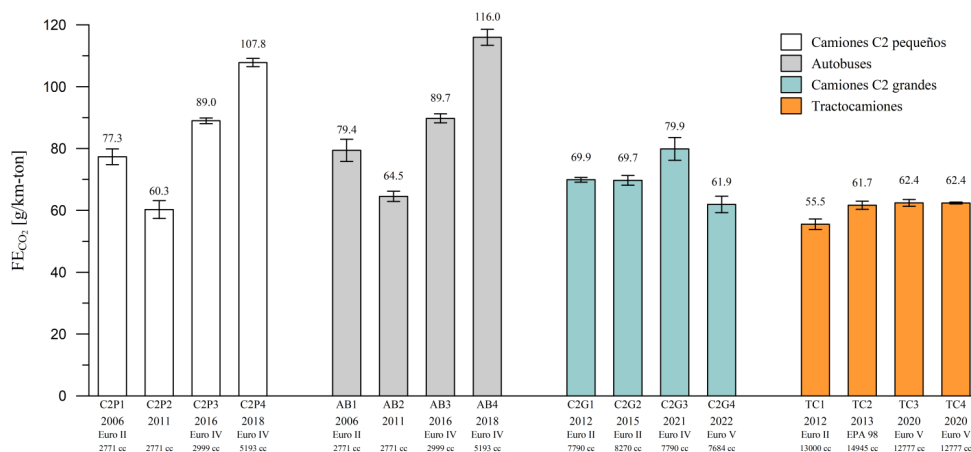


Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)

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



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería

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



upme

Unidad de Planeación Minero Energética

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)
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 el acceso un equipo de medición de gases y de partículas portátil de la empresa 3DATX de Estados Unidos.

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

¡Agradecimientos a todo el equipo de trabajo!


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

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe final contiene los resultados del convenio interadministrativo CV 003-2021 (FECOC+ Fase 2.1) entre la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y la Universidad de Antioquia cuyo objeto era “aunar esfuerzos técnicos, administrativos y económicos para ampliar y complementar los factores de emisión de combustibles colombianos FECOC+ por actividad, para caracterizar gases de efecto invernadero. FASE 2 (Camiones y tractocamiones - Bucaramanga)”. Se realizó una campaña experimental que tuvo como finalidad determinar los factores de emisión de gases (CO_2 , CH_4 , NO_2 , NO_x , THC y CO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM y PN) de una muestra de 12 vehículos pesados de transporte de carga y 4 de pasajeros en el área metropolitana de Bucaramanga (aprox. 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar), para la cual se contó con la colaboración de la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), quien suministró equipos de medición y personal calificado.

Se midieron los factores de emisión de cuatro camiones pequeños de dos ejes (menores a 5 toneladas de capacidad de carga), típicos de distribución de paquetería urbana o última milla; cuatro camiones grandes de dos ejes (capacidad de carga de entre 10 y 11 toneladas), y cuatro 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 el año de modelo, las marcas y tecnologías de control de emisiones más representativas del país, así como los ciclos de conducción utilizados para cada categoría vehicular.

Los factores de emisión de los buses se obtuvieron utilizando los mismos cuatro camiones pequeños (C2P) en banco de rodillos utilizando el ciclo de conducción desarrollado para buses en la primera fase del proyecto. Se programó la dinámica vehicular y capacidad de carga propia del bus en el programa del banco de rodillos, pero se usaron en la medición los cuatro camiones pequeños C2P debido a que en Colombia se ensamblan camiones o buses sobre el mismo tipo de chasis.

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

1. El país cuenta con los factores de emisión de gases (CO_2 , CH_4 , NO_2 , NO_x , THC, NMHC y CO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM y PN) medidos a bordo para la categoría de vehículos pesados más representativa a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga. Igualmente se cuenta con la base de datos de consumo instantáneo y promedio de combustible. Se espera que una vez medidos los FE en las altitudes de Bogotá y Barranquilla, se logre consolidar 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 estimular políticas de

renovación de flota en el sector de transporte de pasajeros y de carga. El uso del sistema de reducción catalítico (SCR) redujo aproximadamente el 50% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx). Se recomienda 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). Este sistema de tratamiento de gases de escape es de uso obligatorio en las tecnologías de control de emisiones Euro VI/6, próximas a ingresar por mandato en el país.

3. No se encontró una relación directa entre la tecnología de control de emisiones del vehículo (Euro II vs Euro IV/V) y el consumo de combustible, y por lo tanto en el factor de emisión de CO₂. En algunos casos (vehículos C2 pequeños y tractocamiones), el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ fueron mayores para vehículos más nuevos debido a las estrategias modernas de control de emisiones. Este resultado sugiere usar parámetros adicionales a la emisión de CO₂ (o al consumo de combustible) para programas de eco-etiquetado de vehículos pesados.
4. Si bien las emisiones de gas metano (CH₄) tienen un potencial de calentamiento climático entre 25 y 28 veces mayor que el CO₂, sus emisiones fueron significativamente pequeñas frente al CO₂ mismo (CH₄ máximo fue 0.051 g/km, frente a CO₂ máximo de 1748 g/km). Este resultado sugiere que no es necesario incluir este gas de efecto invernadero en futuras campañas experimentales si el combustible utilizado es diésel comercial.
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 el peso total del camión incluyendo la carga (en toneladas), lo que sugiere que, mientras no sea necesario, para transporte de carga y pasajeros no es conveniente la atomización de la flota en vehículos de tamaño pequeño.
6. En este proyecto se encontró que los modelos típicos usados para obtener factores de emisión teóricos, como el COPERT y el IVE, subestimaban en varios órdenes de magnitud los factores de emisión frente a los medidos a bordo en condiciones locales. A modo de ejemplo, para PM_{2.5} los valores de estos modelos fueron hasta 10 veces más bajos que los medidos localmente. Los valores de FE obtenidos en este trabajo estuvieron en el mismo orden de magnitud que los reportados en la literatura, particularmente en los estudios de 2012 a 2018 para ciudades chinas.
7. La emisión de dióxido de nitrógeno (NO₂), 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 (NOx). Las emisiones de NOx alcanzaron valores tan elevados como 25 g/km. Esto sugiere la necesidad de incluir el control sobre emisiones de NOx en pruebas de revisión técnico-mecánica de vehículos.
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 relación directa entre la masa 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 de las partículas, siendo las partículas de menor tamaño las que tienen menos masa, pero son las que están en mayor número en las emisiones de las nuevas tecnologías de vehículos. Un caso interesante fue el tractocamión del año 2013 (EPA 98), el cual emitió la mayor concentración de PM (1392 mg/km) y, sin embargo, emitió la menor concentración de PN (0.38 billones/km) en comparación con los demás tractocamiones, lo que sugiere que este motor emite pocas partículas pero de gran tamaño.

9. Los camiones pequeños de dos ejes fueron medidos en banco de rodillos dinamométricos bajo dos ciclos de conducción diferentes. Los factores de emisión fueron más elevados cuando se midieron bajo el ciclo de conducción de buses, que cuando se midieron bajo ciclos de conducción propios de camiones de repartición de paquetería. Esto sugiere que, si se lograran optimizar las condiciones de circulación del servicio público de buses urbano, reduciendo el número de paradas/arranques, y mejorando su velocidad de circulación promedio, las emisiones disminuirían.

Los factores de emisión -FE-, definidos como la masa de un contaminante determinado que emite un vehículo por cada kilómetro que recorre, se usan principalmente para determinar los inventarios de emisión de una ciudad, región o país y por lo tanto se han convertido en un insumo fundamental de los informes que realizan los países comprometidos con la mitigación del cambio climático, como es el caso de Colombia como suscriptor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), estando comprometidos a remitir a la conferencia de las Partes, los Inventarios Nacionales de Emisiones antropogénicas que incluyen 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 (BAT) 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. Por esto, la UPME y la Universidad de Antioquia aunaron esfuerzos para determinar los FE de las fuentes móviles terrestres de carretera, protagonistas en el consumo de energía primaria del país.

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 (alrededor del 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 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 representativos. Las diferencias entre los FE sugeridos por estos modelos frente a los medidos a bordo suelen estar asociadas con las tecnologías vehiculares, calidad de combustible, condiciones climatológicas, topográficas, de altitud sobre el nivel del mar, y a la 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 (CO_2 y CH_4), de gases regulados (CO , NO_2 , NO_x , THC , NMHC), y de material particulado (en masa -PM- y número de partículas -PN-) de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (aproximadamente 1000 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 Euro II y nuevas (Euro IV y Euro V), con el fin de comparar el impacto de la tecnología sobre los factores de emisión.

Para el caso de los cuatro camiones pequeños (o livianos) de dos ejes (C2P), 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 camiones grandes de dos ejes (C2G) y de tractocamiones (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 medidos con un equipo PEMS Horiba OBS ONE de última tecnología (CO₂, CH₄, NO, NO₂, NO_x, HC, NMHC y CO), así como los de partículas medido tanto con el Horiba OBS ONE como con un impactador eléctrico de baja presión (ELPI de 14 etapas) de Dekati (en masa -PM-, y en número -PN-), se determinaron a partir de las concentraciones instantáneas (10 muestras/segundo), del flujo volumétrico de gases de escape medido con el Horiba OBS ONE (m³/s), y de la densidad de los gases en condiciones estándar (medido con el Horiba OBS ONE), 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. 1000 msnm).

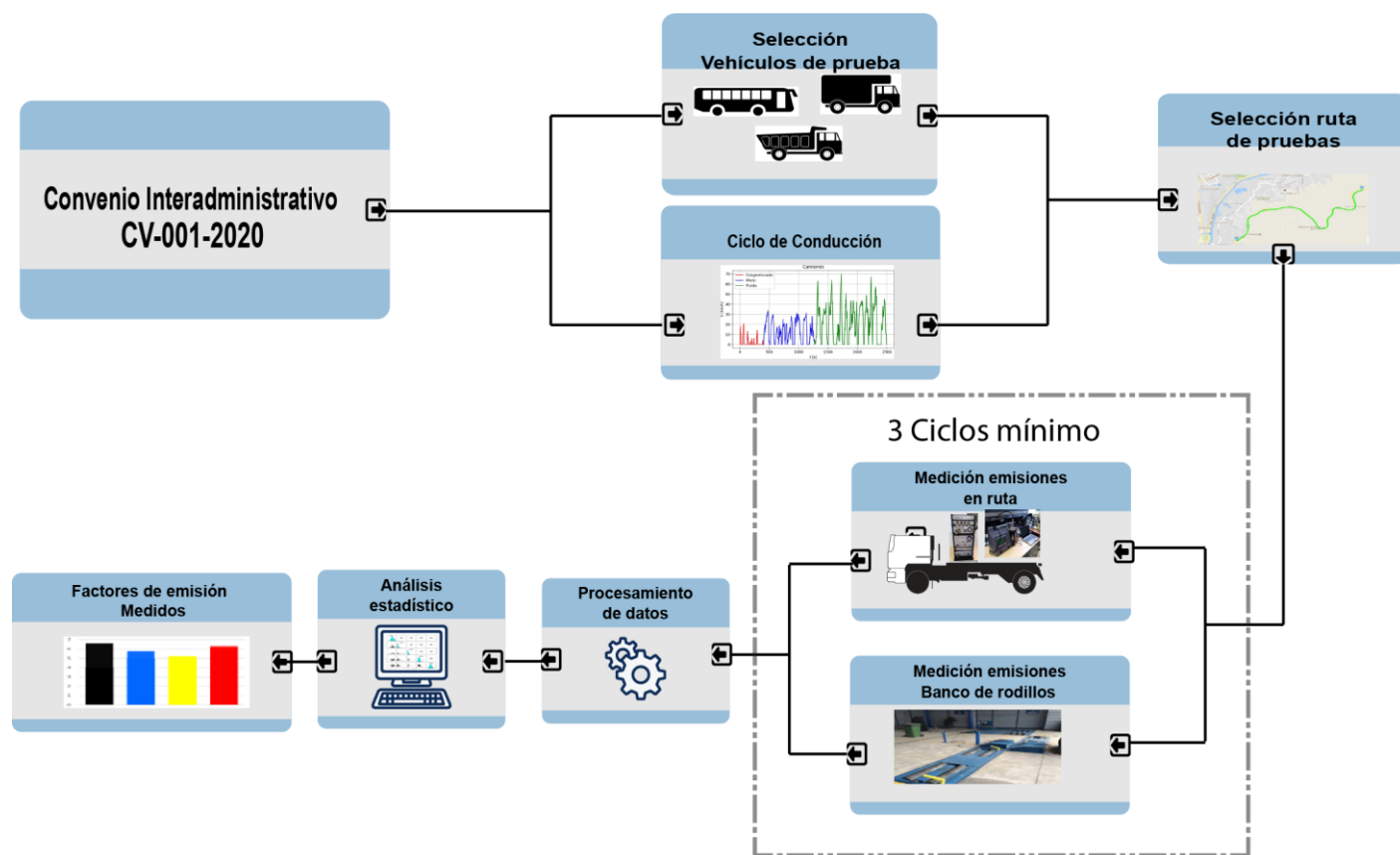


Figura R1. Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1

Tabla R1. Resumen de los factores de emisión promedio de los vehículos de carga para la altitud de la región metropolitana de Bucaramanga (aprox. 1000 msnm).

Categoría	Modelo	Norma emisión	Cilindrada (cm³)	Carga (Ton)	Rend. (km/gal)	CO ₂ (g/km)	CH ₄ (mg/km)	NO (g/km)	NO ₂ (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		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:

CO₂: dióxido de carbono, considerado el gas de efecto invernadero de referencia

CH₄: metano, con un potencial de calentamiento climático 25 veces mayor al CO₂ según el IPCC

NO: monóxido de nitrógeno

NO₂: 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.

NOx: óxidos de nitrógeno (NOx = NO + NO₂), 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_{2.5} (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, sólo que son tan pequeñas (del orden de nanómetros), que apenas contribuyen en su peso. Debido a que la peligrosidad de las partículas en el ser humano es inversamente proporcional a su tamaño, la Organización Mundial de la Salud ha sugerido en su guía de buenas prácticas más reciente (Sept. 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 ($\text{CH}_4 = \text{THC} - \text{NMHC}$)

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) que el de camiones, por lo que el consumo de combustible aumentó frente al de los camiones livianos (C2P). Esto explica por qué los buses emitieron más contaminación por cada kilómetro recorrido. Los tractocamiones Euro V (modelo 2020) con catalizador de reducción selectiva (SCR), presentaron los F.E. más bajos de NOx y material particulado PM en su categoría, por el contrario, el número de partículas que emitieron (PN) fue mayor en comparación.

La Figura R2 (superior) muestra los factores de emisión de CO₂ (g/km) de forma comparativa entre las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos en este proyecto. En la parte inferior de la Figura R2 se muestra el factor de emisión de CO₂ dividido por cada tonelada de peso de vehículo incluida la carga (g/km-ton). Los resultados permiten concluir que las emisiones de GEI de CO₂ crecen a medida que aumenta el tamaño del vehículo, variando desde el valor mínimo de 320 g/km (camión pequeño de dos ejes Euro II), hasta el máximo de 1748 g/km de un tractocamión (año 2020, Euro V).

Se observa que los tractocamiones emitieron la mayor cantidad de CO₂ por cada kilómetro recorrido (más de 1500 g/km) entre las categorías vehiculares medidas, pero a la vez emitieron la menor cantidad de CO₂ por cada kilómetro y tonelada (alrededor de 60 gCO₂/km-ton), seguidos de los camiones grandes de dos ejes (C2G alrededor de 70 gCO₂/km-ton). Por el contrario, las mayores emisiones específicas de GEI las presentaron los buses urbanos (desde 65 gCO₂/km-ton hasta 116 gCO₂/km-ton).

Independiente de la categoría vehicular (pesados) la mejora tecnológica de control de emisiones no mostró una tendencia a disminuir los FE promedio de CO₂. Por el contrario, se aprecia una ligera tendencia a incrementarlos, lo que se explica no sólo por la mayor contrapresión de escape ocasionada por la adición de equipos de postratamiento de gases de escape usados (recirculación de gases de escape EGR para disminuir NOx, y reductor catalítico selectivo de NOx), sino por la estrategia de inyección programada en la Unidad de Control Electrónica, mediante la cual se acerca más el inicio de la inyección al punto muerto superior, afectando negativamente el consumo de combustible y, por tanto, incrementando las emisiones de CO₂.

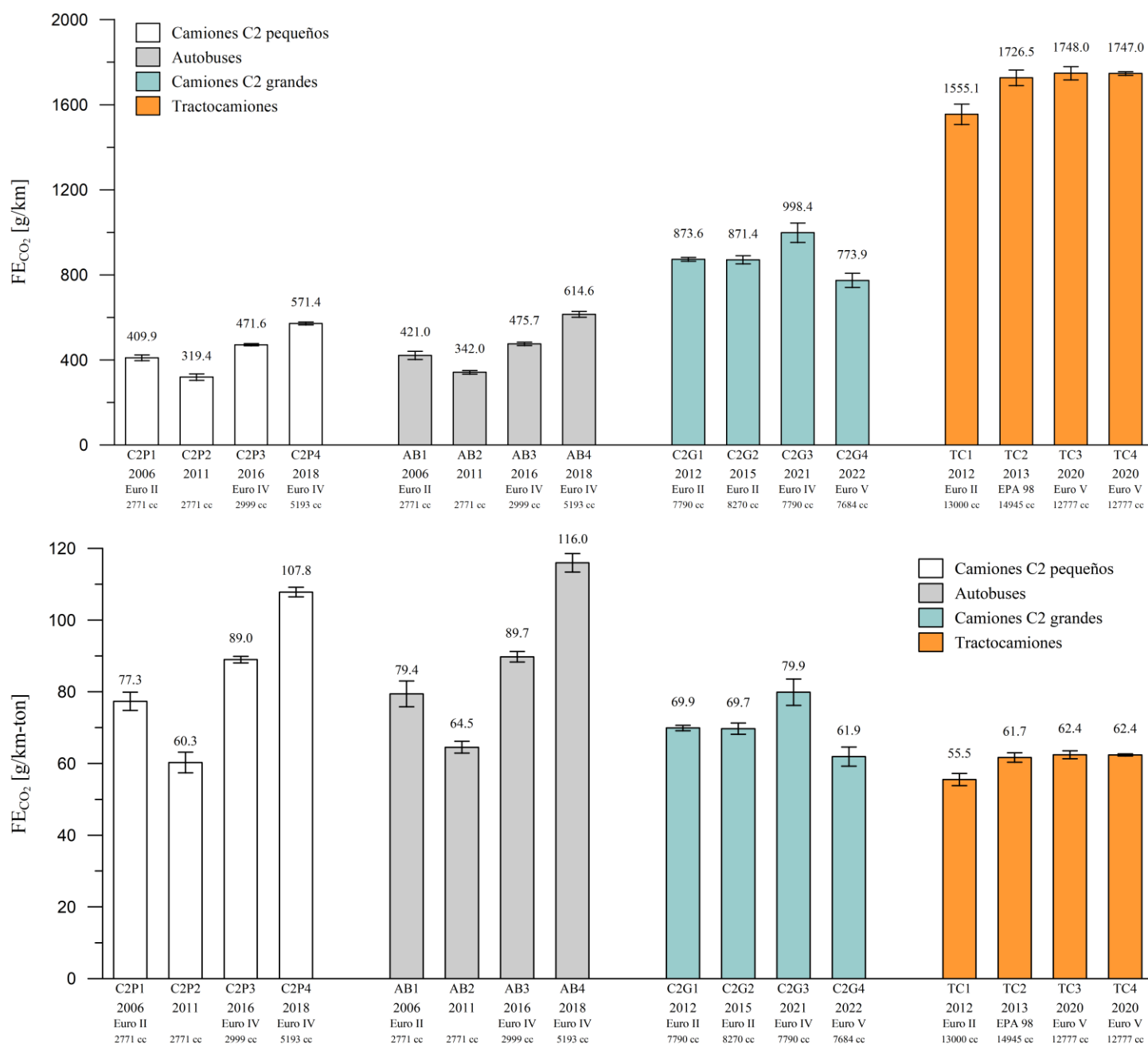


Figura R2. Factor de emisión de CO₂ para la categoría de vehículos pesados de carga/pasajeros (medidos a la altitud de Bucaramanga -aprox. 900 msnm). Superior (g/km), inferior en (g/km-ton).

Los F.E. medidos en este proyecto 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. En la **Figura R3** se compara el CO₂. 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.

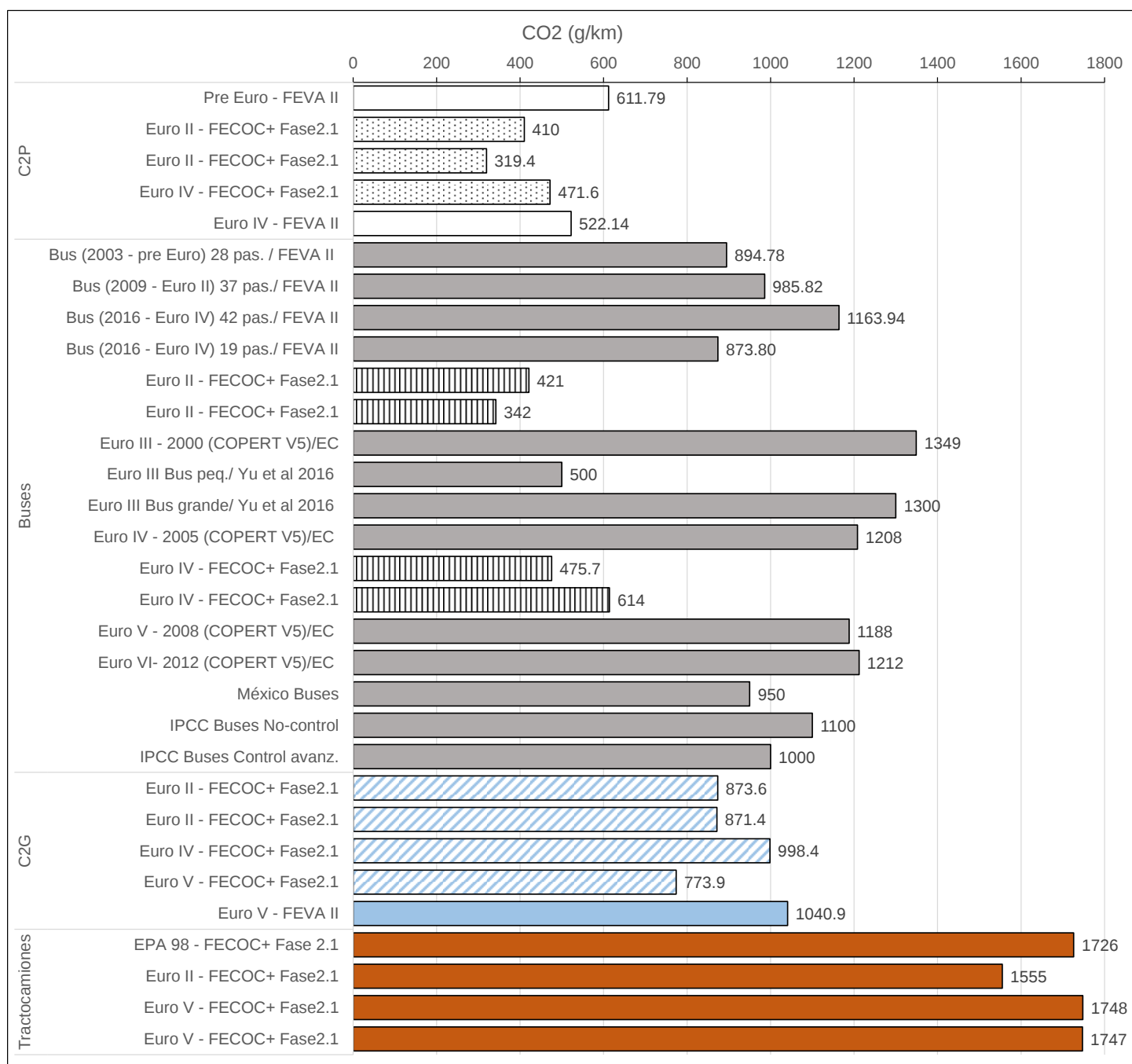


Figura R3. Comparación del CO₂ medido con la literatura técnica

En la **Figura R4** se muestra el factor de emisión del gas metano (CH₄), otro gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO₂ según el IPCC. En la parte superior está el FE en gramos/kilómetro recorrido, mientras que en la parte inferior en g/km-ton para las categorías de vehículos pesados medidos en este proyecto.

Las emisiones de gas metano no cambiaron significativamente con el tamaño de los vehículos medidos, pero si fueron siempre menores para aquellos de tecnologías más avanzadas (Euro IV y Euro V), oscilando entre cerca de 3 y 50 mgCH₄/km.

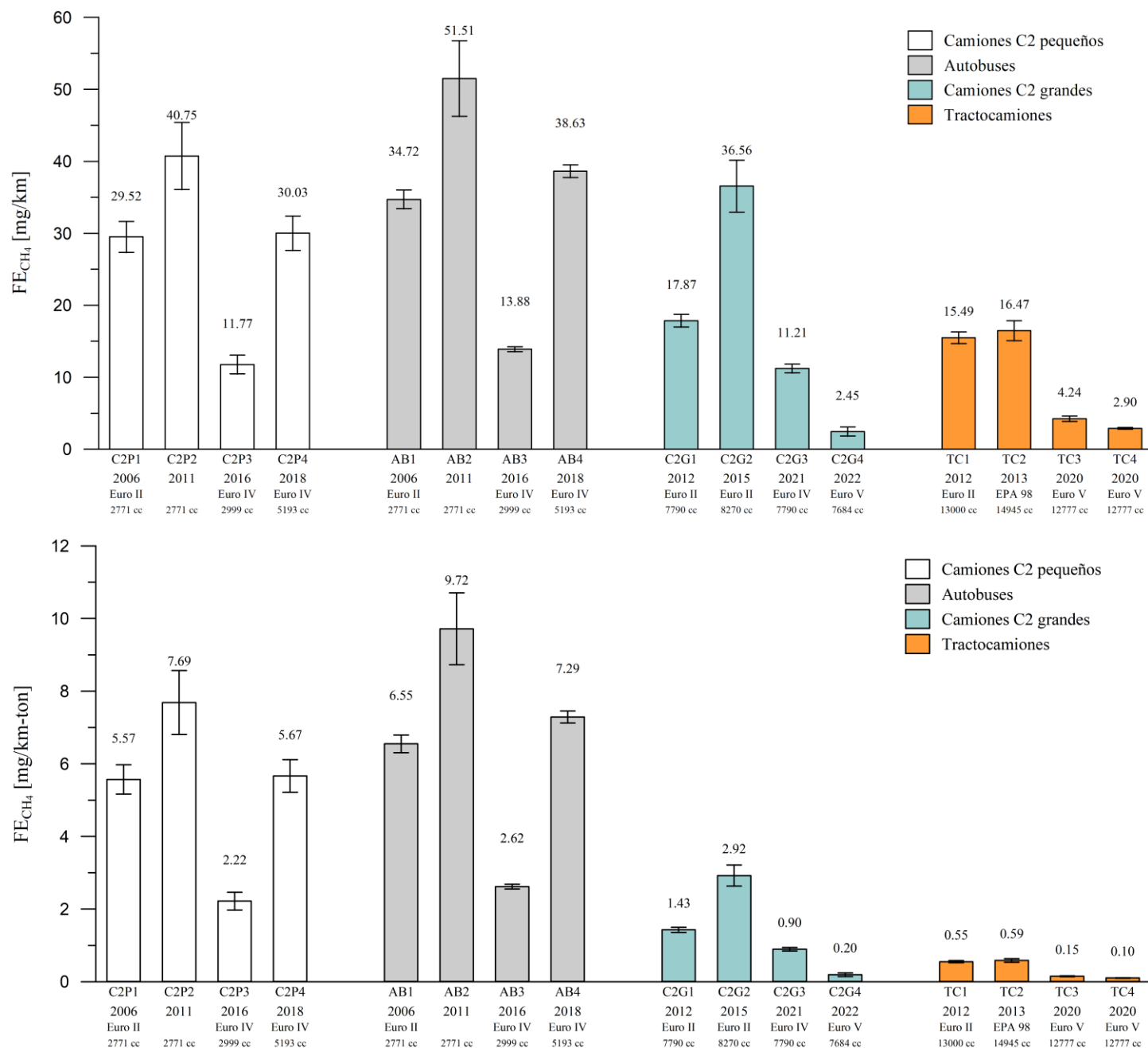


Figura R4. Factor de emisión de gas metano (CH₄). Superior en (g/km). Inferior en (mg/km-ton) para vehículos de carga/pasajeros (altitud de Bucaramanga -aprox. 900 msnm).

En la **Figura R5** se muestran los factores de emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) de las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos en este proyecto. En la **Figura R6** se muestran las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO₂). El uso del dispositivo SCR (Catalizador de Reducción Selectiva de

NOx), 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), y a la mayor contrapresión de gases de escape del motor, es significativamente efectivo en la reducción de las emisiones de NOx.

