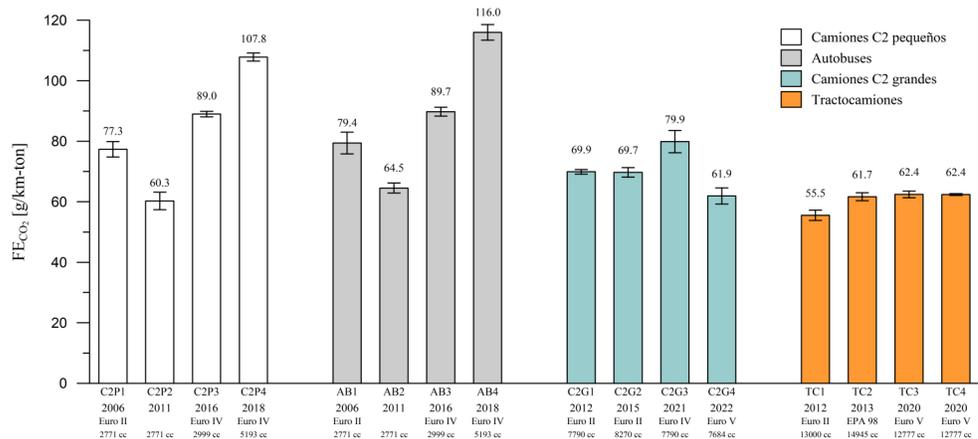


## Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)

Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga



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 Christian Jaramillo Herrera  
Subdirectora Demanda Lina Escobar Rangel  
Av. Calle 26 # 69 D-91 Torre 1, Piso 9°  
Bogotá D.C.  
(+57) 601 222 0601

## Créditos

### **Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+) Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga**

Convenio Interadministrativo No. 003 de 2021

Unidad de Planeación Minero Energética UPME  
Christian Rafael Jaramillo Herrera  
Director General

Lina Patricia Escobar Rangel  
Subdirectora de Demanda

Julieth Stefany García Collazos  
Profesional especializada

#### *Ejecuta*

Universidad de Antioquia  
Grupo de Manejo Eficiente de la Energía

Ing.-Dr. John Ramiro Agudelo, Ing. Mecánico, ([john.agudelo1@udea.edu.co](mailto:john.agudelo1@udea.edu.co))  
Ing.-Dr. Andrés Felipe Agudelo Santamaría. Profesor Dpto. Ing. Mecánica Universidad de Antioquia  
Ing.-Dr. Ricardo Moreno Sánchez. Profesor Dpto. Ing. Mecánica Universidad de Antioquia  
Ing.-Dr. Andrés Felipe López García. Director Lab. Máquinas Térmicas Universidad de Antioquia

#### *Equipo técnico y administrativo*

Carlos Mateo Vélez Rodríguez  
Jaime Nicolás Gutiérrez Ibarra  
Jackeline Saldarriaga Alzate  
Alexander Zuleta Durango  
Julián Felipe Álvarez Morales



**John Ramiro Agudelo Santamaría**

Director del proyecto  
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica de la Universidad de Antioquia  
Calle 67 No. 53-108. Bloque 19 1er. Piso Ala sur. Tel. (+57) 604 2198549  
Medellín – Colombia  
Diciembre de 2021

## Agradecimientos

A la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), especialmente al Dr. Andrés Mantilla Zárate, director del Centro de Tecnología e Innovación ICP de Ecopetrol, por su compromiso incondicional en la ejecución de este convenio. Gracias a su equipo humano, Ingenieros Sandro Faruc González Garnica, José Luis Sarmiento Vesga, y sus colaboradores, por su dedicación, tesón, rigor y capacidad de solucionar problemas, tan necesario para obtener datos de calidad en estas extenuantes campañas de medición en banco de rodillos y especialmente en carretera. Gracias por facilitarnos equipos altamente especializados de medición a bordo de emisiones gaseosas y material particulado, tanto en masa como en número de partículas. Una vez más, ha sido un honor y un placer compartir con ustedes.

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 siete vehículos de prueba, incluyendo cuatro tractocamiones. Gracias al Ingeniero Byron Silva, gerente nacional de mantenimiento, por su apoyo incondicional en todos los proyectos de esta naturaleza que hemos realizado en las áreas metropolitanas del Valle de Aburrá y de Bucaramanga, al Ingeniero Yeison Castro por su apoyo incondicional y sus ganas de saber, y al conductor Albeiro Anaya, quien nos acompañó en todas las pruebas en ruta.

A las Secretarías de Tránsito y Transporte de Girón y Floridablanca (Santander-Colombia) por facilitarnos la realización de la campaña experimental en el anillo vial que los une.

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

¡Agradecimientos a todo el equipo de trabajo!



**John Ramiro Agudelo Santamaría**  
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Antioquia

## RESUMEN EJECUTIVO

Este documento contiene los resultados de una campaña experimental que tuvo como finalidad determinar los factores de emisión de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , THC y CO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM y PN) de una muestra de 16 vehículos pesados de transporte de carga y pasajeros a la altitud sobre el nivel del mar correspondiente al área metropolitana de la Bucaramanga (cerca de 900 metros). Después de comprobar que para vehículos livianos no habían diferencias significativas entre las pruebas en carretera y las pruebas en banco de rodillos, se procedió a medir los factores de emisión de los 4 camiones de dos ejes pequeños (C2P) en banco de rodillos siguiendo los ciclos de conducción tanto de camiones de repartición de paquetería de última milla, como de buses urbanos.

En carretera se midieron los factores de emisión de 4 camiones de dos ejes grandes (capacidad de carga de 11 toneladas) y de 4 tractocamiones tipo C3S2. Los vehículos medidos fueron seleccionados según las recomendaciones de la primera fase de este proyecto (FECOC+ Fase 1), en la que se establecieron los año de modelo, marcas y tecnologías de control de emisiones más representativas del país, así como los ciclos de conducción utilizados para cada categoría vehicular.

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

1. El país cuenta con ocho (8) factores de emisión, así como los datos de consumo instantáneo y promedio de combustible para la categoría de vehículos pesados más representativa. Se espera que una vez medidos los FE en las altitudes de Bogotá y Barranquilla, se pueda ponderar el impacto de la altitud sobre el nivel del mar en las emisiones y el consumo, para que de esta manera estos resultados puedan ser usados para la actualización de los inventarios de emisiones nacionales y regionales.
2. Quedó demostrado y cuantificado que entre mejor sea la tecnología de control de emisiones de los camiones, más bajas son sus emisiones contaminantes. Esto sugiere considerar políticas claras de renovación de flota en el sector de transporte de pasajeros y de carga. El uso del sistema de reducción catalítico (SCR) redujo cerca del 50% las emisiones de óxidos de nitrógeno. Se hace un llamado para que las empresas de transporte valoren positivamente la importancia de mantener en buen estado de funcionamiento sus sistemas de SCR, a pesar de los sobrecostos en operación que supone el uso del fluido de tratamiento de gas de escape (úrea automotriz).
3. No se encontró que existiera ninguna relación (directa o indirecta) entre la tecnología de control de emisiones del vehículo y el consumo de combustible, y por lo tanto en el factor de emisión de  $\text{CO}_2$ . Este resultado sugiere que se deberían usar otros parámetros diferentes a la emisión de  $\text{CO}_2$  o consumo de combustible para posibles programas de eco-etiquetado de vehículos pesados.
4. Si bien las emisiones de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) tienen un potencial de calentamiento climático 25 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ , sus emisiones fueron significativamente pequeñas (máximo 250

mg/km-ton o 51 mg/km en el peor de los vehículos medidos) frente al CO<sub>2</sub> mismo, cuyos valores llegaron estar cercanos a los 1750 g/km para los tractocamiones. Este resultado sugiere que no es necesario incluir este gas en futuras campañas experimentales si el combustible utilizado es diésel comercial, como fue el presente estudio.

5. A pesar de que las emisiones gaseosas en términos generales aumentaron con el tamaño del motor, debido a su mayor consumo de combustible por cada kilómetro, este resultado se invirtió cuando se dividió por la capacidad de carga del camión (en toneladas), lo que sugiere que para transporte de carga y pasajeros no es conveniente la atomización de la flota en vehículos de tamaño pequeño.
6. El uso de modelos para obtener factores de emisión, aunque ampliamente utilizados en el ámbito internacional, no es recomendable para las condiciones del país. En este proyecto se obtuvieron diferencias altamente significativas entre los valores recomendados por el modelo COPERT de la agencia europea del medioambiente. Para material particulado, por ejemplo, los valores de COPERT son hasta 10 veces más bajos que los medidos localmente. Los valores de FE obtenidos en este trabajo estuvieron en el mismo orden de los reportados en la literatura, particularmente en los estudios de 2012 a 2018 para ciudades chinas.
7. La emisión de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), gas altamente tóxico y cancerígeno para el ser humano, y que tiende a reaccionar en la atmósfera por efecto del sol para formar compuestos secundarios como material particulado y nitro-derivados, constituyó aproximadamente la mitad (50%) de la emisión de óxidos de nitrógeno totales (NO<sub>x</sub>). Considerando que las emisiones de NO<sub>x</sub> alcanzaron valores tan elevados como 25 g/km, este resultado sugiere un llamado de atención para que las respectivas autoridades ambientales tomen las debidas precauciones. A la fecha ningún país está limitando las emisiones de NO<sub>2</sub> ni de NO<sub>x</sub> en las pruebas de inspección técnica periódica de vehículos diésel.
8. Las emisiones de material particulado (PM) oscilaron entre 40 y 1400 mg/km sin mostrar una dependencia ni con el tamaño del motor, ni con su tecnología de control de emisiones. Se demostró sin embargo, que no hay una relación necesariamente directa entre la masa de partículas y el número de partículas. En algunos de los camiones medidos se encontró alta emisión de PM y baja emisión de PN, y viceversa, lo que sugiere que ambos parámetros dependen estrechamente del tamaño (diámetro) de las partículas, siendo las partículas de menor tamaño las que están en mayor número en las nuevas tecnologías de motores.
9. Los factores de emisión de los camiones de dos ejes pequeños fueron más elevados cuando se midieron bajo el ciclo de conducción de buses frente a los ciclos de conducción de camiones de repartición de paquetería. Esto sugiere que las autoridades de movilidad/tránsito, podrían utilizar estos indicadores para mejorar las condiciones de circulación del servicio público de buses urbano, evitando las constantes paradas/arranques, y mejorando su velocidad promedio de circulación, además los resultados confirman que emiten menos contaminación cuantos más pasajeros pueden transportar.

Los factores de emisión -FE-, definidos como la masa de emisión contaminante por cada unidad característica de la fuente que lo genera (distancia recorrida en el caso de los vehículos o energía del combustible para las llamadas fuentes fijas/industria), se usan principalmente para determinar los inventarios de emisión de una ciudad, región o país y por lo tanto se han convertido en el insumo fundamental de los informes que realizan los países comprometidos con la mitigación del cambio climático, como es el caso de nuestro país, el cual por ser suscriptor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), está comprometido a remitir a la conferencia de las Partes los Inventarios Nacionales de Emisiones antropogénicas, las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) no controlados por el protocolo de Montreal.

En materia de política pública, los FE han mostrado ser indicadores idóneos para soportar técnicamente la toma de decisiones como por ejemplo: renovación de tecnología, establecimiento de líneas base de consumo de combustible y emisiones con fines de planificar escenarios de reducción, delineamiento de zonas geográficas de aire protegido, principalmente en grandes centros urbanos, restricciones de funcionamiento por motivos ambientales, programas de eco-etiquetado, 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, además de estar al día con las respectivas autoridades ambientales.

Respondiendo a esta necesidad, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia, ha venido realizando una serie de proyectos con el objeto de determinar los FE de combustibles colombianos (FECOC). Si bien esta primera aproximación arrojó resultados claves para el sector industrial intensivo en consumo de combustibles en el país, también dejó también en evidencia la necesidad de cuantificar la eficiencia de conversión del combustible en energía útil según la actividad donde es usado. Dando entonces continuidad, la UPME y la Universidad de Antioquia aunaron esfuerzos para determinar los FE de las fuentes móviles terrestres de carretera, principales consumidores de energía primaria del país, es decir cerca de la tercera parte, sin incluir el transporte aéreo, con el cual sumaría entorno al 43%. Adicionalmente, el Balance de Energía Útil (BEU) realizado en 2019 por la UPME, demostró que el sector transporte es la mayor fuente de ineficiencia energética del país (66% de la energía no se utiliza eficientemente), convirtiéndolo así en el centro de la mirada de uso racional de la energía y de posible recuperación económica del país.

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, y 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 confiables. 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 el primer convenio FECOC+ Fase 1 (CV001-2020) las dos entidades se enfocaron en caracterizar el parque automotor terrestre de carretera colombiano y en determinar sus respectivos ciclos de conducción, herramientas previas indispensables para proceder con la medición de los FE. Con este insumo se trazaron dos fases posteriores en tres altitudes diferentes sobre el nivel del mar, a saber, Fase 2: determinación de los FE para vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros, y Fase 3: FE de automóviles livianos y motocicletas. Debido a la gran variedad de pisos térmicos del país, y al marcado efecto que tiene la altitud sobre el nivel del mar en cualquier sistema térmico, surgió entonces el presente convenio No. CV-003-2021 denominado FECOC+ Fase 2.1, en el cual, con el apoyo incondicional de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), y el grupo empresarial Coordinadora Mercantil (COORDINADORA), determinamos 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 de material particulado (en masa  $\text{PM}$  y número de partículas  $\text{PN}$ ) de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (aproximadamente 900 metros sobre el nivel del mar –msnm-).

El grupo ejecutor adoptó la metodología que se presenta en la **Figura R1**. Los vehículos de prueba más representativos, así como los ciclos de conducción fueron tomados del convenio No. CV-001-2020. Se procuró seleccionar para cada tipo de vehículos, a saber, C2 livianos, C2 grandes y Tractocamiones tipo C3S2, tecnologías de control de emisiones antiguas y nuevas, con el fin de tener un comparativo en el impacto de la tecnología sobre los factores de emisión.

Para el caso de los vehículos de dos ejes C2 livianos (cuatro), se midieron sus FE en banco dinamométrico de rodillos (chasis), previa constatación con resultados obtenidos en ruta. Esto permitió determinar los FE de estos vehículos siguiendo tanto los ciclos de conducción de camiones, típicos de repartición de paquetería de última milla, así como los ciclos de conducción de buses urbanos. Lo anterior se justifica porque en Colombia el chasis y motor de estos vehículos es el mismo, lo único que cambia es la carrocería. Los FE de los vehículos de dos ejes C2 grandes y de tractocamiones tipo C3S2 se determinaron siguiendo sus respectivos ciclos de conducción con medición de emisiones y consumo de combustible instantáneo a bordo. La campaña de medición de los FE se llevó a cabo en el Anillo vial ubicado entre los municipios de Girón y Floridablanca (Santander), la cual tenía una distancia de 10.5 km.

Los FE de contaminantes gaseosos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NMHC}$  y  $\text{CO}$ ), así como los de partículas (en masa – $\text{PM}$ –, y en número – $\text{PN}$ –), se determinaron a partir de las concentraciones instantáneas (10 muestras/segundo en % o ppm), del flujo volumétrico de gases de escape ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), y de la densidad de los gases en condiciones estándar, lo cual permitió determinar la masa de cada contaminante que, posteriormente, se dividió entre la distancia recorrida en cada ciclo de conducción.

En la **Tabla R1** se resumen los FE promedio medidos a bordo en este proyecto, para la categoría de vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (aprox. 900 msnm).

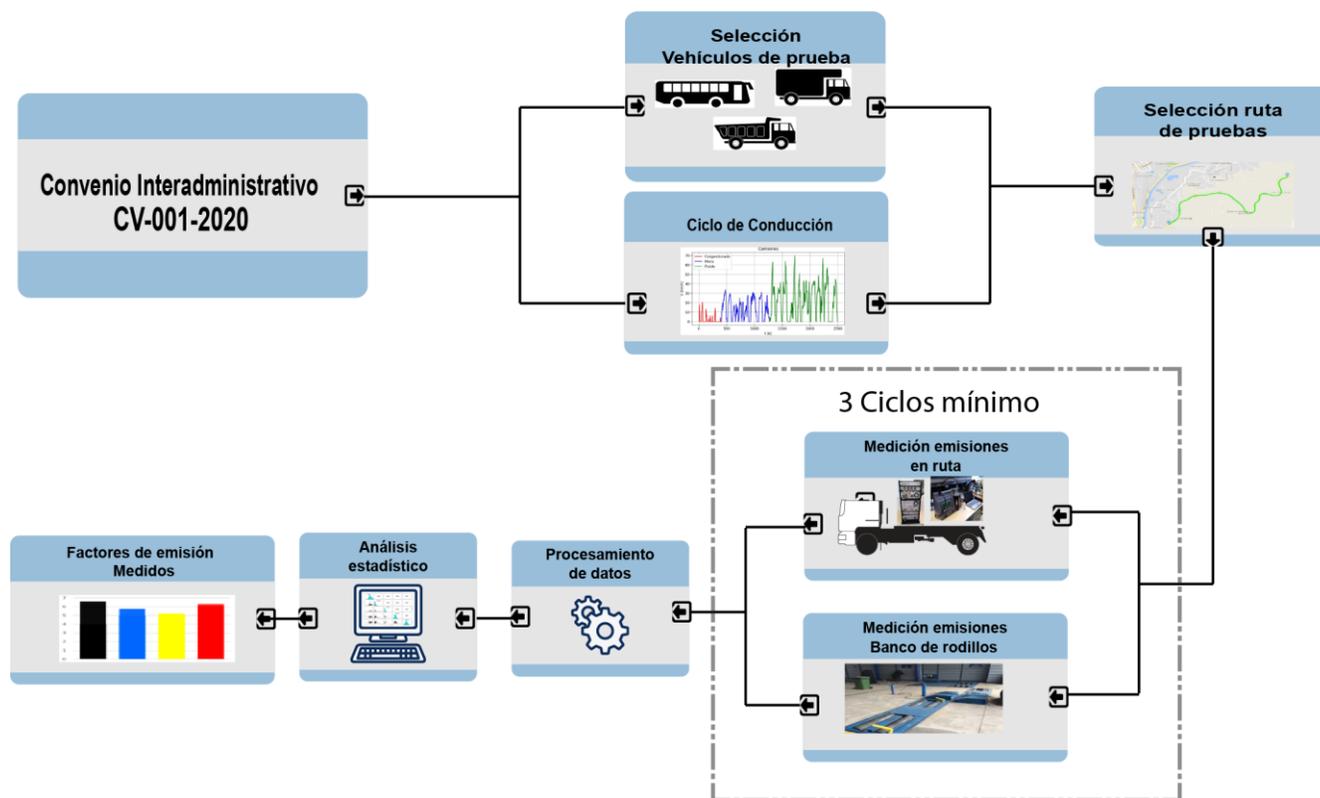


Figura R1. Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1

Tabla R1. Resumen de los factores de emisión promedio de los vehículos de carga para la altitud de la región metropolitana de Bucaramanga (aprox. 900 msnm).

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)	NO (g/km)	NO <sub>2</sub> (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (mg/km)	PN x10e12 (#/km)	THC (g/km)	NMHC (g/km)	CO (g/km)
 C2 liviano	2006	Euro II	2771	< 3	22.8	410.0	7.23	3.19	2.56	5.72	339.0	49.50	1.48	1.45	4.69
	2011	Euro II	2771		29.5	319.4	40.80	1.70	1.69	3.39	245.0	71.55	2.04	2.00	2.55
	2016	Euro IV	2999		20.8	471.6	11.77	1.27	1.33	2.59	41.4	2.67	0.55	0.54	1.98
C2 mediano	2018	Euro IV	5192	< 5 ton	17.0	571.4	30	2.03	2.60	4.64	123.0	43.80	1.51	1.48	11.15
 Buses	2006	Euro II	2771	20 pas.	23.0	421.0	35	3.09	2.78	5.87	303.0	52.40	1.74	1.70	5.05
	2011	Euro II	2771		28.0	342.0	51.50	1.60	2.05	3.65	245.30	72.00	2.63	2.52	2.59
	2016	Euro IV	2999		20.2	475.7	13.88	1.21	1.37	2.58	41.27	30.33	0.70	0.68	2.41
	2018	Euro IV	5192	40 pas.	15.4	614.0	38.60	2.04	2.86	4.90	138.40	39.40	1.93	1.89	15.10
 Camiones de 2 ejes C2 grande	2012	Euro II	7790	< 10	11.0	873.6	17.87	4.76	3.56	8.32	168.90	45.94	0.89	0.88	2.51
	2015	Euro II	8270		11.1	871.4	36.55	4.80	4.03	8.84	1493.70	263.52	1.91	1.87	7.67
	2021	Euro IV	7790		11.5	998.4	11.20	3.61	3.08	6.69	67.40	51.58	0.56	0.55	2.59
	2022	Euro V	7684		11.2	773.9	2.45	5.05	3.44	8.47	130.19	69.15	0.12	0.12	13.37
 Tractocamiones C3S2	2012	Euro II	13000	< 35	5.5	1555.0	15.48	15.44	9.36	24.79	162.50	48.83	0.78	0.76	3.62
	2013	EPA 98	14945		5.1	1726.0	16.47	15.05	9.96	25.01	1392.03	0.38	0.83	0.81	17.07
	2020	Euro V	12777		5.5	1748.0	4.24	6.32	4.12	10.44	165.97	22.88	0.21	0.21	13.32
	2020	Euro V	12777		5.5	1747.0	2.90	6.56	4.41	10.97	126.95	87.86	0.15	0.14	11.69

Donde:

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono, considerado el gas de efecto invernadero de referencia

CH<sub>4</sub>: metano, con un potencial de calentamiento climático 25 veces mayor al CO<sub>2</sub> según el IPCC

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 agente protagonista en el cambio climático. La OMS sugiere límites máximos de concentración de PM<sub>2.5</sub> (todo el material particulado inferior a 2.5 micrómetros).

PN: número de partículas (#), los motores de combustión interna modernos emiten significativamente poca masa de partículas (PM), lo que no significa que hayan dejado de emitir partículas. Lo cierto es que son tan pequeñas en su tamaño (del orden de nanómetros), que apenas contribuyen en la masa. Dado que la peligrosidad de las partículas en el ser humano es inversamente proporcional al tamaño de las partículas, la OMS ha sugerido en su guía de buenas prácticas más reciente (2021), contarlas, y en la medida de lo posible, clasificarlas por su tamaño.

THC: 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.

NMHC: hidrocarburos no metánicos (CH<sub>4</sub> = THC – NMHC)

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.

Los resultados permitieron comprobar que el ciclo de conducción de buses es más transitorio (contiene mayor número de arranques/paradas), por lo que el consumo de combustible aumenta frente al de los camiones C2 livianos. Esto explica, igualmente, que los buses emitieran más contaminación por cada kilómetro recorrido como se muestra en la **Tabla R1**. Los tractocamiones con catalizador de reducción selectiva (SCR), con tecnología de control de emisiones Euro V (modelo 2020), presentaron los F.E. más bajos de NO<sub>x</sub> y material particulado PM en su categoría, no obstante, el número de partículas fue mayor en comparación, lo que muestra el efecto de la elevada presión de inyección de los motores modernos, haciendo que éstos emitan menos masa, pero mayor número de partículas.

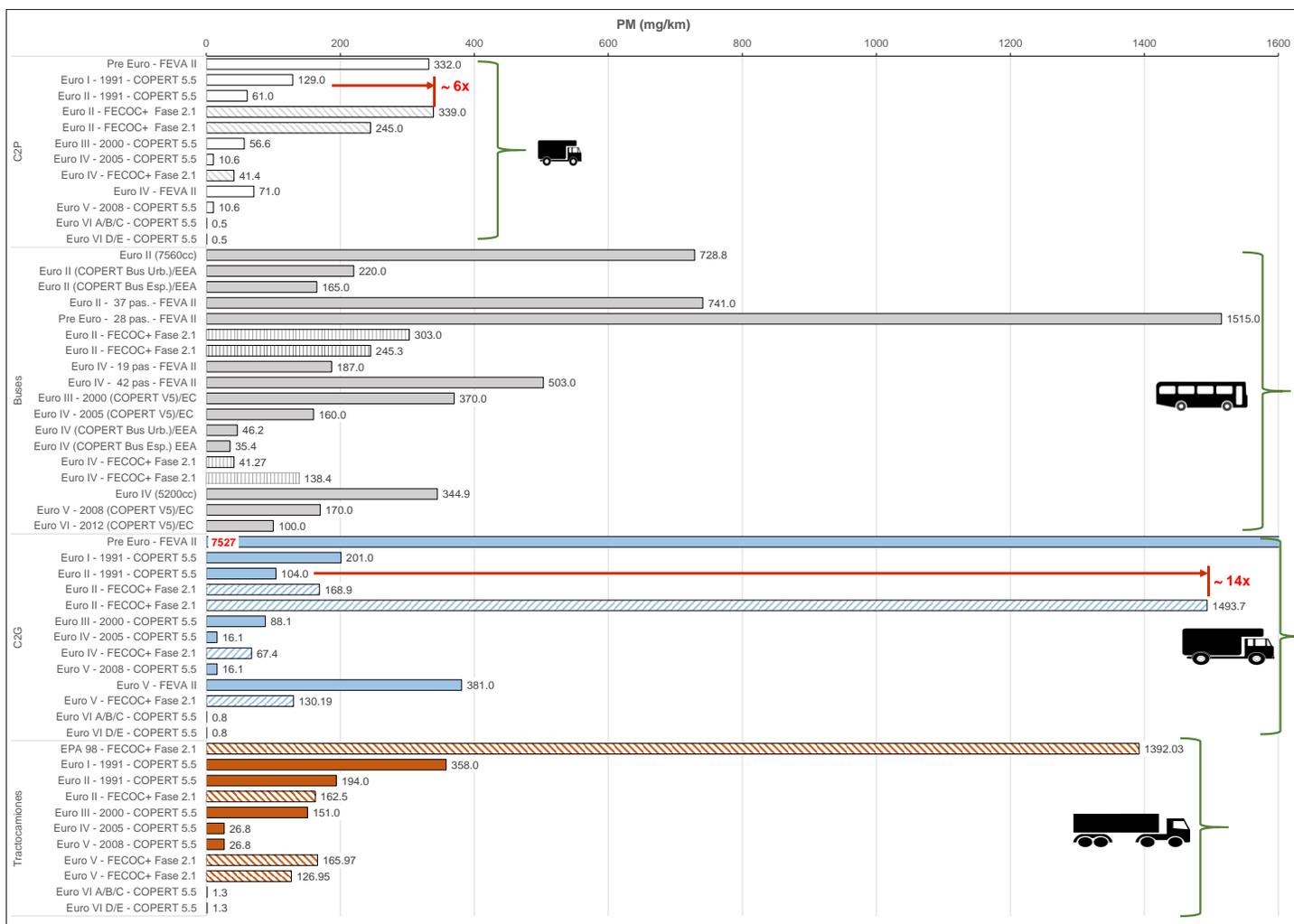
Los F.E. medidos en este proyecto (FECOC+ Fase 2.1), se han comparado frente a otros valores de referencia medidos por el mismo equipo de trabajo (Ecopetrol y Universidad de Antioquia) en el área metropolitana del Valle de Aburrá en 2018 (FEVA-2 Convenio 888 de 2017) y frente a valores de

referencia de la literatura internacional. Esta comparación ratificó la importancia de la medición de los FE locales, ya que las diferencias observadas pueden obedecer, como en el caso de los modelos mencionados antes, al uso de vehículos con tecnologías de control de emisiones, tipo de combustible, altitud sobre el nivel del mar, topografía, climatología y patrones de conducción distintos a los reportados por otros trabajos. Para comprobar esta afirmación, se han recopilado datos de la versión más reciente del modelo COPERT (octubre 2021) de la AEM, en la que, a modo de ejemplo, para el material particulado (**Figura R2**), se aprecian discrepancias significativas, hasta 14 veces mayores para los FE medidos en este proyecto. Resultados similares se obtuvieron para los demás factores de emisión, como se reporta en el capítulo 3 del presente informe final. En la **Figura R3** se compara el CO<sub>2</sub>. En la categoría de buses se aprecia que los resultados obtenidos en este trabajo se parecen más a los reportados para ciudades asiáticas (421 g/km en este trabajo vs 500 g/km reportado por Yu *et al*), probablemente por diferencias en el tamaño de los buses. El modelo COPERT sugiere usar un factor de emisión de CO<sub>2</sub> = 1208 g/km para un bus Euro IV, pero con el doble de la capacidad de pasajeros.

Paralelamente, se evidenció que los FE promedio de CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub> tendieron a incrementar con el tamaño del vehículo (**Tabla R1**). No obstante, los THC, el metano (CH<sub>4</sub>) y el material particulado (en masa PM y en número PN), no mostraron ninguna tendencia. Sin embargo, si se divide por la capacidad de carga del vehículo (en toneladas), todos los FE disminuyen en la medida que aumenta el tamaño del vehículo (ver resultados en el capítulo 3). A modo de ejemplo, la **Figura R4** y la **Figura R5** permiten ver que los tractocamiones emiten la menor cantidad de GEI (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) por cada kilómetro y tonelada (alrededor de 60 gCO<sub>2</sub>/km-ton y entre 0.1 y 0.6 mgCH<sub>4</sub>/km-ton), frente a las otras categorías de vehículos medidos, seguidos de los camiones de dos ejes C2 grandes (alrededor de 70 gCO<sub>2</sub>/km-ton y entre 0.2 y 3 mgCH<sub>4</sub>/km-ton). Por el contrario, las mayores emisiones específicas de GEI las presentaron los buses urbanos (desde 65 gCO<sub>2</sub>/km-ton hasta 116 gCO<sub>2</sub>/km-ton y entre 2.6 y 10 mgCH<sub>4</sub>/km-ton).

Otro resultado a tener en cuenta, es que, independiente de la categoría vehicular, la mejora tecnológica de control de emisiones no mostró una tendencia a disminuir los FE promedio de CO<sub>2</sub> (ver **Tabla R1**). Por el contrario, se aprecia una ligera tendencia a incrementarlos, lo que podría suponer que la adición de equipos de postratamiento de gases de escape usados para disminuir ciertos contaminantes criterio como CO, THC, y NO<sub>x</sub> generan mayor contrapresión de escape, afectando negativamente el consumo de combustible y, por tanto, incrementando las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El NO<sub>2</sub> (mg/km-ton), gas altamente tóxico/cancerígeno para el ser humano, y altamente reactivo (tiende a formar otros compuestos como material particulado secundario en la atmósfera), constituye cerca del 50% de las emisiones de óxido de nitrógeno totales (NO<sub>x</sub>) (ver **Tabla R1**).



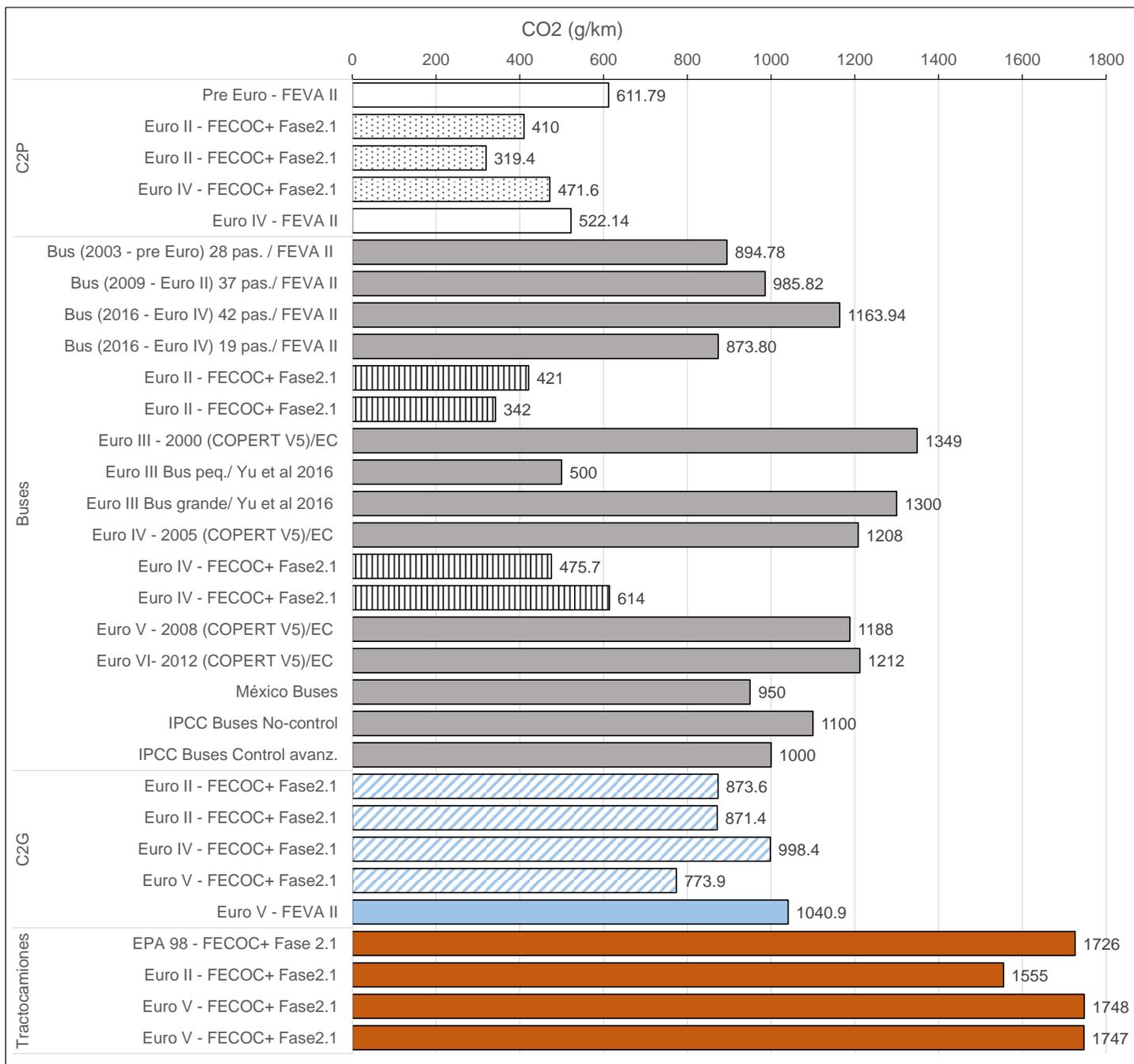
**Figura R2.** Comparación del material particulado (PM en mg/km) con valores reportados en la literatura

El uso de SCR (reducción catalítica selectiva), si bien incrementa los gastos operacionales de las empresas de transporte, debido al uso del aditivo en los gases de escape (solución de úrea automotriz), es significativamente más efectiva en la reducción de los NOx, así como sobre las emisiones CH<sub>4</sub>, las cuales se redujeron en un factor cercano a 4 veces (**Figura R5**).

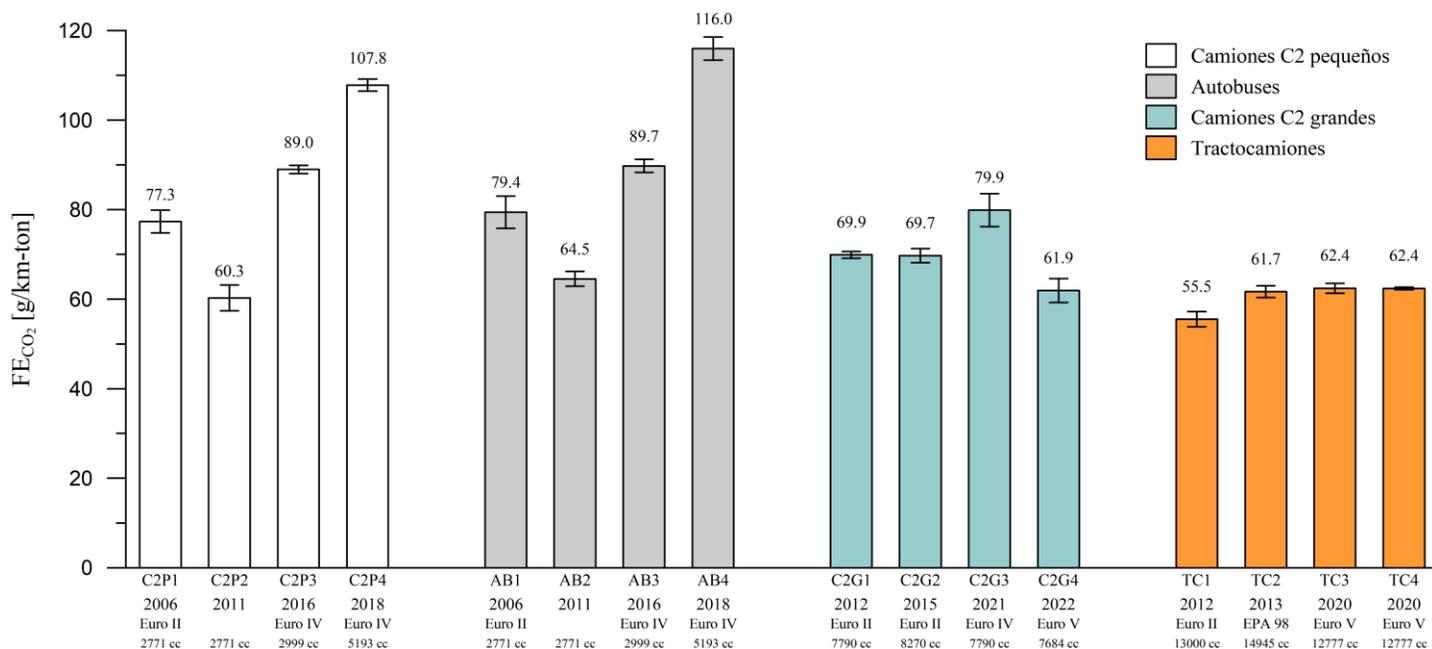
El camión de dos ejes C2 grande (Euro II) del año de modelo 2015, a pesar de haber exhibido un rendimiento de combustible similar a los demás camiones C2G (alrededor de 11 km/gal), fue el que emitió la mayor cantidad de masa de partículas (1493.7 mg/km), la mayor concentración de número de partículas (263.52 billones/km) de los 16 vehículos medidos, y la mayor concentración de hidrocarburos totales (THC = 1.91 g/km) y metano (CH<sub>4</sub> = 36.55 mg/km) en comparación con los demás camiones C2G de su misma categoría.

