pequeños de dos ejes (< 5 ton) - C2P (categoría N2) .....	60
3.4	Buses – B (Categoría M2).....	62
4.	Conclusiones .....	65

## Contenido de Figuras

<b>Figura 2. 1.</b> Datos originales medidos para uno de los vehículos en evaluación. ....	53
<b>Figura 2. 2.</b> Cálculos complementarios de aceleración, distancia acumulada y la pendiente de la carretera para uno de los buses (AB) en evaluación.....	54
<b>Figura 2. 3.</b> Ejemplos de datos cargados en MOVES Project Data Manager. a) Información del combustible, b) Distribución de edades, c) Información sobre el ciclo de conducción (velocidad, pendiente y tipo de carretera) y d) Condiciones ambientales.....	55
<b>Figura 2. 4.</b> FE de Tractocamiones. a) CO <sub>2</sub> , b) CO, c) NO <sub>x</sub> y d) PM <sub>2.5</sub> .....	57
<b>Figura 2. 5.</b> FE para la categoría C2G. a) CO <sub>2</sub> , b) CO, c) NO <sub>x</sub> y d) PM <sub>2.5</sub> .....	59
<b>Figura 2. 6.</b> FE para vehículos C2P. a) CO <sub>2</sub> , b) CO, c) NO <sub>x</sub> y d) PM <sub>2.5</sub> .....	61
<b>Figura 2. 7.</b> FE de buses. a) CO <sub>2</sub> , b) CO, c) NO <sub>x</sub> y d) PM <sub>2.5</sub> .....	62

## Contenido de Tablas

<b>Tabla 2. 1.</b> FE medidos y modelos con IVE, MOVES y COPERT para la categoría de vehículos pesados. ....	56
<b>Tabla 2. 2.</b> Desviación porcentual de los FE estimados frente a los medidos para tractocamiones en la ciudad de Bogotá. Símbolos: (-) indica subestimación, (+) sobreestimación.....	58
<b>Tabla 2. 3.</b> Desviación porcentual de los FE estimados frente a los medidos para camiones C2G (10 ton) en la ciudad de Bogotá. Símbolos: (-) indica subestimación, (+) sobreestimación.....	60
<b>Tabla 2. 4.</b> Comparación de resultados modelados de vehículos C2P respecto a datos medidos. ....	61
<b>Tabla 2. 5.</b> Comparación porcentual de FE estimados de buses de 2771 cc respecto a datos medidos. ....	63
<b>Tabla 2. 6.</b> Comparación porcentual de FE estimados para buses de 5123 y 5193 cc respecto a datos medidos. ....	63

## **1. Base de datos de FE de vehículos pesados medidos en Bogotá y Barranquilla**

### **1.1 Base de datos con FE de vehículos pesados N3 (Tractocamiones) en Bogotá**

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)	
Bogotá	EPA 98 (Euro II/III)		P1	5,7	1782,0	n.a.	n.a.	19,81	18,77	1,05	n.a.	n.a.	
			P3	6,1	1675,0			18,35	17,28	1,07			
			P4	7,0	1428,8			15,02	14,23	0,79			
			P6	6,7	1497,9			17,17	16,29	0,88			
			P7	6,1	1674,0			19,63	18,68	0,95			
			P8	6,9	1461,1			17,40	16,52	0,88			
			P10	7,0	1444,5			16,67	15,74	0,93			
			P1n	5,8	1733,4			0,331	18,53	17,45			1,07
			P3n	5,5	1819,7				19,63	18,40			1,23
			P4n	6,3	1426,8			0,254	15,47	14,48			1,00
	EPA 98 (Euro II/III)		P1	6,1	1612,9	n.a.	n.a.	16,64	16,06	0,59	1543,73	n.a.	
			P2	6,8	1255,8	67,08783		14,57	14,05	0,52			
			P6	5,9	n.a.	63,70253		17,29	16,59	0,69			
			P9	7,2	1349,4	74,12942		16,75	15,93	0,82			
	Euro V		P1	5,6	1301,3	8,564543	n.a.	7,69	6,87	n.a.	42,91	192,06	
			P2	7,5	n.a.	6,883039		6,12	5,97	0,16	37,52	169,73	
			P3	6,4	1210,9	8,206946		5,44	5,29	n.a.	42,68	179,48	
			P4	7,4	n.a.	5,090462		6,07	5,94	0,13	42,38	n.a.	
			P5	6,3	1229,9	5,958753		5,98	5,85	n.a.	39,06	168,93	
			P6	7,3	n.a.	4,418718		4,93	4,79		37,14	155,27	
			P1n	5,9	1612,8	15,70128		9,57	9,46	0,11	67,50	244,24	
			P2n	6,3	1350,2	8,114273		8,21	8,11	0,10	61,46	217,86	
			P3n	5,7	1627,7	11,43987		0,118	9,09	8,96	0,14	62,48	237,65
			P4n	6,6	1440,2	8,564753		0,252	8,36	8,23	n.a.	59,73	225,58
	Euro V		P1	6,2	1514,4	n.a.	n.a.	5,94	5,80	n.a.	53,13	230,00	
			P2	7,7	1216,3			5,31	4,86	0,45	38,81	157,13	
			P3	6,3	1487,5			6,96	6,45	0,52	57,53	225,28	
			P4	7,5	1244,7			6,16	5,64	n.a.	40,80	173,86	
			P5	6,6	1427,6			6,09	5,55	0,54	46,74	182,68	
			P6	7,6	1237,2			6,00	5,47	0,52	42,00	171,28	

### 1.2 Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2G) en Bogotá

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)	
Bogotá	Euro IV		P1	8,9	1107,9	10,64	n.a.	8,368	7,576	0,792	31,68	125,40	
			P3	9,5	1066,1	9,15		8,175	7,312	0,864	31,66	134,41	
			P4	10,6	n.a	8,99		6,166	5,493	0,672	39,15	129,54	
			P5	9,6	1020,7	10,76		7,254	6,581	n.a.	n.a.	119,03	
	Euro II		P2	11,8	730,8	9,69		4,571	3,920	0,651	n.a.	n.a.	
			P3	10,1	931,5	11,60		5,574	5,000	0,574	79,89	205,36	
			P4	11,9	797,5	9,83		4,611	4,046	0,565	101,52	185,29	
			P5	10,0	938,8	11,66		5,779	5,080	0,700	82,14	193,11	
	Euro II		P2	11,6	736,0	5,97		4,695	4,069	0,626	78,12	213,47	
			P3	10,6	909,7	5,95		5,758	5,131	n.a.	n.a.	213,42	
			P4	11,9	757,9	4,88		4,400	3,856	0,544	n.a.	215,76	
			P5	10,5	822,0	4,42		5,025	4,559	0,466	79,26	197,20	
			P6	10,3	1060,0	8,75		6,606	5,802	0,804	82,65	207,58	
			P7	11,7	854,5	6,67		5,158	4,497	0,662	n.a.	199,99	
			P8	10,0	947,2	8,03		5,996	5,307	0,689	89,10	207,88	
			P9	11,9	849,9	5,17		4,988	4,352	0,637	n.a.	218,31	
	Euro IV		P1n	8,7	1196,2	20,14		0,121	7,428	7,027	0,401	48,03	142,52
			P2n	10,1	n.a	18,60		n.a.	5,713	5,420	0,293	41,47	116,69
			P3n	8,5	1223,0	23,49		0,145	7,703	7,303	0,401	45,34	132,62
			P4n	9,4	990,9	21,21		0,137	6,101	5,758	0,343	31,82	n.a.

### 1.3 Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2P) en Bogotá

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)
Bogotá	preEuro		P2	18,2	495,6	2,53	n.a.	3,73	3,10	0,63	95,29	101,47
			P3	18,0	539,0	2,35		4,12	3,48	0,63	93,31	108,95
			P4	20,3	465,1	2,33		3,41	2,84	0,57	n.a.	93,77
	preEuro		P2	21,1	418,4	4,13	n.a.	5,58	4,92	0,66	126,68	116,89
			P3	21,2	398,6	7,00		5,70	5,00	0,70	n.a.	114,55
			P4	22,1	377,1	5,98		5,38	4,77	0,60	120,65	115,84
			P5	22,7	359,0	3,36		5,24	4,71	0,53	n.a.	n.a.
			P1n	19,8	460,6	7,34	0,221	5,51	4,89	0,62	121,86	99,87
			P2n	18,4	509,7	7,99	0,218	6,03	5,47	0,56	83,89	98,49
			P3n	21,6	434,7	6,65	n.a.	5,25	4,56	0,69	81,37	98,16
	Euro IV		P1	27,3	339,2	3,43		2,23	2,04	0,18	19,06	54,40
			P2	30,8	293,6	3,86	1,78	1,56	0,23	20,64	55,91	
			P3	27,2	336,1	4,19	2,06	1,85	0,21	25,84	55,08	
			P4	31,8	277,6	4,20	1,66	1,47	0,19	25,03	61,64	
	Euro IV		P3	19,4	487,9	6,10	n.a.	2,79	2,67	0,12	n.a.	60,88
			P5	19,0	501,1	4,48		2,89	2,76	0,13	45,64	63,84
			P6	23,1	435,6	5,26		2,40	2,28	n.a.	38,21	76,60
			P7	19,8	481,2	5,05		2,76	2,62	0,14	n.a.	68,79
			P8	23,3	412,1	5,36		2,25	2,11	n.a.	30,46	64,65
			P1n	20,3	454,7	n.a.	0,244	2,41	2,27	0,13	37,45	89,68
			P2n	18,0	532,1		n.a.	3,00	2,87	0,14	42,55	78,04

### 1.4 Base de datos con FE de vehículos pesados M2 (Buses) en Bogotá

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)	
Bogotá	preEuro		P1	22,2	423,1	4,58	n.a.	5,29	4,80	0,49	65,78	109,01	
			P2	26,0	361,4	3,40		4,32	3,82	0,50	39,46	99,11	
			P3	23,2	404,0	n.a.		4,74	4,31	0,44	48,31	103,29	
			P4	25,7	365,4	3,89		4,52	3,98	0,55	37,47	99,96	
			P1n	18,7	501,3	9,40	0,209	6,23	5,71	0,52	n.a.	115,99	
			P2n	19,5	480,7	8,95	0,257	5,13	4,57	0,56	73,24	108,12	
			P3n	19,7	475,8	8,70	0,283	5,82	5,20	0,62	72,23	112,43	
	preEuro		P2	24,6	381,9	n.a.	n.a.	2,83	2,21	n.a.	n.a.	78,28	
			P3	21,4	437,6			2,15	2,05	0,10	42,12	80,85	
			P4	24,6	380,9			n.a.	n.a.	0,12	34,33	n.a.	
			P5	22,3	420,1			2,11	1,98	0,12	48,62	80,47	
	Euro IV		P1	19,1	510,5	5,17	n.a.	n.a.	2,93	2,54	0,39	n.a.	n.a.
			P3	21,0	473,5	6,75			2,57	2,17	0,40		
			P4	23,2	435,4	5,91			2,37	2,04	0,33	30,12	68,52
			P5	20,8	494,8	4,53			2,67	2,32	0,35	28,40	77,39
	Euro IV		P2	21,1	456,8	5,02	n.a.	n.a.	2,63	2,54	0,09	n.a.	n.a.
			P3	20,1	511,4	3,51			2,84	2,75	0,09	39,96	63,91
			P4	21,5	413,4	2,94			2,32	2,19	0,13	n.a.	n.a.
			P6	22,5	439,8	5,41			2,60	2,49	0,12	28,62	66,86
			P1n	n.a.	581,4	12,54	0,256	3,09	2,97	0,11	n.a.	97,74	
			P2n	18,9	509,3	11,66	0,275	2,86	2,76	0,10	51,54	91,00	
			P3n	n.a.	569,0	11,53	n.a.	3,24	3,09	0,15	43,72	84,84	

### 1.5 Base de datos con FE de vehículos pesados N3 (Tractocamiones) en Barranquilla

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)	
Barranquilla	Euro V		P1	6,3	1520,4	n.a.	n.a.	13,84	12,57	1,27	n.a.	153,64	
			P2	7,1	1342,1		0,042	14,79	13,84	0,95	49,14	132,76	
			P3	6,7	1437,3		0,071	14,63	13,23	1,40	50,38	138,35	
			P4	7,2	1321,1		0,060	14,20	13,26	0,94	40,96	136,96	
			P5	6,5	1465,5		0,119	15,71	14,11	1,60	40,07	135,23	
	EPA 98 (Euro II/III)			P1	6,2	1540,6	11,87	0,133	14,33	13,17	1,16	719,14	384,50
				P2	5,7	1675,5	14,88	0,158	14,56	13,42	1,14	759,99	391,09
				P3	6,5	1475,0	12,50	0,104	13,73	12,58	1,15	649,26	352,85
				P4	5,7	1679,3	14,06	n.a.	14,81	13,62	1,19	573,39	417,87
				P6	5,8	1646,9	11,60	0,161	14,41	13,29	1,12	n.a.	368,99
	Euro V Mack,			P1	7,1	1342,5	n.a.	n.a.	7,43	7,03	0,40	n.a.	242,61
				P2	5,9	1631,8	6,76	0,067	8,90	8,48	0,42	74,51	244,50
				P3	6,6	1448,6	5,61	n.a.	8,04	7,76	n.a.	70,16	239,45
				P4	6,3	1526,4	5,59		8,85	8,47	0,38	72,71	257,26
				P5	6,0	1606,0	4,65	0,058	8,94	8,42	0,52	71,41	243,30
	EPA 98 (Euro II/III)			P1	8,3	1151,8	15,35	0,165	18,07	16,52	1,55	549,44	279,62
				P2	8,8	1086,2	14,30	0,162	17,66	16,13	1,53	582,48	268,24
				P3	9,7	987,4	12,74	0,172	16,40	14,88	1,53	517,30	261,65

### 1.6 Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2G) en Barranquilla

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)
Barranquilla	Euro V		P1	9,8	980,3	8,82	n.a.	8,04	7,82	0,23	n.a.	n.a.
			P2	9,8	976,3	7,12		8,70	8,53	0,17	35,37	107,63
			P3	11,0	871,5	4,51	0,053	7,12	6,94	0,17	30,97	110,15
			P4	10,4	921,5	5,25	0,068	8,49	8,30	0,18	28,39	108,20
	Euro IV		P1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8,49	n.a.	n.a.	28,01	114,74
			P2	9,3	1029,3	9,57	0,156	10,79	9,19	1,60	23,77	99,70
			P4	9,3	1029,0	8,64	0,211	10,71	9,15	1,56	27,22	117,00
			P5	10,4	920,9	9,92	0,236	10,25	8,50	1,75	28,62	115,47
	pre Euro		P1	8,8	1088,2	4,33	n.a.	10,13	8,93	1,19	74,94	188,10
			P2	9,0	1061,2	2,17	0,113	10,20	8,78	1,42	70,80	181,58
			P3	8,1	1180,9	2,84	0,083	11,68	10,33	1,35	69,82	184,32
			P4	8,7	1095,6	3,98	n.a.	11,111	9,594	1,518	61,83	190,33
	P5	8,2	1161,6	6,19	5,521	4,795		0,726	n.a.	n.a.		
	Euro II		P6	8,2	1171,4	5,07	0,246	5,376	4,478	0,897	81,33	276,09
			P7	8,6	1118,6	5,59	0,202	5,163	4,427	0,737	69,78	243,27
			P8	8,4	1145,6	n.a.	0,218	5,239	4,416	0,823	79,82	261,50

### 1.7 Base de datos con FE de vehículos pesados N2 (C2P) en Barranquilla

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)	
Barranquilla	preEuro		P1	20,4	469,8	1,19	0,060	3,52	2,84	0,68	31,97	93,48	
			P2	21,5	446,2	1,09	0,094	3,34	2,65	0,69	30,18	93,23	
			P3	22,6	424,4	1,54	n.a.	3,36	2,73	0,63	36,67	90,61	
			P4	21,5	444,5	n.a.		3,55	2,89	0,65	27,23	92,53	
	Euro IV		P1	22,5	425,9	1,66	0,056	1,83	1,44	0,39	n.a.	43,43	
			P2	23,3	411,6	1,62		1,83	1,43	0,41	9,21	38,29	
			P3	23,0	416,9	1,06		0,059	1,77	1,36	0,40	11,29	48,54
			P4	23,3	410,5	1,11		0,057	1,76	1,34	0,42	9,27	40,72
	Euro IV		P1	21,5	445,9	1,08	0,044	2,21	1,88	0,33	8,97	41,17	
			P2	21,5	446,1	1,14	0,054	2,29	1,92	0,37	8,75	39,30	
			P3	22,2	431,3	1,07	0,058	2,06	1,70	0,36	n.a.	n.a.	
			P4	21,6	442,4	1,54	0,047	2,19	1,81	0,38	9,02	41,31	
	preEuro		P1	20,6	465,7	2,45	n.a.	4,30	3,95	0,35	n.a.	99,27	
			P2	19,8	484,3	2,34	0,063	4,32	3,97	0,35	33,68	89,15	
			P4	20,1	477,2	2,03	0,070	4,37	3,96	0,41	35,99	89,14	

### 1.8 Base de datos con FE de vehículos pesados M2 (Buses) en Barranquilla

Ciudad	Tipo	Placa	ID Prueba	Rend_comb (km/gal)	CO2 (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	NO (g/km)	NO2 (g/km)	PM (mg/km)	PN (billones/km)
Barranquilla	Euro IV		P1	21,7	440,6	3,01	n.a.	3,95	3,88	0,07	12,58	49,73
			P2	19,8	484,3	3,81	0,038	4,06	3,96	0,09	16,74	63,71
			P3	22,0	434,3	2,57	n.a.	3,84	3,77	0,06	14,81	55,43
			P4	20,0	478,7	2,22		4,40	4,29	0,11	15,19	58,50
			P5	22,1	432,5	1,55		3,99	3,91	0,08	14,37	54,74
	preEuro		P1	19,7	484,9	1,35	0,105	3,79	3,02	0,78	n.a.	n.a.
			P3	18,6	513,6	1,72	0,075	3,73	3,06	0,67		103,98
			P4	21,4	448,2	0,98	0,082	3,45	2,82	0,64	30,00	98,11
			P5	21,4	447,3	1,31	0,082	3,56	2,88	0,68	27,46	100,29
	Euro IV		P1	20,7	462,2	1,46	0,061	1,99	1,56	0,42	n.a.	n.a.
			P2	21,4	446,5	1,50	n.a.	1,94	1,52	0,42	9,04	42,41
			P3	22,3	429,5	1,59	0,060	1,88	1,46	0,42	8,70	40,75
			P4	24,2	395,4	1,14	0,056	1,92	1,53	0,40	8,22	37,13
	Euro IV		P1	20,0	478,6	n.a.	n.a.	2,29	1,97	0,32	11,00	n.a.
			P2	20,5	467,7	0,61	0,039	2,25	1,91	0,34	10,31	44,22
			P3	20,7	462,5	1,10	0,043	2,29	1,95	0,34	10,11	45,41
			P4	20,5	466,8	0,79	0,039	2,35	1,97	0,38	9,70	41,09
	Euro IV		P1	18,7	511,7	2,43	0,072	4,47	4,01	0,45	42,16	95,82
			P2	21,4	447,5	2,57	0,059	3,95	3,55	0,39	48,58	98,21
			P3	18,8	510,3	2,23	0,074	4,64	4,12	0,52	49,05	110,58
P4			21,3	449,2	2,36	n.a.	4,56	4,09	0,47	45,01	99,73	

## 2. Comparación de los FE medidos vs IVE, MOVES y COPERT: caso Bogotá

Debido a la dificultad para medir los FE de los contaminantes criterio para el parque automotor de las ciudades, se han desarrollado varios modelos que permiten estimar estos FE para diversos tipos de vehículos. En el presente apartado realizamos una comparación entre los FE obtenidos a partir de los modelos IVE, MOVES y COPERT con los medidos en carretera para vehículos de carga y de pasajeros en la ciudad de Bogotá. Se presenta una descripción de las consideraciones involucradas en cada modelo, así como la estimación del porcentaje de diferencia para los FE de CO<sub>2</sub>, CO, NOx y PM<sub>2.5</sub>.

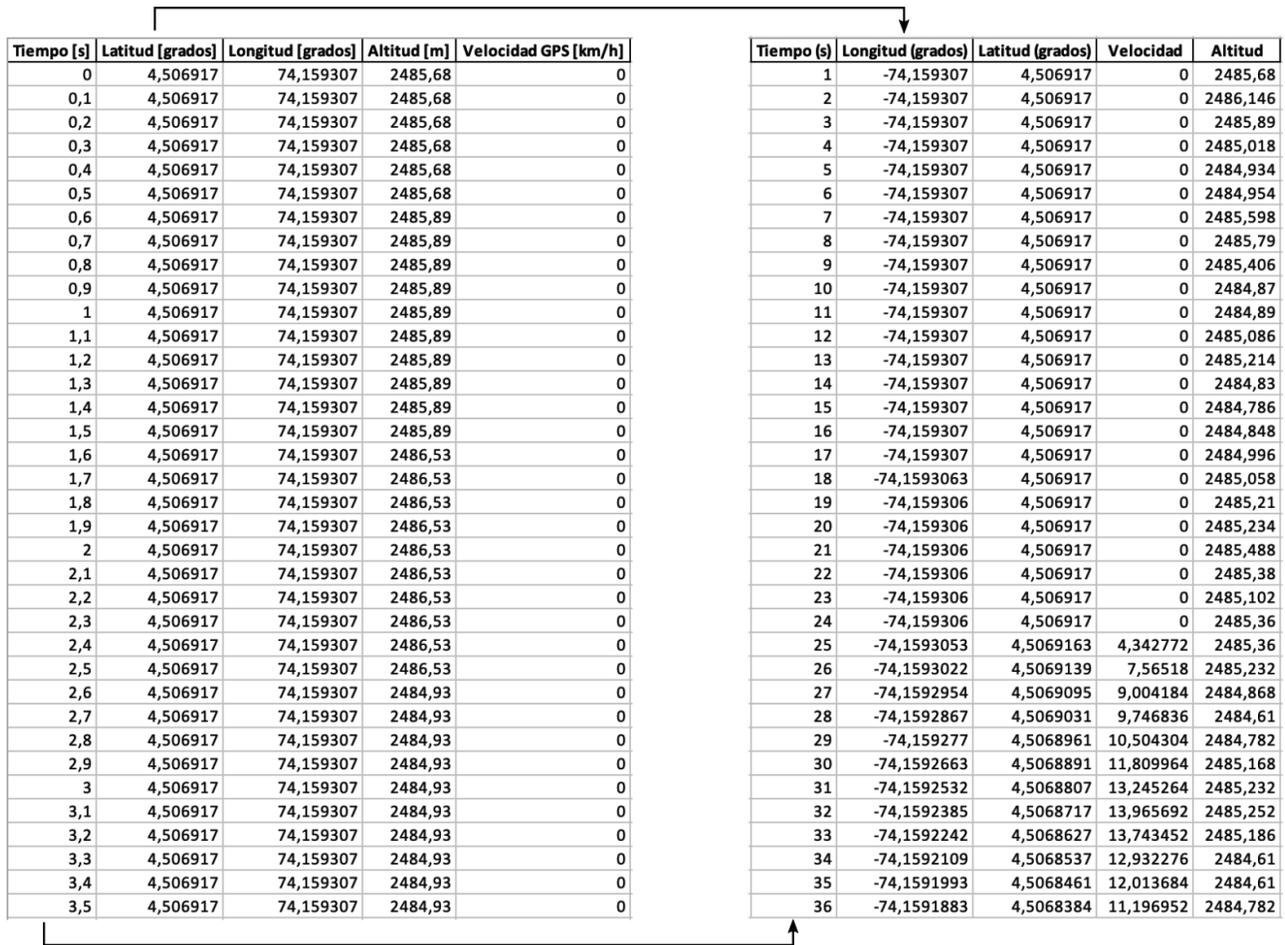
Se encontró que, el FE que mejor logran reproducir los tres modelos es el de CO<sub>2</sub>, presentando un error que varió entre 5% y 55% frente a las mediciones en carretera para la categoría de vehículos pesados. La predicción de los FE empeoró sustancialmente, independientemente del modelo utilizado para los otros contaminantes criterio. En el caso específico del PM<sub>2.5</sub> y los NOx los errores llegaron a superar el orden de magnitud (10x), por lo que se concluye que, mientras sea posible, resulta más conveniente determinar los FE con mediciones a bordo en lugar de usar modelos de estimación, tal como lo recomienda el IPCC.

Realizar estimaciones de las emisiones generadas por el parque automotor no es trivial dada la cantidad de variables que afectan las concentraciones de los gases de combustión y de material particulado liberados al ambiente. El tipo de tecnología del motor, la calidad de combustible utilizado, la topografía, las condiciones climatológicas, la altura de medición, la temperatura, el ciclo de conducción, etc., son algunas de estas variables que dan cuenta de la complejidad de estos modelos de cálculo. La manera adecuada para obtener estos FE consiste en realizar mediciones localmente de los gases emitidos, utilizando un sistema de medición de emisiones portátil (PEMS) conectado *in-situ* a lo largo de un ciclo de conducción. Tener acceso a este tipo de evaluaciones, aunque deseable, no siempre es posible, y requiere de una inversión considerable por parte de los gobiernos locales, por lo que en muchas ocasiones se simplifica el proceso mediante la estimación de los FE utilizando diversos modelos computacionales de cálculo. Dentro de los modelos más utilizados se destacan: el *International Vehicle Emission Model* (IVE), desarrollado por el Centro internacional de investigación de sistemas sostenibles (ISSRC), el modelo *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), desarrollado por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y el modelo *Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport* (COPERT), desarrollado por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA).

Cada modelo presenta ciertos beneficios y desventajas respecto a los otros, pero, en general, todos se encuentran condicionados por supuestos y parámetros de corrección que no siempre logran establecer el cumplimiento de las realidades de las diferentes regiones a nivel mundial. Debido a esto se pueden obtener diferencias significativas en el resultado final de la estimación de los FE, y por ende de los inventarios de emisión, por lo que es recomendable realizar una comparación entre datos reales medidos a bordo de los vehículos con los simulados en los modelos.

## 2.1 Modelo IVE

El modelo IVE requiere la alimentación de 60 *bines* o segmentos que simulan la distribución que presenta el ciclo de conducción del vehículo a partir de la potencia específica vehicular (VSP) y el estrés del motor. Debido a esto, los datos de entrada utilizados corresponden al ciclo de conducción de cada vehículo, esto es, la información de velocidad y la ubicación real (longitud y latitud), como se muestra en la **Figura 2. 1**. Estos datos tuvieron un primer procesamiento de corrección en donde se multiplicó por (-1) la latitud, para dar la coordenada adecuada y además de esto se estableció un paso de tiempo de un segundo para suavizar el cálculo de parámetros posteriores para cada vehículo. A partir de estos datos de entrada se determinó: la aceleración, la distancia recorrida, la altitud y la pendiente de la carretera como se observa en la **Figura 2. 2** (los datos mostrados empiezan desde la fila 35 para evitar mostrar los ceros asociados al vehículo antes de iniciar su movimiento).