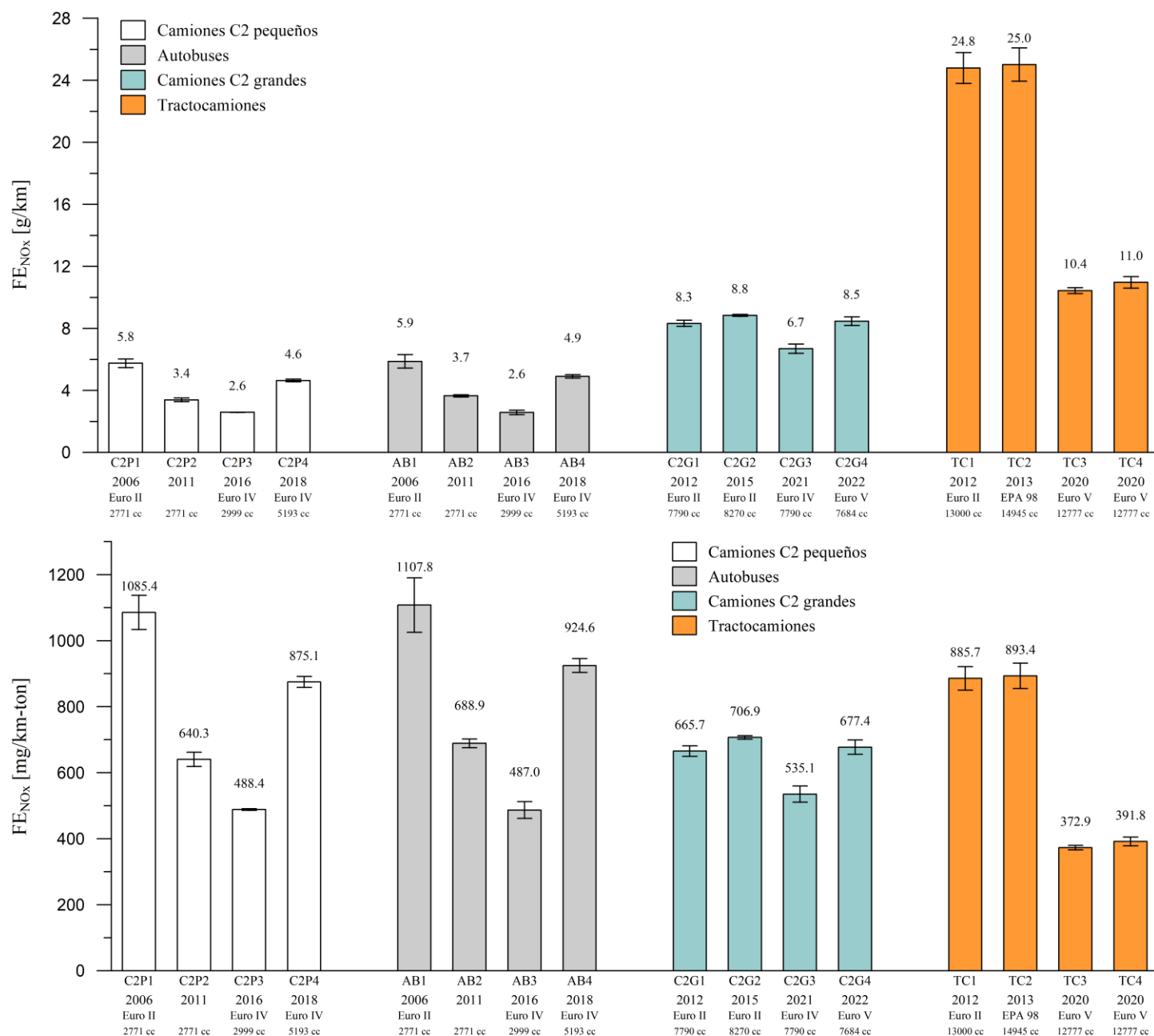


Figura R5. Factor de emisión de NOx (Superior en g/km. Inferior en mg/km-ton) para las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos.

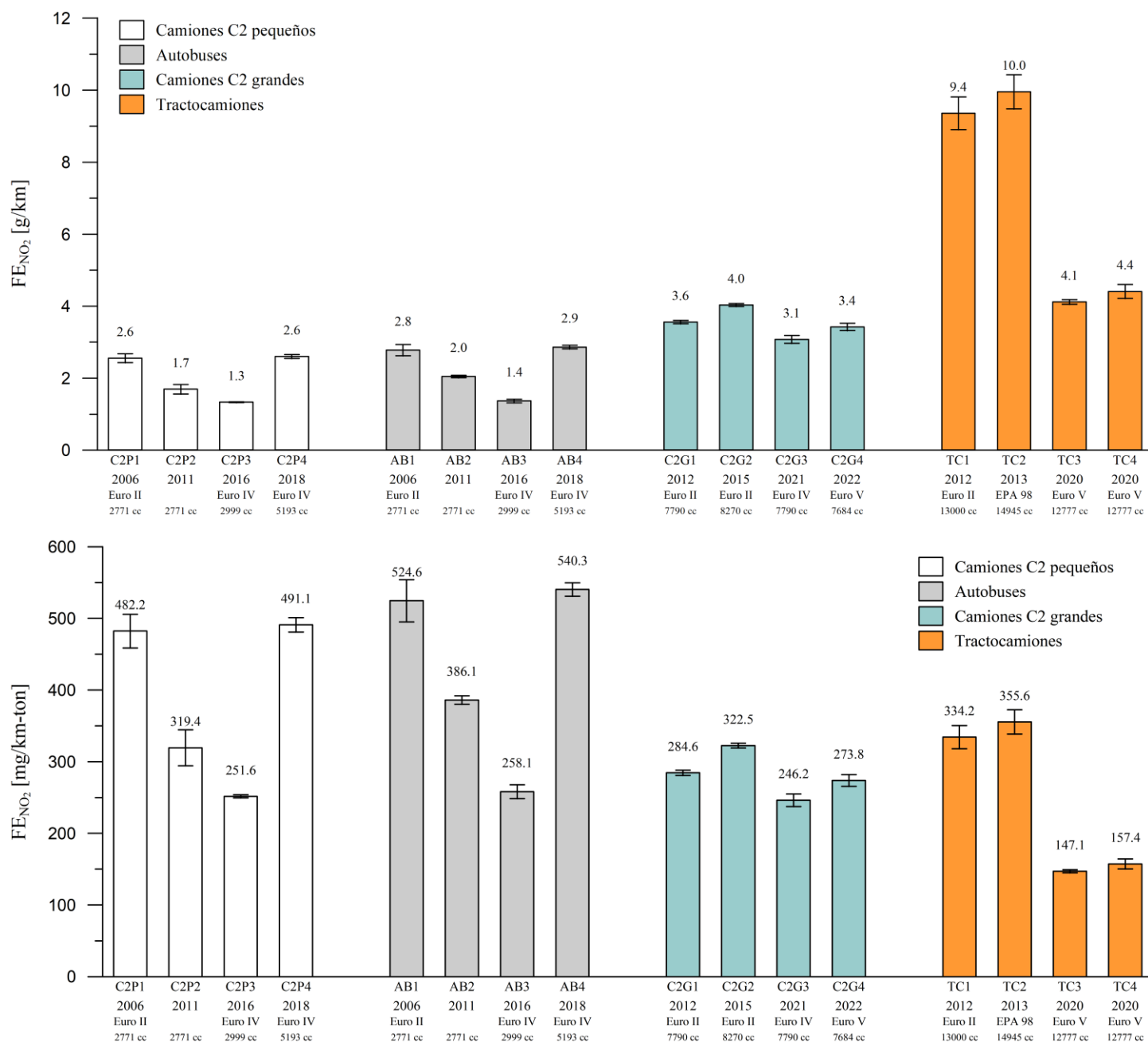


Figura R6. Factor de emisión de NO₂ (superior en g/km, inferior en mg/km-ton) para las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos.

Las emisiones de NO₂, 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 NO_x, incluidos el NO y el NO₂.

En la **Figura R7** se muestran los factores de emisión de monóxido de carbono (CO) de las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos en este proyecto. En la **Figura R8** se muestran los factores de emisión de hidrocarburos totales (THC).

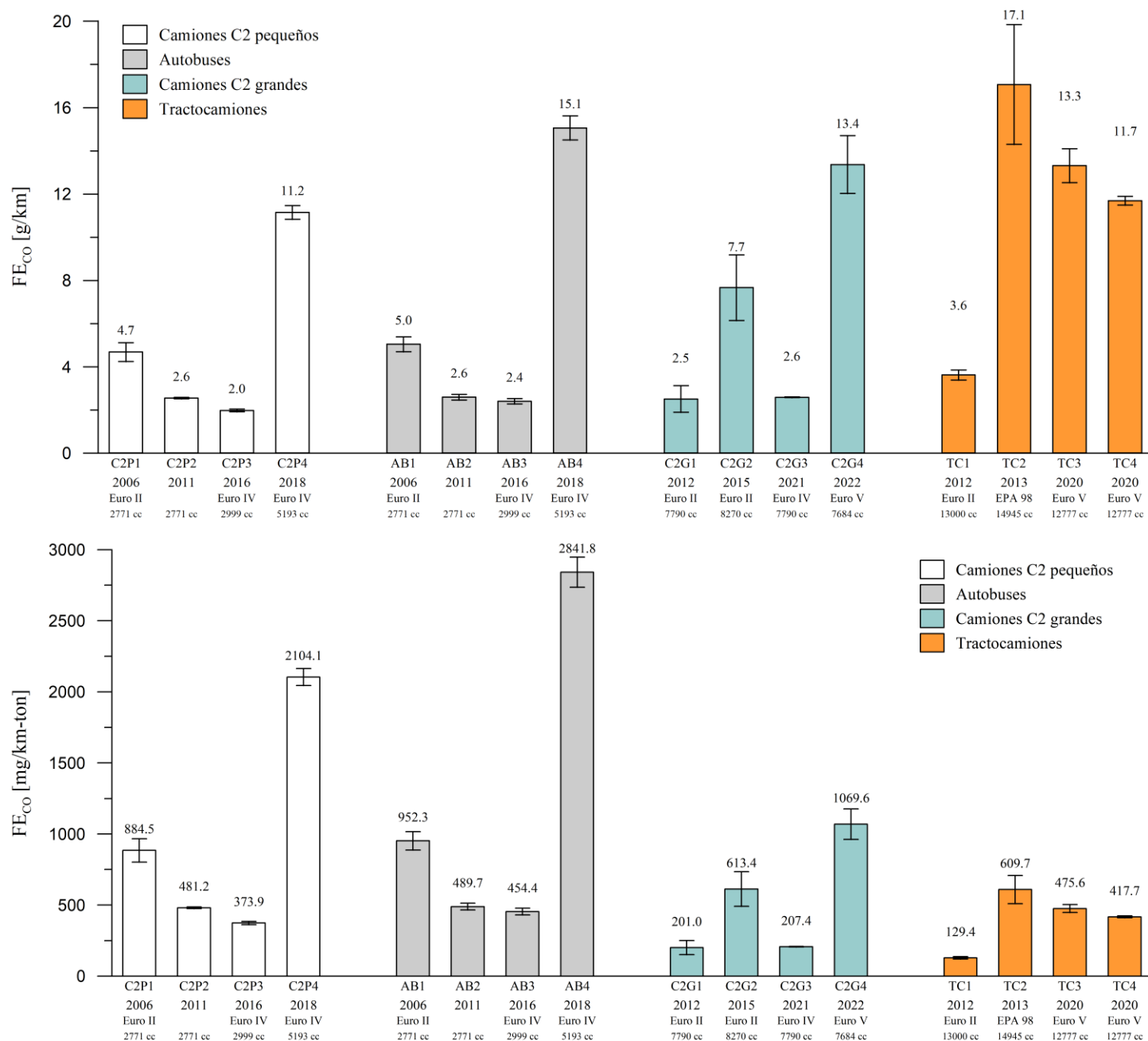


Figura R7. Factor de emisión de CO (superior en g/km, inferior en mg/km-ton) para las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos.

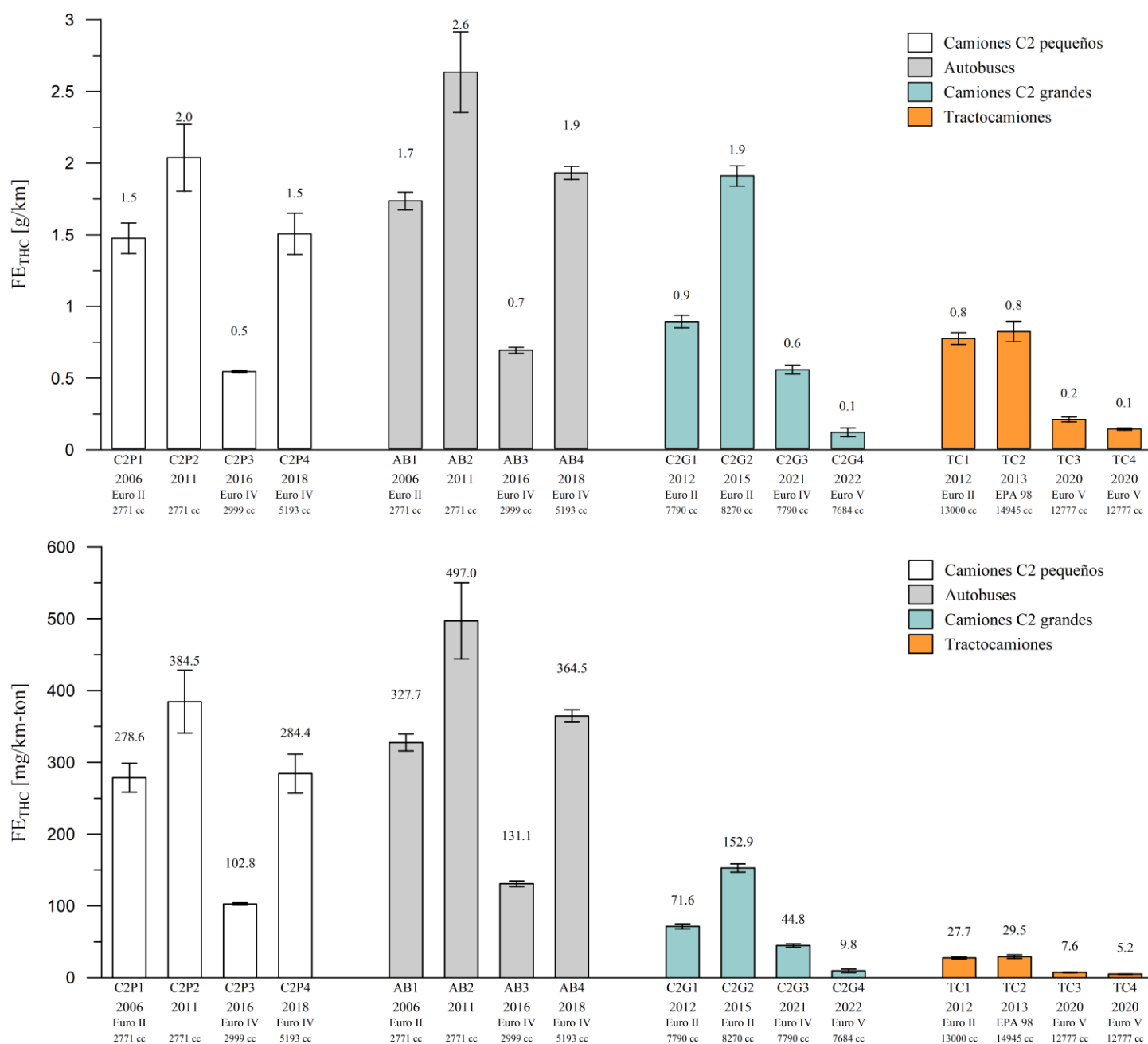


Figura R8. Factor de emisión de hidrocarburos totales (THC) para las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos. Superior en g/km, inferior en mg/km-ton.

En la **Figura R9** se muestran los factores de emisión de material particulado. En la **Figura R10** se muestran los factores de emisión de PM obtenidos en este proyecto frente a los reportados en FEVA-2 a la altitud de la ciudad de Medellín, y en la literatura técnica. Los resultados permitieron identificar dos vehículos atípicos, un camión de dos ejes grande Euro II, y un tractocamión EPA 98, que emitieron

alrededor de 1400 mg/km de PM. Comparativamente con los demás vehículos, éstos pueden ser denominados grandes emisores de material particulado.

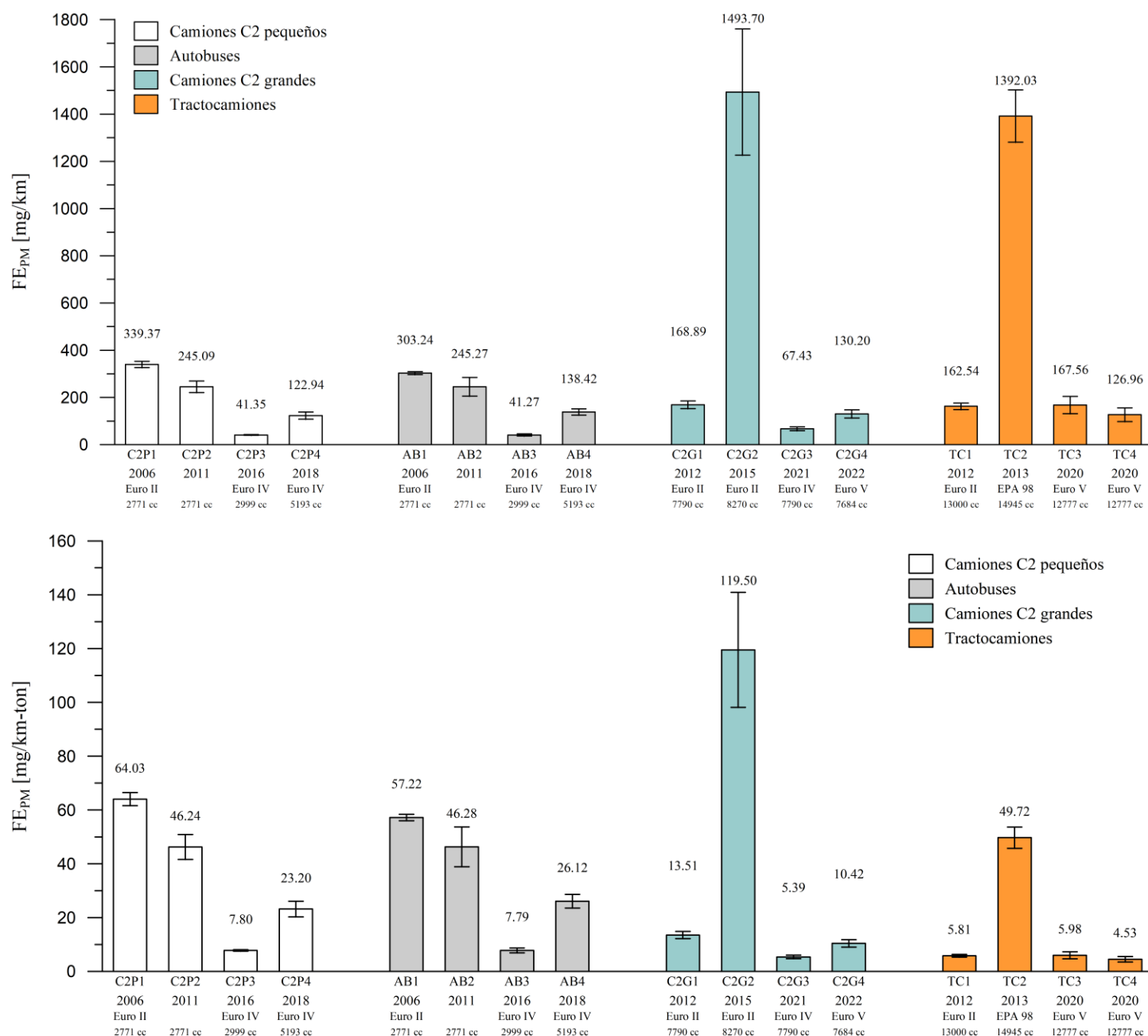


Figura R9. Factor de emisión de material particulado (PM) para las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos. Superior en mg/km, inferior en mg/km-ton.

Los factores de emisión de partículas en términos de masa (PM) medidos en este proyecto fueron en algunos casos hasta 14 veces más elevados que los recomendados por la versión más reciente del modelo COPERT (octubre 2021) de la Agencia Europea de Medioambiente (**Figura R10**). Resultados

similares se obtuvieron para los demás factores de emisión, como se reporta en el capítulo 3 del presente informe final.

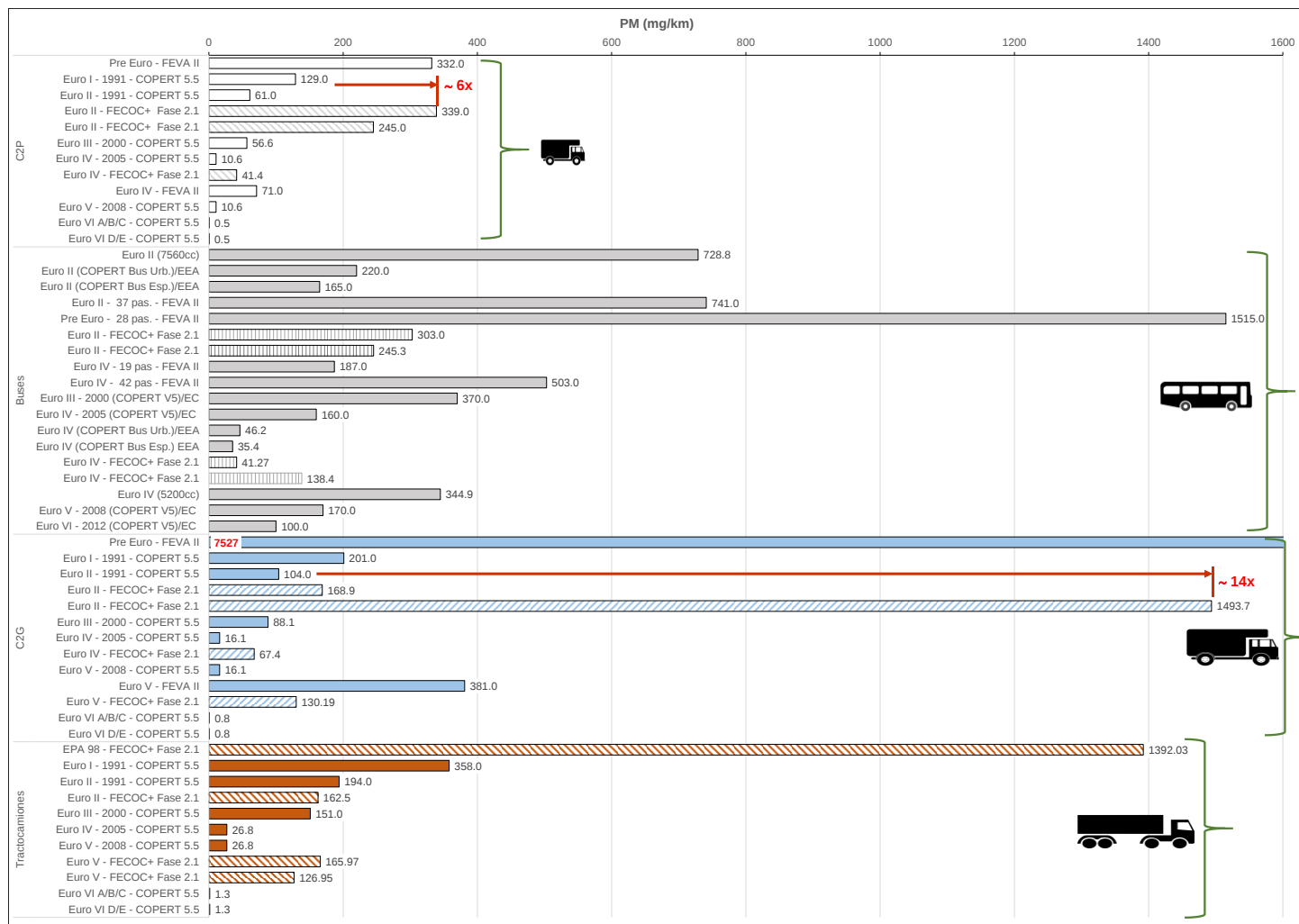


Figura R10. Comparación del material particulado (PM en mg/km) con valores reportados en la literatura

En la **Figura R11** se muestran los factores de emisión del número de partículas medidos a bordo para las diferentes tipologías de vehículos pesados. El número de partículas reportado fue medido con un equipo de impactación eléctrico de baja presión (ELPI) de marca Dekati. Este factor de emisión corresponde a la suma acumulativa del número de partículas con tamaños desde 6 nanómetros hasta 2.5 micras.

Este resultado permite concluir que el camión de dos ejes grande Euro II del año de modelo 2015, además de ser el que más masa de partículas emite, también es el que mayor número de partículas en billones por cada kilómetro está emitiendo. Por su parte, el tractocamión Euro II EPA 98 del año de modelo 2013, muestra que a pesar de haber emitido la mayor masa de partículas en su tipología (tractocamiones), es el que menor número de partículas emitió de toda la categoría de vehículos

pesados medidos. Elevada masa de partículas y bajo número de partículas indica que éstas son pocas, pero de gran tamaño.

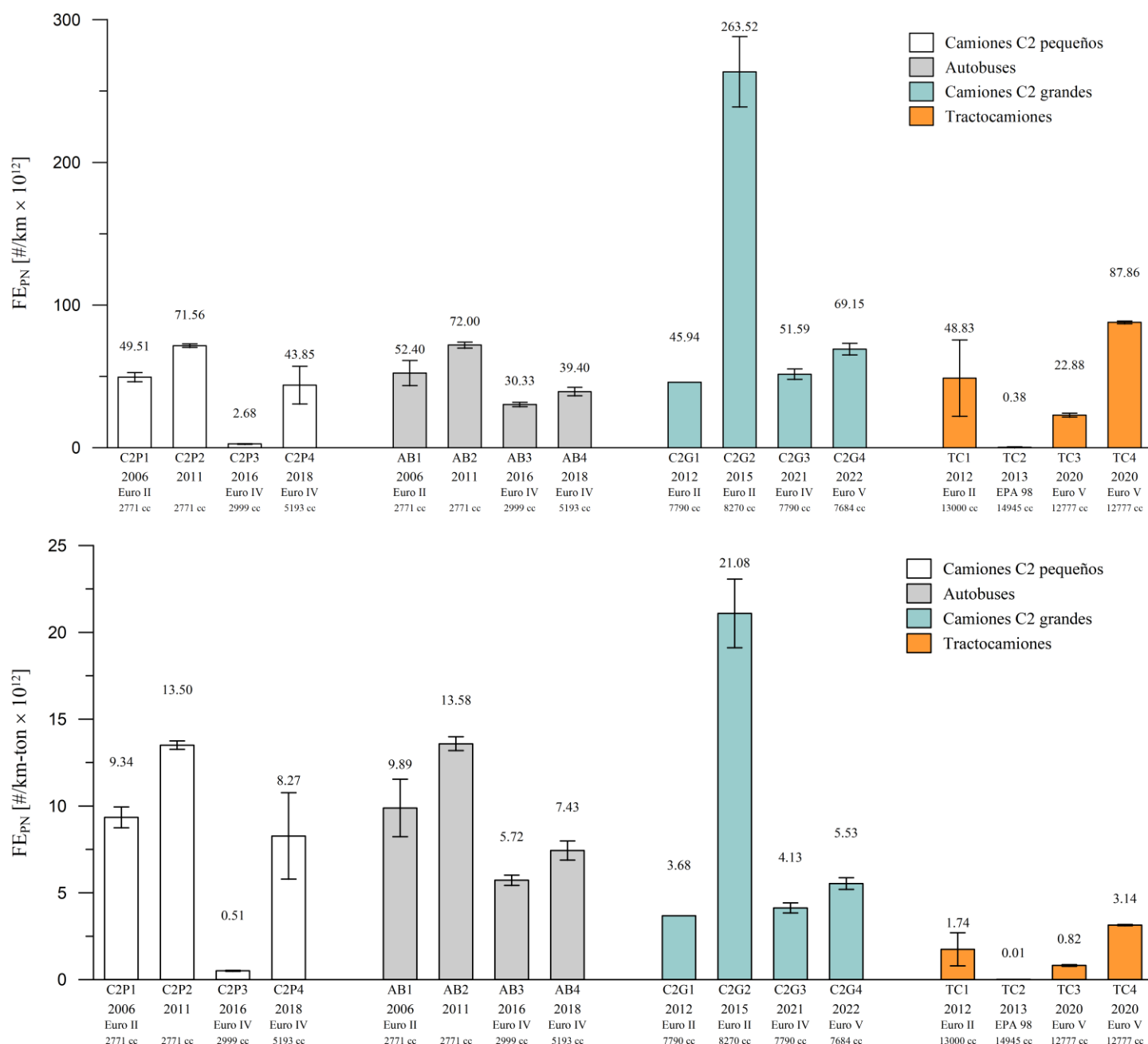


Figura R11. Factor de emisión de número de partículas (PN) para las diferentes tipologías de vehículos pesados medidos. Superior en #/km, inferior en #/km-ton. Los datos están en billones.

