

Análisis de la problemática de contaminación del aire en Bogotá desde una perspectiva de salud

Elkin Osorio-Saldarriaga¹

Sofía Ríos-Oliveros²

Jhon Abella-Flórez³

Ana Gálvez-Lozada⁴

Manuel González-Mayorga⁵

Samuel Osorio-García⁶

Resumen

La contaminación del aire es actualmente uno de los problemas ambientales más importantes que afecta la salud pública de todas las sociedades. En grandes urbes, esta problemática tiene unas connotaciones diferentes, dadas las condiciones y modos de vivir de los habitantes. Independientemente del grado de desarrollo socioeconómico, constituye un fenómeno relacionado con múltiples efectos agudos y crónicos en la salud humana. El presente artículo pretende contextualizar este fenómeno para Bogotá, los agentes contaminantes y sus principales fuentes, los efectos en la salud y la generación de recomendaciones en salud; se enfatiza

en la contaminación de ambientes exteriores por material particulado y resuspendido. Se concluye que la mala calidad del aire en Bogotá comparte características similares a las de las grandes urbes; sin embargo, hay características particulares que permiten orientar las intervenciones del sector de manera específica, reconociendo que las intervenciones más efectivas se abordan en el ámbito intersectorial.

Abstract

Air pollution is currently one of the most important environmental problems that affects the public health of all societies. In large cities this problem has different connotations given the conditions and lifestyles of the inhabitants. Regardless of the level of socioeconomic development, it is a phenomenon related to multiple acute and chronic effects on human health. This article intends to contextualize for the city of Bogotá this phenomenon, criteria pollutants and their main sources, health effects and the generation of health recommendations; emphasizes the pollution of outdoor environments by particulate and resuspended material. It is concluded that the poor air quality in Bogotá shares similar characteristics to those of the big cities; however, there are particular characteristics that allow the sector's interventions to be specifically targeted, recognizing that the most effective interventions are addressed at the intersectoral scope.

Introducción

Los efectos agudos y crónicos en la salud humana relacionados con la contaminación atmosférica son múltiples (1). La contaminación atmosférica urbana aumenta el ries-

- 1 Médico epidemiólogo, doctor en Salud pública. Secretaría Distrital de Salud. Bogotá, Colombia.
- 2 Enfermera magíster en Salud Pública. Secretaría Distrital de Salud. Bogotá, Colombia.
- 3 Ingeniero sanitario y ambiental. Especializado en Gestión Ambiental. Secretaría Distrital de Salud. Bogotá, Colombia.
- 4 Ingeniera ambiental, especializada en Gerencia en Seguridad y Salud en el Trabajo. Secretaría Distrital de Salud. Bogotá, Colombia.
- 5 Odontólogo, magíster en Salud pública. Secretaría Distrital de Salud. Bogotá, Colombia.
- 6 Médico, magíster en Salud Pública. Secretaría Distrital de Salud. Bogotá, Colombia.

go de padecer enfermedades respiratorias agudas, como la neumonía; crónicas, como el cáncer de pulmón; cardiovasculares, diabetes mellitus, deficiencias en el desempeño cognitivo, entre otras (2).

La exposición a la contaminación del aire ambiente se distribuye de manera diferencial entre los grupos de personas según su residencia, relación con el entorno, uso de los servicios públicos como el transporte, tiempo y forma de exposición a los contaminantes, condiciones de salud (los efectos más graves se producen en las personas que ya están enfermas), características de vulnerabilidad (los niños, los ancianos, las mujeres embarazadas y las familias de pocos ingresos y acceso limitado a la asistencia médica).

Como sucede con las principales ciudades del mundo, la contaminación del aire en Bogotá es en la actualidad un problema de salud pública que requiere una respuesta organizada de prevención, adaptación y cuidado de las personas y familias expuestas, de manera que se reconozcan sus determinantes, incluya recomendaciones racionales y se fundamente en la evidencia.

El presente artículo hace una revisión de algunas de estas circunstancias como sustento y punto de partida para la generación de recomendaciones a la población general, a los sectores y a las instituciones competentes.

Materiales y métodos

Tipo de estudio

Es una revisión temática sobre los ejes que relacionan la contaminación del aire con los principales efectos en salud en Bogotá,

y un análisis descriptivo de las relaciones espaciales de contaminación con algunos efectos en salud seleccionados. Para ello, se conformó un equipo técnico multidisciplinario de profesionales de las áreas de la salud y ambiente, quienes, con base en la evidencia disponible, información local y reuniones de discusión-producción, crearon recomendaciones generales de prevención, adaptación y mitigación de los efectos en salud.

Fuentes de información

Bases de datos de mortalidad generadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), de las que se seleccionaron las muertes por enfermedades potencialmente asociadas con contaminación ambiental; registros de estimaciones y proyecciones de población generadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE); bases de datos del Sistema de Vigilancia en Salud Pública; bases de datos bibliográficas. En la revisión de literatura se consultaron Medline (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), Embase (<https://www.elsevier.com/solutions/embase-biomedical-research>), Scielo (<https://scielo.conicyt.cl/>).

Resultados

Efectos en salud

Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Se estima que la contaminación ambiental del aire, tanto en las ciudades como en las zonas rurales, fue causa de 4,2 millones de muertes prematuras por año en todo el mundo; esta mortalidad se debe a la exposición

a gases tóxicos y a material particulado, del cual se destaca el conformado por partículas pequeñas de 2,5 micrones o menos de diámetro ($PM_{2,5}$), que causan enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer (3). Las últimas estimaciones de la carga de morbilidad reflejan el peso que desempeña la contaminación del aire en las enfermedades y muertes prematuras. Cada vez hay más pruebas que demuestran los vínculos entre la contaminación del aire y el riesgo de enfermedad cardiovascular, incluidos estudios realizados en zonas muy contaminadas.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en el 2016, aproximadamente el 58 % de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares; 18 %, a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas, y 6 %, a cáncer de pulmón (3).