Tiempo [s]	Latitud [grados]	Longitud [grados]	Altitud [m]	Velocidad GPS [km/h]
0	4,506917	74,159307	2485,68	0
0,1	4,506917	74,159307	2485,68	0
0,2	4,506917	74,159307	2485,68	0
0,3	4,506917	74,159307	2485,68	0
0,4	4,506917	74,159307	2485,68	0
0,5	4,506917	74,159307	2485,68	0
0,6	4,506917	74,159307	2485,89	0
0,7	4,506917	74,159307	2485,89	0
0,8	4,506917	74,159307	2485,89	0
0,9	4,506917	74,159307	2485,89	0
1	4,506917	74,159307	2485,89	0
1,1	4,506917	74,159307	2485,89	0
1,2	4,506917	74,159307	2485,89	0
1,3	4,506917	74,159307	2485,89	0
1,4	4,506917	74,159307	2485,89	0
1,5	4,506917	74,159307	2485,89	0
1,6	4,506917	74,159307	2486,53	0
1,7	4,506917	74,159307	2486,53	0
1,8	4,506917	74,159307	2486,53	0
1,9	4,506917	74,159307	2486,53	0
2	4,506917	74,159307	2486,53	0
2,1	4,506917	74,159307	2486,53	0
2,2	4,506917	74,159307	2486,53	0
2,3	4,506917	74,159307	2486,53	0
2,4	4,506917	74,159307	2486,53	0
2,5	4,506917	74,159307	2486,53	0
2,6	4,506917	74,159307	2484,93	0
2,7	4,506917	74,159307	2484,93	0
2,8	4,506917	74,159307	2484,93	0
2,9	4,506917	74,159307	2484,93	0
3	4,506917	74,159307	2484,93	0
3,1	4,506917	74,159307	2484,93	0
3,2	4,506917	74,159307	2484,93	0
3,3	4,506917	74,159307	2484,93	0
3,4	4,506917	74,159307	2484,93	0
3,5	4,506917	74,159307	2484,93	0

Tiempo (s)	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Velocidad	Altitud
1	-74,159307	4,506917	0	2485,68
2	-74,159307	4,506917	0	2486,146
3	-74,159307	4,506917	0	2485,89
4	-74,159307	4,506917	0	2485,018
5	-74,159307	4,506917	0	2484,934
6	-74,159307	4,506917	0	2484,954
7	-74,159307	4,506917	0	2485,598
8	-74,159307	4,506917	0	2485,79
9	-74,159307	4,506917	0	2485,406
10	-74,159307	4,506917	0	2484,87
11	-74,159307	4,506917	0	2484,89
12	-74,159307	4,506917	0	2485,086
13	-74,159307	4,506917	0	2485,214
14	-74,159307	4,506917	0	2484,83
15	-74,159307	4,506917	0	2484,786
16	-74,159307	4,506917	0	2484,848
17	-74,159307	4,506917	0	2484,996
18	-74,1593063	4,506917	0	2485,058
19	-74,159306	4,506917	0	2485,21
20	-74,159306	4,506917	0	2485,234
21	-74,159306	4,506917	0	2485,488
22	-74,159306	4,506917	0	2485,38
23	-74,159306	4,506917	0	2485,102
24	-74,159306	4,506917	0	2485,36
25	-74,1593053	4,5069163	4,342772	2485,36
26	-74,1593022	4,5069139	7,56518	2485,232
27	-74,1592954	4,5069095	9,004184	2484,868
28	-74,1592867	4,5069031	9,746836	2484,61
29	-74,159277	4,5068961	10,504304	2484,782
30	-74,1592663	4,5068891	11,809964	2485,168
31	-74,1592532	4,5068807	13,245264	2485,232
32	-74,1592385	4,5068717	13,965692	2485,252
33	-74,1592242	4,5068627	13,743452	2485,186
34	-74,1592109	4,5068537	12,932276	2484,61
35	-74,1591993	4,5068461	12,013684	2484,61
36	-74,1591883	4,5068384	11,196952	2484,782

Figura 2. 1. Datos originales medidos para uno de los vehículos en evaluación.

7 Modelo aplicado: International Vehicle Emissions Model (IVE)													
8													
9 Serie de datos Velocidad vs tiempo							Cálculos complementarios						
10	DeviceName	No. de viaje	Accum Time	Longitud	Latitud	Speed [km/h]	Speed [m/s]	Accel [m/s <sup>2</sup> ]	Accel suav [m/s <sup>2</sup> ]	Dist [m]	Accum dist [km]	Altitude [masl]	Road grade [rad]
35	AB	1	24	-74,1605	4,5077	0,00	0,00	0,00	1,31	0,00	0,00	2499,63	0,00
36	AB	1	25	-74,1605	4,5077	8,33	2,31	2,31	1,57	2,31	0,00	2499,63	0,00
37	AB	1	26	-74,1605	4,5077	9,98	2,77	0,46	0,36	2,77	0,01	2500,8	0,00
38	AB	1	27	-74,1605	4,5077	12,04	3,34	0,57	0,62	3,34	0,01	2500,38	0,00
39	AB	1	28	-74,1605	4,5077	14,15	3,93	0,59	0,44	3,93	0,01	2500,06	0,00
40	AB	1	29	-74,1605	4,5077	15,08	4,19	0,26	0,16	4,19	0,02	2500,48	0,00
41	AB	1	30	-74,1604	4,5077	15,46	4,30	0,11	0,11	4,30	0,02	2499,84	0,02
42	AB	1	31	-74,1604	4,5077	15,83	4,40	0,10	0,02	4,40	0,03	2500,38	0,02
43	AB	1	32	-74,1604	4,5077	15,43	4,29	-0,11	-0,29	4,29	0,03	2500,27	0,02
44	AB	1	33	-74,1604	4,5077	13,87	3,85	-0,43	-0,45	3,85	0,03	2500,27	0,02
45	AB	1	34	-74,1604	4,5076	12,37	3,44	-0,42	-0,41	3,44	0,04	2500,27	0,02
46	AB	1	35	-74,1604	4,5076	11,00	3,06	-0,38	-0,29	3,06	0,04	2500,06	0,02
47	AB	1	36	-74,1603	4,5076	10,33	2,87	-0,19	-0,13	2,87	0,04	2499,84	0,02
48	AB	1	37	-74,1603	4,5076	9,98	2,77	-0,10	-0,05	2,77	0,05	2500,48	0,02
49	AB	1	38	-74,1603	4,5076	9,65	2,68	-0,09	-0,19	2,68	0,05	2500,16	0,02
50	AB	1	39	-74,1603	4,5076	7,65	2,12	-0,56	-1,56	2,12	0,05	2500,27	0,02
51	AB	1	40	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	-2,12	-1,19	0,00	0,05	2496,43	0,02
52	AB	1	41	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,05	2496,01	0,02
53	AB	1	42	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	2495,47	0,02
54	AB	1	43	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	2496,43	0,02
55	AB	1	44	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	2496,01	0,02

Figura 2. 2. Cálculos complementarios de aceleración, distancia acumulada y la pendiente de la carretera para uno de los buses (AB) en evaluación.

Una vez el ciclo de conducción y sus parámetros característicos estuvieron listos para ingresarlo al modelo, fue necesario determinar la flota vehicular (tecnología, tipo de vehículo, sistema de inyección, kilometraje, condiciones de arranque y peso), un factor importante para los resultados obtenidos, ya que, si se seleccionaban tecnologías similares, pero con leves diferencias, el modelo tendía a realizar estimaciones con diferencias significativas, sobreestimando aún más los FE.

Para definir las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá, se tomaron datos promedio reportados por el IDEAM [20] de la temperatura en seco durante el día de evaluación y la humedad relativa. Los parámetros sobre la composición del combustible utilizado fueron proporcionados por el grupo de investigación GIMEL. De esta forma, el modelo proveía la estimación de los FE de CO<sub>2</sub>, CO, VOC, VOC<sub>Evap</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, y PM.

## 2.2 Modelo MOVES

MOVES requiere definir su escala de simulación dentro de tres opciones que presenta, lo cual, dependiendo de la región evaluada por el usuario, puede ser útil o no, ya que el modelo se desarrolló específicamente con las rutas, condiciones ambientales, tipo de combustible y tecnologías que se presentan dentro de los *Estados Unidos de América*. En el caso de la evaluación realizada dentro de este trabajo, se seleccionó el modo “proyecto”, para así tener mayor control de los parámetros simulados, estableciendo nuestras rutas evaluadas, el tipo de flota vehicular, las condiciones ambientales y geográficas de **Bogotá** y también las características propias de la carretera donde se realizó la campaña experimental.

Dentro del modo *proyecto* en MOVES, se pueden caracterizar mejor las condiciones de evaluación mediante la modificación de la base de datos de entrada del modelo, la cual fue creada dentro del

“MOVES Project Data Manager” mediante el ingreso de los diferentes datos solicitados para la modelación, tales como:

- *Fuel*: se indica la composición del combustible específico utilizado. (**Figura 2. 3a**)
- *Age distribution*: distribución de años de antigüedad de los vehículos (**Figura 2. 3b**)
- *Links*: se especificó la velocidad promedio, pendiente promedio y longitud total de las vías o tramos considerados dentro del proyecto.
- *Link Drives Schedules*: se alimenta con la información de varias condiciones como Tramos y Vías, mediante la longitud del tramo, la velocidad y la pendiente promedio a lo largo de la vía definida. Ciclo de conducción por tramo, proporcionado con la información de velocidad y pendiente a lo largo de la vía segundo a segundo. (**Figura 2. 3c**)
- *Link Source Type*: tipo de vehículo en cada tramo.
- *Off-Network*: información del vehículo por fuera de la vía, es decir, se indica la fracción de tiempo correspondiente al arranque, a inactividad y parqueo del vehículo
- *Meteorology Data*: temperatura ambiente y humedad relativa de la zona. (**Figura 2. 3d**)

a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	fuelFormul	fuelSubtyp	RVP	sulfurLevel	ETOHVolu	MTBEVolu	ETBEVolu	TAMEVolu	aromaticC	olefinConte	benzeneC	e200	e300	BioDieselE	Cetanelndi	PAHConte	T50	T90
2	20	20	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	25005	21	0	15	0	0	0	0	27,5	5,3	0	0	0	10	50	10	573	680

b)

	A	B	C	D
1	sourceTyp	yearID	ageID	ageFraction
2	32	2022	0	0
3	32	2022	1	0
4	32	2022	2	0
5	32	2022	3	0
6	32	2022	4	0
7	32	2022	5	0
8	32	2022	6	0
9	32	2022	7	0
10	32	2022	8	0
11	32	2022	9	0
12	32	2022	10	0
13	32	2022	11	0
14	32	2022	12	0
15	32	2022	13	0
16	32	2022	14	0
17	32	2022	15	0
18	32	2022	16	1

c)

	A	B	C	D
1	linkID	secondID	speed	grade
29	5	28	2,914144	0
30	5	29	6,358804	0
31	5	30	8,014566	0
32	5	31	9,498092	0
33	5	32	11,08496	0
34	5	33	11,31231	0
35	5	34	10,32483	0
36	5	35	8,41645	0
37	5	36	6,66194	0
38	5	37	5,947734	0
39	5	38	5,660674	0
40	5	39	5,30472	0
41	5	40	2,057587	0

d)

	A	B	C	D	E
1	monthID	zoneID	hourID	temperatur	relHumidity
2	7	480150	22	55,4	84

**Figura 2. 3.** Ejemplos de datos cargados en MOVES Project Data Manager. a) Información del combustible, b) Distribución de edades, c) Información sobre el ciclo de conducción (velocidad, pendiente y tipo de carretera) y d) Condiciones ambientales.

### 2.3 Modelo COPERT

Los requisitos del modelo COPERT son más simplificados que los modelos anteriores, ya que no es necesario introducir el ciclo de conducción del vehículo, y los valores de entrada son, en general, valores promedio de las condiciones a las que se llevaron a cabo las mediciones. El *software* exigió además del año de evaluación, la siguiente información:

- *Environmental Information*: datos de temperatura ambiente y humedad relativa de la zona.
- *Stock Configuration*: las características de la flota a partir de la categorización realizada por la *European Environmental Agency* en su libro guía y de los combustibles.

- *Trip Characteristics*: corresponde a kilómetros recorridos en el trayecto y su duración para el vehículo en evaluación.
- *Stock and Activity Data*: número de vehículos a evaluar, su respectivo kilometraje y el promedio de actividad en kilómetros del vehículo.
- *Circulation Activity*: información de los tipos de vía/carretera por los cuales se hace la estimación y la velocidad promedio en el trayecto.

Los datos obtenidos en la medición permitieron establecer los valores de entrada del modelo. La información de las temperaturas y humedades relativas fueron tomados del IDEAM, usando la misma metodología empleada en los modelos IVE y MOVES.

### 3. Resultados

La **Tabla 2. 1** presenta los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> para la categoría de vehículos pesados (Tractocamiones -TC-, camiones de dos ejes grandes < 10 toneladas -C2G-, camiones de dos ejes pequeños < 5 toneladas -C2P- y buses -B-), tanto medidos como simulados para la ciudad de Bogotá.

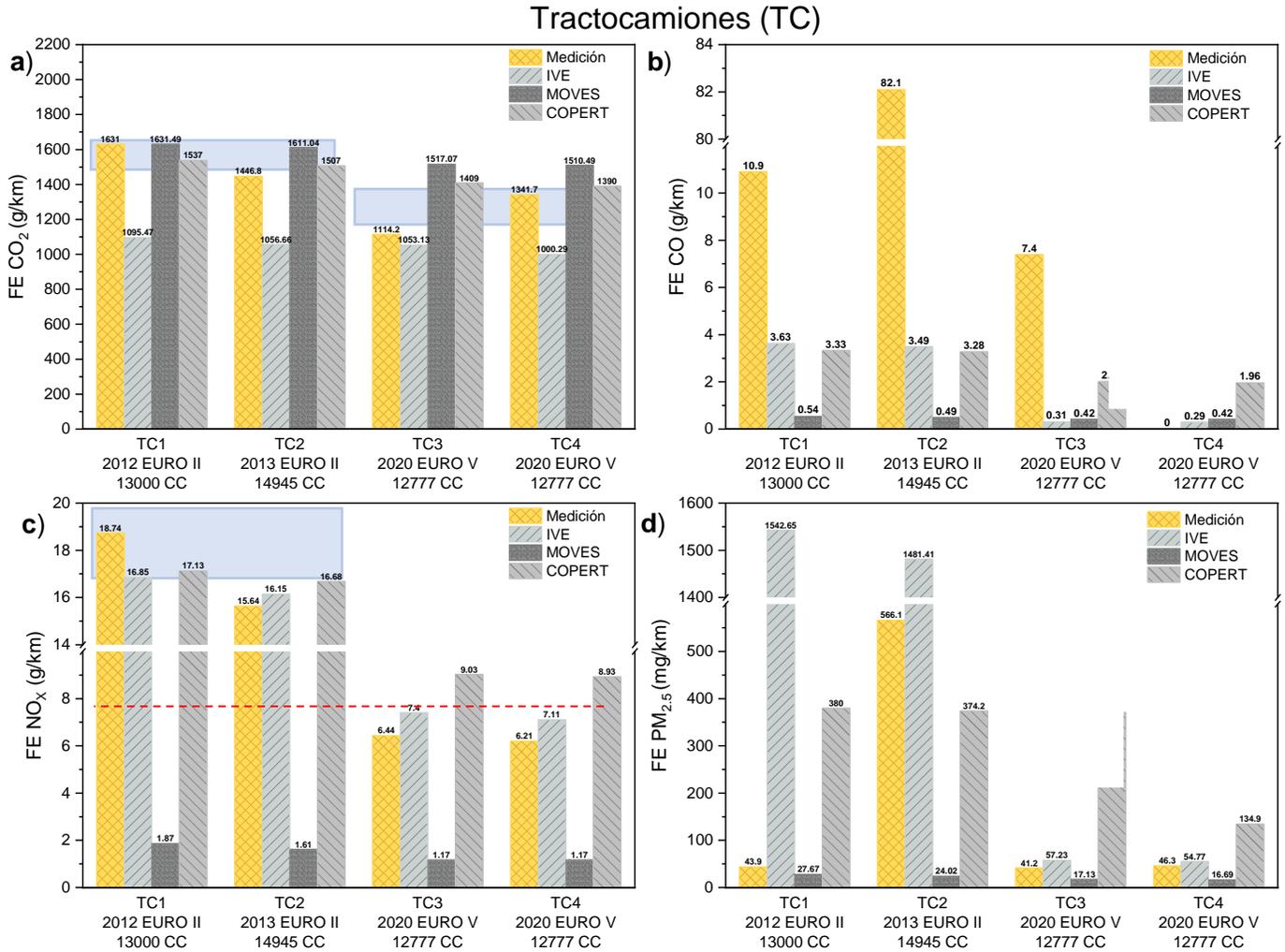
**Tabla 2. 1.** FE medidos y modelos con IVE, MOVES y COPERT para la categoría de vehículos pesados.

Clasificación	Estándar emisiones	Cilindrada	CO <sub>2</sub>				CO				NO <sub>x</sub>				PM <sub>2.5</sub>			
			Medido	IVE	MOVES	COPERT	Medido	IVE	MOVES	COPERT	Medido	IVE	MOVES	COPERT	Medido	IVE	MOVES	COPERT
TC	EPA 98	13000	1.631,0	1.095,5	1.631,5	1.536,8	10,9	3,63	0,54	3,33	18,74	16,85	1,87	17,13	43,9	1.542,65	27,67	380,0
	EPA 98	14945	1.446,8	1.056,7	1.611,0	1.506,9	82,1	3,49	0,49	3,28	15,64	16,15	1,61	16,68	566,1	1.481,41	24,03	374,2
	EURO V	12777	1.114,2	1.053,1	1.517,1	1.409,0	7,4	0,31	0,42	2,01	6,44	7,40	1,17	9,03	41,2	57,23	17,13	371,1
	EURO V	12777	1.341,7	1.000,3	1.510,5	1.390,3	nd.	0,30	0,42	1,96	6,21	7,11	1,17	8,93	46,3	54,77	16,69	134,9
C2G	Euro II	7790	887,3	538,3	1.285,8	793,2	11,0	1,59	0,48	1,70	5,31	7,30	1,45	8,39	87,7	189,40	15,51	229,1
	Euro II	7790	955,8	532,2	1.273,3	800,7	7,8	1,29	0,48	1,70	5,88	6,57	1,43	8,46	80,9	472,96	15,42	230,1
	Euro IV	7790	998,4	625,7	1.171,0	695,7	9,6	0,16	0,39	1,02	7,28	3,69	0,75	4,11	34,2	226,82	9,00	90,9
C2P	Euro II	2771	398,1	475,2	728,7	454,7	5,7	0,63	4,20	0,96	5,58	2,01	2,24	4,89	103,8	125,63	222,59	142,4
	Euro II	2771	500,0	535,9	638,2	458,6	n.d.	0,71	1,82	0,97	3,70	2,26	1,20	4,96	80,5	140,83	13,43	143,1
	Euro IV	2771	323,1	481,7	471,2	418,2	3,8	0,11	0,32	0,62	2,01	1,27	0,16	2,46	21,9	23,74	7,03	75,9
	Euro IV	2771	458,4	472,3	461,5	415,4	5,1	0,10	0,31	0,61	2,65	1,24	0,16	2,43	38,1	23,19	6,81	75,7
B	Euro II	2771	326,3	488,7	770,8	444,9	4,0	0,65	4,38	0,93	4,69	2,06	2,32	4,72	38,4	129,03	234,38	140,7
	Euro II	2771	405,4	522,0	797,4	454,7	n.d.	0,69	4,60	0,96	2,12	2,20	2,41	4,89	41,7	136,99	244,03	142,4
	Euro IV	2771	463,2	508,1	523,4	427,4	6,0	0,11	0,35	0,66	2,56	1,35	0,18	2,57	37,8	25,13	7,68	76,6
	Euro IV	2771	470,0	497,8	510,3	425,3	4,6	0,11	0,34	0,65	2,70	1,33	0,17	2,55	28,5	24,71	7,29	76,4
	Euro IV	5193	645,9	571,3	501,4	718,0	5,9	0,11	0,34	1,07	4,69	1,34	0,16	4,26	15,7	24,71	7,27	92,1
	Euro V	5123	703,2	558,9	498,1	716,5	n.d.	0,14	0,33	1,53	5,23	1,98	0,17	6,61	27,4	10,32	7,29	55,0

#### 3.1 Tractocamiones – TC (Categoría N3)

La **Figura 2. 4** muestra los resultados comparativos de los diferentes FE en cuestión para las tractomulas medidas en este proyecto. Para el caso del FE de CO<sub>2</sub>, la franja azul tenue en posición horizontal en la **Figura 2. 4a**, muestra los rangos de CO<sub>2</sub> mínimo y máximo medidos para cada tecnología de emisiones (Euro II en la izquierda, y Euro V en la derecha). Los resultados indican que el modelo **IVE subestima** en

torno al 30% el FE de CO<sub>2</sub> para tractocamiones de tecnología Euro II (o su equivalente EPA 98), mientras que los modelos MOVES y COPERT caen dentro de la franja de los valores medidos. En los tractocamiones de nueva tecnología Euro V, nuevamente el IVE subestima el CO<sub>2</sub> en torno al 13%, mientras que el MOVES y COPERT sobreestiman este FE (< 10% en promedio).



**Figura 2. 4.** FE de Tractocamiones. a) CO<sub>2</sub>, b) CO, c) NO<sub>x</sub> y d) PM<sub>2.5</sub>.

Los tres modelos subestimaron drásticamente el FE de CO (Figura 2. 4b). El valor de CO tan elevado del TC2 (14.945 cc de cilindrada) no es un dato espurio, ya que estos FE corresponden al valor medio de la repetición de al menos 4 ciclos de conducción. El CO, junto con el FE de PM<sub>2.5</sub> mostraron que este tractocamión, no obstante cumplir con los requerimientos de la revisión técnico-mecánica, necesitaba mantenimiento, acción que fue tomada por la empresa una vez conocidos los resultados de estas mediciones. Esta situación es bastante común en Colombia, evento que ya fue detectado por Ecopetrol y el grupo ejecutor de la Universidad de Antioquia en las mediciones de FE llevadas a cabo en el Valle de Aburrá entre febrero y junio de 2019. Estos vehículos fueron denominados **grandes contaminadores**. Obsérvese que, no obstante tener una emisión de CO<sub>2</sub> dentro de los rangos normales, **sus elevadas emisiones de CO y PM<sub>2.5</sub>** permitieron tomar la decisión de intervenirlos para hacerle mantenimiento. Este

resultado pone en evidencia la importancia de realizar pruebas dinámicas para el control de emisiones en las revisiones técnico-mecánicas del país.

La **Figura 2. 4c** muestra que los modelos IVE y COPERT estiman adecuadamente los FE de NOx para tractocamiones antiguos (Euro II/EPA98), sin embargo, el modelo **MOVES subestima en 10 veces (10x)** este FE. Como se mostró arriba, el MOVES está concebido para las tecnologías de vehículos propios de Estados Unidos, además de que las condiciones de conducción, geográficas, estado de vías, la elevada altitud de Bogotá, influyen notablemente sobre esta emisión. De los tres modelos, **el IVE es el que más se acerca de los tres modelos para predecir NOx**, independiente de la tecnología del tractocamión. Otro hallazgo interesante fue que el uso SCR, que implica la inyección de úrea automotriz en el sistema de escape, logra reducir en torno a 50% las emisiones de NOx. Las tractomulas ensayadas en este proyecto en promedio recorrieron 7 km/gal de diésel, mientras que recorrían 165 km/gal de úrea automotriz.

Finalmente, se puede observar que, en el caso del FE de PM<sub>2.5</sub> (**Figura 2. 4d**) ninguno de los tres modelos predijo adecuadamente los FE para los dos tractocamiones Euro II/EPA98. Si consideramos únicamente el tractocamión TC1, y no el TC2, que demostró necesitar mantenimiento, **El IVE produjo una sobre estimación de 35 veces (35x) frente al valor FE de PM<sub>2.5</sub> medido**. Las estimaciones para los tractocamiones Euro V se mantuvieron en un rango de sobre estimación entre 20 y 40% para IVE. Estos resultados sugieren que **ninguno de los tres modelos es adecuado para estimar el FE de PM<sub>2.5</sub> para tractocamiones en la altitud de Bogotá** (ver comparativos en la **Tabla 2. 2**).

**Tabla 2. 2.** Desviación porcentual de los FE estimados frente a los medidos para tractocamiones en la ciudad de Bogotá. Símbolos: (-) indica subestimación, (+) sobreestimación.

FE	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro V	Euro II	Euro V	Euro II	Euro V
CO <sub>2</sub>	- 30	- 15.5	+ 5.7	+ 27.4	± 5	+ 15
CO	- 81	- 96	- 97	- 94	- 82.7	- 72.8
NO <sub>x</sub>	± 6.6	+ 14.7	- 90	- 81.5	± 7.6	+ 42
PM <sub>2.5</sub>	+ 35x	+ 1.3x	- 37	- 28.6	+ 8.6x	+ 6x

### 3.2 Camiones grandes de dos ejes (10 ton) - C2G (categoría N2)

Los FE para la categoría de camiones C2G (10 toneladas de capacidad de carga) se presentan en la **Figura 2. 5**. Los resultados muestran, en el caso del FE de CO<sub>2</sub> (**Figura 2. 5a**), que el modelo IVE y el COPERT **subestimaron** en promedio 40 y 13%, respectivamente, este FE en comparación con los datos medidos, mientras que MOVES los **sobreestimó entre 28 y 45%**, esto último debido a que, para la estimación de estos camiones grandes en MOVES, se utilizó la categoría “*Single Unit Short haul*”, que comprende vehículos entre 8 y 15 toneladas de peso bruto vehicular, mientras que los vehículos medidos tenían un peso aproximado de 10 toneladas.

### Camiones Grandes de dos Ejes (C2G)

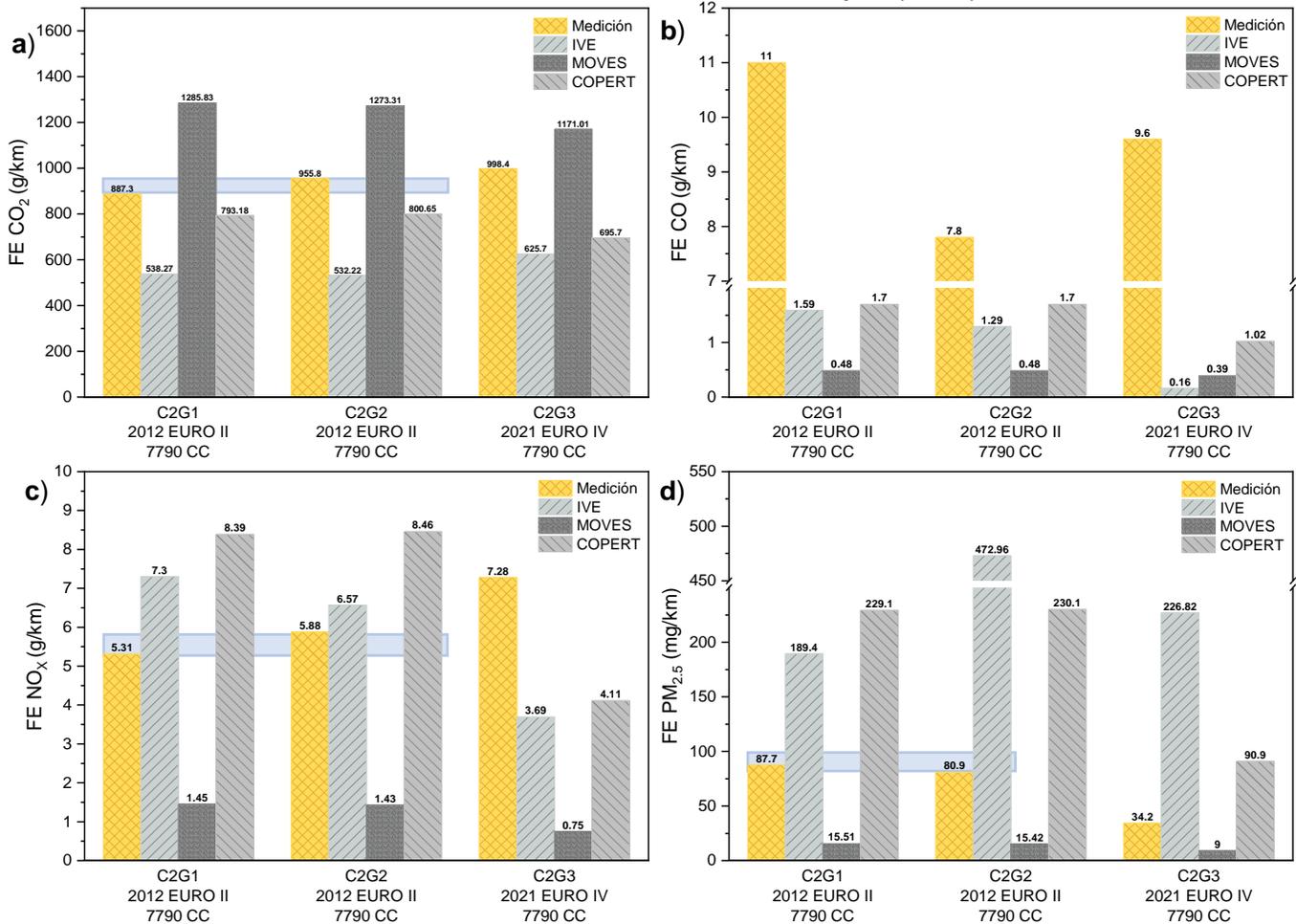


Figura 2. 5. FE para la categoría C2G. a) CO<sub>2</sub>, b) CO, c) NO<sub>x</sub> y d) PM<sub>2.5</sub>.