Un caso interesante fue el tractocamión del año 2013 (EPA 98), el cual emitió la mayor concentración de masa de partículas (1392 mg/km) y, sin embargo, emitió la menor concentración de número de

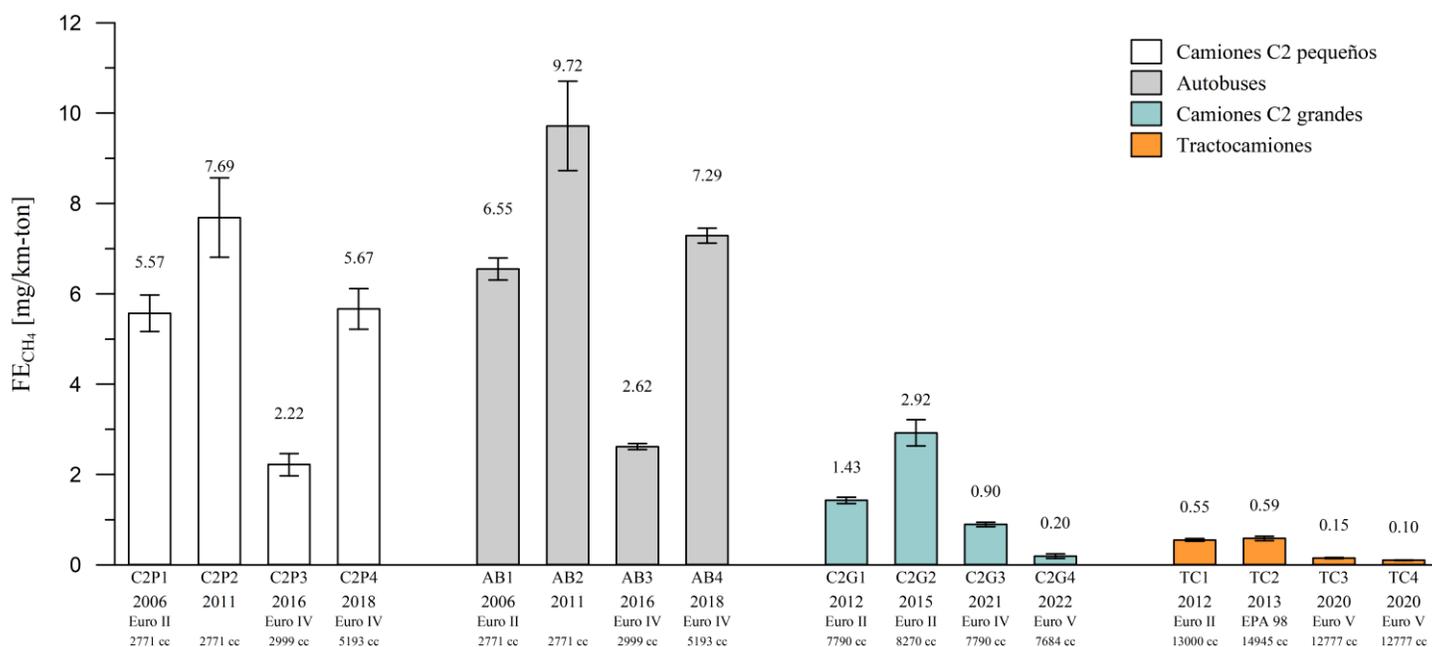
partículas (0.38 billones/km) en comparación con los demás tractocamiones, lo que sugiere que este motor emite pocas partículas de tamaños significativamente grandes.



**Figura R3.** Comparación del CO<sub>2</sub> medido con la literatura técnica



**Figura R4. CO<sub>2</sub> (g/km-ton) para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)**



**Figura R5. CH<sub>4</sub> (mg/km-ton) para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)**

En resumen, en este proyecto se determinaron los FE de contaminantes gaseosos y de partículas (en masa y en número) para la categoría de vehículos pesados de carga y de pasajeros, midiendo con sistemas portátiles de acuerdo a ciclos de conducción específicos por cada actividad vehicular, a la altura del área metropolitana de Bucaramanga (alrededor de 900 msnm). Los resultados permiten concluir que las emisiones de GEI de CO<sub>2</sub> crecen a medida que aumenta el tamaño del vehículo, variando desde el valor mínimo de 320 g/km (camión de dos ejes C2 liviano Euro II), hasta el máximo de 1748 g/km de un tractocamión (año 2020, Euro V).

Las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ , con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ ), no cambiaron con el tamaño de los vehículos, pero si fueron siempre menores para aquellos de tecnologías más avanzadas (Euro IV y Euro V), oscilando entre 3 y 50  $\text{mgCH}_4/\text{km}$ .

Las emisiones de  $\text{NO}_2$ , considerado un gas contaminante altamente tóxico para el ser humano, y causante de formaciones en los contaminantes secundarios en la atmósfera, fueron considerablemente elevadas para todas las categorías vehiculares, oscilando desde un mínimo de 1.3 hasta 10 g/km. El SCR mostró alta eficacia para reducir todos los  $\text{NO}_x$ , incluidos el NO y el  $\text{NO}_2$ .

Los autobuses presentaron FE más elevados que los camiones de dos ejes pequeños (C2P), ocasionados por la mayor transitoriedad (arranques/paradas) a las que están sometidos en ciudad.

Este proyecto evidenció la necesidad de determinar localmente los factores de emisión medidos bajo las condiciones propias del país. Las diferencias con respecto a los modelos propuestos en la literatura, como por ejemplo el COPERT, de la Agencia Europea de Medioambiente, oscilaron entre 2 y hasta 10 veces mayores dependiendo de los FE, frente a los medidos en la región metropolitana de Bucaramanga.

Se espera medir los F.E. a las altitudes de Bogotá (2600 msnm) y Barranquilla (nivel de mar), para entregar finalmente al país el consolidado de los factores de emisión de esta categoría vehicular.



Ing.-Dr. John Ramiro Agudelo Santamaría  
Director del proyecto  
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Antioquia

**Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)**  
**Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga**

INFORME FINAL

Preparado para

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA -UPME-

Convenio Interadministrativo de Asociación No. CV-003 de 2021



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**  
1 8 0 3

Por:

Profesor Ing.-Dr. John Ramiro Agudelo Santamaría

Departamento Ingeniería Mecánica

Medellín

17 de diciembre de 2021

Universidad de Antioquia  
Grupo de Manejo Eficiente de la Energía Laboratorio de Máquinas Térmicas  
Calle 67 No. 53-108. Bloque 19 1er. Piso Ala sur. Tel. (+57) 300 7785626 Medellín - Colombia

**Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)**  
**Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga**

INFORME FINAL

Convenio Interadministrativo de Asociación No. CV-003-2021

Preparado para UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME)

17 de diciembre de 2021

**Responsable**

John Ramiro Agudelo Santamaría  
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica Universidad de Antioquia

**Investigadores**

Andrés Felipe Agudelo Santamaría. Profesor Dpto. Ing. Mecánica Universidad de Antioquia  
Andrés Felipe López García. Director Lab. Máquinas Térmicas Universidad de Antioquia  
Ricardo Moreno Sánchez. Profesor Dpto. Ing. Mecánica Universidad de Antioquia

**Equipo técnico y administrativo**

Carlos Mateo Vélez Rodríguez  
Jaime Nicolás Gutiérrez Ibarra  
Alexander Zuleta Durango  
Julián Felipe Álvarez Morales  
Jackeline Saldarriaga Alzate

**Revisó y Aprobó**



**John Ramiro Agudelo Santamaría**

## Contenido General

Capítulo 1. Introducción	6
Capítulo 2. Metodología	22
Capítulo 3. Resultados y discusión	30
Capítulo 4. Consideraciones finales y Anexos	59

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## Contenido Capítulo 1

<b>1. Introducción</b> .....	6
<b>1.1. FECOC+ Fase 2.1</b> .....	6
<b>1.2. El IPCC y el Cambio Climático</b> .....	8
<b>1.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> y Cambio Climático</b> .....	9
<b>1.4. Impacto en el sector transporte</b> .....	14
<b>Referencias capítulo 1</b> .....	20

## Índice de Figuras capítulo 1

<b>Figura 1.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> (kt) referentes en el mundo.....	10
<b>Figura 2.</b> Valores similares de emisiones de CO <sub>2</sub> (kt) en el mundo .....	11
<b>Figura 3.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> (kt) del consumo de combustibles líquidos en América Latina ..	11
<b>Figura 4.</b> Valores similares de emisiones de CO <sub>2</sub> (kt) del consumo de combustibles líquidos en el mundo.....	12
<b>Figura 5.</b> BEU para el sector transporte en Colombia .....	15
<b>Figura 6.</b> Rendimiento promedio de combustible de camiones en Colombia año 2015 .....	16
<b>Figura 7.</b> Rendimiento promedio de combustible (km/gal) medidos (aprox. 900 msnm) .....	16
<b>Figura 8.</b> Cantidad de emisiones por subcategoría en Gg de CO <sub>2</sub> eq. ....	17
<b>Figura 9.</b> Emisiones totales por categoría en 1990, 1994, 2000, 2004, 2010 y 2012 .....	18

# 1. Introducción

## 1.1. FECOC+ Fase 2.1

Los factores de emisión -FE-, definidos como la masa de emisión contaminante por cada unidad característica de la fuente que lo genera (distancia recorrida en el caso de los vehículos o energía del combustible para las llamadas fuentes fijas/industria), se usan principalmente para determinar los inventarios de emisión de una ciudad, región o país. En materia de política pública, los FE han mostrado ser indicadores idóneos para soportar técnicamente la toma de decisiones, como por ejemplo: renovación de tecnología, establecimiento de líneas base de consumo de combustible y emisiones con fines de planificar escenarios de reducción, delimitamiento de zonas geográficas de aire protegido, principalmente en grandes centros urbanos, restricciones de funcionamiento por motivos ambientales, programas de eco-etiquetado, 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, además de estar al día con las respectivas autoridades ambientales.

Respondiendo a esta necesidad, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia, ha venido realizando una serie de proyectos con el objeto de determinar los FE de combustibles colombianos (FECOC). Si bien esta primera aproximación arrojó resultados claves para el sector industrial intensivo en consumo de combustibles en el país, también dejó en evidencia la necesidad de cuantificar la eficiencia de conversión del combustible en energía útil, según la actividad donde es usado. Dando entonces continuidad, la UPME y la Universidad de Antioquia aunaron esfuerzos para determinar los FE de las fuentes móviles terrestres de carretera.

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, y 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 confiables. 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 el primer convenio FECOC+ Fase 1 (CV001-2020), las dos entidades se enfocaron en caracterizar el parque automotor terrestre de carretera colombiano y en determinar sus respectivos ciclos de conducción, herramientas previas indispensables para proceder con la medición de los FE. Con este insumo se trazaron dos fases posteriores en tres altitudes diferentes sobre el nivel del mar, a saber, Fase 2: determinación de los FE para vehículos

pesados de transporte de carga y de pasajeros, y Fase 3: FE de automóviles livianos y motocicletas. Debido a la gran variedad de pisos térmicos del país, y al marcado efecto que tiene la altitud sobre el nivel del mar en cualquier sistema térmico, surgió entonces el presente convenio No. CV-003-2021 denominado FECOC+ Fase 2.1, en el cual, y con el apoyo incondicional de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), y el grupo empresarial Coordinadora Mercantil (COORDINADORA), determinamos los FE de GEI (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), de gases regulados (CO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, THC), 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 del área metropolitana de Bucaramanga (aproximadamente 900 metros sobre el nivel del mar –msnm-).

Este documento constituye el informe final del convenio CV003 de 2021 entre la UPME y la Universidad de Antioquia, y está conformado por cuatro capítulos. En el primer capítulo presentamos, a manera de introducción, los nuevos aspectos y compromisos que sobre cambio climático destaca el reciente informe del IPCC, a continuación revisamos el material que sobre el mismo respecto han reportado la ONU y el Banco Mundial, con especial énfasis en el CO<sub>2</sub> como GEI. Esta introducción finaliza con una discusión sobre el papel que desempeña el sector de los combustibles líquidos, y en particular el transporte terrestre por carretera, sobre el Balance de Energía Útil, y su contribución al cambio climático en Colombia.

En el segundo capítulo, documentamos detalladamente la metodología llevada a cabo para la determinación de los factores de emisión de gases y partículas, adelantada con la ayuda de ECOPETROL, y el grupo empresarial COORDINADORA MERCANTIL.

En el tercer capítulo, presentamos los resultados de los factores de emisión comprometidos en este convenio, los discutimos y comparamos con otros valores de FE reportados en la literatura.

En el cuarto capítulo presentamos las conclusiones y recomendaciones para continuar con FECOC+ fase 2.2 (factores de emisión de vehículos de carga y de pasajeros a la altitud de Bogotá -2600 msnm y Barranquilla –nivel del mar-), a ser desarrollado probablemente en 2022, y FECOC+ fase 3, que tendría lugar en 2023, y que permitiría determinar los factores de emisión para motocicletas y vehículos livianos en diferentes altitudes sobre el nivel del mar, lo que conduciría finalmente a que Colombia tenga los factores de emisión de sus fuentes móviles terrestres de carretera medidos a bordo.

Este informe se convierte así en el insumo esencial para conocer los factores de emisión de contaminantes gaseosos y de partículas (en masa y número), en condiciones propias de la altitud correspondiente al área metropolitana de Bucaramanga (alrededor de 900 msnm), un reto que la UPME decididamente ha iniciado y que tendrá impactos de cara a los inventarios de emisiones contaminantes del país, en especial los de efecto invernadero, y de material particulado.

## 1.2. El IPCC y el Cambio Climático

Recientemente, en agosto del corriente año, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), hizo pública la primera de tres contribuciones al sexto ciclo de evaluación. Dicho ciclo, tuvo comienzo hace cerca de cinco años y, como los demás ciclos, hace parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), cuyo objetivo consiste en “[...] *lograr 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*” [1]. La primera contribución, *Cambio Climático 2021: Las bases físicas del cambio climático*, se concentra en comprender, a través de modelos climáticos, las variables físicas que podrían afectar, y por ende explicar, el calentamiento global que de manera inusitada ha venido en crecimiento durante los últimos 150 años y, especialmente, durante las últimas cuatro décadas.

Adicional a las contribuciones que realiza el IPCC, también el Grupo, en el marco del sexto ciclo de evaluación, realizó una serie de informes especiales que nutren las reflexiones a la primera contribución. El informe especial, *Calentamiento Global de 1,5 °C*, publicado en el año 2018, brinda las herramientas para la comprensión del calentamiento global actual en relación al denominado periodo preindustrial, ubicado entre los años 1.850 – 1.900. En un diálogo conjunto, entonces, queda claro que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C en relación a dicho periodo [2], [3]. Las estimaciones de cambio de temperatura de superficie a escala global, tomadas a partir de modelos climáticos, ponen de manifiesto que, si se considera la acción humana, el incremento de temperatura producto de los gases de efecto invernadero (GEI), sería, a la fecha, de 1,5 °C aproximadamente, tomando siempre como referente el periodo preindustrial. El uso de aerosoles, también producto de la actividad humana, ha tenido como consecuencia un enfriamiento de aproximadamente de 4 °C. Paralelo a lo anterior, el Grupo de investigadores, estimó que son casi computables a cero las incidencias sobre el calentamiento global de variables como la actividad solar y volcánica y otras variables de tipo interno como tormentas, movimientos telúricos, etc., dando como resultado entonces, y de manera inequívoca, una responsabilidad única e indiscutible del factor humano sobre el cambio en la temperatura global media que se observa desde el periodo preindustrial, parcialmente encubierto por el enfriamiento producido por el uso de aerosoles [2], [3].

Además de lo anterior, queda también establecido que el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) es el principal GEI que impulsa el cambio climático, existiendo una relación de tipo lineal entre este y el aumento de temperatura [3]. En su mayor parte, el CO<sub>2</sub> es resultante de la quema de combustibles fósiles utilizados en diferentes sistemas energéticos: terrestres, industriales, urbanos y de infraestructura (transporte y edificaciones). Sin embargo, aun cuando el CO<sub>2</sub> es el GEI dominante y el que persiste por cientos de años en la atmósfera, otros gases de tipo invernadero también contribuyen de manera formidable al calentamiento global como lo son el Metano (CH<sub>4</sub>), también llamado *Gas Natural*, y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), y dentro de ellos destaca el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), por su elevada tendencia a reaccionar en la atmósfera bajo la influencia de la luz solar, dando lugar a compuestos denominados secundarios. Por tanto, señala el informe, los esfuerzos para mitigar el calentamiento global deberían ir dirigidos

a reducciones fuertes, rápidas y sostenidas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros gases de tipo invernadero. Un ejemplo apropiado para el sector transporte y que puede ser leído en el informe especial *Calentamiento Global de 1,5 °C*, consistiría en aumentar la proporción de la energía final baja en emisiones desde menos del 5% en 2020 a aproximadamente el 35 – 65% (rango por lo demás muy amplio) en 2050, si se precisa un límite máximo de aumento de temperatura global de 1,5 °C; si el límite se estableciera en 2°C la proporción debería aumentar entre 25 y 45% [2].

Dando continuidad al sector transporte en el marco de lo expuesto por el IPCC, en los primeros meses del año 2020, y en el contexto de las restricciones impuestas por el COVID-19, fueron detectables reducciones en las emisiones antropogénicas globales de NO<sub>x</sub> (alrededor de 35% en abril) y de CO<sub>2</sub> fósil (alrededor de 7%), impulsadas en gran medida por la reducción de las emisiones del sector transporte [3]. Adicionalmente, señala el grupo de expertos, existe un consenso de que las emisiones del sector del transporte por carretera, incluida la gasolina y el diésel, son importantes contribuyentes antropogénicos a las concentraciones elevadas de ozono (O<sub>3</sub>) y material particulado (PM<sub>2.5</sub>) en la superficie terrestre, siendo dicho sector el principal contribuyente a las concentraciones de ozono superficial en áreas pobladas y a los daños a la vegetación [3].

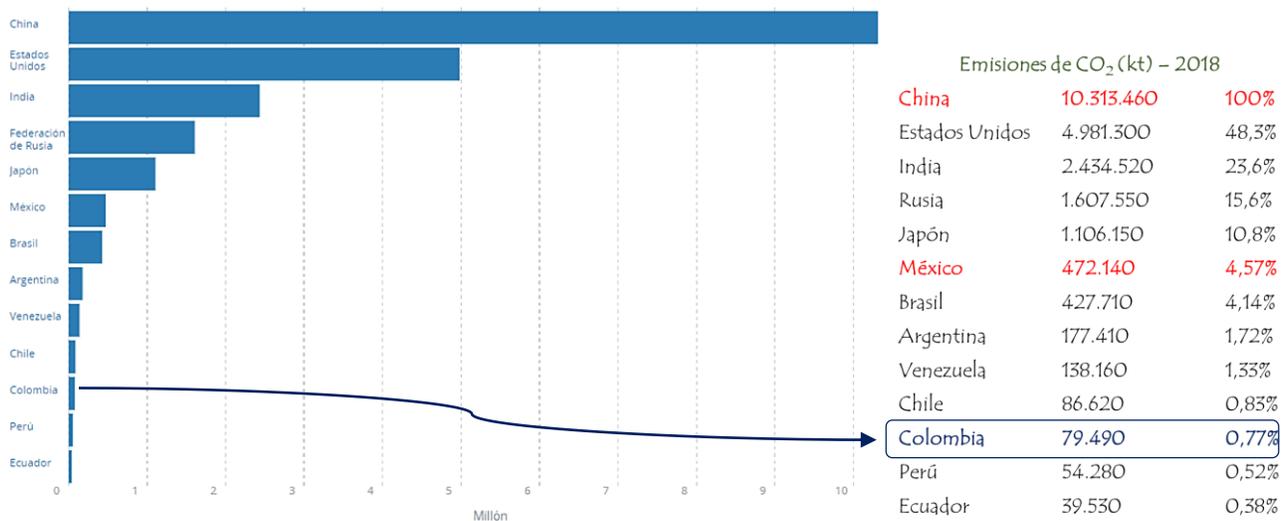
Finalmente, y puestos de nuevo sobre líneas generales, el IPCC ha estimado una liberación de 2.790 GtCO<sub>2</sub> desde el periodo preindustrial hasta el año 2019. En un escenario futuro de muy bajas emisiones sería lícito liberar alrededor de 400 o 500 GtCO<sub>2</sub> más, sin perder la posibilidad de reducir el calentamiento global a 1,5 °C [3]. Actualmente, señala la primera contribución, las emisiones son del orden de 40 GtCO<sub>2</sub> por año, cifra por lo demás muy alta si se precisa un límite máximo de temperatura no superior a 1,5 °C. Además, aun en un escenario de muy bajas emisiones, sería necesario considerar la captura de CO<sub>2</sub> no solo por medios naturales sino también tecnológicos, abriendo así un campo de oportunidad para investigaciones ulteriores. Con lo dicho, entonces, resulta de particular interés conocer con marcada fidelidad la cantidad de CO<sub>2</sub> y otros GEI emitida desde los distintos sistemas energéticos, principalmente del sector de transporte terrestre por carretera, de tal suerte que permita una línea de acción segura y dirigida a contrarrestar los efectos del calentamiento global.

### **1.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> y Cambio Climático**

A diferencia de grandes países y regiones en el mundo, como la Unión Europea donde existe un marco legal asociado a una sostenibilidad energética motivada por la reducción de GEI en los diferentes sectores, industrial, residencial y de transporte, con legislaciones internacionales recientes sobre el cambio climático y el impacto de la contaminación en grandes centros urbanos, conllevando a serias implicaciones en la salud humana; otros países, y sin lugar a dudas, en Colombia, son impelidos por la necesidad de establecer medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles que circulan en su territorio. Por este motivo, los valores de CO<sub>2</sub> serán presentados de acuerdo a las emisiones totales y a las emisiones generadas por el consumo de combustibles líquidos según la actividad donde se generen.

Considerando los últimos reportes de la ONU en su informe sobre la brecha en las emisiones del 2020, China, Estados Unidos de América, India, Rusia, Japón y los 27 integrantes de la Unión Europea + Reino Unido son los principales emisores de CO<sub>2</sub> en el mundo, contribuyendo con alrededor del 60% de las emisiones totales de GEI [4]. Por su parte, el Banco Mundial sustenta estos valores de emisiones de CO<sub>2</sub> con las últimas cifras de 2018, donde permite relacionar y comparar gráficamente el escenario global con América Latina como se presenta en la **Figura 1**.

Los valores reportados para cada uno de los países y su respectivo porcentaje, son medidos teniendo como 100% el valor de 10.313.460 kt de CO<sub>2</sub> que se le asume a China. En el escenario Latinoamericano, se encuentran México con 472.140 kt de CO<sub>2</sub> emitidas, equivalentes a 4.57% aproximadamente, seguido por Brasil, Argentina, Venezuela y Chile; en el sexto lugar se encuentra Colombia con 79.490 kt de CO<sub>2</sub>, equivalente a 0.77% del total emitido comparado con China [4].

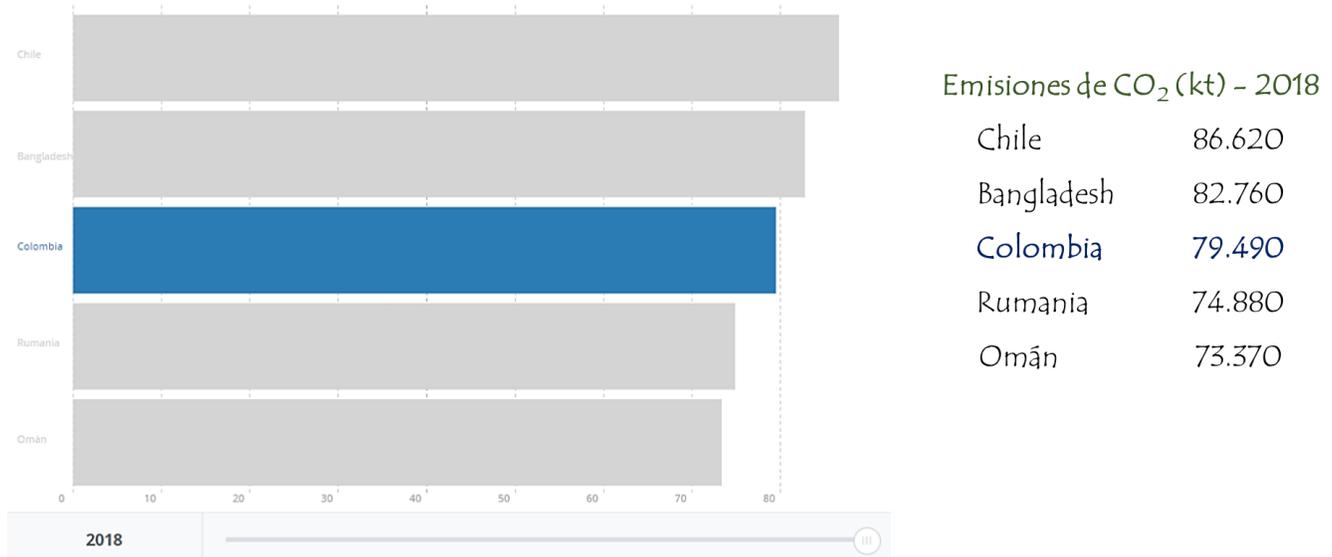


**Figura 1.** Emisiones de CO<sub>2</sub> (kt) referentes en el mundo [4]

Con Colombia como referencia, es posible determinar cuáles países alrededor del mundo tienen valores de emisiones de CO<sub>2</sub> similares según lo reportado en el 2018 por el Banco Mundial, es decir, valores cercanos a los 80.000 (kt) de CO<sub>2</sub>. Así las cosas, Chile, Bangladesh, Rumania y Omán integran el grupo con cifras cercanas a dicho valor, como se muestra en la **Figura 2**.

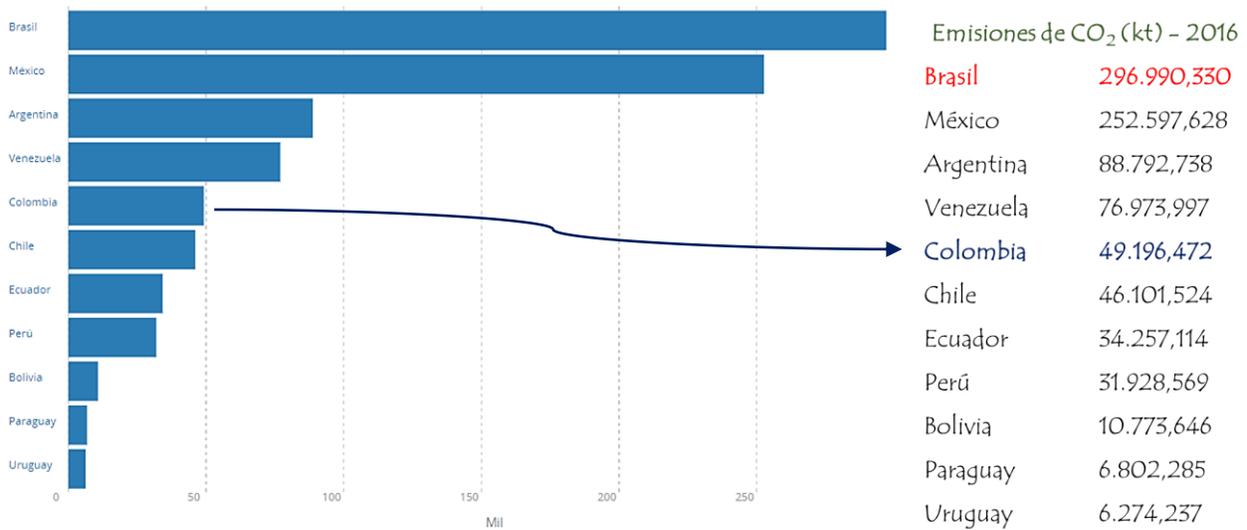
Además de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, otro tipo de información a resaltar son las emisiones de CO<sub>2</sub> producto del consumo de combustibles líquidos (% del total), en la que es posible determinar el porcentaje real atribuido al uso de combustibles derivados del petróleo como fuente de energía. En este escenario, los valores reportados en 2016 muestran un cambio en la primera posición frente al valor total de emisiones, donde Estados Unidos lidera el grupo con 2.127.054,351(kt) de CO<sub>2</sub>, seguido por China, los integrantes de la Unión Europea, India, Japón y Rusia. Referente a América Latina, como se evidencia en la **Figura 3**, este ranking lo lidera

Brasil con 296.990,330 (kt), seguido de México, Argentina y Venezuela; en la quinta posición, con un valor de 49.196,472 (kt) de CO<sub>2</sub>, se encuentra Colombia.



**Figura 2.** Valores similares de emisiones de CO<sub>2</sub> (kt) en el mundo [4]

Como se mencionó, la **Figura 3** presenta gráficamente los diferentes valores con respecto al total de emisiones de CO<sub>2</sub> del consumo de combustibles líquidos para América Latina.

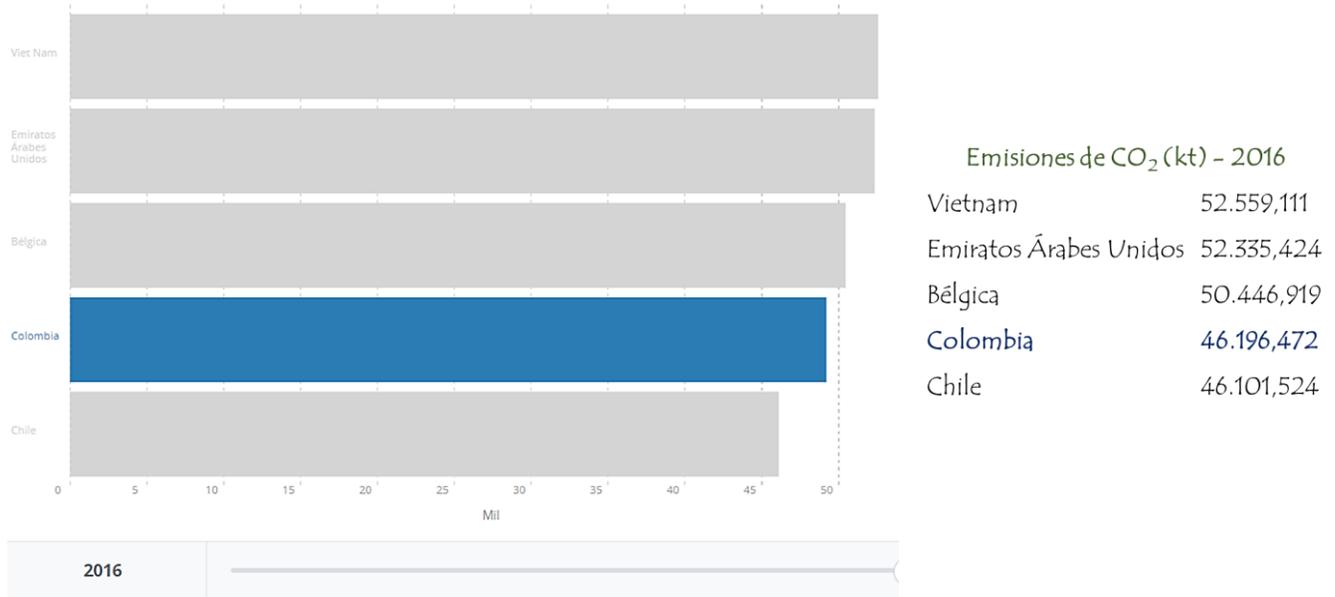


**Figura 3.** Emisiones de CO<sub>2</sub> (kt) del consumo de combustibles líquidos en América Latina [4].

Para el caso del consumo de combustibles líquidos, los valores similares de emisiones de CO<sub>2</sub> reportados por el Banco Mundial muestran cuáles son los países con valores próximos a los obtenidos por Colombia en 2016 (46.196.472). La **Figura 4** muestra los países que se asemejan

al caso colombiano, mostrando así que países como Vietnam, Emiratos Árabes Unidos, Bélgica y Chile presentan valores similares [4].

Todos estos valores presentados, muestran diversos panoramas frente a la problemática del cambio climático en el mundo, por tanto, es evidente la necesidad de implementar diversas estrategias con el objetivo de reducir la emisión de contaminantes al medio ambiente, por lo que varios países han definido ya sus pautas para los próximos años, con miras a una neutralidad en emisiones de CO<sub>2</sub>.



**Figura 4.** Valores similares de emisiones de CO<sub>2</sub> (kt) del consumo de combustibles líquidos en el mundo [4]

De acuerdo con los datos reportados por la ONU en su informe sobre la brecha en las emisiones de 2020, las emisiones mundiales de GEI volvieron a aumentar por tercer año consecutivo y se situaron en un valor histórico de 52,4 GtCO<sub>2</sub>e ± 5,2. Análogamente, las emisiones fósiles de CO<sub>2</sub> alcanzaron un nivel sin precedentes en 2019, llegando a valores de 38 GtCO<sub>2</sub>e ± 5,2 [5].

Por su parte, la crisis de la COVID-19 solo ha desencadenado la disminución a corto plazo de las emisiones mundiales, alrededor de 7% en 2020 en comparación con los índices del 2019, y no generará una contribución de peso a la reducción de las emisiones para el año 2030, a menos que los países aspiren a una recuperación económica que incluya una descarbonización.

China, como mayor emisor de CO<sub>2</sub> en el mundo, establece como uno de sus objetivos nacionales reducir las emisiones, la protección y recuperación del medio ambiente, siendo neutro en CO<sub>2</sub> para 2060. Por su parte Francia y Reino Unido han garantizado por ley su meta de cero emisiones netas de GEI, mientras que Japón se propone alcanzar las cero emisiones netas de GEI. República de Corea tiene la voluntad de lograr una huella neta de carbono igual a cero, Canadá pretende promulgar una ley que estipule que las emisiones netas se reducirán a cero, Sudáfrica aspira a la meta de cero emisiones netas de carbono y, en el caso de países

de América Latina, Argentina y México trabajan en aras de las cero emisiones netas, todos ellos para el 2050 [5].

En el caso de Colombia, la ley 1972 de 2019 establece medidas que tienden a la reducción de emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles que circulen por el territorio nacional, dando cumplimiento a las normativas de emisiones contaminantes provenientes de vehículos, clasificadas como EURO, donde se debe trabajar desde la calidad de los combustibles y la mejora de la tecnología de tratamiento de gases de escape, cumpliendo con límites de emisión definidos. La mencionada ley, además obliga para cada una de las fuentes móviles normativas específicas, tales como:

- **Vehículos**

- A partir del 1° de enero de 2023 las fuentes móviles terrestres con motor ciclo diésel que se fabriquen, ensamblen o importen al país, tendrán que cumplir con los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes al aire correspondientes a tecnologías Euro VI, su equivalente o superiores;
- Como segunda fase, se espera que el 1° de enero de 2035 todos los vehículos con motor diésel que circulen por el territorio nacional tendrán que cumplir Euro VI en uso, su equivalente o superiores.

- **Motocicletas**

- A partir del 1° de enero de 2021 todas las motocicletas que se fabriquen, ensamblen o importen para circular por el territorio nacional, deberán cumplir con los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes al aire correspondiente a Euro 3, su equivalente o superior;
- Además, existe un plan y cronograma de renovación del parque automotor de motocicletas en circulación. En el año 2030 se deben cumplir con los límites máximos permisibles de emisión correspondientes a Euro 3, su equivalente o superior;

- **Uso de Energías Renovables y Transporte Sostenible**

- A partir del 1° de enero de 2030 todos los SITM, SETP, SITP y los SISTR deberán contar con un mínimo de 20% de la flota total nueva correspondiente a tecnología cero emisiones;
- Se fomentará la participación ambiental por parte del Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Salud, para propiciar la investigación y generaciones de:
  - Alternativas para mejorar la calidad de aire;
  - Disminuir las concentraciones de contaminantes en el aire y prevenir sus efectos en la salud;
  - Implementación de sistemas de seguimiento y monitoreo a la calidad del aire.

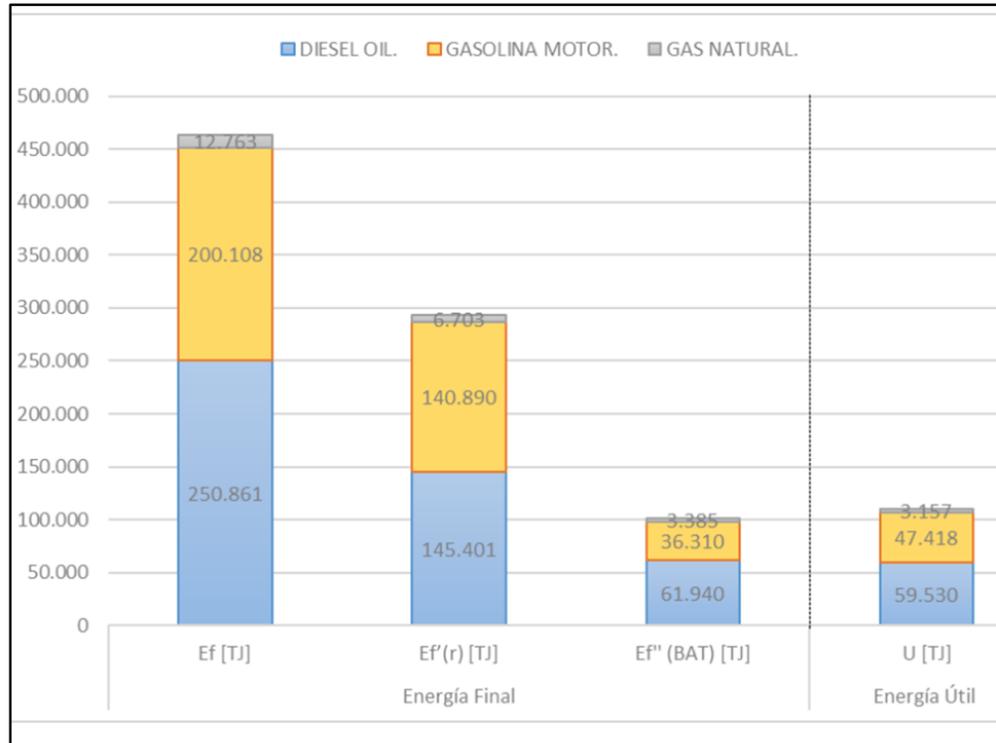
#### 1.4. Impacto en el sector transporte

La UNFCCC determinó una serie de compromisos para cada uno de los países aliados, buscando disminuir los GEI, lo que generaría un cambio en cuanto al consumo energético de los sectores asociados al cambio climático (industrial, residencial, comercial, agricultura, construcción, minería y transporte). Con tal propósito, cada país debe adoptar nuevas medidas que permitan identificar políticas de mejora en la eficiencia energética con base en las tecnologías usadas disponibles en el ámbito nacional e internacional de cada sector.

Por su parte, en Colombia y bajo el liderazgo de la UPME, para cuantificar las pérdidas económicas ocasionadas por la obsolescencia, las prácticas operativas y la poca diversificación de la matriz energética, se utiliza un Balance de Energía Útil (BEU), que compara las características de los equipos actuales contra la mejor tecnología disponible (*Best Available Technologies - BAT*), tanto a nivel local como a nivel internacional. De acuerdo con lo anterior, el análisis sobre factores de eficiencia en el sector transporte determinó que la energía final para el año 2015 fue de 494.560 TJ, de los cuales el 94%, es decir, 463.732 TJ pertenece a la energía utilizada por el sector transporte (carga y pasajeros), siendo así que el 54% de la energía final (diésel) se da por parte de los segmentos de carga y pasajeros, el 44% de la demanda de gasolina para los mismos segmentos y, la diferencia de casi el 3%, corresponde al consumo de gas natural [6].