Los efectos del $PM_{2,5}$ en la salud son de particular interés y han sido ampliamente estudiados (4,5); se encontraron evidencias de nuevos desenlaces que antes no se imaginaban (6). A la fecha no hay suficiente información que establezca concentraciones de $PM_{2,5}$ en el aire en las cuales no se generen efectos para la salud humana, a pesar de que las autoridades sanitarias y ambientales de los países determinen ciertos niveles de referencia (7). Varios grupos y disciplinas avanzan en este propósito; así, por ejemplo, esta relación se puede analizar con curvas dosis-efecto ampliamente usadas en el campo de la toxicología y la farmacología.

Apte y colaboradores mostraron curvas dosis-respuesta para material particulado y mortalidad por las causas más relacionadas con contaminación del aire (8) en las que se ve el efecto sobre la mortalidad por infarto

agudo de miocardio y el accidente cerebrovascular (ACV). Zeng y colaboradores construyeron curvas dosis-respuesta para $PM_{2,5}$ e ingresos diarios a servicios sanitarios por ACV en Chengdu, China, para 2013-2015, usando análisis de series temporales y modelos aditivos generalizados; así, encontraron que el riesgo era mayor para los días de atraso 1 y 0 (mismo día de contaminación elevada y al día siguiente), y para adultos de menos de 65 años; no encontraron relación con el material particulado de 10 micras de diámetro (PM_{10}), lo cual ayuda a soportar la copiosa evidencia que muestra que el $PM_{2,5}$ tiene una relación con salud más fuerte que el PM_{10} (9).

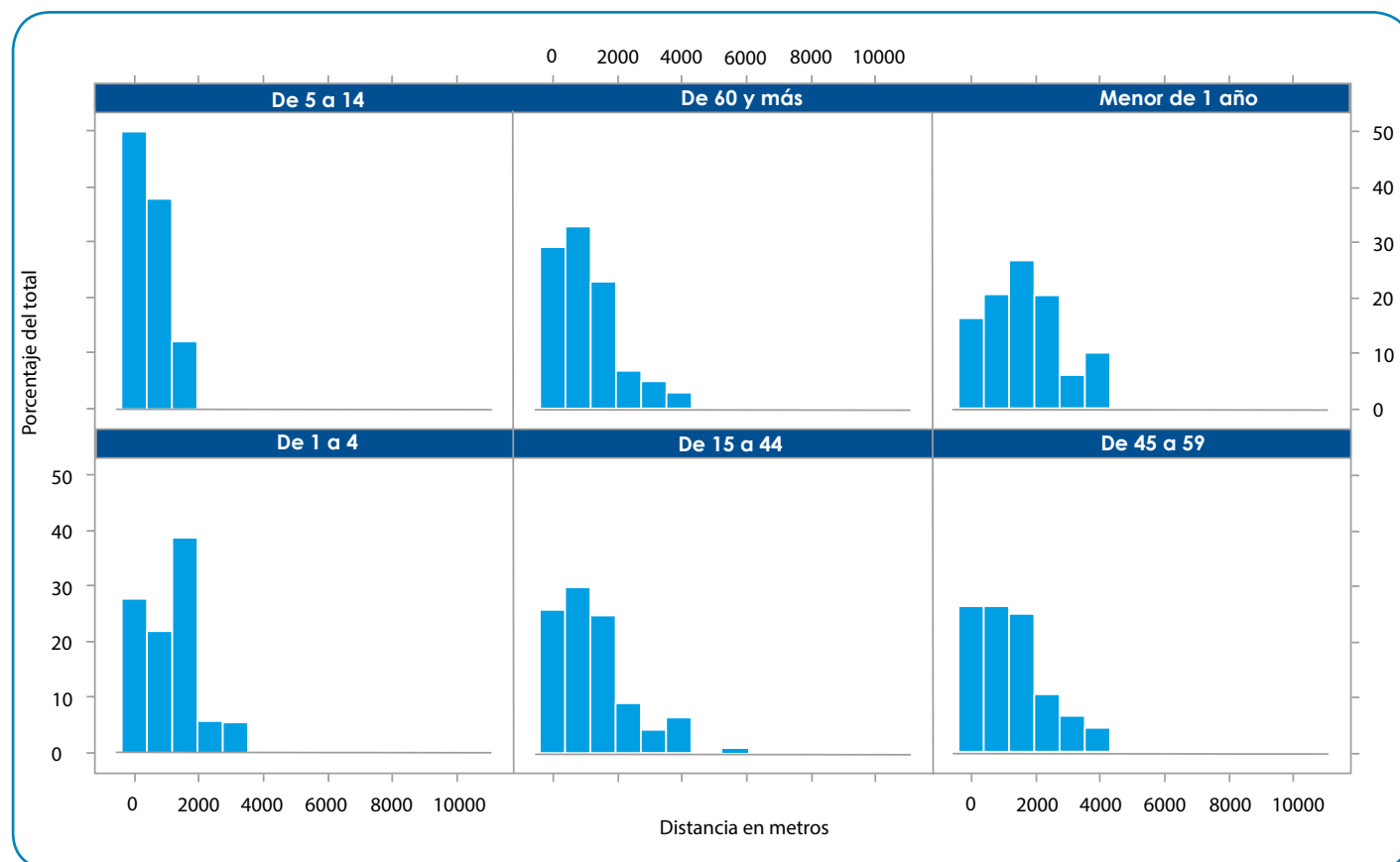
En Bogotá, se exploró la potencial relación entre la contaminación del aire en las grandes troncales de la ciudad con los datos georreferenciados de mortalidad por los diagnósticos de cáncer de pulmón, enfermedad isquémica del corazón, enfermedad cerebrovascular, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), enfermedad respiratoria aguda y diabetes para el 2016. Se encontró un total de 11.339 defunciones para todos los grupos de edad, así: 40,5 % (4.509) de muertes por enfermedad isquémica del corazón, 17,82 % (2.021) por enfermedad cerebrovascular; 17,65 % (2.002) por EPOC; 9,48 % (1.075) por enfermedad respiratoria aguda; 8,41 % (954) por diabetes, y 6,06 % (688) por cáncer de pulmón.

