



FOTOGRAFÍA: [www.codensamovilidad electrica.com](http://www.codensamovilidad electrica.com)

# Transporte público masivo Libre de hollín y más eficiente

 GOBIERNO DE COLOMBIA

 MINAMBIENTE



**PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA**

Juan Manuel Santos Calderón

**MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

Luis Gilberto Murillo Urrutia

**VICEMINISTRA DE ORDENAMIENTO AMBIENTAL**

Yaneth Patricia Alegría Copete

**VICEMINISTRO DE POLÍTICAS Y NORMALIZACIÓN AMBIENTAL**

Willer Edilberto Guevara Hurtado

**DIRECTOR DE ASUNTOS AMBIENTALES SECTORIAL Y URBANA**

Fabian Hernán Gonzalo Torres Carrillo

**COORDINADOR GRUPO DE GESTIÓN AMBIENTAL URBANA**

Mauricio Gaitán Varón

**TEXTOS**

Luisa Fernanda González Herrera

**APOYO TÉCNICO**

Mayra Alejandra Lancheros

Mauricio Gaitán Varón

**CORRECCIÓN DE ESTILO**

María Emilia Botero Arias

Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental  
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**DIAGRAMACIÓN**

José Roberto Arango Romero

Grupo de Comunicaciones  
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN**

Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

*Transporte público masivo libre de hollín y más eficiente* [Recurso electrónico] /  
González Herrera, Luisa Fernanda; Lancheros Barragán, Mayra Alejandra; Dir: Mauricio Gaitán Varón.  
Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018.

22 p.

ISBN: 978-958-8901-80-0

1. tecnologías limpias 2. transporte masivo 3. salud pública 5. combustibles limpios  
6. contaminación del aire 7. Acuerdo de París 8. cambio climático 8. conversión tecnológica I.  
Tit. II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo

CDD: 388.4 TRANSPORTE LOCAL

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia, 2018

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales. No comercializable. Distribución gratuita



# CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>Emisiones del sector transporte</b>	<b>7</b>
<hr/>		
<b>2.</b>	<b>Efectos de la contaminación del aire en la salud</b>	<b>9</b>
<hr/>		
<b>3.</b>	<b>Opciones tecnológicas</b>	<b>10</b>
3.1	Beneficios del transporte público eléctrico e híbrido	10
3.2	Beneficios del transporte público colectivo a gas natural	14
<hr/>		
<b>4.</b>	<b>Costo beneficio de la adopción de nuevas tecnologías</b>	<b>15</b>
4.1	Costo de ciclo de vida de vehículos eléctricos e híbridos	15
4.2	Análisis de costo-beneficio de tecnologías más limpias	17
4.3	Compras públicas sostenibles	19
<hr/>		
<b>5.</b>	<b>Fuentes de información</b>	<b>20</b>
<hr/>		
<b>6.</b>	<b>Siglas, acrónimos y abreviaturas</b>	<b>21</b>
<hr/>		



MINAMBIENTE



GOBIERNO DE COLOMBIA



“Hoy nuestro país es líder en temas de medio ambiente y sostenibilidad. No solo impulsamos los Objetivos de Desarrollo Sostenible que adoptaron las Naciones Unidas, sino que fuimos protagonistas en la discusión del Acuerdo de París sobre Cambio Climático...”

**Juan Manuel Santos Calderón**  
**Presidente de la República de Colombia**  
 Instalación de la Legislatura del Congreso de la República 2017-2018. Bogotá, jueves, 20 de julio de 2017.

“En la Cumbre de París sobre cambio climático, fuimos el primer país en América Latina, en imponer un gravamen sobre las emisiones de carbono y estamos totalmente comprometidos a cumplir la meta de reducir las emisiones de carbono en al menos 20 por ciento, que es a lo que nos comprometimos cuando firmamos el Acuerdo de París”.

**Juan Manuel Santos Calderón**  
**Presidente de la República de Colombia**  
 5.º Conferencia Anual en Desarrollo Sostenible. Nueva York, lunes, 18 de septiembre de 2017.



“Es innegable que los retos ambientales que implica el desarrollo sostenible son cada vez mayores, y dentro de ellos el de mejorar la calidad del aire de nuestros centros urbanos. Desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible hacemos un llamado a las ciudades para planificar la transición de nuestra flota de transporte público operada actualmente por combustible diésel hacia tecnologías de cero y bajas emisiones para que en los próximos años contribuyamos a la reducción de emisiones contaminantes y por ende a la descontaminación del aire y a los impactos en salud generados por esta problemática. Además, de esta manera se contribuirá al cumplimiento de la meta de reducción de gases de efecto invernadero en el marco del Acuerdo de París y a la reducción de contaminantes climáticos de vida corta como el carbono negro (hollín), y así mitigar los impactos del cambio climático en el corto plazo”.

**Luis Gilberto Murillo Urrutia**  
**Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

# Aliados internacionales



“Con inversión en buses nuevos viene la oportunidad de invertir en combustibles y motores más limpios. Cada ciudad puede empezar con la meta de llegar en el corto plazo a buses Euro VI, lo que significa un filtro de partículas en motores diésel y control de emisiones en la vida real. Al mismo tiempo y al largo plazo la meta puede ser cero emisiones con el cambio a motores eléctricos. Para hacerlo, las ciudades y el gobierno nacional tienen que trabajar juntos. El Gobierno de Colombia, a través del Comunicado de Marrakech se comprometió a desarrollar un plan para la introducción de las mejores prácticas internacionales para control de emisiones en los vehículos nuevos. En este sentido, y para apoyar a las ciudades, el gobierno tiene un papel importante: hacer disponible un suministro de diésel con 10 partes por millón de azufre a las ciudades, implementar normas Euro VI, y requerir de cada ciudad su plan para llegar a una flota de cero emisiones”.

**Ray Minjares**  
MPH Lider del Programa Aire Limpio



“El recambio tecnológico a buses eléctricos en las ciudades colombianas es un componente fundamental de la estrategia colombiana de movilidad eléctrica que desarrolla el gobierno colombiano con apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU Medio Ambiente). La electrificación del transporte público es una señal clara del compromiso de Colombia en el combate frente al cambio climático y en la mejora en la calidad de vida en las ciudades del país. Colombia cuenta con una matriz energética limpia, predominantemente hidráulica, la adopción y propagación de buses eléctricos es la alternativa energética más limpia y eficiente para reducir las emisiones del sector transporte. No es la primera vez que Colombia marca tendencia en Latinoamérica como fue la introducción de buses de tránsito rápido, ahora con la adopción de buses eléctricos marcará nuevos hitos en términos de innovación tecnológica de la región”.

**Gustavo Mañez**  
Coordinador Cambio Climático  
Oficina Regional para Latinoamérica y el Caribe



“La contaminación atmosférica produce mala salud humana y ecológica, y a la vez contribuye al cambio climático. Menos del 10 por ciento de las personas en los centros urbanos a nivel mundial viven con aire limpio que cumplen con la normativa de salud por contaminación de material particulado establecida por la Organización Mundial de la Salud. En la lucha contra la contaminación del aire, sin duda el sector transporte representa grandes oportunidades de transición hacia tecnologías más limpias y eficientes. El sector transporte contribuye con casi el 20% del hollín - las emisiones de carbono negro - a nivel mundial y se estima que adoptar estándares EURO 6 podría evitar de trescientas a setecientos miles de muertes prematuras a 2030 reduciendo las emisiones de material particulado y otros contaminantes. Desde el año 2012, que Colombia hace parte de la Coalición del Clima y Aire Limpio ha demostrado esfuerzos por la reducción de emisiones de contaminantes climáticos de vida corta como el carbono negro “hollín” en diferentes sectores y así mitigar los efectos del cambio climático en el corto plazo. ¡Hoy celebramos que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo promueva la introducción de vehículos de cero y bajas emisiones en los sistemas de transporte público como un paso hacia el desarrollo sostenible y de ciudades más sostenibles e inteligentes – y para “respirar la vida”!