Igualmente, la energía útil obtenida para el sector transporte corresponde a 112.214 TJ, es decir, aproximadamente el 26% de la energía final del total carretero. Comparado con las mejores tecnologías del mercado nacional, el potencial de incremento de la eficiencia en la energía útil aumenta de 111 PJ a 170 PJ; con respecto al potencial BAT, la eficiencia aumenta de 111 PJ a 287 PJ, un factor de incremento de 2,7 veces [7]. El cálculo del BEU permite no solo caracterizar el consumo de energía final por tipo de vehículo y su rendimiento, sino que define las bases para realizar estimaciones de potenciales de ahorro. Estos potenciales se interpretan como márgenes de reducción de consumo alcanzables si la tecnología existente en el sector de transporte colombiano presentara rendimientos acordes a las eficiencias de referencia de los mejores equipos disponibles en el país, y la alcanzable si la tecnología existente fuera tan eficiente como la mejor tecnología desarrollada hasta el momento.

La **Figura 5** presenta los valores reportados en el BEU sobre el sector transporte para Colombia de acuerdo con las últimas comparaciones para los combustibles de referencia, gasolina, diésel y metano (gas natural), estudio realizado por la UPME.



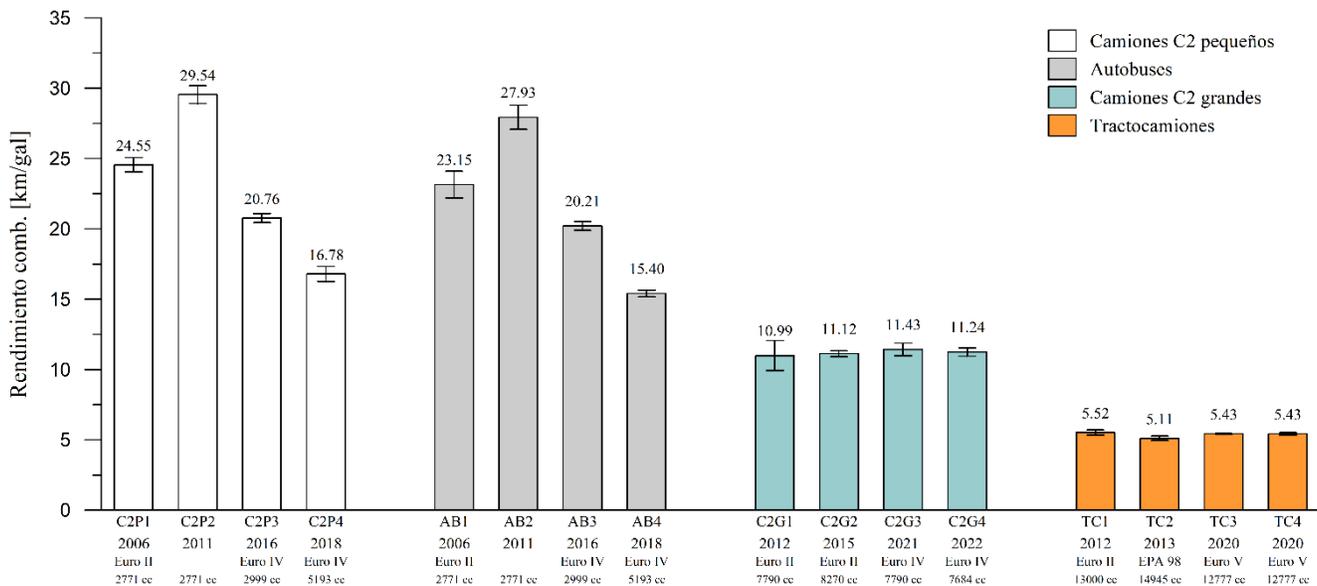
**Figura 5.** BEU para el sector transporte en Colombia (Tomado de [7])

El BEU permitió estimar las eficiencias en km/galón o km/m<sup>3</sup> de acuerdo al combustible utilizado (gasolina, diésel, o metano -gas natural-) en las principales ciudades del país y para cada tipo de vehículo en el mercado colombiano (automóviles, motocicletas, camionetas, taxi, bus, buseta, microbús, camión y tractocamión). Igualmente, se reportaron las pérdidas por ineficiencia con respecto a las tecnologías disponibles en el mercado a nivel internacional (vehículos híbridos y eléctricos).

En el caso de los vehículos pesados para transporte de carga, los valores reportados en el último BEU (**Figura 6**) muestran el rendimiento promedio en km/galón o km/m<sup>3</sup>, además de la energía en kJ/km para el año 2015 con datos y estudios realizados en las diferentes ciudades de referencia en Colombia. La información de los rendimientos reportados, según el tipo de vehículo y el combustible utilizado, se encuentra sujeta a las metodologías utilizadas por cada una de sus fuentes [7]. En la **Figura 7**, y a modo de comparación, se presentan los rendimientos promedios medidos a la altura del área metropolitana de Bucaramanga (alrededor de 900 msnm). Para tal fin se utilizó un equipo de medición de consumo de combustible instantáneo (Ono Sokki), proporcionado por ECOPETROL.

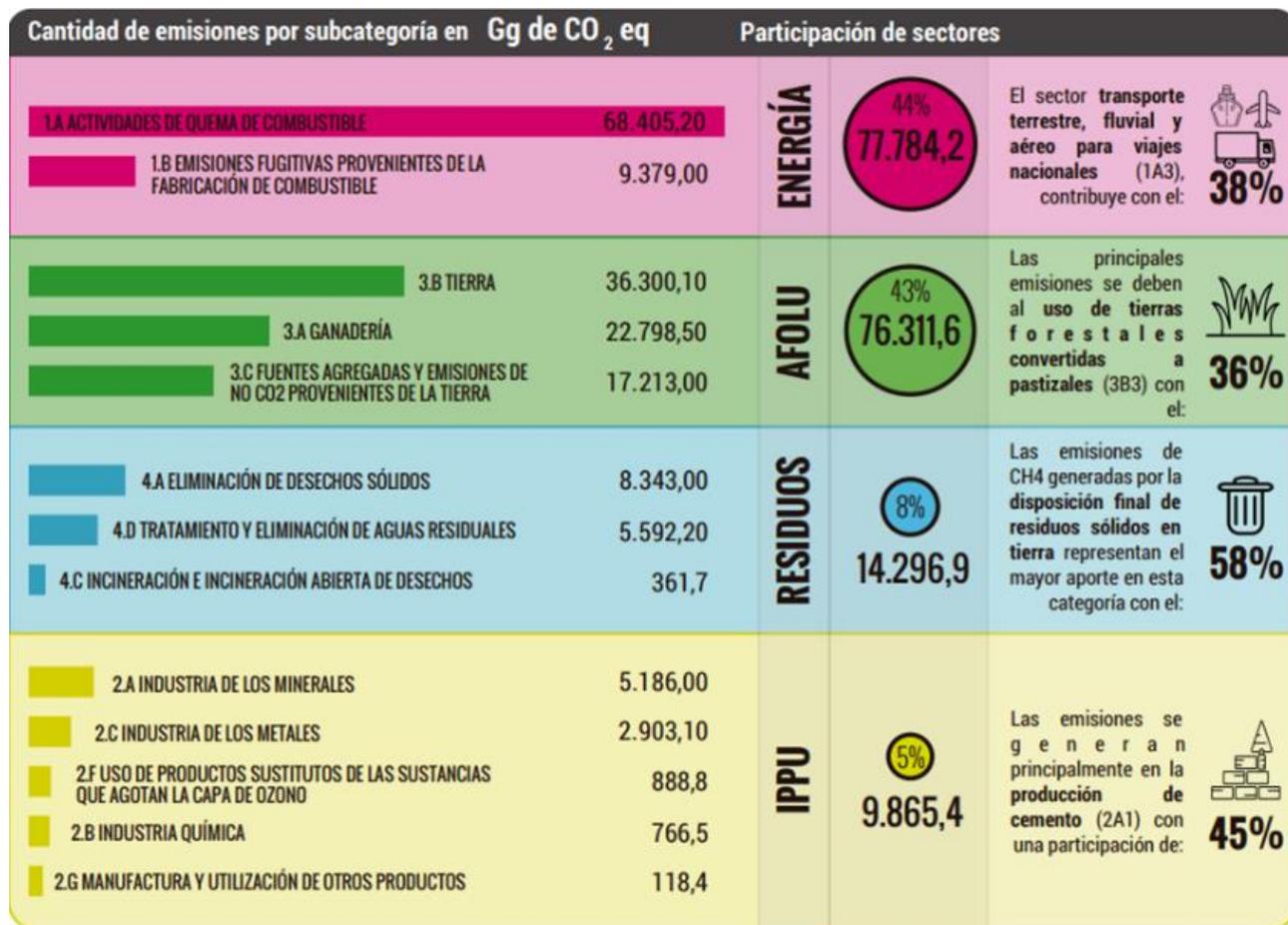
		km/gal o km/m3	kJ/km	Fuente
Bogotá	Diésel	15	9.700	Behrentz (2014)
	Gasolina	11	10.864	Uninorte-Terpel, 2013
	Gas natural	5	7.301	Uninorte-Terpel, 2013
Barranquilla	Diésel	15	9.700	Behrentz (2014)
	Gasolina	5	24.334	Uninorte-Terpel, 2013
	Gas natural	2	15.514	Uninorte-Terpel, 2013
Medellín	Diésel	9	16.167	Mintransporte (s.f)
	Gasolina	11	10.767	Uninorte-Terpel, 2013
	Gas natural	4	9.309	Promedio ciudades
Cali	Diésel	10	15.000	Mintransporte (s.f)
	Gasolina	11	10.864	Uninorte-Terpel, 2013
	Gas natural	4	8.462	Uninorte-Terpel, 2013
Nacional	Diésel	12	11.951	Promedio ciudades
	Gasolina	10	12.576	Promedio ciudades
	Gas natural	5	9.387	Promedio ciudades

**Figura 6.** Rendimiento promedio de combustible de camiones en Colombia año 2015 (Tomado de [7])



**Figura 7.** Rendimiento promedio de combustible (km/gal) medidos (aprox. 900 msnm)

Por otra parte, el Informe Bienal de Actualización de Colombia (IBA), presentó en la UNFCCC sus resultados basados en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), correspondientes al periodo 1990 - 2012. Históricamente, los sectores de emisiones de GEI son categorizados en cuatro grupos diferentes (IPPU, residuos, AFOLU y energía) como se muestra en la **Figura 8**, donde se relacionan y especifican cada una de las actividades que pertenecen a ellos, como por ejemplo actividades de quema de combustible y emisiones provenientes de la fabricación del combustible que particularmente define al sector energía, aportando un valor considerablemente alto (44%), seguido por el sector AFOLU con un 43% y el sector de residuos con un 8% y, finalmente, el IPPU con un 5%. [8].



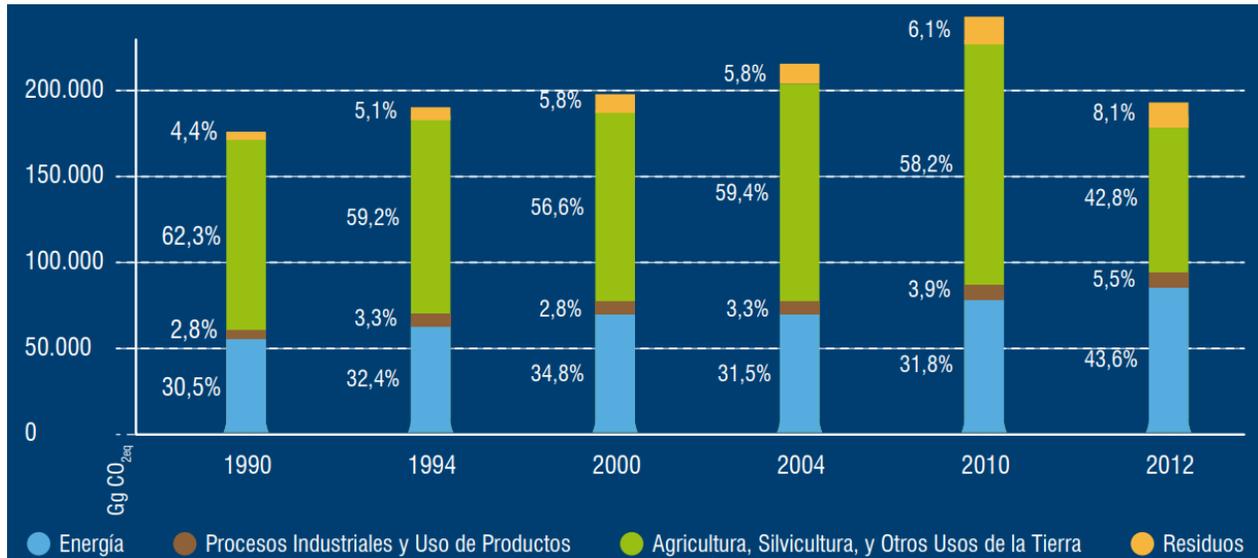
**Figura 8.** Cantidad de emisiones por subcategoría en Gg de CO<sub>2</sub> eq. (Tomado de [8])

En 2015 el país presentó el primer informe bienal de actualización (IBA-1) de GEI en el marco regulatorio encaminado a lograr el cumplimiento de los compromisos adquiridos en la UNFCCC, dirigido a disminuir los GEI no controlados por el protocolo de Montreal [9]. En este informe, el sector transporte se llevó el primer puesto con el 16.7% de la emisión total de GEI; posteriormente, en el segundo IBA-2 del año 2018, el mismo sector descendió al tercer lugar con el 12%, después de los emitidos por tierras forestales (17%) y pastizales (14%) [10]. Ambos informes revelan la importancia del sector transporte en el ámbito de las emisiones de GEI, y por lo tanto demandan políticas puntuales, tal como se ha hecho con la adopción de las normas de control de contaminación ambiental para vehículos nuevos, a través de las resoluciones 910 de 2008, la 1111 de 2013, por las que se obliga a todos los vehículos con motor diésel cumplir el estándar Euro 4/IV a partir de 2015 en el país; por su parte, la ley 1972 de 2019 mencionada anteriormente, obligó al uso de tecnologías Euro 6/VI para todos los vehículos diésel que entren o se ensamblen en el país. También ha sido clave la ley de promoción de la movilidad eléctrica, ley 1964 de 2019, en la que se establecen los compromisos de electrificación del sector transporte terrestre de carretera colombiano.

Otro aspecto importante para resaltar, es el comportamiento de las emisiones totales por categoría asociado a los diferentes sectores en el periodo 1990 - 2012, es decir, cómo los

sectores han aumentado o disminuido con relación a los cambios realizados gradualmente. Para el caso del sector energía, es posible notar un incremento gradual entre los años 1990 (30.5%) hasta 2000 (34.8%). En 2004 se presentó un decrecimiento de 1,5% respecto al año 2000, el cual correspondió a la disminución de consumos de combustibles en generación de energía eléctrica y, a partir de allí, un aumento considerablemente alto llegando a 43.6% en 2012, donde el transporte terrestre, fluvial y aéreo para viajes nacionales contribuyó con el 38% [8].

En el sector de la energía, las principales variables que controlan el comportamiento de las emisiones son el consumo anual de combustibles en el sector transporte y el consumo anual de combustibles para generación de energía. Para el año 2000, el 74% de la generación de energía eléctrica en Colombia fue de origen hidráulico y el 24% de origen térmico, mientras que, en 2004, la generación hidráulica subió al 78% y la generación térmica bajó al 17%, lo que ocasionó que el consumo de metano y carbón disminuyera de manera significativa (107.500 TJ en 2000 a 84.414 TJ en 2004) [8]. Los datos que explican dicho comportamiento son presentados en la **Figura 9**.



**Figura 9.** Emisiones totales por categoría en 1990, 1994, 2000, 2004, 2010 y 2012 (Tomado de [8])

Como estrategia para disminuir el impacto del CO<sub>2</sub>, en el INGEI, Colombia planteó acciones de mitigación de desarrollo bajo en carbono, buscando un Mejoramiento Integrado del Sector de Transporte de Carga por Carretera en Colombia (MITCCC), fortaleciendo el sector a través del desarrollo de programas de capacitación y educación dirigidos a los conductores de los vehículos, operarios e involucrados con toda la cadena de operación, con el fin de avanzar hacia la formalización, profesionalización y desarrollo de buenas prácticas del sector, así como garantizar la sostenibilidad de esta clase de acciones en el largo plazo.

Con relación al transporte y desarrollo urbano, la estrategia es el Desarrollo Orientado al Transporte (TOD por sus siglas en inglés), donde lo que se busca es eliminar barreras para avanzar hacia el desarrollo urbano orientado al transporte público, centrándose en el desarrollo

urbano público y privado en torno a las estaciones de los sistemas actuales de transporte público. Así, se busca crear barrios donde la gente pueda caminar con seguridad, vivir, trabajar, comprar y jugar, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos, la equidad social, la prosperidad económica, al mismo tiempo que se reducen las emisiones de GEI [8].

En términos de calidad del aire, Colombia ha venido implementando progresivamente desde 1982 una serie de políticas que velan por un aire sano para sus habitantes. Es así como la primera norma que regula emisiones contaminantes fue emitida por el presidente de la República mediante el Decreto 02 de 1982, momento en el que aún no se había creado el Ministerio de Ambiente en el país. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), emitió en 2017 la Resolución 2254, que tiene como finalidad establecer los umbrales máximos por contaminantes regulados a nivel nacional orientados bajo las guías recomendadas por la organización mundial de la salud (OMS). En materia de política pública, el gobierno ha emitido varios documentos CONPES que buscan prevenir y controlar la calidad del aire. En 2005, el CONPES 3344, estableció los lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire en Colombia. En 2018, el CONPES 3918, fijó las metas y estrategias para el cumplimiento de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible y sus objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en sus tres dimensiones: social, económica y ambiental. Con este documento se busca avanzar en el cumplimiento de metas concretas y consolidar avances en materia de cambio climático, así como adoptar estándares mundiales como los propuestos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Finalmente, el documento CONPES 3943, también de 2018, definió las propuestas de política para el mejoramiento de la calidad del aire, contemplando en su plan de acción la actualización de parámetros de calidad de los combustibles y biocombustibles, fijando una línea de tiempo para que, en conjunto los Ministerios de Minas y Energía y del MADS, adopten las medidas que lleven a la reducción del contenido de azufre de los actuales 50 ppm hasta llegar a 10 ppm en 2030.

En 2008, el MADS emitió la Resolución 910, por la cual se limitaron las emisiones contaminantes de vehículos livianos y pesados, así como de motocicletas. Por su parte, en 2013, la Resolución 1111, obligó a que todos los vehículos diésel nuevos que ingresaran o se ensamblaran en el país a partir del 1 de enero de 2015 tendrían que cumplir con la norma de emisiones europea Euro 4/IV (vehículos livianos/vehículos pesados). Esto a su vez conllevó la actualización de exigencia en la calidad del combustible diésel, la cual fue fijada por el Ministerio de Minas y Energía mediante Resolución 9 0963 de 2014, recientemente actualizada con la Resolución 4 0619 de 2017.

Por otra parte, en 2019 el sector transporte (terrestre, fluvial y aéreo) consumió alrededor del 40% de la energía primaria del país, ubicándolo en primer lugar por encima de sectores como el industrial, residencial, comercial, agricultura, construcción y minería. En ese mismo año, los combustibles fósiles representaron cerca del 90% del total, mientras que los biocombustibles convencionales (biodiesel de palma y bioetanol de caña de azúcar) el 10%, y solo un 0.07%

correspondió a la electricidad. Por otra parte, el BEU realizado por la UPME, permitió identificar que el sector transporte concentraba la mayor ineficiencia energética del país, representando el 66% del total de la energía perdida en Colombia [6]. El transporte público de buses y busetas supone un aprovechamiento de energía útil de tan sólo entre 8% y 10%, valores que son marcadamente inferiores a los obtenibles con las BAT en el ámbito nacional e internacional, lo que deriva en la posibilidad de darle prioridad a políticas de mejora de eficiencia energética de dicho sector.

La ley 1931 de 2018 estableció las directrices para la elaboración de un Plan Integral de Gestión del Cambio Climático (PIGCC) en Colombia, que fue adoptado por el Ministerio de Minas y Energía mediante la Resolución 4 087 del mismo año, para fijar las metas de reducción de GEI por líneas estratégicas, correspondiéndole a esta cartera una reducción en el rango de 2.48 a 12.3 Mt CO<sub>2</sub>eq al año 2030. Este decreto, el más reciente a la fecha en materia de cambio climático del país, deja en evidencia no sólo que estamos en una fase inicial del proceso de establecimiento de políticas de sostenibilidad energética en el sector transporte, sino que, además, muestra el poco impacto que podrían tener las políticas allí contempladas, enfocadas a formular un programa de reemplazo tecnológico por electromovilidad únicamente en la flota de entidades públicas, cuya línea de tiempo quedó fijada en la ley 1964 de 2019, así como pretender definir la viabilidad de usar el metano licuado (GNL), de origen fósil. Las emisiones de CH<sub>4</sub> han demostrado tener un impacto del orden de 25 veces mayor como GEI que el CO<sub>2</sub>, además de que conlleva procesos de licuefacción y gasificación intensivos en consumo energético, haciendo que sus emisiones en ciclo de vida no sean necesariamente beneficiosas.

## Referencias capítulo 1

- [1] Observatorio del principio 10 y Comisión Económica de América Latina y el Caribe (CEPAL), «Observatorio del principio 10 en América latina y el Caribe». <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/convencion-marco-naciones-unidas-cambio-climatico> (accedido oct. 10, 2021).
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] Banco Mundial, «Emisiones de CO<sub>2</sub> (Kt) - Colombia», 2021. [https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2018&locations=CO&name\\_desc=false&start=2018&view=bar](https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2018&locations=CO&name_desc=false&start=2018&view=bar).
- [5] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, «Informe sobre la Brecha de Emisiones 2021. La calefacción está encendida: un mundo e compromisos climáticos aún por cumplirse. Resumen ejecutivo.» Nairobi, 2021.
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Balance de Energía Útil 2015: Primer balance de Energía Útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética». Colombia, 2019.
- [7] UPME, «Resumen Ejecutivo BEU Sector Transporte», en *Primer balance de Energía útil para Colombia y Cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética*, Bogotá y Karlsruhe, 2019.
- [8] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEA, «Resumen Ejecutivo», en *Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*, Bogotá, 2015.
- [9] IDEAM y PNUD, «Primer informe bienal de actualización Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)». Colombia, 2015.
- [10] IDEAM y PNUD, «Segundo informe bienal de actualización Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)». Colombia, 2018.

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA**

## Contenido Capítulo 2

<b>2. Metodología</b> .....	24
<b>2.1. Ciclos de conducción y descripción de la ruta de pruebas</b> .....	26
<b>2.2. Determinación de los factores de emisión</b> .....	28
<b>Referencias Capítulo 2</b> .....	29

## Índice de Figuras Capítulo 2

<b>Figura 2. 1.</b> Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1 .....	25
<b>Figura 2. 2.</b> Comparación de ciclo de conducción para vehículos livianos en ruta vs. en laboratorio (banco de rodillos y vs. la referencia. ....	25
<b>Figura 2. 3.</b> Comparación de FE y rendimiento de combustible de una camioneta con motor diésel 2.8 litros, turboalimentada, tanto en ciclo de conducción en ruta como en ciclo de conducción en laboratorio (banco de rodillos) .....	26
<b>Figura 2. 4.</b> Ciclo de conducción de camiones en Colombia con sus parámetros característicos .....	27
<b>Figura 2. 5.</b> Camión de prueba. Izq.: intervención del tubo de escape. Der.: con equipos de medición y carga simulada a bordo .....	27
<b>Figura 2. 6.</b> Ruta de pruebas sobre el anillo vial entre Girón, Bucaramanga y Floridablanca (Santander).....	28

## 2. Metodología

El grupo ejecutor, en común acuerdo con ECOPETROL, adoptaron la metodología que se presenta en la **Figura 2. 1**. Los vehículos de prueba más representativos, así como los ciclos de conducción fueron seleccionados de acuerdo a las directrices del informe final convenio No. CV-001-2020 (FECOC+ Fase 1) [1]. Se procuró seleccionar para cada tipo de vehículo, a saber, camiones de dos ejes C2 livianos o pequeños (C2P) con capacidad de carga inferior a 5 toneladas, camiones de dos ejes grandes (C2G) con capacidad de carga inferior a 11 toneladas, y Tractocamiones C3S2 con capacidad de carga inferior a 35 toneladas, tecnologías de control de emisiones antiguas (Euro II o EPA 98) y nuevas para el parque automotor colombiano (Euro IV y Euro V), con el fin de tener un comparativo en el impacto de la tecnología sobre los factores de emisión. Los vehículos operaron con combustible diésel comercial. En el **Anexo 1** aparece el listado de los vehículos medidos y sus principales características técnicas.

Para el caso de los vehículos C2P (tres camiones con capacidad de carga inferior a 3 toneladas y con cilindradas entre 2771 cm<sup>3</sup> y 3000 cm<sup>3</sup>, y uno con capacidad de 5 toneladas y 5192 cm<sup>3</sup> de cilindrada), se midieron sus factores de emisión en banco dinamométrico de rodillos (chasis) y no en carretera, previa constatación con resultados obtenidos en ruta. En la **Figura 2. 2** se muestra la fidelidad de los ciclos de conducción reproducidos en carretera y en el banco de rodillos, frente al de referencia desarrollado en FECOC+ Fase 1.

Para verificar la validez de medir FE en banco de rodillos en lugar de usar pruebas en carretera, se utilizó una camioneta *Nissan Frontier*, propiedad de ECOPETROL, dotada con un motor diésel de 2.8 litros de cilindrada, turboalimentada, con tecnología de control de emisiones Euro 2, sobre la cual se reprodujo el ciclo de conducción para vehículos livianos, establecido previamente en el proyecto FECOC+ Fase 1, tanto en carretera – incluyendo la variación en las pendientes de la vía –, como en banco de rodillos.

Los resultados de FE obtenidos fueron similares para el ciclo de conducción reproducido en carretera frente al reproducido en el banco de rodillos, tal como lo muestra la **Figura 2. 3**, por tanto, fue posible determinar los FE de los vehículos C2P siguiendo tanto los ciclos de conducción de camiones, típicos de repartición de paquetería de última milla, así como los ciclos de conducción de buses urbanos, reproduciéndolos en el banco de rodillos. Lo anterior se justifica porque, en Colombia, el chasis y motor de estos vehículos es el mismo para ambas categorías (buses y camiones C2P), lo único que cambia es la carrocería.

Por su parte, Los FE de los vehículos de dos ejes grandes C2G y de los tractocamiones se determinaron con medición a bordo en carretera.

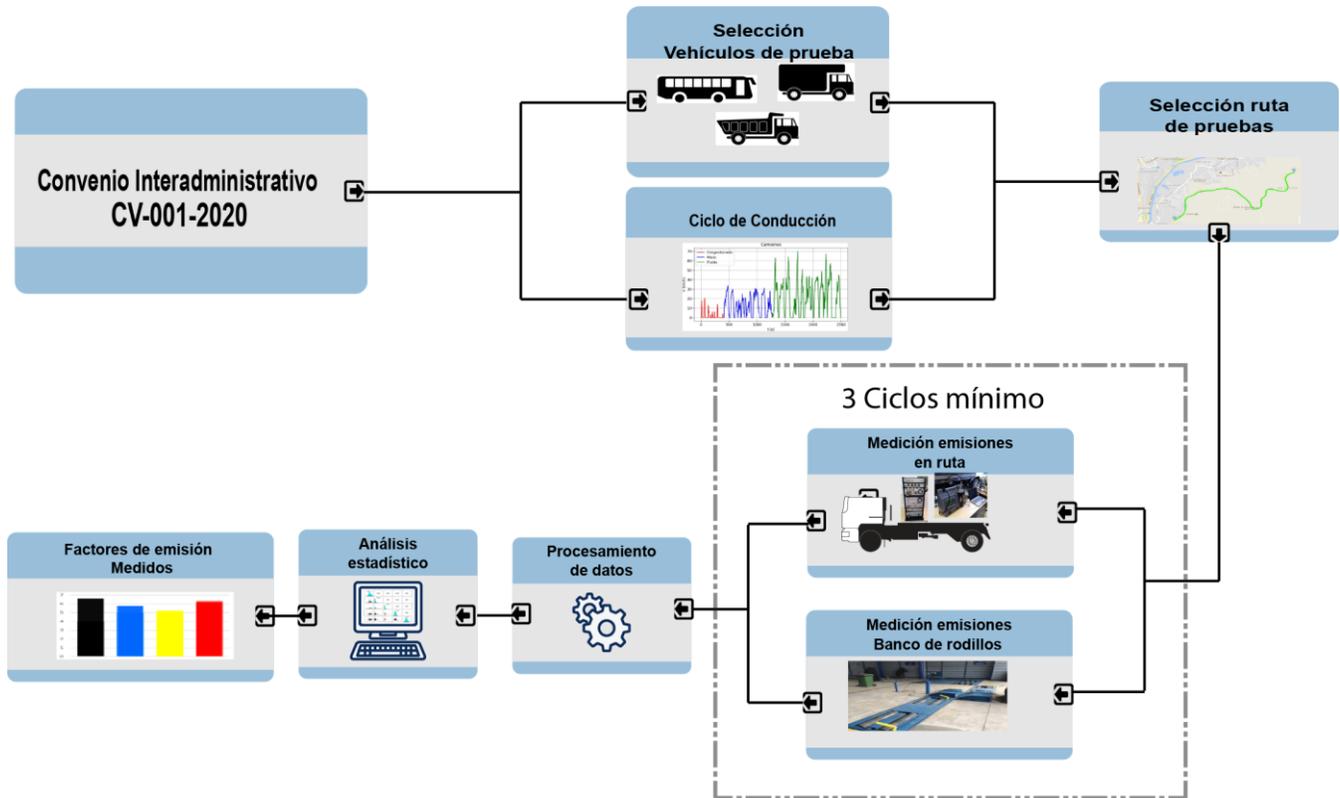


Figura 2. 1. Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1

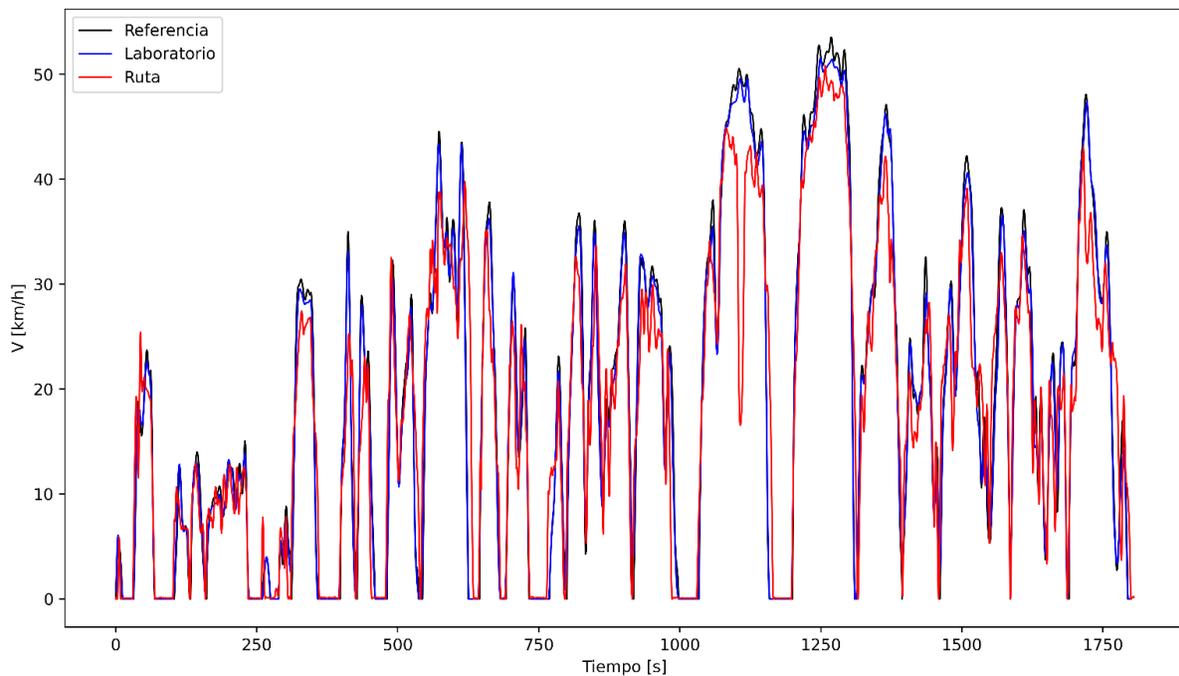
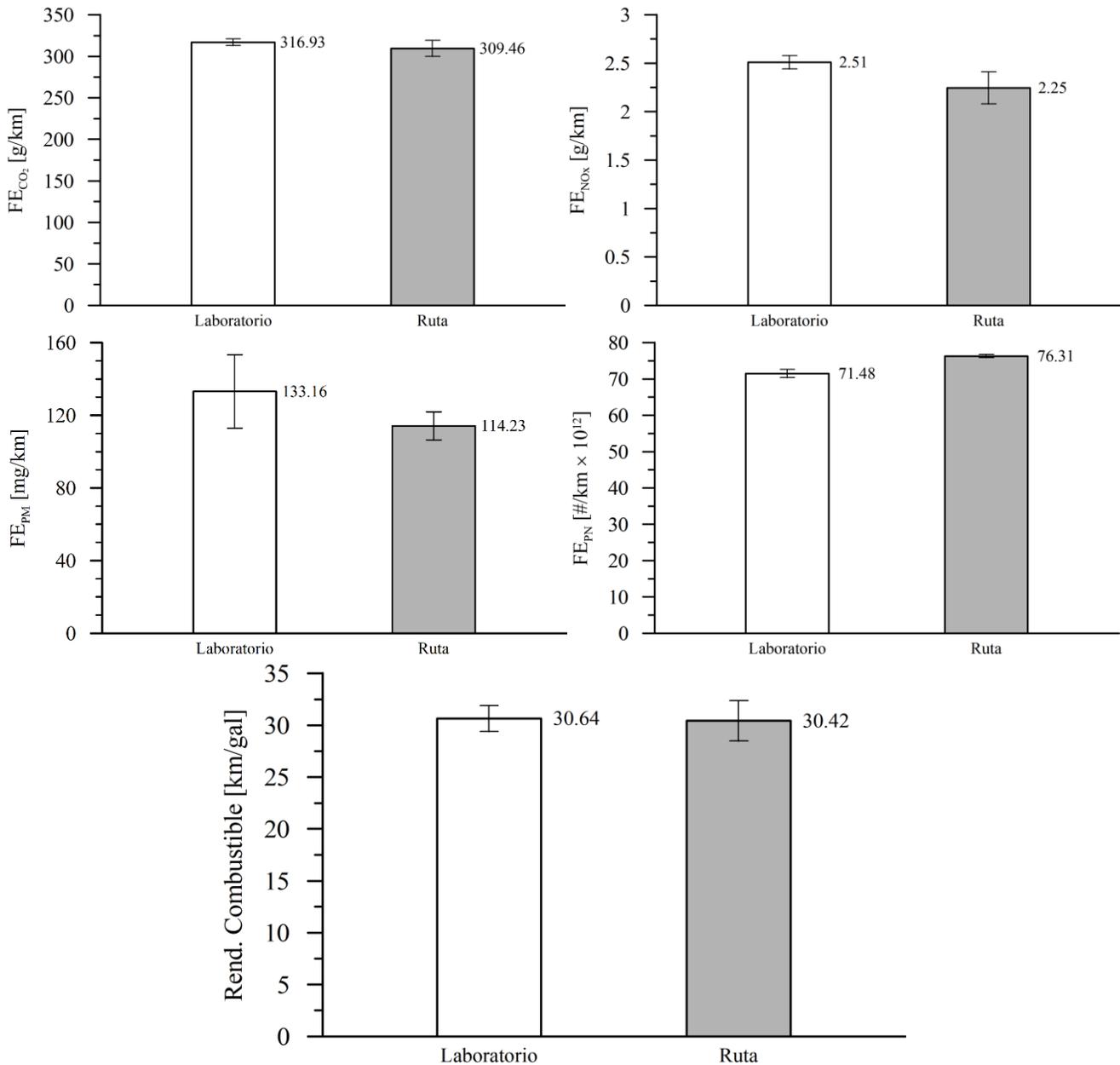


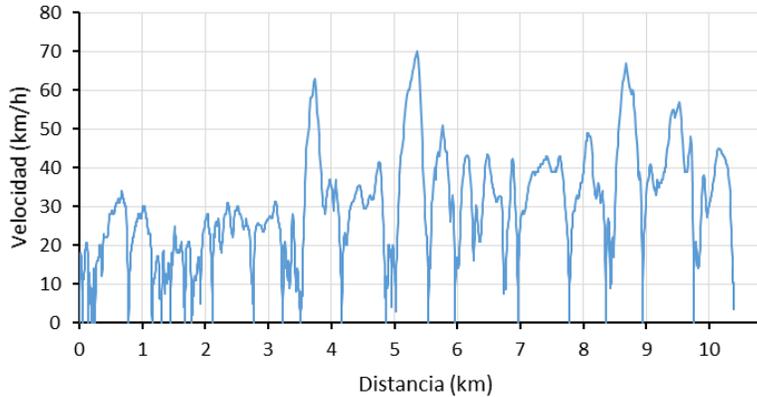
Figura 2. 2. Comparación de ciclo de conducción para vehículos livianos en ruta (rojo) vs. en laboratorio (banco de rodillos, azul) y vs. la referencia (negro).



**Figura 2. 3.** Comparación de FE y rendimiento de combustible de una camioneta con motor diésel 2.8 litros, turboalimentada, tanto en ciclo de conducción en ruta como en ciclo de conducción en laboratorio (banco de rodillos)

### 2.1. Ciclos de conducción y descripción de la ruta de pruebas

Toda la campaña experimental se llevó a cabo en el área metropolitana de Bucaramanga, ubicada a una altitud promedio de 900 msnm. A modo de ejemplo representativo, el ciclo de conducción para la categoría de camiones (C2P) que se utilizó es el que corresponde a la **Figura 2. 4**, donde se muestran además los parámetros característicos del ciclo de conducción de camiones sintetizado durante el convenio FECOC+ Fase 1 [1]. Se reprodujeron separadamente, según correspondía, los ciclos de conducción para buses y tractocamiones.