A partir de esto, se le asignó un valor promedio anual de $PM_{2,5}$ a la zona de residencia de cada uno de los datos georreferenciados y se calculó la distancia en metros, teniendo como referencia una vía de transporte arterial denominada *troncal*. Al realizar la distribución por edad, se observa que, a mayor cercanía con la *troncal*, los niños de 5-14 años presentan un mayor porcentaje de muertes que en los demás grupos de edad (figura 1).

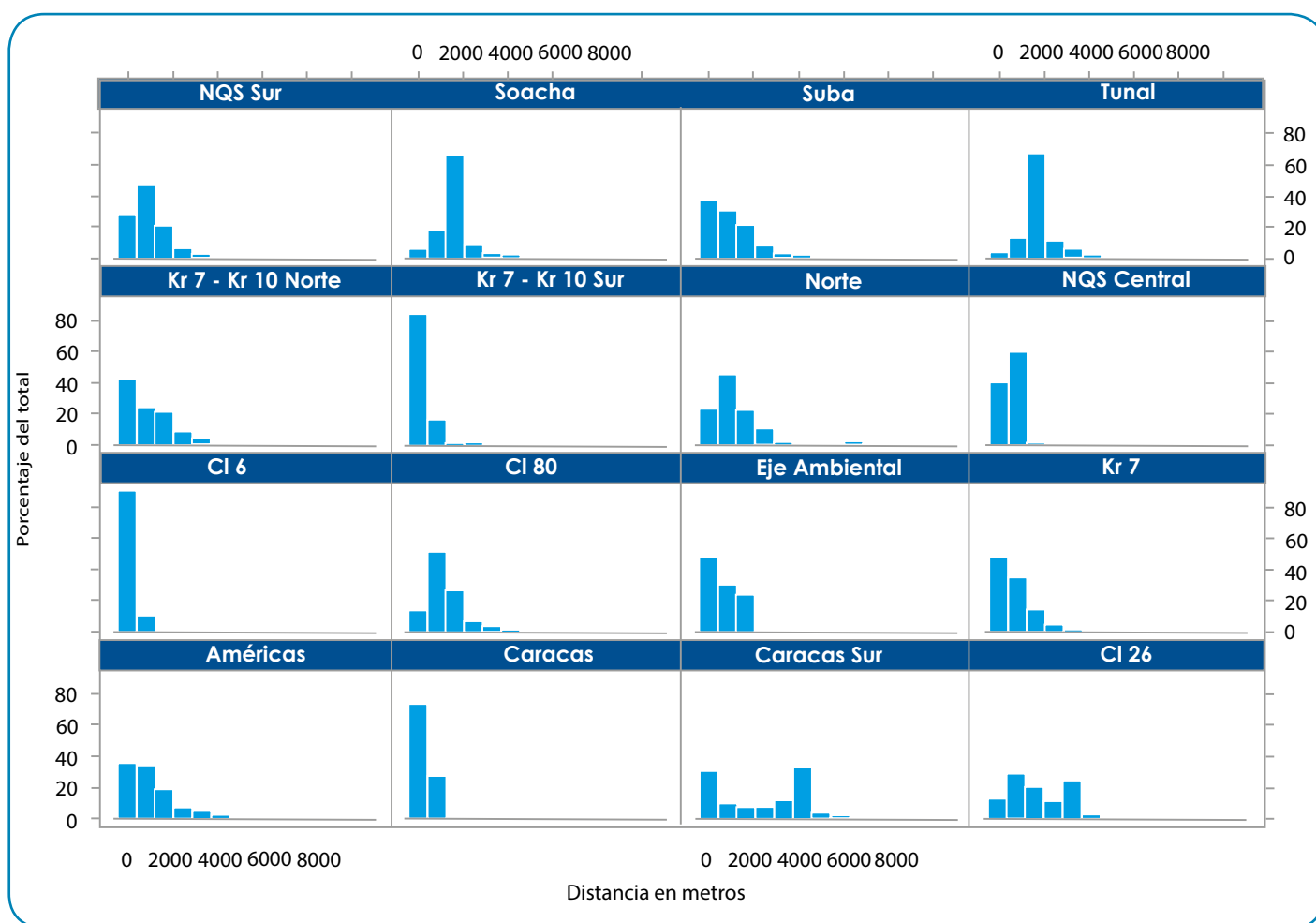
Al realizar el análisis de acuerdo con la troncal, se evidencia que hay un mayor porcentaje de muertes en la calle 6, la carrera

7 a carrera 10 sur y Caracas para todos los grupos de edad, en una distancia de 0 a 1 km (figura 2).

Figura 1. Histogramas de muertes según distancia a alguna troncal y grupo de edad, Bogotá, 2016



Fuente: cálculos propios a partir de información de mortalidad por estadísticas vitales de la Secretaría Distrital de Salud (SDS), 2016.

Figura 2. Histogramas de muertes según distancia a troncales, Bogotá, 2016

Fuente: cálculos propios a partir de información de mortalidad por estadísticas vitales de la SDS, 2016.