En el caso del FE de CO (Figura 2. 5b), los tres modelos **subestimaron** significativamente las emisiones para este tipo de vehículos C2G, con una diferencia entre 81 y 95% frente a los valores medidos. El FE de NO<sub>x</sub> (Figura 2. 5c) medido en promedio fue de 5.6 g/km para camiones C2G Euro II. Valor que fue altamente subestimado (en torno a 4x) por el modelo MOVES (sugiere usar 1.4 g/km). El camión C2G3 Euro IV (modelo 2021) presentó emisiones atípicamente elevadas de CO y NO<sub>x</sub> (9.6 y 7.28 g/km, respectivamente), lo que sugiere que este vehículo probablemente tiene la electrónica descalibrada, lo que podría estar afectando la recirculación de gases de escape (EGR).

Finalmente, se puede observar que, en el caso del FE de PM<sub>2.5</sub> (Figura 2. 5d), los modelos IVE y COPERT **sobrestimaron** las emisiones de PM<sub>2.5</sub> entre 110% y 560% en los tres vehículos evaluados; caso contrario a los resultados del modelo MOVES, el cual arrojó valores inferiores a los obtenidos en carretera, con una diferencia de 70% en el caso de Euro IV y de 85% para los Euro II.

El resultado comparativo presentado en la (Tabla 2. 3) muestra la dificultad en la selección de un modelo único para obtener FE, y, además, pone en evidencia las marcadas diferencias en los resultados arrojados entre ellos para una misma categoría vehicular.

**Tabla 2. 3.** Desviación porcentual de los FE estimados frente a los medidos para camiones C2G (10 ton) en la ciudad de Bogotá. Símbolos: (-) indica subestimación, (+) sobreestimación.

Factor de Emisión	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV
CO <sub>2</sub>	- 42	- 37	+ 39	+ 17.3	- 13	- 30
CO	- 84.5	- 98	- 95	- 96	- 81	- 89
NO <sub>x</sub>	+ 24.5	- 49	- 74	- 89.7	+ 1.5x	- 43
PM <sub>2.5</sub>	+ 4x	+ 6.6x	- 81.6	- 74	+ 2.7x	+ 2.7x

### 3.3 Camiones pequeños de dos ejes (< 5 ton) - C2P (categoría N2)

En la **Figura 2. 6** se muestran los FE obtenidos para los camiones pequeños de dos ejes C2P (< 5 ton). El FE de CO<sub>2</sub> (**Figura 2. 6a**) calculado por los tres modelos fue superior al obtenido mediante mediciones en carretera para tres de los vehículos C2P evaluados. En este caso, a pesar de que los vehículos C2P3 y C2P4 tenían la misma tecnología y tamaño de motor, el valor medido en ruta del factor de CO<sub>2</sub> fue 40% inferior para C2P3 frente a C2P4. Era de esperarse que los FE de CO<sub>2</sub> calculados con los tres modelos fuera semejante. La diferencia entre los valores medidos en estos dos vehículos pudo deberse a factores adicionales de operación y mantenimiento de cada vehículo, o a diferencias en el grado de puesta a punto en la calibración de la electrónica, que no son tenidos en cuenta en las simulaciones.

En la **Figura 2. 6b** se muestra el FE de CO, el cual es subestimado por los tres modelos. El **IVE lo subestima en más del 95%** frente a los medidos. Con MOVES, la diferencia correspondió a 27% para el Euro II y más del 90% para vehículos Euro IV. Por su parte, en COPERT la desviación se encuentra por encima del 83%.

En la **Figura 2. 6c** se muestra el FE de NO<sub>x</sub>. Mientras que los modelos IVE y MOVES subestiman los FE frente a los valores medidos, se apreció que el modelo COPERT arrojó valores más cercanos a los medidos con una diferencia promedio cercana a  $\pm 23\%$ .

Como se aprecia en la **Figura 2. 6d**, los tres modelos sobreestimaron el FE de PM<sub>2.5</sub> en los camiones pequeños antiguos (Euro II). En el caso particular del MOVES, para las tecnologías Euro II, al pasar de 2006 a 2009 produce una reducción drástica en la estimación de este FE.

### Camiones Pequeños de dos Ejes (C2P)

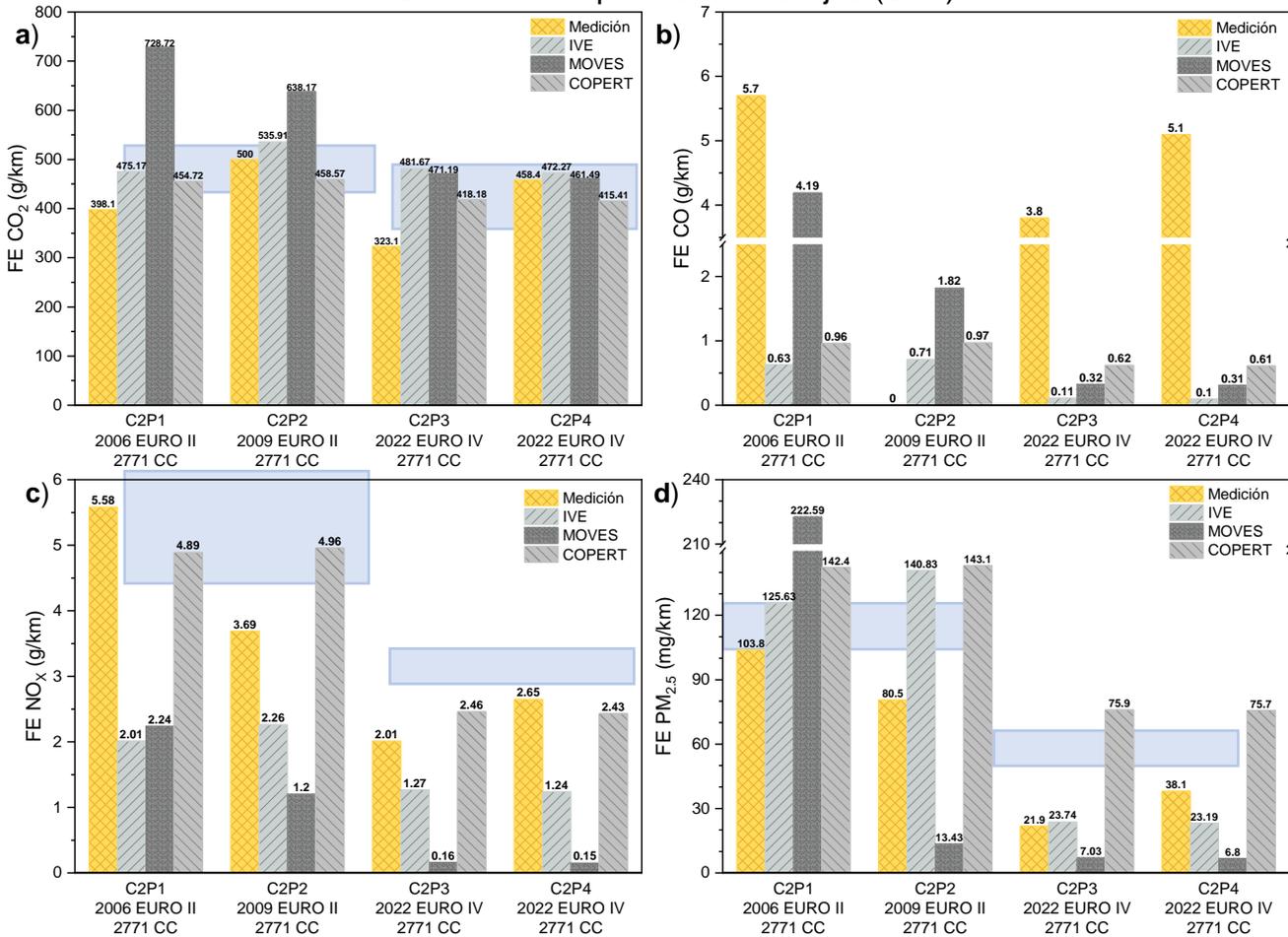


Figura 2. 6. FE para vehículos C2P. a) CO<sub>2</sub>, b) CO, c) NO<sub>x</sub> y d) PM<sub>2.5</sub>.

En la **Tabla 2. 4** se resumen las principales diferencias porcentuales de los FE estimados con los modelos, frente a los medidos para camiones C2 pequeños en la ciudad de Bogotá.

**Tabla 2. 4.** Comparación de resultados modelados de vehículos C2P respecto a datos medidos.

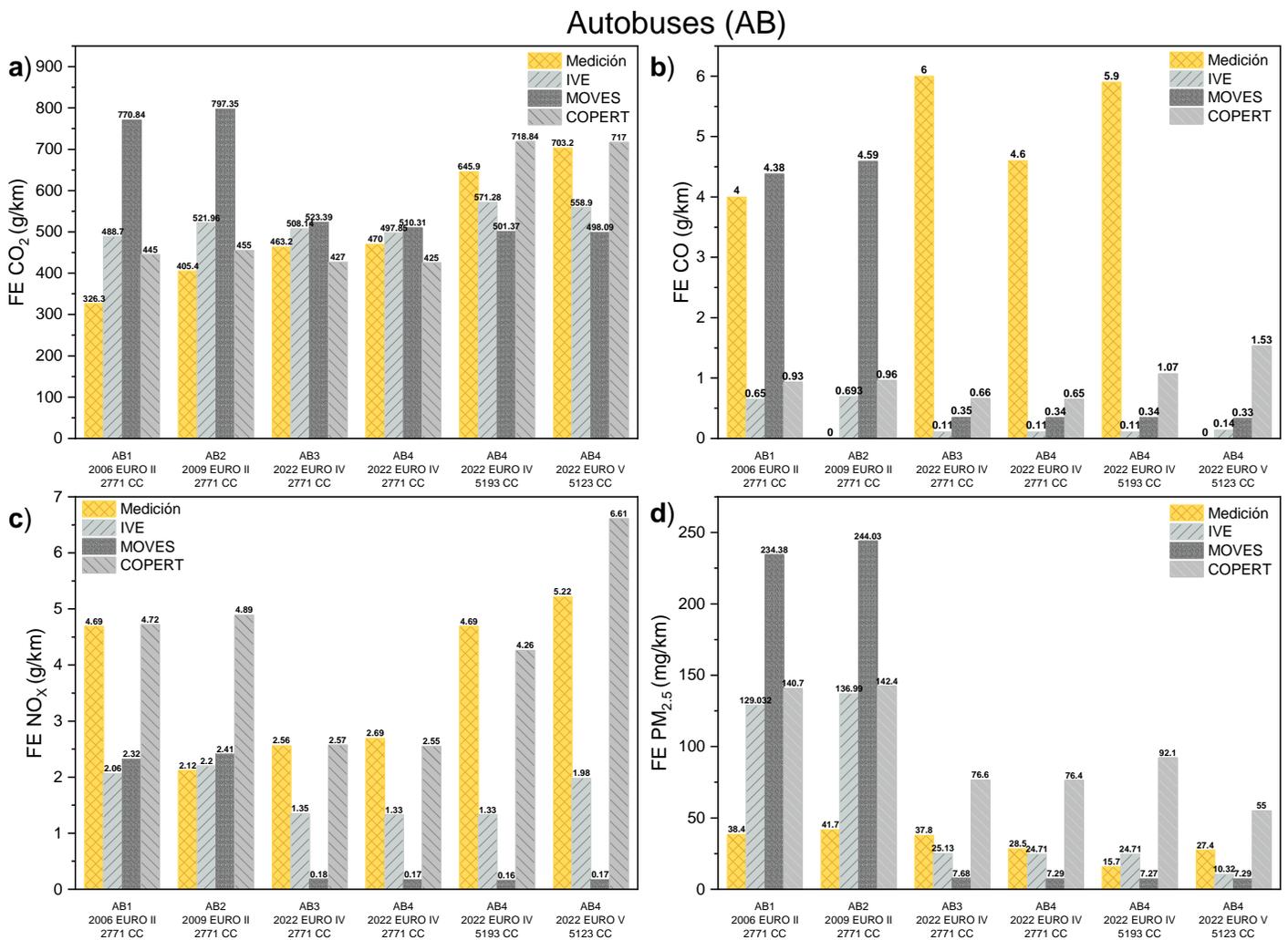
Factor de Emisión	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV
CO <sub>2</sub>	+ 13.3	+ 26	+ 55	+ 23	± 11.3	± 19.4
CO	- 89	- 97.6	- 26	- 92.7	- 83	- 85.9
NO <sub>x</sub>	- 51.5	- 45	- 63.6	- 96	± 23%	- 15.4
PM <sub>2.5</sub>	+ 1.5x	+ 23.8	+ 1.2x	- 75	+ 1.6x	+ 2.7x

Nota: + Sobreestimación, nx sobreestimación en n veces, - Subestimación.

### 3.4 Buses – B (Categoría M2)

En la **Figura 2. 7** se presentan los FE para la categoría de buses. Los resultados mostraron que, para el caso del FE de CO<sub>2</sub> (**Figura 2. 7a**), las estimaciones de los modelos IVE y MOVES fueron más cercanas a las mediciones para los autobuses Euro IV, arrojando diferencias de 9 y 13%, respectivamente, en comparación a los datos medidos. La diferencia en las estimaciones del FE de CO<sub>2</sub> incrementó para el bus Euro V, llegando a oscilar entre 20 y 30% para ambos modelos. El FE de CO para buses se muestra en la **Figura 2. 7b**. En términos generales, los tres modelos subestimaron significativamente el FE de CO para buses Euro IV.

El FE de NO<sub>x</sub> para buses se muestra en la **Figura 2. 7c**. La diferencia tan significativa entre los FE de NO<sub>x</sub> medidos de los dos vehículos Euro II puede obedecer a diferentes factores del estado de mantenimiento y operación de los autobuses, uno modelo 2006, el de más emisiones de NO<sub>x</sub>, y el otro modelo 2009.



**Figura 2. 7.** FE de buses. a) CO<sub>2</sub>, b) CO, c) NO<sub>x</sub> y d) PM<sub>2.5</sub>.

Es probable que el motor del bus AB1 (modelo 2006), tuviera el tiempo de inicio de inyección más adelantado que el bus AB2 (modelo 2009), lo que se puede corroborar en las menores emisiones de CO<sub>2</sub> del primero. Es sabido que el adelanto en la inyección del combustible genera mayores temperaturas promedio dentro de la cámara de combustión, lo que conlleva a obtener mayor eficiencia de combustión, es decir menos CO<sub>2</sub>, pero mayor emisión de NO<sub>x</sub>.

Tanto IVE como MOVES subestimaron los NO<sub>x</sub>. Una vez la tecnología cambia a Euro IV y Euro V, los modelos se distancian significativamente frente a los FE medidos, lo que sugiere que los modelos predicen una emisión entre 3 y 30 veces más baja que la medida en ruta, lo que puede estar asociado específicamente a consideraciones de tecnología dentro del modelo y no a los parámetros con los que se alimentaron ambos modelos.

En general, ninguno de los tres modelos logró estimar algún FE de PM<sub>2.5</sub> que se parecieran a los medidos en carretera para buses (**Figura 2. 7d**). Esto puede deberse, como se dijo anteriormente, a que el IVE reporta valores de PM<sub>2.5</sub> obtenidos con equipos antiguos (2008 a 2010), cuando no estaban completamente desarrollados los analizadores de PM para pruebas en ruta. Por su parte, los modelos MOVES y COPERT carecen de buenas aproximaciones al FE de PM para ciudades a grandes altitudes con vehículos con tecnologías antiguas. En las **Tabla 2. 5** y **Tabla 2. 6** se muestran las diferencias porcentuales de los FE estimados con cada modelo para las diferentes tecnologías de vehículos medidos.

**Tabla 2. 5.** Comparación porcentual de FE estimados de buses de 2771 cc respecto a datos medidos.

Factor de Emisión	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV
CO <sub>2</sub>	+ 39	+ 8	+ 2x	+ 10.8	+ 24	- 8.6
CO	- 83.8	- 97.8	+ 9.5	- 93	- 77	- 87
NO <sub>x</sub>	- 56	- 49	- 50.5	- 93	+ 0.6	± 3
PM <sub>2.5</sub>	+ 3.3x	- 23.4	+ 6x	- 77	+ 3.5x	+ 2.4x

**Tabla 2. 6.** Comparación porcentual de FE estimados para buses de 5123 y 5193 cc respecto a datos medidos.

Factor de Emisión	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro IV	Euro V	Euro IV	Euro V	Euro IV	Euro V
CO <sub>2</sub>	- 11.6	- 20.5	- 22.4	- 29.2	+ 11.2	+ 1.9
CO	- 98	<i>n.d.</i>	- 94.3	<i>n.d.</i>	- 81.8	<i>n.d.</i>
NO <sub>x</sub>	- 71.5	- 62	- 96.5	- 96.8	- 9	+ 26
PM <sub>2.5</sub>	+ 57.4	- 62.3	- 53.7	- 73.4	+ 6x	+ 2x

*\*n.d.: no disponible*

En resumen, reiterando el llamado que hace el IPCC de cara a la obtención de los FE, lo más recomendable es medirlos localmente mientras sea posible. Las diferencias entre los FE medidos y los estimados con los modelos IVE, MOVES y COPERT fueron significativas, especialmente para los gases CO, NO<sub>x</sub> y para el material particulado.

Estas diferencias tan marcadas entre los valores medidos y los estimados pueden deberse, entre otros, a factores tales como:

1. La última versión del modelo IVE fue lanzada en 2010, momento para el cual no se contaba con equipos de medición de emisiones portátiles (PEMS) suficientemente precisos para la medición de  $PM_{2.5}$  en vehículos.
2. Las tecnologías de vehículos superiores a 2010 no alcanzaron a ser tenidas en cuenta en la base de datos de cálculo del modelo IVE.
3. Por su parte, en el MOVES fue difícil ingresar la tecnología adecuada de control de emisiones Euro II, Euro IV y Euro V, ya que este modelo fue desarrollado para tecnología de control de emisiones EPA.
4. La base de datos de vehículos del MOVES corresponde a los típicos del mercado de Estados Unidos de América, los cuales son marcadamente diferentes a las tecnologías más representativas del país, donde las ventas las lideran los vehículos europeos y japoneses.
5. El modelo COPERT, a pesar de coincidir con las normas Euro de emisiones adoptadas en Colombia, no tiene en consideración los efectos medioambientales de gran altura, temperatura y humedad propios de la ciudad de Bogotá, como tampoco las tecnologías propias de nuestra flota de vehículos pesados.
6. El estado de mantenimiento y las condiciones de operación propia de nuestro país podrían diferir sustancialmente frente a las consideradas en dichos modelos.

En términos generales, las estimaciones de  $CO$ ,  $NO_x$  y  $PM_{2.5}$  arrojaron diferencias significativamente elevadas frente a los FE medidos, por lo que se puede afirmar que **ninguno de los tres modelos analizados (IVE, MOVES y COPERT) resulta confiable para obtener FE** cuando de alimentar los inventarios de emisiones se trata. No obstante, se identificó que, en la mayoría de los casos, IVE y COPERT presentaban resultados con diferencias más bajas que MOVES, el cual cuenta con una categorización vehicular y de tecnología de control de emisiones diferente a la utilizada en Colombia, lo que imposibilita introducirle al programa la tecnología exacta para nuestros vehículos. MOVES se basa únicamente en la edad de los vehículos y las características definidas en las bases de datos para Estados Unidos, que no se adapta adecuadamente al parque automotor colombiano.

## 4. Conclusiones

- Se logró obtener una comparación de los FE medidos a bordo frente a los calculados por los modelos IVE, MOVES y COPERT.
- La estimación de los FE con el modelo IVE requirió mayor procesamiento de datos antes de ingresarlos al *software* de simulación, en comparación con el MOVES; sin embargo, el ingreso de datos en el modelo IVE fue más amigable con el usuario y logró simular en menor tiempo que MOVES. En cuanto a procesamiento, COPERT fue el *software* con mayor simplicidad y facilidad, tanto para el ingreso de los datos como para la simulación de estos.
- Uno de los datos más importantes para la estimación de las emisiones de estos modelos es la tecnología de control de emisiones del motor. Debido a que MOVES está basado en la EPA, no fue posible definir para este modelo la tecnología exacta de los vehículos utilizados en Colombia que, generalmente, se encuentran catalogados de acuerdo con la normatividad europea, por lo que los resultados obtenidos con MOVES presentaron las mayores desviaciones frente a los FE medidos en ruta.
- Los tres modelos arrojaron valores de FE de CO<sub>2</sub> aceptables frente a los FE medidos. Pero la estimación de FE de CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub>, en general, no son aproximadas a los datos experimentales, llegando a arrojar diferencias en algunos casos de varios ordenes de magnitud.
- Ninguno de los tres modelos, IVE, MOVES y COPERT, resultó ser adecuado para definir el inventario de emisiones de una ciudad como Bogotá. Para tal fin se recomienda utilizar los FE medidos, que han sido reportados por la UPME y la Universidad de Antioquia a través del proyecto FECOC+ Determinación de Factores de Emisión de fuentes móviles para Colombia

## ENTREGABLE No. 3

**Informe con la determinación del impacto de la tecnología de control de emisiones (EURO) de los vehículos pesados de carga y de pasajeros sobre los factores de emisión, con énfasis en los gases de efecto invernadero**



Sistema de doble MAF en la admisión y adaptación tubo de escape de un tractocamión. FECOC+ Fase 2.2

## Tabla de Contenido

<b>1. Efecto de la tecnología de control de emisiones sobre los factores de emisión .....</b>	<b>68</b>
1.1. Tractocamiones (categoría N3).....	69
1.2. Camiones grandes de dos ejes (C2G) – Categoría N2.....	71
1.3. Camiones pequeños de dos ejes (C2P) – Categoría N2 .....	73
1.4. Autobuses (AB) – Categoría M2 .....	75
<b>2. Efecto de la altitud sobre el nivel del mar en los FE .....</b>	<b>77</b>
2.1 Tractocamiones – Categoría N3.....	79
2.2 Camiones de dos ejes grandes (C2G) – Categoría N2.....	81
2.3 Camiones de dos ejes pequeños (C2P) – Categoría N2 .....	83
2.4 Buses urbanos (AB) – Categoría M2 .....	85
<b>3. Procedimiento estadístico para el análisis de datos .....</b>	<b>87</b>
<b>4. Bibliografía .....</b>	<b>90</b>

## Contenido de Figuras

<b>Figura 3. 3.</b> Impacto de la tecnología sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de tractocamiones.....	69
<b>Figura 3. 4.</b> Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los FE medidos en tractocamiones.....	70
<b>Figura 3. 5.</b> Impacto de la tecnología sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones grandes de dos ejes (C2G).....	71
<b>Figura 3. 6.</b> Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los factores de emisión medidos en camiones grandes de dos ejes (C2G).....	72
<b>Figura 3. 7.</b> Impacto de la tecnología sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones pequeños de dos ejes (C2P).....	73
<b>Figura 3. 8.</b> Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los FE medidos en camiones pequeños de dos ejes (C2P). .....	74
<b>Figura 3. 9.</b> Impacto de la tecnología sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de buses de 20 y 38 pasajeros (AB).....	75
<b>Figura 3. 10.</b> Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los FE medidos en buses de 20 y 38 pasajeros (AB).....	76

<b>Figura 3. 11.</b> Impacto de la altitud sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de Tractocamiones. ....	79
<b>Figura 3. 12.</b> Impacto de la altitud sobre los FE medidos en tractocamiones. ....	80
<b>Figura 3. 13.</b> Impacto de la altitud sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones grandes de dos ejes (C2G).....	81
<b>Figura 3. 14.</b> Impacto de la altitud sobre los FE medidos en camiones C2G.....	82
<b>Figura 3. 15.</b> Impacto de la altitud sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones grandes de dos ejes (C2P). ....	83
<b>Figura 3. 16.</b> Impacto de la altitud sobre los FE medidos en camiones C2P. ....	84
<b>Figura 3. 17.</b> Impacto de la altitud sobre el FE de CO <sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de buses urbanos.....	85
<b>Figura 3. 18.</b> Impacto de la altitud sobre los FE medidos en buses urbanos. ....	86
<b>Figura 3. 17.</b> Verificación visual de normalidad en residuales. ....	87
<b>Figura 3. 18.</b> Verificación de homocedasticidad.....	88

## Contenido de Tablas

<b>Tabla 3. 1.</b> Impacto de la tecnología de los tractocamiones en los FE medidos y en el rendimiento de combustible. ....	69
<b>Tabla 3. 2.</b> Resumen del análisis estadístico de varianza sobre el impacto de la tecnología de los camiones C2G en los FE medidos y en el rendimiento de combustible.....	71
<b>Tabla 3. 3.</b> Impacto de la tecnología de los camiones C2P en los factores de emisión medidos y en el rendimiento de combustible.....	73
<b>Tabla 3. 4.</b> Impacto de la tecnología de los camiones C2P en los FE medidos y en el rendimiento de combustible.....	75
<b>Tabla 3. 5.</b> Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de tractocamiones.....	79
<b>Tabla 3. 6.</b> Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de camiones C2 grandes (10 ton de capacidad de carga). ....	81
<b>Tabla 3. 7.</b> Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de camiones C2 pequeños (< 5 ton de capacidad de carga). ....	83
<b>Tabla 3. 8.</b> Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de buses urbanos (20 y 38 pasajeros). ....	85

En este informe se presenta un análisis estadístico de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95% ( $p < 0.05$ ) de todos los datos de Factores de Emisión, y el rendimiento de consumo de combustible, separados por tecnología de control de emisiones, a saber, pre Euro, Euro II, Euro IV y Euro V, para cada categoría vehicular. Adicionalmente se presenta el mismo análisis estadístico de varianza (ANOVA) para determinar el impacto que tuvo la altitud sobre el nivel del mar (0 y 2600 msnm).