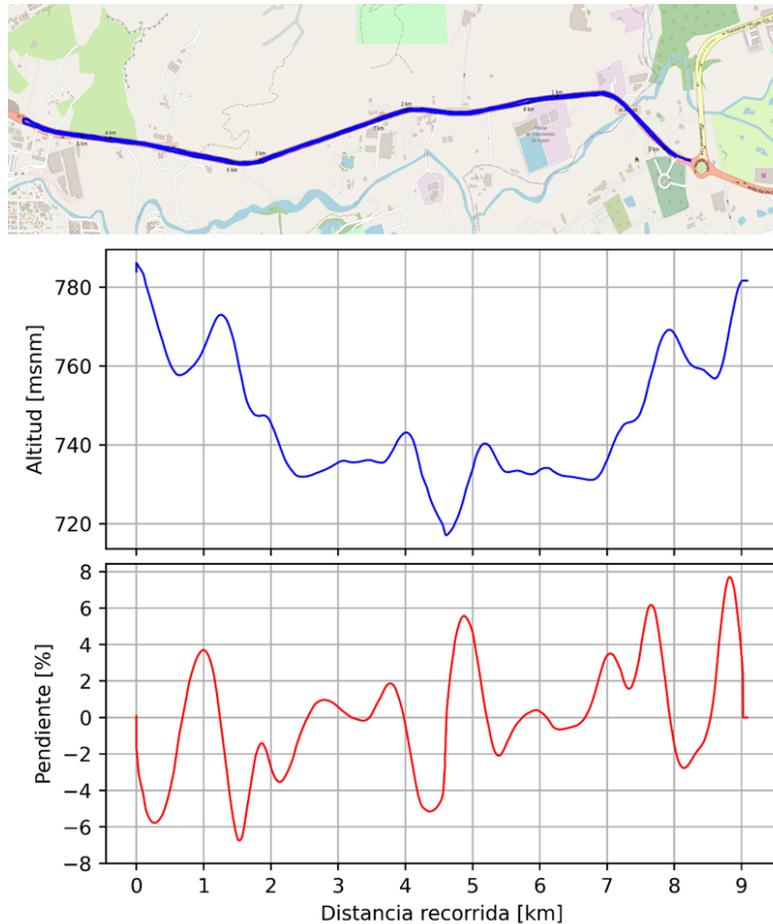
Parámetro	Valor
Duración [s]	2344
Distancia recorrida [km]	10.4
Velocidad promedio [km/h]	16.3
Velocidad promedio en movimiento [km/h]	23
Velocidad máxima [km/h]	70
Tiempo en ralentí [%]	28
Tiempo en aceleración [%]	29
Tiempo en deceleración [%]	26

**Figura 2. 4.** Ciclo de conducción de camiones en Colombia con sus parámetros característicos (ver informe final FECOC+ Fase 1). (Tomado de [1])

La determinación de los FE de los demás vehículos pesados (C2G y tractocamiones), se llevó a cabo mediante instrumentación con equipos de medición a bordo (ver **Figura 2. 5**), realizándose sobre el Anillo Vial que une los municipios de Girón y Floridablanca en el departamento de Santander (Colombia), con una distancia de 10.5 km (ver **Figura 2. 6**), debido a que el banco de rodillos no podía soportar el peso de algunas familias de vehículos pesados (para el esquema y las especificaciones técnicas del banco de rodillos ver Error! Reference source not found. **Anexo 3**).



**Figura 2. 5.** Camión de prueba. Izq.: intervención del tubo de escape. Der.: con equipos de medición y carga simulada a bordo



**Figura 2. 6.** Ruta de pruebas sobre el anillo vial entre Girón, Bucaramanga y Floridablanca (Santander).

## 2.2. Determinación de los factores de emisión

Con cada vehículo instrumentado se siguió el ciclo de conducción correspondiente, registrando valores instantáneos de velocidad del vehículo (tanto en carretera como en el banco de rodillos), del consumo de combustible, así como de los flujos máscicos de los principales contaminantes. Al final de cada prueba se totalizaron la distancia recorrida, así como la masa de cada contaminante durante ésta (y el número de partículas). De este modo, la determinación de los FE consistió en calcular el cociente entre el acumulado de masa / número de cada contaminante durante el ciclo, y la distancia recorrida durante éste.

Los grupos de trabajo de Ecopetrol –ICP- y de la Universidad de Antioquia revisamos los datos de cada equipo de medida para todas las pruebas, de modo que los datos reportados son correctos y representativos. Tanto la descripción del tratamiento estadístico de los datos, que incluye la determinación del error inducido en la reproducción de los ciclos, como la descripción detallada de los equipos portátiles de medición de emisiones (PEMS) se encuentran en el **Anexo 2** y **Anexo 3**, respectivamente.

Finalmente, en el **Anexo 4** se presentan las bases de datos a partir de las cuales se obtuvieron los factores de emisión.

## Referencias Capítulo 2

- [1] 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». Colombia, 2020.

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## Contenido Capítulo 3

<b>3. Resultados y discusión</b> .....	32
<b>3.1. Revisión de antecedentes sobre determinación de FE de vehículos pesados</b> .....	32
<b>3.2. Factores de emisión promedio de vehículos pesados para el área metropolitana de Bucaramanga</b> .....	34
<b>3.2.1. Gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>)</b> .....	34
<b>3.2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>)</b> .....	37
<b>3.2.3. Material particulado y número de partículas (PM y PN)</b> .....	41
<b>3.2.4. Hidrocarburos totales (THC)</b> .....	45
<b>3.2.5. Monóxido de carbono (CO)</b> .....	47
<b>3.3. FE de Tractocamiones tipo C3S2</b> .....	50
<b>3.4. FE de camiones de dos ejes grandes (C2G)</b> .....	52
<b>3.5. FE de camiones de dos ejes pequeños (C2P)</b> .....	54
<b>3.6. FE de buses</b> .....	56
<b>Referencias Capítulo 3</b> .....	57

## Índice de Figuras capítulo 3

<b>Figura 3. 1.</b> Comparación del CO <sub>2</sub> medido vs reportados en la literatura técnica .....	35
<b>Figura 3. 2.</b> CO <sub>2</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm) .....	36
<b>Figura 3. 3.</b> CH <sub>4</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm) .....	37
<b>Figura 3. 4.</b> Comparación de los NO <sub>x</sub> medido vs reportados en la literatura técnica.....	39
<b>Figura 3. 5.</b> NO <sub>x</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm).....	40
<b>Figura 3. 6.</b> NO <sub>2</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm) .....	40
<b>Figura 3. 7.</b> Comparación del PM (en masa) medido vs reportados en la literatura técnica .....	42
<b>Figura 3. 8.</b> PM (mg/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm) .....	43
<b>Figura 3. 9.</b> PN (#/km-ton en billones) medidos para vehículos de carga/pasajeros.....	44
<b>Figura 3. 10.</b> Comparación del THC medido vs reportados en la literatura técnica .....	46
<b>Figura 3. 11.</b> THC (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm) .....	47
<b>Figura 3. 12.</b> Comparación del CO medido vs reportados en la literatura técnica .....	48
<b>Figura 3. 13.</b> CO (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm) .....	49

## Índice de Tablas capítulo 3

<b>Tabla 3. 1.</b> Experiencias con el uso de PEMS en mediciones a bordo de vehículos pesados .....	33
<b>Tabla 3. 2.</b> FE promedio medidos a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga para la categoría de vehículos pesados de carga y de pasajeros .....	34

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Revisión de antecedentes sobre determinación de FE de vehículos pesados

Los vehículos pesados tanto de transporte de carga como de pasajeros, juegan un papel protagónico en el consumo de combustible y en la producción de emisiones al ambiente, especialmente de material particulado (en masa PM y en número PN), y de óxidos de nitrógeno (NOx) cuando se trata de vehículos provistos con motores a ciclo diésel. Mediante mediciones a bordo con sistemas portátiles de emisiones (PEMS), un estudio realizado en cinco ciudades chinas estimó que más del 80% de las emisiones de PM proveniente de vehículos terrestres, eran generadas por camiones con motores diésel [1]. A diferencia de los vehículos livianos, a los que se les suele medir los FE en bancos de rodillos, con los vehículos pesados no es frecuente hacerlo debido no sólo a las dificultades asociadas al peso del vehículo y a la precisión en la aplicación de las cargas en los rodillos, sino a la vocación específica para la que es usada el vehículo (transporte de pasajeros, carga, uso agrícola, etc). Por esta razón, la mayoría de los estudios reportados en la literatura coinciden en usar PEMS ubicados a bordo de los vehículos y bajo ciclos de conducción representativos [2], [3].

Los PEMS pueden proporcionar una amplia base de datos de valores de emisiones al ser instalados en vehículos de diferentes categorías, tecnologías y conducidos bajo diferentes condiciones y tipos de combustibles. Es así como *Franco et al* concluyen que, debido a estas razones, los PEMS son una herramienta potente y robusta para medir emisiones contaminantes a bordo de vehículos [4], ya que los PEMS proporcionan datos de emisiones contaminantes de forma instantánea con niveles satisfactorios de precisión. Además, estos han sido objeto de grandes avances tecnológicos y suelen ser empleados frecuentemente para este tipo de proyectos que buscan determinar FE en condiciones de operación reales.

López-Martínez y colaboradores, propusieron una metodología para estimar las emisiones contaminantes empleando un PEMS a través de la definición de un número de variables cinemáticas de operación del vehículo pesado (parámetros característicos), en rutas seleccionadas previamente, usando análisis de agrupamiento (*clustering*), según parámetros característicos tales como velocidad, aceleración, cantidad de paradas, entre otras [5]. En la **Tabla 3. 1** se recogen varias experiencias internacionales que usaron equipos PEMS para determinar factores de emisión de vehículos pesados midiendo bajo ciclos de conducción en carretera, y se comparan con resultados obtenidos con la misma metodología en Colombia en 2019 [6] y en 2021 (FECOC+ Fase 2.1).

**Tabla 3. 1. Experiencias con el uso de PEMS en mediciones a bordo de vehículos pesados**

País	Referencia	# vehículos ensayados	Actividad	Peso (ton)	Norma de emisión	Modelo	Ruta	Consumo combustible	CO2 (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)	THC (g/km)	CO (g/km)	Observaciones
China	Chen et al 2007	9	Camiones Carga	3,4 - 10	---	1999 - 2002	Urbano y Autopista	1l/h - 10L/h	---	6,54 ± 1,9	---	1,88 ± 1,03	4,96 ± 2,9	FE entre 55% (THC) y 75% (NOx) más bajos que modelo MOBILE para Shanghai
USA	Durbin et al 2008	5	Tractocamiones	30	---	1996-2005	Urbano y Autopista	---	---	8 a 56	160 a 1090	0,16 a 3,2	1,6 a 4,8	Medición de emisiones bajo operación real en California
USA	Johnson et al 2009	1	Tractocamión	30	USEPA 2007	2004	Urbano y Autopista	---	---	---	---	---	---	Mediciones en ruta convierte emisiones a g/kW-h para comparar con el estándar
China	Liu et al 2011	4	Bus	17,8 - 18	Euro III - IV	---	Urbana y Autopista	8,3 a 9,4 km/gal	---	---	---	---	---	Pruebas en ruta con PEMS en Beijing condiciones reales (Emisiones en g/kW-h)
Italia	Fontaras et al 2012	4 (1 Diesel + 3 GNC)	Recolectores de basura	16	Euro V	---	Urbano (Diésel)	---	2430	32.3	46.4	0.21	7.43	Desempeño Camiones a CNG depende de la calibración del motor, sistemas postratamiento y adaptación del motor al GN
							Urbano (GNC)	---	3645	4.38	11.4	2.19	15.8	
China	Huo et al 2012	175	Carga y pasajeros	5 a 20	preEuro a Euro IV	1996-2010	Urbano y Autopista	---	---	3,2 a 14,8	10 a 910	0,2 a 2,4	1,1 a 18,6	Mediciones en ruta en 5 ciudades chinas. Vehículos livianos, medios y pesados diésel
China	Huang et al 2013	2	Liviano	2.5	Euro 3	2010	Urbana	---	---	0.68	170	0.039	0.53	PEMS en ruta para Diesel liviano, Bus y vehículo liviano a gasolina. PN similar los 3
			Bus	28.0	Euro IV					---	5,58 - 10,7	670	0.02	
China	Zhang et al 2014	15	Bus	18.0	Euro IV y V	2007-2011	Urbana	---	---	7,5 Diesel; 4,4 híbrido; 3,2 GN	---	0,25 Diesel; 0,09 híbrido; (0,47-3,6) GNC	3 Diesel; 3 híbrido; (1,5-54) GNC	Comparación Nox entre 2 Euro V diésel, 2 Euro IV híbridos diésel, 9 buses a GNC y 2 GNL
USA	USEPA 2015	---	Bus Urbano	18.0	---	< 2004	Urbana	---	---	9	---	---	2	Exhaust emission rates for Heavy-Duty on-road vehicles in MOVES2014
			Bus escolar							6			1.6	
China	Wu et al 2015	24	Bus y Carga	5 a 34	---	1985-2010	Urbana	6,9 a 25 km/gal	500-1100	3,11-13,4	62 a 127	0,2-0,79	1,73-5,39	Emisiones y consumo en condiciones reales para 13 buses (medianos y pesados) y 11 camiones (medianos y grandes) en Macao
China	Yao et al 2015	18	Camiones Carga	4,4 a 25	Euro III y IV	2009-2014	Urbana	---	304-584	2,3-11,5	---	0,04-0,31	0,8-3,1	Comparación Nox China III y China IV camiones en uso
China	Yu et al 2016	5	Bus	9,5 - 11	Euro III	---	Urbana	9,2 a 22,3 km/gal	400-1300	9,2-23	---	0,22-0,55	0,44-1,1	Influencia del # de pasajeros sobre las emisiones y el consumo de combustible en condiciones reales
Italia	Mendoza et al 2017	1	Camión	---	Euro VI	---	Urbano, rural y autopista	---	---	---	---	---	---	Emisiones en g/kW-h NOx; emisiones en ppm ciclo WHTC: NH3, N2O y PN de vehículo pesado
Italia	Giechaskiel 2018	24	Buses y camiones	---	Euro VI	---	Urbano, rural y autopista	---	---	---	---	---	---	5 buses GNC, 2 trailers GNL, 17 camiones diésel. PEMS para contar partículas sólidas
Europa	Giechaskiel 2018	4	Trabajo pesado	---	Euro VI	---	Urbano, rural y autopista	---	---	---	---	---	---	Evaluó número de partículas sólidas con varios PEMS
China	Lui et al 2018	6	Trabajo pesado	16-18	Euro III y IV	---	Urbana	---	---	5 a 18	10 a 200	---	---	Evaluación de Nox y partículas ultrafinas de buses urbanos en Yangtze, China
China	Shen et al 2018	4	Trabajo medio y pesado	4,4 a 15,9	Euro III y IV	2010-2015	Urbana	19 a 34,3 km/gal	300 a 500	2 a 9	1 a 50	0,05 a 0,4	0,5 a 2,2	Emisiones reales con mezclas diésel + biodiésel de aceites usados en ruta
México	Giraldo et al 2018	15	buses	13.8	USEPA 2004	2012-2014	Urbana y Autopista	6,1 a 10,5 km/gal	843 a 1435	4,81 a 9,18	---	---	18 a 41,6	Emisiones en ruta con PEMS, Consumo de combustible buses en uso. Grandes altitudes
Italia	Giechaskiel 2019	1	Recolector basura	15.5	Euro VI	2018	Urbana	---	---	0,1 a 2,1	---	---	---	Emisiones reales camión recolector de basura. Emisiones con PEMS en mg/kWh
Colombia (FEVA-II)	Agudelo et al 2019	10	Buses	4 a 12	preEuro a Euro V	2003-2016	Urbana, rural	6,3 a 9 km/gal	874 a 1164	2,47 a 5,78	530 a 2870	0,67 a 0,89	6,29 a 8,24	PEMS en ruta. Grandes altitudes. Ciclos propios región Valle de Aburrá
			2019-2017			7 a 17,4 km/gal		522 a 1041	0,02 a 5,53	220 a 15900	0,09 a 1,18	2,3 a 39,3		
			1995-2018			4,8 a 9,6 km/gal		856 a 1644	0,02 a 1,66	650 a 20900	0,69 a 2,82	10,5 a 36,7		
Colombia (FECOC+ Fase 2,1)	Agudelo et al 2021	16	Camiones C2 livianos	3 a 35	Euro II a Euro V	2006-2016	Urbana, rural	21 a 30 km/gal	320 a 472	2.59 a 5.72	41 a 339	0.55 a 2.04	1.98 a 4.7	PEMS en ruta/banco. Ciclos propios Área Metropolitana Bucaramanga
			2006-2016			20 a 28 km/gal		340 a 614	2.58 a 5.87	41 a 303	0.7 a 2.63	2,41 a 15		
			2018			17 km/gal		571.4	4.64	123	1.51	11.2		
			2005 - 2022			11 km/gal		774 a 998	6.69 a 8.84	67 a 1494	0.12 a 1.91	2,5 a 13,4		
			2012 - 2021			5.5 km/gal		1555 a 1748	10.44 a 25	127 a 1392	0.15 a 0.83	3,6 a 17,1		

### 3.2. Factores de emisión promedio de vehículos pesados para el área metropolitana de Bucaramanga

En la **Tabla 3. 2** se presenta un resumen de los FE promedio medidos sobre una muestra de 16 vehículos, en las cuatro categorías más representativas de vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros para la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (alrededor de 900 msnm).

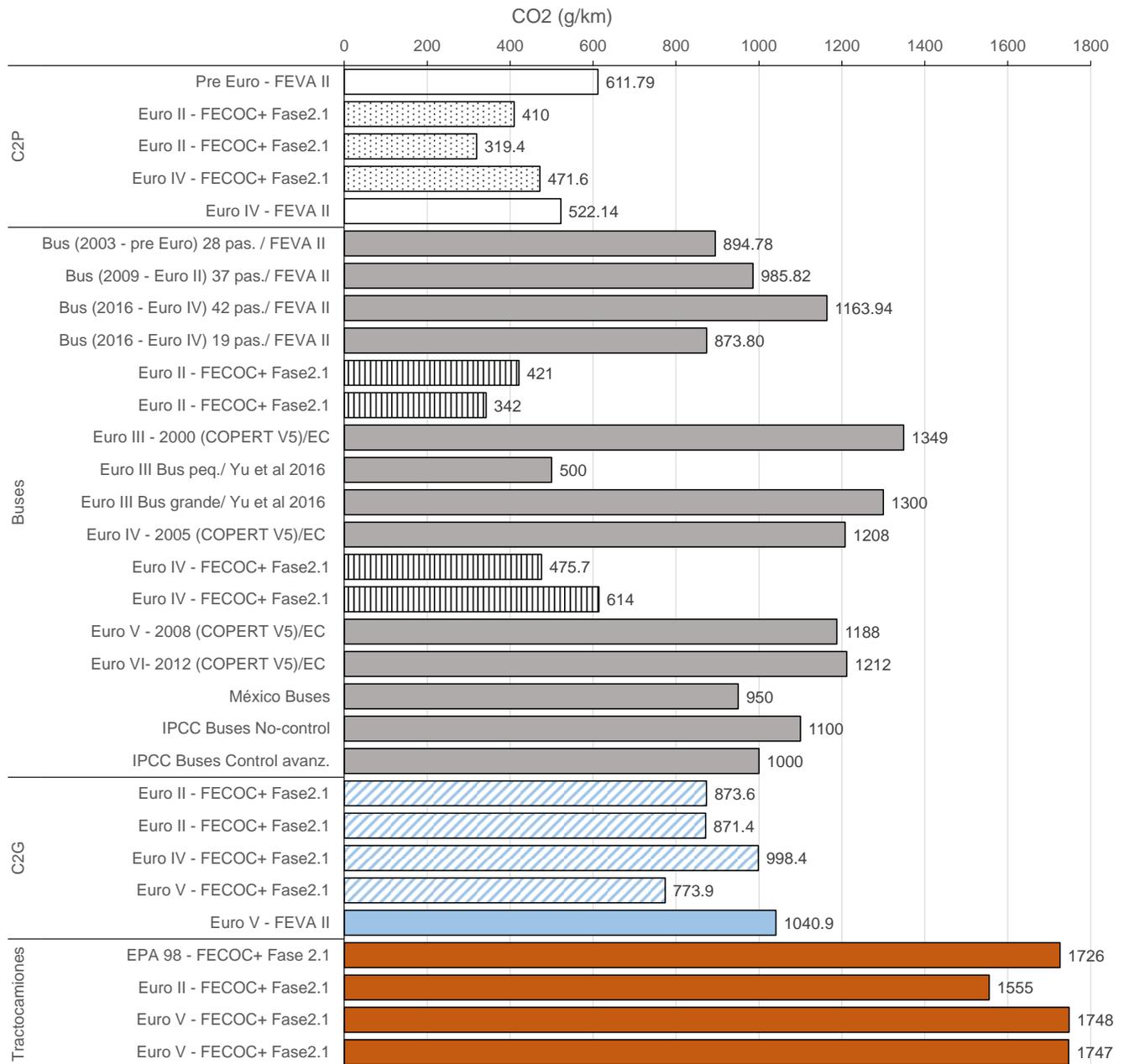
**Tabla 3. 2.** FE promedio medidos a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga para la categoría de vehículos pesados de carga y de pasajeros

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)	NO (g/km)	NO <sub>2</sub> (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)	PN x10e12 (#/km)	THC (g/km)	NMHC (g/km)	CO (g/km)
 C2 liviano	2006	Euro II	2771	< 3	22,8	410,0	7,23	3,19	2,56	5,72	339,0	49,50	1,48	1,45	4,69
	2011	Euro II	2771		29,5	319,4	40,80	1,70	1,69	3,39	245,0	71,55	2,04	2,00	2,55
	2016	Euro IV	2999		20,8	471,6	11,77	1,27	1,33	2,59	41,4	2,67	0,55	0,54	1,98
C2 mediano	2018	Euro IV	5192	< 5 ton	17,0	571,4	30	2,03	2,60	4,64	123,0	43,80	1,51	1,48	11,15
 Buses	2006	Euro II	2771	20 pas.	23,0	421,0	35	3,09	2,78	5,87	303,0	52,40	1,74	1,70	5,05
	2011	Euro II	2771		28,0	342,0	51,50	1,60	2,05	3,65	245,30	72,00	2,63	2,52	2,59
	2016	Euro IV	2999	40 pas.	20,2	475,7	13,88	1,21	1,37	2,58	41,27	30,33	0,70	0,68	2,41
	2018	Euro IV	5192		15,4	614,0	38,60	2,04	2,86	4,90	138,40	39,40	1,93	1,89	15,10
 Camiones de 2 ejes C2 grande	2012	Euro II	7790	< 10	11,0	873,6	17,87	4,76	3,56	8,32	168,90	45,94	0,89	0,88	2,51
	2015	Euro II	8270		11,1	871,4	36,55	4,80	4,03	8,84	1493,70	263,52	1,91	1,87	7,67
	2021	Euro IV	7790		11,5	998,4	11,20	3,61	3,08	6,69	67,40	51,58	0,56	0,55	2,59
	2022	Euro V	7684		11,2	773,9	2,45	5,05	3,44	8,47	130,19	69,15	0,12	0,12	13,37
 Tractocamiones C3S2	2012	Euro II	13000	< 35	5,5	1555,0	15,48	15,44	9,36	24,79	162,50	48,83	0,78	0,76	3,62
	2013	EPA 98	14945		5,1	1726,0	16,47	15,05	9,96	25,01	1392,03	0,38	0,83	0,81	17,07
	2020	Euro V	12777		5,5	1748,0	4,24	6,32	4,12	10,44	165,97	22,88	0,21	0,21	13,32
	2020	Euro V	12777		5,5	1747,0	2,90	6,56	4,41	10,97	126,95	87,86	0,15	0,14	11,69

#### 3.2.1. Gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>)

Como era de esperarse, el factor de emisión de CO<sub>2</sub> en g/km crece fuertemente con el tamaño del motor (cilindrada) debido al incremento del consumo de combustible. En general los factores de CO<sub>2</sub> medidos tienden a ser similares a los reportados en la literatura en función del rango de cilindradas analizados como se observa en la **Figura 3. 1**. Los FE de CO<sub>2</sub> medidos en este proyecto tienden a ser ligeramente mayores, debido probablemente a la topografía y altitud sobre el nivel del mar del área metropolitana de Bucaramanga (cerca de 900 msnm), lo que incrementa el consumo de combustible con las pendientes. Obsérvese que, para los camiones C2P, el CO<sub>2</sub> a la altitud del Valle de Aburrá (1500 msnm) fue 10% mayor (522.14 g/km para el Euro IV) que los medidos en este proyecto (471.6 g/km para el Euro IV), mostrando quizá un marcado efecto de la altitud, dado que los vehículos estaban al día con su estado de inspección y mantenimiento y pertenecían a la misma compañía (Coordinadora Mercantil). En la **Figura 3. 1** se comparan también los valores de CO<sub>2</sub> obtenidos en este proyecto con otros medidos por el mismo grupo ejecutor con el apoyo de ECOPETROL en 2018 en el Valle de Aburrá (1500

msnm), y con los reportados en el reciente modelo COPERT v5.5 de octubre 2021, así como con algunos valores reportados en la literatura para esta categoría vehicular.

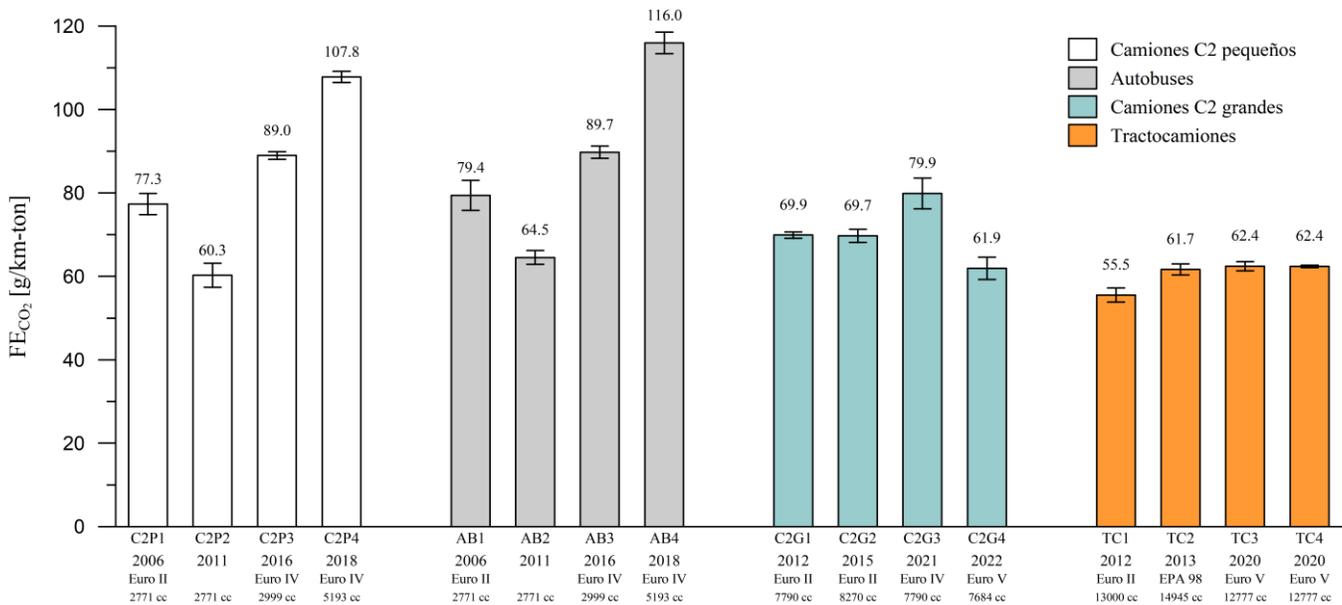


**Figura 3. 1.** Comparación del CO<sub>2</sub> medido vs reportados en la literatura técnica

La emisión de CO<sub>2</sub> de los buses fue mayor en promedio que el de los camiones de 2 ejes pequeños (C2P). Como se mencionó en la sección de metodología, se trataba de los mismos camiones, sólo que medidos en banco de rodillos bajo ciclos de conducción relacionados con la actividad correspondiente (buses vs camiones de repartición de paquetería de última milla). Esto indica que la elevada transitoriedad a la que están sometidos los vehículos en transporte urbano, con constantes arranques/paradas, conlleva mayor consumo de combustible, y por

tanto mayor emisión de CO<sub>2</sub>. Sería interesante que las autoridades respectivas se plantearan estrategias de movilidad especial para la categoría de buses, buscando que se redujeran al máximo posible estas emisiones de GEI. Para tal fin, este proyecto cuenta con los datos instantáneos de CO<sub>2</sub> registrados con una frecuencia de 10 Hz.

Cuando se plantea el análisis no sólo por distancia, sino teniendo en consideración la carga (toneladas), la tendencia se invierte, siendo los tractocamiones los que menos gCO<sub>2</sub>/km-ton emiten, tal como se muestra en la **Figura 3. 2**.



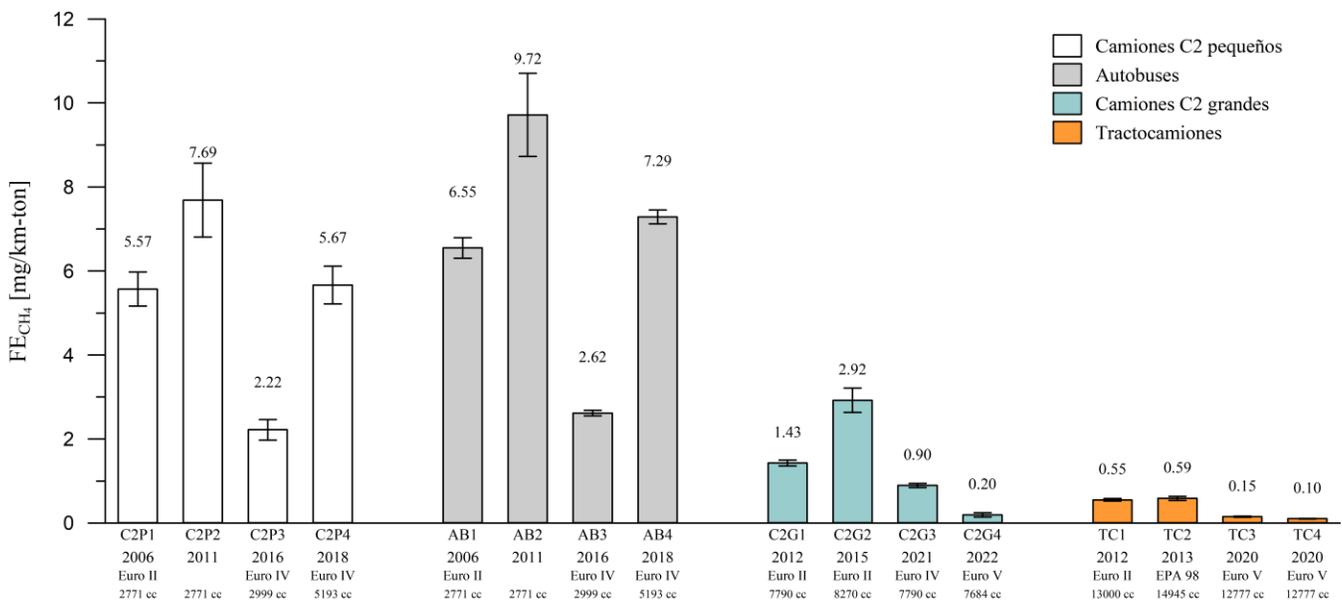
**Figura 3. 2.** CO<sub>2</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

Los resultados permiten concluir que las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen una estrecha dependencia con el consumo de combustible, a medida que aumenta el tamaño del vehículo y por tanto su consumo, incrementan desde un valor mínimo de 320 g/km para un camión de dos ejes C2P Euro II, hasta el máximo de 1748 g/km para un tractocamión (año 2020, Euro V). Sin embargo, al dividir por la capacidad de carga del camión, el resultado se invierte (**Figura 3. 2**), lo que sugiere que no es conveniente atomizar el tamaño de los vehículos de repartición de carga, excepto si fuese estrictamente necesario, por ejemplo, por razones de flujo vehicular en zonas urbanas. Esto también puede ser un llamado de atención para valorar la posibilidad de aumentar la capacidad de carga de los tractocamiones en Colombia, lo cual implicaría un balance económico que se debe comparar con el mantenimiento de las vías.

Finalmente, el CO<sub>2</sub> no mostró ninguna tendencia con la tecnología de control de emisiones de los 16 vehículos pesados que se midieron en este proyecto, incluso en los camiones C2P; en los buses y en los tractocamiones tendió a incrementar ligeramente, lo que supuso un mayor consumo de combustible en este tipo de vehículos con tecnología Euro IV. Dado que el conductor fue el mismo en todas las pruebas, y siguió el mismo ciclo de conducción, este resultado podría obedecer a la mayor contrapresión de escape que supone el uso de dispositivos de control de emisiones, tales como el catalizador de oxidación diésel (DOC por

sus siglas en inglés), la recirculación de gases de escape (EGR por sus siglas en inglés) y el sistema de reducción catalítica selectiva de óxidos de nitrógeno (SCR por sus siglas en inglés).

El otro gas de efecto invernadero medido fue el metano (CH<sub>4</sub>). El factor de emisión varió desde un mínimo de 2.45 mg/km (61.3 gCO<sub>2,equiv./km</sub>) para el camión de dos ejes C2G Euro V, modelo 2022 de 7684 cm<sup>3</sup> de cilindrada, hasta un máximo de 51.5 mg/km (1287.5 gCO<sub>2,equiv./km</sub>) para el denominado bus Euro II modelo 2011 de 2771 cm<sup>3</sup> de cilindrada, mostrando que este gas no presentó una tendencia con el tamaño del motor (vehículo), pero en cambio sí presentó una tendencia clara a disminuir en la medida que la tecnología de control de emisiones era más avanzada (Euro IV y Euro V, fueron menores que Euro II), como se aprecia en la **Figura 3. 3**. Los vehículos provistos con sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) para disminuir los óxidos de nitrógeno (Euro V), fueron los que lograron la mayor reducción de metano entre los 16 medidos.



**Figura 3. 3.** CH<sub>4</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

### 3.2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>)

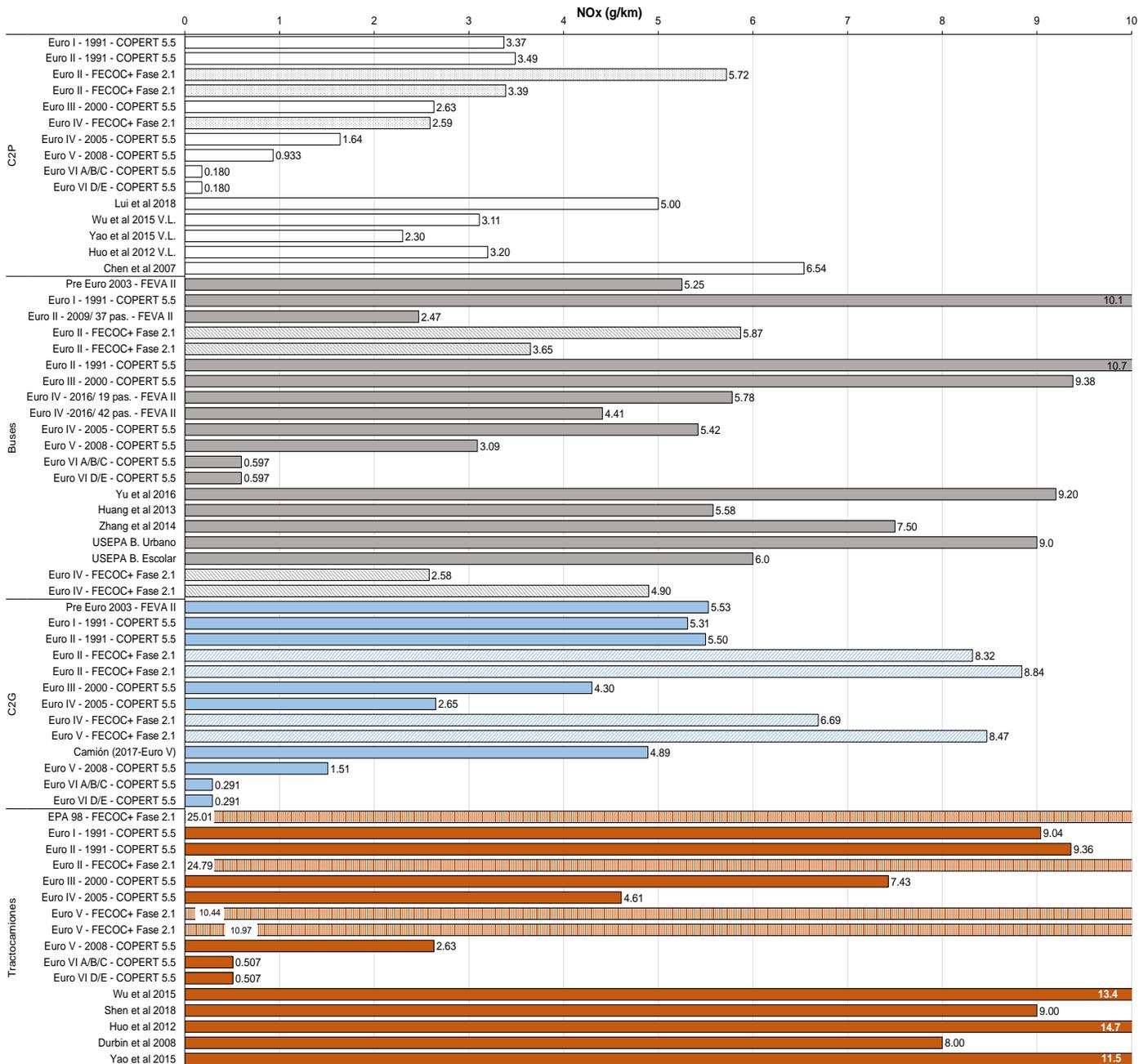
En la **Figura 3. 4** se comparan los NO<sub>x</sub> obtenidos en este proyecto frente a otros reportados en la literatura para vehículos y tecnologías de control de emisiones similares. Sorprenden los elevados valores de NO<sub>x</sub> de dos de los cuatro tractocamiones medidos con valores cercanos a los 25 g/km. La formación de NO<sub>x</sub> en los motores está estrechamente asociada con las temperaturas máximas y los cambios súbitos (gradientes) térmicos que se alcanzan dentro del cilindro. Ambas variables crecen fuertemente con el ángulo en el cual inicia la inyección del combustible (SOI por sus siglas en inglés), con lo cual es altamente probable que en estos dos tractocamiones el SOI esté demasiado adelantado, provocando largos tiempos de retraso, lo que redundaría en mayor emisión de NO<sub>x</sub>, pero, a su vez, en menor emisión de material particulado.

En tecnologías antiguas como la Euro II, es común que los fabricantes/ensambladores se enfoquen en disminuir el material particulado a costa de aumentar las emisiones de NO<sub>x</sub>, debido a que el primero es controlado indirectamente mediante la opacidad de humo de las pruebas de inspección técnica periódica, mientras que el segundo no está regulado en este tipo de pruebas de verificación. Por su parte, los valores más bajos medidos, correspondientes a dos tractocamiones Euro V del año 2020 dotados con SCR, estuvieron cerca de los 10 g/km. Llama la atención que los NO<sub>x</sub>, cuyo impacto ha mostrado ser severo sobre la salud del ser humano, el ambiente y la acidificación de las lluvias, no sea controlado en pruebas de inspección técnica periódica de vehículos en prácticamente ningún país.