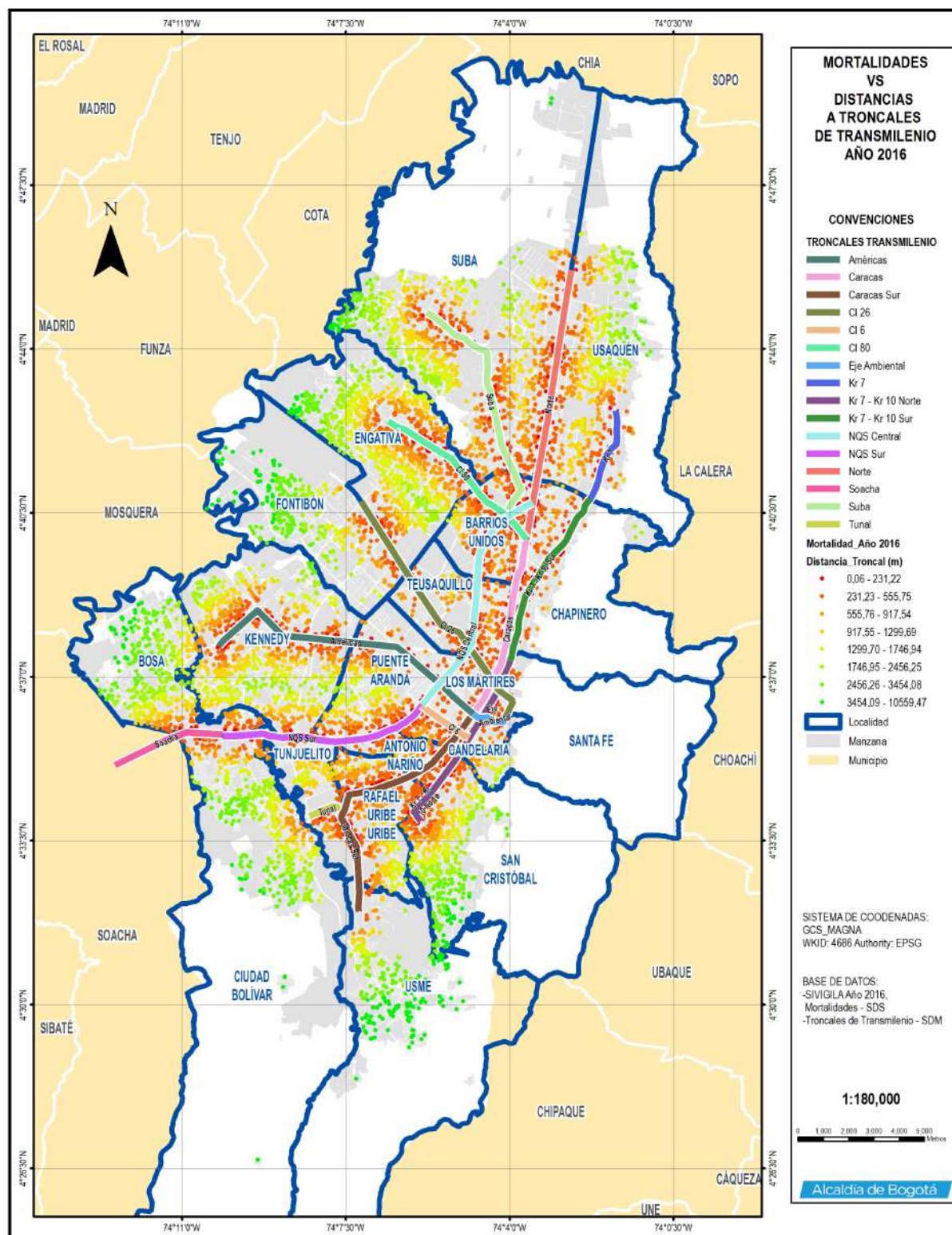
El mapa de la figura 3 muestra la dispersión del total de las muertes para los diagnósticos mencionados.

También se observó que por cada persona que se muere a más de 2 km de cada troncal, se mueren 18 personas a menos de 2 km, en la troncal Carrera 7, 17 personas en la troncal Norte, 8 personas en la troncal Calle 80, 7 personas en la troncal Américas, 6 personas en la troncal NQS-Sur, 5 personas en la troncal Suba, 3 personas en troncal Soacha, 3 personas en la troncal Tunal, 2 personas en la troncal Calle 26 y 1 persona en troncal Caracas sur.

Adicionalmente, se elaboró una curva dosis-respuesta con los ingresos diarios a salas de ERA⁷ (enfermedad respiratoria aguda) de febrero y marzo de 2019, en relación con promedios diarios de MP_{2.5}, usando una metodología de análisis de series temporales y un modelo de regresión polinomial que se controló por temperatura del aire (control de efecto de pico invernal) (figura 4).

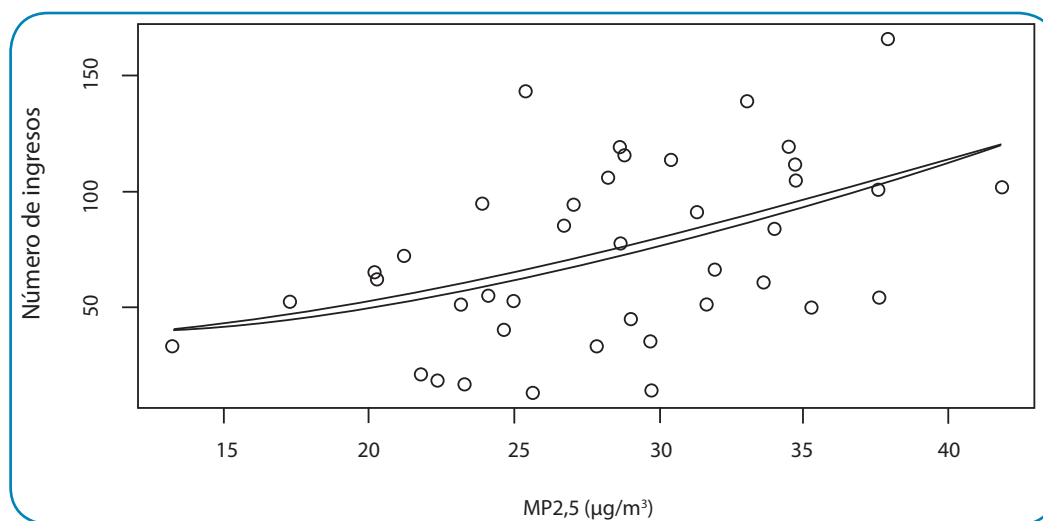
⁷ Es una estrategia de atención primaria en salud (APS) que permite atender de manera oportuna los casos de enfermedad respiratoria aguda en aquellos pacientes en quienes se estima que no requieren, para el manejo de su cuadro agudo, una estancia mayor de cuatro a seis horas en instituciones con servicios de cualquier complejidad, sin los requerimientos de una sala de observación en urgencias.

Figura 3. Mapa de distribución de la mortalidad para los diagnósticos seleccionados, de acuerdo con la cercanía con las vías troncales, Bogotá, 2016



Fuente: cálculos propios a partir de información de mortalidad por estadísticas vitales de la SDS, 2016.

