

**REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA ESTIMACIÓN Y LA
CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO**

NATALIA CÁRDENAS TORRES

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN GESTIÓN AMBIENTAL**

**DIRECTOR
OSCAR LIBARDO LOMBANA
INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. marzo de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. LA CALIDAD DEL AIRE Y EL MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO	15
2.1. Contaminación del aire	15
2.1.1. <i>Definición y origen</i>	15
2.1.2. <i>Fuentes de contaminación</i>	16
2.1.3. <i>Tipos de contaminantes</i>	18
2.1.4. <i>Tamaño de partícula y procesos de formación</i>	22
2.1.5. <i>Impactos</i>	25
2.2. Mecanismos de limpieza atmosférica	27
2.3. Tiempo de vida de las partículas en la atmósfera	28
2.4. Normatividad colombiana para material particulado y otros contaminantes	29
3. METODOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN LA ESTIMACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO	31
3.1. Inventario de emisiones	31
3.2. Métodos de estimación de emisiones atmosféricas	34
3.2.1. <i>Medición directa</i>	34
3.2.2. <i>Factores de emisión</i>	35
3.2.3. <i>Factor de actividad</i>	36
3.2.4. <i>Modelos de emisión</i>	36
4. METODOLOGÍAS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO APLICABLES	38
4.1. Principio del método de cuantificación de material particulado resuspendido	39
4.1.1. <i>Medición de concentraciones de PM mediante un sistema móvil</i>	40
4.1.2. <i>Medición de la ubicación y velocidad del vehículo</i>	41
4.1.3. <i>Calibración del sistema de monitoreo móvil</i>	41

4.1.4. <i>Cuantificación de las emisiones de polvo PM de la carretera</i>	44
4.2. Interferencias con el método	45
4.2.1. <i>Fuentes de PM de otros vehículos, actividades o modos de emisión de polvo en la carretera</i>	45
4.2.2. <i>Lluvia y charcos</i>	45
4.3. Análisis de datos y cálculos.	46
4.3.1. Revisión los registros de datos sin procesar de un segundo	46
4.3.2. Cálculo de las concentraciones netas de PM brutas de un segundo	46
4.3.2. Aplicación de criterios de validez basados en el GPS	46
4.4. Estimación de las emisiones de PM10 "no tubo de escape" de las calles para la modelización práctica de la contaminación atmosférica del tráfico	48
4.4.1. Modelo EPA modificado (solución a corto plazo) y aplicación.	48
4.5. Estimación de factores de emisión de PM10 y PM2.5, en las vías urbanas de Mexicale, Baja California, México.	49
4.5.1. Metodología US EPA, AP-42	49
4.5.2. Resultados	50
4.6. Muestreo y caracterización de materiales resuspendidos y polvo de carretera respirable	51
4.6.1. Metodología Unidad de resuspensión y muestreo	51
4.6.2. Resultados	52
4.7. Emisiones vehiculares de PM10 de alta resolución sobre la mega ciudad de Delhi: Contribuciones relativas de fuentes de escape y no escape.	53
4.7.1. Metodología aplicada	53
4.7.2. Resultados	54
5. GRADO DE AVANCE EN LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO EN COLOMBIA	57
5.1. Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá	57
5.1.1. <i>Resultados</i>	58

5.2. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá	59
5.2.1. Metodología empleada	59
5.2.2. Resultados.	61
5.3. Desarrollo y Evaluación de un Inventario Integral de Emisiones Atmosféricas para el Modelaje de la Calidad del Aire en la Megaciudad de Bogotá	64
5.3.1. Metodología empleada.	64
5.3.2. Resultados.	65
5.4. Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo (2019)	67
5.4.1. Metodología implementada durante la investigación	67
5.5. Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de re suspensión en vías de Bogotá.	71
5.5.1. Metodología implementada durante la investigación (Amato)	72
5.5.2. Resultados.	73
5.6. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – año base 2017)	76
5.6.1. Modelo COPERT	77
5.6.2. Resultados	79
5.6.3. Metodología Amato	80
5.6.4. Resultados	81
6. CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Fuentes de contaminación del aire	18
Figura 2. Diámetros comparados de PM _{2.5} y PM ₁₀	19
Figura 3. Diagrama de relación del diámetro de partículas de un aerosol atmosférico y distribución de área superficial	23
Figura 4. Mecanismos de limpieza de la atmósfera, deposición húmeda y seca	28
Figura 5. TSI, DustTrak	40
Figura 6. Vehículo de prueba para monitoreo móvil	43
Figura 7. <i>Unidad móvil de muestro para material resuspendido PM10</i>	51
Figura 8. Antes vs después de la pavimentación	60
Figura 9. Interpolación de cargas de polvo en carreteras asfaltadas (Izquierda) y contenidos de limo en carreteras sin pavimentar (Derecha).	64
Figura 10. <i>Equipo de Medición- Cámara de sedimentación</i>	70
Figura 11. <i>Equipo "RD10 in road dust" para el muestreo de RD10</i>	78