El hecho de que dos camiones de dos ejes pequeños (C2P1 y C2P2) con igual cilindrada (2771 cm<sup>3</sup>) e igual tecnología de control de emisiones (Euro II), uno modelo 2006 (5.72 g/km) y otro modelo 2011 (3.39 g/km), mostraran diferencias tan marcadas en este factor de emisión podría obedecer al mayor desgaste del vehículo modelo 2006, y a que son fabricantes diferentes. La tecnología Euro IV (2.59 g/km) presentó la menor emisión de NO<sub>x</sub> de todos los camiones de dos ejes pequeños (C2P) medidos, aun así, este valor es 58% mayor al sugerido por el modelo COPERT para esta categoría vehicular (1.64 g/km), lo que, una vez más, evidencia la importancia de medir los FE localmente.

Mientras el modelo COPERT sugiere utilizar un FE de 3.49 g/km para camiones Euro II pequeños, **nosotros medimos** 5.72 g/km para el C2P Euro II modelo 2006 (1.6 veces más alto), y 3.39 g/km para el C2P Euro II modelo 2011. Los FE de NO<sub>x</sub> medidos a los camiones de dos ejes grandes fueron los más elevados al compararlos con los reportados en 2018 en el marco del convenio FEVA-2, y entre 2 a 3 veces mayores frente a los sugeridos por el modelo COPERT para esta categoría vehicular, así como para tractocamiones. Esto, una vez más, pone en evidencia la importancia de medir los FE localmente para enriquecer los inventarios de emisión.

Al comparar las emisiones de NO<sub>x</sub> en g/km-ton, los tractocamiones Euro V, provistos con SCR, son los que menos emiten (aprox. 380 mg/km-ton), frente al valor máximo cercano a 1100 mgNO<sub>x</sub>/km-ton del camión C2P Euro II (**Figura 3. 5**). De estos resultados, sorprende que el camión C2G modelo 2022, Euro V dotado con SCR, presente niveles de emisión de NO<sub>x</sub> similares al resto de camiones C2G medidos, lo que sugiere, por lo nuevo del vehículo, una alta probabilidad que el sistema haya sido intervenido. Es posible que esta práctica sea frecuente en nuestro medio, puesto que supone desactivar un sistema que no está siendo controlando en pruebas de verificación técnico-mecánica, permitiéndoles a los propietarios un ahorro de operación no sólo por el fluido de control (úrea automotriz), sino también por el mantenimiento del SCR.



**Figura 3. 4.** Comparación de los NOx medido vs reportados en la literatura técnica

En la **Figura 3. 6** se muestra que la emisión de NO<sub>2</sub> equivalió aproximadamente a la mitad (50%) de los NOx. De los óxidos de nitrógeno (NO + NO<sub>2</sub> = NOx), se sabe que son gases altamente reactivos con la luz solar (fotoreactivos), promoviendo la formación de material particulado en la atmósfera (PM secundario). Además, sus efectos han demostrado ser altamente tóxicos y carcinogénicos para el ser humano, como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), regulado por la OMS, y los nitroderivados (Nitro-PAH) –nitro hidrocarburos aromáticos policíclicos. El NO<sub>2</sub>, al igual que el monóxido de nitrógeno (NO) son promotores de formación del smog fotoquímico y de la lluvia ácida, y al reaccionar con otros componentes presentes en la atmósfera promueven la

formación de partículas secundarias y de sustancias tóxicas y mutagénicas [7], [8]. Existe evidencia científica que asocia la exposición por periodos cortos al NO<sub>2</sub> con efectos respiratorios nocivos, tales como la inflamación de las vías respiratorias en personas sanas, y el aumento de síntomas respiratorios en personas con asma u otros problemas respiratorios preexistentes. También hay evidencia reciente de que el NO<sub>2</sub> puede tener un efecto en la mortalidad tan grande como el del material particulado (PM<sub>2.5</sub>) [8].

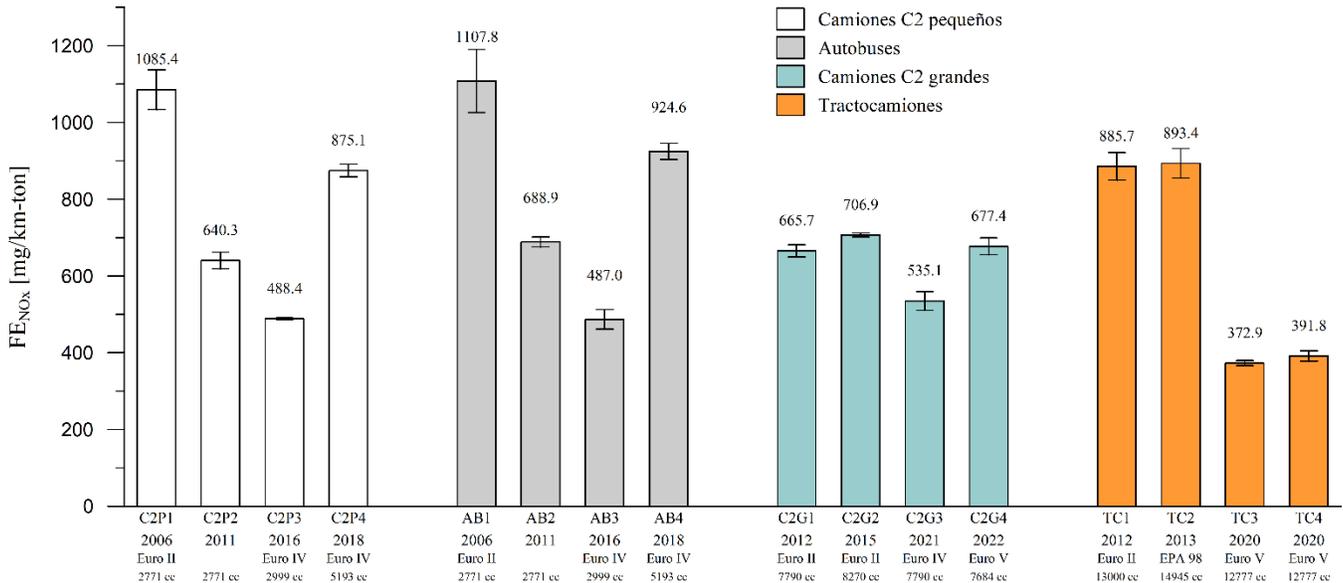


Figura 3. 5. NO<sub>x</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

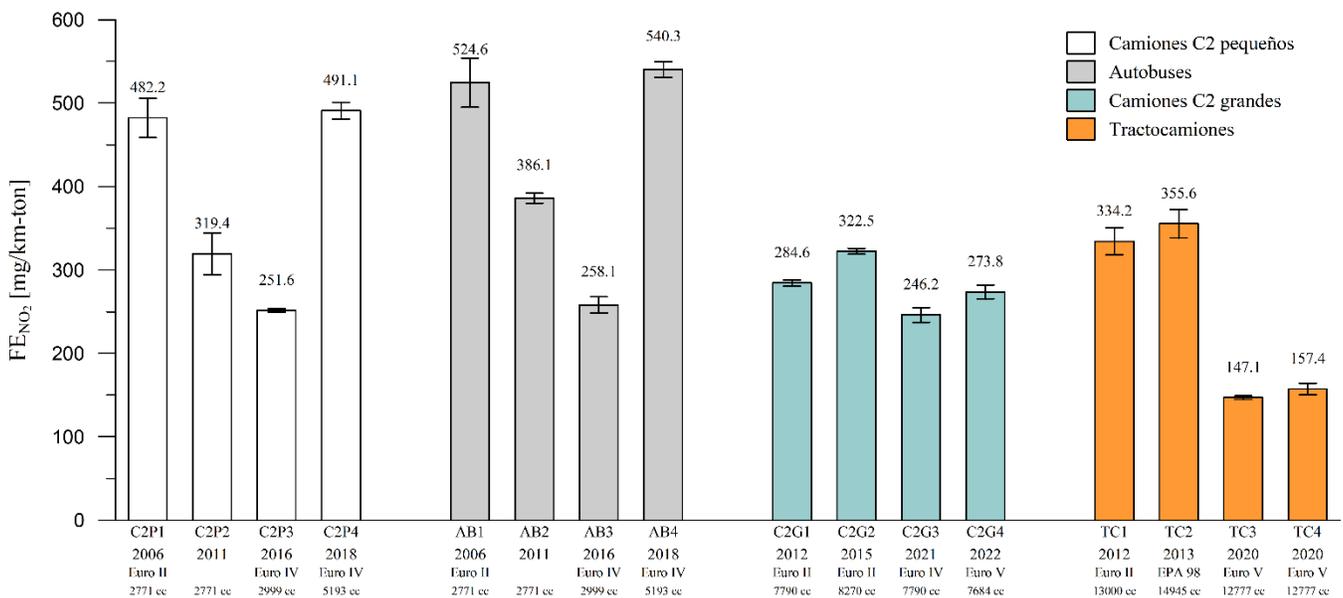


Figura 3. 6. NO<sub>2</sub> (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

Numerosos estudios de salud pública demuestran que el NO<sub>2</sub> está asociado con tos e irritación de la nariz, así como con el infarto al miocardio. La exposición prolongada a este contaminante puede aumentar el riesgo de desarrollar cáncer. En general, se ha encontrado que las mayores concentraciones de NO<sub>2</sub> están asociadas con mayor toxicidad del PM emitido por motores diésel

[9]. Por esta razón, la nueva guía de recomendación de valores límites máximos de exposición a NO<sub>2</sub>, recientemente publicada por la Organización Mundial de la Salud, sugiere disminuir la exposición promedio anual de 40 µg/m<sup>3</sup> a 10 µg/m<sup>3</sup>, mientras que la exposición diaria se redujo de 120 µg/m<sup>3</sup> en la guía del año 2005, a 25 µg/m<sup>3</sup> en la recientemente publicada [10].

### 3.2.3. Material particulado y número de partículas (PM y PN)

Numerosos estudios han caracterizado la composición del material particulado (PM) por su relación con los efectos nocivos en la salud de las personas y el medio ambiente. El PM puede actuar como portador de compuestos orgánicos, metales pesados, microorganismos y hasta virus. Entre los compuestos orgánicos que son adsorbidos en el PM, se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH por sus siglas en inglés). Estos compuestos al ser inhalados logran alcanzar los alvéolos pulmonares exacerbando las enfermedades respiratorias y potencialmente provocando cáncer. Por esta razón, la emisión de PM ha estado sujeta a regulaciones que suelen ser cada vez más estrictas. Recientemente la OMS sugirió disminuir la exposición promedio anual a PM<sub>2.5</sub> de 10 µg/m<sup>3</sup> a 5 µg/m<sup>3</sup>, mientras que, para posibles episodios críticos de calidad del aire, sugiere una exposición no mayor a 15 µg/m<sup>3</sup> para un periodo de 24 horas. PM<sub>2.5</sub> indica partículas con diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros, y dado que el 100% del PM emitido por motores de combustión interna suele ser inferior a 0.5 micras (500 nanómetros), se considera que todo es PM<sub>2.5</sub>.

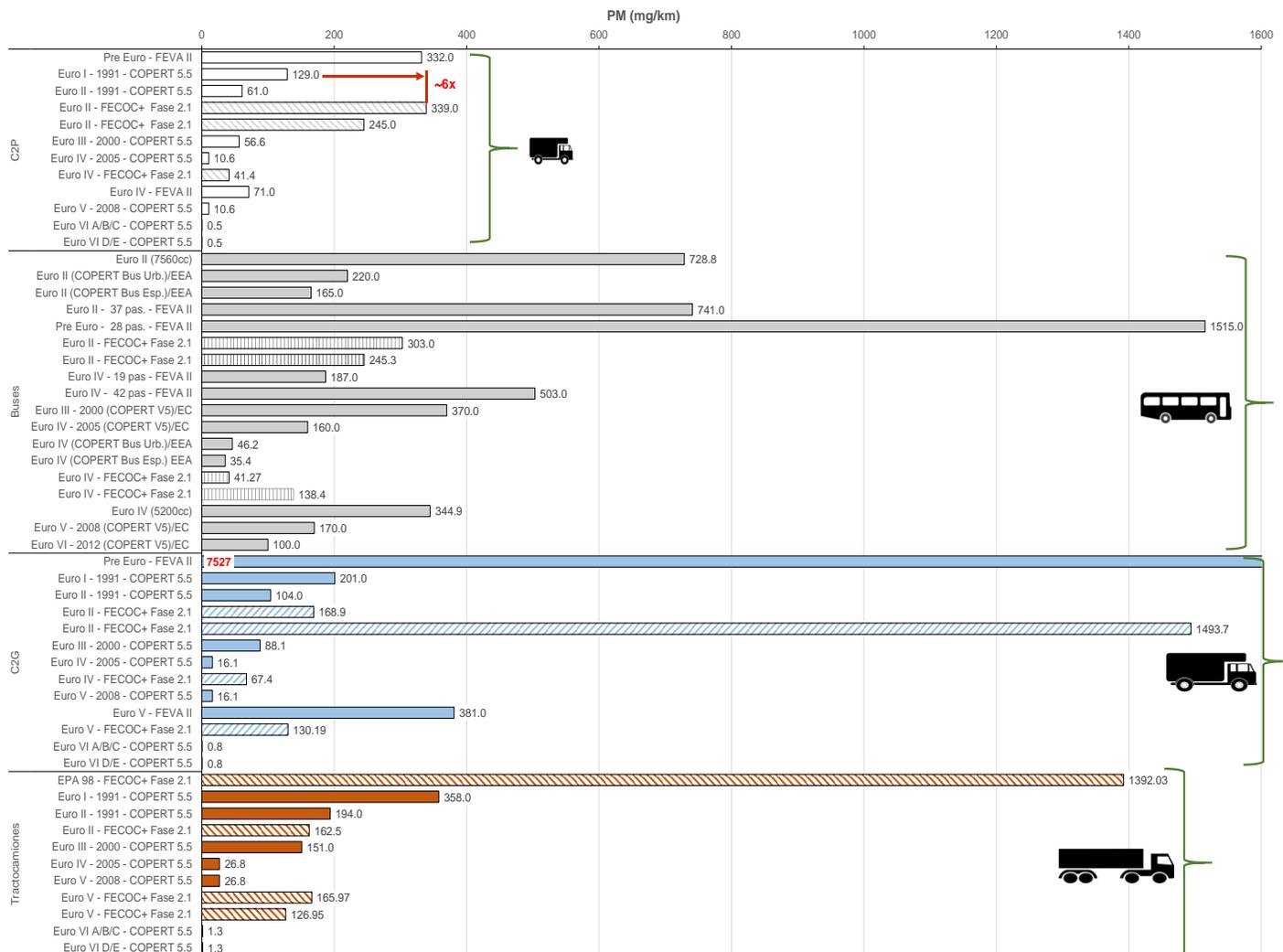
Por otra parte, la concentración del número de partículas, la cual hace referencia a la cantidad del número de partículas que contiene un centímetro cúbico de volumen, es una medida común para medir partículas más pequeñas con poca masa [11]. Sin embargo, la mayoría de las partículas que contribuyen a la concentración del número de partículas suelen tener diámetros aerodinámicos inferiores a 100 nm, (denominadas partículas ultrafinas o UFP por sus siglas en inglés) y aportan muy poca masa. Éstas se originan principalmente en procesos de combustión y son de particular importancia en el aire urbano debido a que el tráfico vehicular es la principal fuente [12].

Históricamente, las UFP se han definido como partículas de menos de 100 nm de diámetro aerodinámico, sin embargo, recientemente el profesor David Kittelson et al., sugieren que este rango de tamaño es confuso, por lo que proponen que las UFP sean consideradas con un diámetro aerodinámico máximo de 500nm, ya que hay una superficie y una masa significativas en la distribución de tamaños en el rango entre 100 nm y 500 nm [13]. Este mismo equipo de trabajo sugiere una nueva propuesta para definir el rango de tamaño mínimo para las UFP entre 3 y 6 nm.

En la **Figura 3. 7** se comparan los FE de material particulado (PM en masa) medidos en este proyecto, frente a otros reportados en la literatura. En términos generales, se aprecia que los valores reportados por el modelo COPERT en su versión 5.5 de octubre de 2021, en algunos casos están subestimados hasta en 7 veces frente a los medidos en el área metropolitana de Bucaramanga. A modo de ejemplo, el modelo COPERT sugiere un valor de 61 mg/km para un camión pequeño Euro II, mientras que para el mismo camión, en este proyecto se midió 339

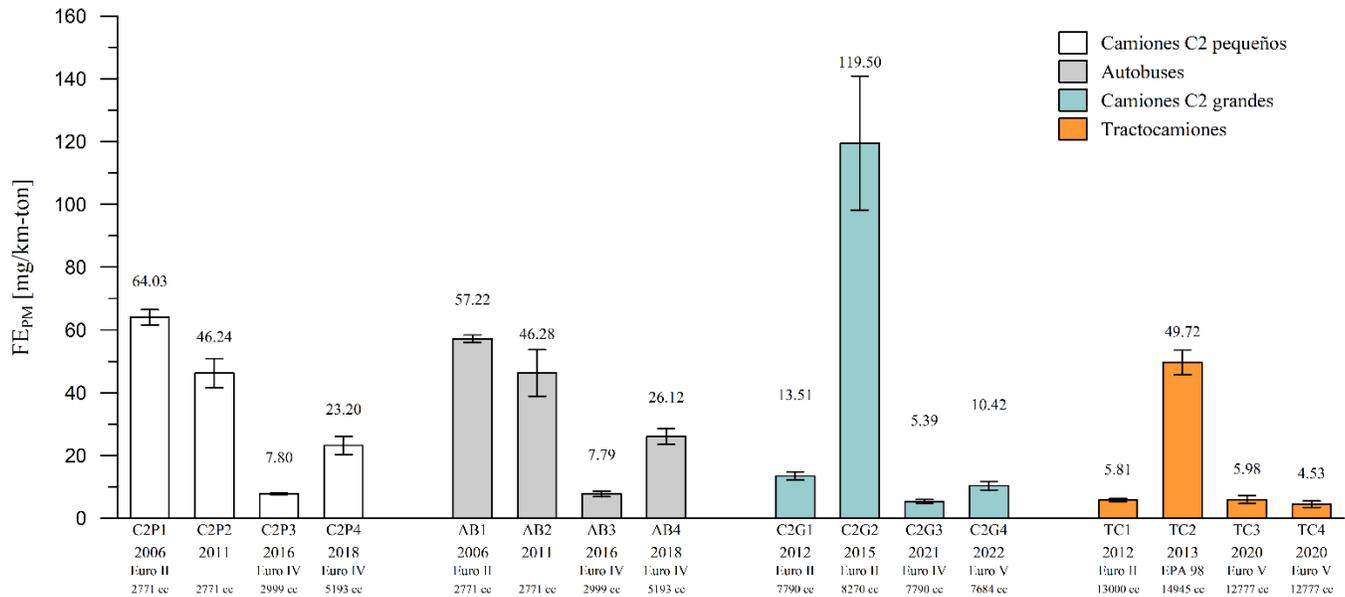
mg/km (5.6 veces más). Para tractocamiones con tecnología Euro V, mientras COPERT recomienda usar un FE de 26.8 mg/km, en este proyecto medimos 126.95 g/km (4.7x mayor) y 165.97 g/km (6.2 x mayor). Lo mismo se evidenció para las tecnologías Euro IV, mientras COPERT sugiere usar 10.6 mg/km, lo medido fue de 41.4 mg/km (3.9x mayor). En la **Figura 3. 7** se aprecia una disminución del PM con la mejora tecnológica de los camiones C2G. El camión Euro II modelo 2015, por tener un valor tan elevado, cercano a los 1500 mg/km de PM, podría ser considerado como un gran contaminante, y seguramente su peso en el inventario de emisiones sería significativo.

El vehículo que emitió más PM entre todos los medidos fue el camión de dos ejes C2G modelo 2015 de 8270 cm<sup>3</sup> de cilindrada (1433.7 mg/km). Este también fue el vehículo que más NOx emitió entre los de su categoría C2G. Sorprende la gran cantidad de material particulado emitido por los vehículos más antiguos (Euro II) a la atmósfera para la categoría vehicular C2P (245 y 339 mg/km), valores similares a los medidos previamente en el área metropolitana del Valle de Aburrá (332 mg/km).



**Figura 3. 7.** Comparación del PM (en masa) medido vs reportados en la literatura técnica

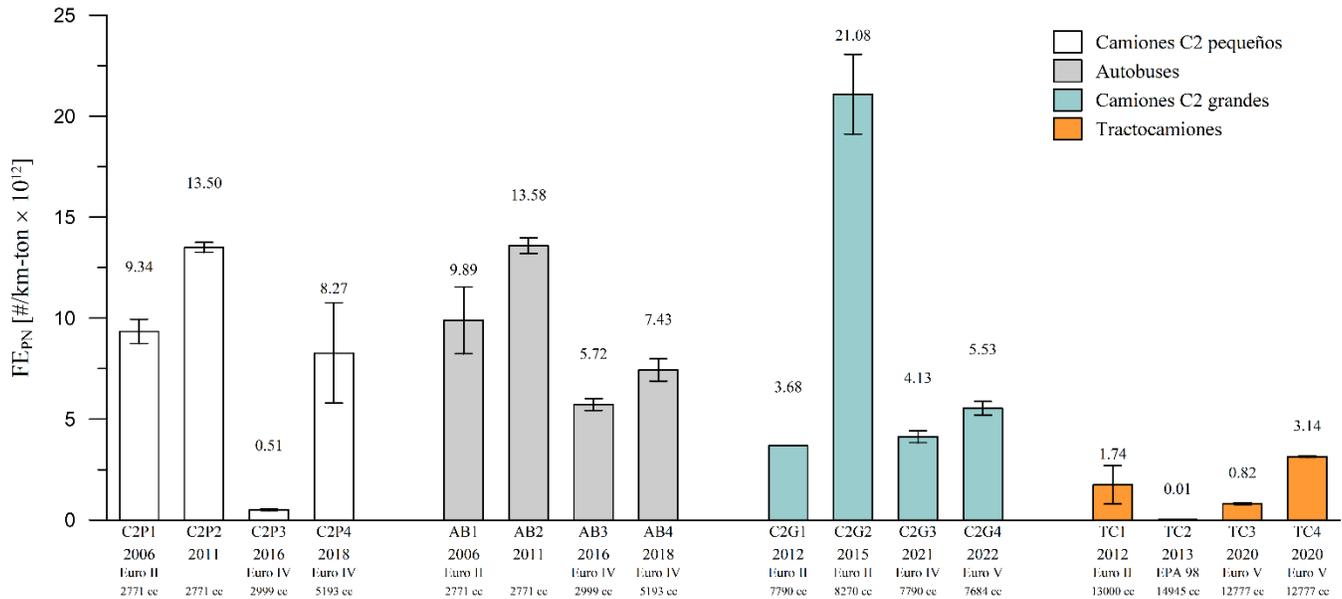
La formación de partículas al interior de la cámara de combustión está fuertemente marcada por las condiciones de inyección del combustible (ángulo de inicio y presión de inyección), de la evolución del chorro (formación y evaporación de las gotas, y disponibilidad de oxígeno) y de la temperatura circundante. Altas presiones de inyección con inicio avanzado y alta temperatura, facilitan la oxidación de las partículas y por lo tanto se reducen. Por esta razón, se explica que la mayor tecnología de control de emisiones de los 16 vehículos medidos, ninguno de ellos provisto con filtro de partículas (DPF por sus siglas en inglés), disminuyera la producción de PM, tal como se aprecia en la **Figura 3. 8**.



**Figura 3. 8.** PM (mg/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

Si bien los parámetros mencionados arriba inducen la reducción de la masa de partículas, no necesariamente ocurre lo mismo con el número de partículas (PN en #/km). Puede darse el caso, como el tractocamión TC2 modelo 2013 con tecnología EPA 98 de 14945 cm<sup>3</sup> de cilindrada, con elevada emisión de PM y muy baja emisión de PN, lo que indica que ese motor emite pocas partículas (baja masa) pero de gran tamaño. Lo contrario también es válido, como se aprecia con el tractocamión TC4 modelo 2020 con tecnología Euro V de 12777 cm<sup>3</sup> de cilindrada, el cual emitió la menor masa de partículas entre todos los tractocamiones (4.53 mg/km-ton) y, sin embargo, fue el que más número de partículas produjo (3.14 billones/km-ton). Esta misma observación es válida para la categoría de camiones C2G Euro IV y Euro V, excepto por el gran contaminador C2G2, el cual, además de emitir la mayor cantidad de PM, emitió el mayor número de partículas. En la **Figura 3. 9** se presenta el factor de emisión del número de partículas (PN) en #/km-ton (billones/km-ton). El número de partículas emitido por el camión C2G2 modelo 2015 con tecnología de control de emisiones Euro II fue cercano a 263 billones #/cm<sup>3</sup> (21.08 billones #/km-ton), el más alto de todos los medidos en esta campaña experimental. Esta herramienta del conteo del número de partículas, es la que se está adelantando actualmente para reemplazar a la opacidad del humo en las pruebas de inspección técnica periódica de vehículos diésel, y también ha mostrado ser eficaz en la detección de grandes contaminantes en programas de eco-etiquetado ambiental llevadas a cabo en la región

del área metropolitana del Valle de Aburrá. Para ampliar información, ver los informes finales de los convenios 888 de 2017, y 686 de 2020, ambos del AMVA, ejecutados por la Universidad de Antioquia. El primero contó con la participación de Ecopetrol.



**Figura 3. 9.** PN (#/km-ton en billones) medidos para vehículos de carga/pasajeros

El número de partículas es una medida común para caracterizar las denominadas partículas ultrafinas (UFP por sus siglas en inglés). Su medición está bien establecida actualmente y se exige por ley para vehículos con tecnología Euro 6 (livianos) o Euro VI (pesados), para lo cual existen hoy dos métodos ampliamente aceptados: conteo de partículas por condensación (CPC) y descarga difusiva (DC).

Por lo pronto, existe incertidumbre sobre los tamaños mínimos recomendados para identificar las UFP, encontrando variaciones en su diámetro aerodinámico entre 2 y 10 nm, mientras que para el tamaño máximo, como se mencionó antes, existe consenso en que son inferiores a 500 nm. En la literatura técnica se ha aceptado llamar UFP a las nanopartículas cuyo tamaño promedio es inferior a 100 nm.

A pesar de que existen numerosos estudios epidemiológicos reportados en la literatura científica que relacionan aspectos de salud pública con la emisión de masa de partículas (PM<sub>2.5</sub>), no ocurre así aún para el número de partículas. Para evidenciar esta afirmación, la reciente actualización de valores límites recomendados por la OMS en agosto de 2021 no incluyó el número de partículas. En la sección 4.3 de la mencionada guía, la OMS enseña una serie de buenas prácticas referentes al UFP [10], dentro de las cuales incluye:

1. Cuantificar el UFP ambiente en términos de la concentración del número de partículas (#/cm<sup>3</sup>) para un rango de tamaños de partículas con un límite inferior menor a 10 nm, y sin restricción de tamaño en el límite superior. Normalmente las UFP son menores a 100 nm, pero se admite que los procesos de combustión en los motores emiten en el rango de partículas 99% inferiores a 500 nm.

2. Expandir las estrategias de monitoreo de calidad de aire existentes a las UFP, incluyendo una segregación no sólo por número de partículas, sino también por tamaño de partículas.
3. Distinguir entre concentraciones elevadas y bajas del número de partículas para guiar a decisiones sobre prioridades para controlar concentración de UFP en la atmósfera. Bajas emisiones de PN pueden ser consideradas por debajo de  $1000 \text{ \#/cm}^3$  (media de 24 horas de exposición), mientras que elevadas concentraciones podrían ser mayores a  $10.000 \text{ \#/cm}^3$  (media de 24 horas de exposición) o  $20.000 \text{ \#/cm}^3$  (media de 1 hora de exposición).
4. Utilizar los avances científicos y tecnológicos para evaluar el impacto de la exposición a UFP en términos de estudios epidemiológicos y de control de UFP.

La OMS se sugiere la cuantificación de las UFP en términos de PN, ya que la medición de su masa (PM) es muy difícil, y establecen, basados en la opinión de expertos y en revisiones de literatura, los siguientes valores de exposición de PN en el aire ambiente:

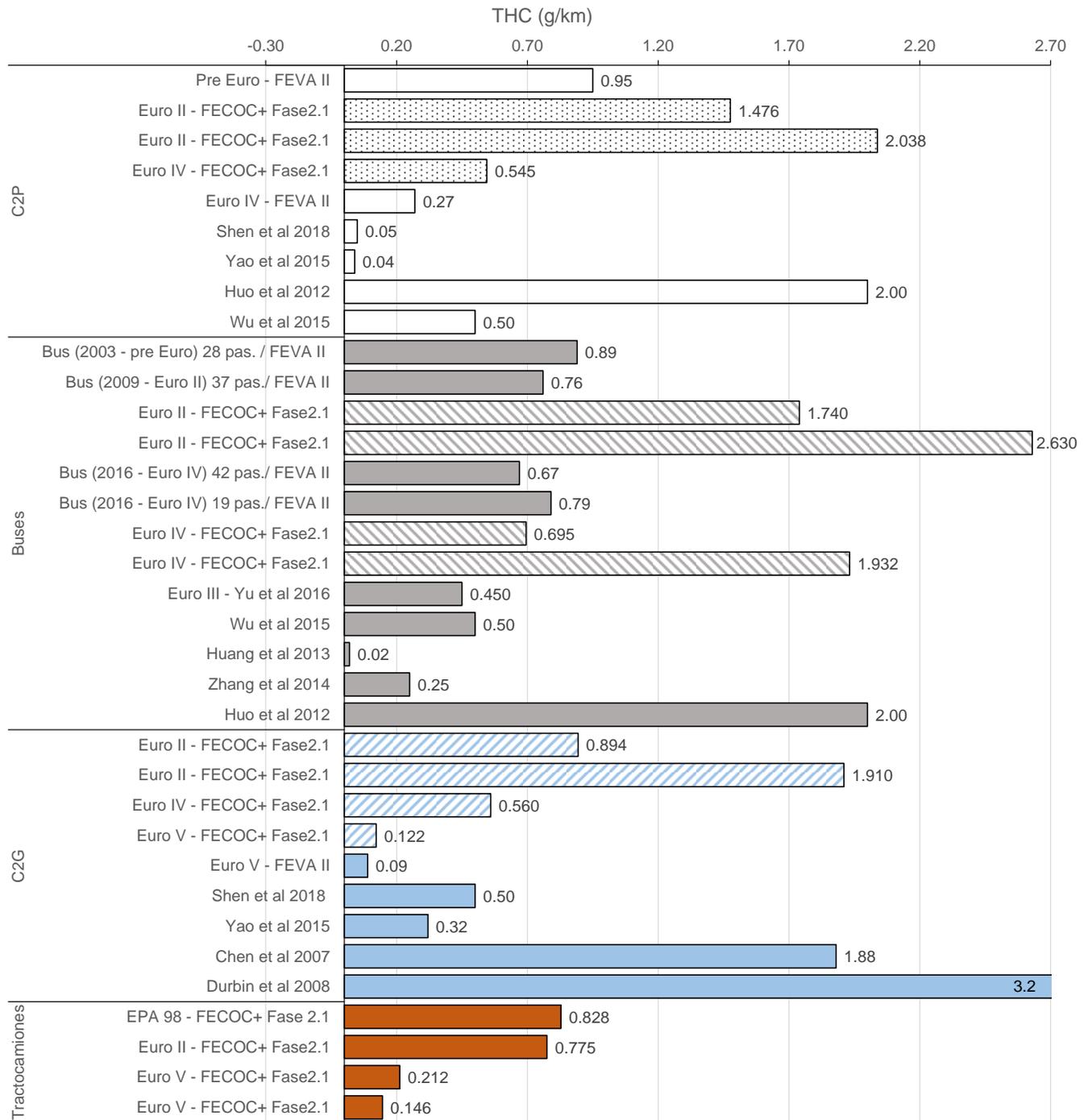
- Concentración baja de PN:  $< 1000 \text{ \#/cm}^3$  (media 24 horas)
- Concentración alta de PN:  $> 10.000 \text{ \#/cm}^3$  (media 24 horas)
- Concentración alta de PN:  $> 20.000 \text{ \#/cm}^3$  (media 1 hora)

### 3.2.4. Hidrocarburos totales (THC)

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos, que se forman como consecuencia de la combustión incompleta de los combustibles en la cámara. No todos los hidrocarburos son necesariamente compuestos orgánicos volátiles (COV), puesto que los hay de elevado peso molecular, como los PAH, así como no todos los COV son necesariamente de la familia de los hidrocarburos. Las concentraciones de hidrocarburos inquemados, o parcialmente oxidados durante el proceso de combustión, se denominan hidrocarburos totales (THC) y suelen representar entre el 1 y 2% de la gasolina, en motores de encendido por chispa, y mucho menos en los motores de encendido por compresión [14]. Debido a la gran cantidad de compuestos orgánicos que conforman los hidrocarburos, se sabe que algunos de ellos son fisiológicamente inertes y algunos ni reaccionan para formar el denominado smog fotoquímico. Sin embargo, algunos de ellos, como los aldehídos, son cancerígenos para el ser humano y pueden tener elevada reactividad para formar ozono en la atmósfera.

La emisión de THC en motores diésel se mide usando una sonda calorifugada a  $190^\circ\text{C}$  seguida de un detector de ionización de llama (FID por sus siglas en inglés). Su composición varía desde el más liviano (metano o  $\text{CH}_4$ ), hasta aquellos que se mantienen en fase vapor a la temperatura de  $190^\circ\text{C}$ . Cualquier hidrocarburo más pesado que estos se condensa y, junto con la fase de las partículas sólidas, es retenido en los filtros antes del FID. Los niveles de emisión de THC en motores diésel varían enormemente con las condiciones de operación, y los diferentes mecanismos de formación se ven fuertemente afectados por los diferentes modos de operación

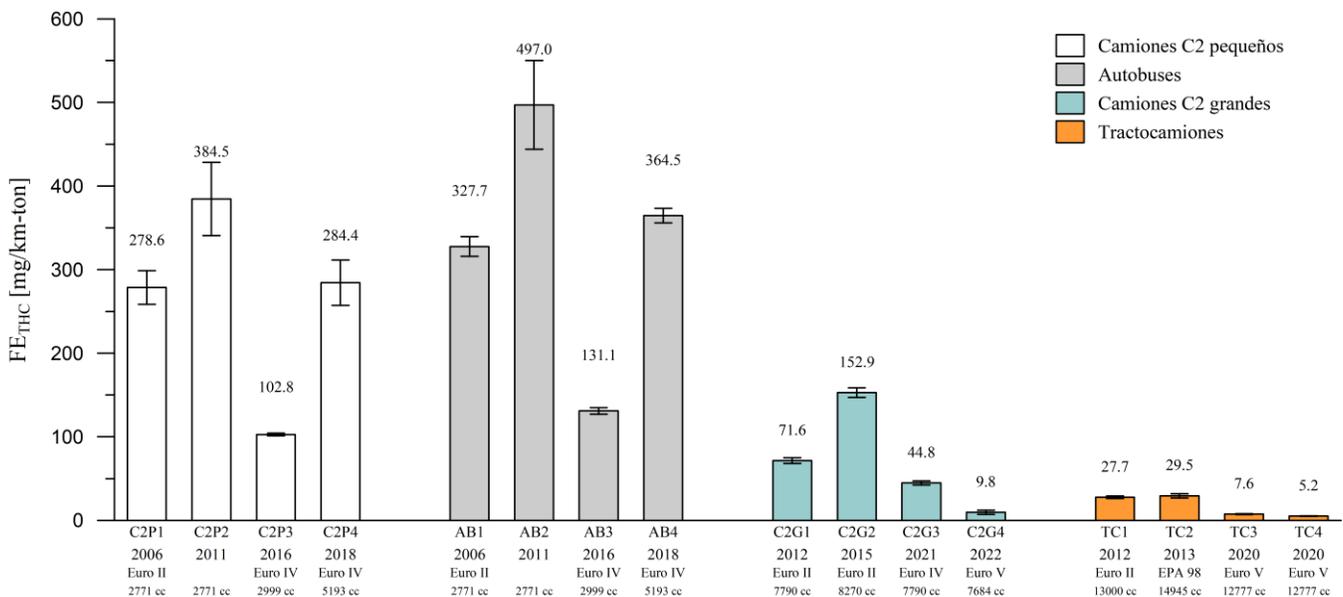
del motor. La operación a bajos regímenes de carga o al ralentí produce emisiones de THC significativamente más elevadas que a plena carga. Sin embargo, cuando la cantidad de combustible inyectada es muy elevada, la emisión de THC incrementa substancialmente por las dificultades de formación de una mezcla adecuada [14].



**Figura 3. 10.** Comparación del THC medido vs reportados en la literatura técnica

En la **Figura 3. 10** se comparan los FE de THC medidos en este trabajo con los reportados en la literatura técnica para vehículos pesados. El valor más alto medido correspondió al camión de dos ejes C2 pequeño C2P2 Euro II modelo 2011 con 2771 cm<sup>3</sup> de cilindrada, operando bajo el ciclo de conducción de buses. Nuevamente, el camión de dos ejes grande (C2G2) fue el que más THC emitió en su categoría (1.91 g/km), lo que da cuenta del mal estado mecánico o la falta de sincronización de este vehículo en comparación con los demás.

En la **Figura 3. 11**, se muestra que la emisión específica de THC (por tonelada) disminuye drásticamente, y que la tecnología influye en reducir el THC, como se observó para los dos tractocamiones Euro V (modelo 2020), que presentaron las más bajas emisiones entre los 16 medidos.