Se evidenció que los factores de emisión promedio en unidades de g/km de CO₂, CO y NO_x tendieron a incrementar con el tamaño del vehículo. No obstante, los THC, el metano (CH₄) y el material particulado (en masa PM y en número PN), no mostraron ninguna tendencia. Sin embargo, si se divide

por peso total del vehículo (incluida la carga simulada para las pruebas en toneladas), todos los factores de emisión disminuyeron en la medida que aumentaba el tamaño del vehículo (ver resultados detallados en el capítulo 3).

Finalmente, en la **Figura R12** se muestra el consumo de combustible promedio obtenido a lo largo de los ciclos de conducción representativos por cada tipología dentro de la categoría de vehículos pesados. El proyecto cuenta además con la base de datos de los consumos instantáneos con una frecuencia de 1 segundo medidos a lo largo del ciclo de conducción respectivo.

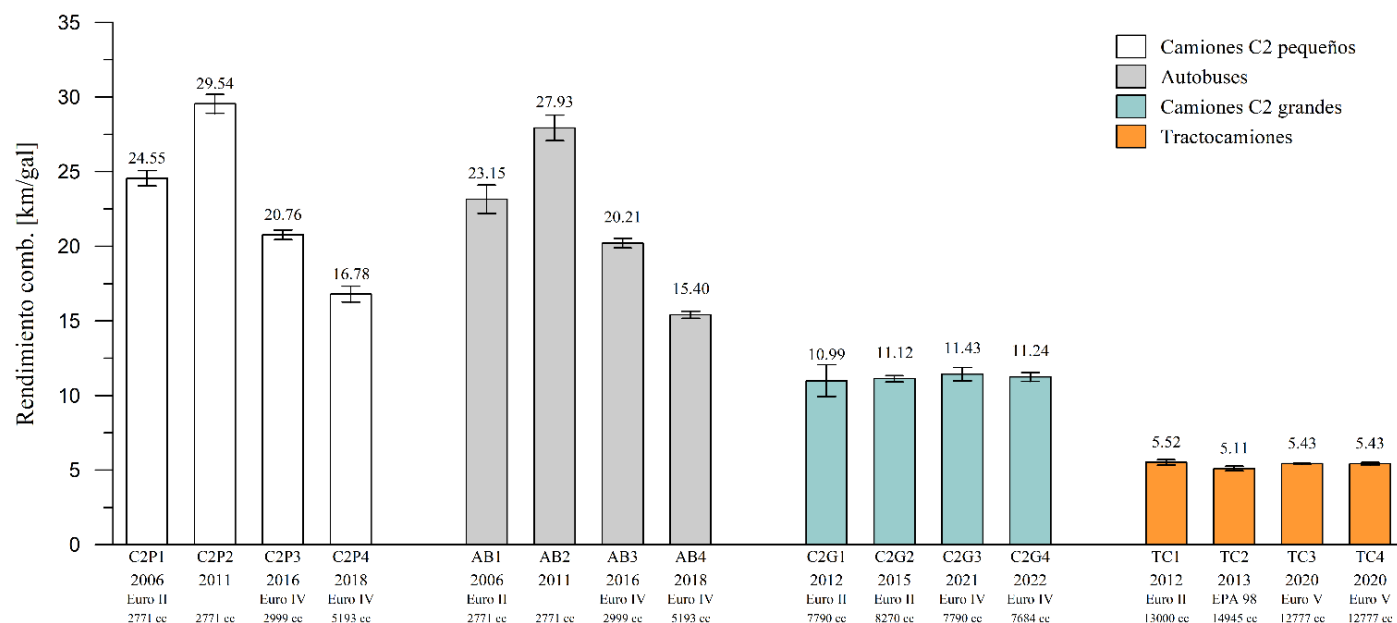


Figura R12. Rendimiento promedio de combustible (km/gal) medidos a la altitud de Bucaramanga (aprox. 900 msnm)

En resumen, en este proyecto se determinaron los factores de emisión 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 con ciclos de conducción específicos por cada actividad vehicular (camiones de dos ejes pequeños C2P típicos de repartición de paquetería urbana, Camiones de dos ejes grandes C2G, Tractocamiones, y autobuses), a la altura del área metropolitana de Bucaramanga (alrededor de 900 msnm).

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

Este proyecto evidenció la necesidad de medir localmente los factores de emisión bajo las condiciones propias del país. El PM medido a bordo en este proyecto fue entre 2 y hasta 14 veces mayor que el recomendado por la última versión disponible del modelo COPERT de la Agencia Europea de

Medioambiente, y entre 4 y 29 veces mayor que el recomendado por el modelo IVE (versión última disponible de 2008).

En la **Tabla R2** se comparan los factores de emisión medidos en este proyecto frente a los recomendados por el modelo internacional de vehículos (IVE) para la categoría de camiones de dos ejes pequeños (C2P). Los resultados muestran que los valores medidos fueron mayores que los sugeridos por el IVE. Por ejemplo, para el factor de emisión de THC y el de PM, los valores medidos oscilaron entre 3.8 y 30 veces mayores que los del IVE. Por su parte los valores más cercanos a los sugeridos por el IVE fueron para las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Tabla R2. Comparación de los valores de vehículos medidos en FECOC+ 2.1 respecto de los valores sugeridos por el modelo IVE para la categoría camiones de dos ejes pequeños C2p

Estándar/ modelo	Factor de Emisión											
	THC ^A (g/km)			CO ^B (g/km)			NOx ^C (g/km)			PM ^D (g/km)		
	FECOC +2.1	IVE	Δ	FECO C+ 2.1	IVE	Δ	FECOC+ 2.1	IVE	Δ	FECOC +2.1	IVE	Δ
Euro II - 2006	1,48	0,39	3,8	4,69	1,43	3,3	5,72	3,43	1,6	0,339	0,065	5,2
Euro II - 2011	2,04	0,39	5,3	2,55	1,43	1,8	3,39	3,43	~	0,245	0,065	3,8
Euro IV - 2016	0,55	0,018	30	1,98	0,14	14	2,59	1,62	1,6	0,414	0,014	30

^A Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - THC entre 4 y 5 veces
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - THC en 30 veces

^B Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - CO entre 2 y 3 veces
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - CO en 14 veces

^C Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - NOx aprox. 1.6 veces
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - NOx aprox. 1.6 veces

^D Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 4 y 5 veces
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - P.M en 29 veces


 Ing.-Dr. John Ramiro Agudelo Santamaría
 Director del proyecto
 Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica
 Facultad de Ingeniería
 Universidad de Antioquia
John.agudelo1@udea.edu.co

Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)
Fase 2.2: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de
carga (camiones y tractocamiones) 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



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

1. Introducción	6
1.1. FECOC+ Fase 2.1	6
1.2. El IPCC y el Cambio Climático	8
1.3. Emisiones de CO₂ y Cambio Climático	9
1.4. Impacto en el sector transporte	14
Referencias capítulo 1	20

Índice de Figuras capítulo 1

Figura 1. Emisiones de CO ₂ (kt) referentes en el mundo	10
Figura 2. Valores similares de emisiones de CO ₂ (kt) en el mundo	11
Figura 3. Emisiones de CO ₂ (kt) del consumo de combustibles líquidos en América Latina	11
Figura 4. Valores similares de emisiones de CO ₂ (kt) del consumo de combustibles líquidos en el mundo	12
Figura 5. BEU para el sector transporte en Colombia	15
Figura 6. Rendimiento promedio de combustible de camiones en Colombia año 2015	16
Figura 7. Rendimiento promedio de combustible (km/gal) medidos (aprox. 900 msnm)	16
Figura 8. Cantidad de emisiones por subcategoría en Gg de CO ₂ eq.	17
Figura 9. 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 representativos. Las diferencias suelen estar asociadas con las tecnologías vehiculares, calidad de combustible, condiciones climatológicas, topográficas, de altitud sobre el nivel del mar, y cultura de conducción propias de cada ciudad, región o país.

En 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_2 y CH_4), de gases regulados (CO , NO_2 , NO_x , THC y NMHC), y de material particulado (en masa -PM- y número de partículas -PN-) de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (aproximadamente 1000 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_2 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 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 consolide 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 1000 msnm), un reto que la UPME decididamente ha iniciado y que tendrá impactos de cara a los inventarios de emisiones 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, pos 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 (CO₂) 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 CO₂ 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 CO₂ 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 (CH₄), también llamado *Gas Natural*, y los óxidos de nitrógeno (NO_x), y dentro de ellos destaca el dióxido de nitrógeno (NO₂), 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 CO₂, CH₄ 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_x (alrededor de 35% en abril) y de CO₂ 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 (O₃) y material particulado (PM_{2.5}) 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 GtCO₂ desde el periodo preindustrial hasta el año 2019. En un escenario futuro de muy bajas emisiones sería lícito liberar alrededor de 400 o 500 GtCO₂ 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 GtCO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ que se le asume a China. En el escenario Latinoamericano, se encuentran México con 472.140 kt de CO₂ 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 CO₂, equivalente a 0.77% del total emitido comparado con China [4].

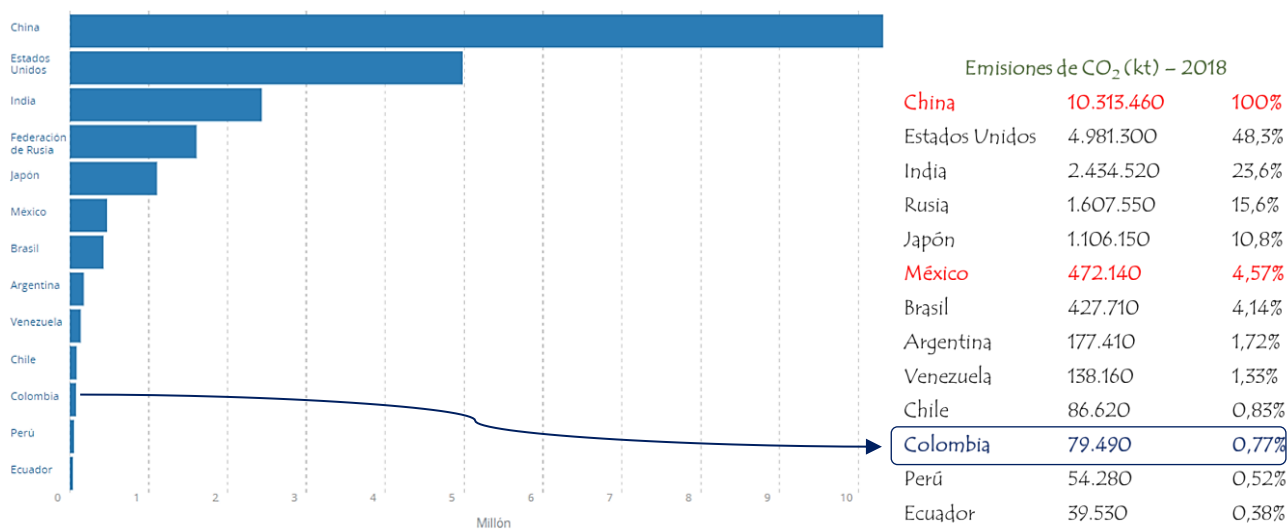


Figura 1. Emisiones de CO₂ (kt) referentes en el mundo [4]

Con Colombia como referencia, es posible determinar cuáles países alrededor del mundo tienen valores de emisiones de CO₂ similares según lo reportado en el 2018 por el Banco Mundial, es decir, valores cercanos a los 80.000 (kt) de CO₂. 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 CO₂, otro tipo de información a resaltar son las emisiones de CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂, se encuentra Colombia.

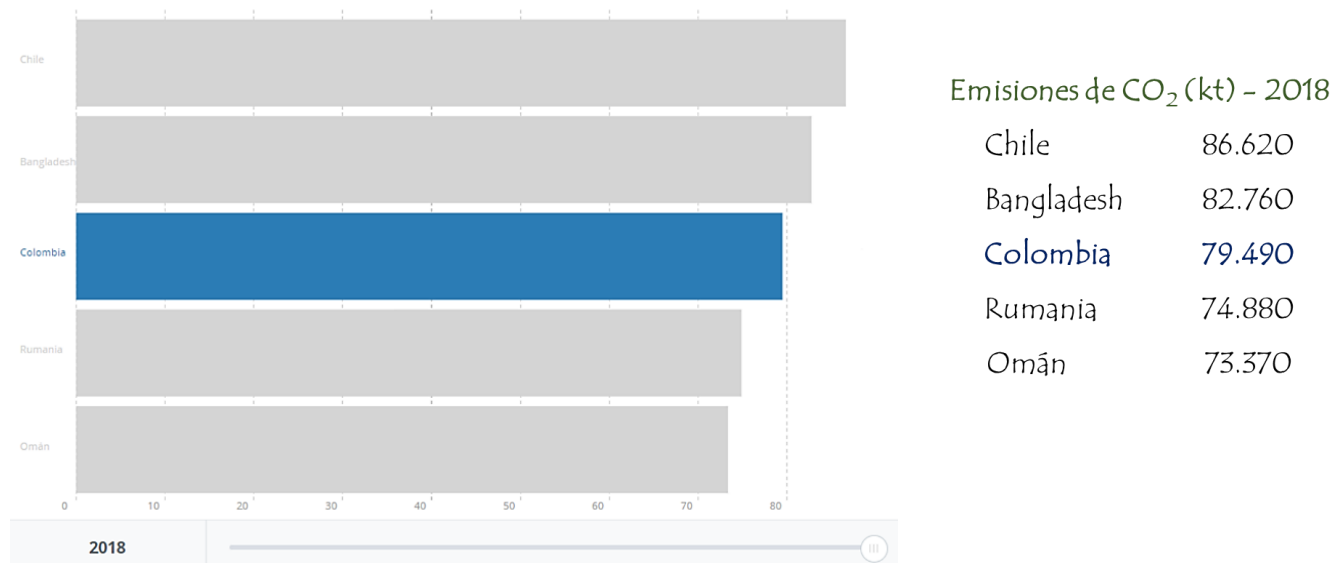


Figura 2. Valores similares de emisiones de CO₂ (kt) en el mundo [4]

Como se mencionó, la **Figura 3** presenta gráficamente los diferentes valores con respecto al total de emisiones de CO₂ del consumo de combustibles líquidos para América Latina.

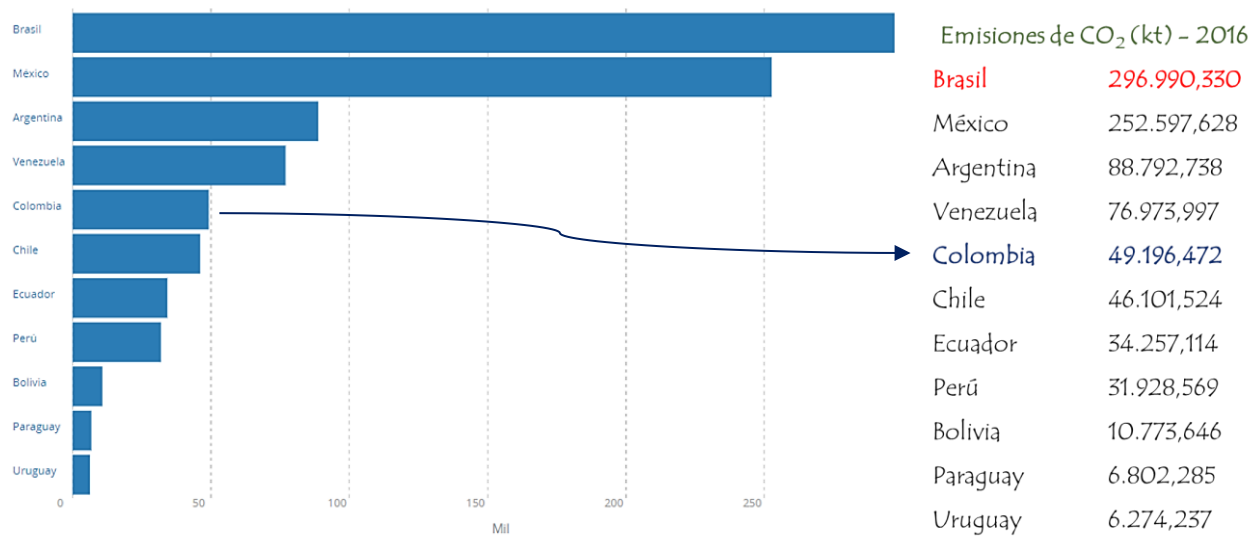


Figura 3. Emisiones de CO₂ (kt) del consumo de combustibles líquidos en América Latina [4].

Para el caso del consumo de combustibles líquidos, los valores similares de emisiones de CO₂ 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 CO₂.

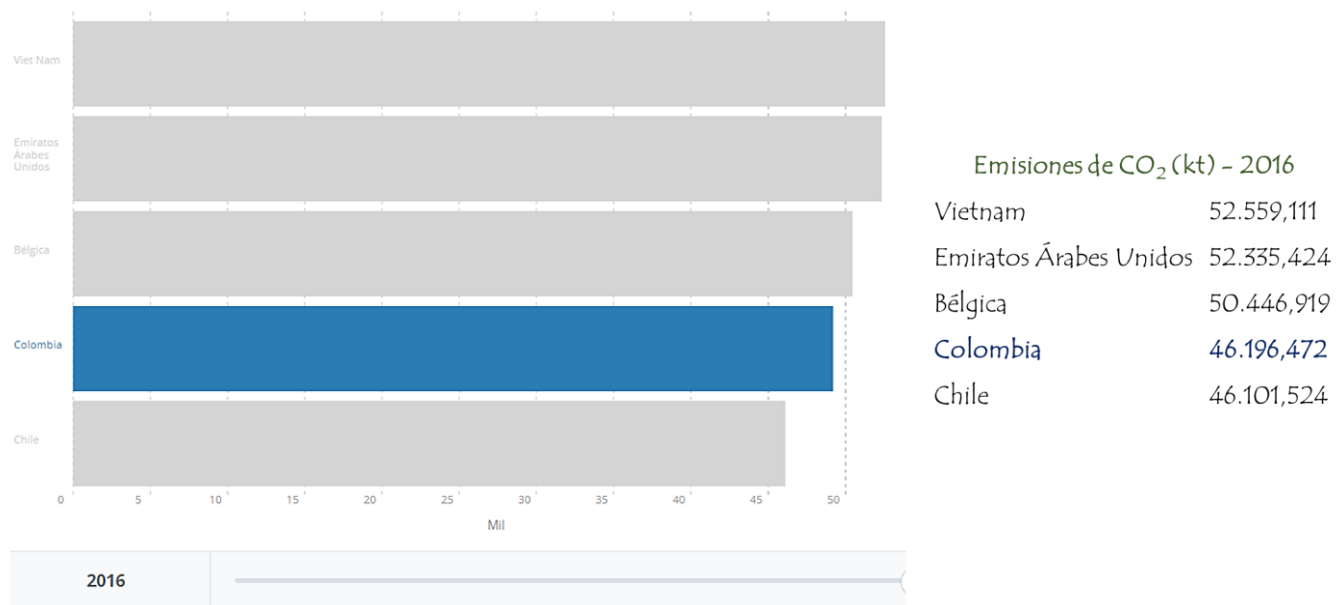


Figura 4. Valores similares de emisiones de CO₂ (kt) del consumo de combustibles líquidos en el mundo [4]

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 GtCO₂e ± 5,2. Análogamente, las emisiones fósiles de CO₂ alcanzaron un nivel sin precedentes en 2019, llegando a valores de 38 GtCO₂e ± 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 CO₂ en el mundo, establece como uno de sus objetivos nacionales reducir las emisiones, la protección y recuperación del medio ambiente, siendo neutro en CO₂ 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 SITR 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.

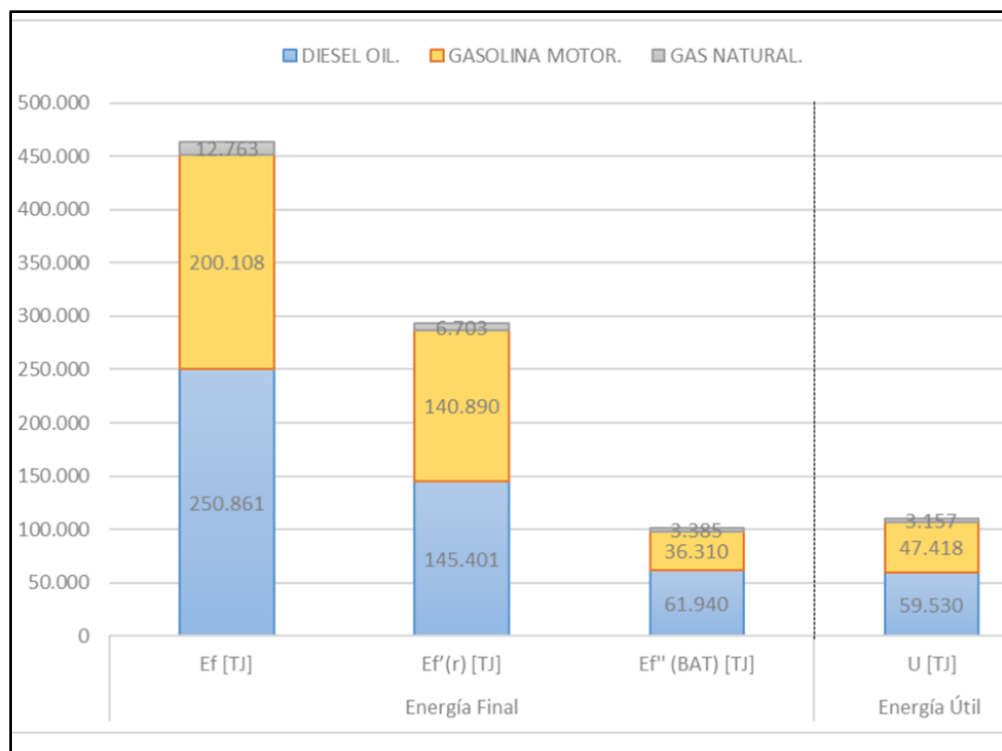


Figura 5. BEU para el sector transporte en Colombia (Tomado de [7])

El BEU permitió estimar las eficiencias en km/galón o km/m³ 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/m³, 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	Mintranspotre (s.f)
	Gasolina	11	10.767	Uninorte-Terpel, 2013
	Gas natural	4	9.309	Promedio ciudades
Cali	Diésel	10	15.000	Mintranspotre (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])

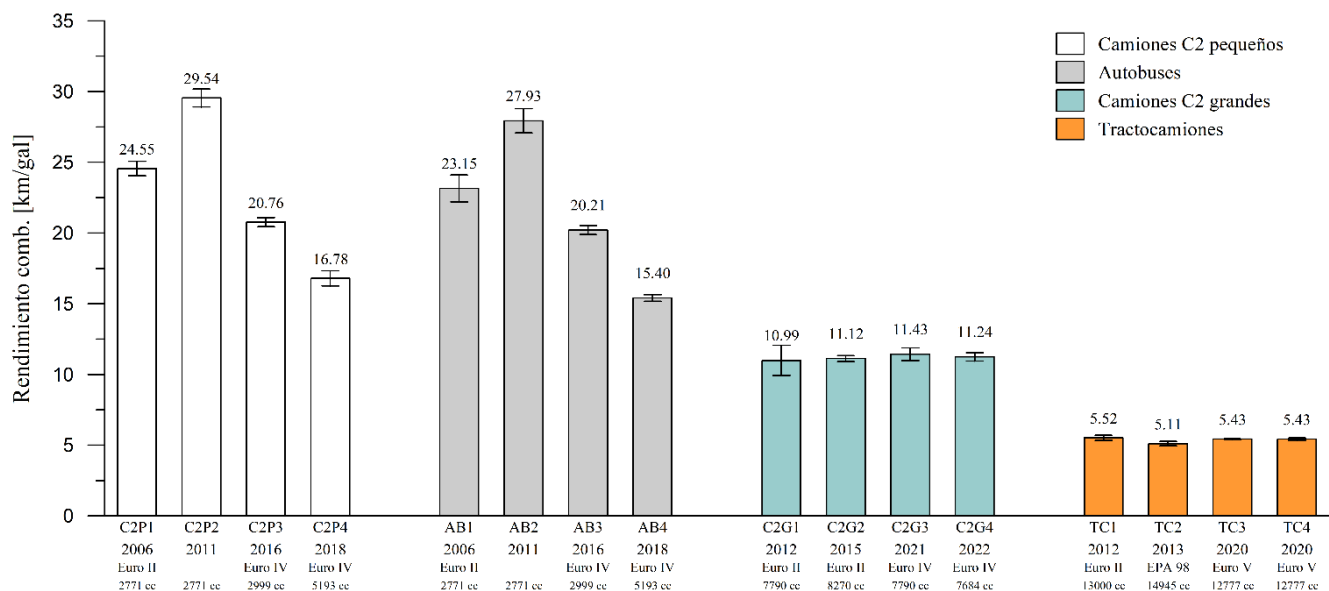


Figura 7. Rendimiento promedio de combustible (km/gal) medidos (aprox. 1000 msnm)

Por otra parte, el Informe Bial 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].

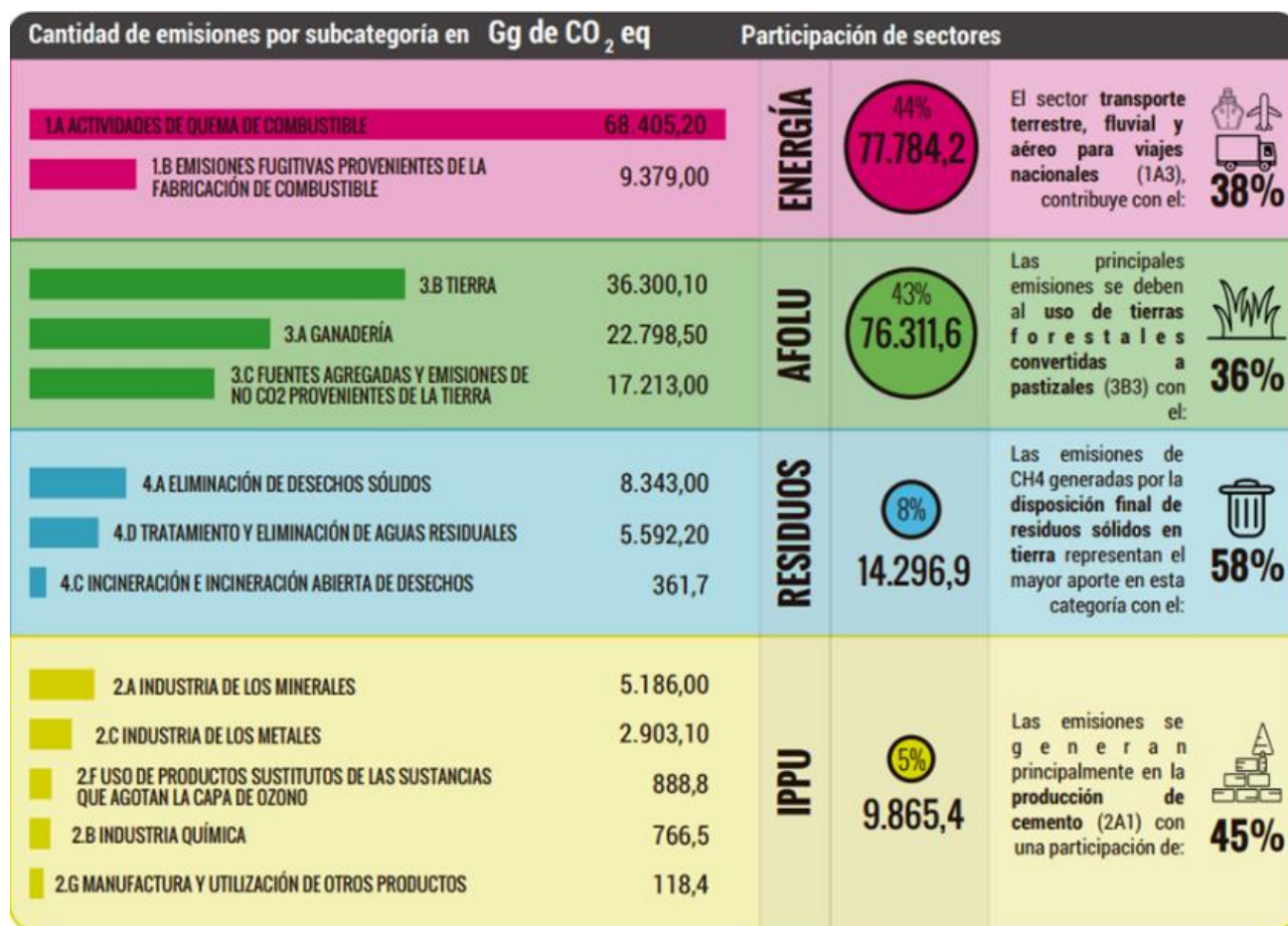


Figura 8. Cantidad de emisiones por subcategoría en Gg de CO₂ eq. (Tomado de [8])

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**.