Figura 4. Curva dosis-respuesta para $MP_{2,5}$ e ingresos de salas de ERA en Bogotá, febrero-marzo de 2019



Fuente: elaboración propia a partir de los datos.

La figura 4 muestra una correlación con una pendiente positiva que podría explicarse por múltiples fenómenos, incluida la exposición a contaminantes ambientales.

Estos resultados llevan a realizar una profundización y actualización de lo que se sabe y entiende en Bogotá por contaminación del aire.

El material resuspendido: su relación con la contaminación, características y fuentes

En Bogotá se reconoce que la principal fuente de emisión del material resuspendido son las vías sin pavimentar, y el contaminante criterio más estudiado es el PM_{10} . El material resuspendido hace referencia a las partículas del polvo que por su tamaño y volatilidad pueden quedar circulando en el aire, y que, de acuerdo con su tamaño, pueden afectar la salud humana y vegetal: “las partículas en suspensión (MP) son una mezcla de productos

químicos y/o biológicos, como metales, sales, materiales carbonosos, orgánicos volátiles, compuestos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos” (10). Con el propósito de relacionarlos con sus potenciales efectos en la salud humana, y dada su variada composición, es práctico clasificar el material particulado de acuerdo con su diámetro aerodinámico; las partículas suspendidas totales varían de 0 a 40 µm, y se clasifican como finas y gruesas.

El material particulado es emitido por diversas fuentes, como el polvo de construcción, el polvo de las carreteras, el polvo del suelo formado por la trituración de partículas más gruesas (las $PM_{2,5}$ se generan principalmente como producto de la combustión), y ha sido objeto de particular monitoreo y estudio en Colombia, dada las sistemáticas excedencias diarias que superan la norma nacional, principalmente relacionadas con el PM_{10} . En Bogotá, de acuerdo con la información suministrada por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), de conformidad con la

actualización del inventario de emisiones, las fuentes de emisión de estas partículas son principalmente las vías públicas. Por esto, la distribución espacial del material susceptible de resuspensión en la ciudad no es homogénea en las localidades, unidades de planeamiento zonal (UPZ) y barrios o unidades geográficas más pequeñas.

Las zonas más afectadas por el material particulado susceptible de resuspensión se ubican en las localidades de Engativá, Fontibón, Kennedy y Bosa, relacionadas probablemente con las vías no pavimentadas y la influencia de las zonas verdes. Las zonas con resultados medios de carga de sedimento corresponden a las localidades de Barrios Unidos, Teusaquillo, Chapinero, Rafael Uribe Uribe, Antonio Nariño, Tunjuelito, Usme, Suba, Usaquén y la zona norte de Ciudad Bolívar. Las zonas con carga de sedimento más bajas corresponden a las localidades del suroriente de Suba, suroriente de Usaquén, Puente Aranda, zona oriental de Ciudad Bolívar y Kennedy, y la localidad de Usme (11).

Algunos estudios han tratado de profundizar en el análisis de las fuentes emisoras del material particulado. El informe, fundamentado en el modelo de receptores (PMF)⁸ generado por la Universidad de La Salle en el 2017, concluye que las principales fuentes emisoras del material particulado son el uso de combustibles fósiles, el polvo fugitivo,

la combustión de carbón, los minerales y los aerosoles secundarios, con aportes de 25,7, 29,8, 9,5, 24,3 y 10,3 %, respectivamente⁹, acorde con lo indicado por la literatura internacional. Es decir, alrededor del 80 % del material particulado puede atribuirse directamente a las emisiones que generan los vehículos, o indirectamente por el arrastre de material proveniente de vías en mal estado o sin constante mantenimiento (11).

En un segundo estudio realizado por la misma universidad, se concluye que las fuentes más importantes de material particulado susceptible de ser resuspendido en vías de Bogotá son: el desgaste de la vía/aporte mineral, escape vehicular/aporte mineral, desgaste de neumáticos y desgaste de frenos, con un 45,4, 36,3, 9,2 y 9 %, respectivamente, con lo que se identifica el 100 % (12).

Material particulado PM_{2,5}: características, valores permisibles, fuentes y efectos en la salud

Se sabe que a menor tamaño, la partícula penetra tejidos más profundos, por lo cual la exposición a largo plazo se hace más dañina para el ser humano. La generación de PM_{2,5} se debe principalmente a procesos de combustión de diésel y gasolina mediada por la tecnología incluida en el vehículo. Según los últimos informes del estado de la calidad del aire realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional es el material particulado menor a 2,5 micras (PM_{2,5}), constituido “por partículas muy pequeñas,

8 Los modelos de receptores son procedimientos matemáticos o estadísticos para identificar y cuantificar las fuentes de contaminantes del aire desde un punto receptor, con el fin de identificar la presencia y cuantificar la contribución de las fuentes en la concentración, al identificar trazadores de determinadas fuentes por parte del receptor. La Environmental Protection Agency de Estados Unidos (US-EPA) desarrolló los modelos y el método de factorización de matriz positiva (PMF) para su uso en la gestión de la calidad del aire.

Estudia los efectos que se producen sobre los distintos elementos receptores (personas, animales, vegetales, materiales, etc.), sobre los que la inmisión, es decir, la calidad del aire resultante, tiene unas consecuencias más o menos negativas en función de la concentración de estos, del tiempo de exposición y de la propia naturaleza del medio receptor.

9 Lograron identificar un 85 % del material analizado.

producidas principalmente por los vehículos pesados que utilizan diésel como combustible, y que pueden transportar material muy peligroso para el cuerpo, como metales pesados, compuestos orgánicos y virus, afectando de este modo las vías respiratorias" (13).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido límites para la concentración de $PM_{2,5}$ de $10 \mu g/m^3$ de media anual y $25 \mu g/m^3$ de media en 24 h, a pesar de que no ha determinado un estándar de no afectación; la normatividad colombiana (14) ha fijado el límite en $25 \mu g/m^3$ de media anual y $50 \mu g/m^3$ de media en 24 h¹⁰.

El $PM_{2,5}$ ha estado relacionado en mayor medida con la mortalidad por enfermedad respiratoria y la cardiovascular; algunos estudios muestran asociaciones para causas respiratorias de muerte mayores a las cardiovasculares, 1,51 % (1,01 a 2,01 %) frente a 0,84 % (0,41 a 1,28 %) (15).