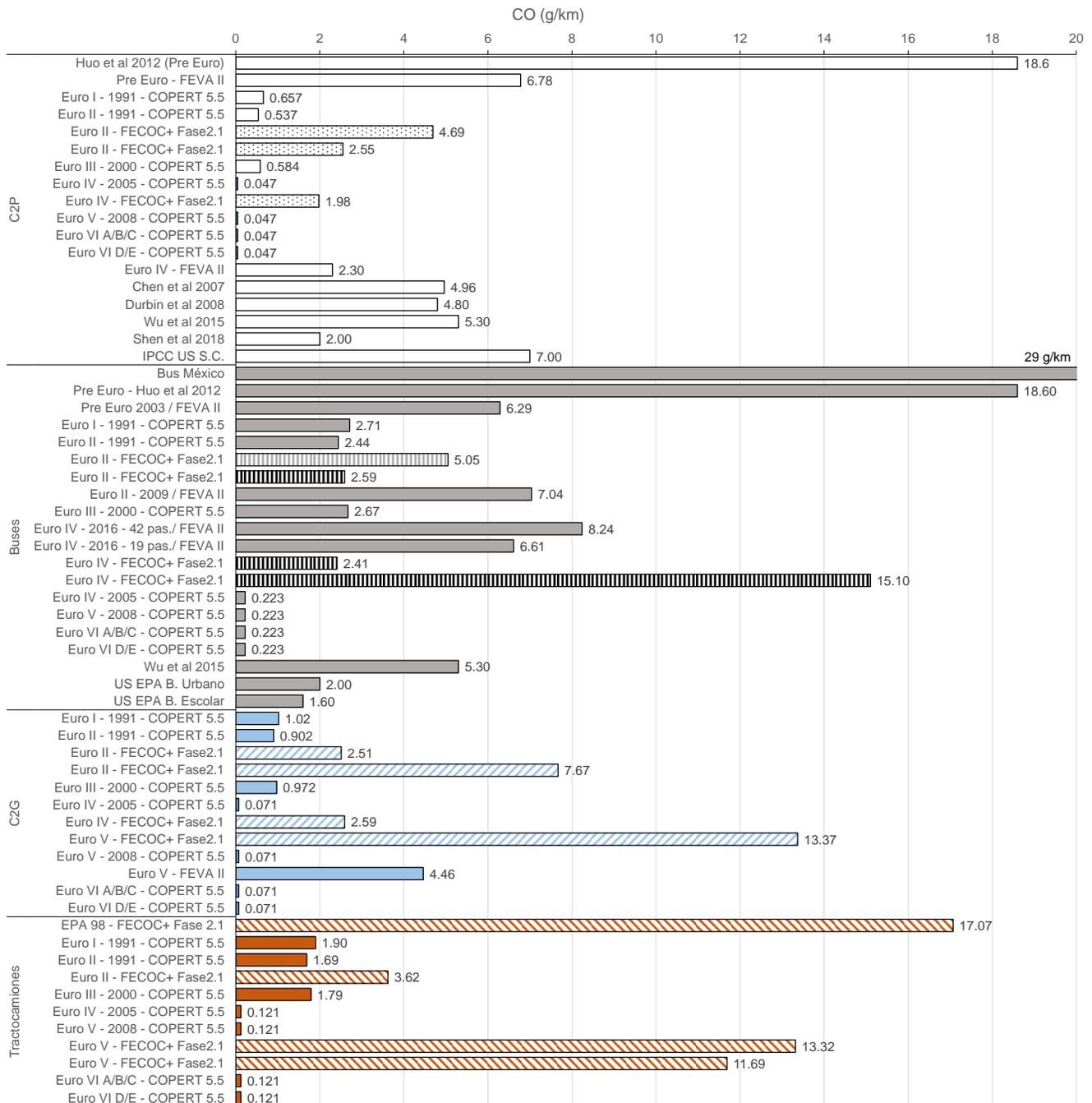
**Figura 3. 11.** THC (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

### 3.2.5. Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas tóxico, producto de la combustión incompleta de los hidrocarburos fuertemente marcada por la disponibilidad de aire (oxígeno), aunque también se pueden producir en menor concentración por la disociación química del CO<sub>2</sub> en condiciones de alta temperatura. En exposiciones de periodos de tiempo prolongados, bajo concentraciones elevadas, puede llegar a causar la muerte por exceso de carboxihemoglobina en la sangre. La guía actualizada de la OMS sugiere disminuir la exposición a no más de 4 mg/m<sup>3</sup> por un periodo no mayor a 24 horas y, en todo caso, no arriesgarse a inhalaciones mayores a 10 mg/m<sup>3</sup> en una jornada de 8 horas, o de 100 mg/m<sup>3</sup> durante más de 15 minutos, por los riesgos que representa para la salud humana [10].

Las emisiones tanto de CO como de THC, suelen ser bajas en los vehículos dotados con motores a ciclo diésel, porque estos funcionan con mezclas pobres (exceso de aire respecto

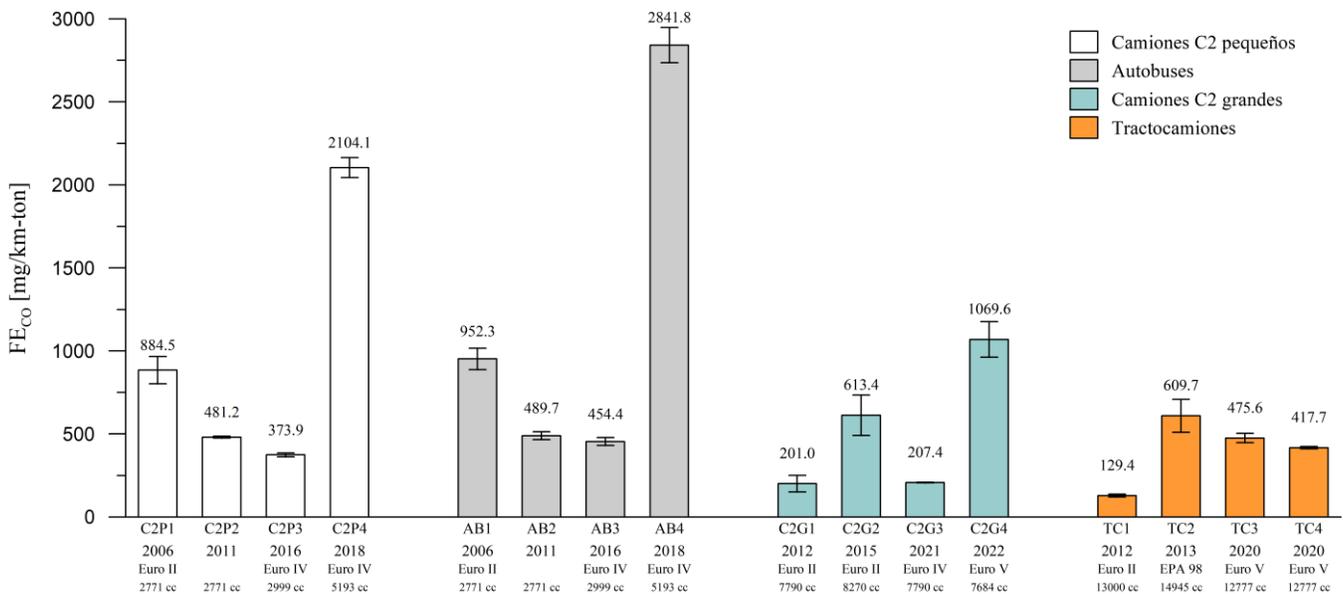
del estequiométricamente requerido). En un trabajo previo realizado por el mismo grupo ejecutor (Universidad de Antioquia y Ecopetrol), se alcanzaron a medir motocicletas con carburador Euro 2, de sólo 100 cm<sup>3</sup> de cilindrada, que emitieron entre 5 y 25 g/km. En nuestro caso, el valor más elevado correspondió a un tractocamión EPA 98 (modelo 2013), el cual, con cerca de 13000 cm<sup>3</sup> de cilindrada, emitió alrededor de 17 g/km, valor que sigue siendo bajo si se compara con la campaña de mediciones de FE llevada a cabo en la ciudad de México, donde se reportan valores promedio de 29 g/km para autobuses de servicio interurbano (**Figura 3. 12**).



**Figura 3. 12.** Comparación del CO medido vs reportados en la literatura técnica

Al comparar el factor de emisión de CO (**Figura 3. 12**), excepto por los valores tan excepcionalmente elevados de tres de los tractocamiones medidos en este proyecto (11.69 g/km, 13 g/km y 17 g/km), los demás valores para camiones C2P y grandes (C2G), así como buses, están dentro de los valores típicos reportados en la literatura. No se observó una tendencia a la disminución del CO con la tecnología de control de emisiones. No obstante, una vez más se observó que los valores medidos superan significativamente los propuestos por el modelo COPERT. Por ejemplo, para el camión C2P de tecnología Euro II, el valor modelado es 0.537 g/km, mientras que lo medido fue 4.69 g/km (cerca de 9 veces mayor).

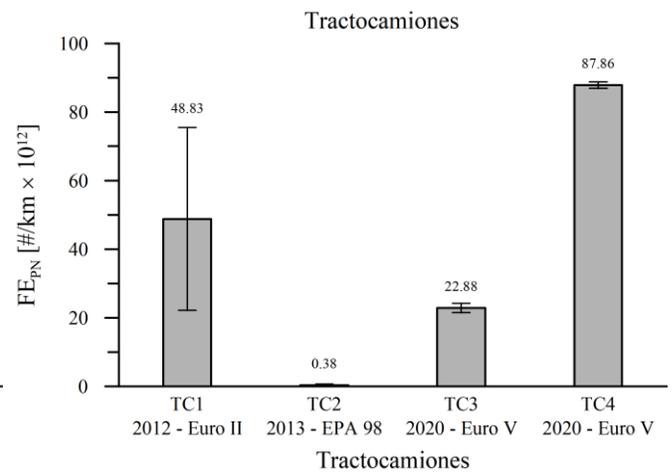
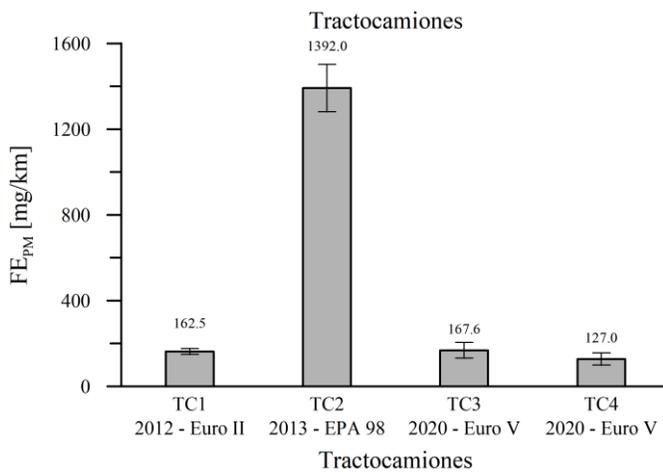
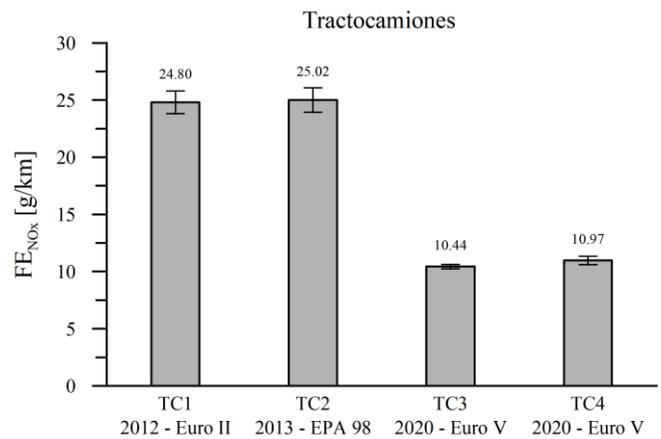
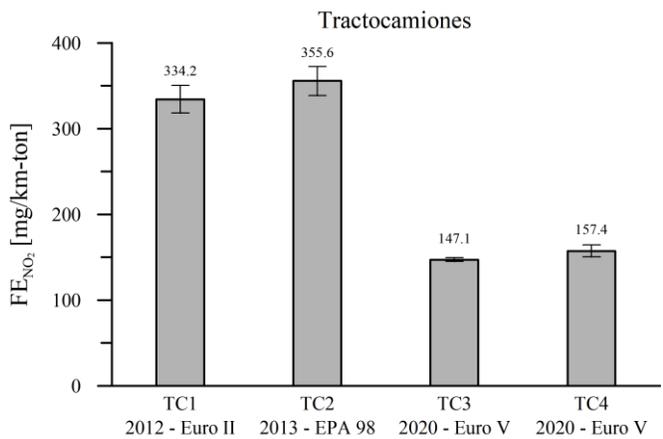
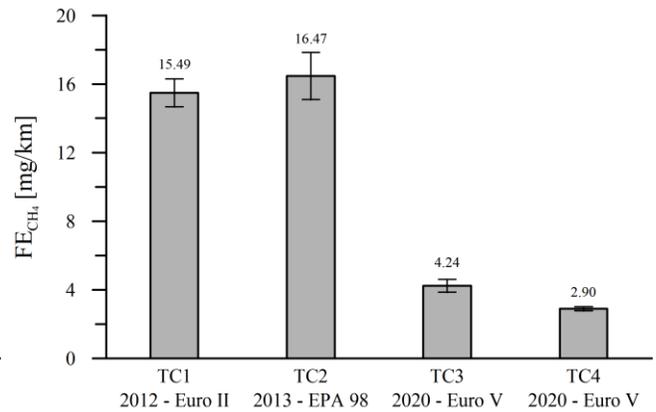
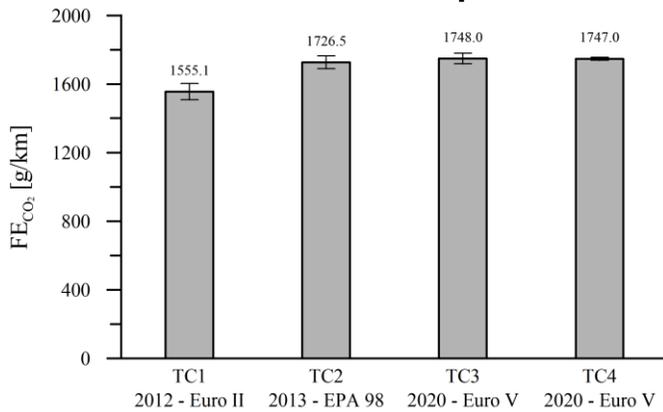
En la **Figura 3. 13** se muestra la comparación de los factores de emisión por cada tonelada de carga. No se observó una tendencia en el factor de emisión del CO con la tecnología de control de emisiones de los camiones/buses.

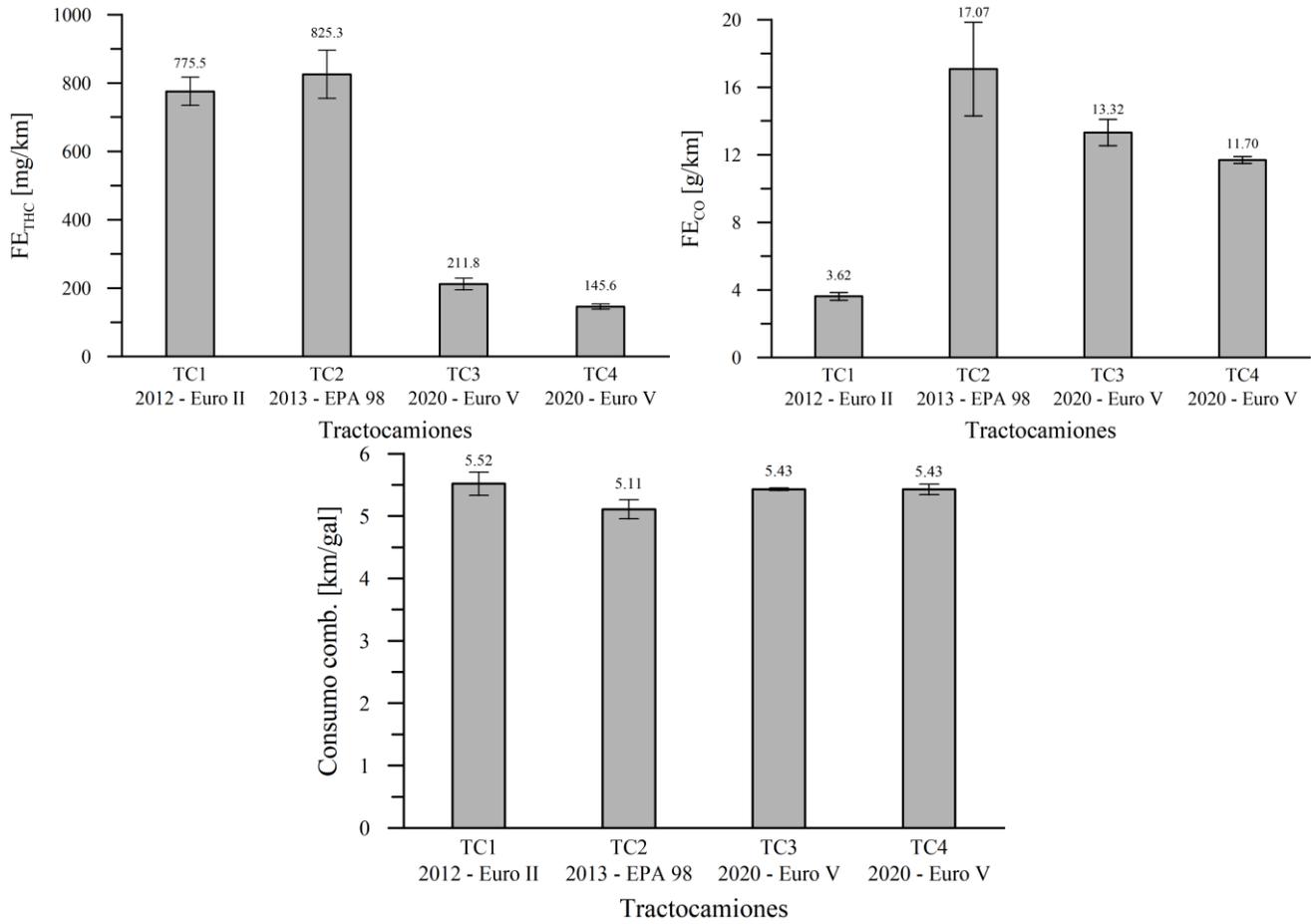


**Figura 3. 13.** CO (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

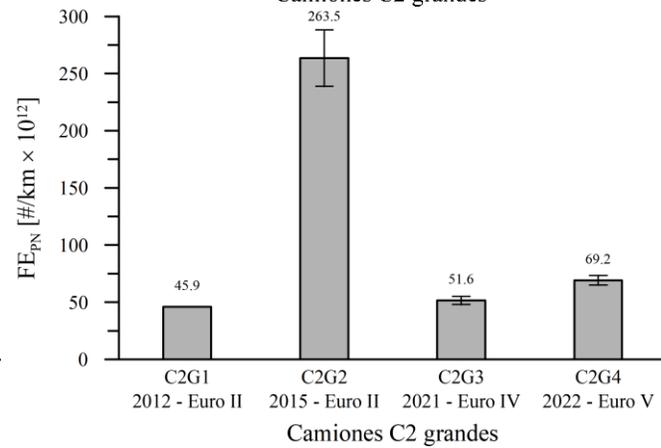
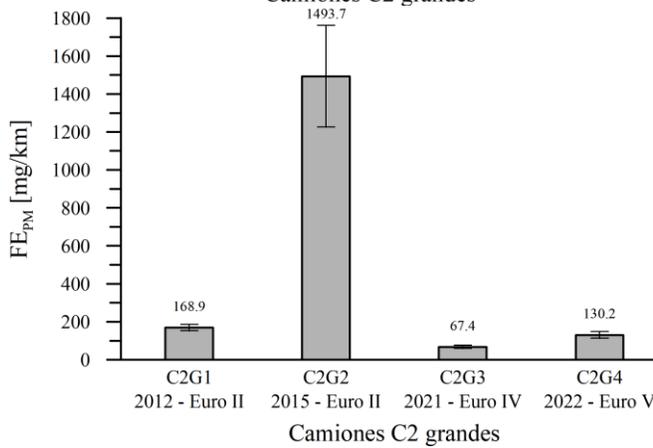
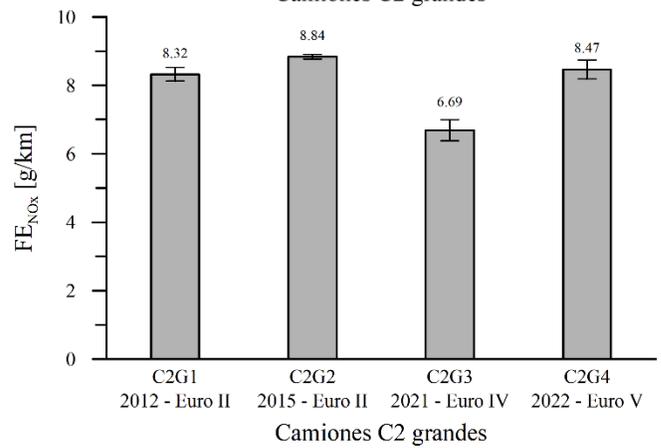
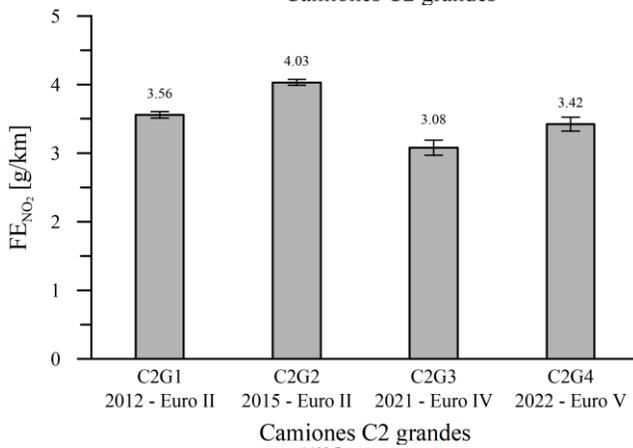
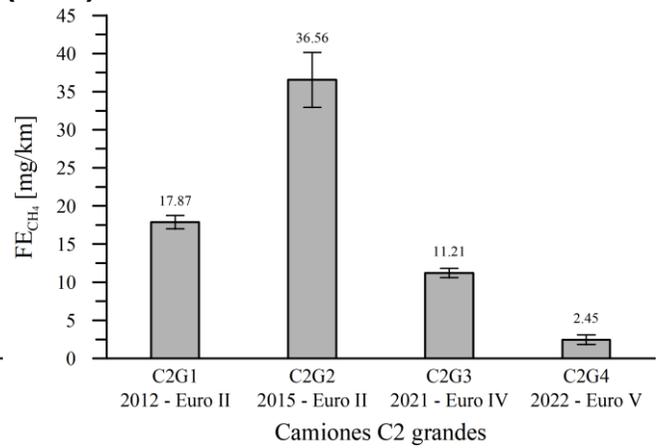
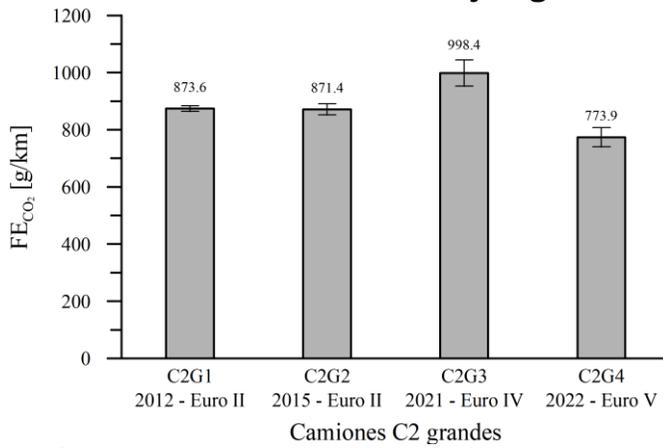
A continuación, se representan gráficamente los FE por cada categoría vehicular medida, a saber, Tractocamiones, camiones de dos ejes grandes (C2G), camiones de dos ejes pequeños (C2P) y buses (AB). Se han separado según sean gaseosos de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), tóxicos/cancerígenos (NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), partículas (PM y PN), y finalmente, se presentan los de THC y CO, que representan, en una medida importante, la ineficiencia de la combustión, el estado de inspección y mantenimiento del vehículo y el efecto de la menor concentración de oxígeno a medida que incrementa la altitud sobre el nivel del mar.

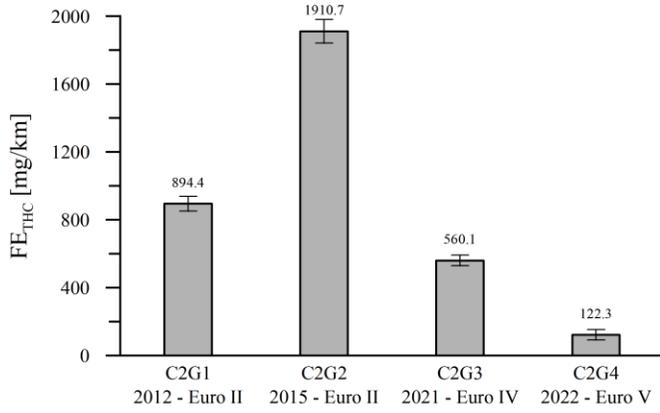
### 3.3. FE de Tractocamiones tipo C3S2



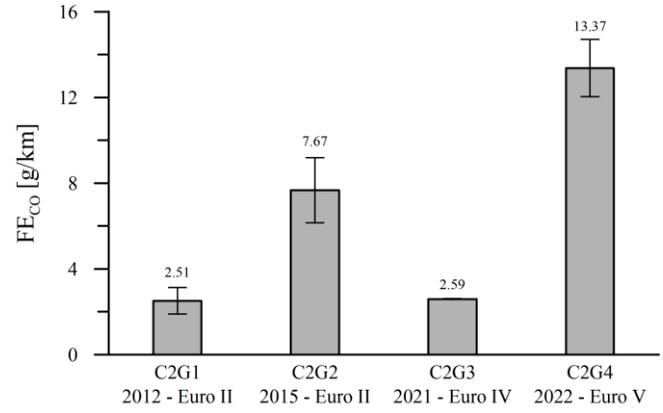


### 3.4. FE de camiones de dos ejes grandes (C2G)

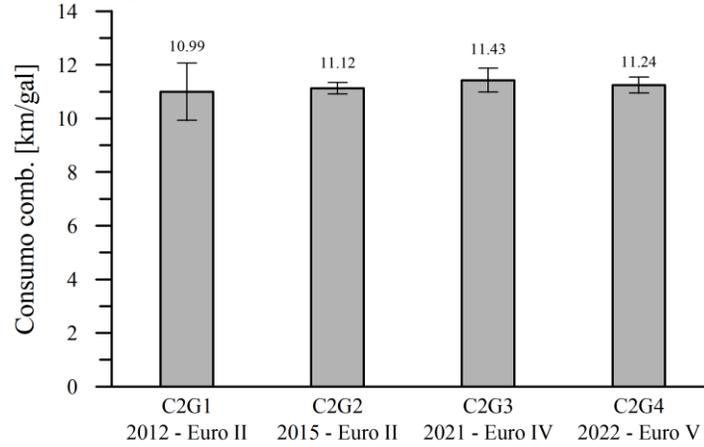




Camiones C2 grandes

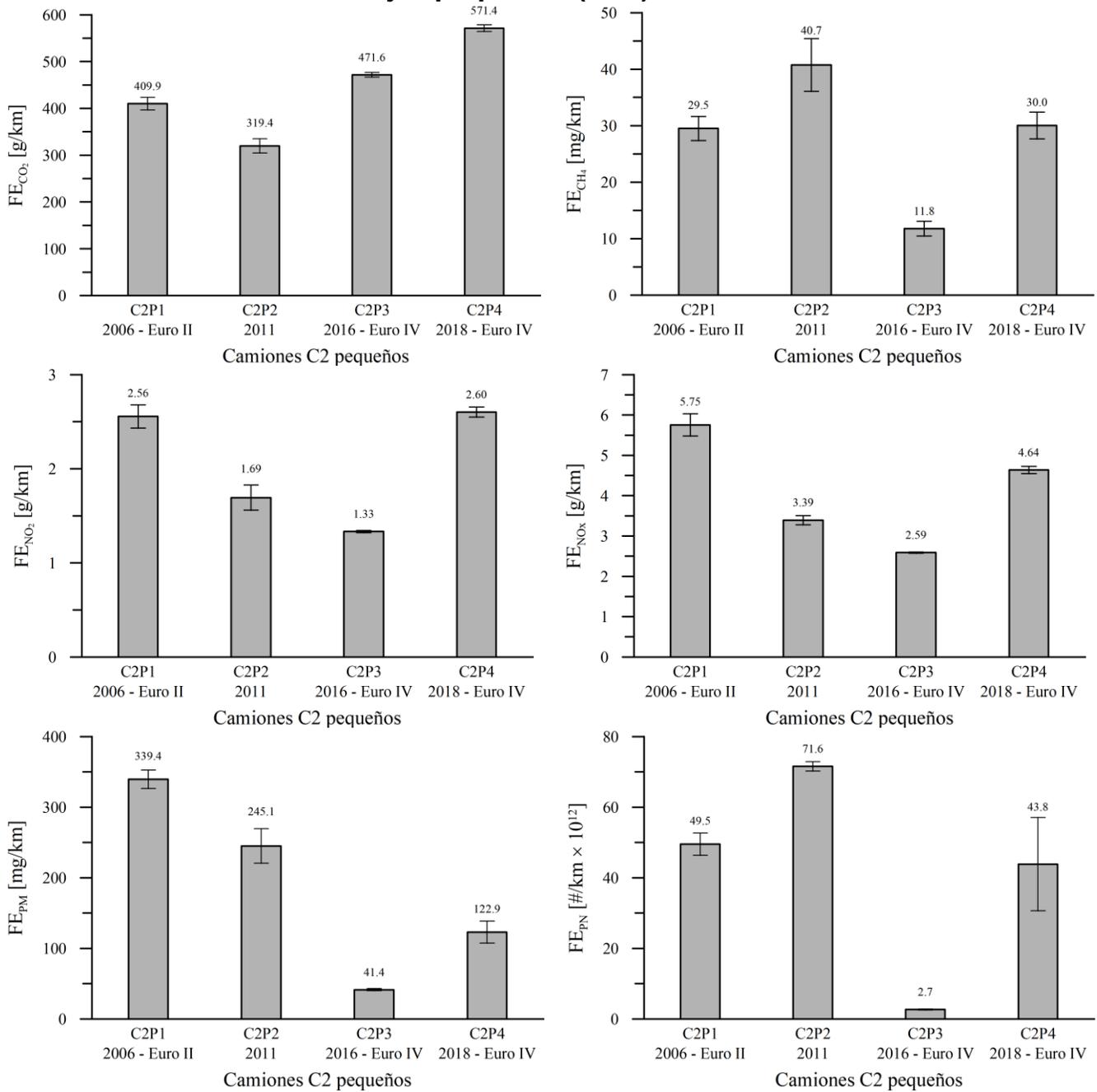


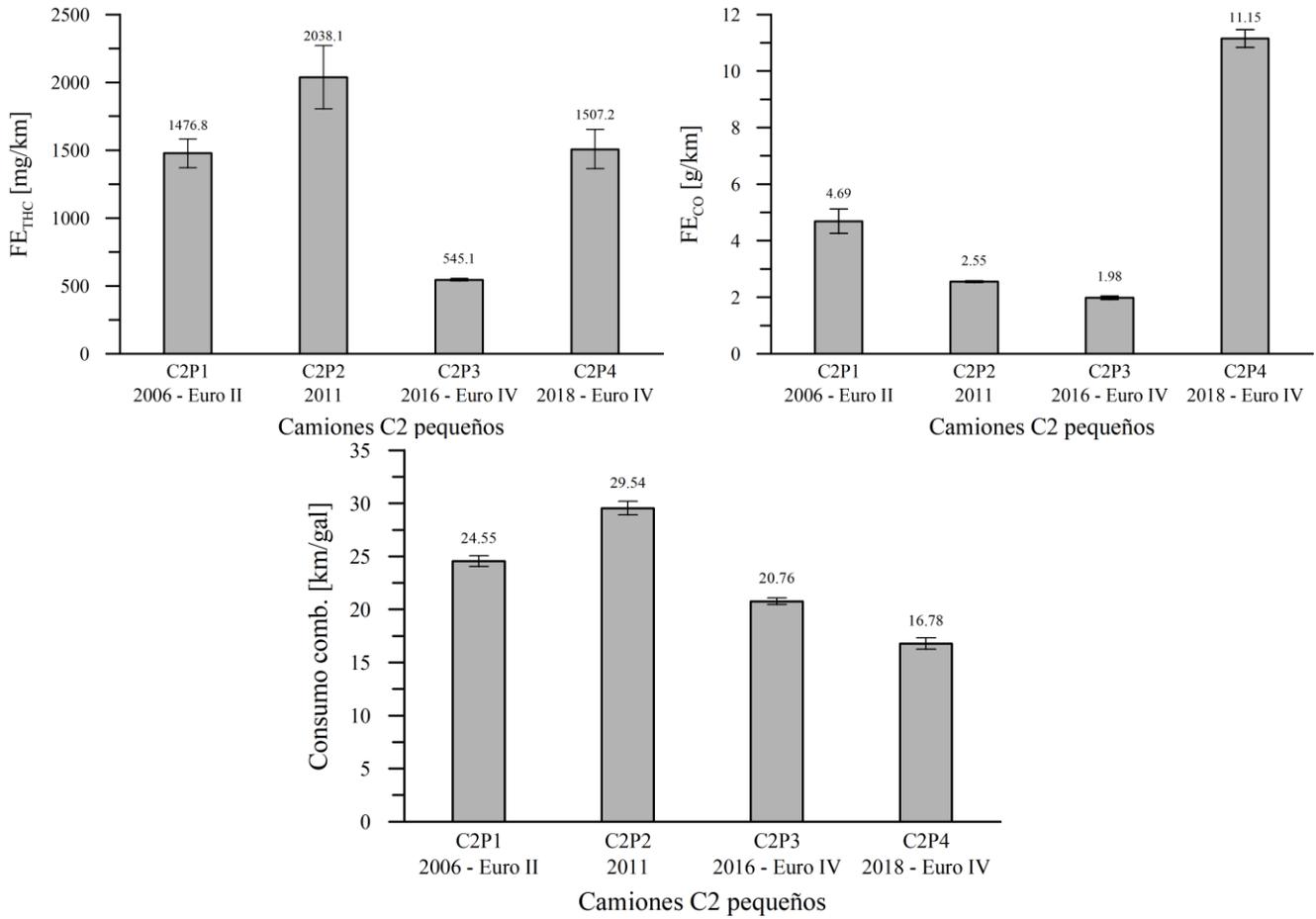
Camiones C2 grandes



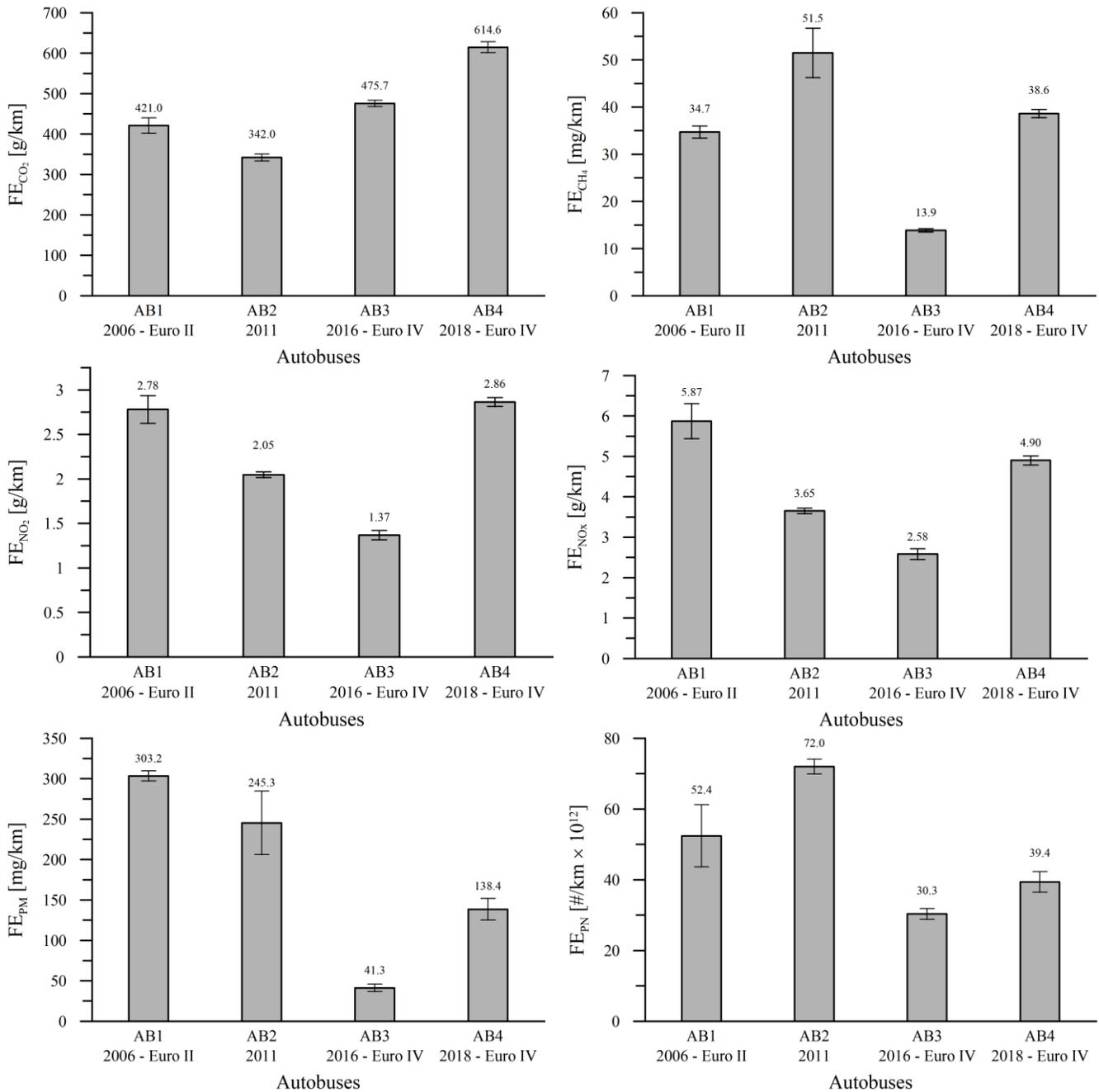
Camiones C2 grandes

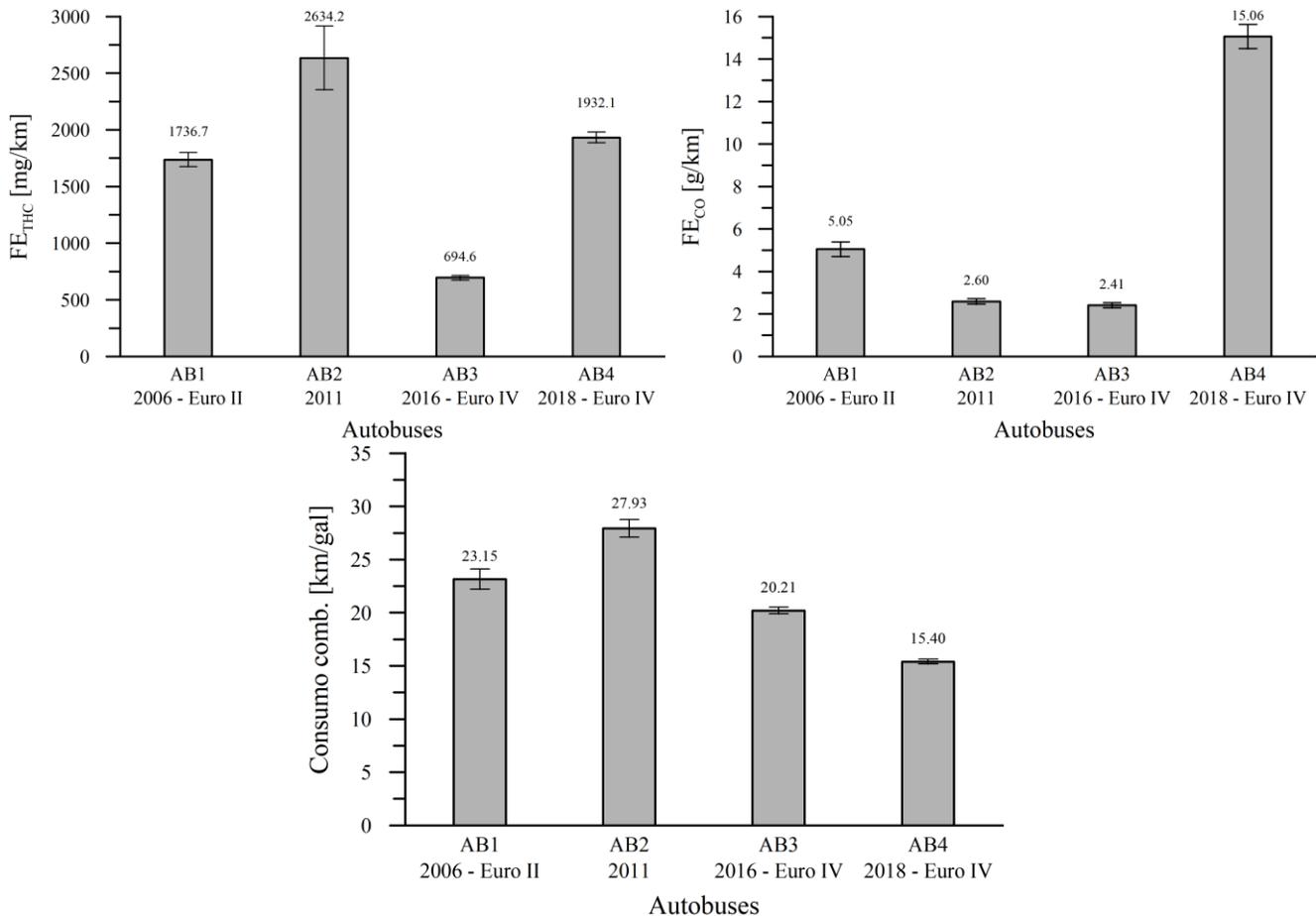
### 3.5. FE de camiones de dos ejes pequeños (C2P)





### 3.6. FE de buses





## Referencias Capítulo 3

- [1] H. Huo, Z. Yao, Y. Zhang, X. Shen, Q. Zhang, y K. He, «On-board measurements of emissions from diesel trucks in five cities in China», *Atmos. Environ.*, vol. 54, pp. 159-167, 2012.
- [2] C. Chen *et al.*, «On-road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles in Shanghai», *Atmos. Environ.*, vol. 41, n.º 26, pp. 5334-5344, 2007.
- [3] X. Zheng *et al.*, «Joint measurements of black carbon and particle mass for heavy-duty diesel vehicles using a portable emission measurement system», *Atmos. Environ.*, vol. 141, pp. 435-442, 2016.
- [4] S. H. y P. D. V. Franco, M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, «Road vehicle emission factors development: A review», *Atmos. Environ.*, vol. 70, pp. 84-97, 2013.
- [5] J. M. López-Martínez *et al.*, «Modelling the fuel consumption and pollutant emissions of the urban bus fleet of the city of Madrid», *Transp. Res. Part D Transp. Environment*, vol. 52, n.º A, 2017.