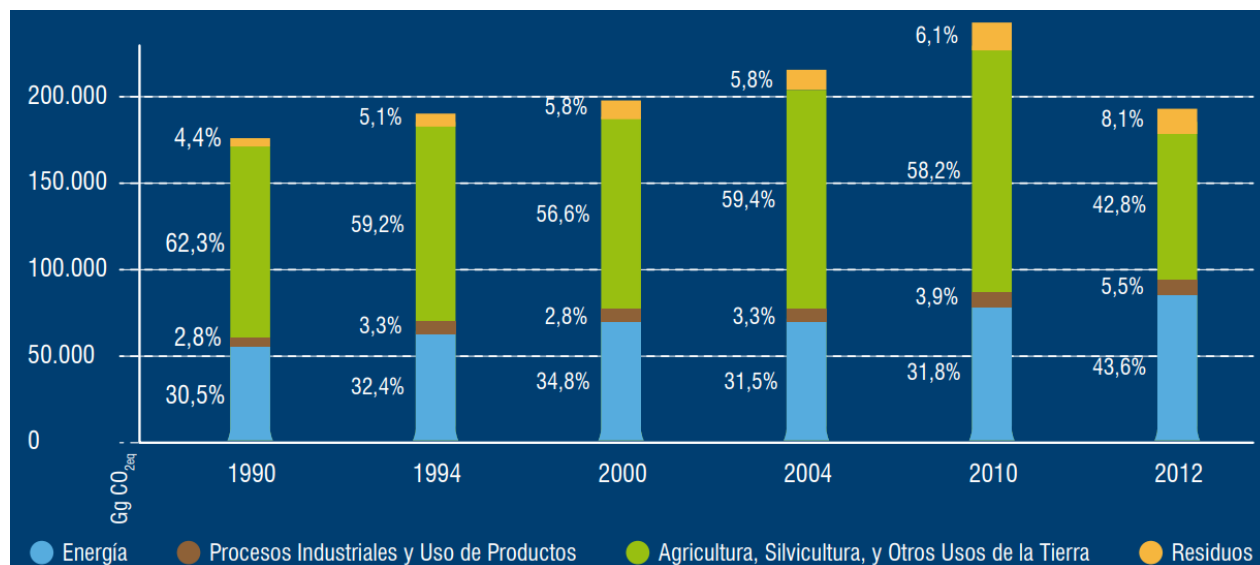


Figura 9. Emisiones totales por categoría en 1990, 1994, 2000, 2004, 2010 y 2012 (Tomado de [8])

Como estrategia para disminuir el impacto del CO₂, 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 CO₂eq 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 CH₄ han demostrado tener un impacto del orden de 25 veces mayor como GEI que el CO₂, 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 CO₂ (Kt) - Colombia», 2021. 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 CANCELLERÍA, «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

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

Índice de Figuras Capítulo 2

Figura 2. 1. Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1.....	25
Figura 2. 2. Comparación de ciclo de conducción para vehículos livianos en ruta vs. en laboratorio (banco de rodillos y vs. la referencia).....	25
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)	26
Figura 2. 4. Ciclo de conducción de camiones en Colombia con sus parámetros característicos	27
Figura 2. 5. Camión de prueba. Izq.: intervención del tubo de escape. Der.: con equipos de medición y carga simulada a bordo	28
Figura 2. 6. 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 con 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 pequeños (livianos) de dos ejes C2 (C2P) con capacidad de carga inferior a 5 toneladas, camiones grandes de dos ejes (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 camiones C2P (tres camiones con capacidad de carga inferior a 3 toneladas y con cilindradas entre 2771 cm³ y 3000 cm³, y uno con capacidad de 5 toneladas y 5192 cm³ de cilindrada), se midieron sus factores de emisión en banco dinamométrico de rodillos (chasis) y no en carretera, previa constatación de que no presentaban diferencias significativas con los 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, por una parte, determinar los FE de los vehículos C2P siguiendo los ciclos de conducción de camiones, típicos de repartición de paquetería de última milla, y, por otra parte, determinar los FE de buses pequeños con estos mismos camiones, pero sometidos al ciclo de conducción de buses, debido a que en Colombia el chasis y motor de estos camiones es el mismo reproduciéndolos en el banco de rodillos.

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

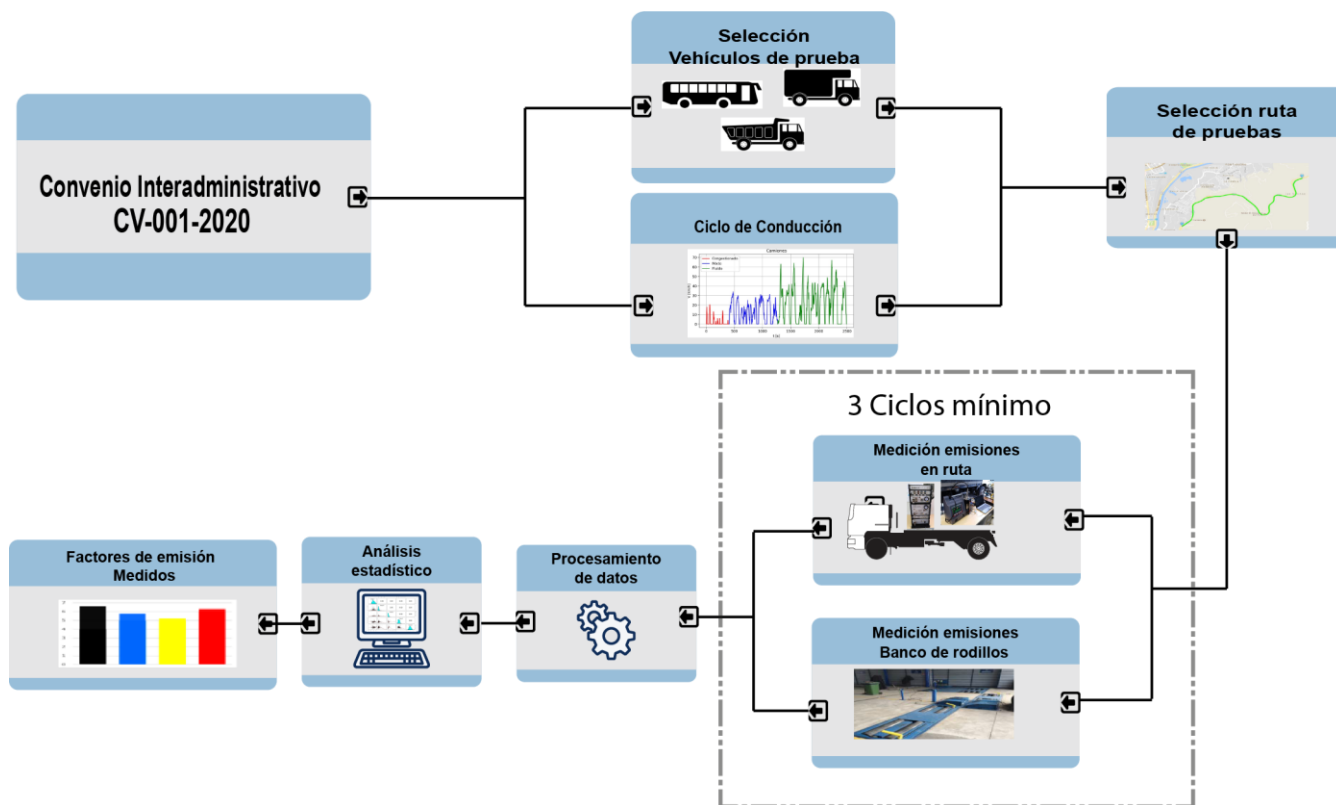


Figura 2. 1. Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1

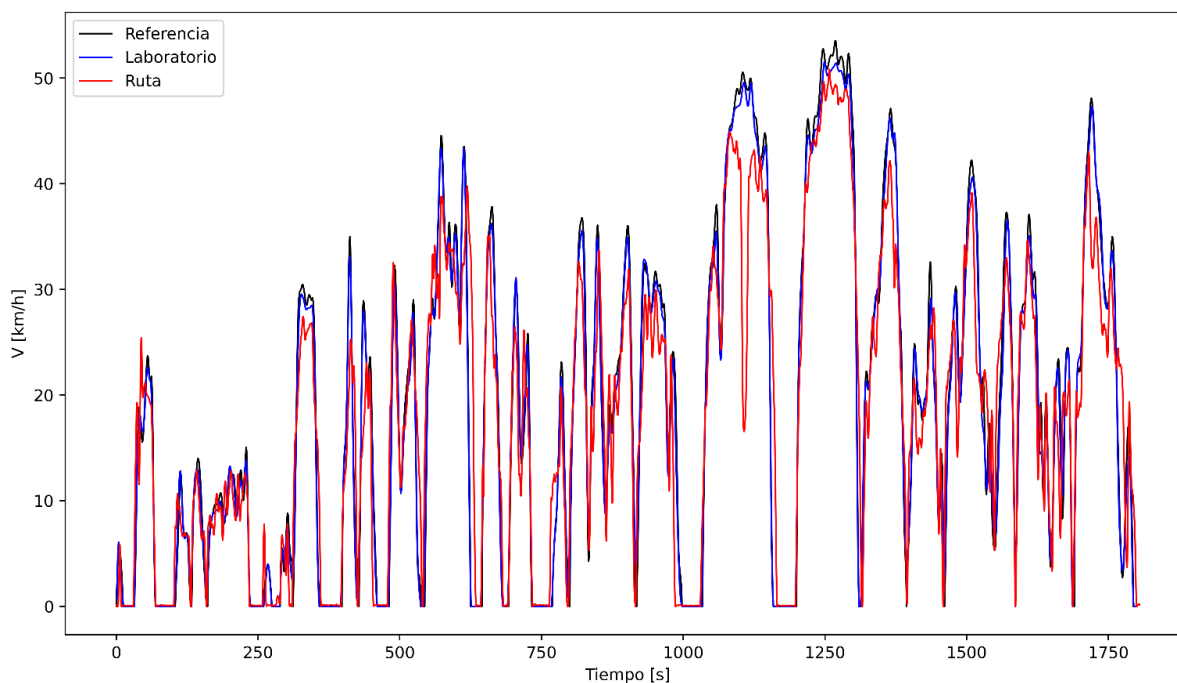


Figura 2. 2. Comparación de ciclo de conducción para vehículos livianos en ruta (rojo) vs. en laboratorio (banco de rodillos, azul) y vs. la referencia (negro).

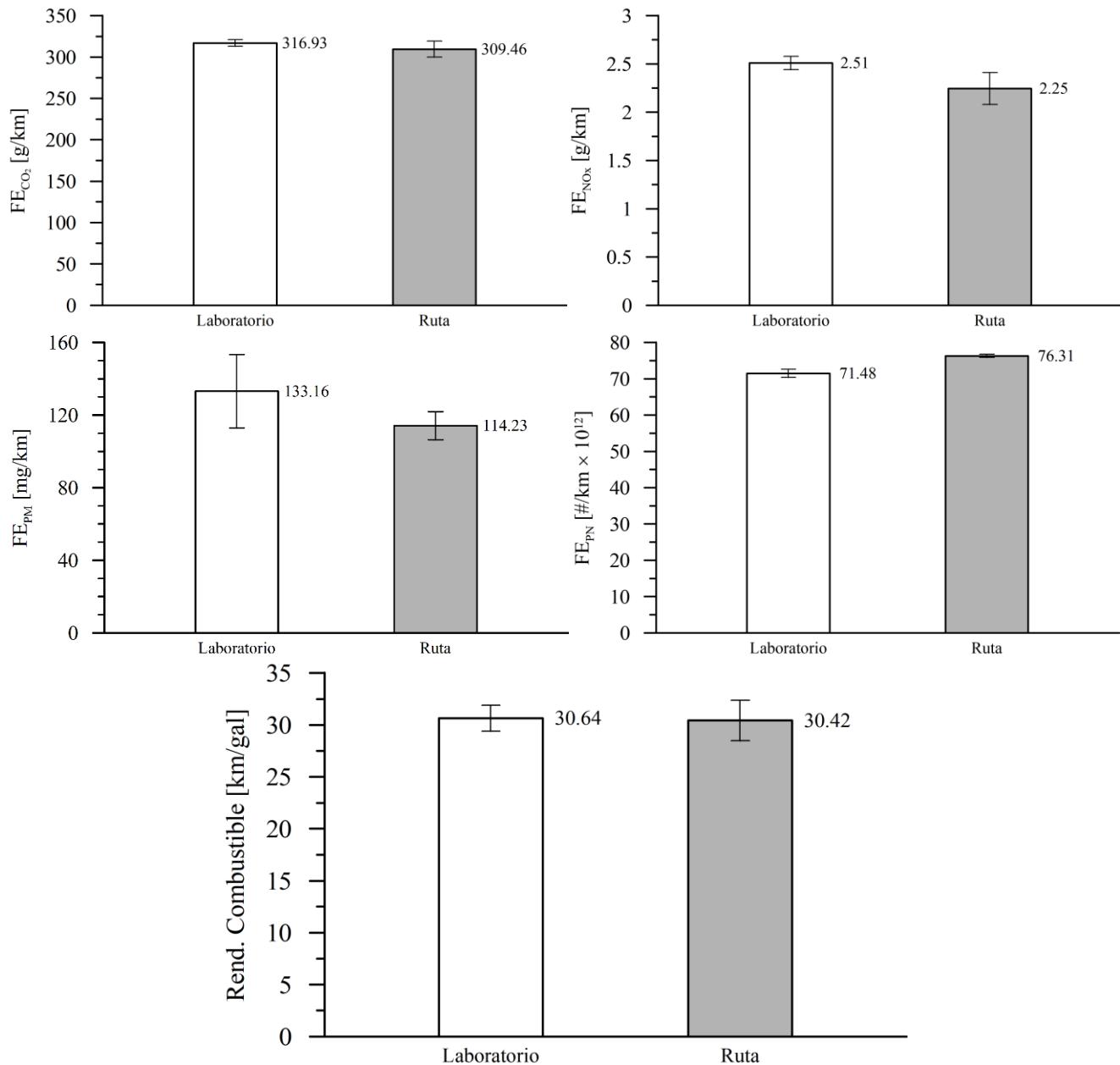
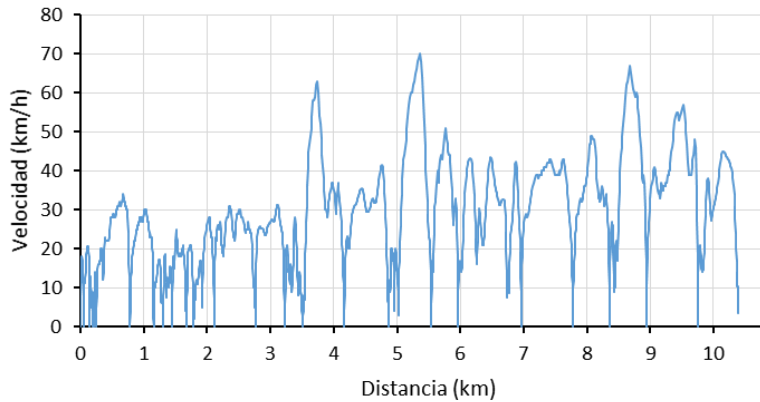


Figura 2. 3. Comparación de FE y rendimiento de combustible de una camioneta con motor diésel 2.8 litros, turboalimentada, tanto en ciclo de conducción en ruta como en ciclo de conducción en laboratorio (banco de rodillos)

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

La campaña experimental se llevó a cabo en el área metropolitana de Bucaramanga, ubicada a una altitud promedio de 1000 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 **Anexo 3**).



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

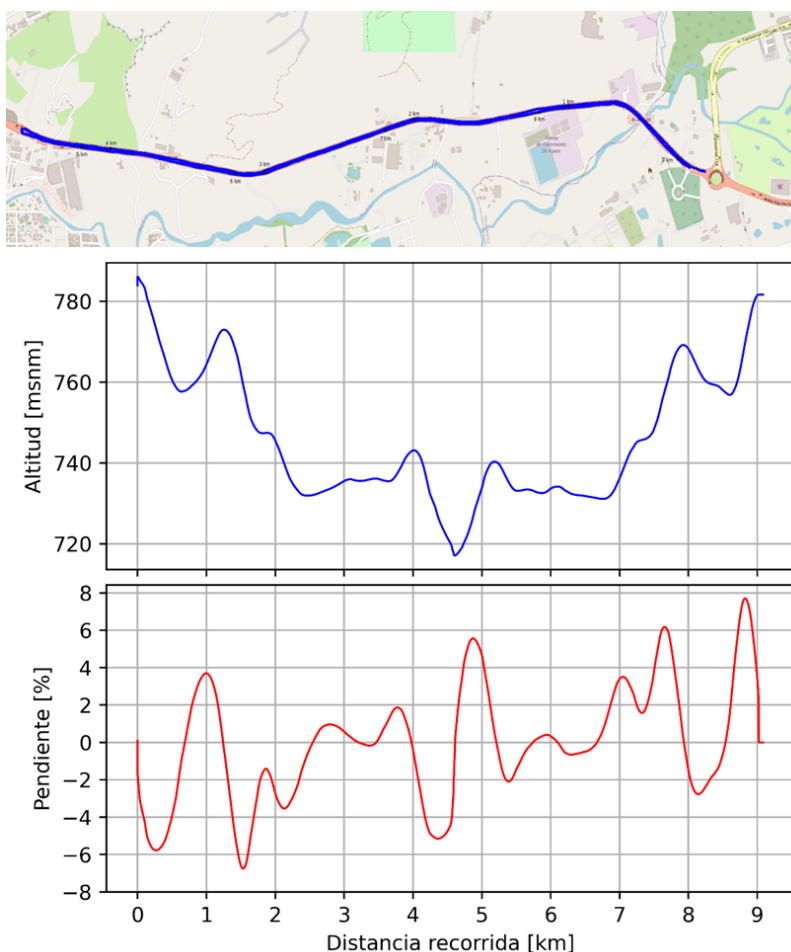


Figura 2. 6. Ruta de pruebas sobre el anillo vial entre Girón, Bucaramanga y Floridablanca (Santander).

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.

Se realizaron mínimo tres repeticiones del ciclo de conducción para cada uno de los vehículos con el fin de garantizar confianza estadística en los resultados. Se utilizó como parámetro de control el consumo de combustible promedio para cada ciclo, de manera que cuando la

variación entre un ciclo y otro era mayor al 3%, se procedía a continuar midiendo hasta obtener mínimo tres ciclos de conducción.

Los factores de emisión de los contaminantes gaseosos (CO, CO₂, THC, MNHC, NO y NO₂) fueron medidos en unidades de concentración con el equipo Horiba OBS ONE (% vol./vol. o en ppm), se midió adicionalmente el flujo instantáneo de gases de escape a través de un tubo de Pitot provisto con el mismo PEMS de Horiba por lo cual se hizo la conversión a masa total emitida a lo largo del ciclo según la Ecuación (1).

Para el material particulado, se tomó la masa total de los 14 impactadores del equipo de impactación eléctrica de baja presión (ELPI) de la marca Dekati, el cual reporta diámetros aerodinámicos de 6 nm hasta 2.5 μm. Dado que se tenía la masa total de material particulado emitida durante el ciclo de conducción, se procedió a dividirlo entre los kilómetros del ciclo (10.5 km aproximadamente) para reportar este factor de emisión en mg/km.

$$FE_{CO,CO_2,NO,NO_2,CH_4,THC,NMHC} = \frac{M_1 + \dots + M_{\mu c}}{d_1 + \dots + d_{\mu c}} \quad (1)$$

Donde FE_i es el factor de emisión en (g/km), CO es monóxido de carbono, CO₂ es dióxido de carbono, NO es monóxido de nitrógeno, NO₂ es dióxido de nitrógeno, CH₄ es metano, THC son hidrocarburos totales y NMHC son hidrocarburos NO metánicos. M_i en el lado derecho de la ecuación (1) es la masa emitida por el vehículo en cada micro-viaje que compone el ciclo de conducción, y que se calculó según la Ecuación (2) y d_i es la distancia recorrida en cada micro-viaje (se obtiene del ciclo de conducción a partir del tiempo y la velocidad instantánea).

$$M_{microviaje} = \frac{\rho_{gas}}{60 f} \dot{V} X_{gas} \quad (2)$$

La densidad del gas es (ρ_{gas}), $\dot{V}$ es el caudal instantáneo de gases medido con el tubo de pito y X_{gas} es la concentración del gas medido con el equipo Horiba OBS ONE.

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. 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

3. Resultados y discusión	32
3.1. Revisión de antecedentes sobre determinación de FE de vehículos pesados	32
3.2. Factores de emisión promedio de vehículos pesados para el área metropolitana de Bucaramanga	34
3.2.1. Gases de efecto invernadero (CO₂ y CH₄)	34
3.2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂ y NO_x)	38
3.2.3. Material particulado y número de partículas (PM y PN)	43
3.2.4. Hidrocarburos totales (THC)	48
3.2.5. Monóxido de carbono (CO)	51
3.3. FE de Tractocamiones tipo C3S2	54
3.4. FE de camiones de dos ejes grandes (C2G)	56
3.5. FE de camiones de dos ejes pequeños (C2P)	58
3.6. FE de buses	60
Referencias Capítulo 3	61

Índice de Figuras capítulo 3

Figura 3. 1. Comparación del CO₂ medido vs reportados en la literatura técnica	35
Figura 3. 2. CO₂ (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	36
Figura 3. 3. CH₄ (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	38
Figura 3. 4. Comparación de los NO_x medido vs reportados en la literatura técnica	40
Figura 3. 5. NO_x (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	41
Figura 3. 6. NO₂ (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	42
Figura 3. 7. Comparación del PM (en masa) medido vs reportados en la literatura técnica	44
Figura 3. 8. PM (mg/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	45
Figura 3. 9. PN (#/km-ton en billones) medidos para vehículos de carga/pasajeros	46
Figura 3. 10. Comparación del THC medido vs reportados en la literatura técnica	49
Figura 3. 11. THC (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	50
Figura 3. 12. Comparación del CO medido vs reportados en la literatura técnica	52
Figura 3. 13. CO (g/km-ton) medidos para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)	53

Índice de Tablas capítulo 3

Tabla 3. 1. Experiencias con el uso de PEMS en mediciones a bordo de vehículos pesados	33
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	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 pesados 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 estadístico 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	Act. Vidad	Peso (ton)	Norma de emisión	Modelo	Ruta	Consumo combust ble	CO ₂ (g/km)	NO _x (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% (NO _x) 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	Tractocamió	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	5,4-9,5	
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	Inf luencia del # de pasajeros sobre las emisiones y el consumo de combust ble en condiciones reales
Italia	Mendoza et al 2017	1	Camión	---	Euro VI	---	Urbano, rural y autopista	---	---	---	---	---	---	Emisiones en g/kW-h NO _x ; emisiones en ppm ciclo WHTC: NH ₃ , N ₂ O 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 part ículas sólidas
Europa	Giechaskiel 2018	4	Trabajo pesado	---	Euro VI	---	Urbano, rural y autopista	---	---	---	---	---	---	Evaluó número de part ículas 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 part ículas ultraf has 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 + biodiesel 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 combust ble buses en uso. Grandes alt tudes
Italia	Giechaskiel 2019	1	Recolector basura	15.5	Euro VI	2018	Urbana	---	---	0,1 a 2,1	---	---	---	Emisione 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 alt tudes. Ciclos propios región Valle de Aburrá
			Camiones Carga			1993-2017		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	
			Volquetas			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
			Buses			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	
			Camión C2 mediano			2018		17 km/gal	571.4	4.64	123	1.51	11.2	
			Camiones C2 Grandes			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	
			Tractocamiones			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 ³)	Carga (Ton)	Rend. (km/gal)	CO ₂ (g/km)	CH ₄ (mg/km)	NO (g/km)	NO ₂ (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		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

3.2.1. Gases de efecto invernadero (CO₂ y CH₄)

Como era de esperarse, el factor de emisión de CO₂ en g/km crece fuertemente con el tamaño del motor (cilindrada) debido al incremento del consumo de combustible. En general los factores de CO₂ 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 CO₂ 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 1000 msnm), lo que incrementa el consumo de combustible con las pendientes. Obsérvese que, para los camiones C2P, el CO₂ 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 CO₂ 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.

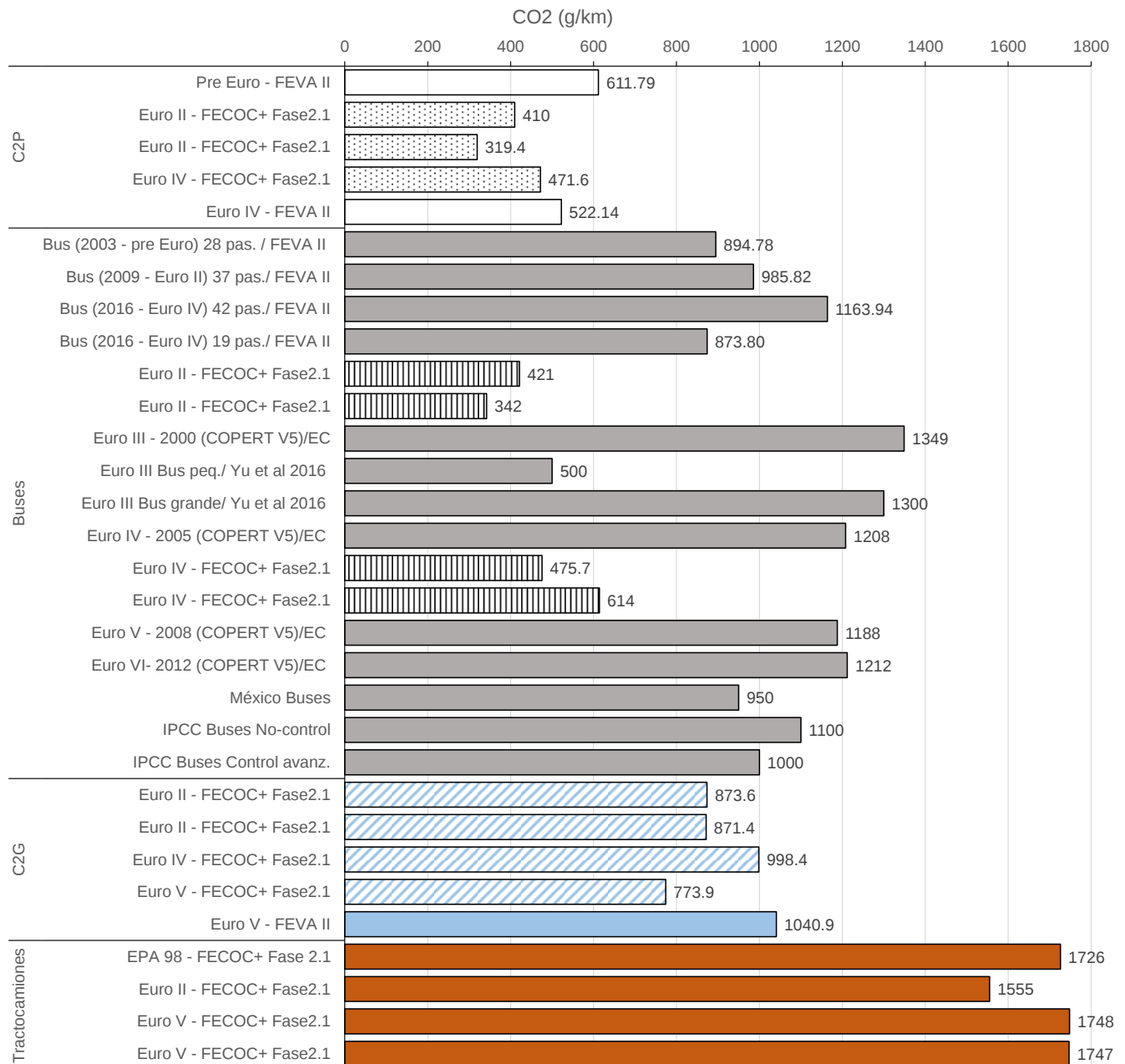


Figura 3. 1. Comparación del factor de emisión de CO₂ medido vs reportados en la literatura técnica

La emisión de CO₂ de los buses fue mayor en promedio que el de los camiones pequeños de 2 ejes (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 CO₂. 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 CO₂ registrados con una frecuencia de 10 muestras por segundo.

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 gCO₂/km-ton emiten, tal como se muestra en la **Figura 3. 2** en la parte inferior.