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire	29
Tabla 2. Concentraciones ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) para los niveles de prevención, alerta o emergencia	30
Tabla 3. Ejemplo de inventario de emisiones de contaminantes criterio en diferentes años para la ciudad de Bogotá	33
Tabla 4. Ejemplo de criterios aplicados para garantizar mediciones válidas basadas en las condiciones de conducción del vehículo	47
Tabla 5. Resultados de factores de emisión de acorde al modelo US EPA, AP-42	50
Tabla 6. Comparación de mediciones de FE, g/VKT 42	51
Tabla 7. Resultados	53
Tabla 8. Emisiones de escape y de no escape (Gg/año) reportadas por diferentes estudios	54
Tabla 9. Resumen de las investigaciones y su principal objetivo	55
Tabla 10. Emisiones estimadas de PM _{2.5} y PM ₁₀ por suspensión de polvo y abrasión en Bogotá.	58
Tabla 11. Resultados de análisis comparativos entre el antes y después de la pavimentación.	61
Tabla 12. Resultados de análisis durante los días más representativos del proceso de pavimentación	62
Tabla 13. Concentraciones de material particulado y factores de emisión FE obtenidos para las 3 etapas de modelos de dispersión.	63
Tabla 14. Emisiones de partículas resuspendidas (RPM) de carreteras pavimentadas y no pavimentadas	66
Tabla 15. <i>Masa total de carga recolectada</i>	68
Tabla 16. Flujo vehicular por tipo de vehículo	69
Tabla 17 Factor de emisión de las áreas de estudio	69
Tabla 18 Comparación factores de emisión	70
Tabla 19. Resultados de Carga de sedimento	74

Tabla 20. Resultados de Factor de emisión por punto	75
Tabla 21. Ecuaciones para la estimación de emisiones por tipo	78
Tabla 22. Factores de emisión en ruta por vehículo ajustados a las condiciones de	80
Tabla 23. Carga de sedimento en la ciudad de Manizales	82
Tabla 24. Factores de emisión obtenidos para la ciudad de Manizales	83
Tabla 25. Comparativo de factores de emisión	84

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una recopilación de aquellas metodologías empleadas en la estimación y la cuantificación de material particulado resuspendido que se ve influenciado por la actividad vehicular en carreteras pavimentadas y sin pavimentar. Mediante la revisión del protocolo establecido por la Agencia de Protección Ambiental en el AP-42 se presentan varios artículos en los que se implementa esta metodología en grandes ciudades como Barcelona, Berlín, Zúrich, entre otras, donde la contaminación por material particulado es elevada. Con variaciones que van desde ajustes en los modelos matemáticos al uso de instrumentos de medición más sofisticados que permiten la cuantificación del material particulado resuspendido específicamente, se encuentra que existe una limitante a la hora de implementar la metodología de la EPA ya que lo que se hace a lo largo de todo el proceso es una sobreestimación del material particulado resuspendido y no se llega a un valor más real.

Por otro lado, se hace una revisión de los estudios que se han realizado sobre el tema en Colombia para establecer el grado de avance investigativo en el país, donde se encuentra que en Colombia se ha investigado desde hace aproximadamente 10 años (iniciando en el 2012 con las primeras investigaciones) y que desde el inicio se ha implementado la metodología EPA del AP-42 con pequeñas variaciones en la cuantificación, unas se han dado a través de campañas de monitoreo, mientras que otras se han desarrollado a través de software que permiten establecer valores con un margen de error menor.

Palabras clave: *material particulado, PM10, PM2.5, polvo resuspendido, inventario de emisiones, vías pavimentadas, vías sin pavimentar.*

INTRODUCCIÓN

Una de las principales entidades internacionales que ha estudiado y desarrollado estrategias y metodologías encaminadas a disminuir el grado de incertidumbre al momento de realizar inventarios de emisiones de material particulado resuspendido que resulta en la mayoría de casos por el mal estado de las vías, es “*The Environmental Protection Agency*” (EPA).