**Helena Molin Valdez**  
Jefe de la Secretaría - CCAC



Calles libres de combustibles fósiles es el estándar ambiental que las ciudades más avanzadas del mundo han establecido para garantizar una buena calidad del aire y minimizar los problemas de salud de sus ciudadanos, porque los combustibles fósiles y particularmente el diésel, son “el cigarrillo” del siglo XXI. Este modelo implica fortalecer el transporte público con vehículos de cero emisiones, eficiente, cómodo y rápido, generar más espacio para los peatones y para las bicicletas y crear una cultura amable para la convivencia segura de todos los modos de transporte. Este documento es un gran paso en la dirección mencionada.

**Manuel Felipe Olivera**  
Director Regional para América Latina

# SU SEGURIDAD ES IMPORTANTE PARA NOSOTROS

En caso de tormenta, tenga en cuenta esta información:

1. ¿Cómo saber si se aproxima una tormenta?

- Se presenta lluvia.
- Hay acumulación de nubes.
- Se ven relámpagos.

2. Lugares de refugio:

- Interior del centro comercial.
- Interior de un carro con techo.

3. Sitios NO recomendados:

- Cerca de elementos que ofrecen protección contra rayos.
- Árboles en zonas despejadas.
- Árboles de mayor o igual altura que las edificaciones cercanas.
- Postes de alumbrado y de señalización.
- Zonas abiertas como plazas y estacionamientos.
- Cubierta de edificios.
- Sitios de almacenamiento de combustibles y potencialmente explosivos como los tanques de gas.

En caso de tormenta, no recargar.

Área vigilada

Este espacio es vigilado por cámaras de seguridad las 24 horas.

# CARGA

QR →

PUNTO DE RECARGA CARRO ELÉCTRICO

1



## PUNTO DE RECARGA CARRO ELÉCTRICO

**¡ATENCIÓN! LEER ANTES DE USAR**

**DESCRIPCIÓN:** Este punto de recarga está diseñado para ser utilizado por los usuarios de vehículos eléctricos. El punto de recarga está equipado con un sistema de seguridad que evita el uso no autorizado. El punto de recarga está equipado con un sistema de seguridad que evita el uso no autorizado.

**PRECAUCIONES:** Este punto de recarga está diseñado para ser utilizado por los usuarios de vehículos eléctricos. El punto de recarga está equipado con un sistema de seguridad que evita el uso no autorizado. El punto de recarga está equipado con un sistema de seguridad que evita el uso no autorizado.

- AC
- DC COMBO
- DC CHAdeMO

CONÉCTATE AQUÍ

# CARGA RÁPIDA



## I. Emisiones del sector transporte

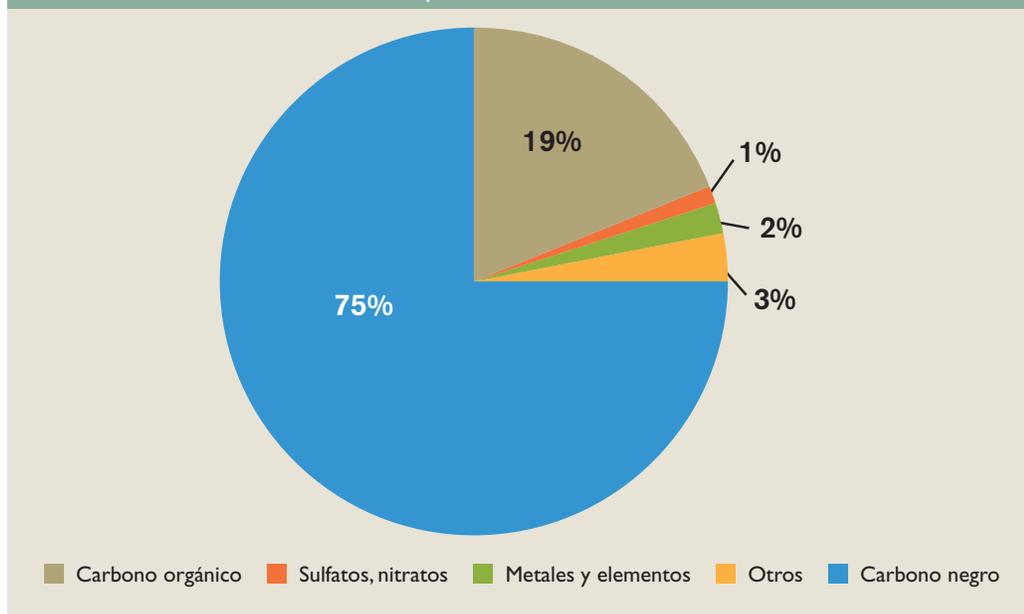
A nivel mundial, el sector transporte contribuye con cerca del 20 % de las emisiones de carbono negro (hollín) que se emiten anualmente, de las cuales cerca del 95 % son aportadas por la combustión de diésel. Las flotas de buses públicos urbanos, aunque son un medio de transporte asequible y ampliamente utilizado en muchas ciudades, está constituida principalmente por maquinaria diésel que contribuye con cerca del 25 % de las emisiones de carbono negro<sup>1</sup>, principal componente de las partículas finas PM<sub>2.5</sub>, emitidas por el sector transporte según estimaciones del Consejo Internacional del Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés) (ICCT, 2015). En la figura 1, se presenta la composición típica de las emisiones de PM<sub>2.5</sub> proveniente de vehículos pesados a diésel.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, el transporte mundial es responsable por más del 60 % del consumo de combustible derivado del petróleo, 13 % de las emisiones globales de gases de efecto

invernadero y 23 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> por consumo de combustibles. Se espera que las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte hayan crecido mundialmente 57 % para 2030, con el 80 % de este crecimiento originado en países en vías de desarrollo (C40, 2013).

El mensaje de las diferentes organizaciones a nivel mundial es promover la transición tecnológica, ya que, al invertir en flotas de buses con tecnologías más limpias y eficientes, al mismo tiempo que promover el uso de combustibles más limpios, traerá beneficios importantes ambientales y económicos, tales como el mejoramiento de la calidad del aire de las ciudades y la mitigación de los efectos del cambio climático a corto plazo. Estos beneficios se verán reflejados en la reducción de los costos asociados a la mortalidad y morbilidad atribuible a la contaminación del aire, en una mayor eficiencia energética y otros beneficios de índole social, ambiental y económica (ICCT, 2017).

**Figura 1.** Composición del material particulado PM<sub>2.5</sub> emitido de vehículos pesados a diésel.



Fuente: U.S. EPA, 2002.