Los resultados de este proyecto permitieron concluir que el uso de nuevas tecnologías en la categoría de vehículos pesados de carga y de pasajeros tienen un impacto marcado sobre la mejora en el rendimiento de combustible, así como en la reducción de emisiones contaminantes reguladas.

Por su parte, la altitud sobre el nivel del mar sí influyó sobre las emisiones contaminantes, haciendo que éstas incrementaran en Bogotá, especialmente el CO, HC, NOx y el material particulado; no obstante, se pudo concluir que la altitud no afectó de forma significativa ni a las emisiones de CO<sub>2</sub>, ni al rendimiento de consumo de combustible.

## 1. Efecto de la tecnología de control de emisiones sobre los factores de emisión

La tecnología de control de emisiones ha sido adoptada por los fabricantes mediante diferentes estrategias, que cambian de uno a otro. Algunos se han centrado en mejorar los diseños de las cámaras de combustión, incrementar la presión de inyección, implementar estrategias de inyección partida o múltiples inyecciones, o usar diferentes tipos de sistemas postratamiento para los gases de escape. Las tecnologías de control de emisiones, en términos generales, se pueden resumir en:

- PreEuro: ningún sistema de postratamiento, bajas presiones de inyección, sistemas de inyección hidráulicos
- Euro I, Euro II y Euro III (o sus equivalentes en EPA): pueden incluir sistemas de mediana presión de inyección, y en algunos casos incorporan una preinyección. Dependiendo del fabricante incorporan sistema EGR (Recirculación de Gases de Escape) de alta presión, y sistema de oxidación catalítica diésel (DOC).
- EURO IV: Normalmente elevan la presión por encima de los 1000 bar (1000 atmósferas), algunos incluyen estrategias de preinyección, vienen dotados con EGR de alta presión refrigerado y DOC. Algunos fabricantes incluyen turbina de geometría variable.
- EURO V: Además de los sistemas EURO IV, este incluye el sistema de catálisis selectiva a NOx (SCR), el cual implica inyección de úrea automotriz en el sistema de escape.

En este informe se agruparon las tecnologías en dos grupos, a saber:

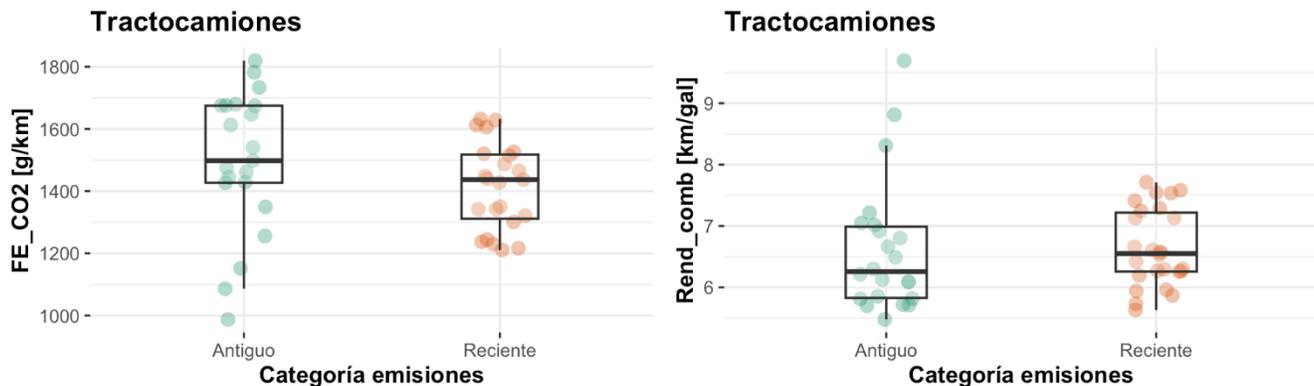
- Antiguos: equivale a tecnologías de control de emisiones Euro III y anteriores
- Recientes: corresponde a Euro IV y Euro V.

### 1.1. Tractocamiones (categoría N3)

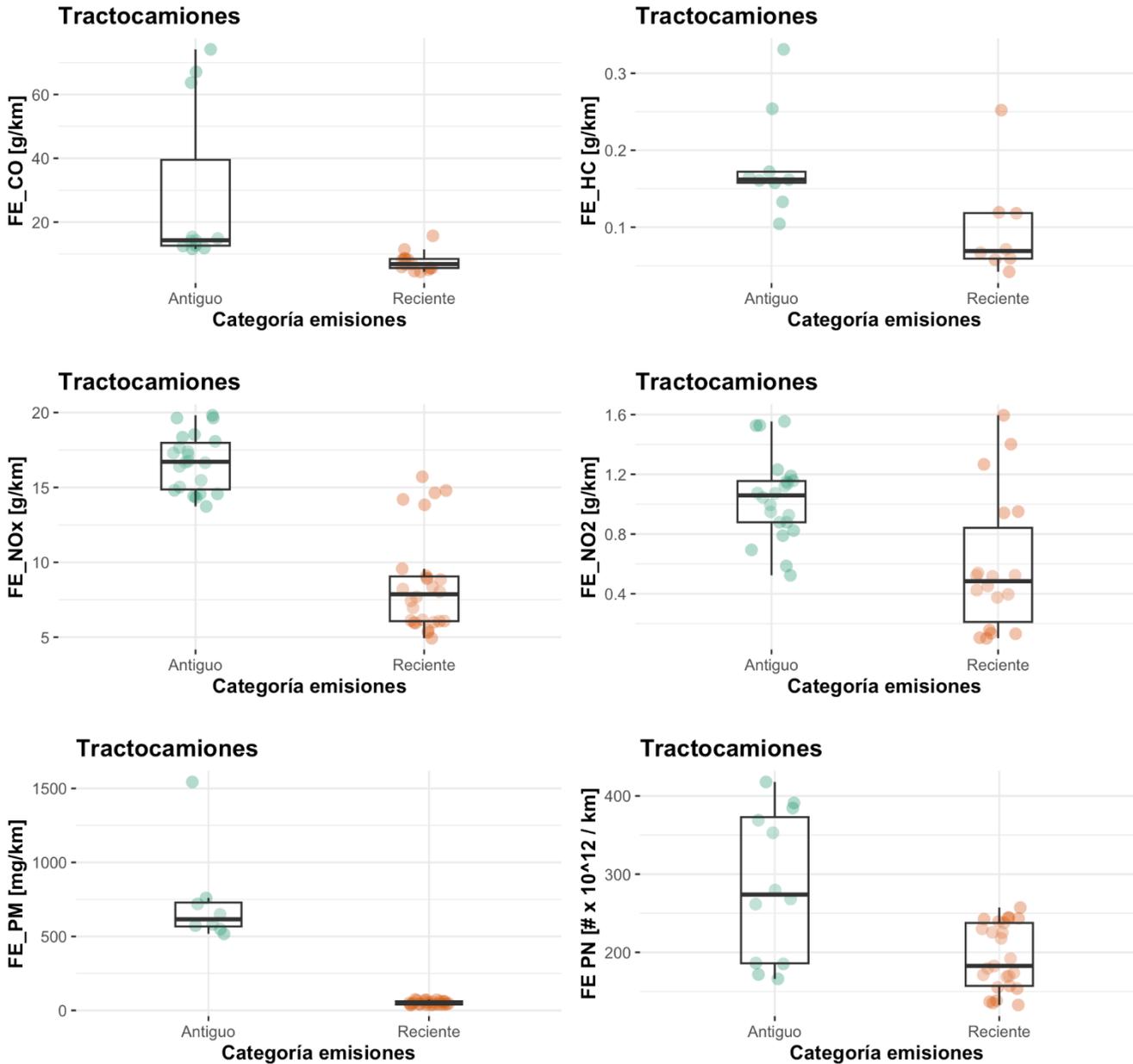
La **Tabla 3. 1** resume los resultados estadísticos basados en un análisis de varianza (ANOVA), donde los valores  $p < 0.05$  para los factores consumo de combustible y FE de CO<sub>2</sub> (**Figura 3. 1**), indican que la tecnología de los tractocamiones (EPA 98 vs Euro V) medidos no presentó ningún efecto significativo de sobre dos factores. No obstante, el resto de los FE si mostró efecto estadísticamente significativo, por tanto, las emisiones contaminantes disminuyen marcadamente al mejorar la tecnología de los tractocamiones, tal como se aprecia en la **Figura 3. 2**.

**Tabla 3. 1.** Impacto de la tecnología de los tractocamiones en los FE medidos y en el rendimiento de combustible. Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

Categoría	Variable	Diferencia antiguo/reciente	valor p
TC	Rend_comb	No	0.2819432
	CO2	No	0.0760604
	CO	Si	1.58E-04
	HC	Si	0.0093748
	NOx	Si	3.71E-08
	NO	Si	2.05E-08
	NO2	Si	0.0012157
	PM	Si	2.94E-05
	PN	Si	0.0025502



**Figura 3. 1.** Impacto de la tecnología sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de tractocamiones. Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V



**Figura 3. 2.** Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los FE medidos en tractocamiones. Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

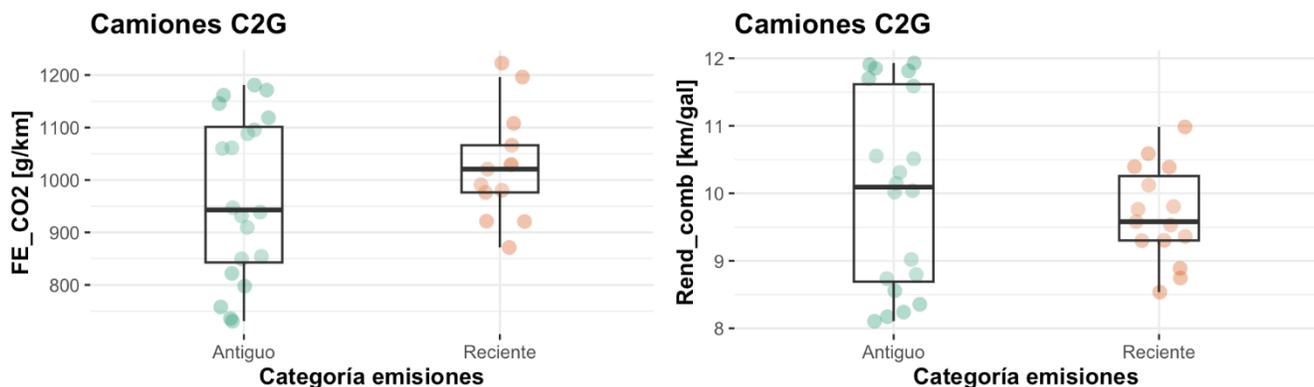
En conclusión, la actualización tecnológica del parque de tractocamiones del país traería un impacto marcado de reducción de emisiones contaminantes y de material particulado, sin embargo, no tendría un efecto significativo sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 1.2. Camiones grandes de dos ejes (C2G) – Categoría N2

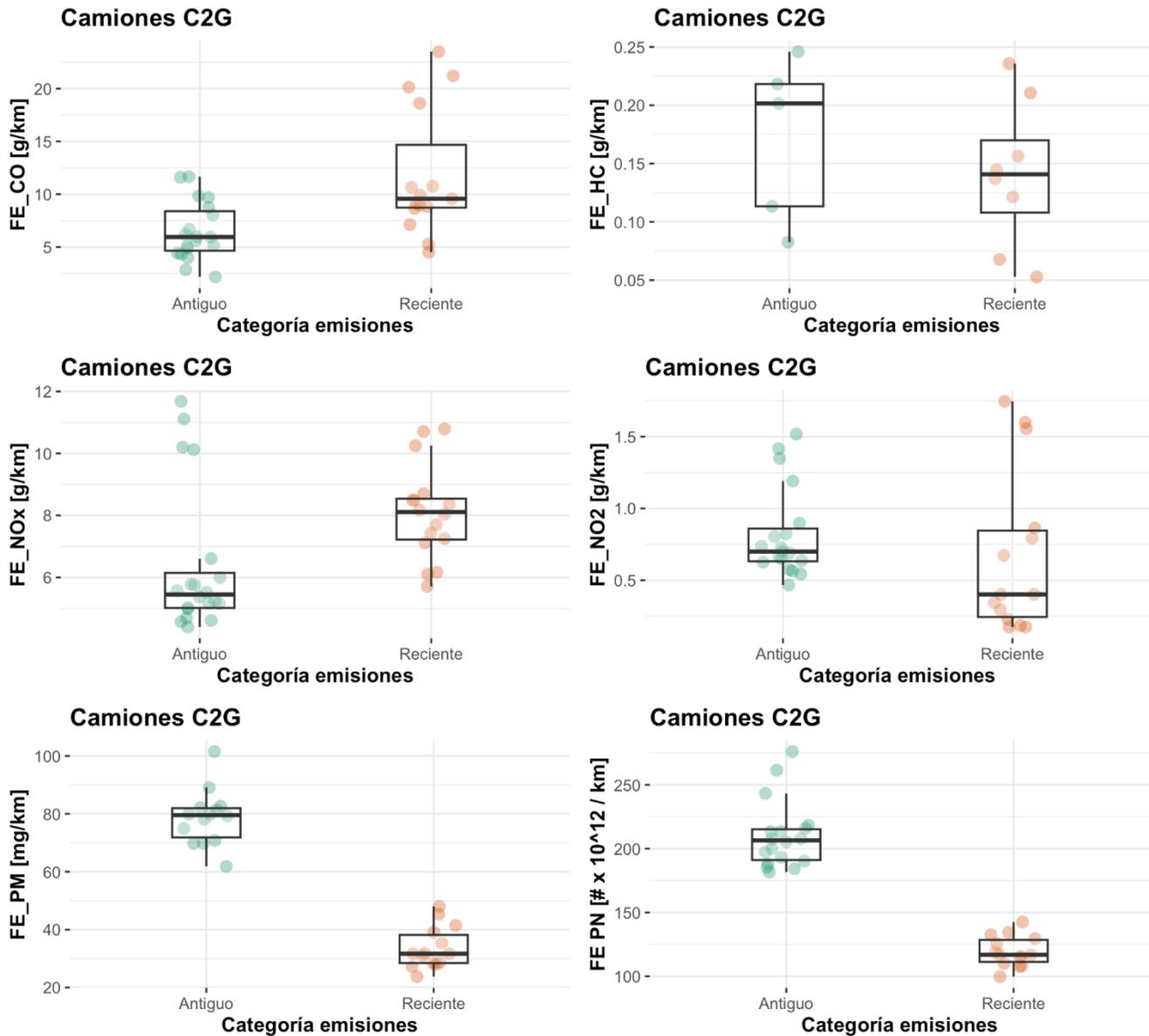
La **Tabla 3. 2** resume los resultados del análisis estadístico basado en un análisis de varianza (ANOVA), donde los valores  $p < 0.05$  para los factores consumo de combustible, factor de emisión de CO<sub>2</sub> (**Figura 3. 3**), HC y NO<sub>2</sub>, indican que la tecnología de los camiones C2G (preEuro, Euro II, Euro IV y Euro V) medidos no presentaron ningún efecto significativo. No obstante, el resto de los FE si mostraron efecto estadísticamente significativo, es decir, que las emisiones contaminantes de CO, NOx, NO, PM y PN disminuyeron marcadamente al mejorar la tecnología de los camiones C2G, tal como se aprecia en las **Figura 3. 4**.

**Tabla 3. 2.** Resumen del análisis estadístico de varianza sobre el impacto de la tecnología de los camiones C2G en los FE medidos y en el rendimiento de combustible. Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

C2G	Rend_comb	No	0.6170751
	CO2	No	0.3198419
	CO	Si	0.0033806
	HC	No	0.4642143
	NOx	Si	0.0022399
	NO	Si	0.0024187
	NO2	No	0.1260445
	PM	Si	6.70E-06
	PN	Si	1.70E-06



**Figura 3. 3.** Impacto de la tecnología sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones grandes de dos ejes (C2G). Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V



**Figura 3. 4.** Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los factores de emisión medidos en camiones grandes de dos ejes (C2G). Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

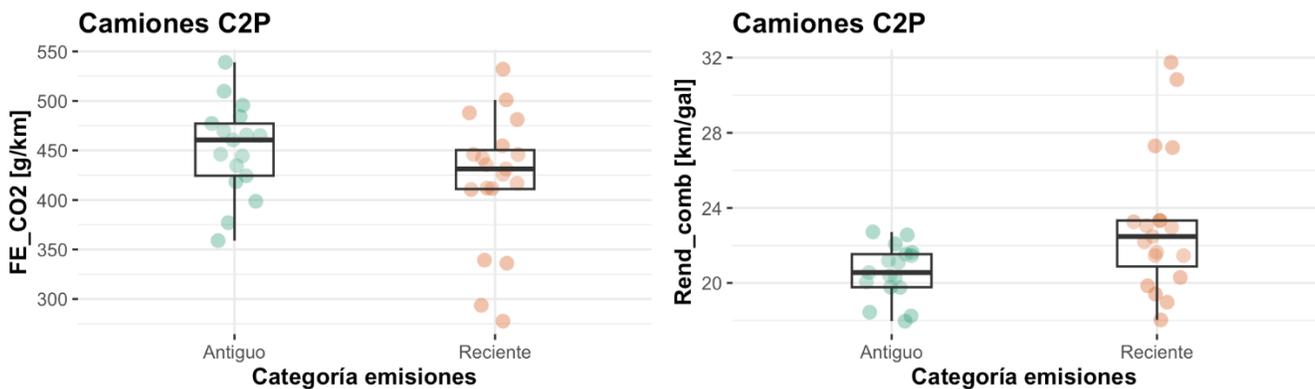
En conclusión, para la categoría de camiones C2 grandes de dos ejes la actualización tecnológica del parque traería un impacto marcado de reducción de emisiones contaminantes reguladas de CO, NOx y material particulado (PM/PN), sin embargo, no tendría un efecto significativo sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 1.3. Camiones pequeños de dos ejes (C2P) – Categoría N2

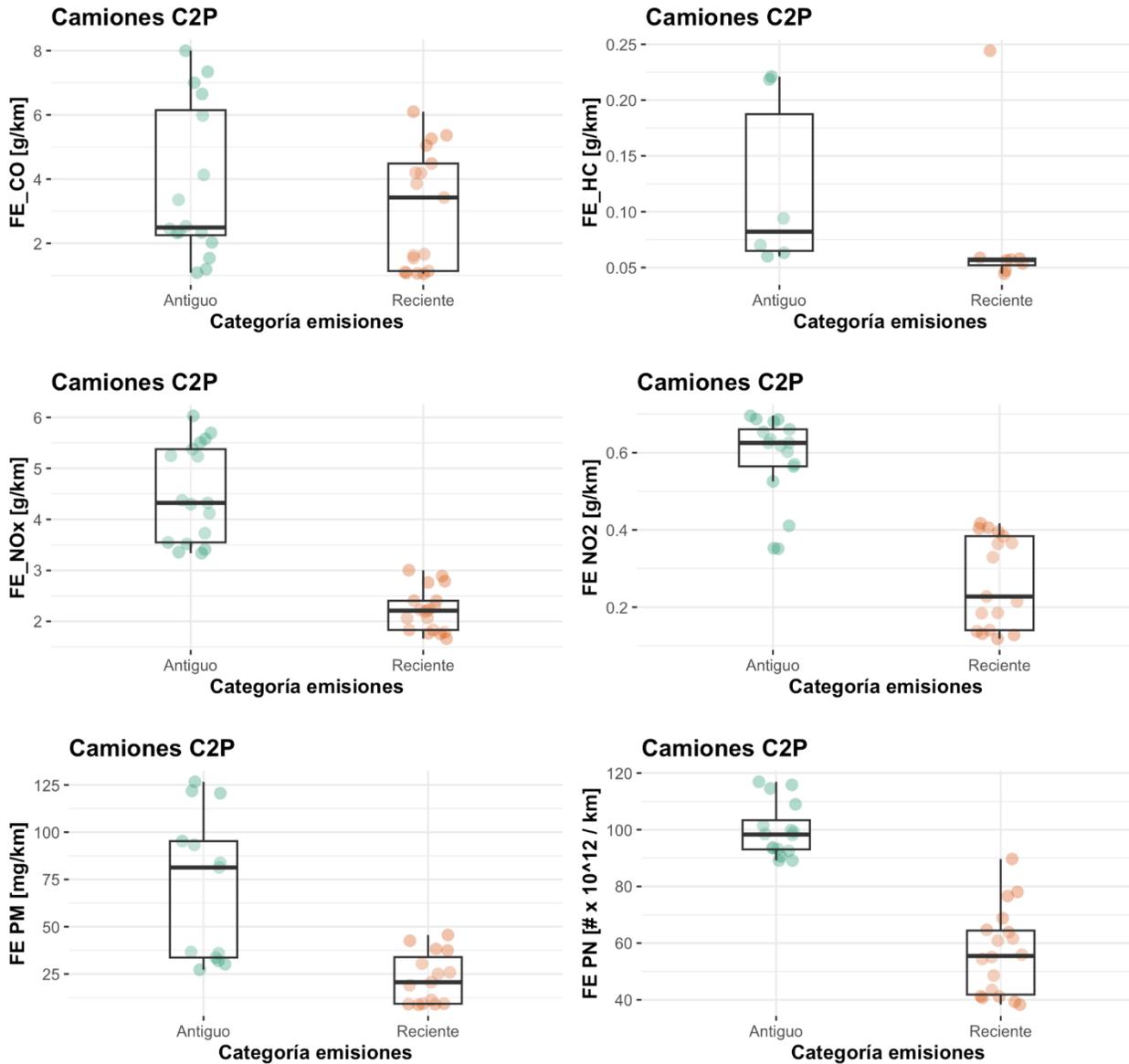
La **Tabla 3. 3** resume los resultados del análisis estadístico basado en un análisis de varianza (ANOVA) del impacto de la tecnología de camiones pequeños de dos ejes (C2P) sobre los FE y el consumo de combustible. Los valores  $p < 0.05$  indican que la tecnología presenta efecto significativo. Los resultados estadísticos permiten inferir que no hubo impacto de la tecnología (preEuro/EuroII/EuroIV) sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> (**Figura 3. 5**) en los camiones pequeños de dos ejes (C2P), pero sí lo tiene en los otros FE (**Figura 3. 6**), así como en el rendimiento de consumo de combustible (**Figura 3. 3**), donde se encontró que los vehículos de tecnología reciente hacen más kilómetro por galón.

**Tabla 3. 3.** Impacto de la tecnología de los camiones C2P en los factores de emisión medidos y en el rendimiento de combustible. Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

C2P	Rend_comb	Si	0.0128655
	CO2	No	0.1322834
	CO	No	0.3307564
	HC	Si	0.0201368
	NOx	Si	3.10E-07
	NO	Si	9.79E-07
	NO2	Si	8.18E-06
	PM	Si	0.0009889
	PN	Si	9.61E-07



**Figura 3. 5.** Impacto de la tecnología sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones pequeños de dos ejes (C2P). Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V



**Figura 3. 6.** Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los FE medidos en camiones pequeños de dos ejes (C2P). Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

En conclusión, para la categoría de camiones C2 pequeños de dos ejes la actualización tecnológica del parque traería un impacto marcado de reducción de emisiones contaminantes reguladas, excepto en las de CO, y sobre la reducción del consumo de combustible, sin embargo, al igual que para los Tractocamiones y los C2G, no tendría un efecto significativo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.

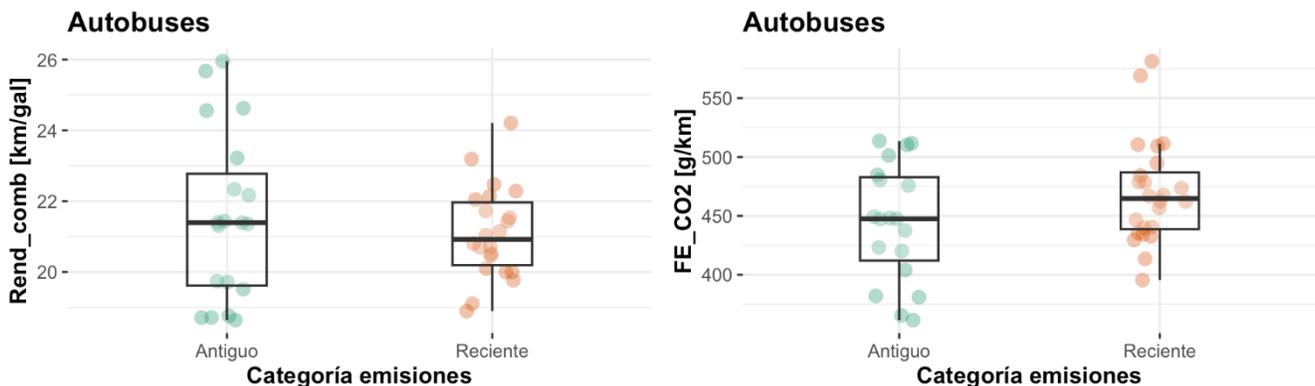
### 1.4. Autobuses (AB) – Categoría M2

La **Tabla 3. 4** resume los resultados del análisis estadístico basado en un análisis de varianza (ANOVA) del impacto de la tecnología de buses urbanos de 20 y 38 pasajeros (AB) sobre los FE y el consumo de combustible. Los valores  $p < 0.05$  indican que la tecnología presenta efecto significativo. Al igual que en las categorías anteriores, el análisis estadístico permite afirmar que no hubo impacto de la tecnología (preEuro/EuroII/EuroIV) sobre el rendimiento de consumo de combustible, ni sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> (**Figura 3. 7**) en los camiones pequeños de dos ejes, pero sí lo tiene en los demás FE (**Figura 3. 8**).

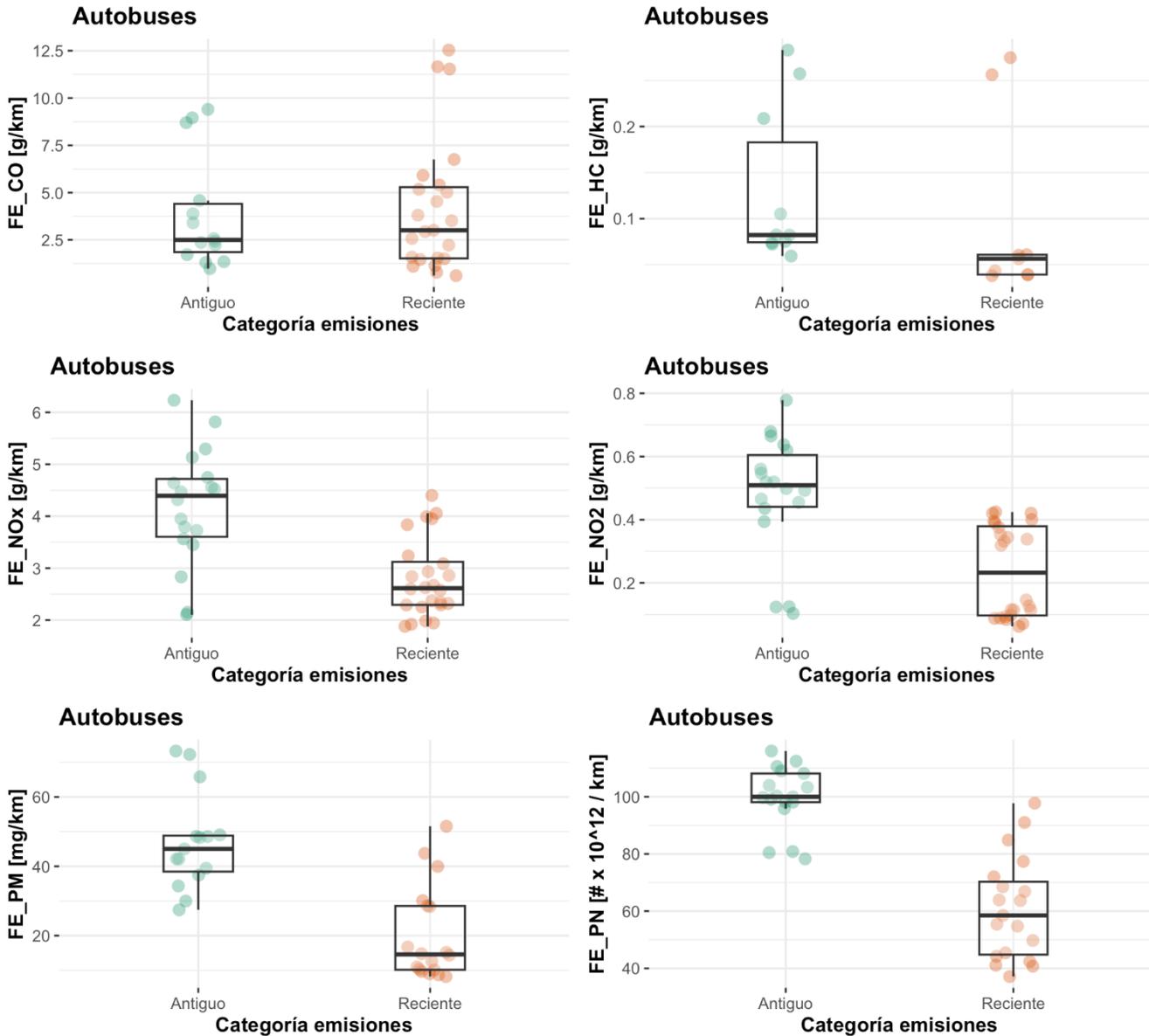
**Tabla 3. 4.** Impacto de la tecnología de los camiones C2P en los FE medidos y en el rendimiento de combustible.

Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

AB	Rend_comb	No	0.8343274
	CO2	No	0.2404437
	CO	No	0.8509566
	HC	Si	0.033763
	NOx	Si	0.0003387
	NO	Si	7.24E-04
	NO2	Si	2.45E-05
	PM	Si	1.09E-04
	PN	Si	1.58E-06



**Figura 3. 7.** Impacto de la tecnología sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de buses de 20 y 38 pasajeros (AB). Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V



**Figura 3. 8.** Impacto de la tecnología (antigua/reciente) sobre los FE medidos en buses de 20 y 38 pasajeros (AB).  
Nota: Antiguo = tecnologías Euro III y anteriores. Reciente: EURO IV/V

En conclusión, para la categoría de buses la actualización tecnológica del parque traería un impacto positivo de reducción de emisiones contaminantes reguladas, sin embargo, al igual que para las demás categorías de vehículos pesados medidos, no tendría un efecto significativo sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## 2. Efecto de la altitud sobre el nivel del mar en los FE

En un trabajo reciente, Shaikh, A.A. et al [1], reportaron los FE de CO, HC y NOx de 70 camiones de diversas marcas, tamaños y tecnologías, operando en el corredor económico China-Pakistan, desde Islamabad (540 msnm), Sost (2800 msnm) y el paso por el Khunjerab (4693 msnm). Los autores no siguieron ningún ciclo de conducción específico, sino que midieron a bordo las emisiones bajo condiciones de conducción real. A pesar de que reportaron incrementos de CO del 103.6 %, de HC del 86.3% y NOx del 133.6% con un incremento de altitud de 4000 msnm, ellos argumentaron que estos incrementos estaban más asociados a cambios en la meteorología, condiciones atmosféricas (humedad, presión y temperatura) y a las características de la flota tan diversa de camiones que midieron (diferentes tamaños y tecnologías de camiones), que a la misma altitud. De hecho, ellos identificaron como el factor más influyente en las emisiones al tipo de camión (tecnología de control de emisiones). Este trabajo no reportó variaciones significativas ni en las emisiones de CO<sub>2</sub> ni en el consumo de combustible, al variar la altitud sobre el nivel del mar, pero sí fueron significativas al cambiar de camiones livianos a camiones pesados (tamaño del vehículo identificado en el estudio por el número de ejes y la cilindrada del motor). El equipo de trabajo afirma que el tamaño de los vehículos fue más decisivo en los FE que la misma tecnología.

El efecto de la altitud sobre el nivel del mar en la emisión del GEI CO<sub>2</sub>, el consumo de combustible y las emisiones reguladas ha sido bastante estudiado. Hasta ahora no existe, sin embargo, consenso en la literatura, pues se han reportado conclusiones que evidencian un incremento de estos parámetros al incrementar la altitud, pero, también, otros trabajos han mencionado que no hay cambios o, incluso, que podrían presentarse disminuciones de algunos contaminantes específicos. Wang, Y. y colaboradores reportaron recientemente [2] 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 (*world 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 CO<sub>2</sub> o el consumo de combustible. Reportaron que otros parámetros ajenos a la altitud, como por ejemplo el control de la mezcla aire/combustible durante los ciclos transitorios tenían mayor peso. Los autores midieron bajo la nueva normativa de control de emisiones China 6, equivalente a Euro 6. Esta normativa implica medir bajo dos condiciones, una en banco de ensayos siguiendo el ciclo de conducción WLTP antes mencionado, y otra bajo emisiones reales en conducción, permitiendo obtener factores de corrección entre las mediciones en carretera y las obtenidas de forma controlada en el laboratorio. La operación en condiciones reales de operación los llevó a concluir que, parámetros como el patrón de conducción, las condiciones de las vías, y las condiciones ambientales tenían mayor efecto en las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustible, más que la propia altitud sobre el nivel del mar. Estas mismas razones los llevaron a explicar el por qué no encontraron una tendencia clara en las demás emisiones contaminantes que reportaron al variar la altitud.

Muchos estudios reportados en la literatura muestran un efecto marcado de la altitud sobre las emisiones y el consumo, normalmente aumento de ambas asociadas a la deficiencia de oxígeno, pero la mayoría de éstos normalmente se basan en mediciones realizadas con un único vehículo o motor (ver, por ejemplo, Wang, H. et al. *Atmospheric environment*, 191, 2018 [3], Benjumea, et al. *Fuel*, 2009 [4]). Las principales razones que pueden explicar esta divergencia de resultados se podrían resumir en:

- Para ensayos bajo ciclos de conducción, como fue el caso de FECOC+ Fases 1 y 2, durante los cambios bruscos de aceleración (transitorios), se pueden producir variaciones en la relación aire/combustible instantánea.
- Las variaciones del dosado relativo (riqueza de la mezcla respecto de la estequiométrica) cilindro a cilindro respecto del valor medio medido con los equipos, podría tener un efecto más significativo en la formación de emisiones contaminantes que la misma altitud. Adicionalmente, estas variaciones cilindro a cilindro se acentúan aún más en condiciones de operación transitorias.

Huertas, J.I. y colaboradores reportaron recientemente un análisis del consumo real de combustible de 46 camiones de transporte pesado en corredores logísticos de Colombia [5]. Los datos de consumo (frecuencia de muestreo de 1 segundo) fueron registrados a través del monitoreo de sistemas telemáticos operados por la empresa *Navisaf*, y, mediante un modelo desarrollado por los autores a partir de la potencia específica vehicular, lograron separar el efecto del factor humano en la conducción de otros factores como la altitud, la edad de los camiones y la pendiente de la carretera. Ellos encontraron que los efectos de la altitud en el consumo eran despreciables, pero que, por el contrario, la pendiente de la carretera tenía un efecto significativo. Plantearon la necesidad de estudiar el efecto de la edad de los vehículos (nivel de tecnología) sobre el consumo de combustible.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en este proyecto para cada categoría vehicular.

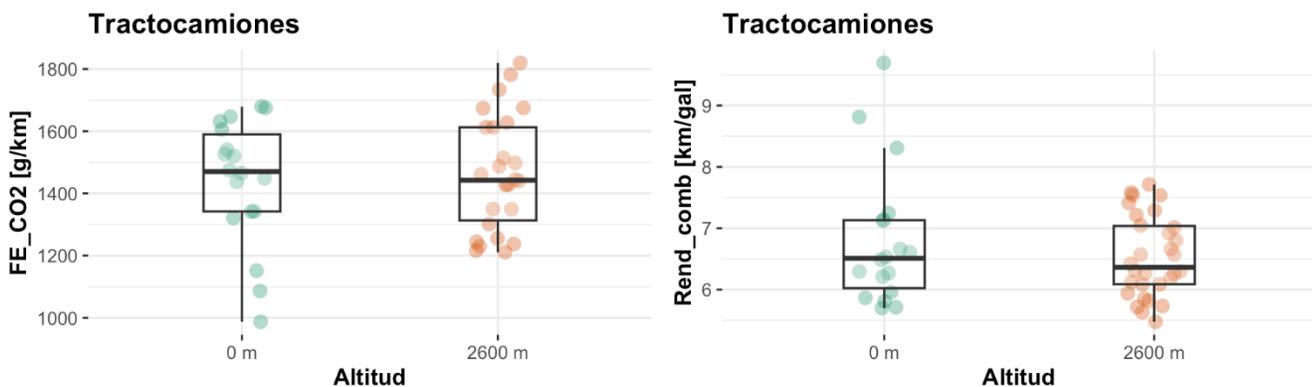
### 2.1 Tractocamiones – Categoría N3

La **Tabla 3. 5** resume los resultados del análisis de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95% ( $p$  value < 0.05). Al igual que presentaron Huertas, J.I. y colaboradores [5], en una muestra de 46 camiones y a partir de datos de telemetría, en este trabajo se demostró que la altitud sobre el nivel del mar no tiene efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de combustible, así como tampoco sobre otros FE como el CO<sub>2</sub> (**Figura 3. 9**), el CO, NOx y NO (**Figura 3. 10**). Sin embargo, la altitud sí influyó en el incremento de las emisiones de hidrocarburos totales, el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el material particulado (PM/PN). Estos dos últimos contaminantes son peligrosos para la salud del ser humano por su efecto demostrado de toxicidad.

En la literatura se han reportado resultados contradictorios de las emisiones de NOx al variar la altitud, mientras que algunos autores afirman que incrementan otros han encontrado lo contrario o, incluso, han reportado altitudes a partir de las cuales el incremento no es significativo.

**Tabla 3. 5.** Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de tractocamiones.

Categoría	Variable	Diferencia 0 m/2600 m	valor p
TC	Rend_comb	No	0.7333037
	CO2	No	0.9429111
	CO	No	9.13E-01
	HC	Si	0.03145045
	NOx	No	5.23E-01
	NO	No	6.55E-01
	NO2	Si	0.00273654
	PM	Si	3.43E-03
	PN	Si	0.02653844



**Figura 3. 9.** Impacto de la altitud sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de Tractocamiones.

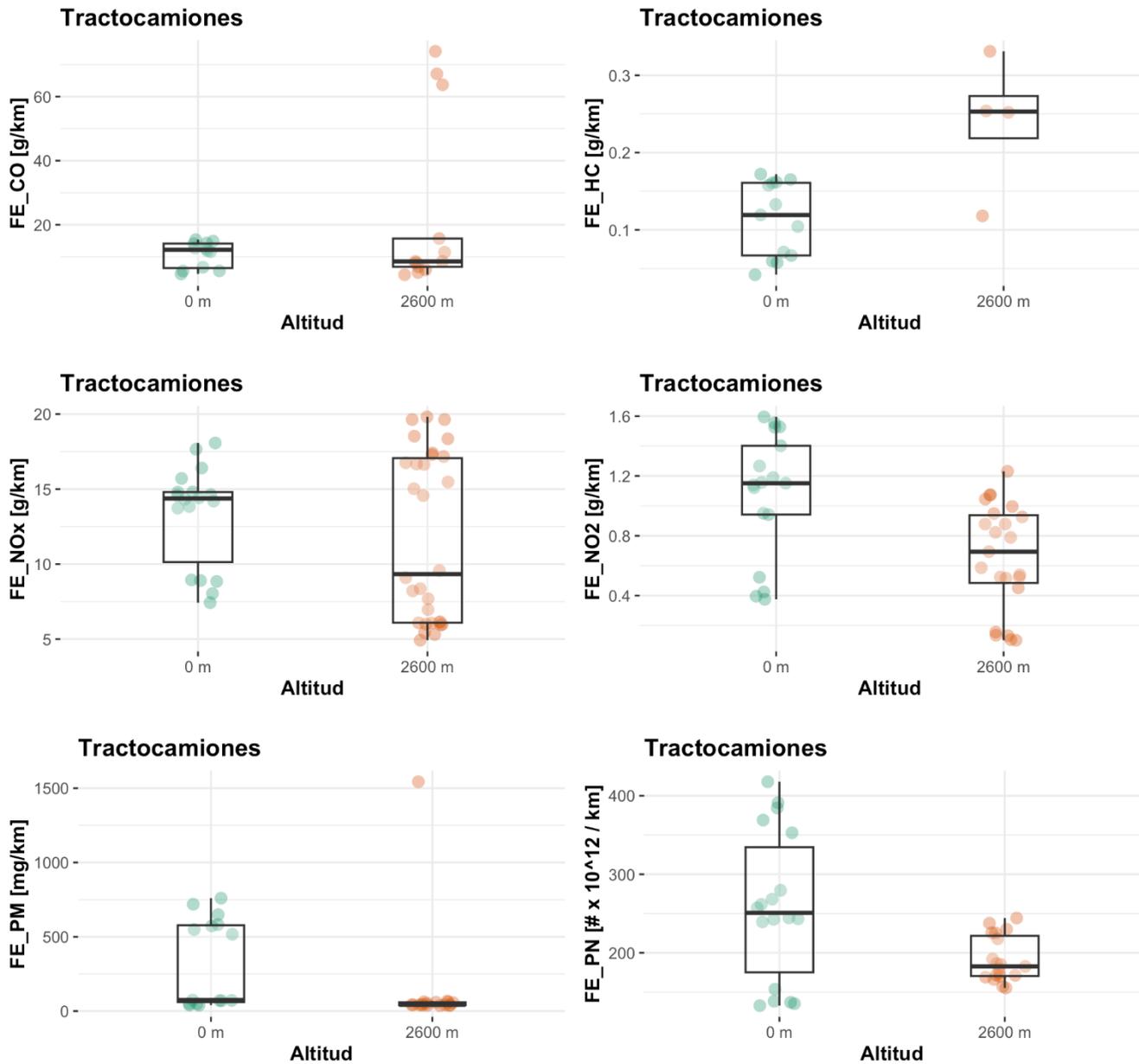


Figura 3. 10. Impacto de la altitud sobre los FE medidos en tractocamiones.

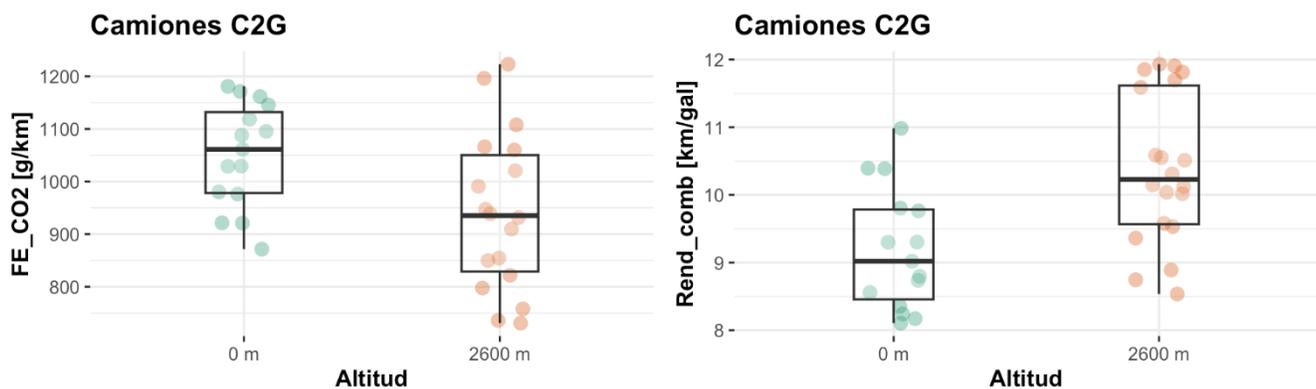
En conclusión, si bien la altitud no afectó significativamente al consumo de combustible y al FE de CO<sub>2</sub>, CO y NOx, sí tuvo impacto sobre el NO<sub>2</sub> y sobre el incremento del material particulado. Sobre el número de partículas el efecto no fue significativo.

## 2.2 Camiones de dos ejes grandes (C2G) – Categoría N2

La **Tabla 3. 6** muestra que la altitud sobre el nivel del mar sí tuvo efecto significativo en las emisiones de CO<sub>2</sub> y en el rendimiento de combustible. El CO<sub>2</sub> disminuyó con la altitud y el rendimiento de combustible mejoró al pasar de Barranquilla a Bogotá (**Figura 3. 11**). En esta categoría de camiones, con motores de cilindradas que rondaron los 7.8 litros, a pesar de que el valor p = 0.059 indica que no hay impacto significativo, la **Figura 3. 12** permite afirmar que la mediana fue mayor en la ciudad de Bogotá, con lo cual la tendencia estuvo dirigida a aumentar el PM con la altitud. En el caso del número de partículas, el efecto fue menos marcado.

**Tabla 3. 6.** Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de camiones C2 grandes (10 ton de capacidad de carga).

C2G	Rend_comb	Si	0.00301047
	CO2	Si	0.03005957
	CO	Si	0.00367964
	HC	No	0.6120899
	NOx	Si	0.00130165
	NO	Si	0.00335344
	NO2	Si	0.04289979
	PM	No	5.96E-02
	PN	No	1.19E-01



**Figura 3. 11.** Impacto de la altitud sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones grandes de dos ejes (C2G).

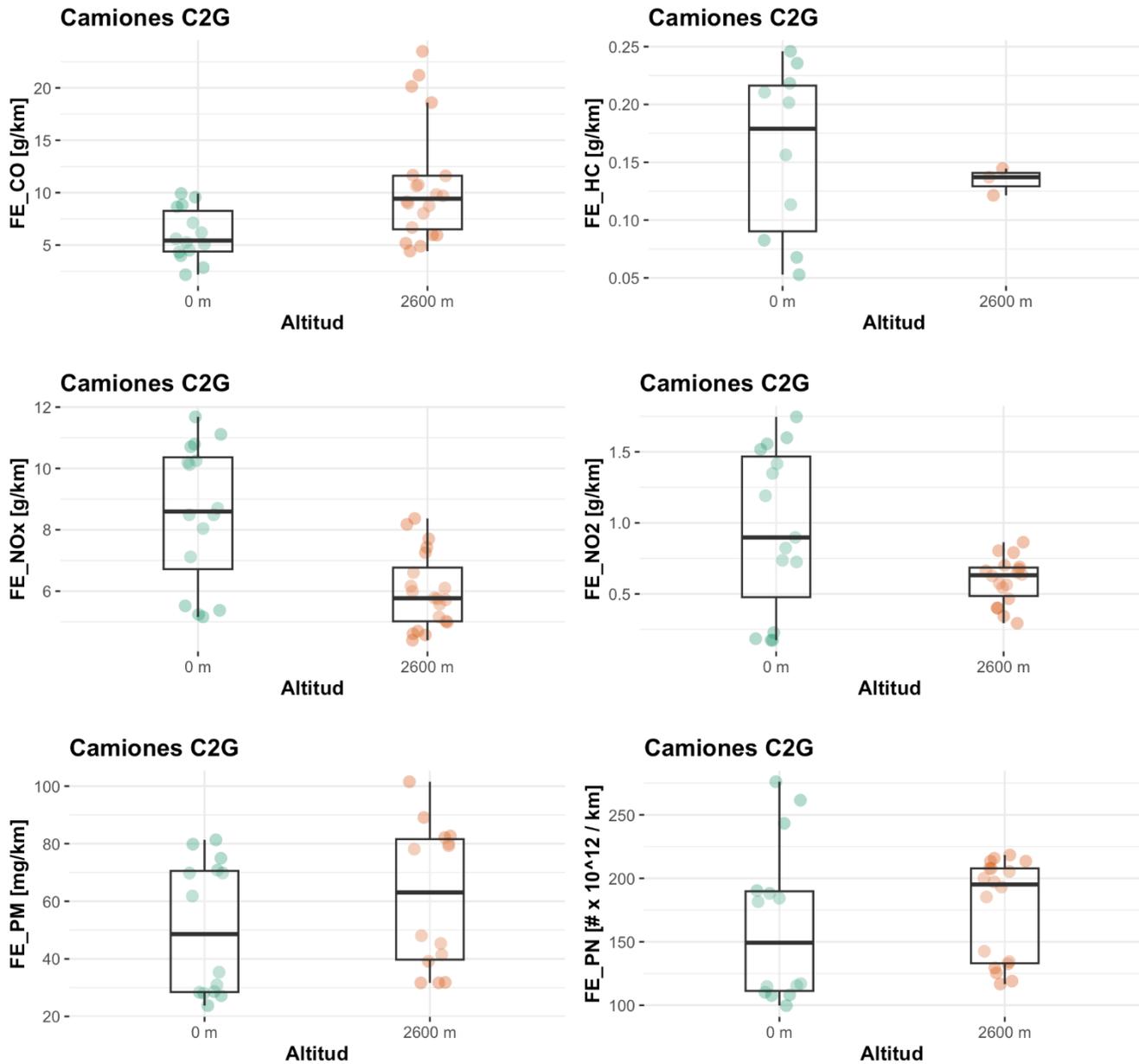


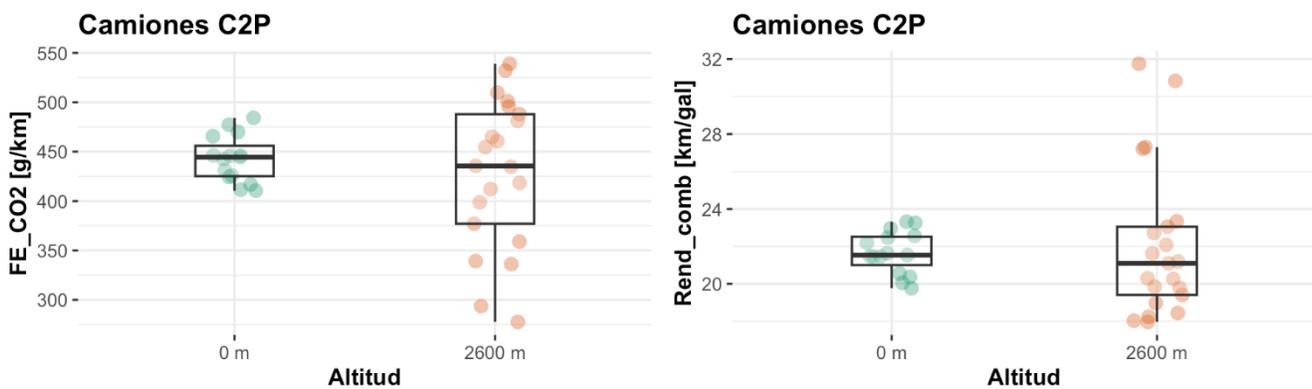
Figura 3. 12. Impacto de la altitud sobre los FE medidos en camiones C2G.

### 2.3 Camiones de dos ejes pequeños (C2P) – Categoría N2

La **Tabla 3. 7** muestra que la altitud sobre el nivel del mar NO tuvo efecto significativo en las emisiones de CO<sub>2</sub> y en el rendimiento de combustible de esta categoría de camiones pequeños (**Figura 3. 13**). Los FE de CO, HC, y material particulado (PM y PN) fueron mayores en la ciudad de Bogotá respecto de Barranquilla (**Figura 3. 14**).

**Tabla 3. 7.** Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de camiones C2 pequeños (< 5 ton de capacidad de carga).

C2P	Rend_comb	No	0.3951494
	CO2	No	0.9105809
	CO	Si	2.19E-06
	HC	Si	0.01019788
	NOx	No	1.12E-01
	NO	Si	3.29E-02
	NO2	No	4.56E-01
	PM	Si	0.00159499
	PN	Si	3.00E-02



**Figura 3. 13.** Impacto de la altitud sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de camiones grandes de dos ejes (C2P).

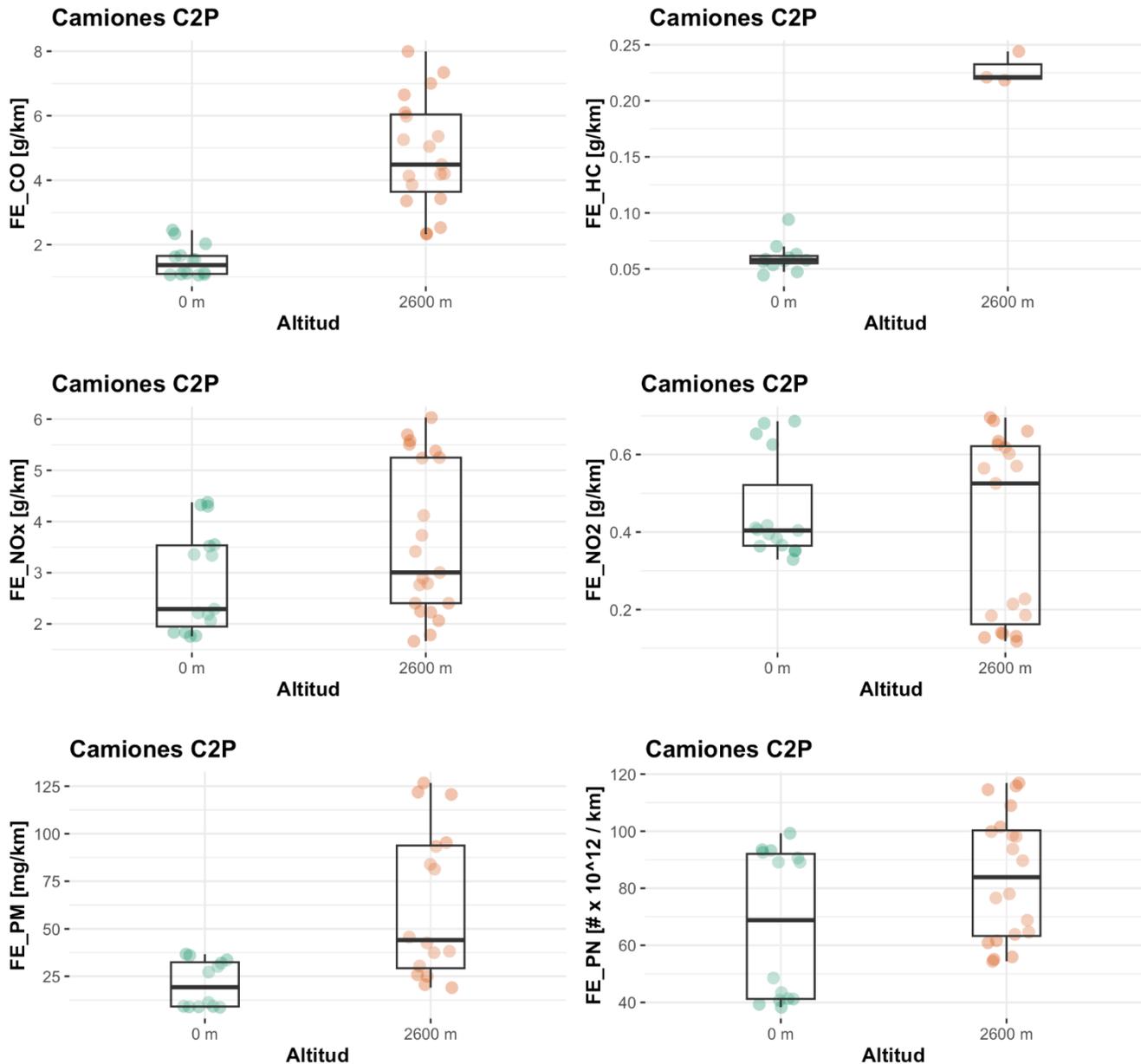


Figura 3. 14. Impacto de la altitud sobre los FE medidos en camiones C2P.

