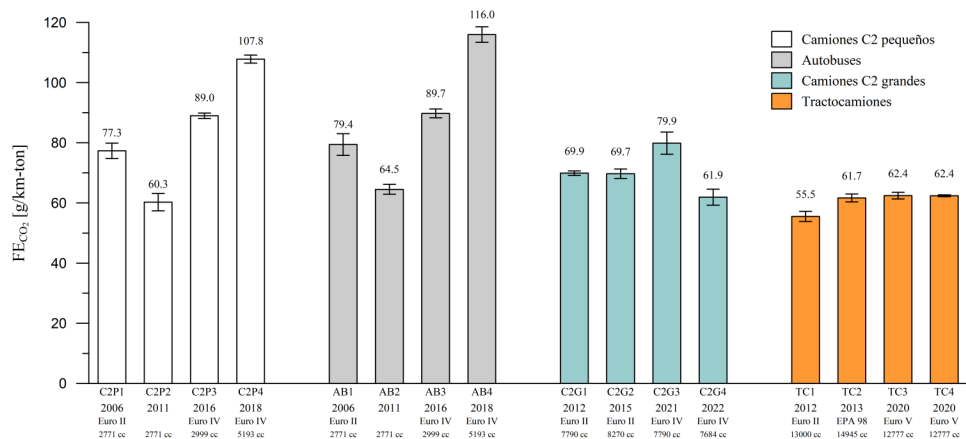


Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)

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



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



**Unidad de Planeación Minero Energética
UPME**

Director General Christian Jaramillo Herrera
Subdirectora Demanda Lina Escobar Rangel
Av. Calle 26 # 69 D-91 Torre 1, Piso 9°
Bogotá D.C.
(57-1) 222 06 01

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 amablemente un equipo de medición de gases y de partículas portátil iPEMS ParSync de la empresa 3DATX de Estados Unidos.

¡Agradecimientos a todo el equipo de trabajo!



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

RESUMEN EJECUTIVO

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

En materia de política pública, los FE han mostrado ser indicadores idóneos para soportar técnicamente la toma de decisiones como por ejemplo: renovación de tecnología, establecimiento de líneas base de consumo de combustible y emisiones con fines de planificar escenarios de reducción, delineamiento de zonas geográficas de aire protegido, principalmente en grandes centros urbanos, restricciones de funcionamiento por motivos ambientales, programas de eco-etiquetado, programas de financiación estatal y privada en materia de cambio climático y calidad del aire, entre otras. También, los FE son una herramienta potente para el sector empresarial, puesto que les permite valorar sus programas de autorregulación de emisiones, así como validar las mejores tecnologías disponibles para sus actividades, además de estar al día con las respectivas autoridades ambientales.

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

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

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

En el primer convenio FECOC+ Fase 1 (CV001-2020) las dos entidades se enfocaron en caracterizar el parque automotor terrestre de carretera colombiano y en determinar sus respectivos ciclos de conducción, herramientas previas indispensables para proceder con la medición de los FE. Con este insumo se trazaron dos fases posteriores en tres altitudes diferentes sobre el nivel del mar, a saber, Fase 2: determinación de los FE para vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros, y Fase 3: FE de automóviles livianos y motocicletas. Debido a la gran variedad de pisos térmicos del país, y al marcado efecto que tiene la altitud sobre el nivel del mar en cualquier sistema térmico, surgió entonces el presente convenio No. CV-003-2021 denominado FECOC+ Fase 2.1, en el cual, con el apoyo incondicional de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), y el grupo empresarial Coordinadora Mercantil (COORDINADORA), determinamos los FE de GEI (CO₂ y CH₄), de gases regulados (CO, NO₂, NO_x, THC), y de material particulado (en masa PM y número de partículas PN) de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (aproximadamente 900 metros sobre el nivel del mar –msnm-).

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

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

Los FE de contaminantes gaseosos (CO₂, CH₄, NO, NO₂, NO_x, HC, NMHC y CO), así como los de partículas (en masa –PM-, y en número –PN-), se determinaron a partir de las concentraciones instantáneas (10 muestras/segundo en % o ppm), del flujo volumétrico de gases de escape (m³/s), y de la densidad de los gases en condiciones estándar, lo cual permitió determinar la masa de cada contaminante que, posteriormente, se dividió entre la distancia recorrida en cada ciclo de conducción.