Las investigaciones realizadas en Colombia en términos de calidad del aire se han presentado principalmente en la Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública (Casap) en el año 2013. Desde el evento de 2013 se evidencia que se vienen adelantando desde el 2010 – 2011 investigaciones referentes al material particulado resuspendido y su influencia en la calidad del aire colombiano bajo diferentes circunstancias, además de sus efectos en la salud de los habitantes del país.

Los principales temas y con mayor importancia que se han tratado acerca de las tendencias de investigación sobre la calidad del aire son: Muestreo y análisis de contaminantes atmosféricos; Gestión de la calidad del aire, políticas públicas y planeación urbana; Calidad del aire y Salud pública; Modelación meteorológica y de calidad del aire; Inventarios de emisiones a la atmosfera, entre otros (Pachón, 2013).

En lo que refiere a la temática que se va a abordar en este trabajo se ha encontrado que las investigaciones sobre metodologías y modelación de calidad del aire e inventarios de emisiones han sido herramientas fundamentales para la gestión de la calidad del aire por lo que permiten evaluar diversas estrategias de reducción de emisiones; sin embargo, aunque las investigaciones han aumentado en los últimos años, éstas son escasas y en su mayoría están lideradas por instituciones educativas universitarias, sin una participación directa de las autoridades ambientales.

De acuerdo a la revisión de los diferentes avances que se ha realizado hasta la actualidad sobre el tema, se identificó la necesidad de comparar y analizar las diferentes estrategias y metodologías desarrolladas para la cuantificación y estimación de material particulado resuspendido, esto con el fin de encontrar la metodología más robusta que presenta un menor grado de incertidumbre y presentar posibles mejoras, aportando a una alta calidad del aire en Colombia en los próximos años.

En el presente trabajo, la problemática a desarrollar gira en torno a la identificación de metodologías y estrategias implementadas en un marco nacional e internacional para la estimación y cuantificación de concentraciones de material particulado resuspendido, así como similitudes y diferencias entre ellas para así determinar cuál presenta mejores resultados y un mayor grado de avance investigativo.

La investigación tendrá un enfoque cualitativo ya que se realizará a partir de estudios desarrollados anteriormente sobre el tema de interés. En la fase inicial se realizará la recopilación de información técnica y teórica relacionada a las metodologías que se implementan para la estimación de material particulado a nivel general.

En la segunda fase se realizará una comparación entre la metodología establecida por la US-EPA en la AP-42 para la cuantificación de material particulado resuspendido, frente a metodologías (aunque basadas en la AP-42) que en determinados parámetros han sido modificadas por otros países.

Por último, a partir de casos de estudio desarrollados en Colombia se establecerá una línea de tiempo y se determinará cuál ha sido el grado de avance investigativo en términos de metodologías y estrategias para la estimación y cuantificación de material particulado resuspendido que han permitido gestionar la calidad del aire mediante el uso de modelamientos e inventarios de emisiones, para así, llegar a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Calidad del Aire trazados para el 2030 y cumplir con los parámetros establecidos por la normatividad vigente en Colombia y la OMS en términos de mejoramiento de la calidad del aire.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Revisar las metodologías empleadas en la estimación y la cuantificación de material particulado resuspendido.

1.2. Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica de las metodologías y estrategias implementadas en la estimación de material particulado
- Identificar las metodologías para la cuantificación de material particulado resuspendido aplicables.
- Determinar el grado de avance en la aplicación de la metodología de estimación y cuantificación de material particulado resuspendido en Colombia.

2. LA CALIDAD DEL AIRE Y EL MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO

El planeta actualmente presenta una situación crítica debido a la presencia de una alta concentración de contaminantes provenientes de diversas fuentes, los cuales, según estudios, pueden llegar a tener efectos negativos en la salud de los seres vivos y a su vez generar daños irreversibles en diferentes ecosistemas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), dentro de la civilización uno de los factores que representa un importante riesgo ambiental para la salud es la contaminación del aire, bien sea en los países desarrollados o en los países en desarrollo. “Una evaluación realizada por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS determinó que la contaminación del aire exterior es carcinógena para el ser humano, y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia de cáncer, especialmente del cáncer de pulmón”. (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018)

Por otro lado, la contaminación del aire no solo es una de las mayores preocupaciones globales debido a la alta polución en las ciudades, también es la causa directa del creciente cambio climático y el desarrollo de nuevas enfermedades, principalmente respiratorias. La importancia de la contaminación atmosférica radica principalmente en la afectación a las grandes ciudades por factores como la polución generada por las fábricas y el constante uso de automóviles, los cuales emplean sistemas energéticos basados en combustibles fósiles que producen en gran cantidad material particulado, y según recientes estudios, la resuspensión de material particulado que se genera por la deposición de partículas atmosféricas contaminantes.