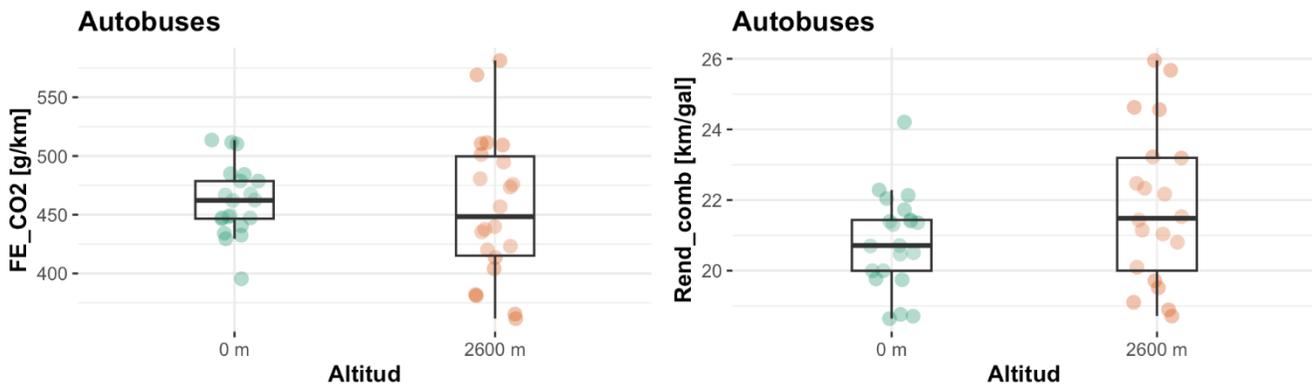
Los camiones de dos ejes pequeños, típicos de distribución de paquetería urbana de última milla, incrementaron significativamente las emisiones de material particulado y de óxidos de nitrógeno, CO y HC al incrementar la altitud sobre el nivel del mar.

## 2.4 Buses urbanos (AB) – Categoría M2

La **Tabla 3. 8** muestra que la altitud sobre el nivel del mar NO tuvo efecto significativo en las emisiones de CO<sub>2</sub> y en el rendimiento de combustible de esta categoría de camiones pequeños (**Figura 3. 15**). Los FE de CO, HC y material particulado (PM y PN) fueron mayores en la ciudad de Bogotá respecto de Barranquilla (**Figura 3. 16**).

**Tabla 3. 8.** Impacto de la altitud en los FE medidos y en el rendimiento de combustible de buses urbanos (20 y 38 pasajeros).

AB	Rend_comb	No	0.1303413
	CO <sub>2</sub>	No	0.511821
	CO	Si	4.21E-07
	HC	Si	0.00119375
	NO <sub>x</sub>	No	0.5544133
	NO	No	3.99E-01
	NO <sub>2</sub>	No	4.43E-01
	PM	Si	5.93E-04
	PN	Si	1.76E-02



**Figura 3. 15.** Impacto de la altitud sobre el FE de CO<sub>2</sub> (izq.) y el consumo de combustible (der.) de buses urbanos.

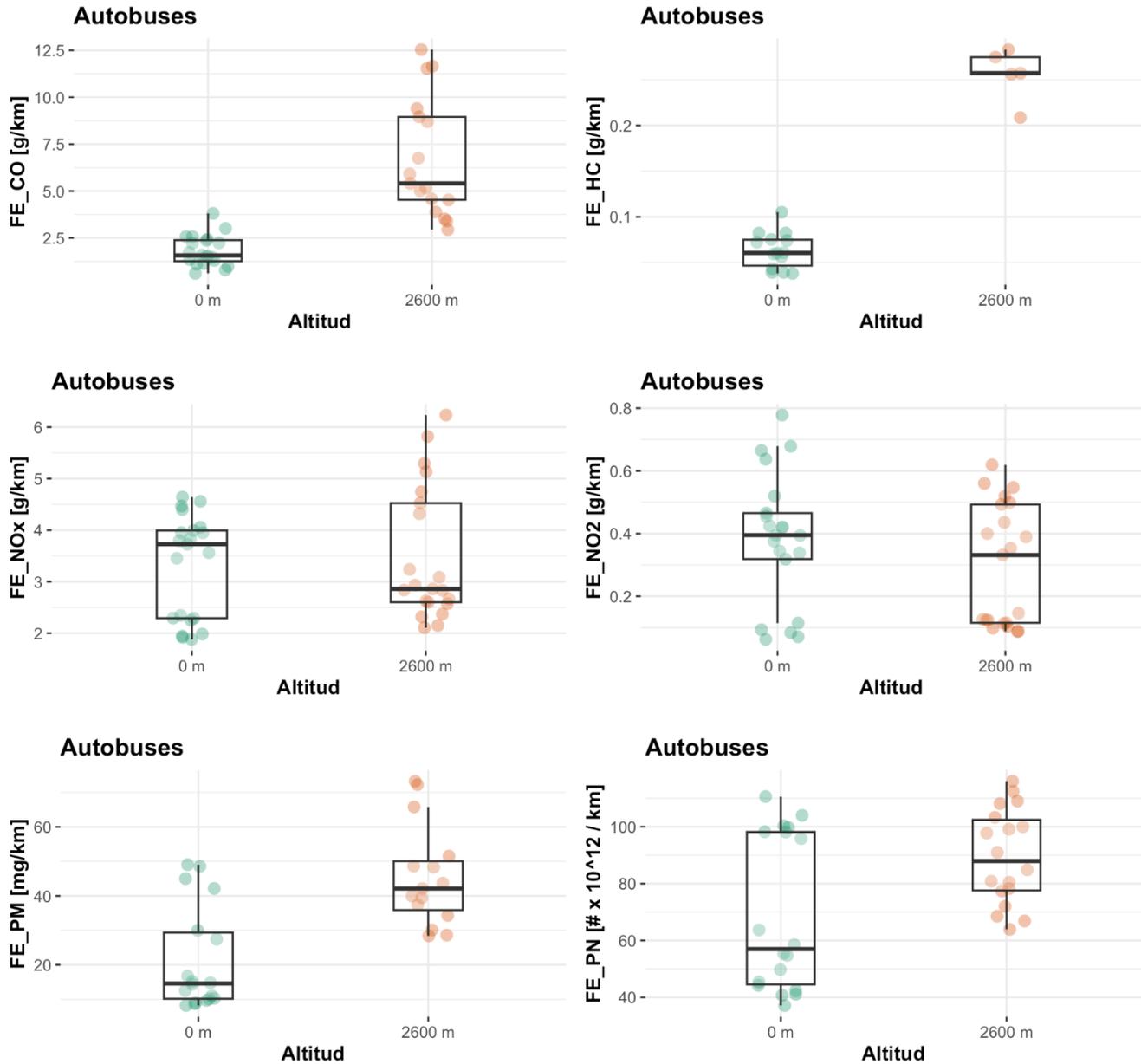


Figura 3. 16. Impacto de la altitud sobre los FE medidos en buses urbanos.

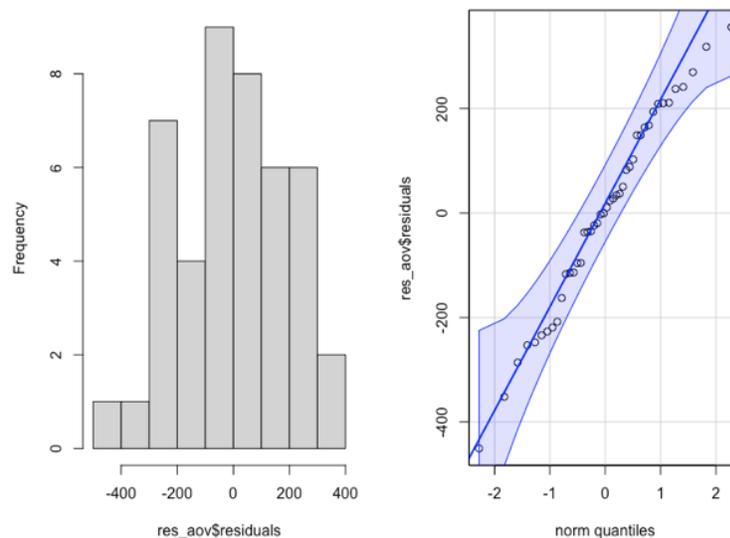
### 3. Procedimiento estadístico para el análisis de datos

Se analizaron en total 9 variables: Rendimiento de combustible y FE de CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, PM, y PN. En cada caso se tomaron valores de todas las pruebas válidas de cada vehículo y se agruparon los datos según dos factores: Tecnología de emisiones (Categoría-emisiones), y altitud.

En el caso de la tecnología se formaron dos grupos, uno de vehículos antiguos: aquellos cuyo año de modelo es menor o igual a 2015, y vehículos recientes: con año de modelo superior a 2015. Los vehículos antiguos comprenden tecnologías pre-Euro y Euro II, mientras que los vehículos recientes comprenden tecnologías Euro IV y Euro V.

En el caso de la altitud, hay dos valores correspondientes a las ciudades en las cuales se midió en el proyecto: Barranquilla (0 m) y Bogotá (2600 m).

Para cada variable se verificó primero que los residuales se acomodaran a una distribución normal. Esto se verificó visualmente mediante el histograma de frecuencias y mediante el diagrama de residuales reales vs. Estimados (ver **Figura 3. 17**).



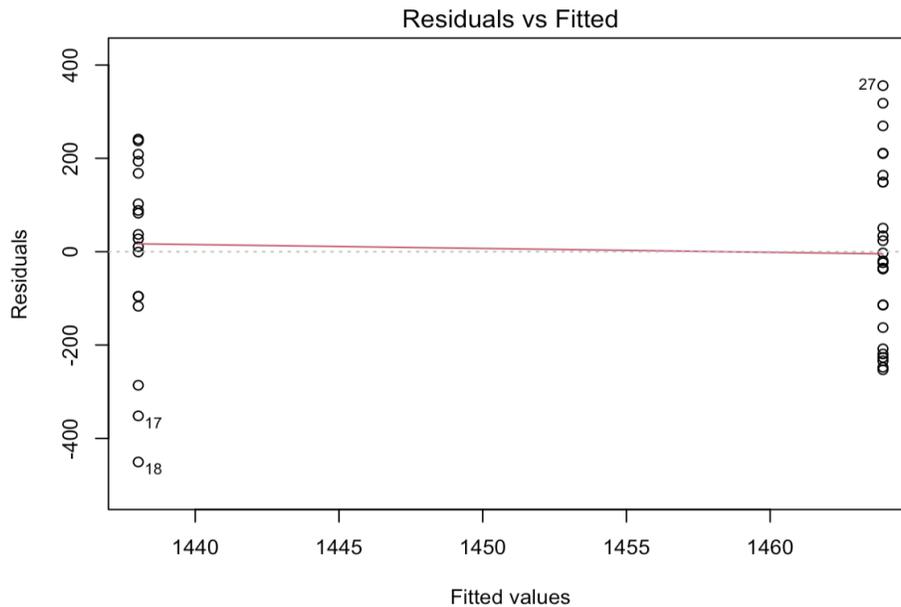
**Figura 3. 17.** Verificación visual de normalidad en residuales.

Adicionalmente, se usó la prueba estadística de Shapiro-Wilk para determinar si los residuales se pueden considerar distribuidos de forma normal. El valor  $p$  de esta prueba permitió identificar aquellas variables cuyos residuales se distribuían de forma normal, permitiendo, por lo tanto, un análisis convencional. A continuación, se muestra un ejemplo del resultado de esta prueba en un caso en el cual se presenta normalidad (la hipótesis nula de esta prueba es que la muestra proviene de una distribución normal, por lo tanto, si el valor  $p$  es mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, con un intervalo de confianza del 95%).

### Shapiro-Wilk normality test

```
data: res_aov$residuals
W = 0.98263, p-value = 0.7387
```

Después de confirmar si se cumple o no normalidad para una variable, se verifica que se tenga varianza constante (homocedasticidad), con el fin de poder confiar en las comparaciones de valores de dicha variable para diferentes niveles de un factor. En la **Figura 3. 18** se muestra un ejemplo de la verificación gráfica de homocedasticidad. Si la varianza es aproximadamente constante, la línea que representa la distribución en esta figura debe ser aproximadamente horizontal.



**Figura 3. 18.** Verificación de homocedasticidad.

En el caso de que una variable se ajuste a una distribución normal, ésta se puede caracterizar mediante su valor promedio. En caso contrario, se debe caracterizar usando la mediana, la cual coincide con la media si se cumple normalidad.

Para determinar si hay diferencia estadística significativa para una variable según los dos niveles de cada factor (altitud y categoría de emisiones), se usó la prueba estadística de Wilcoxon, que es adecuada para comparar dos muestras de datos. A continuación, se muestra un ejemplo del resultado de dicha prueba.