En la **Tabla R1** se resumen los FE promedio medidos a bordo en este proyecto, para la categoría de vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (aprox. 900 msnm). En total se reportan 16 pruebas, debido a que a cuatro camiones (para los C2 livianos y el C2 mediano) se les midieron los F.E. bajo el ciclo de conducción de camiones y de buses en banco de rodillos

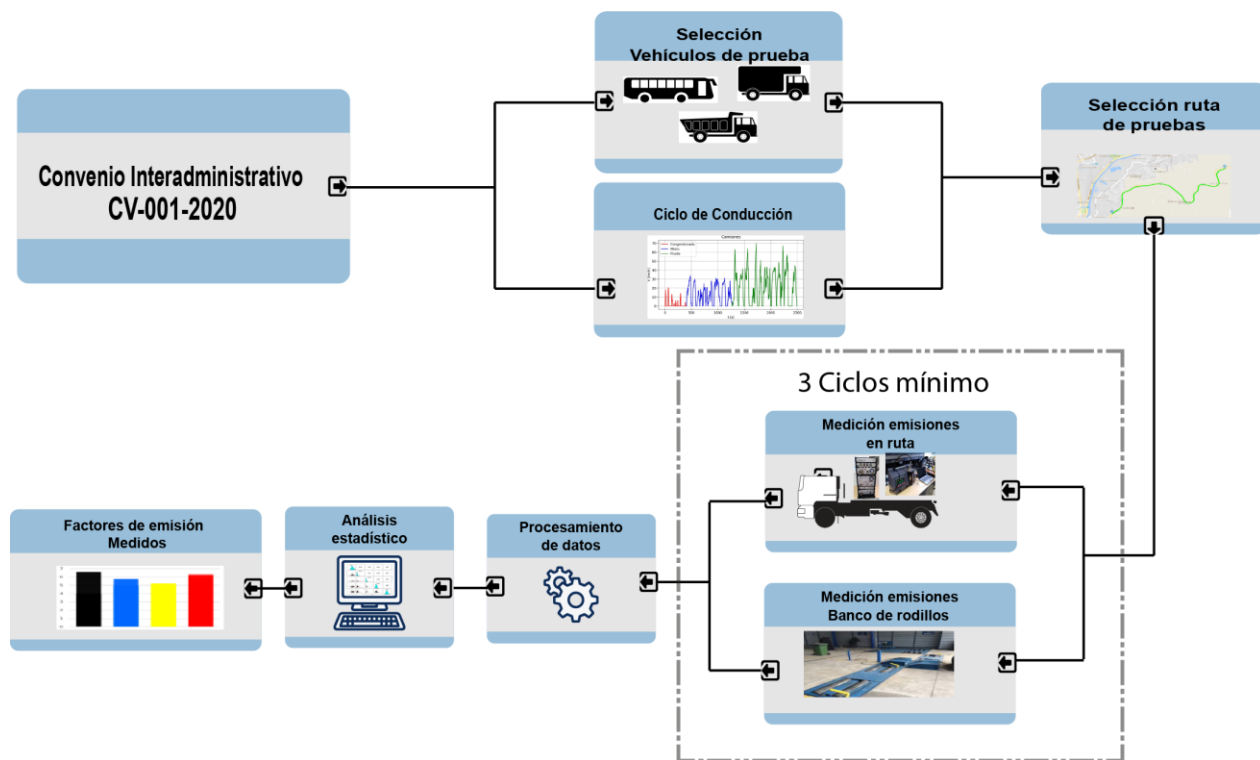






Figura R1. Vista esquemática de la metodología del proyecto FECOC+ Fase-2.1

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

Categoría	Modelo	Norma emisión	Cilindrada (cm ³)	Carga (Ton)	Rend. (km/gal)	CO ₂ (g/km)	CH ₄ (mg/km)	NO (g/km)	NO ₂ (g/km)	NO _x (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.