2.1. Contaminación del aire

2.1.1. Definición y origen

La contaminación del aire se conoce como la pérdida del equilibrio de los diferentes gases que componen la atmosfera lo cual ocurre debido al incremento en la concentración de partículas sólidas u otros gases tóxicos que se emiten al aire a través

de las actividades humanas (Vázquez, 2017). Este concepto tuvo mayor relevancia a partir de la revolución industrial en el siglo XVIII, momento en cual se desarrollaron procesos y tecnologías cuyo principal combustible era el carbón y sus derivados (Fernández, 2018).

El crecimiento industrial de la época aceleró drásticamente la emisión de contaminantes gaseosos y particulados generados por procesos industriales dedicados tanto a la producción como a la generación de energía mediante el uso de combustibles no renovables; es así como por primera vez se identificó la contaminación del aire como un problema de importancia para la población en el siglo XVIII provocada por la industrialización y la quema de combustibles.

Posteriormente con el creciente avance económico asociado al desarrollo de actividades como la industria petrolera, la agroindustria, el incremento de automotores, entre otras, comenzó un proceso el cual llevaría los problemas ambientales locales a una escala global, como la acidificación del ambiente, la destrucción de la capa de ozono y el incremento del calentamiento global (Romero et ál., 2006).

Actualmente la contaminación del aire representa la mayor amenaza para el medio ambiente y la salud de la humanidad, pues se tiene una gran dependencia por los combustibles fósiles y una alta emisión de gases de efecto invernadero que están causando daños irreparables en los ecosistemas y el equilibrio del planeta.

2.1.2. Fuentes de contaminación

Se define como fuente de contaminación a toda actividad, proceso u operación, realizada por el ser humano susceptible de emitir contaminantes al aire. Las fuentes de contaminación se clasifican en fuentes móviles, fuentes fijas y de área. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010)

- **Fuentes fijas:** “es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa” (Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010). Existen tres tipos de fuentes fijas:

- Fuentes puntuales: estas fuentes presentan un alto nivel de contaminantes derivados de la generación de energía eléctrica, como también contaminantes generados por procesos industriales como la quema a gran escala de carbón y petróleo, procesos químicos enfocados al área textil o de manufactura, entre otros (Instituto de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2007).
- Fuentes de área: son aquellas fuentes que generan contaminantes provenientes directamente de procesos o actividades industriales como el proceso de fertilización de la agricultura, así como el uso sin restricciones de diferentes pesticidas (Instituto de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2007).
- Fuentes naturales: se conoce como fuente natural aquellas fuentes cuyos contaminantes provienen de procesos o fenómenos naturales tales como la erupción de un volcán, incendios forestales y emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales (Instituto de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2007).
- **Fuentes móviles:** “es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010). Las fuentes móviles se han convertido en uno de los principales causantes de la contaminación atmosférica debido al acelerado crecimiento de la flota vehicular en las grandes ciudades durante los últimos años, adicionalmente el procedimiento para llevar un control de estas fuentes es complejo e ineficiente ya que involucra aspectos como tipología vehicular o ciclos de conducción, entre otros aspectos los cuales varían dependiendo el escenario (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

En la **Figura 1** se ilustran las fuentes de contaminación mencionadas anteriormente entre las cuales encuentra el transporte, el polvo, las actividades industriales, las prácticas agrícolas, entre otras.

Figura 1.

Fuentes de contaminación del aire



Nota. Representación gráfica de las fuentes de contaminación del aire, entre las cuales se encuentra el polvo, el transporte, las prácticas agrícolas, la gestión de desechos, la energía doméstica, la industria y el suministro energético. Tomado de: Organización Panamericana de la Salud –OPS– (2018). Cuáles son las fuentes de contaminación. <https://www.paho.org/es/documentos/infografia-cuales-son-fuentes-contaminacion-aire-2018>

2.1.3. Tipos de contaminantes

Actualmente la contaminación del aire se debe principalmente por tres tipos de contaminantes, el material particulado o compuestos sólidos, los gases de efecto invernadero y los contaminantes criterio.