De acuerdo con la metodología de la Organización Mundial de la Salud (OMS), Sylvia Medina, Antoni Plasència y colabora-

dores realizaron una evaluación de impacto en salud en 23 ciudades europeas, en las que se estimó que 16.926 muertes prematuras por todas las causas, incluidas 11.612 muertes cardiopulmonares y 1901 muertes por cáncer de pulmón, podrían prevenirse anualmente si la exposición a largo plazo a niveles de $PM_{2,5}$ se redujera a $15 \mu g/m^3$ en cada ciudad (16).

Un estudio realizado en España determinó que el $PM_{2,5}$ es el único contaminante

¹⁰ Las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM_{10} por metro cúbico (m^3) de aire. Las mediciones sistemáticas de la calidad del aire describen esas concentraciones de PM expresadas en microgramos (μ)/ m^3 . Cuando se dispone de instrumentos de medición suficientemente sensibles, se notifican las concentraciones de partículas finas ($PM_{2,5}$ o más pequeñas) (3).

primario que muestra mayor asociación con los ingresos hospitalarios ligados con enfermedades respiratorias en los niños menores de 10 años en Madrid (17).

Estudios experimentales de células *in vitro* e *in vivo* han proporcionado información sobre la asociación entre la exposición de $PM_{2,5}$ y el estrés oxidativo, la inflamación y la genotoxicidad, que son los principales mecanismos potenciales en la progresión de enfermedades como disfunciones cardiovasculares, respuestas inflamatorias inmunes, enfermedades pulmonares, diabetes mellitus, sensibilización alérgica (18).

Los estudios de fuentes de emisión y características relacionadas con el $PM_{2,5}$ para Bogotá aún no son concluyentes. Tampoco hay certeza en la relación de PM_{10} con $PM_{2,5}$ en el material resuspendido; los informes internacionales los relacionan principalmente con la combustión de vehículos diésel y gasolina, y, en menor proporción, con fuentes geológicas (suelo) y biológicas (polen). Sin embargo, algunos estudios muestran una correlación positiva y lineal entre los dos parámetros, lo que indica que para Bogotá la relación es de 0,6 y que esta se puede emplear para predecir concentraciones de $PM_{2,5}$ a partir de datos existentes. No obstante, al ser un dato predecible, existe diversidad en los valores encontrados debido a las diferencias geológicas, atmosféricas, climatológicas y en las fuentes de emisión (19,20); la Secretaría Distrital de Ambiente estimó que del total de emisión de PM_{10} de fuentes fijas y fuentes móviles, la fracción de $PM_{2,5}$ corresponde en un 45,4 % al desgaste de la vía y mineral; el 36,30 %, al exosto vehicular y mineral; el 9,2 %, al desgaste de llantas; y el 9,0 %, al desgaste de frenos y mineral (11).

Fuentes fugitivas como factor de emisión de resuspensión de las vías pavimentadas y no pavimentadas en el Distrito Capital de Bogotá

La Secretaría Distrital de Ambiente del Distrito Capital estimó que 1 km de vía pavimentada emite 6,97 toneladas de material particulado al año, mientras que 1 km de vía no pavimentada emite 21,4 toneladas de material particulado en el mismo periodo; es decir que por cada kilómetro de vía pavimentada se ahorrarían tres veces la contaminación cuando las vías no están pavimentadas.

Un estudio realizado sobre la pavimentación de una vía en Bogotá indica que los factores de emisión estimados para vía no pavimentada fueron $7,8 \pm 0,5$ g PM_{10} /VKT y $0,6 \pm 0,2$ g $PM_{2,5}$ /VKT, y para vía en proceso de construcción, de $28 \pm 0,27$ μ g PM_{10} /m²*s y $11 \pm 0,13$ μ g $PM_{2,5}$ /m²*s. La modelación de dispersión atmosférica de material particulado resuspendido mostró una reducción del área de impacto en aproximadamente 1 km y más de un 95 % en concentración (21).

Finalmente, se concluyó que la pavimentación impacta positivamente en la calidad del aire, al reducir en un 95 % las concentraciones de $PM_{2,5}$ y PM_{10} asociadas con resuspensión, y en más de un 37 % las concentraciones asociadas con fuente por combustión y otras no definidas.

Una de las fuentes principales de contaminación del aire por PM es la resuspensión de polvo y abrasión superficial (22,23); por ello, se presenta la intervención de vías como estrategia para disminuir la resuspensión de polvo. Sin embargo, no existen estudios suficientes que demuestren la variación es-

tadística entre las concentraciones de MP obtenidas antes y después de realizadas las obras de intervención en Bogotá (24).

En otro estudio, mediante un análisis del *principal component analysis* (PCA) se identificaron cinco componentes, incluidos suelos locales y erosión del pavimento (63 %), actividades de construcción y demolición (13 %), emisiones industriales (6 %), desgaste de los frenos (5 %) y emisiones del tubo de escape (4 %) (25).

En el 2014, la Secretaría Distrital de Ambiente, junto con la Universidad de La Salle, realizaron la actualización del inventario de emisiones, en el que por primera vez se estimó en Bogotá la emisión de material particulado resuspendido, al implementar la metodología de la EPA, y se encontró un aporte de 70.309 t PM_{10} año⁻¹, de las cuales el 47 % proviene de vías pavimentadas; el 47 %, de vías sin pavimentar, y el 6 % es producto de otras fuentes (11).

Otras fuentes de contaminación del aire por $PM_{2,5}$ relacionadas con el transporte urbano: vehículos de servicio público, vehículos de carga, vehículos particulares y motocicletas

Además de los combustibles fósiles, se reconocen otras fuentes relacionadas con el transporte urbano, como el desgaste de llantas, frenos y pavimentos. Algunos estudios muestran la relación de las llantas en la producción de material particulado, pues están compuestas por una gran cantidad de materiales que varían según su uso, características especiales como resistencias a la

carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia, entre otros.