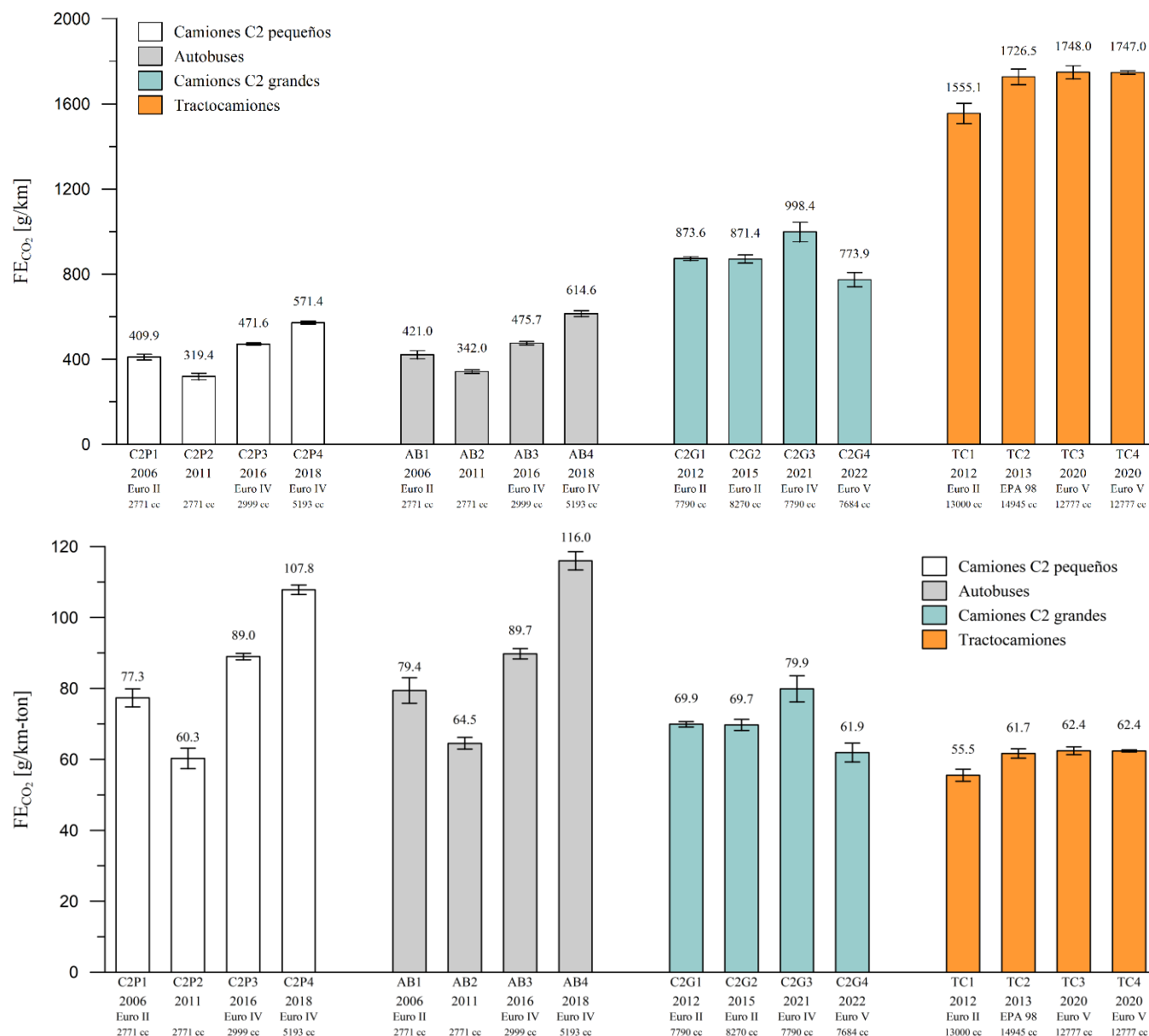


Figura 3. 2. Factor de emisión de CO₂ medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (g/km). Inferior en (g/km-ton) (altitud aprox. 900 msnm)

Los resultados permiten concluir que las emisiones de CO₂ tienen 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 pequeño 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** inferior), llegando a ser en algunos casos del orden de la mitad de CO₂ por cada kilómetro y cada tonelada de carga para el tractocamión frente al camión pequeño C2P, 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 CO₂ 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 en los camiones más nuevos, 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 incremento de CO₂ con la mejora tecnológica de los vehículos también podría obedecer a la estrategia de inyección implementada en los más nuevos, los cuales tienden a retrasar el ángulo de inicio de la inyección hacia las cercanías del punto muerto superior. Este inicio de inyección retrasado disminuye los óxidos de nitrógeno, pero aleja al motor de su punto de máxima eficiencia.

El otro gas de efecto invernadero medido fue el metano (CH₄). Como se muestra en la parte superior de la **Figura 3. 3.**, el factor de emisión varió desde un mínimo de 2.45 mg/km (es decir, 61.3 gCO_{2,equiv.}/km) para el camión grande de dos ejes C2G Euro V, modelo 2022 de 7684 cm³ de cilindrada, hasta un máximo de 51.5 mg/km (correspondiente a 1287.5 mgCO_{2,equiv.}/km) para el bus Euro II modelo 2011 de 2771 cm³ 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 camiones provistos con sistema de reducción catalítica selectiva (SCR), utilizados para disminuir los óxidos de nitrógeno (Euro V), fueron los que lograron la mayor reducción de emisión de metano entre los 16 vehículos medidos. Este resultado señala la importancia de la presencia de los sistemas SCR en la reducción de emisiones de NO_x, y por lo tanto, que las autoridades respectivas deberían buscar la forma de incluir este gas contaminante en las pruebas de inspección técnica periódica de vehículos diésel, las cuales no están contempladas actualmente en la regulación (resolución 910 de 2008).

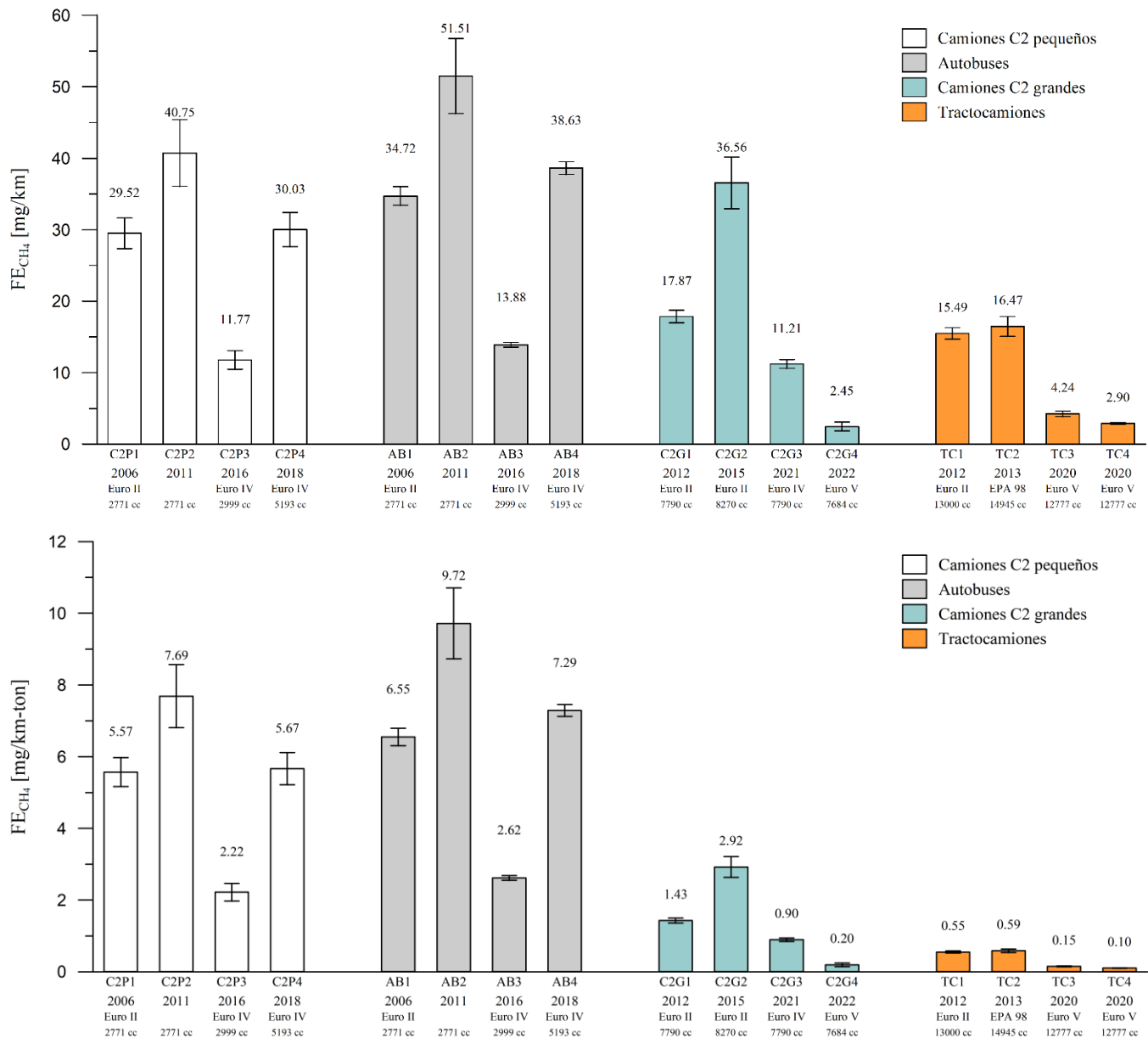


Figura 3. 3. Factor de emisión de CH₄ medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (mg/km). Inferior en (mg/km-ton) (altitud aprox. 900 msnm).

3.2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂ y NO_x)

En la **Figura 3. 4** se comparan los NO_x 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_x (valores máximos cercanos a los 25 g/km). La formación de NO_x 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 redunda en mayor emisión de NO_x, pero, a su

vez, en menor emisión de material particulado. En tecnologías antiguas como la Euro II, es común que los fabricantes/ensambladores se enfocaran por una parte en obtener mayor eficiencia de consumo de combustible, y por otra en disminuir el material particulado a costa de aumentar las emisiones de NOx. El PM está controlado indirectamente mediante la opacidad de humo de las pruebas de inspección técnica periódica, mientras que el NOx 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, emitieron cerca de 10 g/km. Llama la atención que los NOx, 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 pequeños de dos ejes (C2P1 y C2P2) con igual cilindrada (2771 cm³) e igual tecnología de control de emisiones (Euro II), uno modelo 2006 (5.72 gNOx/km) y otro modelo 2011 (3.39 gNOx/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 presentó la menor emisión de NOx (2.59 g/km) de todos los camiones pequeños de dos ejes (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 NOx medidos a los camiones grandes de dos ejes 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.

Los tractocamiones Euro V provistos con SCR, emitieron menos NOx en g/km-ton (aprox. 380 mg/km-ton), frente al valor máximo cercano a 1100 mgNOx/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 NOx similares al resto de camiones C2G medidos, lo que sugiere, por lo nuevo del vehículo, una alta probabilidad que el sistema haya sido intervenido o que se encuentre defectuoso. 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.

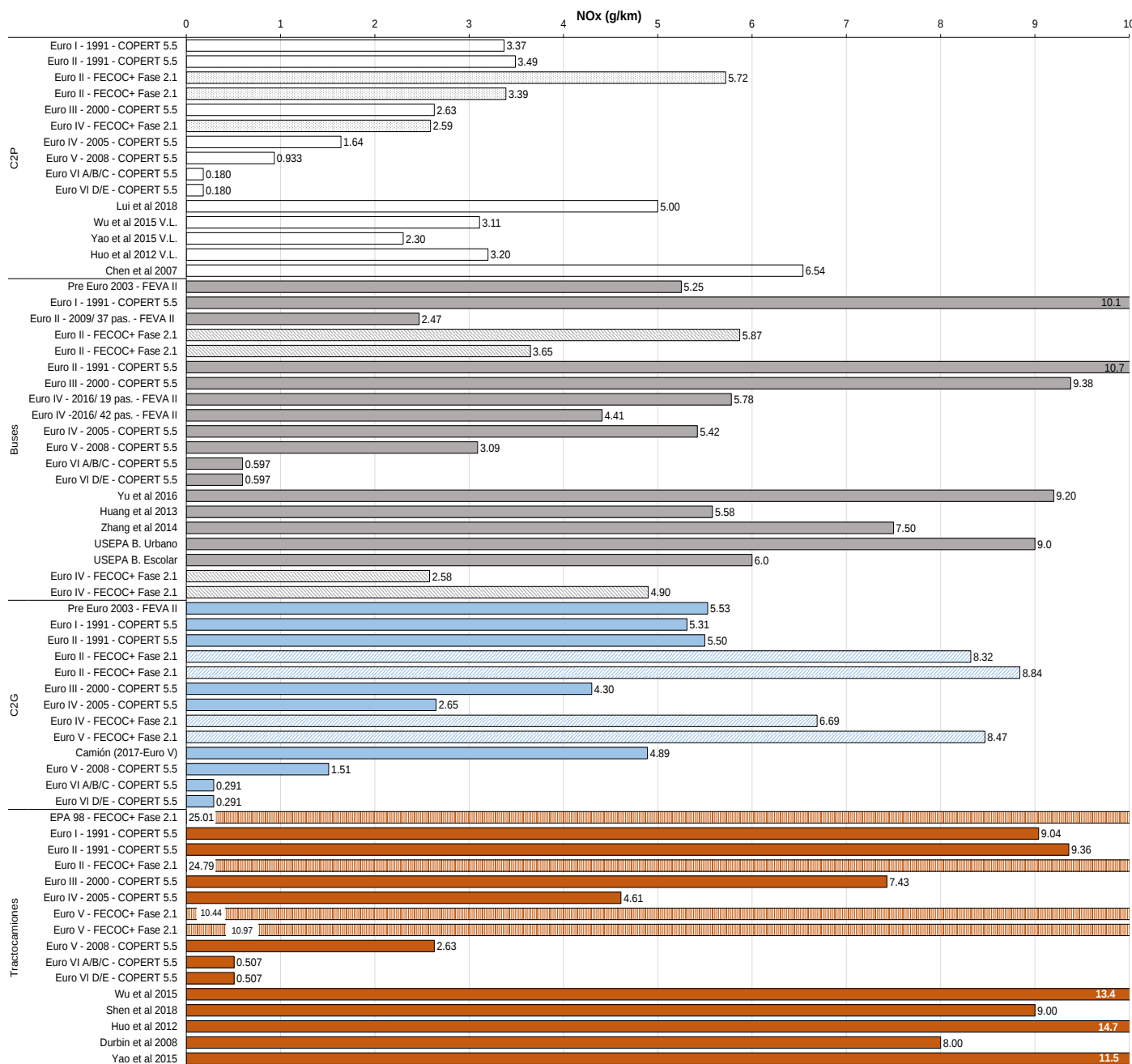


Figura 3. 4. Comparación de factores de emisión de NOx medidos vs reportados en la literatura

En la **Figura 3. 6** se muestra que la emisión de NO₂ equivalió aproximadamente a la mitad (50%) de los NOx. De los óxidos de nitrógeno (NO + NO₂ = 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 (NO₂), regulado por la OMS, y los nitroderivados (Nitro-PAH) –nitro hidrocarburos aromáticos policíclicos. El NO₂, 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 NO₂ 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 NO₂ puede tener un efecto en la mortalidad tan grande como el del material particulado (PM_{2.5}) [8].

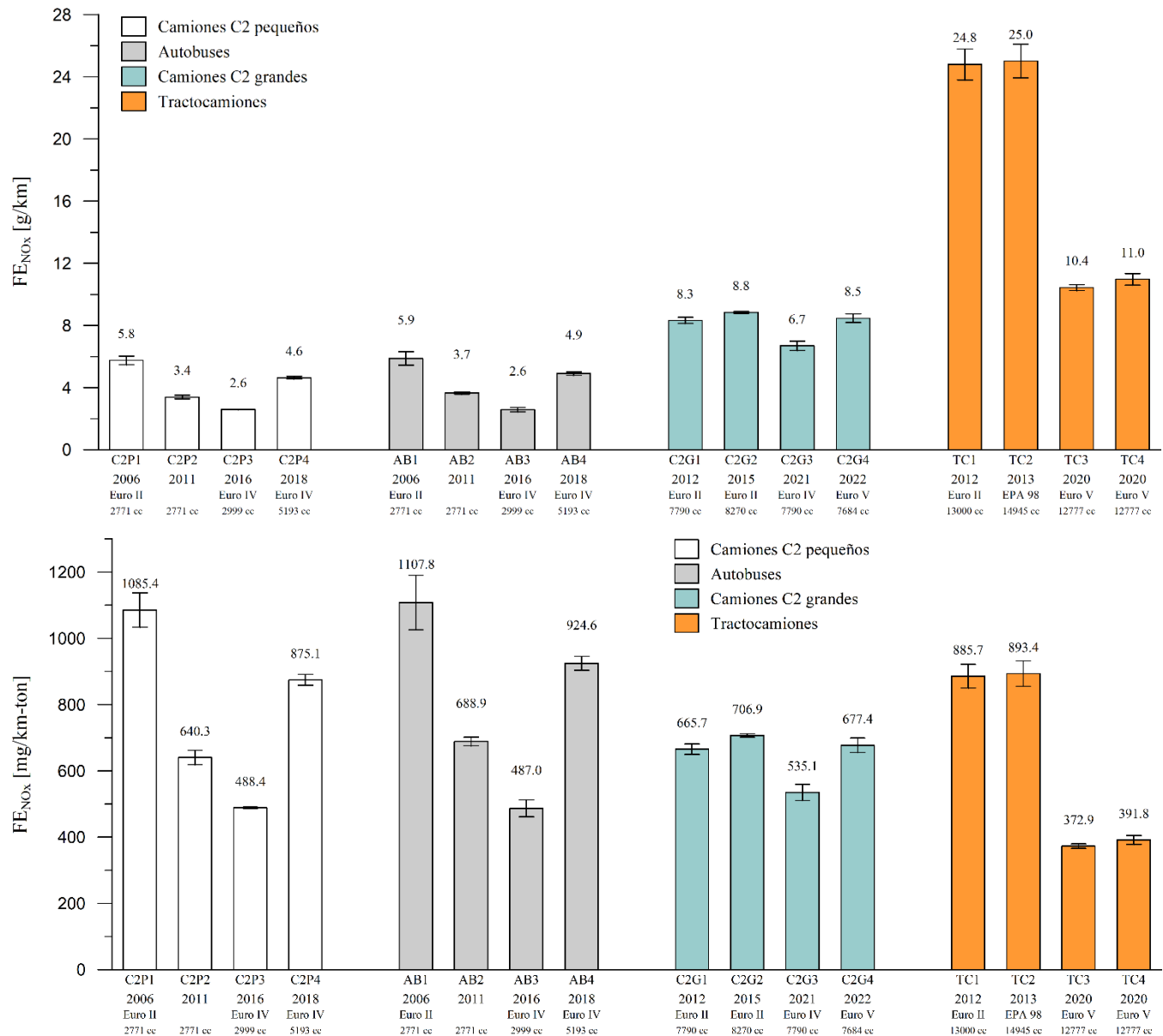


Figura 3. 5. Factor de emisión de NO_x medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (g/km). Inferior en (mg/km-ton) (altitud aprox. 900 msnm).

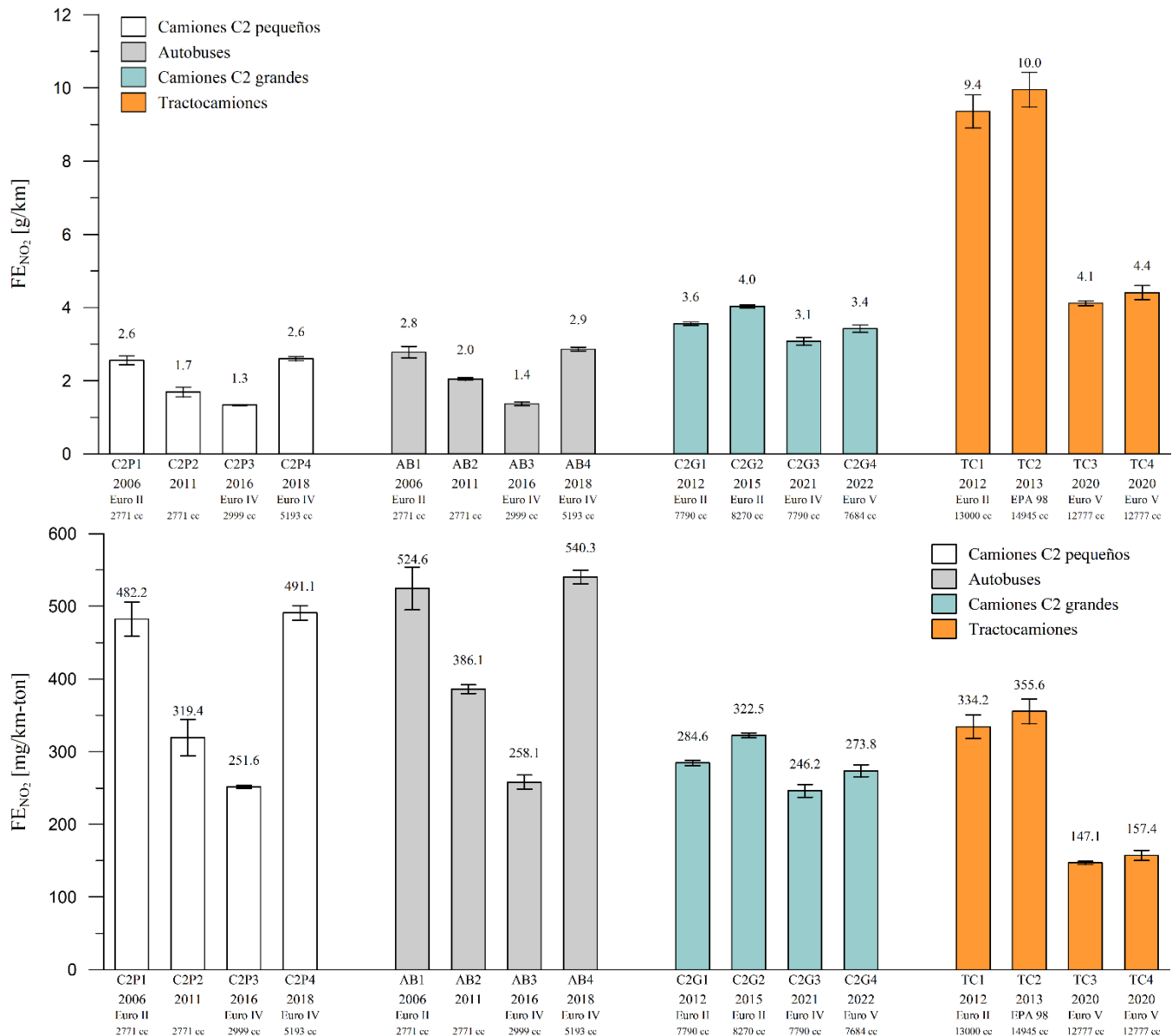


Figura 3. 6. Factor de emisión de NO₂ medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (g/km). Inferior en (mg/km-ton) (altitud aprox. 900 msnm).

Numerosos estudios de salud pública demuestran que el NO₂ 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 NO₂ 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 NO₂, recientemente publicada por la Organización Mundial de la Salud, sugiere disminuir la exposición promedio anual de 40 µg/m³ a 10 µg/m³, mientras que la exposición diaria se redujo de 120 µg/m³ en la guía del año 2005, a 25 µg/m³ 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_{2.5} de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que, para posibles episodios críticos de calidad del aire, sugiere una exposición no mayor a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un periodo de 24 horas. PM_{2.5} 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_{2.5}.

Por otra parte, la concentración del número de partículas, la cual hace referencia a la cantidad del número de partículas que contiene un centímetro cubico 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). La **Figura 3. 7**

muestra una disminución del PM con la mejora tecnológica de los camiones de dos ejes grandes (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 cm³ 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).

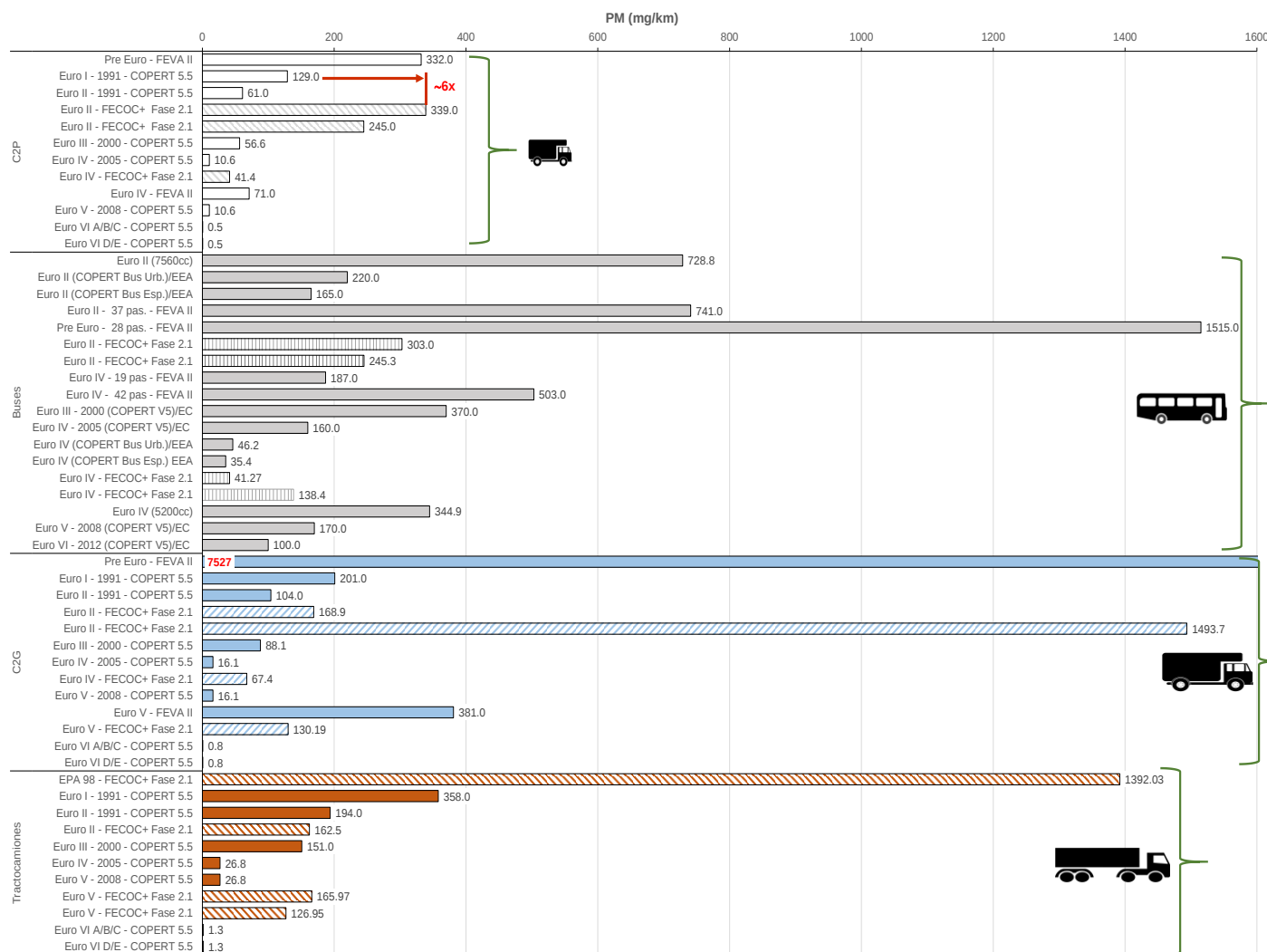


Figura 3. 7. Comparación del PM (en masa) medido vs reportados en la literatura técnica

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**.