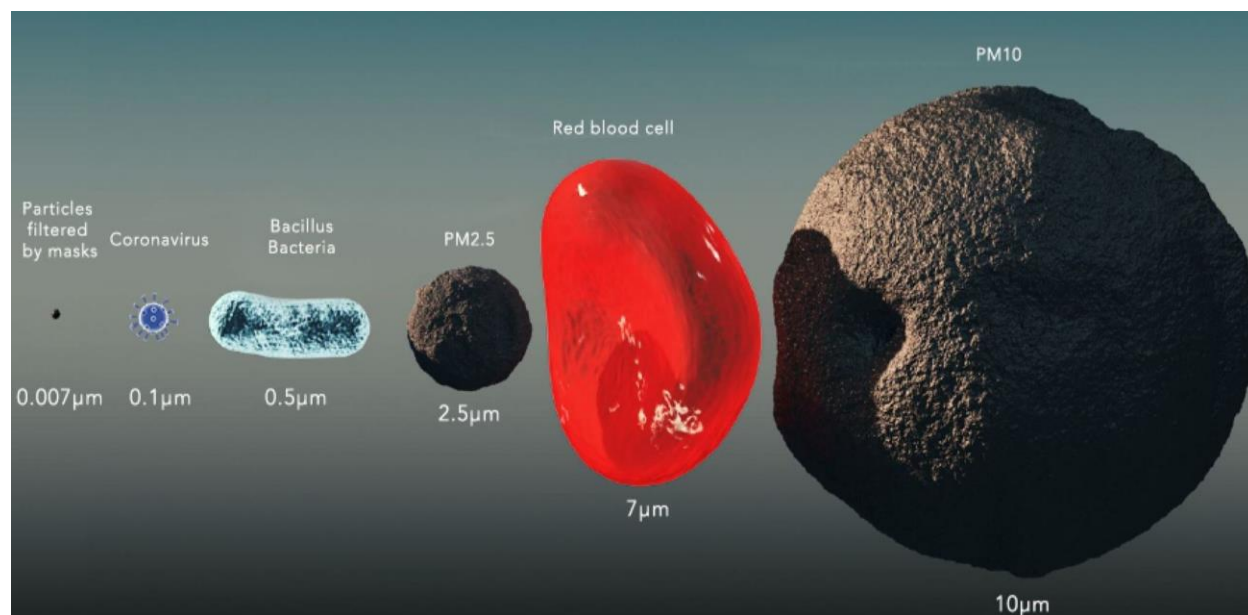
- **Material particulado:** el material particulado es una mezcla tanto de partículas sólidas como partículas líquidas capaces de permanecer suspendidas en el aire, ya sean de origen orgánico o inorgánico (Environmental Protection Agency [EPA], 2018). Los contaminantes presentes en esta mezcla son clasificados en dos grupos dependiendo el diámetro de la partícula:

- PM_{10} : partículas inhalables con un diámetro menor o igual a 10 micrones como el polvo, el polen y el moho (Environmental Protection Agency [EPA], 2018).
- $PM_{2.5}$: partículas inhalables con un diámetro menor o igual a 2.5 micrones como partículas generadas por combustión, algunos componentes orgánicos y metales (Environmental Protection Agency [EPA], 2018).

En la **Figura 2** se ilustra como se ve el material particulado en relación a algunas células y partículas comunes que se pueden encontrar en el aire como lo es el coronavirus, un bacilo o un glóbulo rojo.

Figura 2.

Diámetros comparados de $PM_{2.5}$ y PM_{10}



Nota. Representación comparativa del tamaño de partícula del PM_{10} y el $PM_{2.5}$ en relación a células como el glóbulo rojo, bacilos, el coronavirus y partículas filtradas por máscaras. Tomado de: Tu Buen Sitio. Material Particulado ($PM_{2.5}$ / PM_{10}). <https://tubuensitio.com/material-particulado/>.

- **Material particulado resuspendido:** el polvo atmosférico significativo surge de la perturbación mecánica del material granular expuesto al aire. El polvo resuspendido generado a partir de estas fuentes abiertas se denomina “fugitivo” porque no se

descarga a la atmósfera en una corriente de flujo confinado. Las fuentes comunes del polvo resuspendido incluyen vías sin pavimentar, actividades agrícolas y actividades de construcción pesada (Environmental Protection Agency [EPA], 2018).

El material particulado resuspendido se puede generar por dos fenómenos físicos:

- Pulverización y abrasión de materiales superficiales por aplicación de fuerza mecánica a través de algún elemento (ruedas, cuchillas, etc.).
- Arrastre de partículas de polvo por la acción de corrientes de aire turbulentas, como la erosión eólica de una superficie expuesta por velocidades del viento superiores a 19 kilómetros por hora (km / h) (12 millas por hora [mph]).
- **Gases de efecto invernadero:** los gases de efecto invernadero son compuestos químicos en estado gaseoso capaces de absorber la radiación infrarroja del Sol, los cuales se acumulan en la atmósfera de la Tierra aumentando y reteniendo el calor en la misma (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, s.f.). Dentro de los gases de efecto invernadero encontramos:
 - Dióxido de carbono (CO₂): Este contaminante entra a la atmosfera principalmente por el uso de combustibles fósiles como por la combustión de biomasa (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).
 - Metano (CH₄): Se genera por las eyecciones de los rumiantes, en la producción de arroz, durante la producción y transporte de carbón (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).
 - Óxido nitroso (N₂O): Se forma en los procesos de combustión de los vehículos y fábricas, y son los principales causantes del aire contaminado en las ciudades, sin embargo, también es producto de algunos procesos relacionados con la agricultura (Vázquez, 2017).