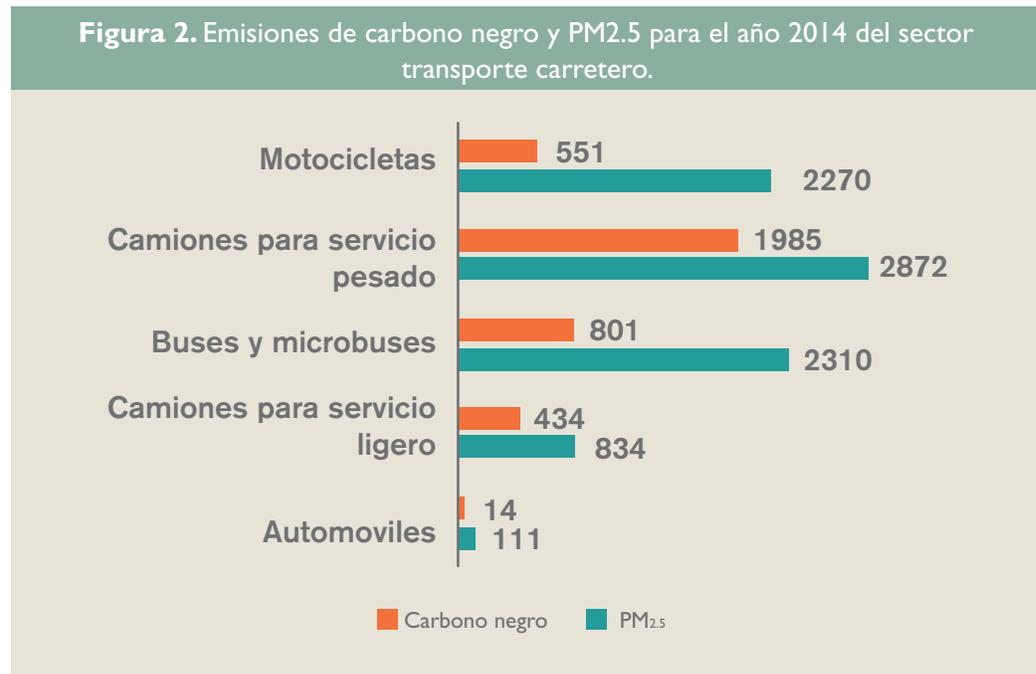
1. El **carbono negro** (componente principal del hollín) es un componente del material particulado, principalmente PM<sub>2.5</sub>, que se produce durante la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa. El carbono negro es un potente forzador climático con un potencial de calentamiento 900 a 3200 veces mayor que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por su capacidad de absorber energía para irradiarla como calor contribuyendo así al calentamiento de la atmósfera (ICCT, 2017). Además, el carbono negro proveniente de la combustión de diésel genera un riesgo a la salud significativo y ha sido catalogado como un componente carcinogénico para los seres humanos por la Organización Mundial de la Salud.

En 2017, la Coalición del Clima y Aire Limpio para la reducción de contaminantes climáticos de vida corta, logró que cuatro fabricantes de buses se comprometieran a traer tecnologías de buses “libres de hollín” a 20 ciudades de Latinoamérica a partir de 2018, entre ellas Bogotá. Las empresas que asumieron el compromiso fueron: BYD, Cummins, Scania y Volvo (CCAC, 2017). Debido al rápido crecimiento de la población urbana y al aumento de la demanda de movilidad eficiente y asequible, se prevé que la actividad de buses urbanos aumentará cerca de un 50 % para el año 2030. Esto se traducirá en un estimado adicional de 26.000 toneladas de carbono negro que serán emitidas en 2030. Las concentraciones de carbono negro son típicamente elevadas en áreas urbanas donde las fuentes de emisión están más densamente localizadas. Para las personas que habitan en zonas urbanas, la exposición a los gases de combustión de diésel constituye hasta en el 70 % del riesgo de exposición a sustancias tóxicas en el aire (ICCT, 2015).

Las ciudades pueden rápidamente reducir las emisiones de partículas y de carbono negro mediante las siguientes medidas:

- ▶ Migrar hacia tecnologías que cumplan normas de emisión EURO VI
- ▶ Privilegiar el uso de maquinaria y tecnologías más limpias de acuerdo con los combustibles disponibles
- ▶ Reemplazar o implementar sistemas de control de emisiones
- ▶ Invertir en infraestructura y combustibles para lograr una transición tecnológica del parque automotor

Para Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estima una emisión nacional de PM<sub>2.5</sub> del transporte terrestre de 8398 Ton/año de PM<sub>2.5</sub> para 2014 (3745 Ton/año de carbono negro), de las cuales cerca del 28 % es atribuible al transporte público (buses y microbuses). En la figura 2 se presenta la contribución de diferentes tipos de transporte a las emisiones de PM<sub>2.5</sub> y carbono negro.



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## 2. Efectos de la contaminación del aire en la salud

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, “la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire los países pueden reducir la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma”.

En Colombia, según estimaciones del Departamento Nacional de Planeación -DNP, los costos por muertes y enfermedades asociadas a la contaminación del aire urbano ascienden a \$12.3 billones de pesos (1.5 % del producto interno bruto (PIB) de 2015) asociados a cerca de 8000 muertes y 67.8 millones de síntomas y enfermedades (DNP, 2017). Algunos resultados por ciudades son:

En Bogotá, el 10,5 % (3.219) del total de las muertes que se presentan en la ciudad, son atribuidas a la contaminación del aire urbano, lo que generó costos estimados en \$4,2 billones de pesos, equivalentes al 2,5% del PIB de la ciudad.

BOGOTÁ

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el 12,3 % (2.105) del total de las muertes que se presentan en el área, son atribuidas a la contaminación del aire urbano, lo que generó costos estimados en \$2,8 billones de pesos, equivalentes al 5 % del PIB del área.

ÁREA  
METROPOLITANA  
DEL VALLE DE  
ABURRÁ

En Cali, el 9,5 % (1.317) del total de las muertes que se presentan en la ciudad son atribuidas a la contaminación del aire urbano, lo que generó costos estimados en \$1,7 billones de pesos, equivalentes al 5,6 % del PIB de la ciudad.

CALI

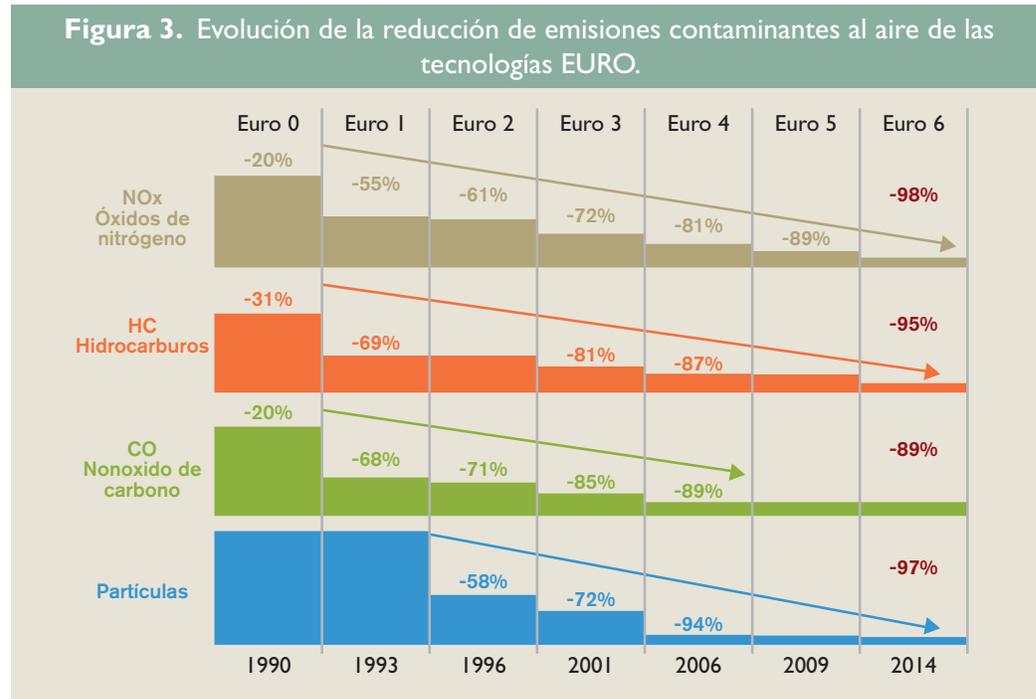
En Bucaramanga y Floridablanca, el 10,5 % (484) de las muertes son atribuidas a la contaminación del aire urbano, lo que generó costos estimados en \$0,6 billones de pesos, equivalentes al 3,9 % del PIB de la ciudad.

BUCARAMANGA Y  
FLORIDABLANCA

Otras emisiones contaminantes, además del hollín, provenientes del transporte son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), aerosoles de sulfatos, ozono troposférico, monóxido de carbono, benceno, así como el principal gas de efecto invernadero dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (GIZ & OMS, 2011).