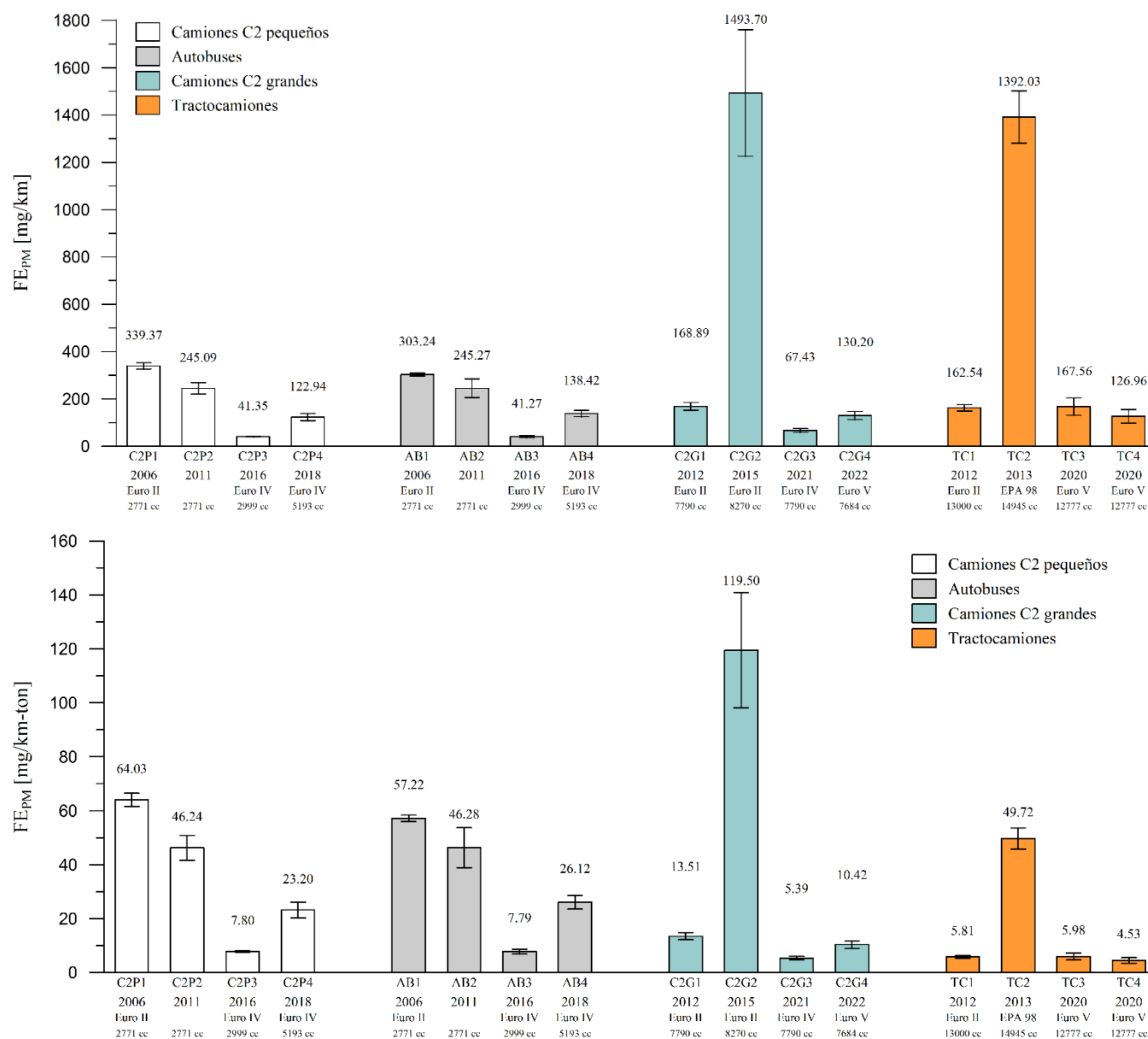


Figura 3. 8. Factor de emisión de material particulado (PM) medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (mg/km). Inferior en (mg/km-ton) (altitud aprox. 900 msnm).

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 $\#/km$) como se muestra en la **Figura 3. 9**.

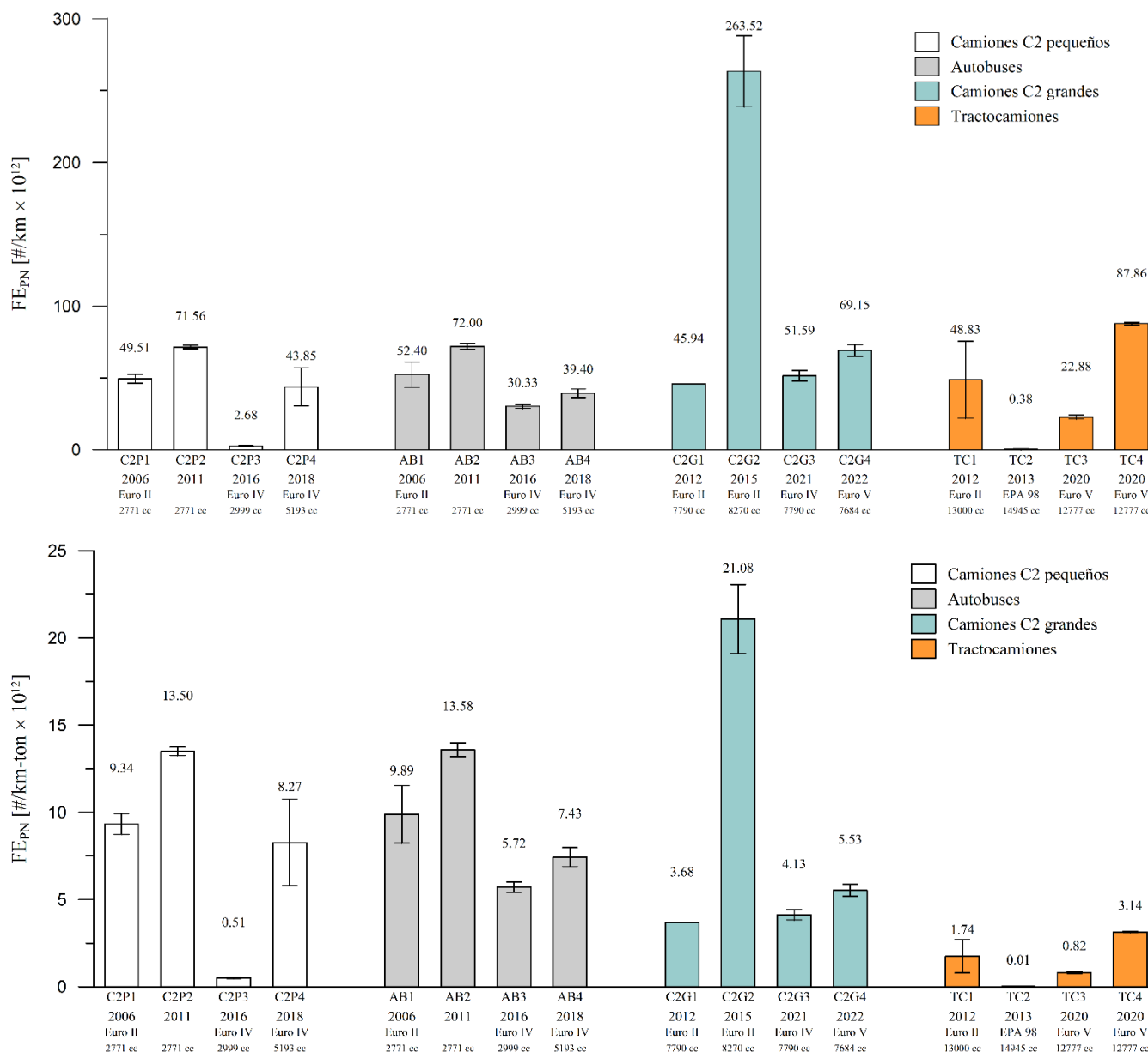


Figura 3. 9. Factor de emisión de número de partículas (PN) medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en ($\#/km$). Inferior en ($\#/km-ton$). Datos en billones de partículas. Altitud aprox. 900 msnm.

Puede darse el caso, como el tractocamión TC2 modelo 2013 con tecnología EPA 98 de 14945 cm^3 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^3 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 $\#/cm^3$ (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.

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_{2.5}), 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 ($\#/cm^3$) 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 $\#/cm^3$ (media de 24 horas

de exposición), mientras que elevadas concentraciones podrían ser mayores a 10.000 $\#/cm^3$ (media de 24 horas de exposición) o 20.000 $\#/cm^3$ (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 $\#/cm^3$ (media 24 horas)
- Concentración alta de PN: > 10.000 $\#/cm^3$ (media 24 horas)
- Concentración alta de PN: > 20.000 $\#/cm^3$ (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°C seguida de un detector de ionización de llama (FID por sus siglas en inglés). Su composición varía desde el más liviano (metano o CH_4), hasta aquellos que se mantienen en fase vapor a la temperatura de 190°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].

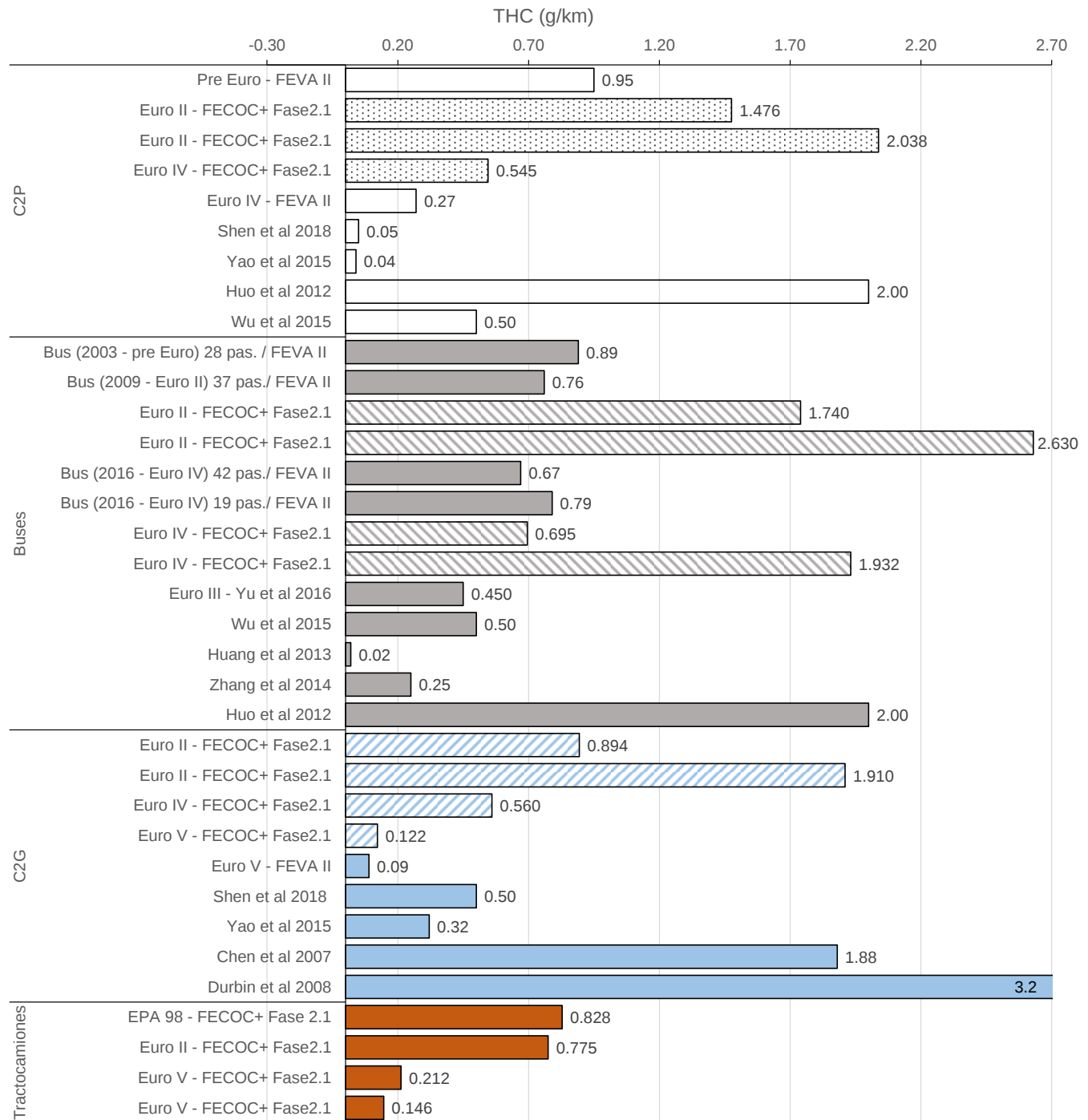


Figura 3. 10. Comparación del THC medido vs reportados en la literatura técnica

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 cm³ 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.

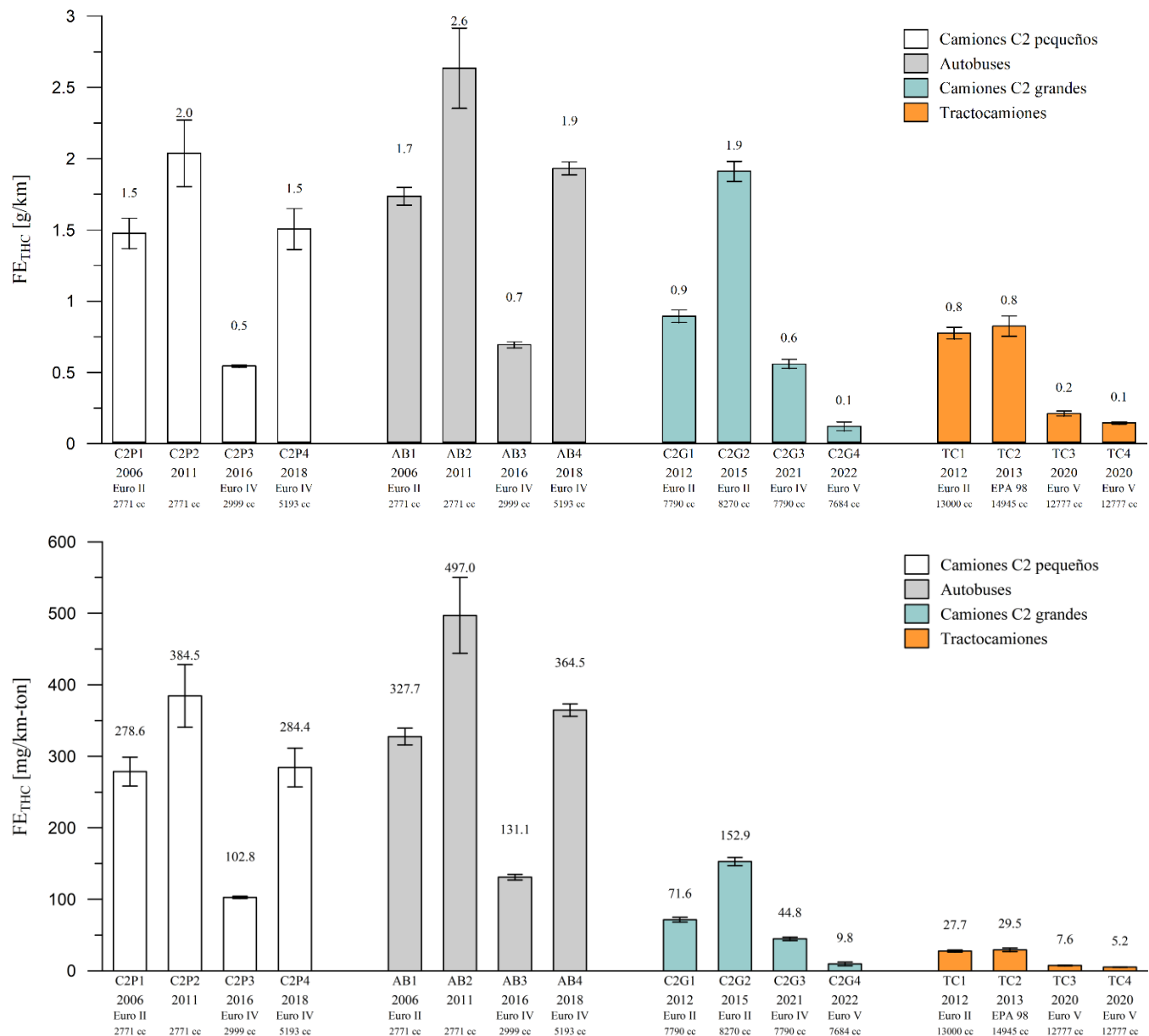


Figura 3. 11. Factor de emisión de hidrocarburos totales (HC) medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (g/km). Inferior en (mg/km-ton). Altitud aprox. 900 msnm.

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 CO₂ 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/m³ por un periodo no mayor a 24 horas y, en todo caso, no arriesgarse a inhalaciones mayores a 10 mg/m³ en una jornada de 8 horas, o de 100 mg/m³ 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 cm³ 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 cm³ 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**).

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 de CO, tanto en g/km (parte superior), como en g/km-ton, es decir al dividir por cada tonelada de carga (incluido el peso del vehículo). No se observó una tendencia en el factor de emisión del CO con la tecnología de control de emisiones de los camiones/buses.

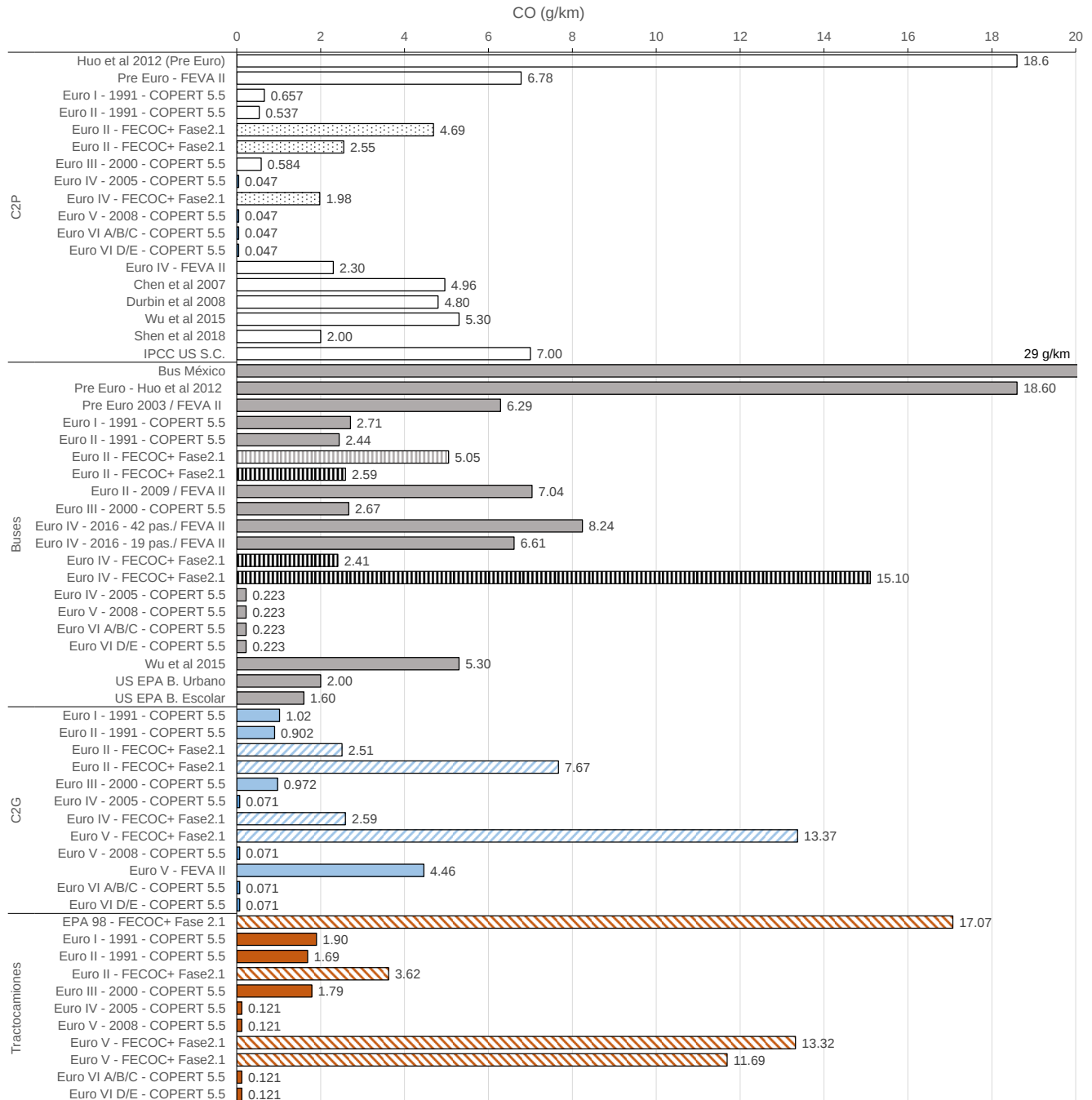


Figura 3. 12. Comparación del CO medido vs reportados en la literatura técnica

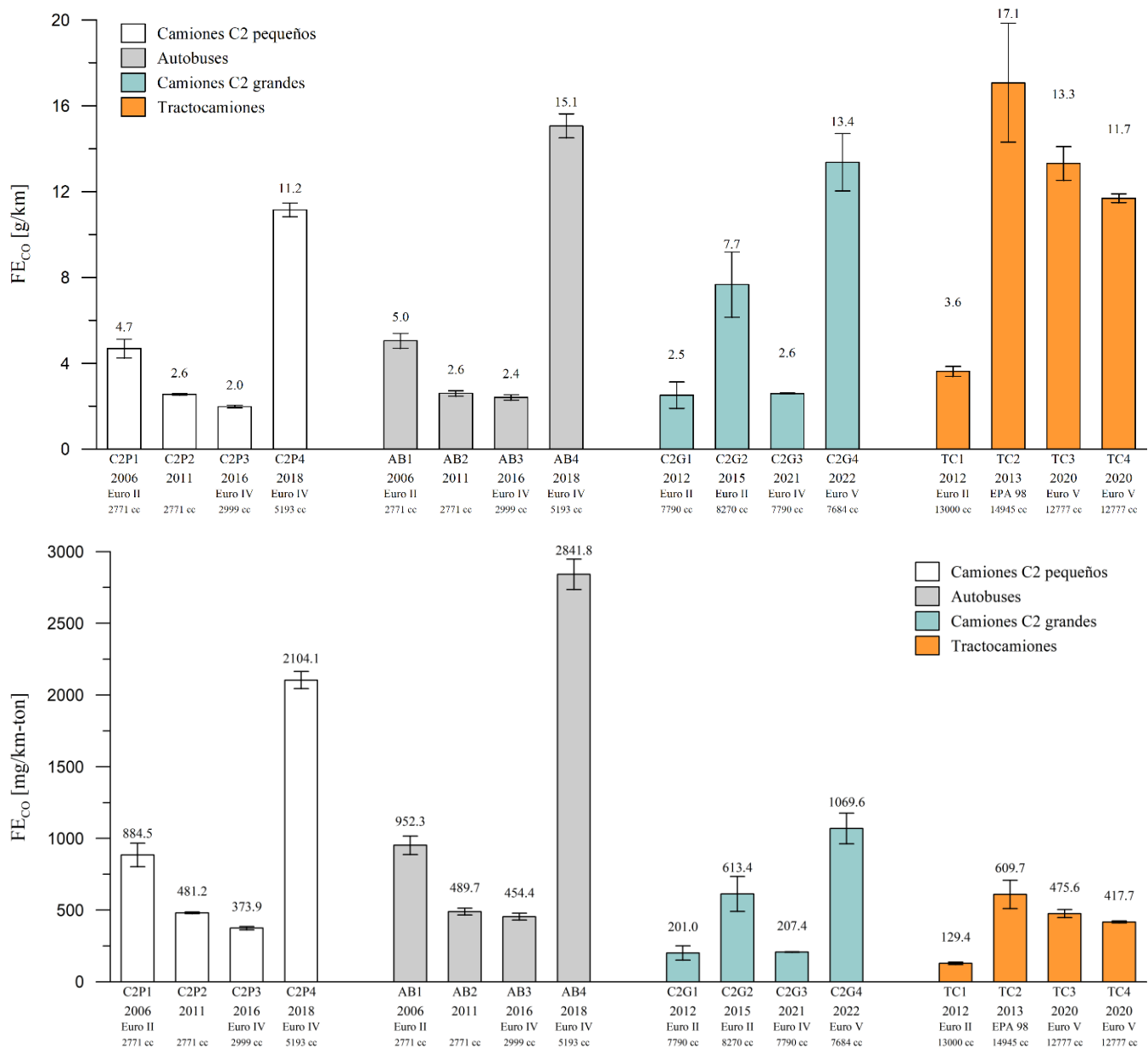
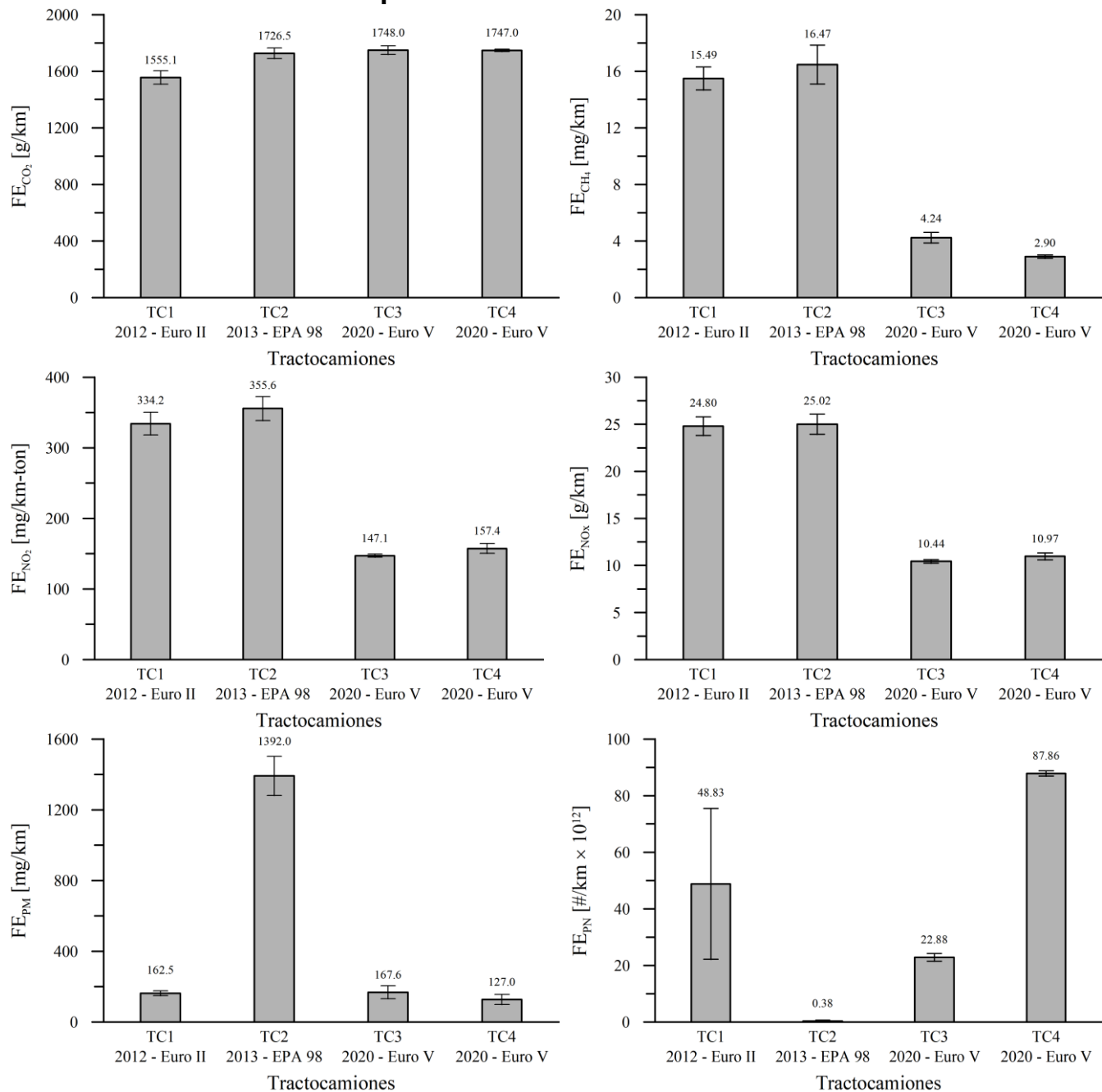
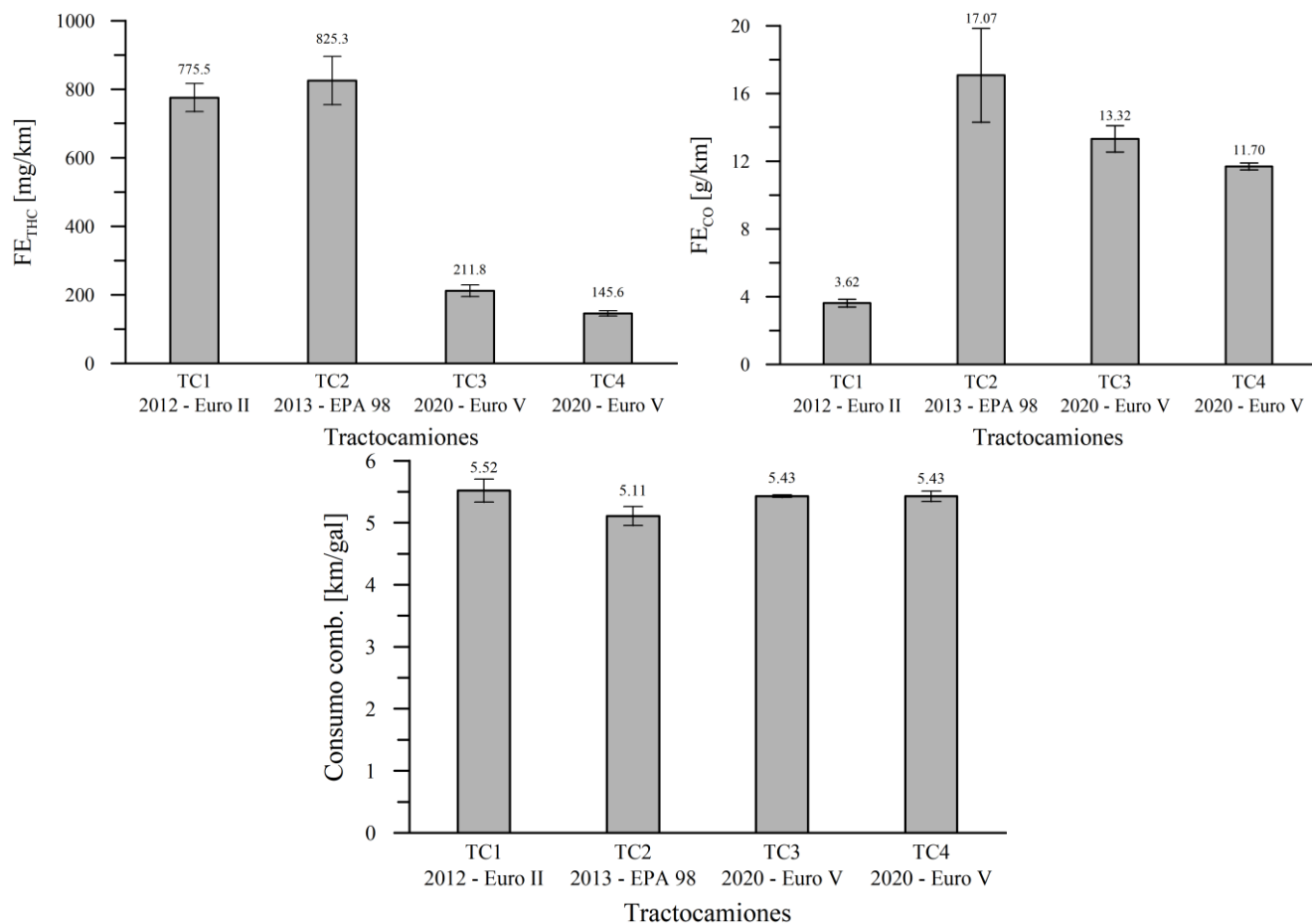


Figura 3.13. Factor de emisión de monóxido de carbono (CO) medido en vehículos de carga/pasajeros. Superior en (g/km). Inferior en (mg/km-ton). Altitud aprox. 900 msnm.