- Gases fluorados: Se generan principalmente por procesos industriales relacionados a la refrigeración, como también por el uso de una variedad de productos de consumo contribuyen a las emisiones de gases fluorados, que incluyen los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Environmental Protection Agency [EPA], 2018).
- Dióxido de azufre (SO₂): Empleado en la industria del papel como blanqueador y producido durante la quema de combustibles (Vázquez, 2017).
- **Contaminantes criterio:** son aquellos compuestos que se determinaron como perjudiciales para la salud y el bienestar de los humanos a través de diversos estudios epidemiológicos por lo cual han sido normados y se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración en la atmósfera con el fin de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población; entre los más comunes encontramos:
 - Monóxido de carbono (CO): Gas incoloro e inodoro considerado uno de los contaminantes más peligrosos para la salud a muy bajas concentraciones. Este contaminante entra a la atmosfera principalmente por la quema de combustibles fósiles como el gas, petróleo, gasolina, entre otros. (Metropol, s.f.).
 - Óxido de nitrógeno (NO_x): Gas tóxico de color pardo que se genera como subproducto de algunos procesos de combustión a altas temperaturas como por ejemplo plantas eléctricas o vehículos motorizados (Metropol, s.f.). Estos compuestos se consideran promotores de otros contaminantes como lo es la lluvia ácida y el smog; además de esto, en presencia de radicales libres como HC en la troposfera genera compuestos como el O₃ troposférico, mientras que en la atmósfera reacciona con el CO y produce nitratos de cloro (Banco Mundial, 1997).
 - Dióxido de azufre (SO_x): gas tóxico con olor ocre e irritante que se atribuye, principalmente, a los procesos de combustión. Se produce por el contenido de ciertas cantidades de compuestos azufrados presentes en combustibles como el carbón, el

petróleo, el diésel o el gas natural (Metropol, s.f.). Este contaminante afecta principalmente la parte superior de las vías respiratorias y disminuye el funcionamiento pulmonar (WHO, 2005).

- Ozono troposférico (O_3): Existen dos tipos de ozono como tal, puede ser bueno o malo de acuerdo con la altura en la que se encuentre. El ozono “bueno” o estratosférico es una forma natural de oxígeno que provee una capa protectora sobre la tierra que bloquea la radiación ultravioleta; mientras que el ozono “malo” que se encuentra en la tropósfera, es un oxidante químico y el mayor componente de la niebla fotoquímica. Este tipo de ozono puede deteriorar seriamente el sistema respiratorio (Metropol, s.f.).