### 3. Opciones tecnológicas

De acuerdo con diferentes estudios, migrar hacia estándares de emisión EUROVI trae importantes beneficios en términos de reducción de emisiones de óxidos de azufre, partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos como se presenta en la figura 3.



Traducido y adaptado de CESVIMAP, 2016.

Cualquier combinación de tecnología y combustible sería capaz de lograr estándares EURO VI, incluyendo el uso de combustible diésel (si hubiese disponibilidad de combustible con contenido de azufre inferior a 10 ppm), gas natural, biodiésel y electricidad. Dentro de las tecnologías de buses más limpias y eficientes se encuentran:

- ▶ Buses eléctricos
- ▶ Buses híbridos-eléctricos
- ▶ Buses a gas natural
- ▶ Buses con tecnología diésel EURO VI
- ▶ Otras tecnologías libres de hollín (biogás, biodiesel)

#### 3.1 Beneficios del transporte público eléctrico e híbrido

De acuerdo con los resultados del Programa de pruebas de buses híbridos y eléctricos desarrollado por C40 y auspiciado por el Banco Interamericano de Desarrollo publicado en 2013, las tecnologías de buses híbridos y eléctricos son reconocidas como bajas en emisiones de carbono.

Los buses híbridos combinan un motor convencional de combustión interna con un sistema de propulsión eléctrico. Este tipo de buses usa normalmente una fuente de poder diésel-

**Figura 4. Factores de emisión de carbono negro.**

Traducido y adaptado de ICCT, 2017. Factores de emisión basados en COPERT 4, versión 10.0.

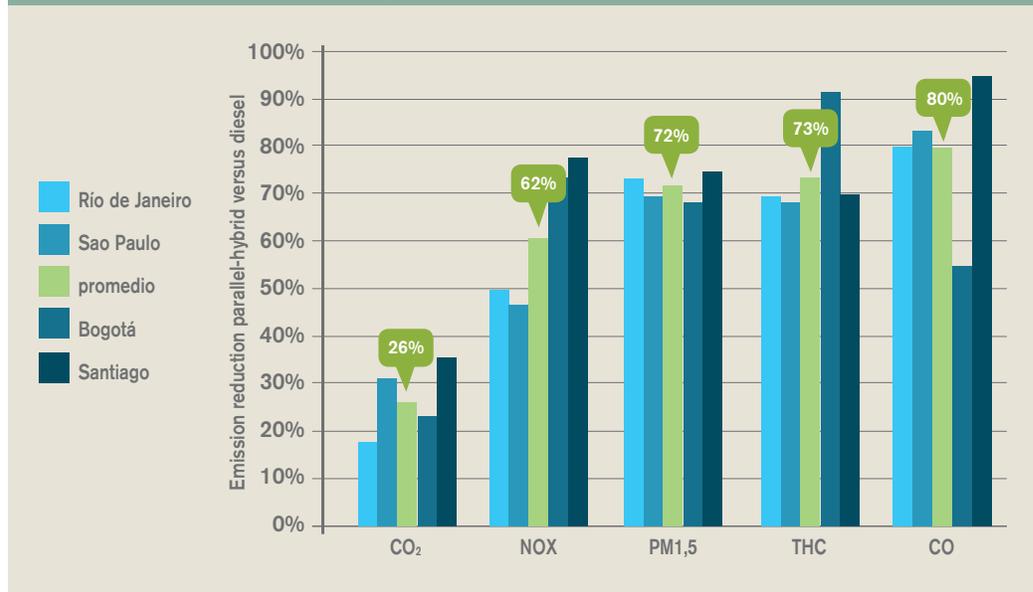
eléctrica por lo que también se denominan como buses híbridos diésel-eléctricos. Con la fuente de poder eléctrica se buscan ahorros de combustible superiores a los de los vehículos convencionales. Los buses híbridos diésel-eléctricos modernos utilizan tecnologías para mejorar la eficiencia, tales como frenado regenerativo, que convierte la energía cinética del vehículo en energía eléctrica para cargar la batería en lugar de disipar la energía en forma de calor cada vez que el vehículo frena.

En general, los vehículos híbridos y eléctricos se pueden clasificar de acuerdo con la fuente de poder que llega al tren de conducción: en paralelo o en serie. En los vehículos híbridos en paralelo, ambos motores, el de combustión interna y el motor eléctrico, están conectados a la transmisión mecánica y pueden transmitir simultáneamente potencia para manejar las ruedas, normalmente mediante transmisión convencional. En los híbridos en serie, solo el motor eléctrico maneja al tren de dirección y el motor de combustión interna trabaja como un generador para alimentar al motor eléctrico o para recargar las baterías. Los híbridos en serie tienen normalmente

motores de combustión más pequeños y un conjunto de baterías más grande que el de los híbridos en paralelo. A su vez, estos tienen motores más pequeños que los de los buses diésel equivalentes.

De otra parte, el programa liderado por C40, demostró que el desempeño de los buses híbridos y eléctricos es mejor que el de los vehículos diésel convencionales en relación con emisiones y eficiencia energética. En varias ciudades de Latinoamérica se probaron diferentes tecnologías de buses donde se aplicaron pruebas sobre tres componentes principales para medir el desempeño de los buses: i) las emisiones directas del tubo de escape, ii) el consumo de combustible y energía y iii) el rol de los conductores, recorridos, topografías y altitudes. Los resultados se presentan en la figura 5, donde se compara la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio de las tecnologías de buses eléctricos e híbridos frente a la tecnología diésel. En Bogotá donde está disponible el combustible diésel de 50 ppm de azufre, se probaron dos tecnologías de buses híbridos, durante cerca de 30 horas, bajo condiciones reales de manejo. De

**Figura 5.** Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminantes criterio de tecnologías de buses híbridos vs diésel.



Fuente: C40, 2013.

otra parte, los buses híbridos no requieren inversiones adicionales en infraestructura. Los sistemas híbridos consumen menos energía y consecuentemente reducen CO<sub>2</sub>, óxido de nitrógeno y emisiones de partículas como se describe más adelante.

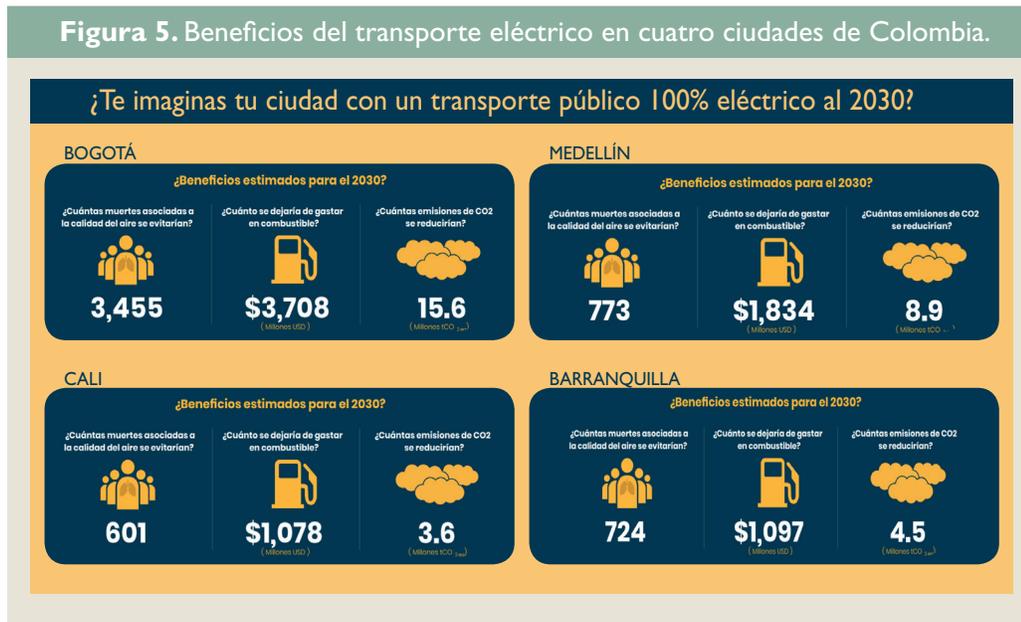
El ciclo de ruta también tiene un impacto en el desempeño de las diferentes tecnologías estudiadas, de acuerdo con otros estudios. La ventaja de los buses híbridos es mayor en ciclos de ruta con velocidades muy bajas y con muchas paradas, como lo observado en las ciudades. Los buses con motor eléctrico dedicado tienen más ventajas frente a los buses híbridos porque no pierden su ventaja en eficiencia en ciclos de ruta con velocidades altas. De otra parte, un motor Euro VI con motor híbrido o dedicado eléctrico aprovecha las ventajas de la mejor tecnología para bajar emisiones de contaminantes y eficiencia energética (ICCT, 2017a). De acuerdo con el estudio que ha sido preparado para ONU Medio Ambiente como parte del programa de cooperación regional de EUROCLIMA, los buses eléctricos son un sistema de propulsión eléctrica, impulsado por un sistema de baterías