- [6] Universidad de Antioquia, «Informe final Convenio 888 de 2017: Factores de emisión reales de vehículos pesados en el Valle de Aburrá (FEVA II)». Medellín, 2017.
- [7] «Don't breathe here. Beware the invisible killer. Tackling air pollution from vehicles Transport and environment», 2015. <https://www.transportenvironment.org/discover/dont-breathe-here-tackling-air-pollution-from-vehicles/> .
- [8] Universidad de los Andes y V. y D. T. Ministerio de Ambiente, «Fundamentos de contaminación del aire. Conceptos generales, definiciones y política ambiental». Bogotá, 2008.
- [9] M. Krzyzanowski, B. Kuna-Dibbert, y J. Schneider, Eds., *Health effects of transport-related air pollution*. Copenhagen: World Health Organization, 2005.
- [10] WHO global quality guidelines, «Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon dioxide». World Health Organization, Geneva, 2021.
- [11] A. Ayala *et al.*, *Ambient combustion ultrafine particles and health*. New York: Nova Science, 2021.
- [12] A. L. de Jesus *et al.*, «Ultrafine particles and PM2.5 in the air of cities around the world: Are they representative of each other?», *Environ. Int.*, n.º 129, pp. 118-135, 2019.
- [13] D. Kittelson, I. Khalek, J. McDonald, J. Stevens, y R. Giannelli, «Particle emissions from mobile sources: Discussion of ultrafine particle emissions and definition», *J. Aerosol Sci.*, vol. 159, n.º 105881, 2022.
- [14] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, 2.<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill, 2018.

## **CAPITULO 4**

### **CONSIDERACIONES FINALES Y ANEXOS**

## Contenido Capítulo 4 y Anexos

<b>1. Consideraciones finales</b> .....	62
<b>Anexos</b> .....	65
<b>1.1. Anexo 1. Vehículos de prueba</b> .....	65
<b>1.1.1. Criterios generales de selección</b> .....	65
<b>1.1.2. Selección e instrumentación de vehículos y ejecución de la prueba</b> .....	66
<b>1.2. Anexo 2. Metodología para tratamiento y análisis de datos</b> .....	70
<b>1.3. Anexo 3. Equipos de medición y fichas técnicas</b> .....	76
<b>1.4. Anexo 4. Datos brutos usados para determinar los factores de emisión</b> .....	81
<b>1.4.1. Tractocamiones tipo C3S2</b> .....	81
<b>1.4.2. Camiones de dos ejes grandes (C2G)</b> .....	83
<b>1.4.3. Vehículos de dos ejes C2 pequeños (C2P)</b> .....	85
<b>1.4.4. Buses (AB)</b> .....	87
<b>Referencias Capítulo 4</b> .....	88

## Índice de Figuras Anexos

<b>Figura A. 1.</b> Vehículo de prueba en chasis dinamométrico .....	67
<b>Figura A. 2.</b> Adaptación del tubo de muestreo al tubo de escape (izquierda) y contenedor cargado (derecha). .....	68
<b>Figura A. 3.</b> Vehículos ubicados en zona de inicio de la prueba. ....	69
<b>Figura A. 4.</b> Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos .....	70
<b>Figura A. 5.</b> Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos.....	71
<b>Figura A. 6.</b> Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción en carretera. Sup.: camiones C2 grandes, Inf.: tractocamiones C3S2.....	72
<b>Figura A. 7.</b> Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión C2 grande; inf.: tractocamión) para mediciones en carretera .....	73
<b>Figura A. 8.</b> PEMS para gases HORIBA OBS-ONE-GS12 (izq.) y gases de calibración (der.) .....	76
<b>Figura A. 9.</b> Módulo de PM y PN de Horiba (izquierda) y ELPI de Dekati con dilutores (derecha) .....	79
<b>Figura A. 10.</b> Características del sensor de flujo de combustible. ....	79

## Índice de Tablas Anexos

<b>Tabla A. 1.</b> Vehículos de carga seleccionados para medición de factores de emisión a la altitud de la región metropolitana de Bucaramanga .....	65
<b>Tabla A. 2.</b> Especificaciones de camiones de dos ejes C2 livianos y C2 mediano .....	66
<b>Tabla A. 3.</b> Especificaciones de camiones de dos ejes C2 grandes .....	67
<b>Tabla A. 4.</b> Especificaciones de tractocamiones tipo C3S2 medidos.....	68
<b>Tabla A. 5.</b> Coeficientes de correlación reproducción de ciclos de conducción C2 livianos/buses .....	71
<b>Tabla A. 6.</b> Coeficientes de correlación que cuantifican las diferencias entre el ciclo de conducción teórico (programado) y el ciclo de conducción reproducido por el conductor (real) para pruebas en carretera. Izq.: vehículos de dos ejes C2 grandes, der.: tractocamiones C3S2 .....	74
<b>Tabla A. 7.</b> Coeficientes de correlación promedio para todas las categorías vehiculares medidas .....	74
<b>Tabla A. 8.</b> Especificaciones técnicas del equipo portable de medición de gases de escape. (Tomado de <a href="https://www.horiba.com/sgp/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/">https://www.horiba.com/sgp/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/</a> ) .....	76
<b>Tabla A. 9.</b> Especificaciones técnicas del módulo OBS-ONE PM de Horiba. (Tomado de <a href="https://www.horiba.com/en_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pm-unit-19/">https://www.horiba.com/en_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pm-unit-19/</a> ).....	77
<b>Tabla A. 10.</b> Especificaciones técnicas del módulo OBS-ONE PN de Horiba. (Tomado de <a href="https://www.horiba.com/en_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pn-unit-12/">https://www.horiba.com/en_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pn-unit-12/</a> ) .....	77
<b>Tabla A. 11.</b> Especificaciones del HR-ELPI + VI de Dekati.....	78
<b>Tabla A. 12.</b> Dimensiones de los impactadores del HR-ELPI +VI de Dekati.....	78
<b>Tabla A. 13.</b> Especificaciones técnicas del Banco de Rodillos usado en las pruebas, propiedad de Ecopetrol .....	80

## 1. Consideraciones finales

Este documento contiene los resultados de una campaña experimental que tuvo como finalidad determinar los factores de emisión de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , THC y CO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM y PN) de una muestra de 16 vehículos pesados de transporte de carga y pasajeros a la altitud correspondiente al área metropolitana de Bucaramanga (cerca de 900 msnm). Después de comprobar que para vehículos livianos no había diferencias significativas entre las pruebas en carretera y las pruebas en banco de rodillos, se procedió a medir los factores de emisión de los 4 camiones de dos ejes pequeños (C2P) en banco de rodillos, siguiendo los ciclos de conducción tanto de camiones de repartición de paquetería de última milla, como de buses urbanos.

En carretera se midieron los factores de emisión de 4 camiones de dos ejes grandes (capacidad de carga de 11 toneladas) y de 4 tractocamiones tipo C3S2. Los vehículos medidos fueron seleccionados según las recomendaciones de la primera fase de este proyecto (FECOC+ Fase 1), en la que se establecieron los años de modelo, marcas y tecnologías de control de emisiones más representativas del país. Igualmente, los ciclos de conducción utilizados para cada categoría vehicular fueron tomados del mismo proyecto.

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

1. El país cuenta con ocho (8) factores de emisión, así como los datos de consumo instantáneo y promedio de combustible para la categoría de vehículos pesados más representativa. Se espera que, una vez medidos los FE en las altitudes de Bogotá y Barranquilla, se pueda ponderar el impacto de la altitud sobre el nivel del mar en las emisiones y el consumo, de tal forma que estos resultados puedan ser usados para la actualización de los inventarios de emisiones nacionales y regionales.
2. Quedó demostrado y cuantificado que, entre mejor sea la tecnología de control de emisiones de los camiones, más bajas son sus emisiones contaminantes. Esto sugiere considerar políticas claras de renovación de flota en el sector de transporte de pasajeros y de carga. El uso del sistema de reducción catalítico (SCR) redujo cerca del 50% las emisiones de óxidos de nitrógeno. Se hace un llamado para que las empresas de transporte valoren positivamente la importancia de mantener en buen estado de funcionamiento sus sistemas de SCR, a pesar de los sobrecostos en operación que supone el uso del fluido de tratamiento de gas de escape (úrea automotriz).
3. No se encontró que existiera ninguna relación (directa o indirecta) entre la tecnología de control de emisiones del vehículo y el consumo de combustible, y por lo tanto en el factor de emisión de  $\text{CO}_2$ . Este resultado sugiere que se deberían usar otros parámetros diferentes a la emisión de  $\text{CO}_2$  o consumo de combustible para posibles programas de eco-etiquetado de vehículos pesados.

4. Si bien las emisiones de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) tienen un potencial de calentamiento climático 25 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ , sus emisiones fueron significativamente pequeñas (máximo 250 mg/km-ton o 51 mg/km en el peor de los vehículos medidos) frente al  $\text{CO}_2$ , cuyos valores llegaron a estar cercanos a los 1750 g/km para los tractocamiones. Este resultado sugiere que no es necesario incluir este gas en futuras campañas experimentales si el combustible utilizado es diésel comercial, como fue el presente estudio.
5. A pesar de que las emisiones gaseosas en términos generales aumentaron con el tamaño del motor, debido a su mayor consumo de combustible por cada kilómetro, este resultado se invirtió cuando se dividió por la capacidad de carga del camión (en toneladas), lo que sugiere que para transporte de carga y pasajeros no es conveniente la atomización de la flota en vehículos de tamaño pequeño.
6. El uso de modelos para obtener factores de emisión, aunque ampliamente utilizados en el ámbito internacional, no es recomendable para las condiciones del país. En este proyecto se obtuvieron diferencias altamente significativas entre los valores recomendados por el modelo COPERT de la agencia europea del medioambiente. Para material particulado, por ejemplo, los valores de COPERT son hasta 10 veces más bajos que los medidos localmente. Los valores de FE obtenidos en este trabajo estuvieron en el mismo orden de los reportados en la literatura, particularmente en los estudios de 2012 a 2018 para ciudades chinas.
7. La emisión de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), gas altamente tóxico y cancerígeno para el ser humano, y que tiende a reaccionar en la atmósfera por efecto del sol para formar compuestos secundarios como material particulado y nitro-derivados, constituyó aproximadamente la mitad (50%) de la emisión de óxidos de nitrógeno totales ( $\text{NO}_x$ ). Considerando que las emisiones de  $\text{NO}_x$  alcanzaron valores tan elevados como 25 g/km, este resultado sugiere un llamado de atención para que las respectivas autoridades ambientales tomen las debidas precauciones. A la fecha ningún país está limitando las emisiones de  $\text{NO}_2$  ni de  $\text{NO}_x$  en las pruebas de inspección técnica periódica de vehículos diésel.
8. Las emisiones de material particulado (PM) oscilaron entre 40 y 1400 mg/km sin mostrar una dependencia ni con el tamaño del motor, ni con su tecnología de control de emisiones. Se demostró, sin embargo, que no hay una relación necesariamente directa entre la masa de partículas y el número de partículas. En algunos de los camiones medidos se encontró alta emisión de PM y baja emisión de PN, y viceversa, lo que sugiere que ambos parámetros dependen estrechamente del tamaño (diámetro) de las partículas, siendo las partículas de menor tamaño las que están en mayor número en las nuevas tecnologías de motores.

9. Los factores de emisión de los camiones de dos ejes pequeños fueron más elevados cuando se midieron bajo el ciclo de conducción de buses frente a los ciclos de conducción de camiones de repartición de paquetería. Esto sugiere que las autoridades de movilidad/tránsito, podrían utilizar estos indicadores para mejorar las condiciones de circulación del servicio público de buses urbano, evitando las constantes paradas/arranques, y mejorando su velocidad promedio de circulación. Además, los resultados confirman que emiten menos contaminación cuantos más pasajeros pueden transportar.

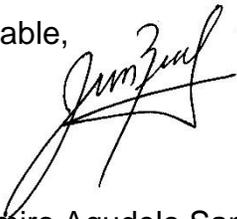
Debido a que el objeto de este convenio consistió en determinar los factores de emisión de la categoría de vehículos pesados más representativos de Colombia, no se incluyeron tecnologías como vehículos eléctricos, híbridos o a gas metano vehicular (GMV)

Como recomendaciones para la UPME, el grupo ejecutor de la Universidad de Antioquia, sugiere que, siguiendo los lineamientos recientemente trazados en agosto de este año por la Organización Mundial de la Salud, se realice un estudio en el que se relacionen los factores de emisión de número y tamaño de partículas con su impacto sobre la salud pública (ver numeral 4.3 del informe de la OMS).

Con agradecimiento sincero a nuestra Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), a la empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), al grupo empresarial Coordinador Mercantil, y a la empresa INTECCON.

Grupo Ejecutor, en Medellín a 17 de diciembre de 2021.

Responsable,



John Ramiro Agudelo Santamaría  
Prof. Dr-Ing. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Antioquia

## Anexos

### 1.1. Anexo 1. Vehículos de prueba

#### 1.1.1. Criterios generales de selección

La selección de vehículos pesados se basó en el análisis estadístico realizado en el proyecto FECOC+ Fase 1 [1], donde se recomendó medir entre 12 y 20 vehículos pesados, con un nivel de confianza (NC) del 90% y un error de 0,24. Esta selección fue determinante, porque sus emisiones serían representativas de los vehículos que se encuentran en circulación en el país. Por razones logísticas, se midieron 12 vehículos en esta Fase 2.1.

Se utilizaron mapas de calor analizados en el informe final del convenio CV001-2020 (FECOC+ Fase 1) para determinar, a partir de la información disponible en la base de datos del RUNT a corte de diciembre de 2020, cuáles eran los vehículos más representativos dentro de cada categoría, según el cilindraje del motor, año del modelo y capacidad de carga.

En la **Tabla A. 1** se resumen los 12 vehículos a los cuales se les determinó los factores de emisión en este proyecto, de los cuales cuatro (4) se midieron en banco de chasis dinamométrico del ICP en Piedecuesta, siguiendo los dos ciclos de conducción, de camiones y de buses, y ocho (8) se midieron en carretera siguiendo los ciclos de conducción de camiones y tractocamiones.

**Tabla A. 1.** Vehículos de carga seleccionados para medición de factores de emisión a la altitud de la región metropolitana de Bucaramanga

Clase	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	Modelo	Medidos	Ciclo	Tipo prueba	Total pruebas
Camión C2 liviano (<3ton)	< 3.000	2012 (Euro II) y > 2016 (Euro IV)	3	Camiones / Buses	Banco	6
Chasis C2 mediano (<5ton)	5200	< 2010 (Euro II) y > 2016 (Euro IV)	1	Camiones / Buses	Banco	2
Camión C2 pesado (10ton)	> 6.000	< 2012 (Euro II) y > 2016 (Euro IV/V)	4	Camiones	Carretera	4
Tracto-camión C3S3	12.000 a 15.000	2012 (Euro II) y > 2016 (Euro IV/Euro V)	4	Tractocamiones	Carretera	4
<b>TOTAL</b>			<b>12</b>	-	-	<b>16</b>

Para esta fase del proyecto se seleccionaron 4 tractocamiones tipo 3S2, con cilindradas entre 12.800 y 15.000 cm<sup>3</sup>., entre los años de modelo 2011 a 2019, y con capacidad de carga sobre las 35 toneladas. Además, se seleccionaron 3 camiones C2 livianos, tipo repartición de paquetería de última milla, 1 camión C2 mediano, y 4 camiones C2 grandes con capacidad de carga de 10 toneladas. En todos los casos se intentó cubrir los rangos de tecnologías de control de emisiones más característicos del país, normalmente Euro II y Euro IV.

El grupo empresarial Coordinadora Mercantil, facilitó: 2 camiones C2 livianos (2.7 ton), uno Euro II y otro Euro IV, 1 camión pesado (10 ton) tipo Euro II y 4 tractocamiones. Los demás vehículos fueron alquilados.

**1.1.2. Selección e instrumentación de vehículos y ejecución de la prueba**

Los vehículos en los que se ejecutaron los ciclos fueron seleccionados de tal forma que cumplieran de la mejor manera con los requisitos más importantes (cilindrada, modelo y capacidad de carga) descritos en los criterios de selección de la Fase 1 de este proyecto (**Tabla A. 1**). La selección de estos vehículos según su marca estuvo sujeta a la disponibilidad del medio, pero se seleccionaron los de marcas más representativas. En las **Tabla A. 2**, **Tabla A. 3** y **Tabla A. 4** se muestran sus características.

- **Camiones de dos ejes C2 livianos y C2 medianos**

A los vehículos referidos en la **Tabla A. 2** se les realizaron las pruebas en el chasis dinamométrico que está ubicado en el laboratorio de motores del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP - Ecopetrol). En estos vehículos se ejecutaron ciclo de camiones y ciclo de buses, ya que los motores de estos camiones son usados en buses y son representativos de la flota colombiana. Los parámetros de dimensiones del vehículo y capacidad de carga fueron ajustados en el software del chasis dinamométrico para que los camiones simularan adecuadamente el desempeño de los buses. En este caso, los equipos de medición se ubicaron dentro del laboratorio. Frente al vehículo se ubicó una pantalla que mostraba el ciclo que debía seguir el conductor y un ventilador industrial que ayudaba a refrigerar el vehículo (ver **Figura A. 1**). El tiempo empleado para realizar la instrumentación en las pruebas de chasis fue de 1 día. El tiempo empleado en el desmontaje de equipos también fue de 1 día, mientras que las 3 o 4 repeticiones que se realizaban para cada vehículo, en cada tipo de ciclo de conducción (camiones/buses), se tomaba entre 2 y 3 días.

**Tabla A. 2.** Especificaciones de camiones de dos ejes C2 livianos y C2 mediano

Marca	Línea	Modelo	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	Capacidad aproximada (kg)
Chevrolet	NKR	2006	2.800	3.000
		2016	3.000	3.000
	NPR	2018	5.200	5.000
JAC	HFC1035KD	2011	2.800	2.000



**Figura A. 1.** Vehículo de prueba en chasis dinamométrico

- **Camiones de dos ejes C2 grandes**

Para los vehículos C2 grandes (ver **Tabla A. 3**) fue necesario incluir generadores eléctricos en su carrocería. Se cargaron cuatro isotanques con un peso aproximado de una tonelada cada uno, adicionalmente, el peso estimado de todos los equipos cargados en la carrocería fue de una tonelada, para un total de cinco toneladas de carga de prueba usada en cada vehículo. Se buscó que los vehículos de esta categoría tuvieran carrocería tipo estacas para facilitar la adaptación del tubo de escape a las sondas de los equipos de medición para evitar realizar perforaciones. El tiempo invertido para realizar la instrumentación de este tipo de vehículos fue de dos días, y para el desmontaje, se invirtió un día. El tiempo de pruebas en carretera, para garantizar al menos tres repeticiones, oscilaba entre uno y dos días. Las pruebas se realizaron en horas de la noche, para evitar interrupciones durante las pruebas. Las secretarías de tránsito y transporte de los municipios de Girón y Floridablanca emitieron las autorizaciones para el uso del anillo vial.

**Tabla A. 3.** Especificaciones de camiones de dos ejes C2 grandes

Marca	Línea	Norma	Modelo	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	Capacidad aprox. (kg)
Chevrolet	FTR	Euro II	2012	7.800	10.000
Ford	Cargo 1721	Euro II	2005	8.300	10.500
Hino	GH8J Cargo	Euro V	2022	7.700	11.400
Chevrolet	FVR	Euro IV	2021	7.800	11.500

- **Tractocamiones tipo C3S2**

El proceso de instrumentación en tractocamiones (**Tabla A. 4**) se hizo más rápido que en los camiones C2 grandes, debido a que el grupo empresarial COORDINADORA MERCANTIL prestó un contenedor para usarlo en los cuatro cabezotes de

tractocamiones, por lo cual no fue necesario realizar el proceso de carga y descarga como se hizo en cada uno de los camiones de dos ejes C2 grandes.

Además, la empresa autorizó la modificación del contenedor para adaptar los equipos y asegurar la carga. Surgieron retos importantes como la adaptación del tubo de escape a las sondas de los equipos de medición, proceso que se dificultaba porque el tractocamión giraba sobre la quinta rueda y podía causar daños.

El contenedor fue cargado con aproximadamente 10 toneladas que estaban compuestas por isotanques y canecas repletas de agua, propiedad de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), además de los equipos necesarios para ejecución de las pruebas (**Figura A. 1**). Al finalizar la prueba con uno de los tractocamiones, bastaba con quitar la adaptación realizada en el tubo de escape, además de realizar el desmontaje de los equipos ubicados en cabina y desenganchar el contenedor del cabezote o tractocamión.

**Tabla A. 4.** Especificaciones de tractocamiones tipo C3S2 medidos

Marca	Línea	Norma	Modelo	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	Capacidad aprox. (kg)
International	9400i	EPA 98	2013	15.000	35.000
Mack	CXU613E	Euro II	2012	13.000	30.000
Mack	AN64TX	Euro V	2020	12.800	35.000
Mack	AN64TX	Euro V	2020	12.800	35.000



**Figura A. 2.** Adaptación del tubo de muestreo al tubo de escape (izquierda) y contenedor cargado (derecha).

A continuación, se explican otras condiciones generales de la instrumentación y de la ejecución de las pruebas de camiones de dos ejes C2 grandes y tractocamiones C3S2.

1. Los vehículos referidos en la **Tabla A. 3** y **Tabla A. 4** ejecutaron los ciclos en ruta, ya que estos excedían las dimensiones (longitud del eje) del chasis dinamométrico.

2. El combustible utilizado para las pruebas siempre fue el mismo, y esto se garantizó utilizando un tanque auxiliar que en todas las ocasiones fue llenado con combustible comprado en una estación seleccionada por personal del ICP, y que luego se conectaba al vehículo teniendo adaptado un sensor de flujo Ono Sokki. En los tractocamiones este tanque se ubicó entre el contenedor y el cabezote, y en los camiones de dos ejes C2 grandes se ubicó dentro de la carrocería.
3. Los sistemas encargados de mostrar el ciclo (computador portátil, pantallas y tabletas) que debía ejecutar el conductor en ruta, fueron ubicados en la cabina de los vehículos junto al medidor de velocidad de la quinta rueda provisto con el equipo Ono Sokki.
4. Para las pruebas en ruta se utilizaron dos vehículos vigía, uno atrás y otro adelante del camión de pruebas, para supervisar el estado de la vía, prevenir accidentes y tratar de garantizar que el ciclo se ejecutara de la manera correcta y repetitiva. Los vehículos estaban señalizados y usaban balizas para alertar a los demás actores de la vía sobre la presencia de vehículos que se encontraban en prueba. Las personas de los tres vehículos se comunicaban constantemente por radioteléfonos para reportar el estado de la prueba, los posibles obstáculos encontrados en la vía y para sincronizar el inicio de la prueba en cada uno de los equipos empleados.
5. Las pruebas en ruta se realizaron en jornadas nocturnas para minimizar los riesgos de accidentes de tránsito, además de aprovechar el poco tráfico vehicular para buscar obtener una mejor ejecución del ciclo de conducción. Ver **Figura A. 3**.
6. Con el objetivo de medir un vehículo por semana, se ejecutaron la mayor cantidad de ciclos posibles en ruta, en una o dos noches. La ejecución de cada ciclo en ruta tardaba más de una hora, teniendo en cuenta el tiempo de duración del ciclo, el acondicionamiento de los equipos, y los desplazamientos desde el punto de finalización de la prueba hasta el punto de inicio.

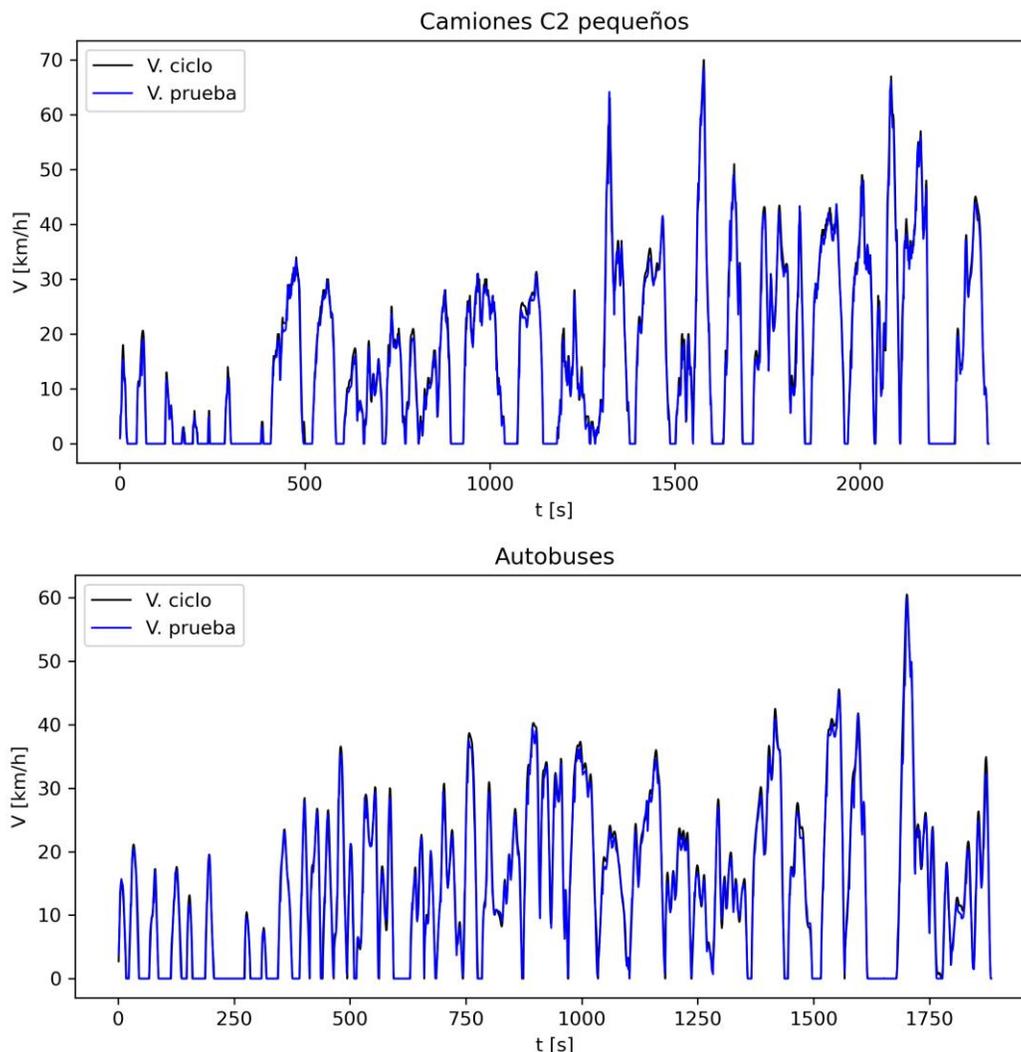


**Figura A. 3.** Vehículos ubicados en zona de inicio de la prueba.

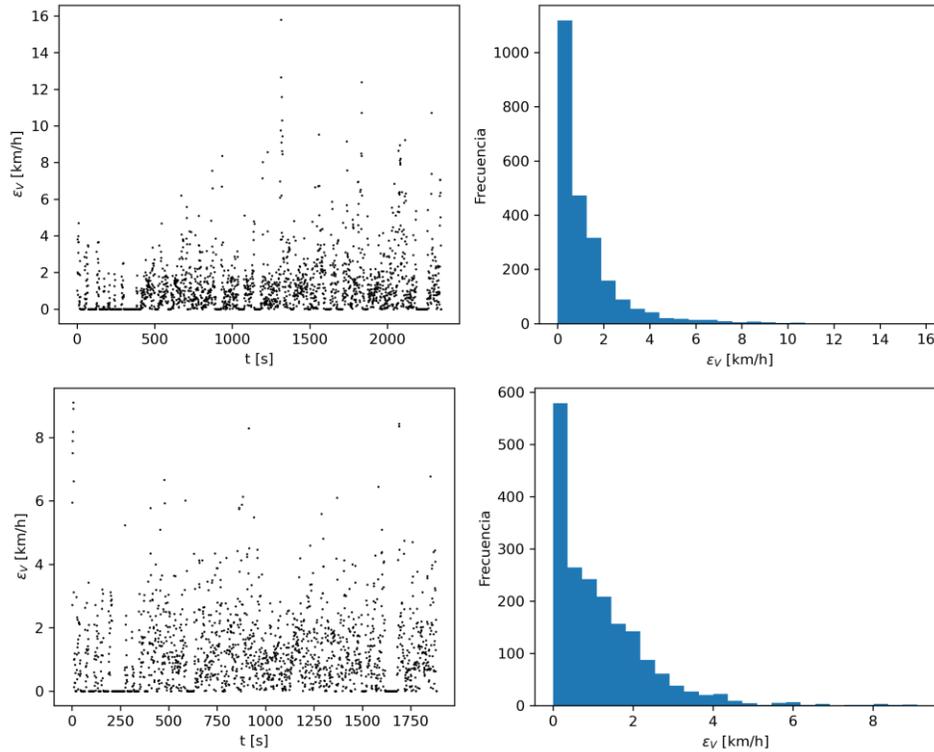
## 1.2. Anexo 2. Metodología para tratamiento y análisis de datos

El análisis de los datos recolectados es fundamental para verificar la validez y consistencia de las mediciones realizadas en campo. En primer lugar, se verificó la consistencia en la reproducción de los ciclos de conducción por parte del conductor, tanto en banco de rodillos (Figura A. 4), como en la ruta. Este paso es crucial para garantizar la representatividad de los factores de emisión a nivel nacional, para cada categoría vehicular.

Esta verificación permitió confirmar la correcta reproducción del ciclo en general y, en particular, de los eventos de aceleración, responsables de la mayor cantidad de emisiones contaminantes. En la Figura A. 5 se muestran los errores en la reproducción de estos dos ciclos en banco de rodillos, donde se observa que la mayor parte de los datos se concentran en valores inferiores a 2.5 km/h.



**Figura A. 4.** Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos



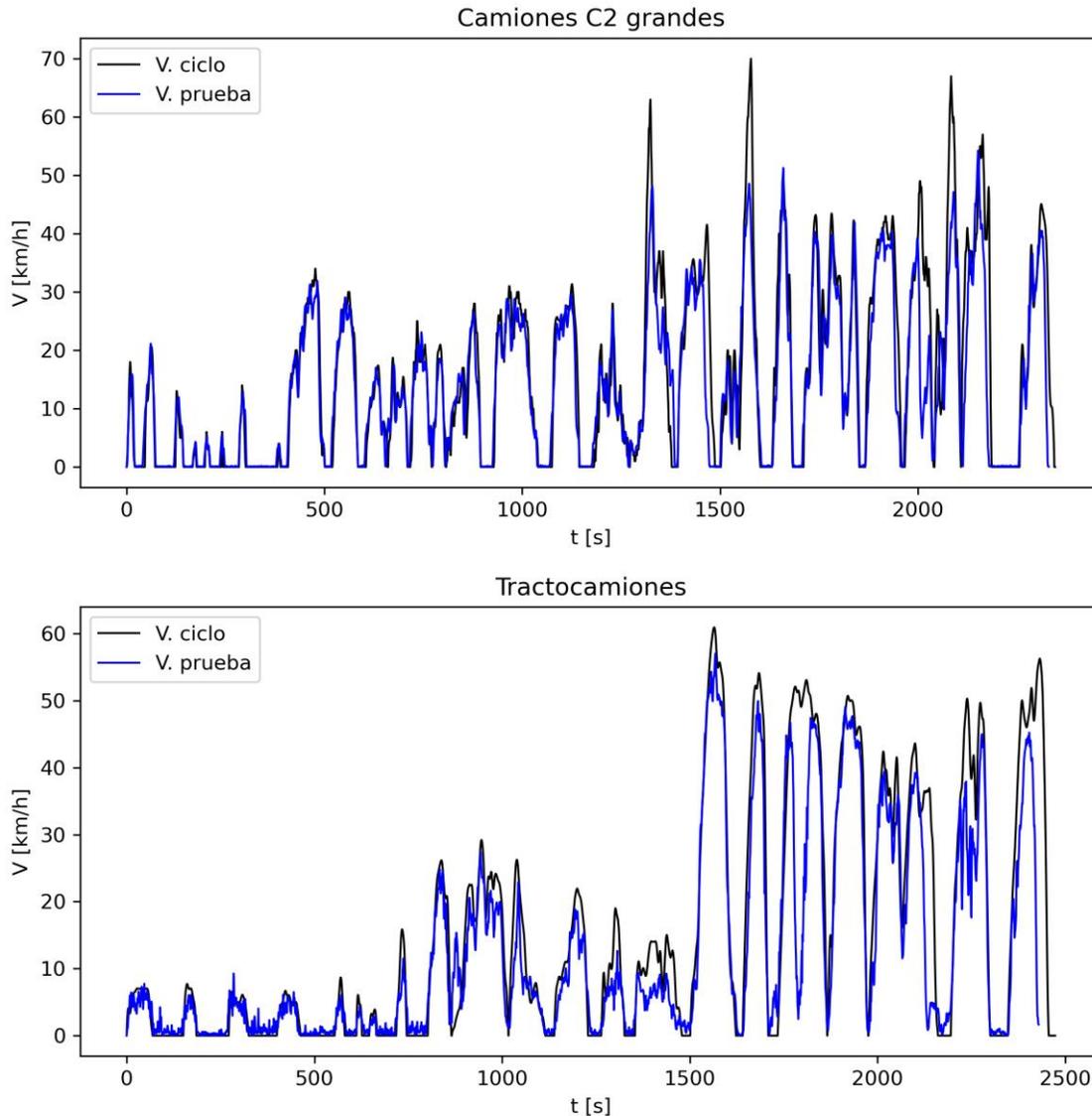
**Figura A. 5.** Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos

En la **Tabla A. 5** se muestran los coeficientes de correlación para la reproducción del ciclo de conducción de camiones de dos ejes C2 livianos –C2P- (izq.) y de buses –AB- (der.).