NO_x: óxidos de nitrógeno (NO_x = 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. Lo cierto es que son tan pequeñas en su tamaño (del orden de nanómetros), que apenas contribuyen en la masa. Dado que la peligrosidad de las partículas en el ser humano es inversamente proporcional al tamaño de las partículas, la OMS ha sugerido en su guía de buenas prácticas más reciente (2021), contarlas, y en la medida de lo posible, clasificarlas por su tamaño.

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

NMHC: hidrocarburos no metánicos (CH₄ = THC – NMHC)

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

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

En la **Tabla R2** se presenta una comparación de los F.E. medidos en este proyecto (FECOC+ Fase 2.1), 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 (FEVA-2 Convenio 888 de

2017) y a valores de referencia de la literatura internacional. Esta comparación muestra la importancia de la medición de los FE locales, ya que las diferencias observadas pueden obedecer, como en el caso de los modelos mencionados antes, al uso de vehículos con tecnologías de control de emisiones, tipo de combustible, altitud sobre el nivel del mar, topografía, climatología y patrones de conducción distintos a los reportados por otros trabajos. Para comprobar esta afirmación, se han recopilado datos de la versión más reciente del modelo COPERT (octubre 2021) de la AEM, en la que, a modo de ejemplo, para el material particulado (**Figura R2**), se aprecian discrepancias significativas, hasta 14 veces mayores para los FE medidos en este proyecto. Resultados similares se obtuvieron para los demás factores de emisión, como se reporta en el capítulo 3 del presente informe final. En la **Figura R3** se compara el 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. El modelo COPERT sugiere usar un factor de emisión de CO₂ = 1208 g/km para un bus Euro IV, pero con el doble de la capacidad de pasajeros.

Paralelamente, se evidenció que los FE promedio de CO₂, CO y NO_x tendieron a incrementar con el tamaño del vehículo (**Tabla R1**). 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 la capacidad de carga del vehículo (en toneladas), todos los FE disminuyen en la medida que aumenta el tamaño del vehículo (ver resultados en el capítulo 3). A modo de ejemplo, la **Figura R4** y la **Figura R5** permiten ver que los tractocamiones emiten la menor cantidad de GEI (CO₂ y CH₄) por cada kilómetro y tonelada (alrededor de 60 gCO₂/km-ton y entre 0.1 y 0.6 mgCH₄/km-ton), frente a las otras categorías de vehículos medidos, seguidos de los camiones de dos ejes C2 grandes (alrededor de 70 gCO₂/km-ton y entre 0.2 y 3 mgCH₄/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 y entre 2.6 y 10 mgCH₄/km-ton).

Otro resultado a tener en cuenta, es que, independiente de la categoría vehicular, la mejora tecnológica de control de emisiones no mostró una tendencia a disminuir los FE promedio de CO₂ (ver **Tabla R1**). Por el contrario, se aprecia una ligera tendencia a incrementarlos, lo que podría suponer que la adición de equipos de postratamiento de gases de escape usados para disminuir ciertos contaminantes criterio como CO, THC, y NO_x generan mayor contrapresión de escape, afectando negativamente el consumo de combustible y, por tanto, incrementando las emisiones de CO₂.

El NO₂ (mg/km-ton), gas altamente tóxico/cancerígeno para el ser humano, y altamente reactivo (tiende a formar otros compuestos como material particulado secundario en la atmósfera), constituye cerca del 50% de las emisiones de óxido de nitrógeno totales (NO_x) (ver **Tabla R1**).