(baterías y sistema de manejo de baterías) con sistemas de frenos regenerativos y otros componentes eléctricos. En general, compiten dos soluciones tecnológicas distintas para buses urbanos. La primera consiste en buses con un gran paquete de baterías, típicamente de litio-ferrofosfato (LFP por sus siglas en inglés) que les permite operar un día completo con una sola carga, efectuada durante toda una noche a través de sistemas de carga estacionaria. Mientras que la otra tecnología consiste en buses equipados con un paquete de tamaño menor, pero con baterías de litio y titanio (LPO, por sus siglas en inglés) capaces de descargarse en un corto lapso, por lo que se recargan varias veces durante el día con un sistema de carga oportuna o en ruta, que consiste también en un sistema de carga estacionaria. El tamaño de la batería y la capacidad de carga determinan la duración de la carga. Los operadores deben tener en cuenta el espacio que se requiere y la ubicación de los vehículos durante este periodo. En importante resaltar que existen otras maneras de diseñar la batería, además de las dos mencionadas.

Actualmente existen un número limitado de fabricantes de buses eléctricos, tales como BYD y Yutong de China, país que tiene la flota más grande en circulación a nivel global. Estos buses corresponden a la tecnología de carga durante la noche, mientras que la gran mayoría de los desarrollos actuales en Europa y América del Norte corresponde a la tecnología de carga oportuna (*opportunity charging*), que lleva un número menor de baterías que son cargadas frecuentemente durante la operación diaria del vehículo. Sin embargo, también existen tecnologías en el mercado de buses diseñados para ser cargados durante toda la noche que pueden llevar un sistema de carga oportuna, con el propósito de dar flexibilidad en servicio. Aun así, los buses urbanos y aún más las rutas de los sistemas de buses de tránsito rápido (BRT, sigla en inglés de: *bus rapid transit*) presentan una situación ideal para

la aplicación de mecanismos de propulsión eléctrica para vehículos pesados, dado que tienen recorridos predefinidos, de corta distancia, con varias paradas que ayudan a los sistemas de frenos regenerativos y operan a velocidades bajas. Igual de importante es que los buses urbanos regresan a terminales en las noches donde tienen la posibilidad de cargar sus baterías para el recorrido del siguiente día. Expertos internacionales recomiendan a los operadores, incluir dentro de las licitaciones demostraciones de buses con tecnologías cero y bajas emisiones, operarlas en ruta hasta que se aprende cómo integrarlas a toda la flota. En la figura 6, se presentan los beneficios estimados de reemplazar el transporte público actual por buses eléctricos, en términos de las muertes evitadas atribuibles a la mala calidad del aire, ahorros en combustible y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Figura 5. Beneficios del transporte eléctrico en cuatro ciudades de Colombia.



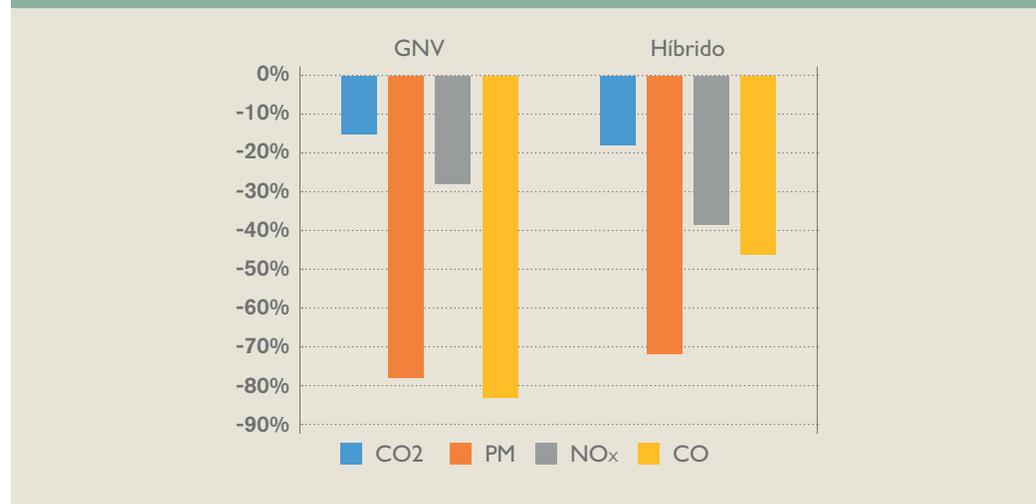
Fuente: ONU Medio Ambiente & Euroclima. Movilidad eléctrica (2016)

### 3.2. Beneficios del transporte público colectivo a gas natural

Los vehículos dedicados originales de fábrica de última generación a gas natural comprimido para vehículos (GNCV) son desarrollados para operar en diferentes condiciones topográficas y con calidades diferentes de gas natural o biogás. Esta tecnología es actualmente una alternativa para Colombia que cuenta con certificación de emisiones EURO VI, que puede operar sin restricciones por calidad de combustible o condiciones locales. En el 2017, un estudio de la Universidad Nacional en Bogotá demostró que, en pruebas en ruta (on-board) y con condiciones reales, la reducción de emisiones de contaminantes, tales como material particulado, NOX, CO, hidrocarburos totales y CO<sub>2</sub> de buses biarticulados a GNCV con motor Scania Euro 6 es mayor, comparada con la reducción de emisiones obtenida con vehículos con homologaciones Euro 5. En este estudio, se estimó que las emisiones de PM<sub>2.5</sub> (gr/km) en un bus biarticulado Euro 5 diésel son 76.000 veces superiores a las generadas por el bus biarticulado a GNCV Euro 6. De otra parte, las emisiones de NOX (gr/km) en un bus Euro 5 diésel biarticulado son hasta 400.000 veces superiores a las generadas por el bus biarticulado a GNCV Euro 6.

De otra parte, un estudio realizado por la Universidad de los Andes en 2016 confirma estos resultados. Durante este estudio se realizó una revisión teórica sobre diferentes tecnologías vehiculares y se estimó la reducción porcentual promedio de CO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>x</sub> y CO para buses dedicados a gas natural y para buses híbridos eléctricos, con respecto a los factores de emisión de un bus diésel convencional, como se presenta en la figura 7. Se puede observar que la reducción de emisiones de material particulado y CO es cercana al 80 % para el caso de gas natural, mientras que la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> es cercana al 40 % para vehículo híbrido, en comparación con un vehículo diésel Euro 5.