2.1.4. Tamaño de partícula y procesos de formación

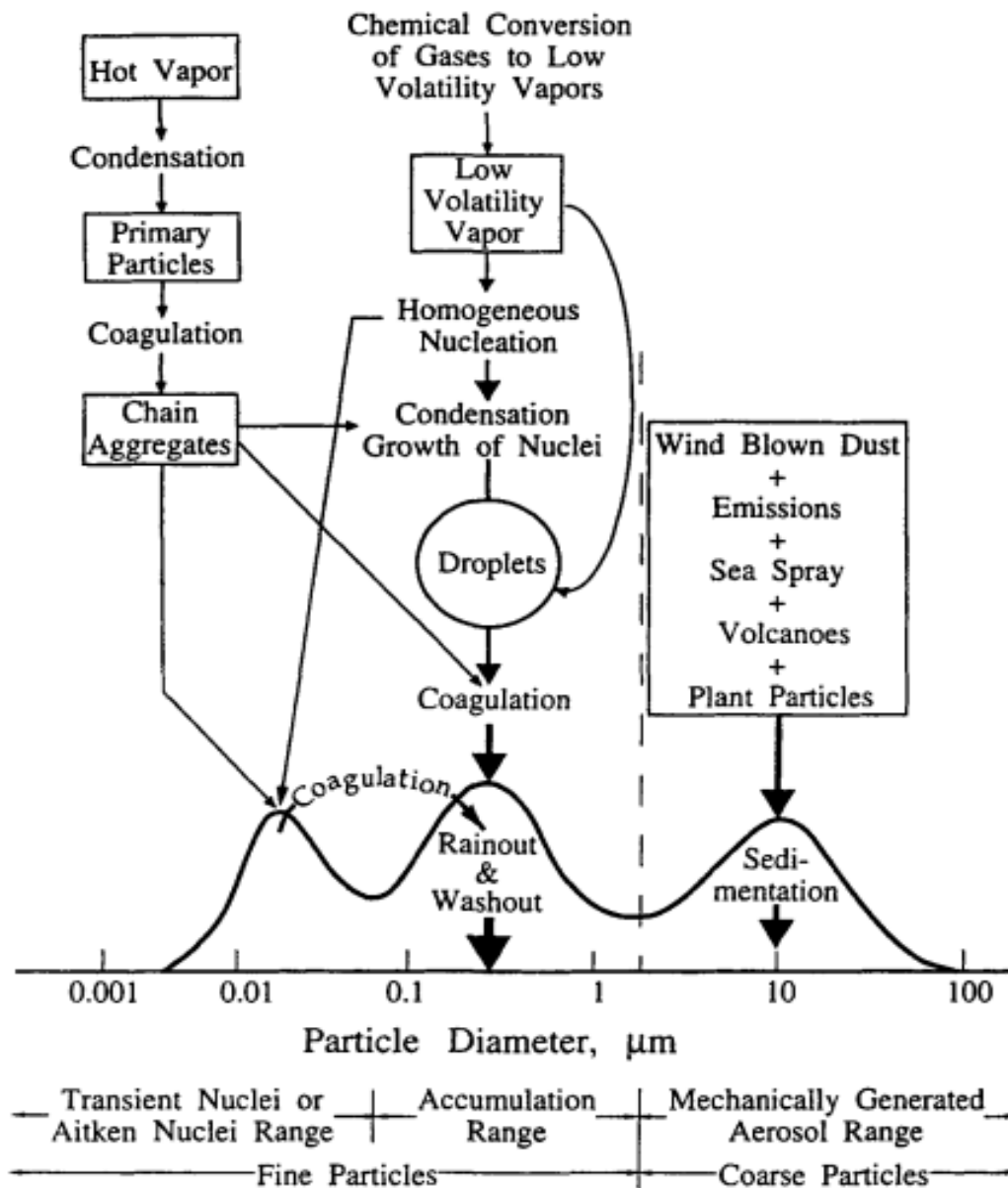
En cuanto a material particulado se refiere, generalmente se identifican principalmente tres rangos de tamaño de partícula de acuerdo a una distribución multimodal de este:

- Nucleótidos: partículas con un diámetro menor a $0,1\mu m$
- Acumulación: partículas con un diámetro entre $0,1\mu m$ y $1\mu m$
- Gruesas: partículas con un diámetro mayor de $1\mu m$

Las partículas más pequeñas resultan de la combustión y fuentes estacionarias (fuentes industriales y plantas de poder), en particular del diésel empleado en chimeneas y vehículos; mientras que las más grandes tienden a proceder de fuerzas mecánicas, como son el viento o el tráfico.

Figura 3.

Diagrama de relación del diámetro de partículas de un aerosol atmosférico y distribución de área superficial



Nota. Esquema idealizado de la distribución del área superficial de partículas de un aerosol atmosférico. Se indican los principales modos, fuentes y mecanismos de formación y eliminación de partículas. Tomado de: Atmospheric chemistry and physics from Air Pollution to Climate Change. Seinfeld, et, ál. 2006