Tabla R2. Comparación de factores de emisión medidos con la literatura técnica

País	Referencia	# vehículos ensayados	Act ividad	Peso (ton)	Norma de emisión	Modelo	Ruta	Consumo combust ble	CO2 (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)	THC (g/km)	CO (g/km)	Observaciones
China	Chen et al 2007	9	Camiones Carga	3,4 - 10	---	1999 - 2002	Urbano y Autopista	1L/h - 10L/h	---	6,54 ± 1,9	---	1,88 ± 1,03	4,96 ± 2,9	FE entre 55% (THC) y 75% (NOx) más bajos que modelo MOBILE para Shanghai
USA	Durbin et al 2008	5	Tractocamiones	30	---	1996-2005	Urbano y Autopista	---	---	8 a 56	160 a 1090	0,16 a 3,2	1,6 a 4,8	Medición de emisiones bajo operación real en California
USA	Johnson et al 2009	1	Tractocamión	30	USEPA 2007	2004	Urbano y Autopista	---	---	---	---	---	---	Mediciones en ruta convierte emisiones a g/kW-h para comparar con el estándar
China	Liu et al 2011	4	Bus	17,8 - 18	Euro III - IV	---	Urbana y Autopista	8,3 a 9,4 km/gal	---	---	---	---	---	Pruebas en ruta con PEMS en Beijing condiciones reales (Emisiones en g/kW-h)
Italia	Fontaras et al 2012	4 (1 Diesel + 3 GNC)	Recolectores de basura	16	Euro V	---	Urbano (Diésel)	---	2430	32.3	46.4	0.21	7.43	Desempeño Camiones a CNG depende de la calibración del motor, sistemas postratamiento y adaptación del motor al GN
							Urbano (GNC)		3645	4.38	11.4	2.19	15.8	
China	Huo et al 2012	175	Carga y pasajeros	5 a 20	preEuro a Euro IV	1996-2010	Urbano y Autopista	---	---	3,2 a 14,8	10 a 910	0,2 a 2,4	1,1 a 18,6	Mediciones en ruta en 5 ciudades chinas. Vehículos livianos, medios y pesados diésel
China	Huang et al 2013	2	Liviano	2.5	Euro 3	2010	Urbana	---	---	0.68	170	0.039	0.53	PEMS en ruta para Diesel liviano, Bus y vehículo liviano a gasolina. PN similar los 3
			Bus	28.0	Euro IV					---				
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 NOx; emisiones en ppm ciclo WHTC: NH3, N2O y PN de vehículo pesado
Italia	Giechaskiel 2018	24	Buses y camiones	---	Euro VI	---	Urbano, rural y autopista	---	---	---	---	---	---	5 buses GNC, 2 trailers GNL, 17 camiones diésel. PEMS para contar 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
			2017-2018			7 a 17,4 km/gal		522 a 1041	0,02 a 5,53	220 a 15900	0,09 a 1,18	2,3 a 39,3		
			1995-2018			4,8 a 9,6 km/gal		856 a 1644	0,02 a 1,66	650 a 20900	0,69 a 2,82	10,5 a 36,7		
Colombia (FECOC+ Fase 2,1)	Agudelo et al 2021	16	Camiones C2 livianos	3 a 35	Euro II a Euro V	2006-2016	Urbana, rural	21 a 30 km/gal	320 a 472	2.59 a 5.72	41 a 339	0.55 a 2.04	1,98 a 4,7	PEMS en ruta/banco. Ciclos propios Área Metropolitana Bucaramanga
			2006-2016			20 a 28 km/gal		340 a 614	2.58 a 5.87	41 a 303	0.7 a 2.63	2,41 a 15		
			2018			17 km/gal		571.4	4.64	123	1.51	11.2		
			2005 - 2022			11 km/gal		774 a 998	6.69 a 8.84	67 a 1494	0.12 a 1.91	2,5 a 13,4		
			2012 - 2021			5.5 km/gal		1555 a 1748	10.44 a 25	127 a 1392	0.15 a 0.83	3,6 a 17,1		