Con el uso, las llantas van presentando desgaste por fricción, arrojan al ambiente partículas sobre la vía lo suficientemente pequeñas para ser inhaladas y pueden contener metales de transición, como óxido de zinc y de magnesio (26). En promedio, una llanta de camión de carga pesa 54,5 kg cuando está nueva y 45,5 kg después de usada, lo que significa que se pierden por fricción cerca de 9,0 kg. La llanta de los automóviles particulares promedio pesa 11,5 kg cuando está nueva y 9,0 kg después de usada, lo que significa que se pierden por fricción cerca de 2,5 kg.

En una investigación del King's College de Londres rastrearon la contaminación del aire a lo largo de 65 caminos durante 10 años. Los investigadores encontraron algunas carreteras donde los beneficios de la contaminación del aire de las mejoras en los escapes de diésel fueron superados por los aumentos en las partículas que provienen del desgaste de los neumáticos, los frenos y la carretera. Esto se dio principalmente en las carreteras exteriores de Londres que tenían un número creciente de vehículos pesados (27).

Por otra parte, frenar supone la emisión de un 20 % del total de partículas generadas por el tráfico. En efecto, según un estudio realizado en Alemania por el Instituto del Medio Ambiente de la Universidad Técnica de Berlín, solo el desgaste de los frenos genera el 20 % del conjunto de partículas suspendidas en el aire que respiramos. Cuando se aprieta el pedal del freno, se genera la emisión de partículas finas a la atmósfera. Según el Instituto Francés de Ciencias Aplicadas (INSA), el desgaste de los frenos aporta (5 %) del total del material susceptible de ser resuspendido (12).

En el marco del Plan Maestro de Movilidad, la carta de navegación de la ciudad en el tema, se estableció la estructuración del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá (SITP) en cuanto evolución de lo diseñado como sistema de transporte del tercer milenio TransMilenio S. A., que tiene como objeto la gestión, organización y planeación del sistema de transporte público masivo urbano de pasajeros en Bogotá D. C. y su área de influencia bajo la modalidad de transporte terrestre automotor. El sistema en su componente troncal cuenta en un 88 % con flota diésel, con estándares de emisión entre Euro II y Euro V (28). La circulación de buses articulados Euro I, II y III no está definida o concentrada en algunas troncales en particular, debido a las condiciones de demanda de pasajeros del sistema; es necesario que todos los buses, independientemente de su nivel de emisiones, circulen por la totalidad de vías.

El cálculo de estos sistemas no tiene en cuenta la renovación de aire producto de la apertura de puertas y/o ventanas y/o escotillas del vehículo, por lo que el número de ventiladores es variable en función del fabricante de carrocería, y estos se encuentran distribuidos a lo largo del bus, con sus respectivas tomas de aire.

Para los buses de fases I, II y III, la activación del sistema de recirculación de aire es parte de las labores del conductor, quien posee el mando de los sistemas. Para la nueva generación de buses de TransMilenio, la activación del sistema se puede parametrizar para que sea automática o a discreción del conductor.

La ventilación o circulación de aire en las estaciones se realiza de forma natural, al ser espacios en su mayoría abiertos. Para los que no son de superficie, como la estación

Museo Nacional, se dispone de un sistema de extracción automática que renueva el aire.

La empresa no es competente para los temas de infraestructura vial, diseños de estaciones ni estudios de impacto ambiental relacionados con la prevención, adecuación, adaptación o mitigación de la contaminación ambiental. Por tanto, no dispone de estrategias puntuales para la reducción de exposición a contaminantes, más allá de la renovación de la flota troncal de las actuales fases I y II, y del cumplimiento estricto de la normativa nacional vigente en la materia.

Conclusiones y recomendaciones generales

Aún es limitado el conocimiento global, regional y local en temas de calidad del aire, específicamente en la asociación causal con los factores de riesgo, condiciones y dinámicas de las poblaciones expuestas, diseño y operación de infraestructuras y servicios como el de transporte.

La mala calidad del aire en Bogotá comparte características similares a las de las grandes urbes. Sin embargo, hay características particulares que permiten formular recomendaciones adaptadas a las condiciones regionales y locales.

La mayor proporción (80 %) del material particulado potencialmente resuspendido en la ciudad puede atribuirse directamente a las emisiones que generan los vehículos o indirectamente por el arrastre de material proveniente de vías en mal estado o sin constante mantenimiento. La generación de $PM_{2.5}$ se debe principalmente a procesos de combustión de diésel y gasolina mediado por la tecnología incluida en el vehículo.

El mejoramiento de condiciones de estado de la malla vial debe ser una prioridad. Además, las adecuaciones de las troncales deben acompañarse de estudios que permitan identificar las condiciones de riesgo para la salud de la población potencialmente expuesta a la contaminación.

La respuesta social, transectorial y del sector salud a la contaminación del aire tiene importantes oportunidades de gestión y adecuación, por lo que hay una ventana de oportunidad que debe ser aprovechada. Este documento aporta a la problematización de la calidad del aire en Bogotá y genera la posibilidad de formular recomendaciones en salud desde una perspectiva más amplia, abordado desde los determinantes sociales y de forma que se propicie información para los demás sectores; entre ellas:

- » Propiciar un espacio intersectorial (u orientar los existentes) de análisis y decisiones para la mitigación de riesgos y efectos.
- » Adecuar los planes, estrategias y servicios de salud para la promoción y gestión integral del riesgo de los efectos en salud relacionados con la contaminación del aire.
- » Aumentar las unidades de monitoreo de calidad del aire acompañadas de estrategias de vigilancia en salud pública en corredores y territorios de mayor exposición; esto incluye el monitoreo con visión de Bogotá-región.
- » Implementar tecnologías modernas de comunicación social del riesgo (aplicación con información en tiempo real, alertas a dispositivos móviles de población de mayor riesgo, medios masivos de comunicación, pantallas en vías públicas).