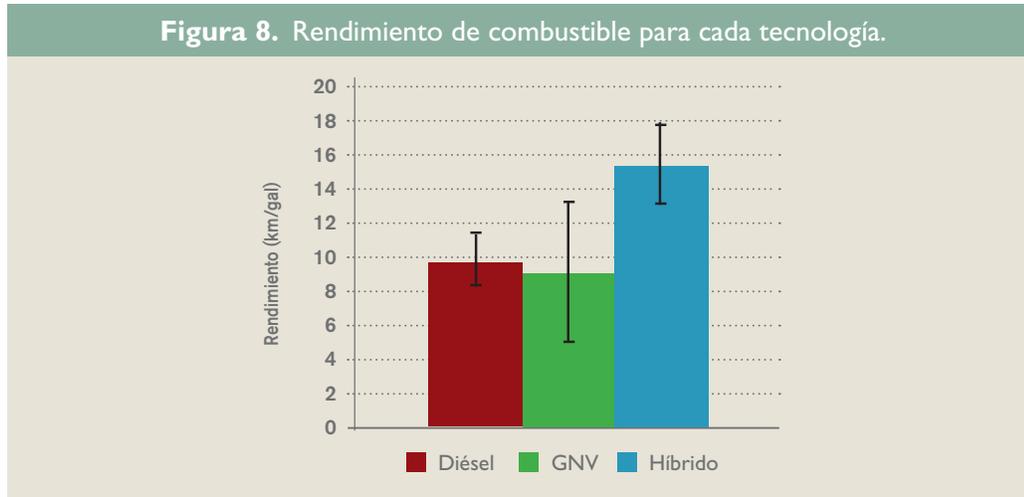
**Figura 7.** Reducción promedio de los factores de emisión para buses que operan con gas natural vehicular y bus híbrido con respecto a bus diésel (50 ppm de contenido de azufre).



Fuente: Universidad de los Andes (2016)

Además, este estudio comparó el rendimiento energético para las diferentes tecnologías, para lo cual se calculó el rendimiento equivalente de energía por galón de diésel, teniendo en cuenta la capacidad calorífica de los combustibles. La comparación entre las tres tecnologías se presenta a continuación, en la figura 8:

Además, este estudio comparó el rendimiento energético para las diferentes tecnologías, para lo cual se calculó el rendimiento equivalente de energía por galón de diésel, teniendo en cuenta la capacidad calorífica de los combustibles. La comparación entre las tres tecnologías se presenta a continuación, en la figura 8:



Fuente: Universidad de los Andes (2016)

Por último, es necesario apoyar cualquier tecnología con inversiones en combustible, con combustibles limpios de una parte y electricidad renovable de otra parte. El cambio en los vehículos necesita un cambio en todo el sistema que apoya la operación de la flota.

## 4. Costo beneficio de la adopción de nuevas tecnologías

### 4.1. Costo de ciclo de vida de vehículos eléctricos e híbridos

De acuerdo con el *Programa de pruebas de buses híbridos y eléctricos* (C40, 2013), se ha demostrado que el desempeño de los buses híbridos y eléctricos es mejor que el de los vehículos diésel convencionales en relación con emisiones y eficiencia energética. Según expertos del ICCT (comunicación personal), los buses con motores EURO VI proporcionan el mejor desempeño de cualquier motor de combustión incluyendo los buses diésel dedicados, híbridos, a gas natural o biogás. Sin embargo, la meta

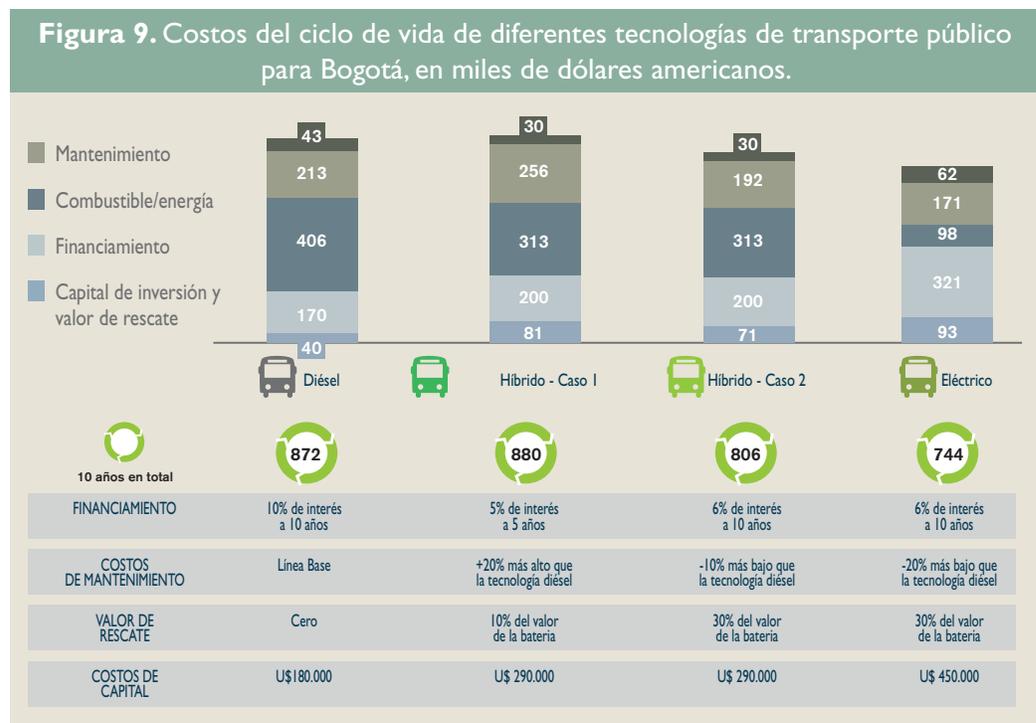
última de los sistemas de transporte público y masivo debe ser las tecnologías de buses de cero emisiones con motores dedicados eléctricos puesto que eliminan la contaminación del aire y representan actualmente la mejor tecnología para mitigar el impacto del transporte público en la salud. Además, estos motores proporcionan la mejor eficiencia energética lo que contribuye también a mitigar los impactos del cambio climático.

La adopción de tecnologías de bajo carbono en América Latina está sujeta a varios escenarios de regulación y sistemas de impuestos. Por ejemplo, los actuales subsidios al diésel fomentan la inversión en

tecnologías diésel convencionales y las barreras a la importación en forma de aranceles favorecen la continuidad del sistema establecido de producción local de buses diésel. Las evaluaciones de largo plazo de costos de mantenimiento y operación afectan fuertemente el análisis económico de ciclo de vida, así como también el análisis de escenarios de mercado, mostrando que los mercados secundarios al final del ciclo de vida de las baterías pueden tener efectos importantes.

El análisis económico muestra que durante el ciclo de vida de la tecnología (un período de 10 años), un bus híbrido o eléctrico tiene un costo de inversión inicial mayor, pero un costo operacional competitivo, además de muy bajos costos de mantenimiento en el caso de los buses eléctricos. La gran ventaja potencial de estas tecnologías está en los beneficios ambientales, de salud para la población y beneficios sociales de diverso tipo. Adicionalmente, la adopción de buses eléctricos a gran escala ayuda a desarrollar el mercado de este tipo de vehículos de tecnología de bajo carbono, al mismo tiempo que se aumenta la estabilidad operacional, ya que se reduce la incertidumbre del precio de la energía debido a la característica más predecible del costo de la electricidad respecto de cualquier combustible líquido.

En la figura 9 se presentan los costos del mantenimiento, el consumo de combustible, financiamiento y capital de inversión para cuatro tecnologías de buses, considerando un tiempo de vida del proyecto de 10 años traídos a valor presente neto.