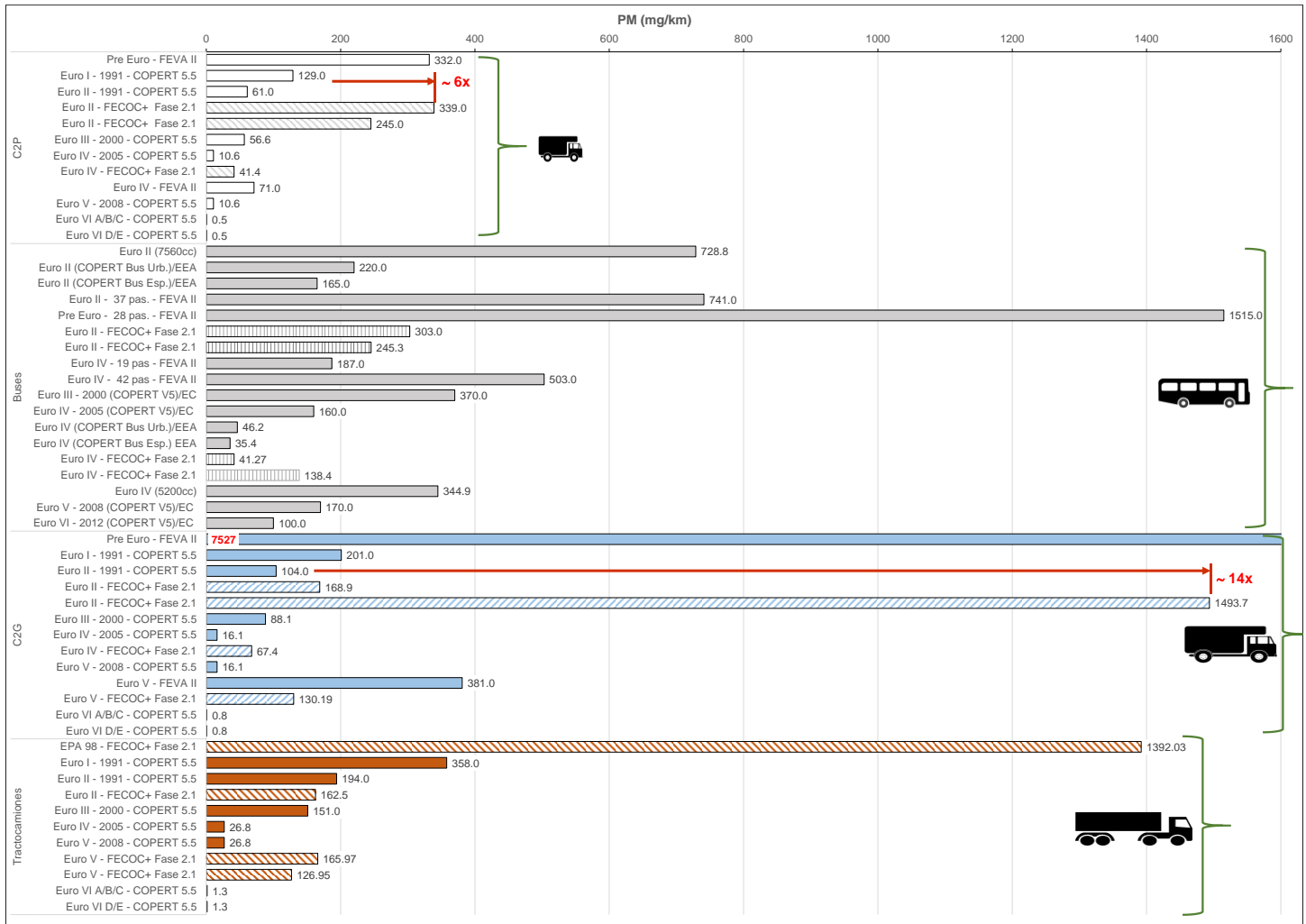


Figura R2. Comparación del material particulado (PM en mg/km) con valores reportados en la literatura

El uso de SCR (reducción catalítica selectiva), si bien incrementa los gastos operacionales de las empresas de transporte, debido al uso del aditivo en los gases de escape (solución de úrea automotriz), es significativamente más efectiva en la reducción de los NOx, así como sobre las emisiones CH₄, las cuales se redujeron en un factor cercano a 4 veces (**Figura R5**).

El camión de dos ejes C2 grande (Euro II) del año de modelo 2015, a pesar de haber exhibido el mejor rendimiento de combustible entre los de su categoría C2G (28 km/gal), fue el que emitió la mayor cantidad de masa de partículas (1493.7 mg/km), la mayor concentración de número de partículas (263.52 billones/km), y la mayor concentración de hidrocarburos totales (THC = 2.63 g/km) y metano (CH₄ = 51.5 mg/km) en comparación con todos los demás vehículos medidos. Este resultado permitió comprobar que no existe relación directa entre menor consumo de combustible y menor emisión de contaminantes.