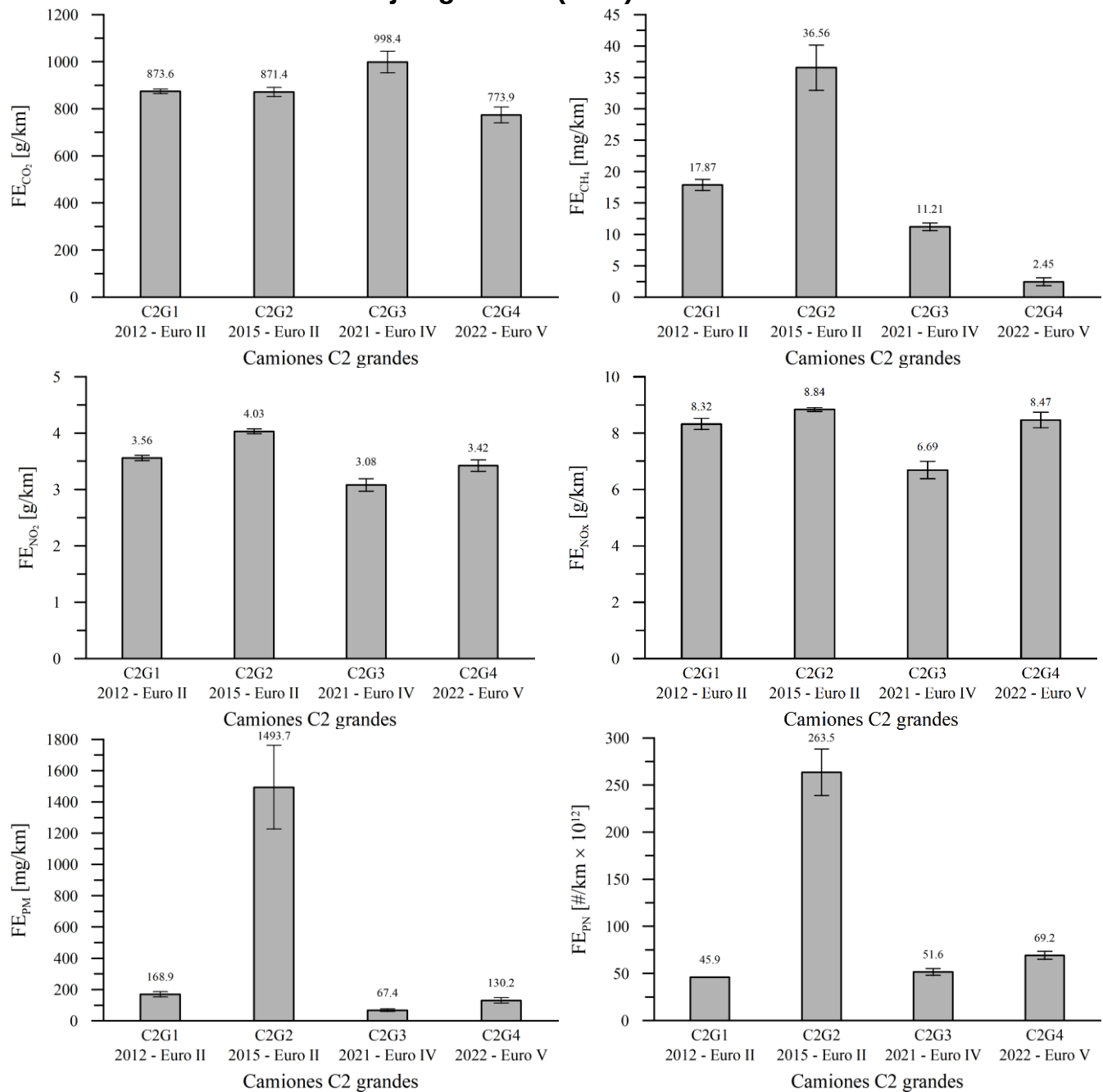
A continuación, se representan gráficamente los factores de emisión por cada tipología de vehículo pesado medido en este proyecto, a saber, tractocamiones, camiones de dos ejes grandes (C2G), camiones de dos ejes pequeños (C2P) y buses (AB). Se han separado según sean gaseosos de efecto invernadero (CO₂ y CH₄), tóxicos/cancerígenos (NO₂ y NO_x), 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.

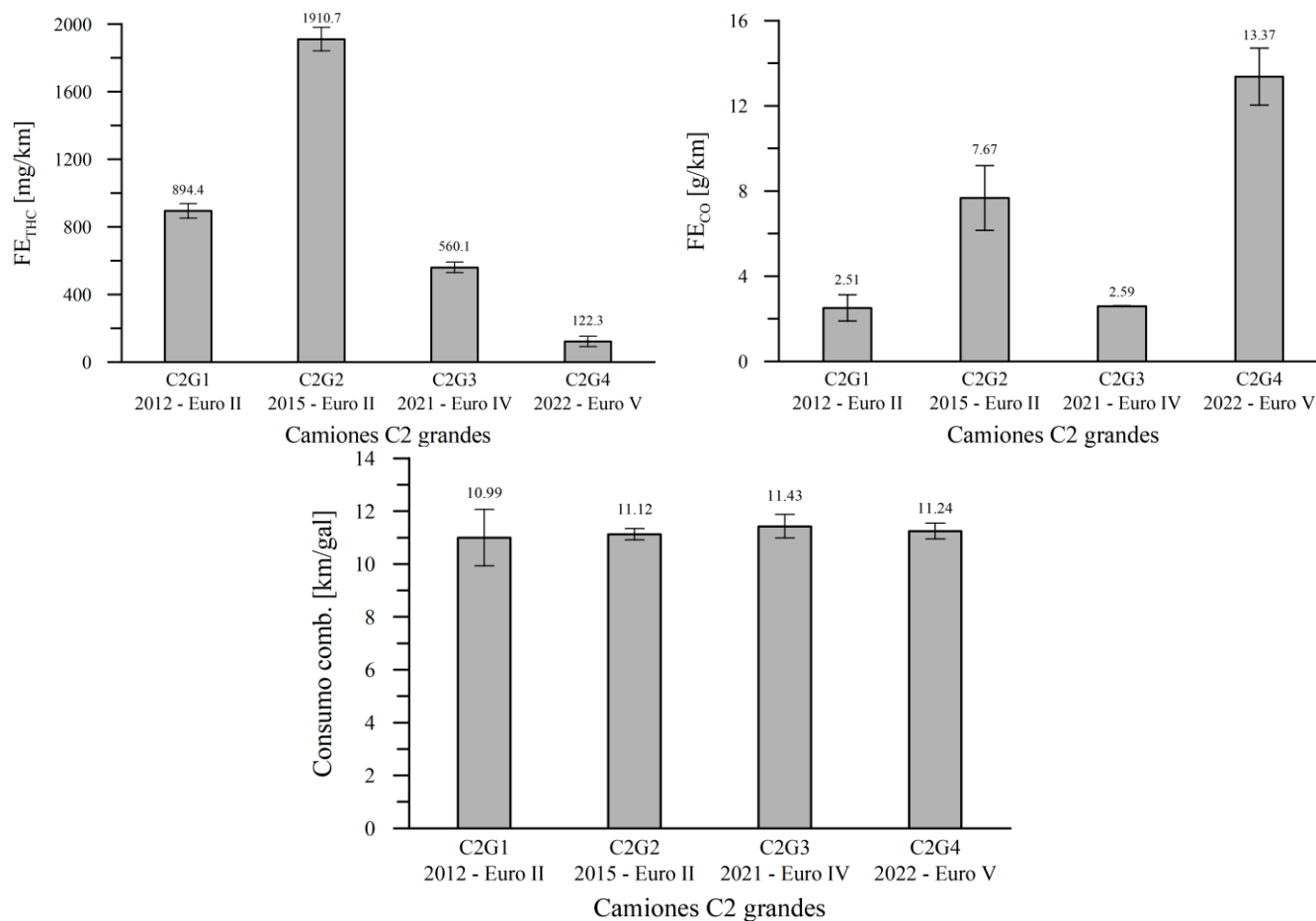
3.3. FE de Tractocamiones tipo C3S2



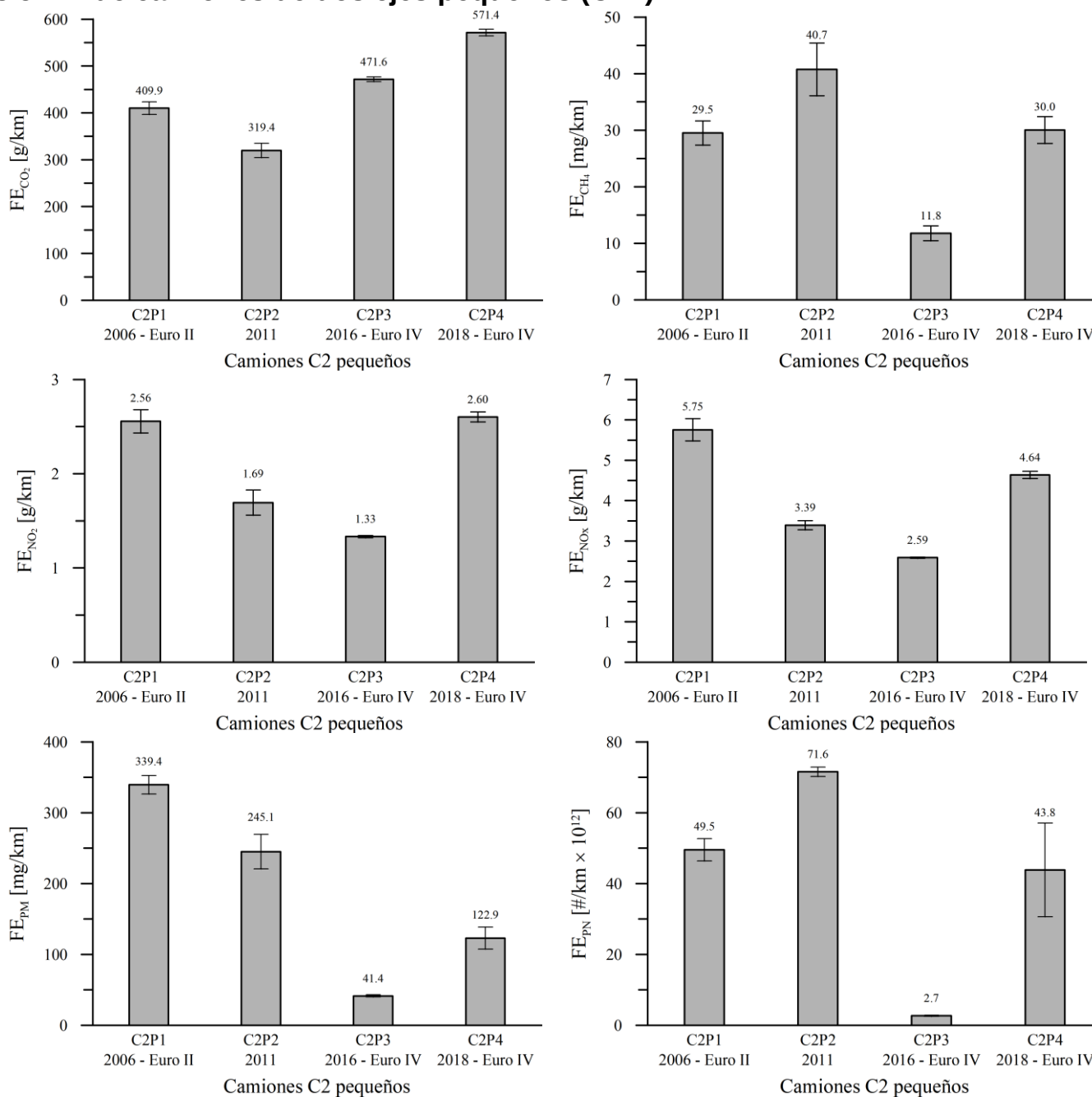


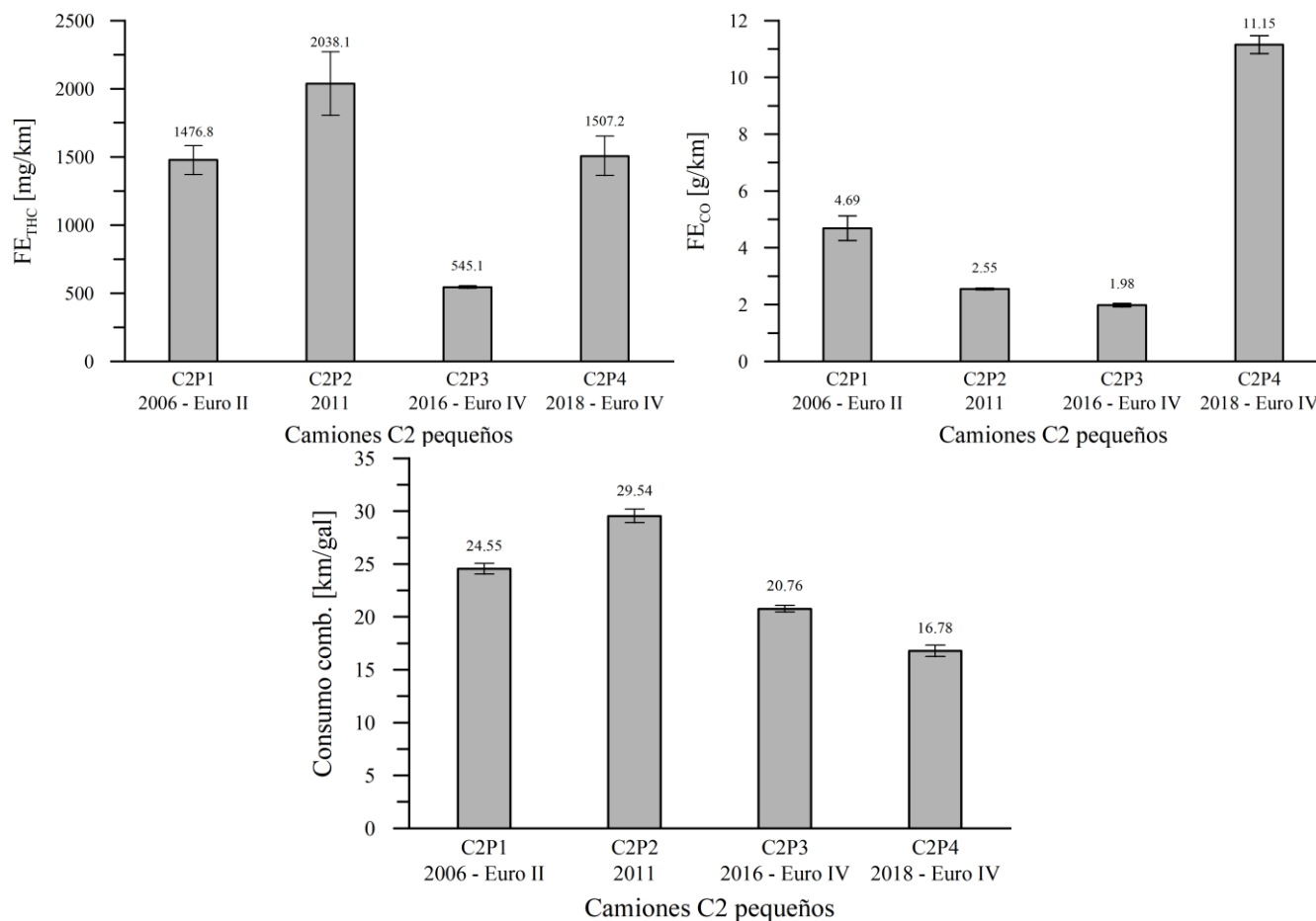
3.4. FE de camiones de dos ejes grandes (C2G)



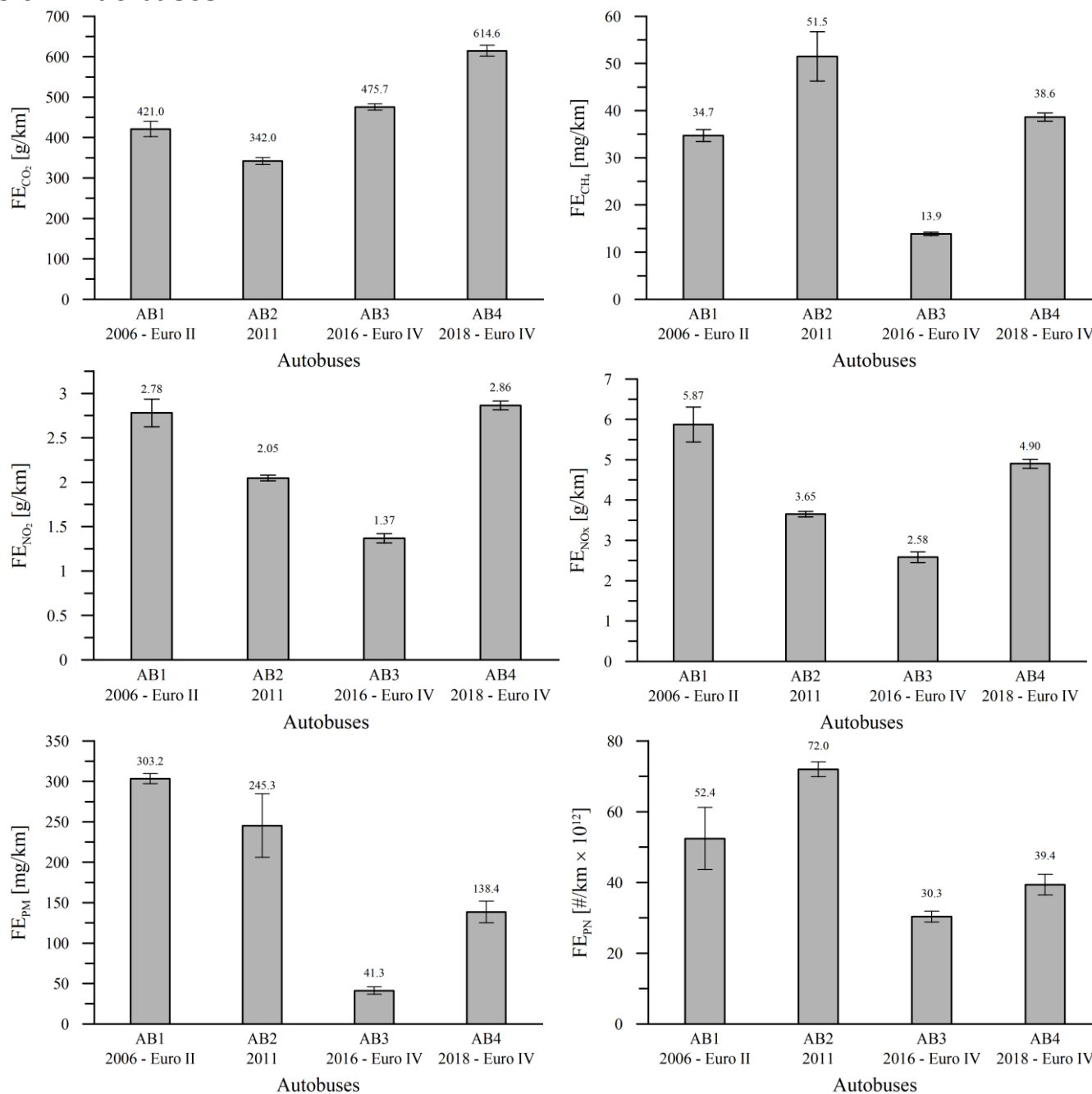


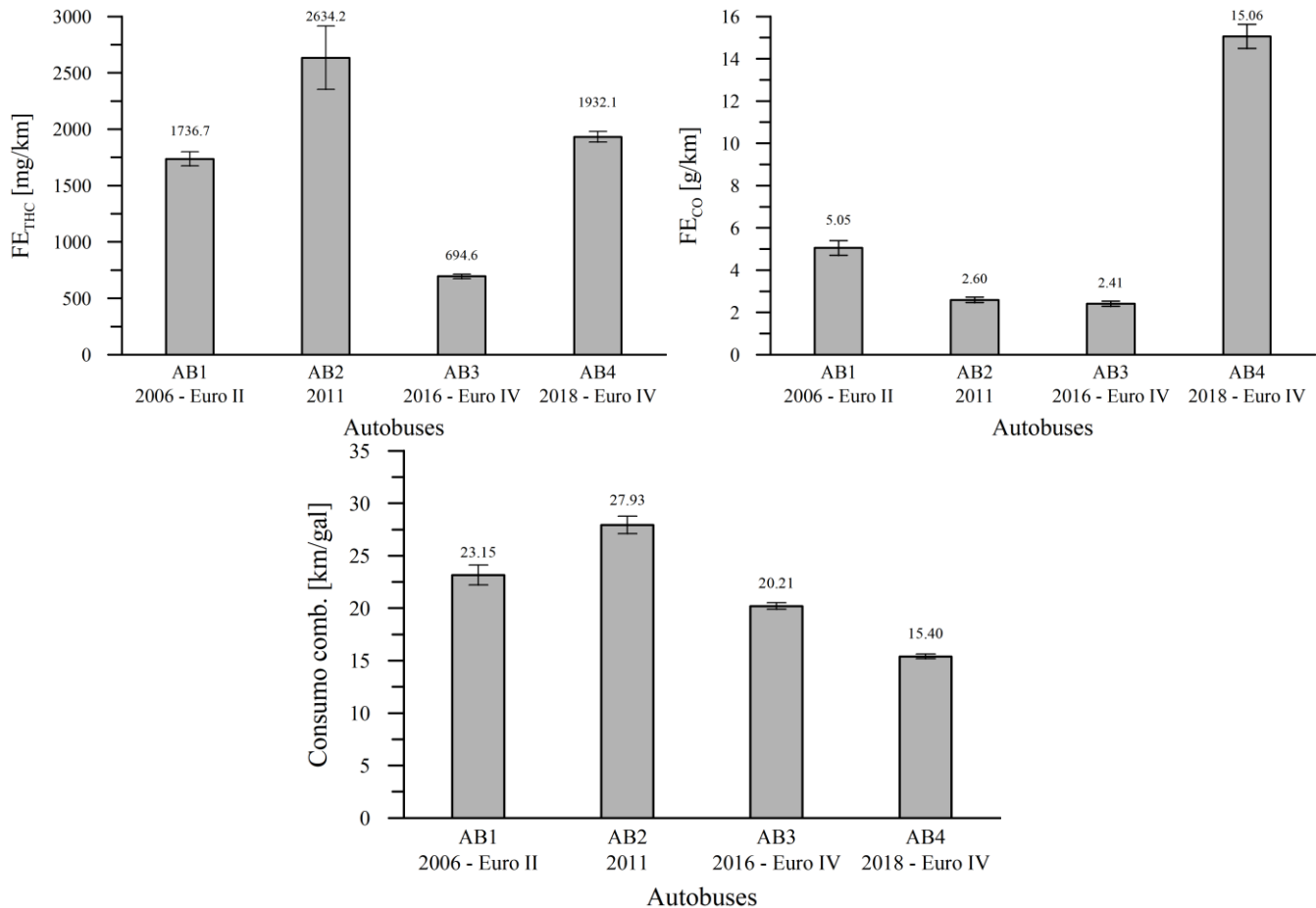
3.5. FE de camiones de dos ejes pequeños (C2P)





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 monoxide». 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.^a ed. McGraw-Hill, 2018.

CAPITULO 4

CONSIDERACIONES FINALES Y ANEXOS

Contenido Capítulo 4 y Anexos

1. Consideraciones finales	66
Anexos	69
1.1. Anexo 1. Vehículos de prueba	69
1.1.1. Criterios generales de selección	69
1.1.2. Selección e instrumentación de vehículos y ejecución de la prueba	70
1.2. Anexo 2. Metodología para tratamiento y análisis de datos	74
1.3. Anexo 3. Equipos de medición y fichas técnicas	80
1.4. Anexo 4. Datos brutos usados para determinar los factores de emisión	85
1.4.1. Tractocamiones tipo C3S2	85
1.4.2. Camiones de dos ejes grandes (C2G)	87
1.4.3. Vehículos de dos ejes C2 pequeños (C2P)	89
1.4.4. Buses (AB)	91
Referencias Capítulo 4	92

Índice de Figuras Anexos

Figura A. 1. Vehículo de prueba en chasis dinamométrico	71
Figura A. 2. Adaptación del tubo de muestreo al tubo de escape (izquierda) y contenedor cargado (derecha)	72
Figura A. 3. Vehículos ubicados en zona de inicio de la prueba	73
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	74
Figura A. 5. Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos	75
Figura A. 6. Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción en carretera. Sup.: camiones C2 grandes, Inf.: tractocamiones C3S2	76
Figura A. 7. Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión C2 grande; inf.: tractocamión) para mediciones en carretera	77
Figura A. 8. PEMS para gases HORIBA OBS-ONE-GS12 (izq.) y gases de calibración (der.)	80
Figura A. 9. Módulo de PM y PN de Horiba (izquierda) y ELPI de Dekati con dilutores (derecha)	83
Figura A. 10. Características del sensor de flujo de combustible	83

Índice de Tablas Anexos

Tabla A. 1. Vehículos de carga seleccionados para medición de factores de emisión a la altitud de la región metropolitana de Bucaramanga	69
Tabla A. 2. Especificaciones de camiones de dos ejes C2 livianos y C2 mediano	70
Tabla A. 3. Especificaciones de camiones de dos ejes C2 grandes	71
Tabla A. 4. Especificaciones de tractocamiones tipo C3S2 medidos	72
Tabla A. 5. Coeficientes de correlación reproducción de ciclos de conducción C2 livianos/buses	75
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	78
Tabla A. 7. Coeficientes de correlación promedio para todas las categorías vehiculares medidas	78
Tabla A. 8. Especificaciones técnicas del equipo portable de medición de gases de escape. (Tomado de https://www.horiba.com/sgp/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/)	80
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/)	81
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/)	81
Tabla A. 11. Especificaciones del HR-ELPI + VI de Dekati	82
Tabla A. 12. Dimensiones de los impactadores del HR-ELPI +VI de Dekati	82
Tabla A. 13. Especificaciones técnicas del Banco de Rodillos usado en las pruebas, propiedad de Ecopetrol	84

1. Consideraciones finales

Este informe final contiene los resultados de una campaña experimental que tuvo como finalidad determinar los factores de emisión de gases (CO_2 , CH_4 , NO_2 , NO_x , THC, NMHC 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 cuatro camiones pequeños de dos ejes (C2P) en banco de rodillos, siguiendo tanto 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 cuatro camiones grandes de dos ejes (capacidad de carga de 11 toneladas) y de cuatro tractocamiones (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 factores de emisión de gases de efecto invernadero, de gases contaminantes, de material particulado y de número de partículas, así como con el consumo instantáneo y promedio de combustible para la categoría de vehículos pesados más representativos. 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 gaseosas. Esto sugiere la conveniencia de implementar políticas 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 (NO_x). Las empresas de transporte están llamadas a valorar 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) y su mantenimiento.
3. No se encontró una tendencia clara entre la tecnología de control de emisiones de los camiones y su consumo de combustible, y por lo tanto en el factor de emisión de CO_2 . En la mayoría de los casos los camiones antiguos consumían menos combustible que

los nuevos en el mismo ciclo de conducción. Este resultado sugiere que se deberían usar parámetros adicionales a la emisión de CO₂ o al consumo de combustible para posibles programas de eco-etiquetado de vehículos pesados.