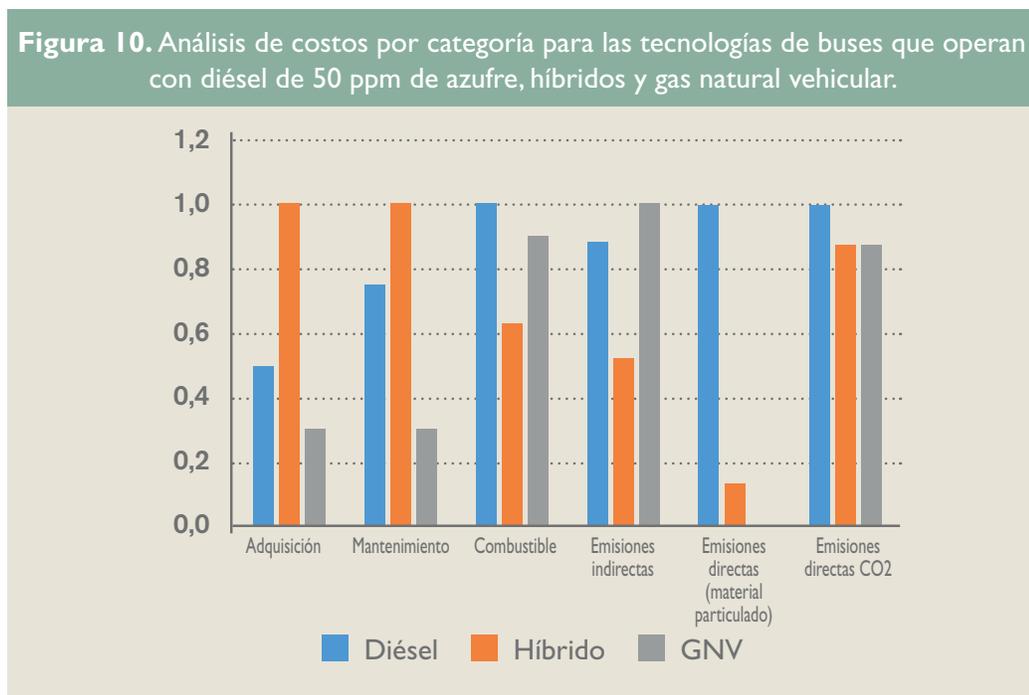
Traducido y adaptado de C40, 2013.

De acuerdo con el estudio del ICCT (2017a), donde se analizaron opciones tecnológicas libres de hollín para 20 ciudades, incluida Bogotá, se obtienen conclusiones similares. La inversión inicial para la implementación de tecnologías de cero y bajas emisiones es mayor en comparación con la de tecnologías convencionales. Sin embargo, en el caso de buses dedicados eléctricos, la reducción de costos de operación a lo largo del proyecto con este tipo de buses permite que el costo total de implementación de buses con tecnologías limpias sea menor:

De otra parte, el estudio de la Universidad de los Andes (2016) evidencia cómo la tecnología con menores costos financieros es la del GNV. Los vehículos que operan con este combustible generan costos financieros 22 % inferiores a los generados por vehículos con tecnología híbrida y 7 % inferiores a los generados por vehículos diésel. Adicionalmente, se observa que para la tecnología híbrida el mayor costo proviene de la adquisición, mientras que para el diésel y el GNV el mayor costo corresponde al combustible.

## 4.2. Análisis de costo-beneficio de tecnologías más limpias

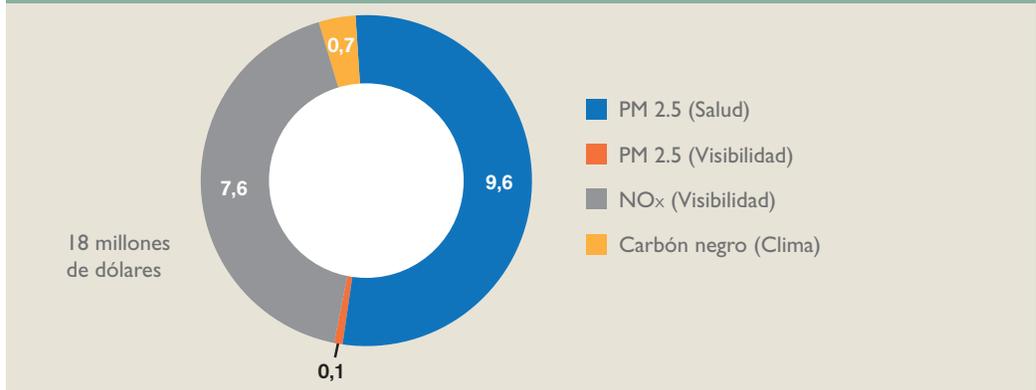
La Universidad de los Andes (2016) realizó un estudio comparativo sobre los costos de cada alternativa, para lo cual definió un indicador que permite normalizar cada rubro. Este indicador varía de 0 a 1, donde 1 representa el costo más alto de las tres tecnologías. El resultado comparativo se presenta en la figura 10.



Fuente: Universidad de los Andes, 2016.

De otra parte, en el año 2017 el ICCT ha realizado un estudio costo-beneficio para el caso específico de Transmilenio (Bogotá) donde se ha estimado el valor de la reducción de emisiones de  $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$  y carbono negro a lo largo de 15 años de operación si se implementaran buses con motor certificado EURO VI, el cual se estima en cerca de 18 millones de dólares. En la figura 11 se presenta este resultado.

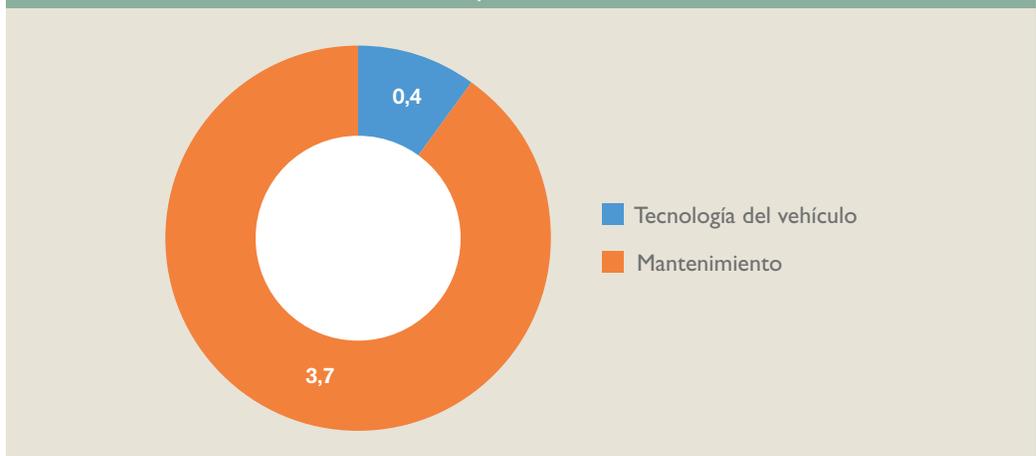
**Figura 11.** Beneficio de la reducción de emisiones evaluados en 15 años de operación con buses EURO VI.



Fuente: ICCT, 2017b.

El costo de implementación de la tecnología, así como el mantenimiento a lo largo de 15 años de operación, se estima en 4.1 millones de dólares como se presenta en la figura 12.

**Figura 12.** Costo incremental de la implementación de buses EURO VI en 15 años de operación.



Fuente: ICCT, 2017b.

En conclusión, los beneficios de promover la introducción de tecnologías de cero y bajas emisiones en el transporte público, supera ampliamente los costos de implementación. De otra parte, en el estudio realizado por la firma Steer Davis Gleave en 2017 (citado por Semana Sostenible, 2017), se establece que con la implementación de gas natural en los sistemas de transporte colectivo de las 15 principales ciudades de Colombia y en algunas rutas intermunicipales de carga, se generarían ahorros cercanos a 13.5 billones de pesos durante el periodo 2018-2035. Específicamente se muestra que un 96 % de los beneficios provienen de utilizar un combustible relativamente menos costoso y el 4 % restante proviene de beneficios por menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y menores costos en salud pública por emisiones contaminantes. La adopción significativa

del GNV representaría una disminución en emisiones del 4.3 % de la meta fijada por Colombia en el marco del Acuerdo de París.