### Wilcoxon rank sum test

```
data: dat_0m$FE_CO2 and dat_2600m$FE_CO2
W = 237, p-value = 0.9429
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

Con la prueba de Wilcoxon, si el valor  $p$  es mayor que 0.05, se concluye que no hay diferencia estadística significativa entre las dos muestras comparadas. En el ejemplo anterior, realizado para  $\text{CO}_2$ , se tiene que las dos muestras comparadas no son diferentes.

Finalmente, se representan los datos de cada variable usando diagramas de cajas y bigotes, incluyendo los puntos de datos, en los cuales se ven los parámetros y detalles de la distribución. Estos diagramas sirven como orientación, pero la diferencia significativa entre muestras se concluye únicamente a partir de resultado de la prueba de Wilcoxon.

#### 4. Bibliografía

- [1] Asad Ali Shaikh, Fanyuan Deng, Zhenyu Luo, Junchao Zhao, Zhining Zhang, Huan Liu, Tingkun He. Altitude-dependent gaseous emissions from freight trucks along the China-Pakistan Economic Corridor in Pakistan, *Environmental Science and Ecotechnology*, No. 14, 2023
- [2] 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 CO<sub>2</sub> and pollutant emission at various altitudes: Inconsistent results and reason analysis *Fuel* No. 307, 2022.
- [3] Haohao Wang, Yunshan Ge, Lijun Hao, Xiaoliu Xu, Jianwei Tan, Jiachen Li, Haohao Wang, Yunshan Ge, Lijun Hao, Xiaoliu Xu, Jianwei Tan, Jiachen Li, Rong Yang. The real driving emission characteristics of light-duty diesel vehicle at various altitudes. *Atmospheric Environment* 191 (2018).
- [4] Pedro N. Benjumea, John R. Agudelo, Andrés F. Agudelo Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine. *Fuel* 88 (2009).
- [5] José I. Huertas, Oscar Serrano-Guevara, Jenny Díaz-Ramírez, Daniel Prato, Lina Tabares. Real vehicle fuel consumption in logistic corridors. *Applied Energy* No. 314, 2022

**ENTREGABLE No. 4**

**CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO DE LOS DIFERENTES EVENTOS DE CONDUCCIÓN  
SOBRE LOS FACTORES DE EMISIONES VEHICULARES**

## Contenido

1. Introducción .....	93
2. Determinación de eventos de conducción .....	95
3. Efecto de los eventos de conducción – Flujos máxicos.....	99
4. Efecto de los eventos de conducción – Aceleración / deceleración .....	105
5. Conclusiones.....	111

## 1. Introducción

El patrón de conducción de un vehículo, definido por los arranques, paradas y grados de aceleración y deceleración, puede considerarse sosegado o agresivo. La conducción sosegada se caracteriza por aceleraciones y deceleraciones progresivas, en las cuales el conductor aprovecha la inercia del vehículo, y evita frenar más de lo necesario, manteniéndose en movimiento la mayor parte del tiempo, disminuyendo los arranques y paradas del vehículo. En la conducción agresiva, las aceleraciones y deceleraciones son más súbitas o rápidas, requiriendo el uso constante de los frenos, y llevando a que haya muchas paradas y arranques innecesarios.

La conducción eficiente es más sosegada, y conduce a ahorrar combustible, ya que las aceleraciones súbitas son ineficientes. Además, el frenado constante representa una disipación de energía considerable. El ahorro de combustible se traduce directamente en ahorro económico para los propietarios de los vehículos, así como en una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por otro lado, otras emisiones, tales como CO, hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno y partículas, también se pueden ver afectadas por la agresividad en la conducción. Adicionalmente, la conducción sosegada representa ahorros en el mantenimiento del vehículo, debido a que se desgastan menos ciertos sistemas, y con ella se asocia una conducción más segura. Se han reportado disminuciones en el número y la gravedad de los accidentes de tránsito cuando se implementan técnicas de conducción eficiente.

El consumo de energía durante el movimiento de un vehículo está asociado con las diferentes resistencias que éste debe vencer, como se ilustra en la figura 4.1.

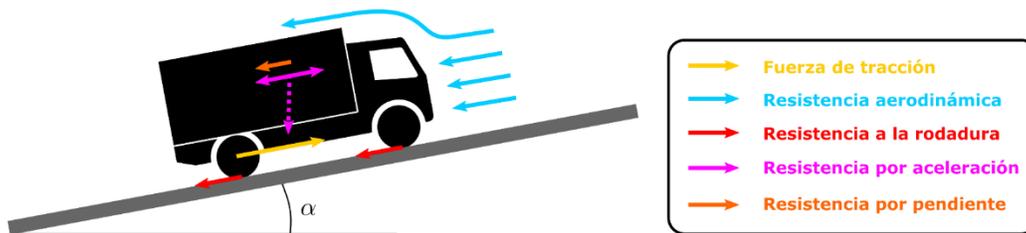


Figura 4.1. Resistencias al avance de un vehículo.

La fuerza de tracción en las ruedas se utiliza para vencer la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura, la resistencia por aceleración, y la resistencia por pendiente.

La resistencia aerodinámica se genera debido a que el vehículo se enfrenta al aire cuando se mueve por una vía, teniendo que usar energía para desplazar el volumen de aire que ocupa, y para llenar el vacío que deja tras de sí. Además, el roce del aire contra la superficie del vehículo genera fricción y una resistencia al avance. Esta resistencia depende de la velocidad del vehículo, de la velocidad del viento, del área frontal del vehículo, y de su coeficiente aerodinámico. Es importante notar que la fuerza de resistencia aerodinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad del vehículo, por lo tanto, si la velocidad pasa a ser el doble, la resistencia para valer cuatro veces lo que era. También cabe mencionar

que la resistencia aerodinámica es poco significativa a bajas velocidades, pero se vuelve relevante a velocidades altas (por encima de 60 km/h).

La resistencia a la rodadura se genera porque el vehículo debe invertir energía para deformar los neumáticos, a medida que éstos giran. También hace falta vencer la fricción que hay entre las llantas y el piso, y mover el aire que rodea a las llantas. En la Figura 4.2 se presentan los aportes de los diferentes componentes de la resistencia a la rodadura.

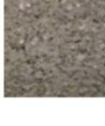
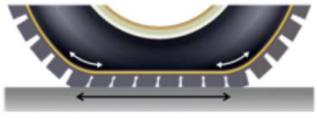
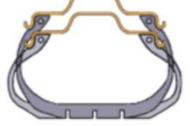
Qué	Superficie de la rueda y aire	Grabado de la llanta			Pared lateral y parte inferior		
		Deslizamiento en el piso	Deformación → disipación de energía			Flexión	Cizalladura
Circulación de aire	Flexión		Compresión	Cizalladura			
Cómo							
Aporte	< 15%		60 - 70 %			20 - 30 %	

Figura 4.2. Resistencia a la rodadura.

Se observa que el mayor aporte a la resistencia a la rodadura está en la deformación de las llantas, lo cual está estrechamente relacionado con la presión de inflado.

La resistencia de aceleración está asociada con los cambios de velocidad en función del tiempo, y puede representar un aporte positivo o negativo al movimiento del vehículo. Siempre que se quiere aumentar la velocidad, habrá una resistencia en contra, la cual es proporcional al peso del vehículo. Sin embargo, la inercia del vehículo hace que cuando se desee disminuir la velocidad del vehículo, no se tenga que realizar un esfuerzo de tracción, sino que este efecto se vuelve un aliado para vencer las otras resistencias al movimiento. Por esta razón las deceleraciones causan menor consumo de combustible (equivalente a mayor rendimiento, expresado en km/gal), y por lo tanto, menores emisiones contaminantes.

La resistencia por pendiente depende del peso del vehículo y de la inclinación de la vía. Si la pendiente es positiva, es decir, si el vehículo sube una cuesta, la resistencia por pendiente es positiva y se suma a lo que tiene que vencer la tracción del vehículo. Sin embargo, cuando el vehículo realiza descensos, la inclinación es negativa, haciendo que la pendiente ayude a la tracción. En las mediciones de este proyecto, el aporte de la pendiente es modesto, ya que en las rutas de prueba las pendientes tuvieron valores en el rango  $\pm 5\%$ .

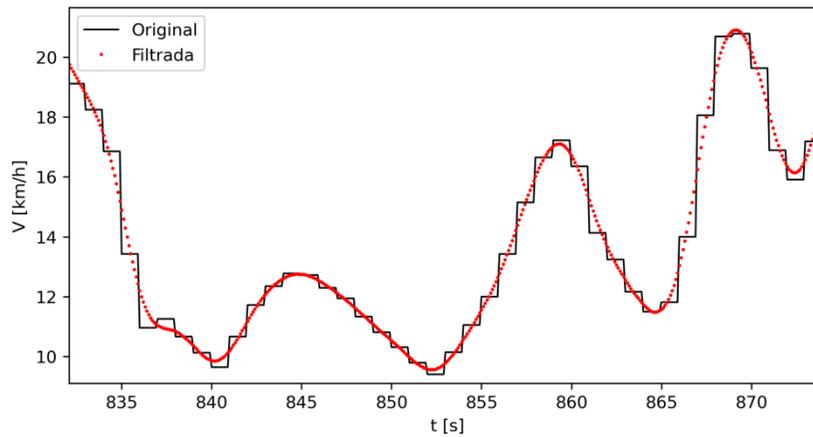
Las ineficiencias durante la conducción están asociadas con la operación del motor, de la transmisión del vehículo, el estado de la vía, la presión de las llantas, el estado de mantenimiento del vehículo, así como a ciertas prácticas del conductor. Por ejemplo, el grado de carga, respecto a lo permitido, así como la distribución de ésta en el área de carga, puede influir de forma significativa en el consumo de combustible durante un viaje. El análisis que se presenta a continuación, a pesar de no considerar este

tipo de variables, sirve para conocer como los eventos de conducción afectan el consumo de combustible y las emisiones de vehículos de carga en Colombia, lo cual es relevante para plantear programas de educación en conducción eficiente.

## 2. Determinación de eventos de conducción

Los vehículos de carga medidos en este proyecto siguieron un ciclo de conducción, previamente determinado para cada categoría: autobuses, camiones, y tractocamiones. Se realizaron varias pruebas en cada vehículo, con el fin de garantizar repetibilidad y validez de los resultados. Para identificar los eventos de conducción, se utilizaron todas las pruebas válidas, de todos los vehículos medidos.

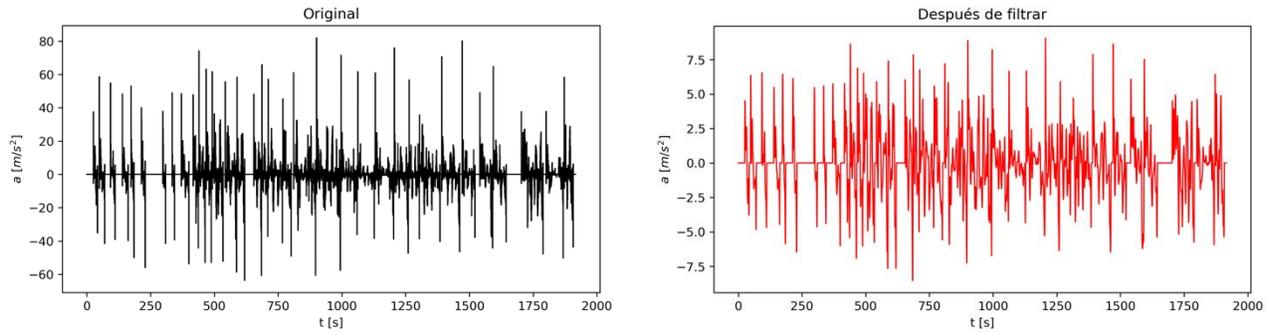
La velocidad del vehículo se usó como señal de referencia para identificar los eventos de ralentí, aceleración, y deceleración de las pruebas. Su medición se realizó mediante un sensor de posicionamiento global (GPS), con una frecuencia de 10 datos por segundo. Esto resulta en una señal con escalones, ya que el vehículo no manifiesta cambios de velocidad en intervalos de tiempo tan cortos. Los datos de velocidad son el insumo para determinar la aceleración instantánea del vehículo, la cual se calcula como su derivada. Sin embargo, el proceso de derivación amplifica ruidos o imperfecciones en las señales, por lo cual fue necesario filtrar la señal original, con el fin de tener una señal equivalente, pero suavizada, que permitiera determinar la aceleración en cada instante. En la figura 4.3 se muestra un ejemplo de este proceso de filtrado.



*Figura 4.3. Filtrado de los datos de velocidad.*

En todos los casos se verificó que la integral de la señal filtrada (la cual equivale a la distancia recorrida) fuera similar a la correspondiente a los datos originales. En todos los casos se verificó que error en la distancia después de filtrar se mantuvo por debajo de 0.5 %.

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. Como ejemplo, en la figura 4.4 se presentan los resultados de aceleración para una prueba en un autobús, para los datos originales, y para los datos de velocidad filtrados.



a) Aceleración de datos sin filtrar

b) Aceleración de datos filtrados

*Figura 4.4. Efecto del filtrado de los datos de velocidad sobre la aceleración.*

La figura anterior evidencia la necesidad de filtrar los datos de velocidad, antes de calcular la aceleración, pues, como se observa en la parte a de ésta, los valores de aceleración son atípicamente altos (tener en cuenta que la aceleración gravitacional es de aproximadamente 9.8 m/s<sup>2</sup>, y los vehículos normalmente suelen experimentar aceleraciones por debajo de ésta).

Una vez se calcula la aceleración, es posible usarla en la determinación de los eventos de conducción, según las reglas mostradas en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.1. 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).

Aplicando los criterios anteriores a los datos de las pruebas, es posible diferenciar entre los tres modos de conducción, como se muestra en la figura 4.5. Se puede observar los eventos de ralenti en color azul, los de aceleración en color rojo, y los de deceleración en color verde. Esta discriminación por eventos de conducción para los datos instantáneos de las pruebas, permite también discriminar los datos de consumo de combustible, distancia, y emisiones contaminantes correspondientes a cada uno de éstos.

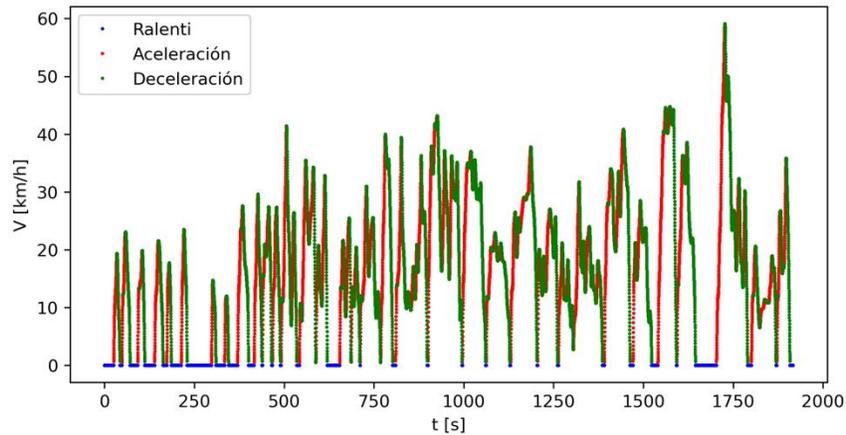


Figura 4.5. Eventos de conducción para una prueba de autobuses.

En la figura 4.6 se muestra una ampliación de la figura anterior, en la cual se observa claramente la secuencia de eventos que tienen lugar durante la conducción. Algunos de estos eventos tienen duraciones muy bajas, como por ejemplo la deceleración que se observa alrededor de 1350 s en esta figura.

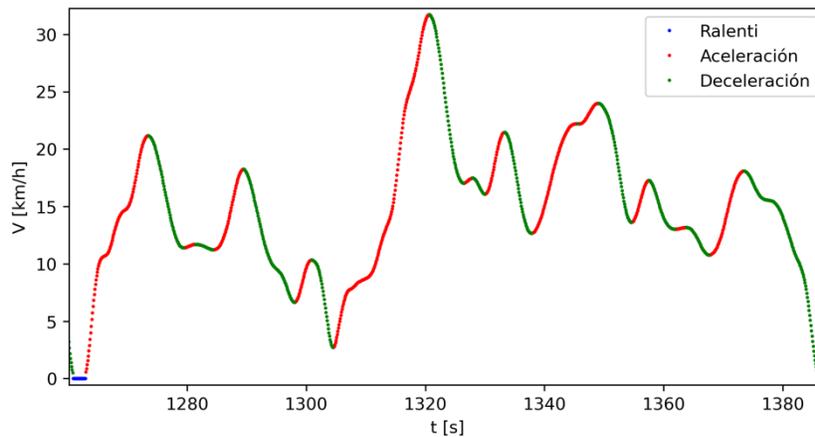


Figura 4.6. Vista ampliada de eventos de conducción.

Por este motivo, después de discriminar los datos por eventos de conducción, se hizo una depuración, para considerar en la etapa posterior, únicamente aquellos eventos que tuvieran 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 4.2 presenta un resumen con el total de eventos de conducción relevantes para las pruebas del proyecto. Las categorías se identifican como AB: Autobuses, C2P: Camiones C2 pequeños, C2G: Camiones C2 grandes, y TC: Tractocamiones.

*Tabla 4.2. Resumen de los eventos de conducción.*

Ciudad	Categoría	Cant. Ev. ralenti	Cant. Ev. acel.	Cant. Ev. decel.
Bogotá	AB	605	1761	1703
	C2P	520	1320	1141
	C2G	687	1622	1456
	TC	552	1418	1280
Barranquilla	AB	371	1187	1319
	C2P	347	955	963
	C2G	382	1029	964
	TC	326	967	850
	<b>Total</b>	<b>3790</b>	<b>10259</b>	<b>9676</b>

Como se observa en la tabla anterior, hay aproximadamente 3800 eventos de ralenti, y cerca de 10000 de aceleración y deceleración, todos con una duración mínima de 5 segundos. Se tienen 976 eventos de ralenti para autobuses, 867 para camiones C2 pequeños, 1069 para camiones C2 grandes, y 878 para tractocamiones. Se identificaron 2948 eventos de aceleración para autobuses, 2275 para camiones C2 pequeños, 2651 para camiones C2 grandes, y 2385 para tractocamiones. Finalmente, se tienen 3022 eventos de deceleración para autobuses, 2104 para camiones C2 pequeños, 2420 para camiones C2 grandes, y 2130 para tractocamiones. En total se identificaron 23725 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 máxicos 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 máxico (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 CO<sub>2</sub>), 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 máxicos.

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 CO<sub>2</sub>) y mg/km (para las demás emisiones gaseosas y PM), y #/km (para PN).

### 3. Efecto de los eventos de conducción – Flujos máxicos

En esta sección se comparan los flujos máxicos de combustible y emisiones 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%).

Antes de proceder a analizar los datos completos, se realizó el análisis del consumo de combustible y de las emisiones de CO<sub>2</sub> para cada ciudad, y se verificó, que aunque los valores de las variables pueden ser diferentes, la existencia de diferencias significativas entre eventos para cada variable no cambia con la altitud (Bogotá: 2600m, Barranquilla: 0 m). Esto se puede observar en la figura 4.7, donde se muestra un ejemplo para la categoría de autobuses.

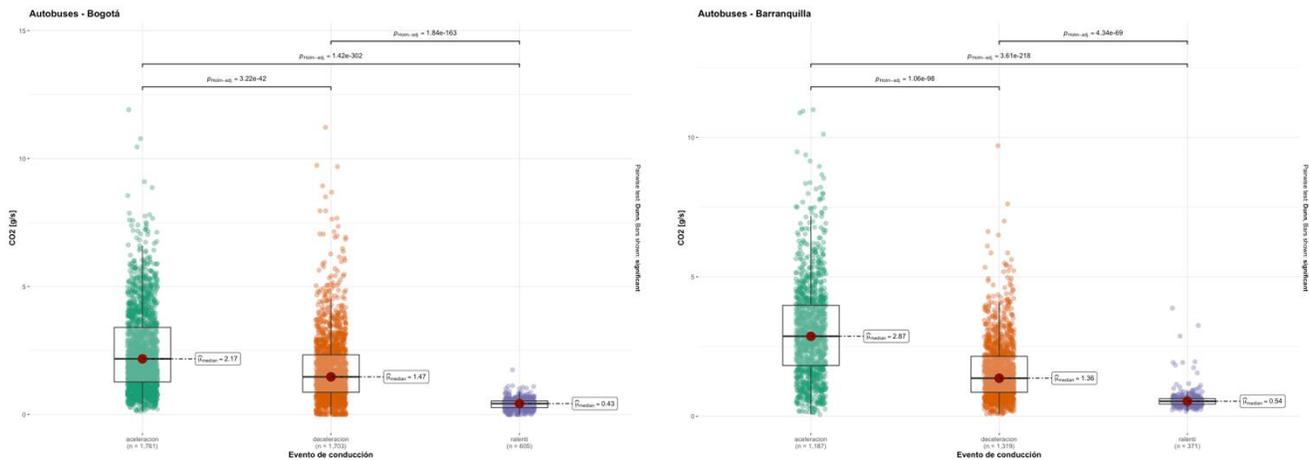


Figura 4.7. Efecto la altitud sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> por evento de conducción.

En esta figura las barras horizontales conectan los eventos que tienen diferencia estadística significativa (con confianza del 95%) entre sí. Se observa como todos los eventos para autobuses son diferentes entre sí, tanto para los datos de Bogotá, como para los de Barranquilla. Esta verificación también se realizó para las demás categorías vehiculares. Como era de esperarse, el comportamiento relativo de los eventos de conducción no se ve afectado por la altitud.

También se verificó cómo afecta el nivel de desarrollo tecnológico en los sistemas control de emisiones (vehículos antiguos y recientes) al comportamiento de las variables características de los eventos (ver

figura 4.8). En esta figura las barras conectan los eventos que tienen diferencia significativa entre sí, y sobre éstas aparece el respectivo valor p, calculado mediante la prueba de Dunn.

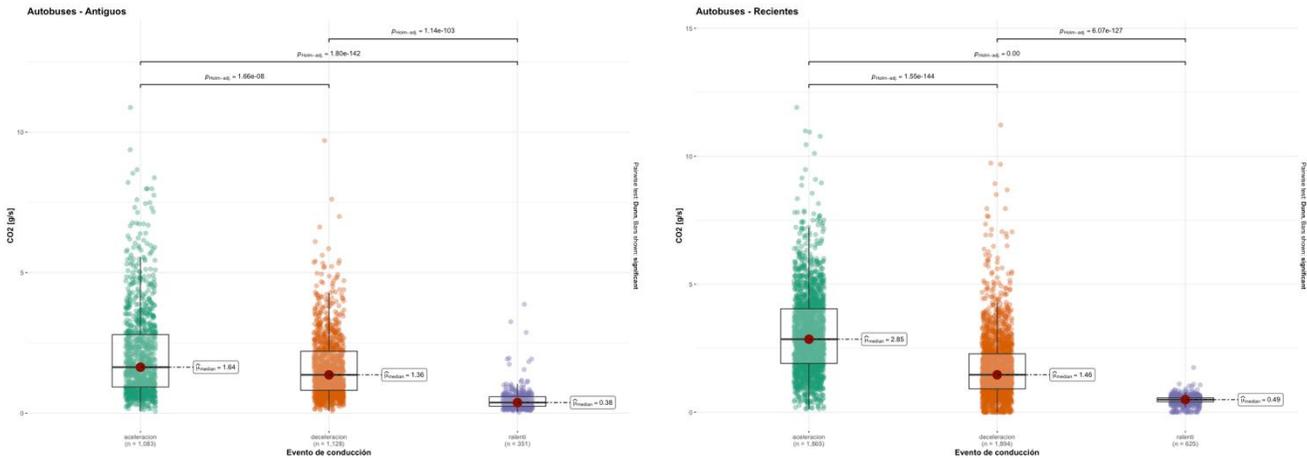


Figura 4.8. Efecto del nivel de desarrollo tecnológico sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> por evento de conducción.

De nuevo, se comprueba que la existencia de diferencias significativas entre eventos no se ve afectada por la tecnología de control de emisiones. Esto sugiere que en los análisis posteriores se pueden mezclar, para cada categoría vehicular, los resultados de todas las altitudes y tecnologías de emisión, con el fin de estudiar el efecto de los eventos de conducción.

Se empleó la prueba estadística de Kolmogorv-Smirnov para hacer un análisis de normalidad a la distribución de los residuales obtenidos a partir del análisis de varianza. En todos los casos se encontró que no se cumple la hipótesis de normalidad (valor  $p < 0.05$ ). Por lo tanto, el valor representativo de cada muestra debe ser su mediana, y no su promedio. El análisis de varianza aportó el valor de las medianas para cada una de las 8 variables (consumo de combustible, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, HC, PM, y PN). 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 dichas medianas. 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 4.9 se presentan los resultados de las emisiones de PM para tractocamiones, y en la figura 4.10 se muestran las emisiones de HC para camiones C2 grandes.

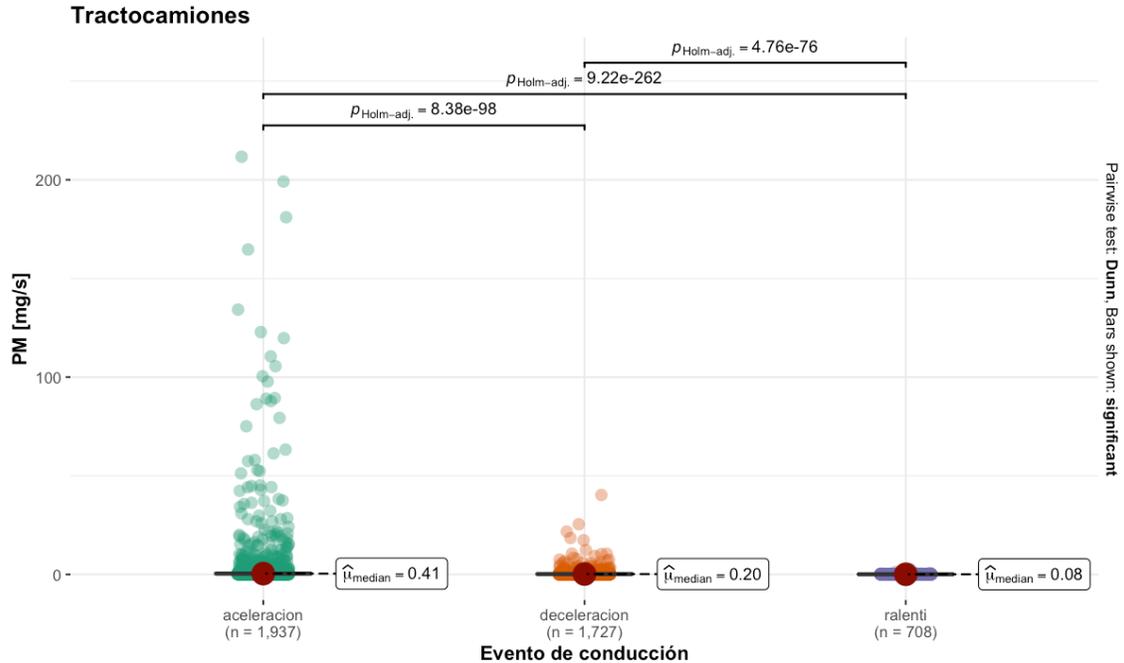


Figura 4.9. Emisiones de PM de tractocamiones.

La figura anterior muestra claramente que las emisiones de PM en tractocamiones se forman principalmente durante los eventos de aceleración, y que son bastante menores para las deceleraciones. Además, se observa que hay diferencia estadística significativa entre las emisiones de los diferentes eventos de conducción (valores p menores a 0.05).

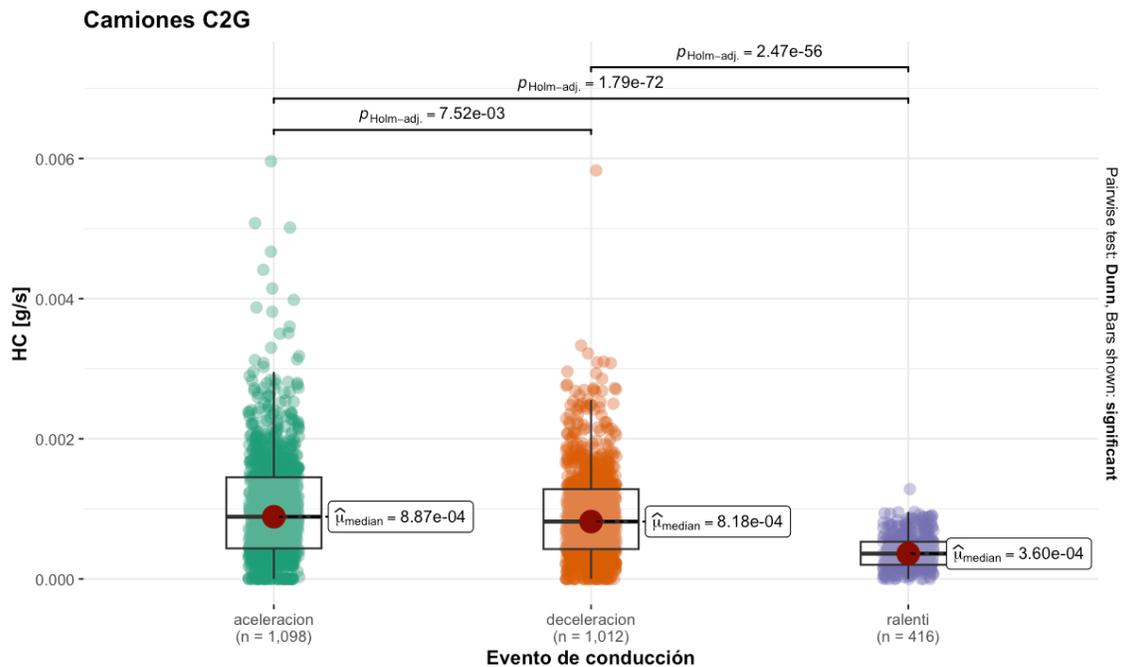


Figura 4.10. Emisiones de HC de camiones C2 grandes.

En la figura 4.10 se observa la misma tendencia a tener mayores emisiones de HC para aceleración que para deceleración, y las menores emisiones corresponden a los eventos de ralenti. En todos los casos los valores son muy bajos.

*Tabla 4.3. Resultados de flujos máxicos de los eventos de conducción.*

Categoría	Evento	Comb. [g/s]	CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO [g/s]	NO <sub>2</sub> [g/s]	HC [g/s]	PM [mg/s]	PN [# x 10 <sup>12</sup> /s]
<b>AB</b>	Acel.	0.924	2.46	0.0113	0.0144	0.00124	0.000375	0.121	0.385
	Decel.	0.238	1.43	0.00835	0.0115	0.00101	0.000317	0.0822	0.307
	Ralenti	0.205	0.47	0.00383	0.00317	0.000431	0.000191	0.0226	0.0946
<b>C2P</b>	Acel.	0.94	2.81	0.012	0.0142	0.00236	0.000393	0.166	0.428
	Decel.	0.227	1.53	0.00984	0.00994	0.00185	0.000345	0.11	0.335
	Ralenti	0.185	0.489	0.00487	0.00285	0.000925	0.000121	0.0414	0.146
<b>C2G</b>	Acel.	2.14	6.36	0.0454	0.0364	0.00333	0.000887	0.304	0.99
	Decel.	0.404	3.2	0.0281	0.0232	0.00279	0.000818	0.189	0.743
	Ralenti	0.306	0.878	0.00836	0.00698	0.00126	0.00036	0.0454	0.191
<b>TC</b>	Acel.	3.66	10.5	0.0612	0.0707	0.00441	0.000786	0.411	1.53
	Decel.	0.791	3.28	0.0216	0.0306	0.00282	0.000549	0.203	0.828
	Ralenti	0.612	1.64	0.00656	0.0185	0.00178	0.000322	0.0824	0.342

En la tabla 4.3 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 ligeramente mayores que los correspondientes a los eventos de ralenti.

La tabla 4.4 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 4.4. Diferencia estadística entre los flujos para los eventos de conducción.*

Categoría	Comparación	Comb. [g/s]	CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO [g/s]	NO <sub>2</sub> [g/s]	HC [g/s]	PM [mg/s]	PN [# x 10 <sup>12</sup> /s]
<b>AB</b>	Acel. – Decel.	0	7.3x10 <sup>-125</sup>	9.83x10 <sup>-27</sup>	5.24x10 <sup>-25</sup>	2.25x10 <sup>-16</sup>	1.43x10 <sup>-8</sup>	1.08x10 <sup>-50</sup>	5.76x10 <sup>-47</sup>