4. Si bien las emisiones de gas metano (CH₄) tienen un potencial de calentamiento climático entre 25 y 28 veces mayor que el CO₂, sus emisiones fueron significativamente pequeñas (máximo 51 mg/km en el peor de los vehículos medidos) frente al CO₂, 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 recorrido, 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 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 sugeridos por COPERT son hasta 10 veces inferiores 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 (NO₂), 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_x). Considerando que las emisiones de NO_x alcanzaron valores tan elevados como 25 g/km, este resultado sugiere, en la medida de lo posible, incluir las emisiones de 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 que no hay relación 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 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 se 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 de circulación promedio. Además, los resultados confirman que emiten menos contaminación cuantos más pasajeros pueden transportar.

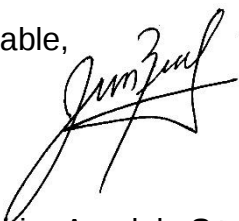
Debido a que el objeto de este convenio consistió en determinar los factores de emisión de la categoría de vehículos pesados más representativos de Colombia, no se incluyeron tecnologías como vehículos eléctricos, híbridos o a gas metano vehicular (GMV).

El grupo ejecutor de la Universidad de Antioquia sugiere que de acuerdo con los lineamientos recientemente trazados en agosto/septiembre de 2021 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 ³)	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
TOTAL			12	-	-	16

Para esta fase del proyecto se seleccionaron 4 tractocamiones tipo 3S2, con cilindradas entre 12.800 y 15.000 cm³, 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 (cilindraje, 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

Modelo	Cilindrada (cm ³)	Capacidad aproximada (kg)
2006	2.800	3.000
2016	3.000	3.000
2018	5.200	5.000
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

Norma	Modelo	Cilindrada (cm³)	Capacidad aprox. (kg)
Euro II	2012	7.800	10.000
Euro II	2005	8.300	10.500
Euro V	2022	7.700	11.400
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

Norma	Modelo	Cilindrada (cm³)	Capacidad aprox. (kg)
EPA 98	2013	15.000	35.000
Euro II	2012	13.000	30.000
Euro V	2020	12.800	35.000
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.

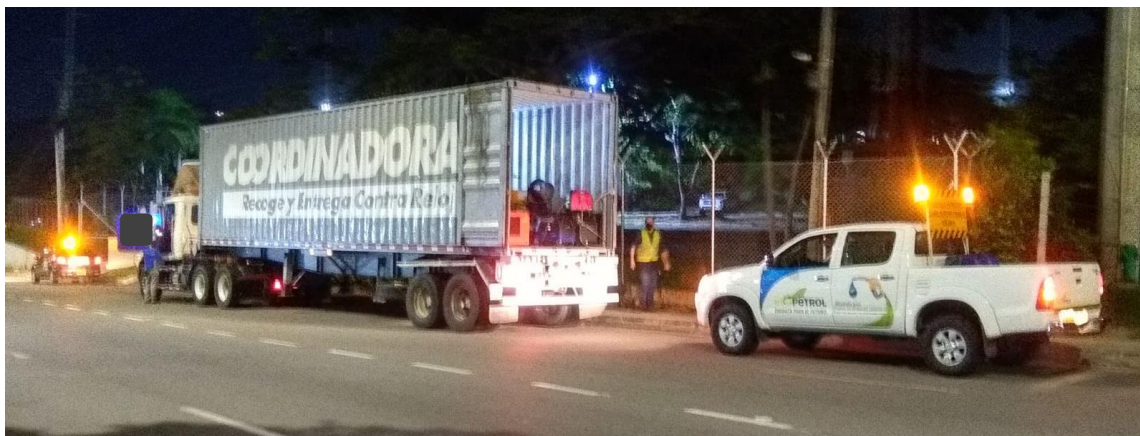


Figura A. 3. Vehículos ubicados en zona de inicio de la prueba.

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.

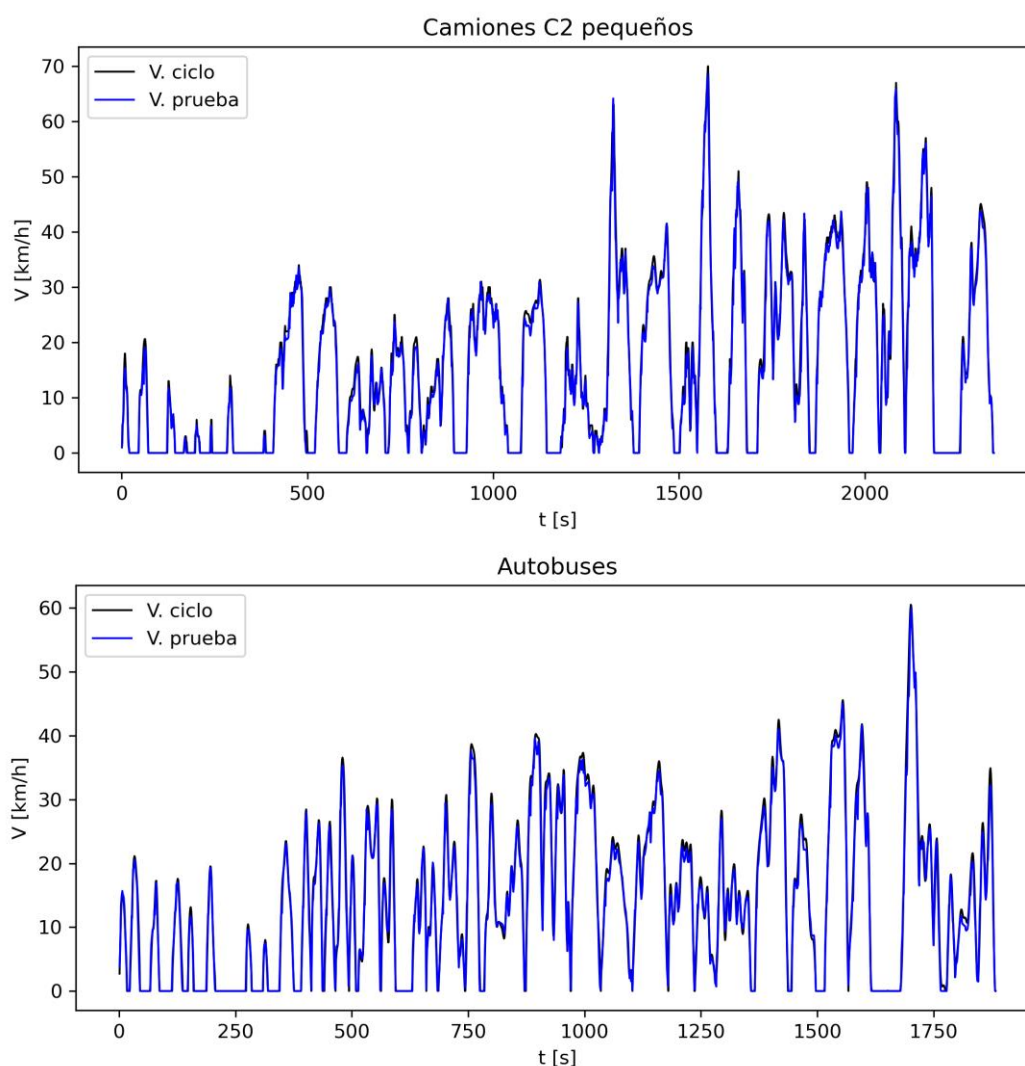


Figura A. 4. Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos

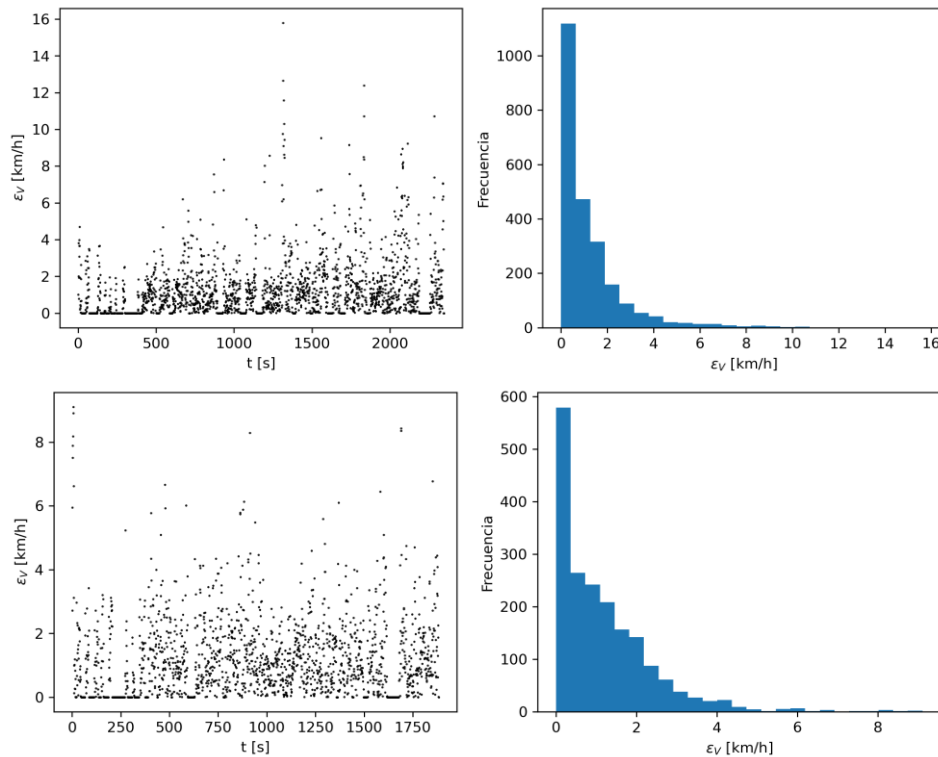


Figura A. 5. Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión; inf.: buses) para vehículos de dos ejes C2 livianos en banco de rodillos

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.
C2P1	388	0.9938	AB1	393	0.9935
	389	0.9959		394	0.9909
	391	0.9951		396	0.9932
	392	0.9946		397	0.9941
C2P2	438	0.9955	AB2	443	0.9936
	439	0.9905		444	0.9947
	440	0.9817		445	0.9938
	442	0.9955		446	0.9943
C2P3	400	0.9909	AB3	403	0.9920
	401	0.9948		404	0.9918
	402	0.9951		405	0.9823
C2P4	407	0.9951	AB4	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 bordo, 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.

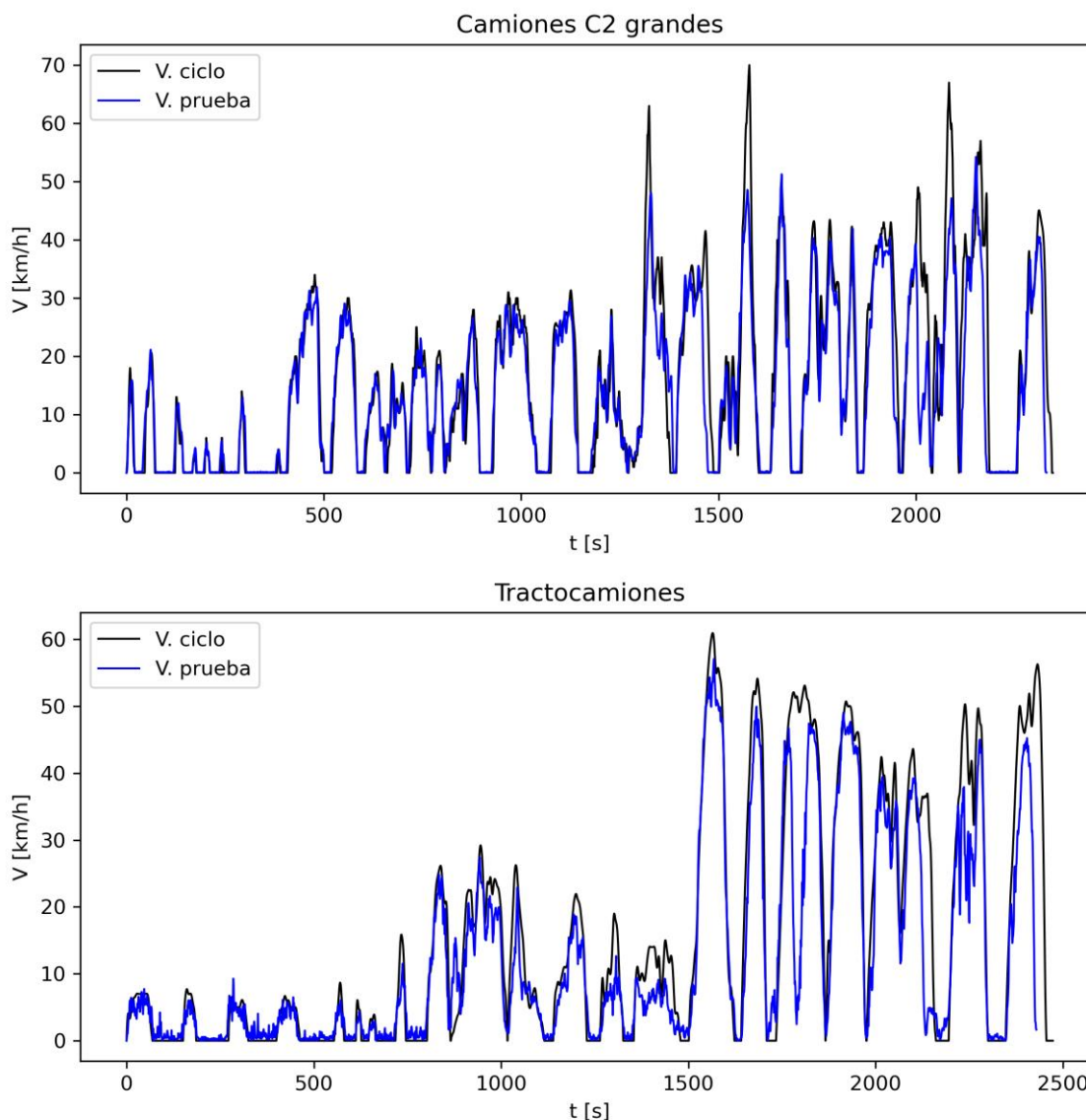


Figura A. 6. Verificación de la reproducción de los ciclos de conducción en carretera. Sup.: camiones C2 grandes, Inf.: tractocamiones C3S2

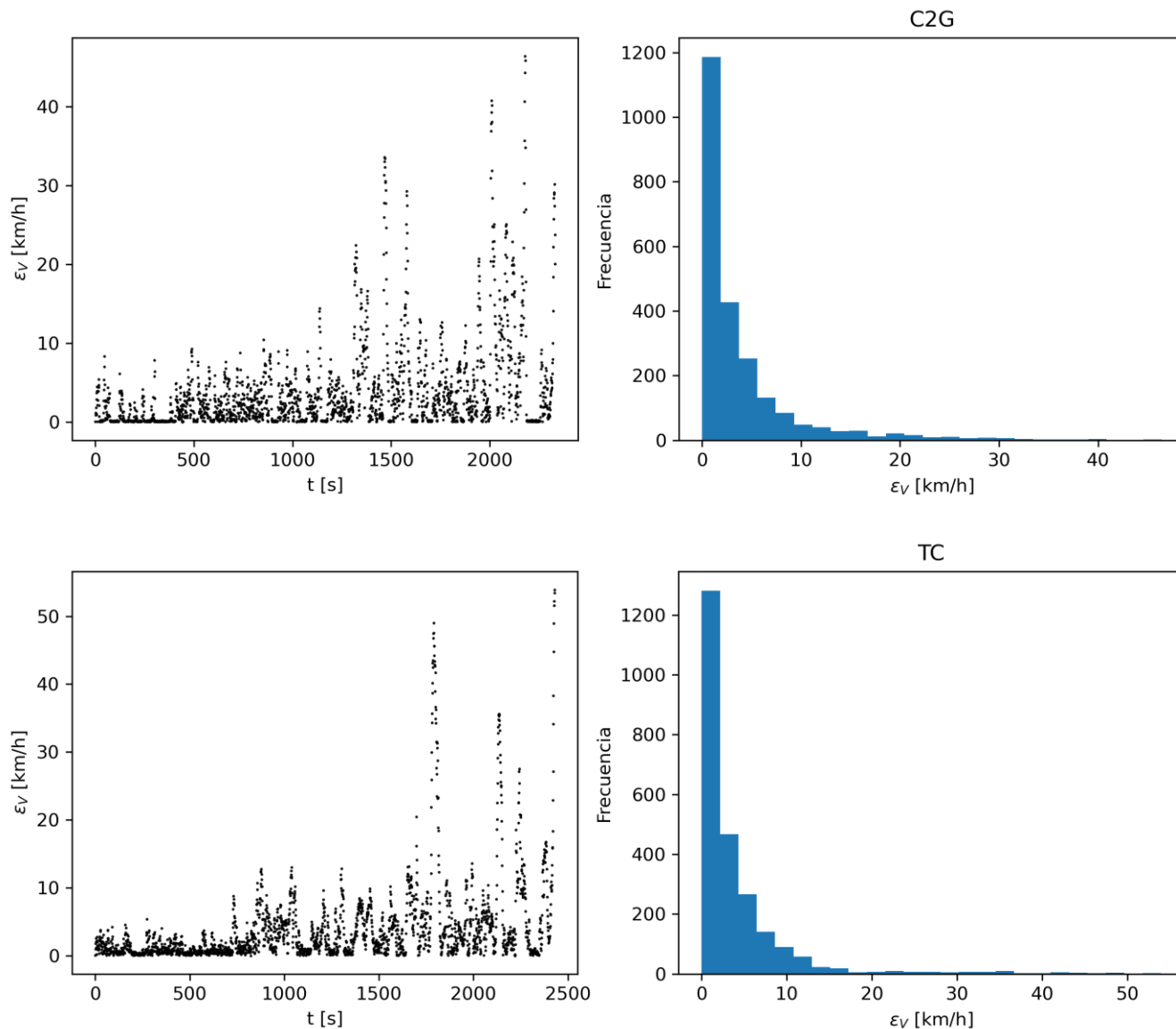


Figura A. 7. Errores en los ciclos de conducción (sup.: camión C2 grande; inf.: tractocamión) para mediciones en carretera

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 - CO₂ -, 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 ₂ [vol%]	0-5~0-20
NO/Nox [ppm]	0-100~0-3000
Exhaust Flow Range [m ³ /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/)

Measuring Principles	Batch sampling : Filter gravimetric method Real-time PM measurement : Diffusion charging method
Measuring Ranges (Real-time PM sensor)	0 to 2500 mm/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 μm 50% cut off point : particle size between 2.5 and 10 μm
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/)

Measuring Principles	Condensation particle counter (CPC)
Particle Diameter	23 ~ 1,000 nm
Measuring Range	0 ~ 5 × 10 ⁷ particles/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

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

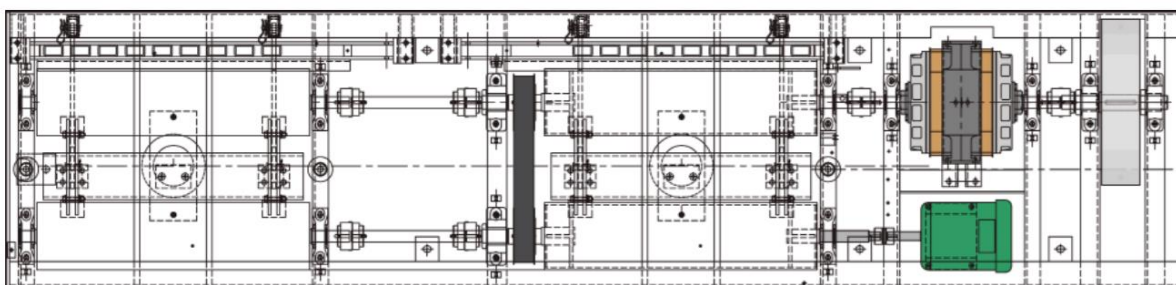


Figura R 1. Esquema del banco de rodillos de ECOPETROL-ICP Mustang MD 100

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

1.4.1. Tractocamiones tipo C3S2

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

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

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

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

1.4.2. Camiones de dos ejes grandes (C2G)

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

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

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

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

1.4.3. Vehículos de dos ejes C2 pequeños (C2P)

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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.

Tabla. 1. Comparación de los valores de vehículos medidos en FECOC+ 2.1 respecto de los valores presentados por el IVE para la categoría C2p liviano

Estándar/ modelo	Factor de Emisión											
	THC ^A (g/km)			CO ^B (g/km)			NOx ^C (g/km)			PM ^D (g/km)		
	FECOC+ 2.1	IVE	Factor	FECOC+ 2.1	IVE	Factor	FECOC+ 2.1	IVE	Factor	FECOC+ 2.1	IVE	Factor
Euro II - 2006	1,48	0,39	+3,8	4,69	1,427	+3,3	5,72	3,434	+1,6	0,339	0,065	+5,2
Euro II - 2011	2,04	0,39	+5,3	2,55	1,427	+1,8	3,39	3,434	+1	0,245	0,065	+3,8
Euro IV - 2016	0,55	0,018	+30,5	1,98	0,136	+14,5	2,59	1,624	+1,6	0,414	0,014	+29,6
^A Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - THC entre 4 y 5 veces Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - THC en 30 veces ^B Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - CO entre 2 y 3 veces Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - CO en 14 veces ^C Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - NOx entre 1 y 2 veces Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - NOx en 2 veces ^D Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 4 y 5 veces Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - P.M en 29 veces												

Tabla 1.1. Comparación del F.E. THC medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p liviano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	THC (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II – 2006	1,48	0,387	+3,8
Euro II – 2011	2,04	0,387	+5,3
Euro IV – 2016	0,55	0,018	+30,5
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. – THC entre 4 y 5 veces Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. – THC en 30 veces			

Tabla 1.2. Comparación del F.E. CO medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p liviano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	CO (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II – 2006	4,69	1,427	+3,3
Euro II – 2011	2,55	1,427	+1,8
Euro IV – 2016	1,98	0,136	+14,5
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. – CO entre 2 y veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. – CO en 14 veces			

Tabla 1.3. Comparación del F.E. NOx medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p liviano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	NOx (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II – 2006	5,72	3,434	+1,6
Euro II – 2011	3,39	3,434	+1
Euro IV – 2016	2,59	1,624	+1,6
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. – NOx entre 1 y 2 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. – NOx en 2 veces			

Tabla 1.3. Comparación del F.E. PM medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p liviano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	PM (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II – 2006	0,339	0,065	+5,21
Euro II – 2011	0,245	0,065	+3,8
Euro IV – 2016	0,414	0,014	+29,6
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. – P.M entre 4 y 5 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. – P.M en 29 veces			

Tabla. 2. Comparación de los valores de vehículos medidos en FECOC+ 2.1 respecto de los valores presentados por el IVE para la categoría C2p mediano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)														
	THC ^A (g/km)			CO ^B (g/km)			NOx ^C (g/km)			PM ^D (g/km)			CH ₄ (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro IV – 2018	1,51	0,027	+5,6	11,15	0,201	+55,5	4,64	2,388	+2	0,123	0,017	+7,2	0,03	[s.d.]	
^A Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- THC en 5 veces ^B Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- CO en 55 veces ^C Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- NOx en 2 veces ^D Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- P.M en 7 veces															

Tabla 2.1. Comparación del F.E. THC medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p mediano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	THC (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro IV – 2018	1,51	0,027	+5,6
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- THC en 5 veces			

Tabla 2.2. Comparación del F.E. CO medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p mediano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	CO (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro IV – 2018	11,15	0,201	+55,5
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- CO en 55 veces			

Tabla 2.3. Comparación del F.E. NOx medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p mediano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	NOx (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro IV – 2018	4,64	2,388	+2
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- NOx en 2 veces			

Tabla 2.4. Comparación del F.E. PM medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2p mediano

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	PM (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro IV – 2018	0,123	0,017	+7,2
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E.- P.M en 7 veces			

Tabla. 3. Comparación de los valores de vehículos medidos en FECOC+ 2.1 respecto de los valores presentados por el IVE para la Buses

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)														
	THC ^A (g/km)			CO ^B (g/km)			NOx ^C (g/km)			PM ^D (g/km)			CH ₄ (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2006	1,74	0,387	+4,5	5,05	1,427	+3,5	5,87	3,434	+1,7	0,303	0,065	+4,6	0,03	[s.d.]	
Euro II - 2011	2,63	0,387	+6,8	2,59	1,427	+1,8	3,65	3,434	+1	0,245	0,065	+3,7	0,051	[s.d.]	
Euro IV - 2016	0,70	0,018	+38,9	2,41	0,136	+17,7	2,58	1,624	+1,6	0,041	0,014	+2,9	0,013	[s.d.]	
Euro IV - 2018	1,93	0,027	+71,5	15,10	0,201	+75,1	4,90	2,388	+2	0,138	0,017	+8,1	0,038	[s.d.]	

^A Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - THC entre 4 y 7 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - THC entre 38 y 71 veces

^B Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - CO entre 2 y 3 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - CO entre 18 y 75 veces

^C Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - NOx entre 1 y 2 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - NOx entre 1 y 2 veces

^D Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 4 y 5 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 3 y 8 veces

Tabla 3.1. Comparación del F.E. THC medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría Buses

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	THC (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2006	1,74	0,387	+4,5
Euro II - 2011	2,63	0,387	+6,8
Euro IV - 2016	0,70	0,018	+38,9
Euro IV - 2018	1,93	0,027	+71,5
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - THC entre 4 y 7 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - THC entre 38 y 71 veces			

Tabla 3.2. Comparación del F.E. CO medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría Buses

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	CO (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2006	5,05	1,427	+3,5
Euro II - 2011	2,59	1,427	+1,8
Euro IV - 2016	2,41	0,136	+17,7
Euro IV - 2018	15,10	0,201	+75,1
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - CO entre 2 y 3 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - CO entre 18 y 75 veces			

Tabla 3.3. Comparación del F.E. NOx medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría Buses

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	NOx (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2006	5,87	3,434	+1,7
Euro II - 2011	3,65	3,434	+1
Euro IV - 2016	2,58	1,624	+1,6
Euro IV - 2018	4,90	2,388	+2
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - NOx entre 1 y 2 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - NOx entre 1 y 2 veces			

Tabla 3.4. Comparación del F.E. PM medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría Buses

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	PM (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2006	0,303	0,065	+4,6
Euro II - 2011	0,245	0,065	+3,7
Euro IV - 2016	0,041	0,014	+2,9
Euro IV - 2018	0,138	0,017	+8,1
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 4 y 5 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 3 y 8 veces			

Tabla. 4. Comparación de los valores de vehículos medidos en FECOC+ 2.1 respecto de los valores presentados por el IVE para la categoría C2 grande

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)														
	THC ^A (g/km)			CO ^B (g/km)			NOx ^C (g/km)			PM ^D (g/km)			CH ₄ (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2012	0,89	0,879	+1	2,51	3,251	-0,7	8,32	7,858	+1	0,168	0,093	+1,8	0,017	[s.d.]	
Euro II - 2015	1,91	0,879	+2,2	7,67	3,251	+2,3	8,84	7,858	+1,1	1,493	0,093	+16	0,036	[s.d.]	
Euro IV - 2021	0,56	0,041	+13,6	2,59	0,311	+8,3	6,69	3,716	+1,8	0,067	0,020	+3.3	0,011	[s.d.]	
Euro IV - 2022	0,12	0,041	+3	13,37	0,311	+43	8,47	3,716	+2,3	0,130	0,020	+6,5	0,002	[s.d.]	

^A Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - THC entre 1 y 2 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - THC entre 3 y 13 veces

^B Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - CO en 2 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - CO entre 8 y 43 veces

^C Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - NOx en 1 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - NOx en 2 veces

^D Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 2 y 16 veces

Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 3 y 6 veces

Tabla 4.1. Comparación del F.E. THC medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2 grande

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	THC (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2012	0,89	0,879	+1
Euro II - 2015	1,91	0,879	+2,2
Euro IV - 2021	0,56	0,041	+13,6
Euro IV - 2022	0,12	0,041	+3
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - THC entre 1 y 2 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - THC entre 3 y 13 veces			

Tabla 4.2. Comparación del F.E. CO medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2 grande

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	CO (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2012	2,51	3,251	-0,7
Euro II - 2015	7,67	3,251	+2,3
Euro IV - 2021	2,59	0,311	+8,3
Euro IV - 2022	13,37	0,311	+43
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - CO en 2 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - CO entre 8 y 43 veces			

Tabla 4.3. Comparación del F.E. NOx medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2 grande

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	NOx (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2012	8,32	7,858	+1
Euro II - 2015	8,84	7,858	+1,1
Euro IV - 2021	6,69	3,716	+1,8
Euro IV - 2022	8,47	3,716	+2,3
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - NOx en 1 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - NOx en 2 veces			

Tabla 4.4. Comparación del F.E. PM medido en FECOC+ 2.1 y el estimado por el IVE para la categoría C2 grande

Estándar/modelo	Factor de Emisión (F.E.)		
	PM (g/km)		
	FECOC+2.1	IVE	Factor
Euro II - 2012	0,168	0,093	+1,8
Euro II - 2015	1,493	0,093	+16
Euro IV - 2021	0,067	0,020	+3.3
Euro IV - 2022	0,130	0,020	+6,5
Para el estándar Euro II, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 2 y 16 veces			
Para el estándar Euro IV, el IVE subestima el F.E. - P.M entre 3 y 6 veces			