En resumen, las ciudades colombianas y en general las ciudades latinoamericanas tienen una gran oportunidad de considerar opciones de transporte público más limpio y eficiente, libre de partículas contaminantes y hollín, dirigiendo sus mercados hacia tecnologías de bajo carbono, y particularmente buses híbridos y eléctricos. El esfuerzo económico requerido se compensa ampliamente con los grandes beneficios ambientales y de salud que se desencadenarán. Aliados internacionales y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, promueven e invitan a las ciudades a mover sus sectores de transporte hasta la frontera de la movilidad sostenible de bajo carbono.

### 4.3. Compras públicas sostenibles

Es importante resaltar que los costos de producción y adquisición no son los únicos que definen el precio de un bien o servicio. Si bien, son aquellos que el productor paga directamente, hay otros costos que se generan en contra del medio ambiente y la sociedad pero que nadie contempla. Estos son considerados externalidades. En cuanto a los sistemas de transporte público, es importante señalar que, si bien las tecnologías de cero y bajas emisiones pueden ser consideradas más costosas de implementar, es necesario considerar también el costo para las entidades públicas de cubrir sistemas de salud debido al aumento de enfermedades respiratorias si se implementan tecnologías altamente emisoras.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha puesto a disposición de las entidades públicas y privadas herramientas con el propósito de considerar las externalidades ambientales dentro de los análisis costo beneficio, como el *Manual de compras sostenibles para entidades públicas y privadas*, disponible en la página web del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## 5. Fuentes de información

- ▶ C40 (2013) Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleet. C40 Cities Climate. Disponible en: <http://www.c40.org/researches/low-carbon-technologies-can-transform-latin-america-s-bus-fleets>
- ▶ CCAC (2017) Bus Manufacturers Commit to Bring Cleaner 'Soot-Free' Buses to 20 Megacities. Disponible en: <http://ccacoalition.org/en/news/bus-manufacturers-commit-bring-cleaner-%E2%80%98soot-free%E2%80%99-buses-20-megacities>
- ▶ CESVIMAP (2016) Control de emisiones contaminantes en Europa y Estados Unidos. Centro de Experimentación y Seguridad Vial. Disponible en: <http://www.revistacesvimap.com/control-de-emisiones-contaminantes-en-europa-y-estados-unidos/>
- ▶ DNP (2017) Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones. Departamento Nacional de Planeación. Disponible en: [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- ▶ GIZ & OMS (2011) Transporte Urbano y Salud. Módulo 5g: Transporte sostenible. Texto de referencia para formuladores de política pública de ciudades en desarrollo. Disponible en: [http://www.who.int/hia/green\\_economy/giz\\_transport\\_sp.pdf](http://www.who.int/hia/green_economy/giz_transport_sp.pdf)
- ▶ ICCT (2015). Soot-free urban bus fleets. International Council on Clean Transportation. Autor: Ray Minjarres. EcoMobility Dialogues / Technical Papers. Disponible en: [http://www.ecomobilityfestival.org/wp-content/uploads/2015/10/EcoMobility\\_Soot-Free-Urban-Bus-Fleets\\_29-Sept-2015.pdf](http://www.ecomobilityfestival.org/wp-content/uploads/2015/10/EcoMobility_Soot-Free-Urban-Bus-Fleets_29-Sept-2015.pdf)
- ▶ ICCT (2017) Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities. The International Council on Clean Transportation. Disponible en: <https://www.theicct.org/publications/financing-transition-soot-free-urban-bus-fleets-20-megacities>
- ▶ ICCT (2017a) Low-carbon technology pathways for soot-free urban bus fleets in 20 megacities. The International Council on Clean Transportation. Disponible en: [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Low-carbon-tech-pathways-soot-free-buses-megacities\\_ICCT-working-paper\\_31082017\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Low-carbon-tech-pathways-soot-free-buses-megacities_ICCT-working-paper_31082017_vF.pdf)
- ▶ ICCT (2017b) Pensando a futuro: conectando tecnologías y políticas para un transporte limpio y eficiente. Francisco Posada, Kate Blumberg, Ray Minjares. Taller OMU CAF. Bogotá, 13 de Diciembre, 2017.
- ▶ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) Manual de compras sostenibles para entidades públicas y privadas. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/compras\\_p%C3%BAblicas/Manual\\_compras\\_S.O.Stenibles.compressed.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/compras_p%C3%BAblicas/Manual_compras_S.O.Stenibles.compressed.pdf)
- ▶ ONU Medio Ambiente & Euroclima. Movilidad eléctrica (2016). Oportunidades para Latinoamérica. Disponible en: [http://movelatam.org/Movilidad%20electrica\\_%20Oportunidades%20para%20AL.pdf](http://movelatam.org/Movilidad%20electrica_%20Oportunidades%20para%20AL.pdf)
- ▶ Semana Sostenible. Artículo del 30 noviembre de 2017: pacto entre gremio del gas natural y gobierno. Disponible en: <http://sostenibilidad.semana.com/hablan-las-marcas/articulo/pacto-entre-gremio-del-gas-natural-y-gobierno/39052>
- ▶ Universidad de los Andes (2016) Actualización del estudio, Conveniencia del gas natural vehicular en Colombia: Caso de estudio para el sector transporte público. Grupo de estudios en sostenibilidad urbana y regional – SUR.
- ▶ Universidad Nacional de Colombia (2017) Pruebas de Desempeño en un Vehículo con Motor Dedicado a Gas Natural – Presentación del profesor: Helmer Acevedo. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Financiado por: GAS NATURAL FENOSA. Apoyo: SCANIA – COLOMBIA.
- ▶ U.S. EPA (2002) Health assessment document for diesel engine exhaust. Report by the National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/8-90/057F. Disponible en: [http://oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p\\_download\\_id=36319](http://oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=36319)

## 6. Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>BRT</b>	bus rapid transit (buses de tránsito rápido)
<b>C40</b>	Cities climate leadership group (grupo de liderazgo de ciudades frente al clima)
<b>CCAC</b>	Climate and clean air coalition (Coalición del clima y aire limpio)
<b>CESVIMAP</b>	Centro experimentación y seguridad vial
<b>COPERT</b>	Computer Program to calculate Emissions from road transport (programa computacional para calcular las emisiones del transport carretero)
<b>DNP</b>	Departamento nacional de planeación
<b>EUROCLIMA</b>	Programa de cooperación regional entre la Unión Europea y América Latina
<b>GEF</b>	Global environment facility (Fondo para el Medio Ambiente Mundial)
<b>GIZ</b>	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Agencia alemana de cooperación técnica)
<b>GNCV</b>	gas natural comprimido para vehículos
<b>GNV</b>	gas natural vehicular
<b>ICCT</b>	International Council on Clean Transportation (Concilio internacional para el transporte limpio)
<b>LFP</b>	litio-ferrofosfato
<b>LPO</b>	litio y titanio
<b>OMS</b>	Organización mundial de la salud
<b>ONU Medio Ambiente</b>	Programa de naciones unidas para el medio ambiente
<b>PIB</b>	producto interno bruto
<b>US EPA</b>	United States Environmental Protection Agency (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos)

## Nomenclatura

<b>CO<sub>2</sub></b>	dióxido de carbono
<b>CO</b>	monóxido de carbono
<b>NO<sub>x</sub></b>	óxidos de nitrógeno
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	partículas en el aire de diámetro inferior a 2.5 micrómetros
<b>PM</b>	material particulado
<b>THC</b>	hidrocarburos totales



---

GOBIERNO DE COLOMBIA



---

MINAMBIENTE

---