- » Promover energías alternativas a los combustibles fósiles en transporte y viviendas.
 - » Otorgar incentivos positivos por cambios en tecnologías modernas (combustión, llantas, embragues) y negativos por emisiones (comparendos, impuestos y restricciones de movilidad según antigüedad del vehículo).
 - » Hacer recomendaciones de autocuidado fundamentadas en la evidencia (actividad física, relación con el espacio público)¹¹.
 - » Generar capacidades en los individuos, familias y comunidades relacionadas con el cuidado de los entornos.
 - » Profundizar en las estrategias incluidas en el convenio marco para el control del tabaco.
 - » Ajustar los procesos del SITP que reduzcan las emisiones e inmisiones contaminantes (renovación tecnológica, manejo de ventilación en buses, ventilación en estaciones y portales).
 - » Implementar programas de ecoconducción como herramienta para disminuir los niveles de contaminación en la ciudad (29).
2. Ostro B, Malig B, Broadwin R, Basu R, Gold EB, Bromberger JT, et al. Chronic PM_{2.5} exposure and inflammation: Determining sensitive subgroups in mid-life women. *Environ Res.* 2014;132:168-75.
 3. World Health Organization. Calidad del aire y salud [internet]. Datos y cifras. 2018 [citado 2019 abr. 9]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
 4. Seaton A, Godden D, MacNee W, Donaldson K. Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet.* 1995;345(8943):176-8.
 5. Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Frostad J, Estep K, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet.* 2017;389(10082):1907-18.
 6. Fonken LK, Xu X, Weil ZM, Chen G, Sun Q, Rajagopalan S, et al. Air pollution impairs cognition, provokes depressive-like behaviors and alters hippocampal cytokine expression and morphology. *Mol Psychiatry.* 2011;16(10):987-95.
 7. Schwartz J, Laden F, Zanobetti A. The Concentration-response relation between PM_{2.5} and daily deaths. *Environ Health Perspect.* 2002;110(10):1025-9.
 8. Apte JS, Marshall JD, Cohen AJ, Brauer M. Addressing global mortality from ambient PM_{2.5}. *Environ Sci Technol.* 2015;49(13):8057-66.
 9. Zeng W, Zhang Y, Wang L, Wei Y, Lu R, Xia J, et al. Ambient fine particulate pollution and daily morbidity of stroke in Chengdu, China. *PLoS One.* 2018;13(11):1-12.

Referencias

1. OMS. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. OMS [internet]. 2005;25. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/

¹¹ Por ejemplo, bicisuarios con uso de máscaras de protección.

10. Arciniegas Suárez CA. Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM 10. Luna Azul ISSN. 2012;(34):195–213.
11. Espitia Cano SO, Porras Montaña SP. Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de resuspensión en vías de Bogotá. Bogotá: Universidad de la Salle; 2017.
12. Garcia Villegas N, Parra Gracés DM. Análisis preliminar de la caracterización y contribución de fuentes de material particulado -PM10 en el aire ambiente de Bogotá. Bogotá: Universidad de la Salle; 2017.
13. Ministerio de Ambiente, Gobierno de Colombia, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2016 [Internet]. Bogotá D.C., Colombia; 2016. p. 1–103. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/3.+Informe+del+Estado+de+la+Calidad+del+Aire+en+Colombia+2016.pdf/fb3eee92-6bcf-4979-9ea2-de0101496a2f?version=1.0>
14. Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. Resolución 2254 [Internet]. Bogotá (Colombia); 2017. p. 11. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>
15. Atkinson RW, Kang S, Anderson HR, Mills IC, Walton HA. Epidemiological time series studies of PM2.5 and daily mortality and hospital admissions: A systematic review and meta-analysis. Thorax. 2014;69(7):660-5.
16. Alonso Fustel E, Martínez Rueda T, Cambra Contin K, Lopez Carrasco L, Boldo Pascua E, Zorrilla Torras B, et al. Evaluación en cinco ciudades españolas del impacto en salud de la contaminación atmosférica por partículas. Proyecto europeo apheis. Rev Esp Salud Publica. 2005;79(2):297-308.
17. Linares C, Díaz J. Efecto de las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras (PM 2,5) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid. Gac Sanit. 2009;23(3):192-7.
18. Cho CC, Hsieh WY, Tsai CH, Chen CY, Chang HF, Lin CS. In vitro and in vivo experimental studies of PM 2.5 on disease progression. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(7):1-26.
19. Rojas N, Galvis B. Relación entre PM2,5 y PM10 en la ciudad de Bogotá. Rev Ing. 2005;22:54-60.
20. Echeverri C, Maya GJ. Relation between fine particles (Pm2.5) and breathable particles (Pm10) in Medellín City. Rev Ing Univ Medellín. 2008;7(12):23-42.
21. Méndez J, Pinto L, Galvis B, Pachón J. Estimation of resuspended dust emission factors before, during and after road paving process in Bogotá. Cienc Ing Neogranadina. 2017;27(1):43-60.
22. Beltrán D, Belalcázar LC, Rojas N. Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá. Asoc Colomb Ing Sanit y Ambient. 2012;231:25-32.
23. Orozco K, Huelvas A, Galvis B. Determinación de factores de emisión para PM10 proveniente de construcción de vías, edificaciones y canteras en Bogotá (trabajo de grado). Bogotá: Universidad de la Salle; 2015.

24. Pinto Herrera LC, Méndez Espinosa JF. Evaluación del impacto en calidad del aire, asociado a resuspensión de material particulado por la pavimentación de la vía principal de Caracolí - Ciudad Bolívar, Bogotá: Universidad de la Salle; 2015.
25. Ramírez O, Sánchez de la Campa AM, Amato F, Moreno T, Silva LF, de la Rosa JD. Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Sci Total Environ*. 2019;652:434-46.
26. Castro G. Materiales y compuestos para la industria del neumático. Buenos Aires, Argentina: Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A; 2008.
27. Font A, Fuller GW. Did policies to abate atmospheric emissions from traffic have a positive effect in London? *Environ Pollut*. 2016;218:463-74.
28. Transmilenio S.A. Memorando de proyecto. Anexo 26. Especificaciones y lineamientos técnicos. Bogotá; 2018.
29. Florez D, Rangel V, Logyca. Revisión de literatura conducción eficiente [internet]. Organización Corona; 2014. Disponible en: <https://docplayer.es/49084055-Revision-de-literatura-conduccion.html>