Un caso interesante fue el tractocamión del año 2013 (EPA 98), el cual emitió la mayor concentración de masa de partículas (1392 mg/km) y, sin embargo, emitió la menor concentración de número de partículas (0.38 billones/km) en comparación con los demás tractocamiones, lo que sugiere que este motor emite pocas partículas de tamaños significativamente grandes.

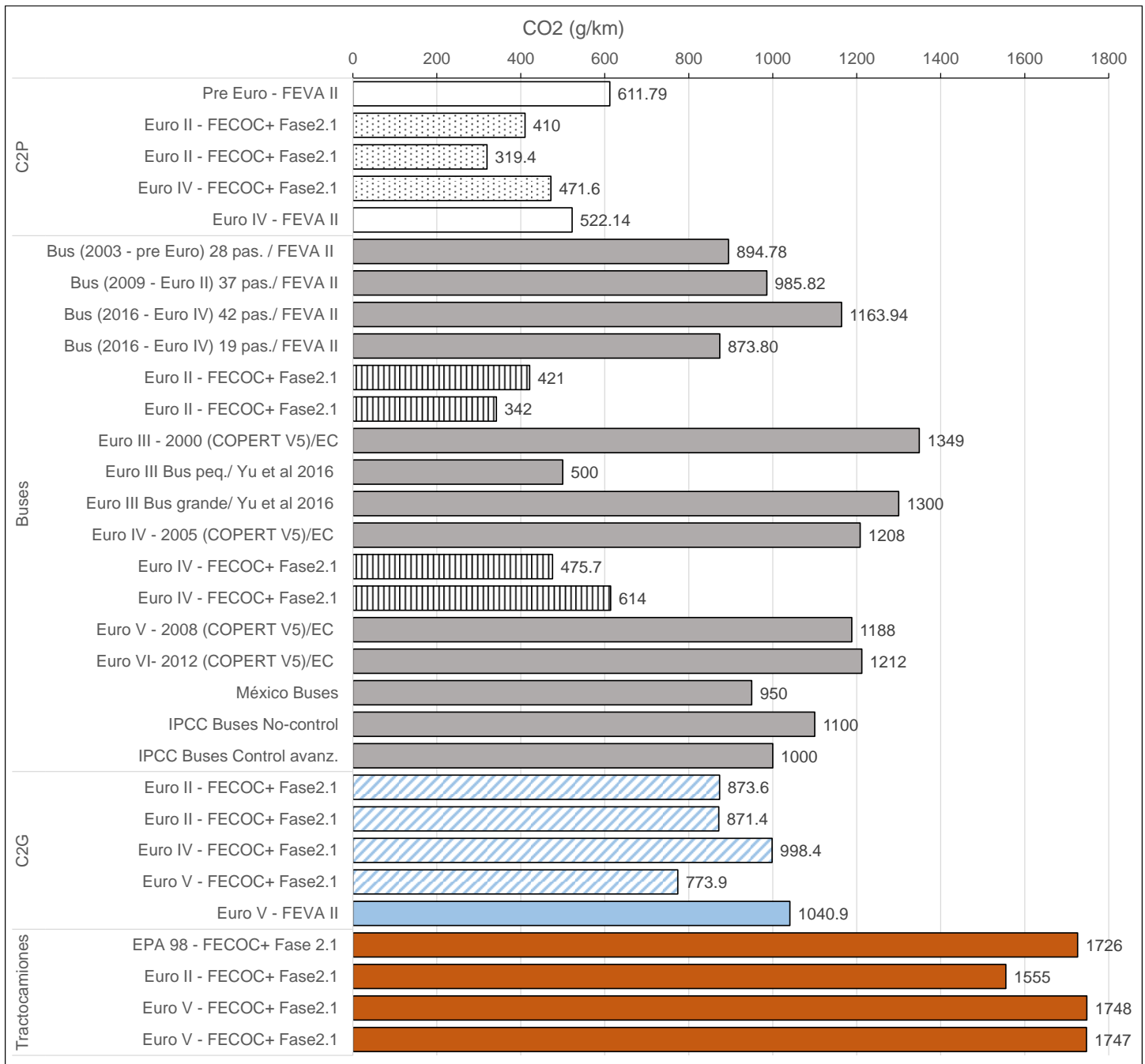


Figura R3. Comparación del CO₂ medido con la literatura técnica

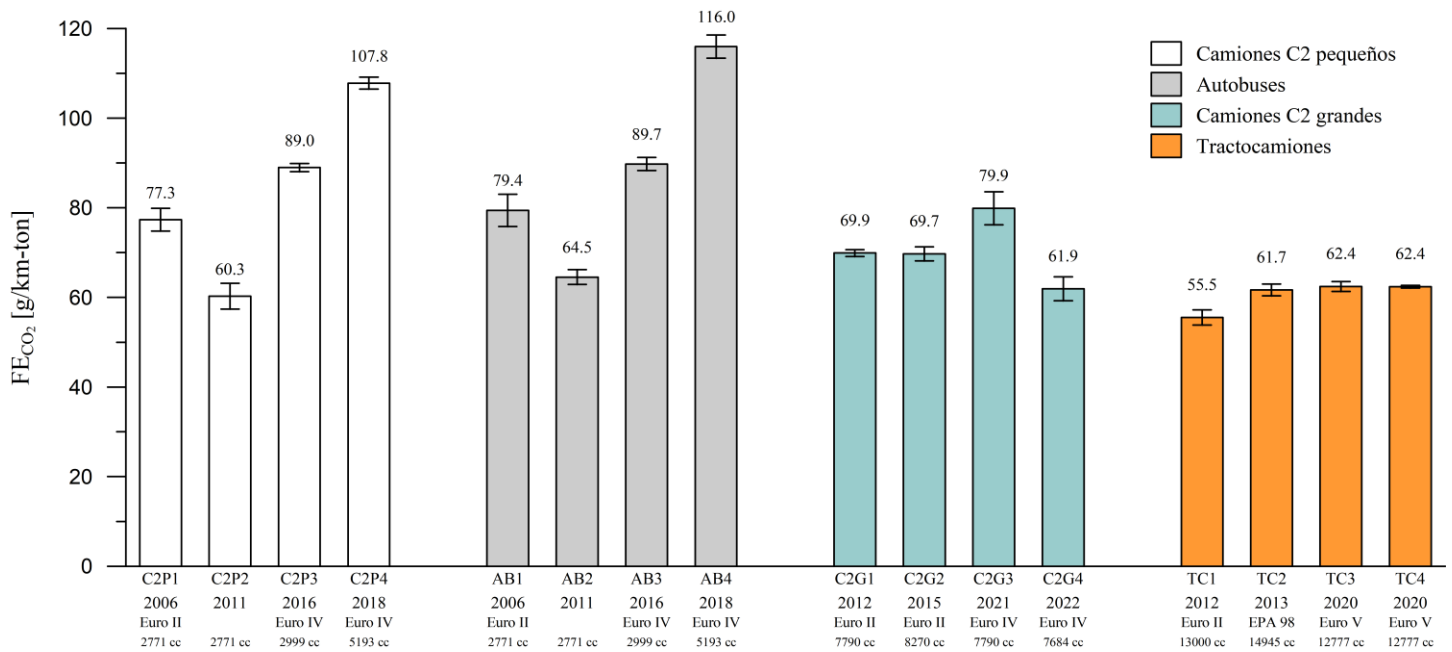


Figura R4. CO₂ (g/km-ton) para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