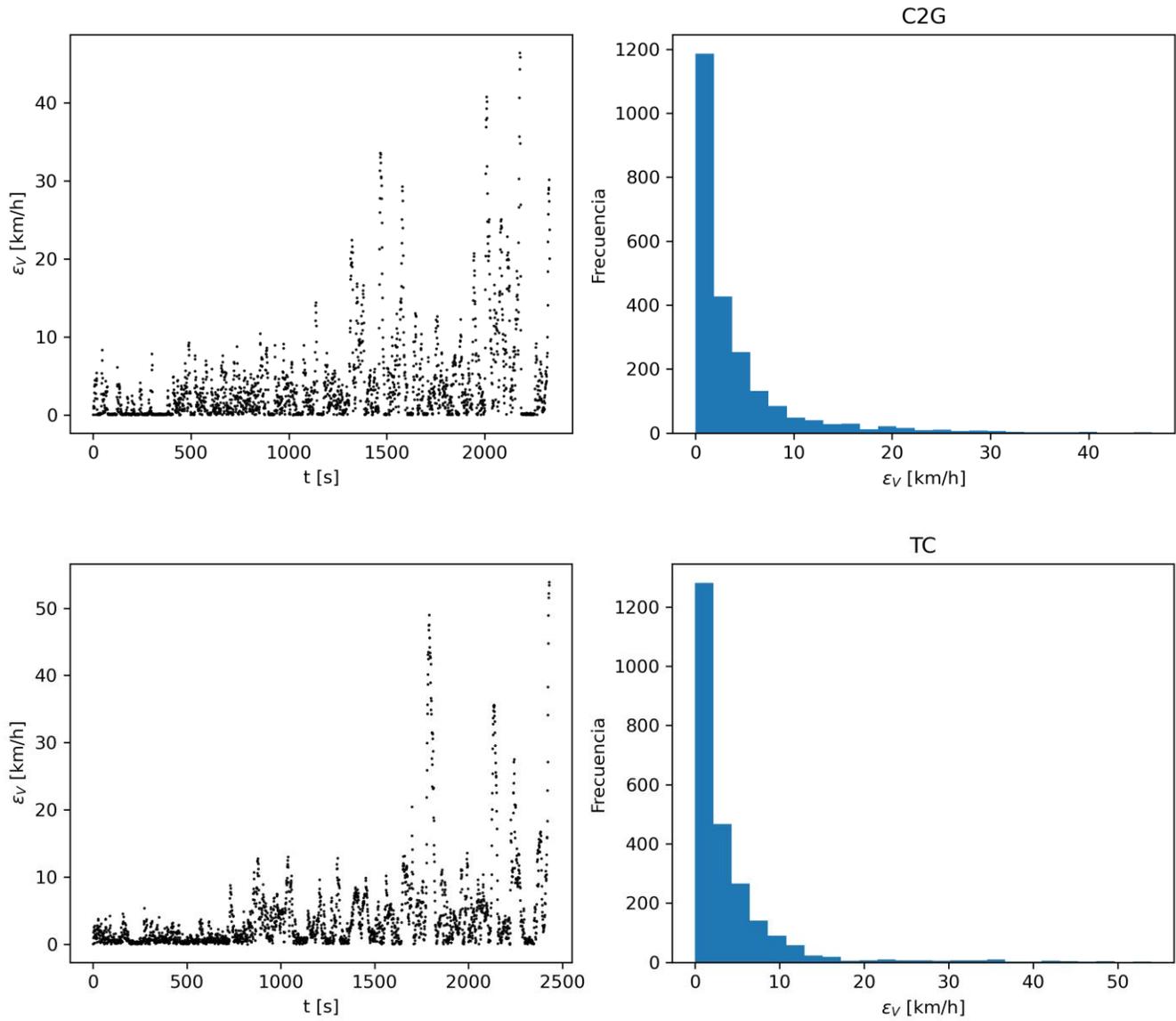
**Tabla A. 5.** Coeficientes de correlación reproducción de ciclos de conducción C2 livianos/buses

Vehículo	Prueba	Coef. de corr.	Vehículo	Prueba	Coef. de corr.
<b>C2P1</b>	388	0.9938	<b>AB1</b>	393	0.9935
	389	0.9959		394	0.9909
	391	0.9951		396	0.9932
	392	0.9946		397	0.9941
<b>C2P2</b>	438	0.9955	<b>AB2</b>	443	0.9936
	439	0.9905		444	0.9947
	440	0.9817		445	0.9938
	442	0.9955		446	0.9943
<b>C2P3</b>	400	0.9909	<b>AB3</b>	403	0.9920
	401	0.9948		404	0.9918
	402	0.9951		405	0.9823
<b>C2P4</b>	407	0.9951	<b>AB4</b>	406	0.9903
	408	0.9956		411	0.9891
	409	0.9965		412	0.9920
	410	0.9957		414	0.9912

Resultados similares se encontraron en la reproducción de los ciclos de conducción en carretera para camiones de dos ejes C2 grandes y tractocamiones, tal como se muestra en la **Figura A. 6**. La **Figura A. 7** muestra gráficamente el error en la velocidad (km/h) entre el ciclo de conducción teórico, programado en el computador de abordaje, y el ciclo de conducción real ejecutado por el conductor. En la **Tabla A. 6** se muestran los coeficientes de correlación para ambos tipos de vehículos.



**Figura A. 6.** Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción en carretera. Sup.: camiones C2 grandes, Inf.: tractocamiones C3S2



**Figura A. 7.** Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión C2 grande; inf.: tractocamión) para mediciones en carretera

**Tabla A. 6.** Coeficientes de correlación que cuantifican las diferencias entre el ciclo de conducción teórico (programado) y el ciclo de conducción reproducido por el conductor (real) para pruebas en carretera. Izq.: vehículos de dos ejes C2 grandes, der.: tractocamiones C3S2

Vehículo	Prueba	Coef. de corr.	Vehículo	Prueba	Coef. de corr.
C2G1	417	0.8398	TC1	422	0.9148
	418	0.8564		423	0.9078
	420	0.8825		424	0.8602
C2G2	448	0.8375	TC2	431	0.8430
	449	0.8812		432	0.9022
	450	0.8741		433	0.9263
C2G3	455	0.8869	TC3	426	0.9172
	457	0.9006		427	0.9016
	458	0.8843		428	0.9112
C2G4	451	0.7685	TC4	434	0.9053
	452	0.8760		435	0.8772
	453	0.8746		436	0.9062
	454	0.8721			

Los resultados globales mostraron que los coeficientes de correlación de reproducción de los ciclos de conducción en carretera (< 13% para camiones C2 grandes, y del 10% para tractocamiones) fueron mayores que los obtenidos en banco de rodillos (error inferior al 1%), no obstante, los valores promedio son ampliamente aceptables para garantizar la validez de los factores de emisión medidos en este proyecto, tal como se resume en la **Tabla A. 7.**

**Tabla A. 7.** Coeficientes de correlación promedio para todas las categorías vehiculares medidas

Categoría vehículo	Coef. corr. medio	Desv. est.
2 ejes liviano (C2P)	0.9938	0.0038
buses (AB)	0.9918	0.0031
2 ejes grande (C2G)	0.8642	0.0339
Tractocamiones C3S2 (TC)	0.8977	0.0248

El siguiente paso consistió en verificar los principales resultados consolidados después de cada prueba: flujos máxicos, consumo de combustible y factores de emisión, buscando identificar valores atípicos. De esta forma se puede declarar una prueba como válida.

Se realizaron mínimo cuatro repeticiones (pruebas válidas) por cada vehículo, para garantizar la repetibilidad y representatividad de las emisiones. Si se observaban variabilidades significativas en los valores promedio de consumo de combustible entre pruebas, se realizaban

pruebas adicionales para tener datos confiables. De este modo se determinó, para cada factor de emisión medido, su valor medio representativo, así como la variación esperada, dada por la desviación estándar de las mediciones realizadas.

Los equipos de medida registraban datos con una frecuencia de 10 datos por segundo, y también entregaban el valor total de emisión de cada prueba. El paso final consistió en verificar la consistencia interna de los datos, analizando los datos instantáneos, y contrastándolos con los valores consolidados de cada prueba. De esta forma se comprobó el correcto funcionamiento de los equipos de medida empleados a lo largo de cada prueba.

### 1.3. Anexo 3. Equipos de medición y fichas técnicas

Para la determinación de las emisiones contaminantes gaseosas (monóxido de carbono - CO , dióxido de carbono - CO<sub>2</sub> -, hidrocarburos totales - THC - y óxidos de nitrógeno - NOx -) se usó un equipo de análisis de gases portable (PEMS) de marca Horiba, de la serie OBS-ONE-GS (Figura A. 8 izquierda y Tabla A. 8). Cada vez que el equipo de gases PEMS de Horiba se enciende, es necesario realizar un procedimiento de calibración con gases patrón. (Figura A. 8 derecha).



Figura A. 8. PEMS para gases HORIBA OBS-ONE-GS12 (izq.) y gases de calibración (der.)

Tabla A. 8. Especificaciones técnicas del equipo portable de medición de gases de escape. (Tomado de <https://www.horiba.com/sqp/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/>)

Technical Data	
Dimensions [H x W x D mm] (excluding protruding objects)	330 x 350 x 470
Approx. Weight [kg]	33
Power Requirement [VDC input]	20 – 28
Approx. Power Consumption [kW] (stable state)	0.45
Environment for use	
Temperature [°C]	-10 to 40
Humidity [% as relative humidity]	Up to 80
Altitude [m above sea level]	Up to 2000
Analyzer Ranges	
CO [vol%]	0-0.5-0-10
CO <sub>2</sub> [vol%]	0-5-0-20
NO/Nox [ppm]	0-100-0-3000
Exhaust Flow Range [m <sup>3</sup> /min]	0-2.0 to 0-65
*Customer to select applicable tailpipe attachment	
Range of Other Sensors	
Exhaust pressure sensor [kPa]	0 to 115
Exhaust temperature sensor [°C]	0 to 800
Atmospheric pressure [kPa]	0 to 115
Ambient temperature sensor [°C]	-40 to 60
Ambient humidity [% as R.H.]	0 to 100
Sample line temperature [°C]	95
Sample gas flow rate [L/min]	Approx. 2.5
Sample inlet pressure [kPa]	-5 to +5 (gauge)
Data rate [s]	
Display rate	0.5
Logging rate	0.1

La masa del material particulado, PM, y el número de partículas, PN, se midieron usando los módulos OBS-ONE PM y OBS-ONE PN respectivamente, ambos de marca HORIBA. Al encender estos módulos y antes de ejecutar cada prueba, se realiza un proceso de purga de sus conductos para asegurar que los residuos acumulados en pruebas pasadas no afecten los resultados de las siguientes.

La muestra tomada por el módulo de PM es pasada por un filtro, el cual se pesa antes y después de la prueba a ejecutar, determinando de esta manera el peso del material particulado que se acumuló. El módulo OBS-ONE tiene un medidor de flujo de gases de escape y permite conocer el volumen total emitido durante la prueba. Debido a que la muestra de material particulado recolectada en el filtro está diluida parcialmente, se realiza el cálculo total del PM en un software facilitado por Horiba, usando las variables de volumen y de peso del material particulado recolectado en el filtro. Las características de este módulo se describen en la **Tabla A. 9**.

**Tabla A. 9.** Especificaciones técnicas del módulo OBS-ONE PM de Horiba. (Tomado de [https://www.horiba.com/en\\_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pm-unit-19/](https://www.horiba.com/en_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pm-unit-19/))

Measuring Principles	Batch sampling : Filter gravimetric method Real-time PM measurement : Diffusion charging method
Measuring Ranges (Real-time PM sensor)	0 to 2500 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$ (Concentration after dilution)
Dilution Method	Partial flow dilution method (Proportional sampling mode / Fixed dilution ratio mode)
Signal for Gas Sampling	Exhaust gas flow rate : Isolated analog signal (0-10 V)
Flow Rate of Diluted Gas	10 to 15 L/min (Under the conditions of 20 deg.C and 101.3 kPa)
Filter Holder	Diameter 47 mm, Effective diameter 26.2 mm (Without backup filter)
Particle Pre-classifier (Cyclone)	99% penetration of particle size of less than 1 $\mu\text{m}$ 50% cut off point : particle size between 2.5 and 10 $\mu\text{m}$
Power Requirements	DC 24 V
Power Consumption	Max. 0.6 kVA
Dimensions	350(W) x 470(D) x 460(H) mm (Excluding controller and protruding objects)
Mass	Approx. 45 kg (Excluding controller)
Operating Conditions	Temperature : 0 to 40 deg.C (During operation) Relative humidity : less than 80%      Altitude : 0 to 2000 m above sea level

La muestra tomada por el módulo de PN es diluida en dos etapas y luego se combina con un fluido que ayuda a separar las partículas para que puedan ser contadas una a una al pasar por un láser e interrumpir su haz de luz. Las especificaciones de este dispositivo se encuentran en la **Tabla A. 10**.

**Tabla A. 10.** Especificaciones técnicas del módulo OBS-ONE PN de Horiba. (Tomado de [https://www.horiba.com/en\\_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pn-unit-12/](https://www.horiba.com/en_en/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-pn-unit-12/))

Measuring Principles	Condensation particle counter (CPC)
Particle Diameter	23 ~ 1,000 nm
Measuring Range	0 ~ $5 \times 10^7$ particles/ $\text{cm}^3$
Power Supply	DC 24 V
Power Consumption (MAX.)	Approx. 0.25 kW
Mass	Approx. 18 kg
Operating Condition	Temperature: -10 ~ 40 °C , Altitude: 0 to 2,000 m above sea level, Relative humidity: less than 80% (No condensation)
Condensation fluid	Isopropyl alcohol a special grade reagent (99.5%) corresponded
Option	Outer cover for mounting outside the vehicle using a hitch carrier

Adicionalmente, para la medición de material particulado (PN y PM), se utilizó un equipo de respaldo portable PEMS de marca Dekati cuya referencia es HR-ELPI +VI, compuesto por una

torre de 14 impactadores (etapas) que separan las partículas por tamaño en función de la carga eléctrica que adquieren, con un rango de medición que va desde los 6 nanómetros hasta 10 micrómetros (PM10). El equipo posee una etapa exclusiva para medir PM2.5. La **Tabla A. 11** describe las especificaciones generales del equipo.

**Tabla A. 11.** Especificaciones del HR-ELPI + VI de Dekati  
**ELPI®+ Specifications**

Particle size range	0.006 - 10 µm
Number of size classes	14
	100/500 with High Resolution ELPI®+
Sample flow rate	10 lpm
ELPI®+ dimensions	H407 x W454 x D242 mm
Collection plate diameter	25 mm
Unit weight	15 kg without impactor 22 kg with impactor in its place
Pump requirements *	20 m³/h @ 40 mbars
Sample temperature	10-35 °C 10-180 °C with the High Temperature ELPI®+
Sample humidity	0-90 % RH Non-condensing
Sampling rate	10 Hz
Power	100-250 V, 50-60 Hz, 200 W
Computer requirements	MS-Windows 7™, MS-Windows 8™
Connection to PC	RS-232 or Ethernet
6 analogue inputs	0-5 V
3 analogue outputs	0-10 V

El equipo toma la muestra que se diluye dos veces, en una relación 8:1 en cada dilución, para que en su totalidad se diluya en una relación 64:1. Luego la muestra recorre las 14 etapas, llamados impactadores, siendo el primer impactador el que recoge las partículas más grandes (de 10 micrómetros), y el último impactador el que recoge las partículas más pequeñas (6 nanómetros). La **Tabla A. 12** describe los tamaños de partícula de los impactadores. En la **Figura A. 9** se muestran los módulos de PN y PM de Horiba y el ELPI de Dekati con sus dilutores.

**Tabla A. 12.** Dimensiones de los impactadores del HR-ELPI +VI de Dekati

Stage	D50% [µm]	Di [µm]	Number min [1/cm³]	Number max [1/cm³]	Mass min [µg/m³]	Mass max [mg/m³]
15	10					
14	5,3	7,3	0,1	1,7E+04	11	3400
13	3,6	4,4	0,1	3,0E+04	4	1300
12	2,5	3,0	0,16	5,2E+04	2,3	730
11	1,6	2,0	0,3	9,7E+04	1,3	400
10	0,94	1,2	0,6	2,0E+05	0,6	195
9	0,60	0,75	1,2	3,9E+05	0,3	85
8	0,38	0,48	2	6,8E+05	0,12	38
7	0,25	0,31	4	1,2E+06	0,06	17
6	0,15	0,19	6	2,0E+06	0,03	7,7
5	0,094	0,12	12	3,7E+06	0,01	3,2
4	0,054	0,071	21	7,0E+06	0,004	1,3
3	0,030	0,040	42	1,4E+07	0,0015	0,47
2	0,016	0,022	90	3,0E+07	0,0005	0,16
1	0,006	0,010	240	7,9E+07	0,0002	0,03



**Figura A. 9.** Módulo de PM y PN de Horiba (izquierda) y ELPI de Dekati con dilutores (derecha)

Para la medición del consumo de combustible se instrumentó un sensor de flujo de marca Ono Sokki, cuya referencia es FP-2140H y la señal generada por este sensor es interpretada y mostrada en tiempo real por el dispositivo DF-2200 de la misma marca. El sensor de flujo tiene una resolución de 0.1 mL y sus características se describen en la **Figura A. 10**.

Para registrar la velocidad del vehículo durante la prueba, se tuvo disponible un GPS en el módulo OBS-ONE GS y un GPS de la marca Ono Sokki cuya referencia es LC-8310. Este último puede entregar datos de la distancia recorrida y de la aceleración del vehículo durante una prueba.

**FP-2140H Standard flow rate type**

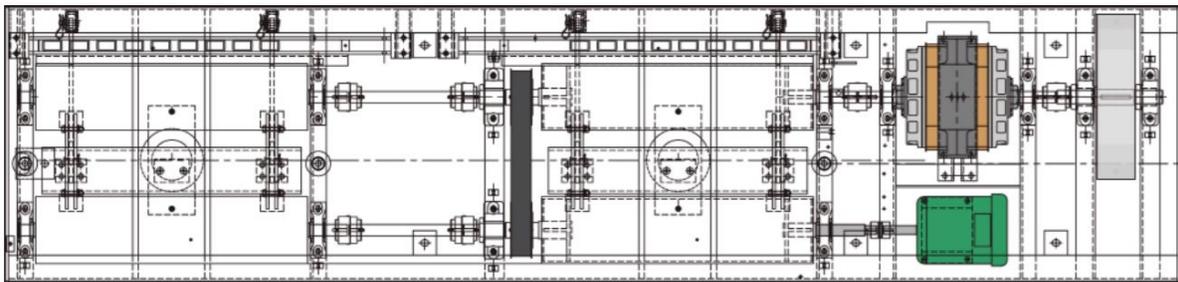


- **Applicable fluids: gasoline, light oil, kerosene or standard petroleum oils**
- \* Option: Alcohol fuels (methanol, ethanol, gasohol etc.)
- **Measurement range: 0.3 to 120 L/h**
- **High accuracy within  $\pm 0.2\%$  of reading, high pressure resistant design**
- **Wide range ability: 1:400**
- **Capable of compensating for errors caused by pulsating or backflow by means of a function for judging the direction of rotation**
- **Small and light weight, ideal for on-board measurement**

**Figura A. 10.** Características del sensor de flujo de combustible.

**Tabla A. 13.** Especificaciones técnicas del Banco de Rodillos usado en las pruebas, propiedad de Ecopetrol

<b>Chasis dinamométrico</b>	
<b>Referencia</b>	Mustang MD 100
<b>Máxima potencia</b>	300 HP
<b>Dispositivo para carga</b>	Tipo corriente de Eddy MDK-70 con sensor de temperatura dual
<b>Celda de carga</b>	500 Lb
<b>Velocidad</b>	Máximo 160 km/h
<b>Tiempo de respuesta</b>	25 ms
<b>Inercia</b>	2000 Lb.
<b>Peso de embrague</b>	3250 Lb
<b>Conexión eléctrica</b>	230 VAC 3 fases, 50/60 Hz, hasta 25 Amp.



**Figura R 1.** Esquema del banco de rodillos de ECOPETROL-ICP Mustang MD 100

## 1.4. Anexo 4. Datos brutos usados para determinar los factores de emisión

### 1.4.1. Tractocamiones tipo C3S2

<b>TC1 - Euro II 2012 - Mack 13000 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	3.387	3.632	3.852	<b>3.623</b>	<b>0.233</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	1509.289	1551.482	1604.460	<b>1555.077</b>	<b>47.688</b>
<b>NO [g/km]</b>	15.096	15.126	16.100	<b>15.441</b>	<b>0.571</b>
<b>NOX [g/km]</b>	24.000	24.488	25.911	<b>24.799</b>	<b>0.993</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	8.903	9.362	9.811	<b>9.359</b>	<b>0.454</b>
<b>THC [mg/km]</b>	757.765	746.429	822.308	<b>775.500</b>	<b>40.931</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.743	0.732	0.806	<b>0.760</b>	<b>0.040</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	24.757	25.234	26.733	<b>25.575</b>	<b>1.031</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	15.176	14.881	16.410	<b>15.489</b>	<b>0.811</b>
<b>PN [# /km]</b>		6.772E+13	2.995E+13	<b>4.88331E+13</b>	<b>2.6708E+13</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	178.588	154.167	154.872	<b>162.542</b>	<b>13.901</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	5.649	5.601	5.306	<b>5.519</b>	<b>0.186</b>

<b>TC2 - EPA 98 2013 - International 14945 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	13.903	19.056	18.256	<b>17.072</b>	<b>2.773</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	1725.558	1763.851	1690.157	<b>1726.522</b>	<b>36.856</b>
<b>NO [g/km]</b>	15.734	14.824	14.620	<b>15.059</b>	<b>0.593</b>
<b>NOX [g/km]</b>	26.235	24.572	24.241	<b>25.016</b>	<b>1.069</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	10.501	9.748	9.622	<b>9.957</b>	<b>0.475</b>
<b>THC [g/km]</b>	813.537	901.205	761.190	<b>825.311</b>	<b>70.746</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.797	0.883	0.746	<b>0.809</b>	<b>0.069</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	27.049	25.473	25.003	<b>25.842</b>	<b>1.072</b>
<b>CH4 [g/km]</b>	16.220	17.952	15.238	<b>16.470</b>	<b>1.374</b>
<b>PN [# /km]</b>	1.72877E+11	2.3823E+11	7.1451E+11	<b>3.75206E+11</b>	<b>2.9566E+11</b>
<b>PM [g/Km]</b>	1395.122	1501.205	1279.762	<b>1392.030</b>	<b>110.754</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	5.044	5.002	5.284	<b>5.110</b>	<b>0.152</b>

<b>TC3 - Euro V 2020 - Mack 12777 cc</b>					
	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	12.638	14.175	13.134	<b>13.316</b>	<b>0.784</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	1783.318	1731.991	1728.824	<b>1748.044</b>	<b>30.589</b>
<b>NO [g/km]</b>	6.480	6.276	6.203	<b>6.320</b>	<b>0.143</b>
<b>NOX [gkm]</b>	10.659	10.328	10.333	<b>10.440</b>	<b>0.190</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	4.179	4.051	4.130	<b>4.120</b>	<b>0.064</b>
<b>THC [mg/km]</b>	210.357	229.176	195.814	<b>211.783</b>	<b>16.727</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.206	0.225	0.192	<b>0.208</b>	<b>0.016</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	10.869	10.557	10.529	<b>10.652</b>	<b>0.189</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	4.286	4.588	3.837	<b>4.237</b>	<b>0.378</b>
<b>PN [# /km]</b>	2.43627E+13	2.2517E+13	2.17455E+13	<b>2.28751E+13</b>	<b>1.3448E+12</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	204.759	151.059	142.093	<b>165.970</b>	<b>33.890</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	5.449	5.407	5.434	<b>5.430</b>	<b>0.021</b>

<b>TC4 - Euro V 2020 - Mack 12777 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	11.694	11.901	11.491	<b>11.695</b>	<b>0.205</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	1745.289	1756.074	1739.658	<b>1747.007</b>	<b>8.342</b>
<b>NO [g/km]</b>	6.331	6.713	6.646	<b>6.563</b>	<b>0.204</b>
<b>NOX [gkm]</b>	10.593	11.341	10.976	<b>10.970</b>	<b>0.374</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	4.263	4.628	4.330	<b>4.407</b>	<b>0.195</b>
<b>THC [g/km]</b>	154.070	142.439	140.238	<b>145.582</b>	<b>7.432</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.151	0.140	0.137	<b>0.143</b>	<b>0.007</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	10.748	11.484	11.116	<b>11.116</b>	<b>0.368</b>
<b>CH4 [g/km]</b>	3.023	2.805	2.857	<b>2.895</b>	<b>0.114</b>
<b>PN Dekaty [# /km]</b>	8.697E+13	8.773E+13	8.889E+13	<b>8.786E+13</b>	<b>9.6774E+11</b>
<b>PM Horiba [g/Km]</b>	160.233	113.207	107.429	<b>126.956</b>	<b>28.963</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	5.353	5.411	5.516	<b>5.427</b>	<b>0.082</b>

### 1.4.2. Camiones de dos ejes grandes (C2G)

<b>C2G1 - Euro II 2012 - Chevrolet FTR 7790 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
CO [g/km]	2.006	2.334	3.198	<b>2.512</b>	<b>0.615</b>
CO2 [g/km]	876.679	881.186	863.058	<b>873.641</b>	<b>9.438</b>
NO [g/km]	4.629	4.707	4.957	<b>4.764</b>	<b>0.171</b>
NOX [g/km]	8.133	8.302	8.528	<b>8.321</b>	<b>0.198</b>
NO2 [g/km]	3.505	3.595	3.572	<b>3.557</b>	<b>0.047</b>
THC [mg/km]	938.302	893.396	851.495	<b>894.398</b>	<b>43.412</b>
NMHC [g/km]	0.920	0.876	0.834	<b>0.877</b>	<b>0.043</b>
THC+Nox [g/km]	9.072	9.195	9.380	<b>9.216</b>	<b>0.155</b>
CH4 [mg/km]	18.774	17.830	17.009	<b>17.871</b>	<b>0.883</b>
PN [# /km]	4.594E+13		6.421E+12	<b>2.618E+13</b>	<b>2.795E+13</b>
PM [mg/Km]	186.981	165.189	154.486	<b>168.885</b>	<b>16.560</b>
Rendimiento [km/galón]	10.011	12.124	10.833	<b>10.989</b>	<b>1.065</b>

<b>C2G2 - Euro II 2015 - Ford Cargo 1721 - 8270 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
CO [g/km]	6.461	7.159	9.380	<b>7.667</b>	<b>1.524</b>
CO2 [g/km]	892.143	853.256	868.808	<b>871.403</b>	<b>19.573</b>
NO [g/km]	4.692	4.815	4.909	<b>4.806</b>	<b>0.109</b>
NOX [g/km]	8.769	8.836	8.904	<b>8.836</b>	<b>0.068</b>
NO2 [g/km]	4.077	4.021	3.995	<b>4.031</b>	<b>0.042</b>
THC [mg/km]	1991.222	1861.444	1879.556	<b>1910.741</b>	<b>70.285</b>
NMHC [g/km]	1.951	1.824	1.847	<b>1.874</b>	<b>0.068</b>
THC+Nox [g/km]	10.760	10.698	10.788	<b>10.749</b>	<b>0.046</b>
CH4 [mg/km]	39.778	37.222	32.667	<b>36.556</b>	<b>3.602</b>
PN [# /km]	2.5175E+14	2.4693E+14	2.9189E+14	<b>2.6352E+14</b>	<b>2.4684E+13</b>
PM [mg/Km]	1228.889	1488.889	1763.333	<b>1493.704</b>	<b>267.255</b>
Rendimiento [km/galón]	10.882	11.300	11.174	<b>11.119</b>	<b>0.215</b>

<b>C2G3 - Euro IV 2021 - Chevrolet FVR - 7790 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	2.588	2.576	2.611	<b>2.592</b>	<b>0.018</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	1049.961	962.142	983.032	<b>998.378</b>	<b>45.877</b>
<b>NO [g/km]</b>	3.838	3.489	3.507	<b>3.611</b>	<b>0.197</b>
<b>NOX [g/km]</b>	7.042	6.495	6.531	<b>6.689</b>	<b>0.306</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	3.204	3.006	3.024	<b>3.078</b>	<b>0.109</b>
<b>THC [mg/km]</b>	566.703	526.264	587.363	<b>560.110</b>	<b>31.079</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.555	0.516	0.576	<b>0.549</b>	<b>0.030</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	7.609	7.022	7.118	<b>7.249</b>	<b>0.315</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	11.319	10.549	11.758	<b>11.209</b>	<b>0.612</b>
<b>PN Dekaty [# /km]</b>	5.537E+13	4.8114E+13	5.128E+13	<b>5.1588E+13</b>	<b>3.6379E+12</b>
<b>PM Horiba [mg/Km]</b>	74.890	58.857	68.538	<b>67.429</b>	<b>8.074</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	10.910	11.658	11.709	<b>11.426</b>	<b>0.447</b>

<b>C2G4 - Euro IV 2022 - HINO GH8JM8A - 7684 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	13.203	14.946	11.706	13.623	<b>13.370</b>	<b>1.335</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	785.333	723.986	790.869	795.430	<b>773.905</b>	<b>33.534</b>
<b>NO [g/km]</b>	5.003	4.920	5.293	4.963	<b>5.045</b>	<b>0.169</b>
<b>NOX [g/km]</b>	8.410	8.237	8.856	8.366	<b>8.467</b>	<b>0.270</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	3.406	3.317	3.563	3.403	<b>3.422</b>	<b>0.103</b>
<b>THC [mg/km]</b>	164.667	122.527	95.055	107.033	<b>122.321</b>	<b>30.388</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.161	0.120	0.093	0.105	<b>0.120</b>	<b>0.030</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	8.574	8.360	8.951	8.473	<b>8.590</b>	<b>0.257</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	3.333	2.418	1.868	2.198	<b>2.454</b>	<b>0.628</b>
<b>PN [# /km]</b>	6.7134E+13	7.5092E+13	6.576E+13	6.8615E+13	<b>6.915E+13</b>	<b>4.12906E+12</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	151.778	135.495	119.780	113.736	<b>130.197192</b>	<b>17.061</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	11.089	11.686	11.136	11.070	<b>11.245</b>	<b>0.295</b>

### 1.4.3. Vehículos de dos ejes C2 pequeños (C2P)

<b>C2P1 - Euro II 2006 - Chevrolet NKR 2771 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
CO [g/km]	4.242	4.706	4.531	5.273	<b>4.688</b>	<b>0.435</b>
CO2 [g/km]	396.929	411.376	403.427	428.056	<b>409.947</b>	<b>13.440</b>
NO [g/km]	3.030	3.231	3.133	3.392	<b>3.196</b>	<b>0.154</b>
NOX [g/km]	5.421	5.841	5.674	6.073	<b>5.752</b>	<b>0.275</b>
NO2 [g/km]	2.391	2.610	2.540	2.682	<b>2.556</b>	<b>0.124</b>
THC [mg/km]	1590.281	1465.247	1337.123	1514.653	<b>1476.826</b>	<b>106.386</b>
NMHC [mg/km]	1558.494	1435.936	1310.434	1484.374	<b>1447.309</b>	<b>104.243</b>
THC+Nox [g/km]	7.011	7.307	7.011	7.588	<b>7.229</b>	<b>0.277</b>
CH4 [mg/km]	31.787	29.311	26.690	30.279	<b>29.517</b>	<b>2.143</b>
PN [# /km]	4.616E+13	5.006E+13	4.820E+13	5.362E+13	<b>4.95109E+13</b>	<b>3.167E+12</b>
PM [mg/Km]	325.365	341.659		351.075	<b>339.367</b>	<b>13.007</b>
Rendimiento [km/galón]	25.129	24.170	24.357		<b>24.552</b>	<b>0.508</b>

<b>C2P2 - Euro II 2011 - JAC 2771 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
CO [g/km]	2.513	2.578	2.535	2.577	<b>2.551</b>	<b>0.032</b>
CO2 [g/km]	303.343	314.456	319.989	339.754	<b>319.385</b>	<b>15.242</b>
NO [g/km]	1.720	1.699	1.712	1.672	<b>1.701</b>	<b>0.021</b>
NOX [g/km]	3.299	3.340	3.380	3.557	<b>3.394</b>	<b>0.114</b>
NO2 [g/km]	1.578	1.641	1.668	1.885	<b>1.693</b>	<b>0.134</b>
THC [mg/km]	2081.694	1933.171	1797.086	2340.447	<b>2038.099</b>	<b>232.675</b>
NMHC [g/km]	2.040	1.895	1.761	2.294	<b>1.997</b>	<b>0.228</b>
THC+Nox [g/km]	5.380	5.273	5.177	5.898	<b>5.432</b>	<b>0.322</b>
CH4 [mg/km]	41.638	38.621	35.954	46.785	<b>40.749</b>	<b>4.646</b>
PN [# /km]		7.183E+13	7.270E+13	7.014E+13	<b>7.15554E+13</b>	<b>1.298E+12</b>
PM [mg/Km]	247.531	219.593		268.141	<b>245.088</b>	<b>24.366</b>
Rendimiento [km/galón]		29.948	29.873	28.808	<b>29.543</b>	<b>0.638</b>

<b>C2P3 - Euro IV 2016 - Chevrolet NKR 2999 cc</b>					
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	2.052	1.933	1.961	<b>1.982</b>	<b>0.062</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	467.185	470.748	476.802	<b>471.578</b>	<b>4.862</b>
<b>NO [g/km]</b>	1.270	1.264	1.265	<b>1.266</b>	<b>0.003</b>
<b>NOX [g/km]</b>	2.602	2.587	2.576	<b>2.588</b>	<b>0.013</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	1.332	1.323	1.346	<b>1.333</b>	<b>0.012</b>
<b>THC [mg/km]</b>	535.253	548.753	551.244	<b>545.083</b>	<b>8.604</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.530	0.538	0.540	<b>0.536</b>	<b>0.006</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	3.142	3.136	3.162	<b>3.147</b>	<b>0.013</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	13.274	11.040	10.999	<b>11.771</b>	<b>1.302</b>
<b>PN [# /km]</b>	2.550E+12	2.806E+12		<b>2.678E+12</b>	<b>1.8084E+11</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	40.715	43.126	40.211	<b>41.351</b>	<b>1.558</b>

<b>C2P4 - Euro IV 2018 - Chevrolet NPR 5193 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	10.941	11.091	10.958	11.617	<b>11.152</b>	<b>0.317</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	563.182	580.325	569.918	572.128	<b>571.388</b>	<b>7.069</b>
<b>NO [g/km]</b>	1.985	2.064	2.065	2.026	<b>2.035</b>	<b>0.038</b>
<b>NOX [g/km]</b>	4.512	4.677	4.716	4.646	<b>4.638</b>	<b>0.089</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	2.527	2.612	2.652	2.620	<b>2.603</b>	<b>0.053</b>
<b>THC [mg/km]</b>	1671.161	1447.432	1403.051		<b>1507.215</b>	<b>143.705</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	1.638	1.418	1.375	1.478	<b>1.477</b>	<b>0.115</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	6.183	6.124	6.119	6.125	<b>6.138</b>	<b>0.030</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	33.479	28.955	28.071	29.599	<b>30.026</b>	<b>2.386</b>
<b>PN [# /km]</b>	5.905E+13	3.693E+13	3.556E+13		<b>4.38479E+13</b>	<b>1.318E+13</b>
<b>PM [mg/Km]</b>		133.45	111.58	123.79	<b>122.943</b>	<b>15.464</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	16.1735086	17.161154	17.0171275	16.9601491	<b>16.784</b>	<b>0.534</b>

#### 1.4.4. Buses (AB)

Son los mismos camiones C2P, pero los resultados corresponden al ciclo de conducción de buses llevado a cabo en banco de rodillos.

<b>AB1 - Euro II 2006 - Chevrolet 2771 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	5.397	5.284	4.774	4.734	<b>5.047</b>	<b>0.342</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	446.756	423.229	410.784	403.087	<b>420.964</b>	<b>19.092</b>
<b>NO [g/km]</b>	3.424	3.225	2.884	2.832	<b>3.091</b>	<b>0.282</b>
<b>NOX [g/km]</b>	6.401	6.055	5.515	5.514	<b>5.871</b>	<b>0.435</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	2.977	2.830	2.631	2.682	<b>2.780</b>	<b>0.156</b>
<b>THC [mg/km]</b>	1795.789	1655.531	1772.225	1723.425	<b>1736.743</b>	<b>61.963</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	1.760	1.622	1.737	1.689	<b>1.702</b>	<b>0.061</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	8.197	7.711	7.288	7.238	<b>7.608</b>	<b>0.446</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	36.006	33.050	35.417	34.422	<b>34.724</b>	<b>1.293</b>
<b>PN [# /km]</b>	5.074E+13	5.431E+13	6.290E+13	4.166E+13	<b>5.240E+13</b>	<b>8.795E+12</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	301.139	312.401	299.473	299.964	<b>303.244</b>	<b>6.144</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	21.844	23.092	23.609	24.056	<b>23.150</b>	<b>0.956</b>

<b>AB2 - Euro II 2011 - JAC 2771 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	2.537	2.679	2.445	2.721	<b>2.595</b>	<b>0.128</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	331.873	337.713	349.509	348.939	<b>342.009</b>	<b>8.669</b>
<b>NO [g/km]</b>	1.556	1.587	1.641	1.637	<b>1.605</b>	<b>0.041</b>
<b>NOX [g/km]</b>	3.565	3.634	3.682	3.724	<b>3.651</b>	<b>0.068</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	2.009	2.047	2.041	2.087	<b>2.046</b>	<b>0.032</b>
<b>THC [mg/km]</b>	2696.333	2327.097	2879.077		<b>2634.169</b>	<b>281.192</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	2.642	2.281	2.821	2.340	<b>2.521</b>	<b>0.255</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	6.261	5.961	6.561	6.112	<b>6.311</b>	<b>0.229</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	54.021	46.539	57.657	47.808	<b>51.506</b>	<b>5.244</b>
<b>PN [# /km]</b>	7.232E+13	7.456E+13	7.168E+13	6.942E+13	<b>7.200E+13</b>	<b>2.116E+12</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	256.128	201.715		277.961	<b>245.268</b>	<b>39.266</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	28.898	28.100	27.593	27.297	<b>27.929</b>	<b>0.851</b>

<b>AB3 - Euro IV 2016 - Chevrolet 2999 cc</b>						
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	2.491	2.269	2.339	2.535	<b>2.408</b>	<b>0.125</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	474.526	484.204	465.773	478.137	<b>475.660</b>	<b>7.707</b>
<b>NO [g/km]</b>	1.292	1.276	1.115	1.169	<b>1.213</b>	<b>0.085</b>
<b>NOX [g/km]</b>	2.686	2.700	2.421	2.518	<b>2.581</b>	<b>0.135</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	1.394	1.423	1.306	1.349	<b>1.368</b>	<b>0.052</b>
<b>THC [mg/km]</b>	712.593	671.457	699.703		<b>694.584</b>	<b>21.041</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	0.698	0.658	0.686	0.687	<b>0.682</b>	<b>0.017</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	3.399	3.371	3.120	3.205	<b>3.274</b>	<b>0.133</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	14.288	13.484	14.002	13.762	<b>13.884</b>	<b>0.342</b>
<b>PN [# /km]</b>	3.251E+13	2.882E+13	2.999E+13	2.999E+13	<b>3.033E+13</b>	<b>1.556E+12</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	47.850	38.512	37.682	41.022	<b>41.26637</b>	<b>4.613</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	20.318	20.239	19.758	20.508	<b>20.206</b>	<b>0.319</b>

<b>AB4 - Euro IV 2018 - Chevrolet 5193 cc</b>					
<b>+</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 4</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>
<b>CO [g/km]</b>	14.701	14.774	15.709	<b>15.062</b>	<b>0.562</b>
<b>CO2 [g/km]</b>	629.992	603.996	609.814	<b>614.601</b>	<b>13.643</b>
<b>NO [g/km]</b>	2.100	1.974	2.037	<b>2.037</b>	<b>0.063</b>
<b>NOX [g/km]</b>	5.019	4.797	4.885	<b>4.900</b>	<b>0.111</b>
<b>NO2 [g/km]</b>	2.919	2.823	2.849	<b>2.864</b>	<b>0.049</b>
<b>THC [mg/km]</b>	1981.461	1923.970	1890.785	<b>1932.072</b>	<b>45.878</b>
<b>NMHC [g/km]</b>	1.942	1.885	1.853	<b>1.893</b>	<b>0.045</b>
<b>THC+Nox [g/km]</b>	7.000	6.721	6.776	<b>6.832</b>	<b>0.148</b>
<b>CH4 [mg/km]</b>	39.569	38.496	37.824	<b>38.630</b>	<b>0.880</b>
<b>PN [# /km]</b>	4.271E+13	3.836E+13	3.714E+13	<b>3.940E+13</b>	<b>2.925E+12</b>
<b>PM [mg/Km]</b>	151.045	124.356	139.867	<b>138.423</b>	<b>13.403</b>
<b>Rendimiento [km/galón]</b>	15.264	15.271	15.673	<b>15.403</b>	<b>0.234</b>

## Referencias Capítulo 4

- [1] 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». Colombia, 2020.