	Acel. – Ral.	0	0	4.8x10 <sup>-168</sup>	0	4.7x10 <sup>-99</sup>	3.02x10 <sup>-43</sup>	0	0
	Decel. – Ral.	2.39x10 <sup>-15</sup>	3.6x10 <sup>-228</sup>	1.06x10 <sup>-90</sup>	2.5x10 <sup>-273</sup>	6.95x10 <sup>-54</sup>	1.05x10 <sup>-23</sup>	3.4x10 <sup>-164</sup>	7.4x10 <sup>-216</sup>
<b>C2P</b>	Acel. – Decel.	0	5.8x10 <sup>-126</sup>	2.17x10 <sup>-15</sup>	3.9x10 <sup>-30</sup>	1.02x10 <sup>-20</sup>	8.05x10 <sup>-05</sup>	6.71x10 <sup>-37</sup>	2.27x10 <sup>-33</sup>
	Acel. – Ral.	0	0	9.7x10 <sup>-119</sup>	0	4.6x10 <sup>-145</sup>	8.67x10 <sup>-71</sup>	8.2x10 <sup>-246</sup>	0
	Decel. – Ral.	2.79x10 <sup>-18</sup>	3x10 <sup>-195</sup>	1.99x10 <sup>-64</sup>	7.2x10 <sup>-231</sup>	1.18x10 <sup>-75</sup>	6.57x10 <sup>-50</sup>	5.1x10 <sup>-123</sup>	9.7x10 <sup>-184</sup>
<b>C2G</b>	Acel. – Decel.	0	2.3x10 <sup>-121</sup>	3.83x10 <sup>-43</sup>	1.82x10 <sup>-63</sup>	8.07x10 <sup>-09</sup>	0.007523	9.33x10 <sup>-50</sup>	3.85x10 <sup>-38</sup>
	Acel. – Ral.	0	0	0	0	2.4x10 <sup>-126</sup>	1.79x10 <sup>-72</sup>	0	0
	Decel. – Ral.	1.58x10 <sup>-32</sup>	2.1x10 <sup>-216</sup>	2.5x10 <sup>-201</sup>	1x10 <sup>-194</sup>	5.08x10 <sup>-82</sup>	2.47x10 <sup>-56</sup>	2.8x10 <sup>-185</sup>	9.3x10 <sup>-218</sup>
<b>TC</b>	Acel. – Decel.	1.7x10 <sup>-293</sup>	3.3x10 <sup>-226</sup>	8.75x10 <sup>-64</sup>	4.6x10 <sup>-133</sup>	1.96x10 <sup>-37</sup>	3.88x10 <sup>-10</sup>	8.38x10 <sup>-98</sup>	7x10 <sup>-106</sup>
	Acel. – Ral.	0	0	1.5x10 <sup>-175</sup>	1.8x10 <sup>-273</sup>	1.6x10 <sup>-81</sup>	1.14x10 <sup>-39</sup>	9.2x10 <sup>-262</sup>	1.5x10 <sup>-284</sup>
	Decel. – Ral.	8.48x10 <sup>-38</sup>	3.22x10 <sup>-77</sup>	7.59x10 <sup>-53</sup>	1.89x10 <sup>-61</sup>	8.31x10 <sup>-21</sup>	5.71x10 <sup>-17</sup>	4.76x10 <sup>-76</sup>	7.37x10 <sup>-83</sup>

Los resultados de esta tabla son todos menores a 0.05, con el mayor valor p igual a 0.007523. 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 4.3 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 4.11 se muestran los resultados para consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>.

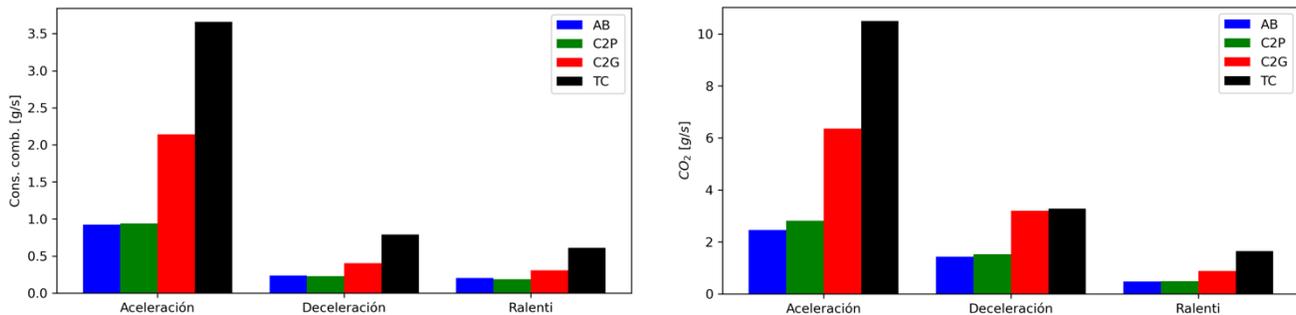


Figura 4.11. Efecto sobre consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>.

Se observa que para cada categoría vehicular, tanto el consumo de combustible como las emisiones de CO<sub>2</sub> son significativamente mayores para los eventos de aceleración. Además, los valores correspondientes a los eventos de deceleración son ligeramente 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 CO<sub>2</sub> en todas las categorías, si no que se refleja la cilindrada del motor, la cual es igual para autobuses y camiones C2 pequeños, aumenta a aproximadamente el doble para camiones C2 grandes, y nuevamente aumenta aproximadamente al doble a partir de esta categoría, para los tractocamiones.

En el caso de los eventos de ralenti, se observa que aunque el consumo de combustible y las emisiones son las más bajas, están lejos de ser despreciables, por lo que influyen de forma significativa sobre el consumo total y las emisiones totales de un viaje de un vehículo, de forma proporcional al tiempo que éste pase detenido con el motor encendido, lo cual es muy común en vehículos de carga. Aquí nuevamente se nota de forma directa el efecto de la cilindrada del motor.

La figura 4.12 presenta los resultados de flujos máxicos de emisiones de CO y de HC, ambas emisiones altamente perjudiciales para la salud humana.

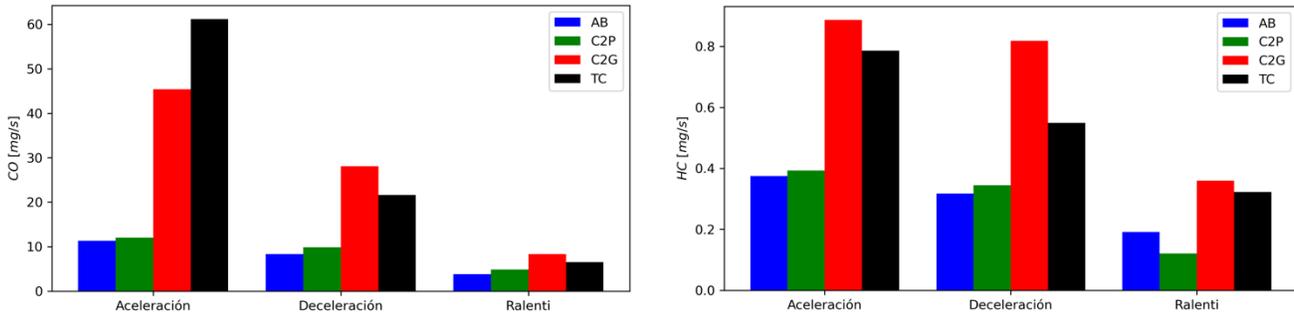


Figura 4.12. Efecto sobre emisiones de CO y HC.

Se observa que las emisiones de CO son mucho más bajas que las de CO<sub>2</sub> (alrededor de 150 veces menores). En el caso de las emisiones de HC, son alrededor de 1000 veces menores que la de CO<sub>2</sub>. Esto se debe a que los motores diesel tienen alta eficiencia de combustión, y estas emisiones no son una gran preocupación para este tipo de motores. A pesar de que las diferencias observadas son estadísticamente significativas, se observa que las emisiones de HC varían menos que las otras, con el tipo de evento de conducción, debido a que en todos los eventos son muy bajas.

La figura 4.13 presenta los resultados correspondientes a óxidos de nitrógeno. Se observa que para todos los eventos de conducción, la emisión de NO<sub>2</sub> es aproximadamente 10 veces menor que la emisión de NO, y se ve que el tamaño de los vehículos también afecta de forma directa los flujos máscicos de estas emisiones.

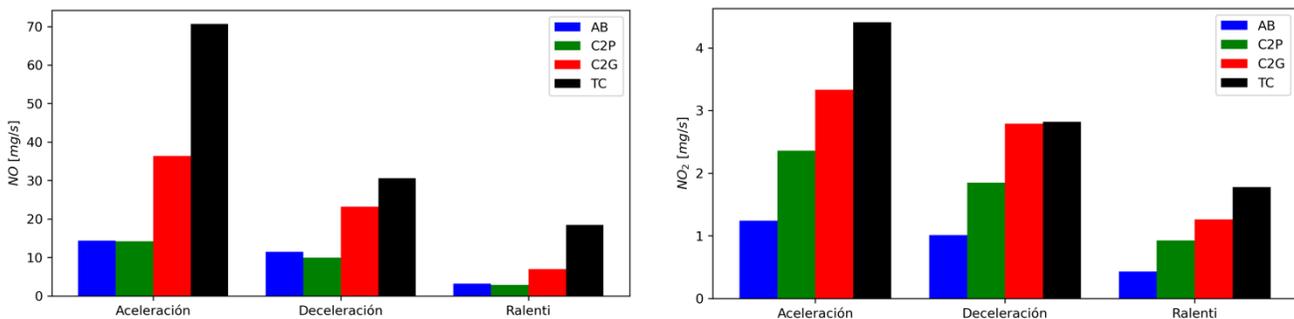


Figura 4.13. Efecto sobre emisiones de NOx.

Las emisiones de partículas se muestran en la figura 4.14. Se observa que los eventos de aceleración afectan más los flujos de partículas para vehículos grandes (C2G y TC) que para los de menor tamaño. Este efecto se debe a que un mismo aumento de aceleración implica una resistencia mayor a mayor tamaño del vehículo, y esto se traduce en mayor consumo de combustible y mezclas más ricas, lo cual contribuye a aumentar la formación de partículas.

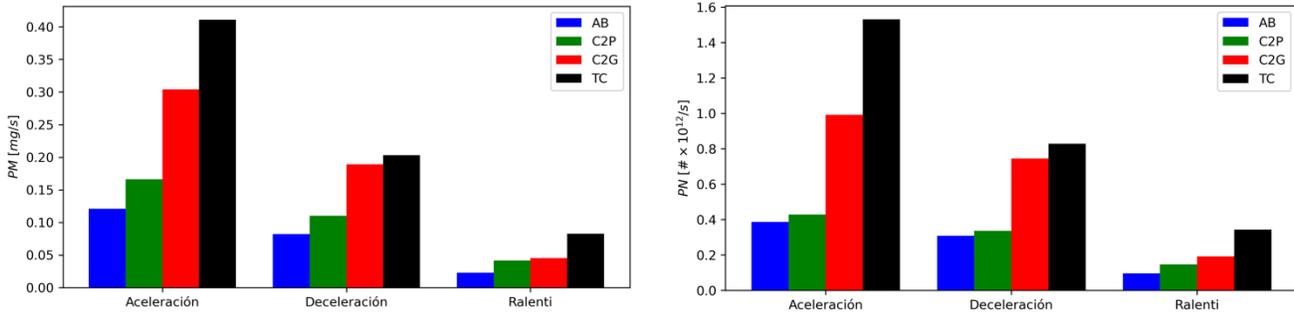


Figura 4.14. Efecto sobre emisiones de partículas.

## 4. Efecto de los eventos de conducción – Aceleración / deceleración

En el caso de los eventos de aceleración y deceleración, los cuales se dan con el vehículo en movimiento, es posible asociar una distancia recorrida a cada evento, y por lo tanto, expresar las emisiones correspondientes también en unidades de masa o número por unidad de distancia. Estas unidades coinciden con las de los factores de emisión (FE). Es más, estos resultados se pueden interpretar como FE asociados a cada evento de conducción.

En este caso, una exploración de los resultados permitió identificar que, en general, hay diferencia entre los datos a baja aceleración, con aquellos correspondiente a alta aceleración. El umbral que se identificó para separar los niveles de aceleración es  $0.5 \text{ m/s}^2$ . Los datos correspondientes a los eventos de deceleración no mostraron un comportamiento diferenciado con el nivel de aceleración. Por lo tanto, los resultados de esta sección se presentan para tres eventos: aceleración para niveles bajo y alto de aceleración, y deceleración.

Se siguió el mismo procedimiento que en la sección anterior: análisis de varianza, prueba de normalidad a los residuales de las muestras (Kolmogorov-Smirnov), prueba de diferencia de medianas (Kruskal-Wallis), y análisis post-hoc (Dunn). El nivel de confianza estadístico usado es 95%, por lo cual, cualquier valor p por debajo de 0.05 indica que no se cumple normalidad, y que hay diferencias estadísticas significativas.

Como ejemplo de los resultados del análisis, en la figura 4.15 se muestran las emisiones de  $\text{CO}_2$  para camiones C2 grandes, y en la figura 4.16 las emisiones de PN para camiones C2 pequeños.

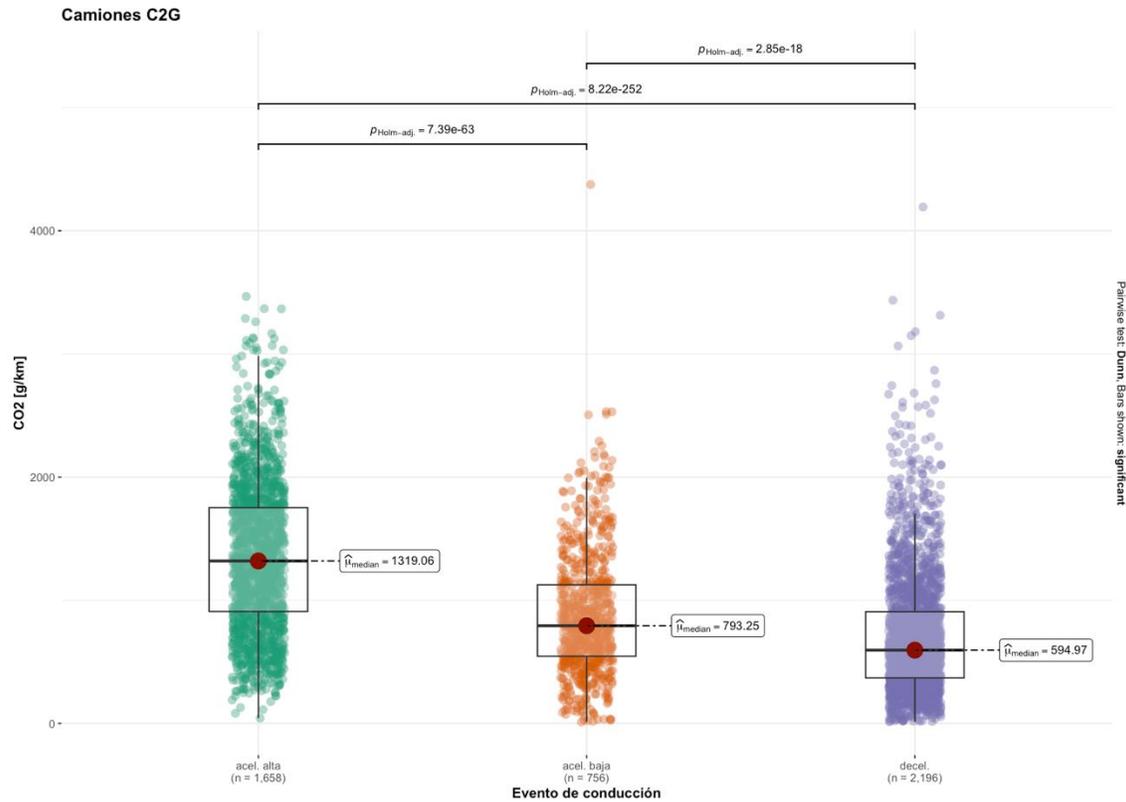


Figura 4.15. Efecto del evento de conducción sobre los FE de CO<sub>2</sub> para C2G.

Esta figura evidencia que las emisiones de CO<sub>2</sub> son mucho mayores a aceleraciones altas, que a baja aceleración, y que las menores emisiones de CO<sub>2</sub> se dan para los eventos de deceleración. Las diferencias que se observan entre las medianas son significativas, ya que los valores p indicados en las barras horizontales de la parte superior son todos menores que 0.05.

En el caso de las emisiones de PN (figura 4.16), se observa la misma tendencia que en la figura 4.15, y aunque en este caso las diferencias son menores, siguen siendo significativas, de a los valores p determinados. Los resultados consolidados de los eventos de conducción en movimiento, se presentan en la tabla 4.5.

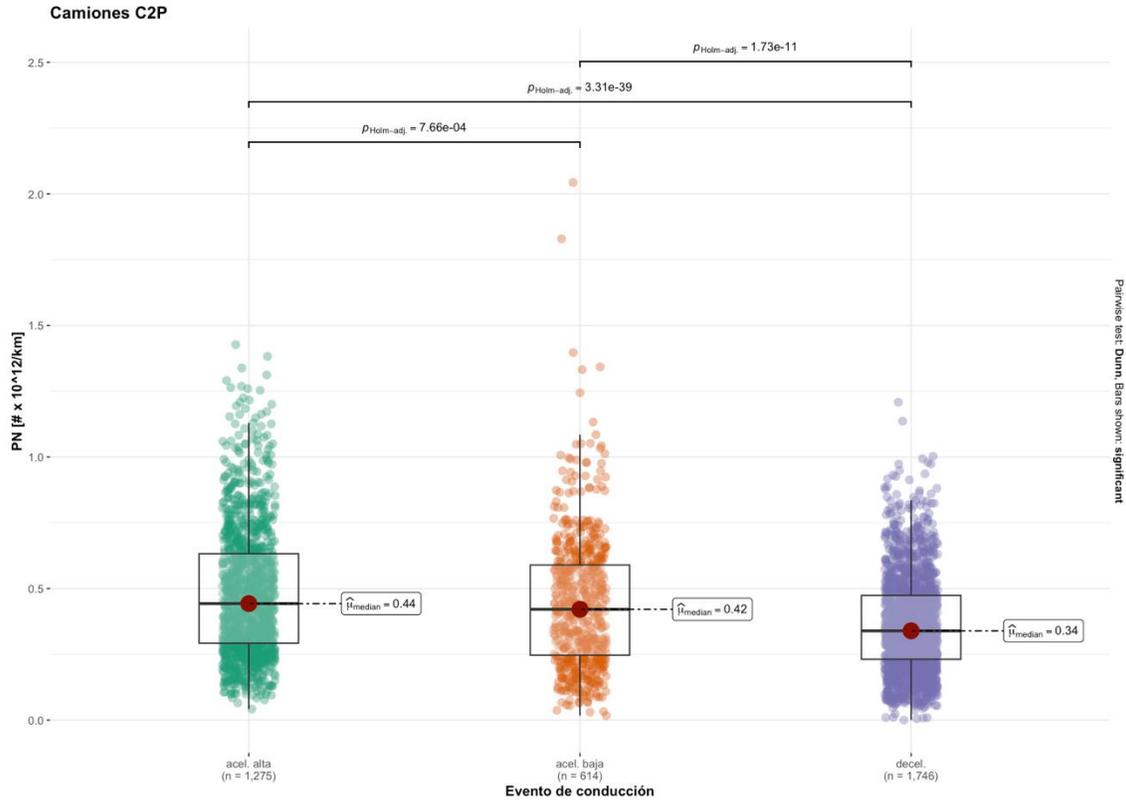


Figura 4.16. Efecto del evento de conducción sobre los FE de PN para C2P.

Tabla 4.5. Resultados de los FE asociados con los eventos de conducción.

Categoría	Evento	Rend. comb. [km/gal]	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NO <sub>2</sub> [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 <sup>12</sup> /km]
AB	Acel. alta	16.2	544	2.54	2.97	0.251	0.0733	26.5	0.396
	Acel. baja	26.1	308	1.44	2.21	0.208	0.052	15.5	0.31
	Decel.	64.2	299	1.73	2.43	0.197	0.0613	17	0.307
C2P	Acel. alta	16.9	554	2.48	2.79	0.371	0.0689	32.7	0.443
	Acel. baja	23.6	357	2.23	2.16	0.361	0.0774	22.5	0.421
	Decel.	77.2	279	1.86	1.92	0.294	0.0601	20.7	0.339
C2G	Acel. alta	7.02	1319	8.39	6.93	0.558	0.15	65	1.06
	Acel. baja	11.9	793	6.38	4.74	0.61	0.172	34.9	0.85
	Decel.	40.4	595	5	4.27	0.493	0.147	35.2	0.743
TC	Acel. alta	4.34	2086	16.6	15	0.604	0.133	80.1	1.79
	Acel. baja	7.06	1359	5.68	12.4	0.553	0.106	49	1.35
	Decel.	22.8	527	4.01	5.66	0.348	0.0849	31.5	0.826

La tabla 4.6 presenta los valores p de las comparaciones de las medianas de los FE de los tres eventos de conducción en movimiento. 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 4.6. Diferencia estadística entre los FE asociados con los eventos de conducción.

Categoría	Evento	Rend. comb. [km/gal]	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NO <sub>2</sub> [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]	PN [# x 10 <sup>12</sup> /km]
AB	Acel. alta – Acel. baja	3.45x10 <sup>-50</sup>	8.35x10 <sup>-62</sup>	1.88x10 <sup>-27</sup>	3.97x10 <sup>-23</sup>	4.55x10 <sup>-05</sup>	2.45x10 <sup>-06</sup>	1.93x10 <sup>-41</sup>	6.6x10 <sup>-20</sup>
	Acel. alta – Decel.	0	1.6x10 <sup>-185</sup>	2.77x10 <sup>-34</sup>	2.07x10 <sup>-31</sup>	4.72x10 <sup>-13</sup>	1.81x10 <sup>-07</sup>	1.03x10 <sup>-72</sup>	2.55x10 <sup>-70</sup>
	Decel. – Acel. baja	1.16x10 <sup>-56</sup>	0.977466	7.94x10 <sup>-05</sup>	0.000879	0.994711	0.077451	0.001023	0.314961
C2P	Acel. alta – Acel. baja	5.43x10 <sup>-36</sup>	2.42x10 <sup>-66</sup>	0.004993	8.32x10 <sup>-19</sup>	0.046083	0.386176	7.36x10 <sup>-14</sup>	0.000766
	Acel. alta – Decel.	0	1.3x10 <sup>-257</sup>	1.95x10 <sup>-13</sup>	1.95x10 <sup>-54</sup>	3.55x10 <sup>-12</sup>	0.028523	5.15x10 <sup>-49</sup>	3.31x10 <sup>-39</sup>
	Decel. – Acel. baja	2.1x10 <sup>-147</sup>	6.77x10 <sup>-20</sup>	0.005405	0.002618	0.000796	0.020163	0.000229	1.73x10 <sup>-11</sup>
C2G	Acel. alta – Acel. baja	3.97x10 <sup>-64</sup>	7.39x10 <sup>-63</sup>	1.6x10 <sup>-17</sup>	1.23x10 <sup>-42</sup>	0.128275	0.754497	1.12x10 <sup>-59</sup>	7.22x10 <sup>-23</sup>
	Acel. alta – Decel.	0	8.2x10 <sup>-252</sup>	1.48x10 <sup>-63</sup>	2.2x10 <sup>-118</sup>	0.001239	0.543264	5.6x10 <sup>-105</sup>	4.79x10 <sup>-67</sup>
	Decel. – Acel. baja	4.5x10 <sup>-141</sup>	2.85x10 <sup>-18</sup>	4.46x10 <sup>-05</sup>	0.000546	7.25x10 <sup>-05</sup>	0.480524	0.913632	0.002027
TC	Acel. alta – Acel. baja	1.15x10 <sup>-48</sup>	7.95x10 <sup>-40</sup>	1.27x10 <sup>-42</sup>	1.7x10 <sup>-06</sup>	0.549451	0.070652	1.05x10 <sup>-39</sup>	1.32x10 <sup>-20</sup>
	Acel. alta – Decel.	0	4.5x10 <sup>-245</sup>	6.6x10 <sup>-106</sup>	1.13x10 <sup>-85</sup>	1.51x10 <sup>-12</sup>	4.89x10 <sup>-05</sup>	4.3x10 <sup>-147</sup>	3.7x10 <sup>-121</sup>
	Decel. – Acel. baja	6x10 <sup>-148</sup>	6x10 <sup>-104</sup>	4.89x10 <sup>-16</sup>	7.41x10 <sup>-60</sup>	1.55x10 <sup>-13</sup>	0.009185	1.55x10 <sup>-39</sup>	1.42x10 <sup>-52</sup>

Se resaltan los valores p mayores a 0.05 en esta tabla, para identificar fácilmente las comparaciones que no resultan en una diferencia significativa. Se observa que la mayoría de casos corresponden a las emisiones de HC y de CO, las cuales son muy bajas (ver tabla 4.5), y cuando se dan por distancia recorrida no se diferencian entre sí. En los casos de las otras emisiones que no son estadísticamente diferentes, esto ocurre entre deceleración y aceleración baja: CO<sub>2</sub> y PN en autobuses y PM en camiones C2 grandes. Las diferencias entre aceleración alta y baja, y entre aceleración alta y deceleración son mucho más marcadas.

A continuación se presentan de forma gráfica los resultados de la tabla 4.5, para identificar más fácilmente los comportamientos. En la figura 4.17 se presentan el rendimiento de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> para los eventos de conducción de las diferentes 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 CO<sub>2</sub>.

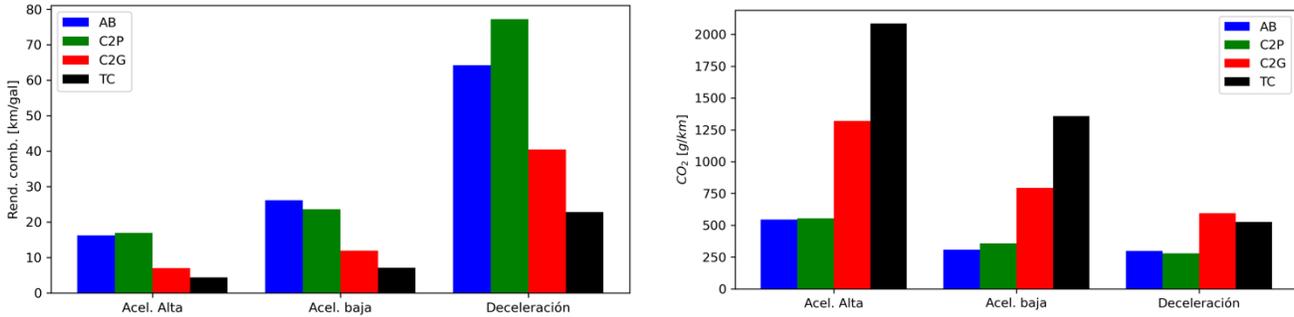


Figura 4.17. Efecto sobre Rendimiento de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>.

Ambas variables presentan el peor resultado para aceleración alta, seguido por aceleración baja, y el mejor resultado corresponde a deceleración. Para cada categoría vehicular, el rendimiento de combustible para los eventos de aceleración baja es el que más se parece al correspondiente al ciclo completo (ver tabla 1.2), siendo menor el de aceleración alta, y el de los eventos de deceleración mucho mayor. En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub>, sucede lo mismo para los tractocamiones y para los camiones C2 grandes. Sin embargo, en el caso de los autobuses y de los camiones C2 pequeños, las emisiones más similares a las del ciclo completo son aquellas correspondiente a los eventos de aceleración alta. Esto se puede deber a que por tratarse de vehículos más pequeños y livianos que las categorías TC y C2G, hay mayor tendencia a tener aceleraciones altas, y por eso estos eventos son más similares a los del ciclo completo.

En la figura 4.18 se presentan los FE de CO y de HC.

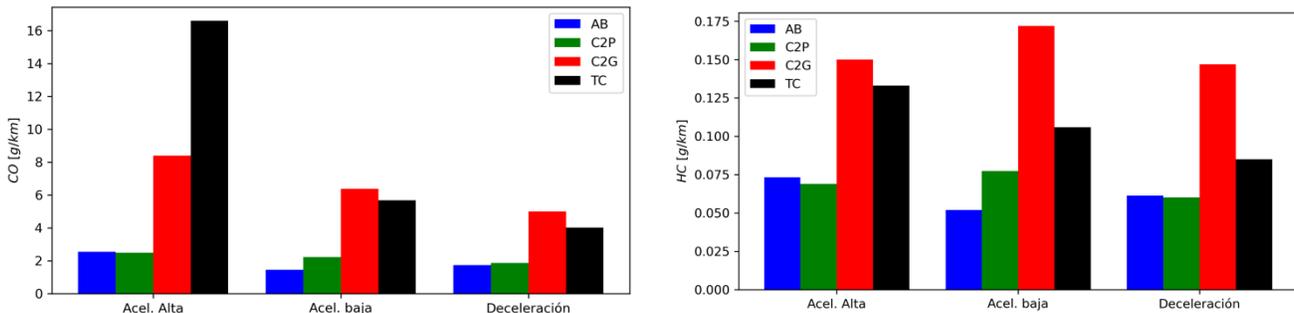


Figura 4.18. Efecto sobre emisiones de CO y HC.

Como se vio en la tabla 4.5, se nota que las emisiones de CO son mayores en eventos de aceleración alta que en aceleración baja, pero hay muy poca diferencia entre aceleración baja y deceleración, y en todos los casos las emisiones son bastante bajas. En el caso de las emisiones de HC, éstas son muy bajas, cerca de 10 veces menos que las de CO, las cuales son aproximadamente 100 veces menores que las de CO<sub>2</sub>, y prácticamente no se nota un efecto de los eventos de aceleración.

En la figura 4.19 se muestran las emisiones de óxidos de nitrógeno. En general, las emisiones de NO son cerca de 20 veces mayores que las de NO<sub>2</sub>.

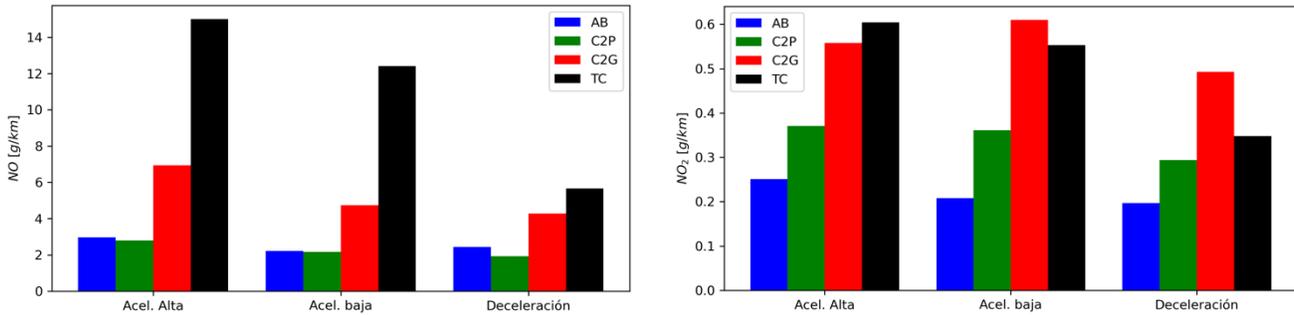


Figura 4.19. Efecto sobre emisiones de NOx.

Para NO<sub>2</sub> sucede algo similar a lo que se observó con los HC: emisiones muy bajas y sin efecto de los eventos de conducción. Las emisiones de NO muestran un disminución para los eventos de aceleración baja, con respecto a aceleración alta, pero la diferencia es casi nula entre aceleración y baja y deceleración, excepto para los tractocamiones.

Finalmente, en la figura 4.20 se presentan los resultados de emisiones de partículas para los eventos de aceleración y deceleración.

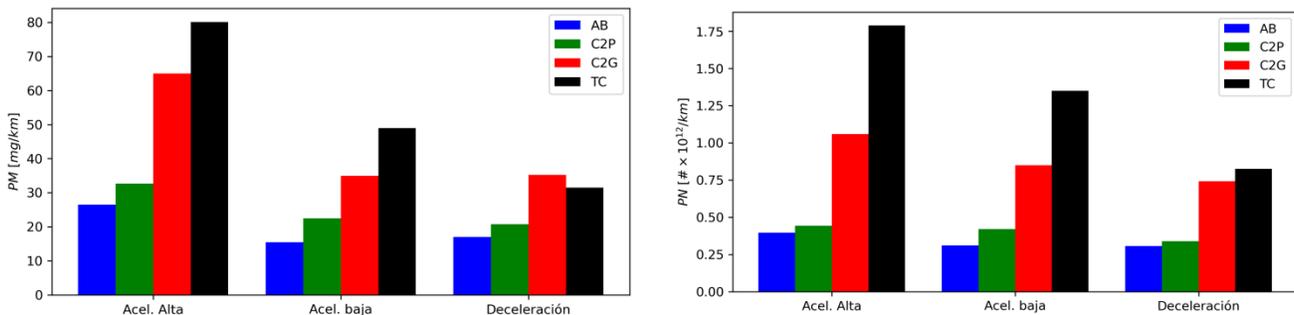


Figura 4.20. Efecto sobre emisiones de partículas.

Tanto para las emisiones de PM como para las de PN se observa una diferencia clara entre los eventos de aceleración alta y baja, siendo más altos para el primer evento de conducción. Sin embargo, la diferencia entre los eventos de aceleración baja y deceleración es poca, con excepción de los tractocamiones, y de PN en camiones C2G.

## 5. 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 diferentes categorías de vehículos pesados. Para cada evento se determinaron los valores acumulados de recorrido, consumo de combustible y emisiones contaminantes (en masa o número), y con estos resultados se determinaron flujos máxicos característicos de cada evento, dividiendo el acumulado respectivo por la duración del evento (mínimo de 5 segundos). De esta forma 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 en movimiento (aceleración y deceleración), 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 usó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, 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 deben representar por su mediana, en lugar de usar el promedio, y en los análisis posteriores se deben emplear 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 puede proceder con un análisis posterior (*post-hoc*) para identificar si hay 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:

- Se identificaron correctamente 23725 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 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.

- El tamaño del motor, indicado por su cilindrada, tuvo un efecto directo sobre el consumo de combustible y sobre el flujo másico de CO<sub>2</sub> en todos los eventos de conducción. Este comportamiento es igual para las emisiones de CO, NO, PM y PN.
- En el caso de NO<sub>2</sub> y HC, los flujos másicos son significativamente menores que para las otras emisiones, y en este caso la diferencia entre los flujos másicos de los eventos de conducción es mucho más baja, aunque significativa.
- 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%.
- Se identificó que hay un umbral de aceleración (0.5 m/s<sup>2</sup>), el cual permite identificar diferencias en el rendimiento de combustible y en los factores de emisión (valores acumulados divididos por la distancia recorrida) de los eventos de aceleración.
- En el caso de los factores de emisión de los eventos de aceleración y deceleración, los factores de emisión de hidrocarburos (HC) fueron significativamente menores (cerca de 10000 veces) que los correspondientes a CO<sub>2</sub>. Además, en este caso no se identificó un efecto significativo del evento de conducción. Algo similar ocurrió con los factores de emisión de NO<sub>2</sub>, los cuales fueron cerca de 2500 veces menores a los de CO<sub>2</sub>, y en los cuales tampoco se observó un efecto claro de los eventos de conducción.
- La diferencia del rendimiento de combustible y de los FE entre los eventos de aceleración alta y aceleración baja, así como entre aceleración alta y deceleración, fue significativa en la mayoría de los casos, excepto para HC en camiones C2 grandes y en tractocamiones.
- En general, se observó poca diferencia del rendimiento de combustible y de los FE entre los eventos de aceleración baja y deceleración, aunque ésta significativa en la mayoría de los casos.

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 los vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros. Entre más agresiva es la conducción (mayores aceleraciones), se consume más combustible y se emite mayor cantidad de casi todos los contaminantes medidos, excepto NO<sub>2</sub> y HC, los cuales presentaron niveles de emisión muy bajos para las categorías vehiculares analizadas. Esto es relevante, ya que la agresividad en la conducción está más relacionada con los hábitos de los conductores que con las condiciones de las vías o del tráfico, y por lo tanto existe un potencial muy grande de reducir consumo de combustible y emisiones contaminantes mediante campañas de educación y sensibilización, lo cual es más rápido y menos costoso que renovar la flota vehicular o mejorar la infraestructura vial.

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 de carga encendidos por periodos prolongados cuando están estacionados,

con lo cual se pueden tener ahorros significativos en el consumo de combustible, en las emisiones contaminantes, y mejorar la calidad del aire en las zonas de carga y estacionamiento. Esto también se puede lograr mediante educación a los conductores, lo cual es especialmente necesario, ya que existe el mito de que los motores diésel no se deben apagar durante el día.