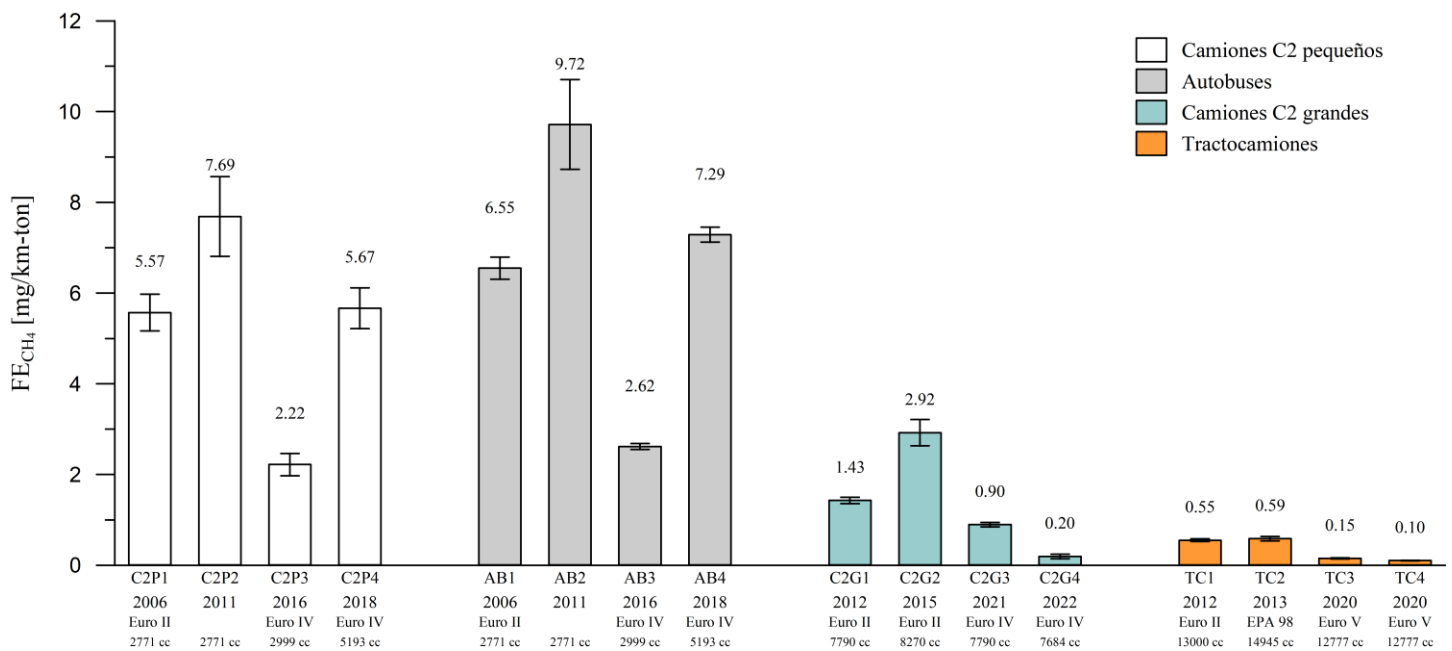


Figura R5. CH₄ (mg/km-ton) para vehículos de carga/pasajeros (aprox. 900 msnm)

En resumen, en este proyecto se determinaron los FE de contaminantes gaseosos y de partículas (en masa y en número) para la categoría de vehículos pesados de carga y de pasajeros, midiendo con sistemas portátiles de acuerdo a ciclos de conducción específicos por cada actividad vehicular, a la altura del área metropolitana de Bucaramanga (alrededor de 900 msnm). Los resultados permiten concluir que las emisiones de GEI de CO₂ crecen a medida que aumenta el tamaño del vehículo, variando desde el valor mínimo de 320 g/km (camión de dos ejes C2 liviano Euro II), hasta el máximo de 1748 g/km de un tractocamión (año 2020, Euro V).

Las emisiones de metano (CH_4 , con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO_2), no cambiaron con el tamaño de los vehículos, pero si fueron siempre menores para aquellos de tecnologías más avanzadas (Euro IV y Euro V), oscilando entre 3 y 50 mgCH_4/km .

Las emisiones de NO_2 , considerado un gas contaminante altamente tóxico para el ser humano, y causante de formaciones en los contaminantes secundarios en la atmósfera, fueron considerablemente elevadas para todas las categorías vehiculares, oscilando desde un mínimo de 1.3 hasta 10 g/km . El SCR mostró alta eficacia para reducir todos los NO_x , incluidos el NO y el NO_2 .

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

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

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



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