Los fenómenos que influyen en el tamaño de las partículas se muestran en un esquema idealizado en la Figura 3, que representa la distribución típica del área superficial de un aerosol atmosférico. Las partículas a menudo se pueden dividir aproximadamente en modos. El modo de nucleación (o núcleos) comprende partículas con diámetros de hasta aproximadamente 10 nm. El modo Aitken abarca el rango de tamaño de aproximadamente 10 nm a 100 nm (0,1 μm) de diámetro. Estos dos modos explican la preponderancia de partículas por número; Debido a su pequeño tamaño, estas partículas rara vez representan más de un pequeño porcentaje de la masa total de partículas en el aire. Las partículas en modo núcleo se forman a partir de la condensación de vapores calientes durante los procesos de combustión y de la nucleación de especies atmosféricas para formar partículas frescas. Se pierden principalmente por coagulación con partículas más grandes. El modo de acumulación, que se extiende desde 0,1 hasta aproximadamente 2,5 μm de diámetro, normalmente representa la mayor parte del área superficial del aerosol y una parte sustancial de la masa del aerosol. La fuente de partículas en el modo de acumulación es la coagulación de partículas en el modo de núcleos y de la condensación de vapores en partículas existentes, lo que hace que crezcan en este rango de tamaño. El modo de acumulación se llama así porque los mecanismos de eliminación de partículas son menos eficientes en este régimen, lo que hace que las partículas se acumulen allí. El modo grueso, de $> 2,5 \mu\text{m}$ de diámetro, se forma mediante procesos mecánicos y generalmente consta de partículas de polvo naturales y artificiales. Las partículas gruesas tienen velocidades de sedimentación lo suficientemente grandes como para que se asienten fuera de la atmósfera en un tiempo razonablemente corto. Debido a que los mecanismos de remoción que son eficientes en los extremos de partículas pequeñas y grandes del espectro de tamaño son ineficientes en el rango de acumulación, las partículas en el modo de acumulación tienden a tener tiempos de residencia en la atmósfera considerablemente más largos que aquellas en el modo de núcleo o grueso (Seinfeld et ál, 2006).

2.1.5. Impactos

- **Efectos en la salud**

Una de las principales consecuencias de la contaminación del aire es el aumento y agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares de las personas que residen en grandes centros urbanos o cerca a fuentes industriales, las cuales emiten contaminantes nocivos a la atmosfera, bien sea en países desarrollados o en desarrollo (Serkonten, 2018). Según la Organización Mundial de la Salud, se estima que esta problemática ha sido la causa de millones de muertes prematuras cada año en todo el mundo debido a la exposición de partículas pequeñas PM 2.5 o de menor diámetro, causando principalmente asma, deficiencia en la función respiratoria y en casos extremos, cáncer de pulmón (2018).

Para el 2016, estudios realizados estimaron que aproximadamente el 58% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cardiovasculares, mientras que el 18% de las muertes se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas, y el 6% de las muertes se debieron a cáncer de pulmón (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018).

Entre los principales contaminantes con capacidad de afectar la salud de los individuos están los que provienen de emisiones primarias o transformaciones atmosféricas. Los vehículos automotores son la fuente más importante de algunos de estos contaminantes (en particular el monóxido de carbono), óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados, ozono y otros oxidantes fotoquímicos, plomo y, en menor proporción, las partículas suspendidas totales de dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles (Romero et ál., 2006).

Estudios realizados en los últimos años han demostrado que diferentes factores relacionados a la contaminación del aire afectan de manera directa o indirecta la salud, los principales componentes de estas afectaciones son:

La composición química de los componentes relacionados al contaminante cómo también la estructura y complejidad física, anatómica y fisiológica del individuo afectado,

los nuevos estudios también han demostrado que el patrón de respiración y la condición física también son factores a tener en cuenta.

Ahora estos contaminantes pueden entrar al cuerpo a diferentes niveles: las partículas más gruesas y pesadas afectan principalmente las vías respiratorias generales o superiores mientras que las partículas más pequeñas y livianas llegan al sistema respiratorio más pequeñas e incluso directamente a los alvéolos, cabe aclarar que gran parte de las partículas pesadas se quedan en la nariz o en las fosas nasales.

La toxicidad varía dependiendo el producto químico del cual se origina el contaminante. Los gases solubles en agua, como el dióxido de azufre (SO₂), reaccionan con la capa mucosa de las vías aéreas superiores mientras que los gases menos solubles, como el dióxido de nitrógeno (NO₂), tienen más posibilidad de llegar a los alvéolos (Ubilla et ál.,2017).

De acuerdo con lo anterior, la OMS recalca que es fundamental proteger la salud pública, pues la mayoría de las fuentes de contaminación del aire están más allá del control de las personas, y requieren medidas por parte de los gobiernos de las ciudades, así como de instancias normativas nacionales e internacionales que regulen la emisión de estos contaminantes a la atmosfera (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018).

Las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire publicadas en 2005 ofrecen orientación general relativa a umbrales y límites para contaminantes atmosféricos clave que entrañan riesgos sanitarios. Estas Directrices señalan que mediante la reducción de la contaminación con partículas (PM₁₀) de 70 a 20 microgramos por metro cúbico (µg/m) es posible reducir en un 15% el número de defunciones relacionadas con la contaminación del aire (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018).

- **Efectos en el medio ambiente**

El material particulado puede ser transportado por el viento a través de largas distancias, para luego ser depositadas en el suelo o el agua. Según la composición química del PM, los efectos provocados por la sedimentación de este pueden generar (Environmental Protection Agency [EPA], s.f.):

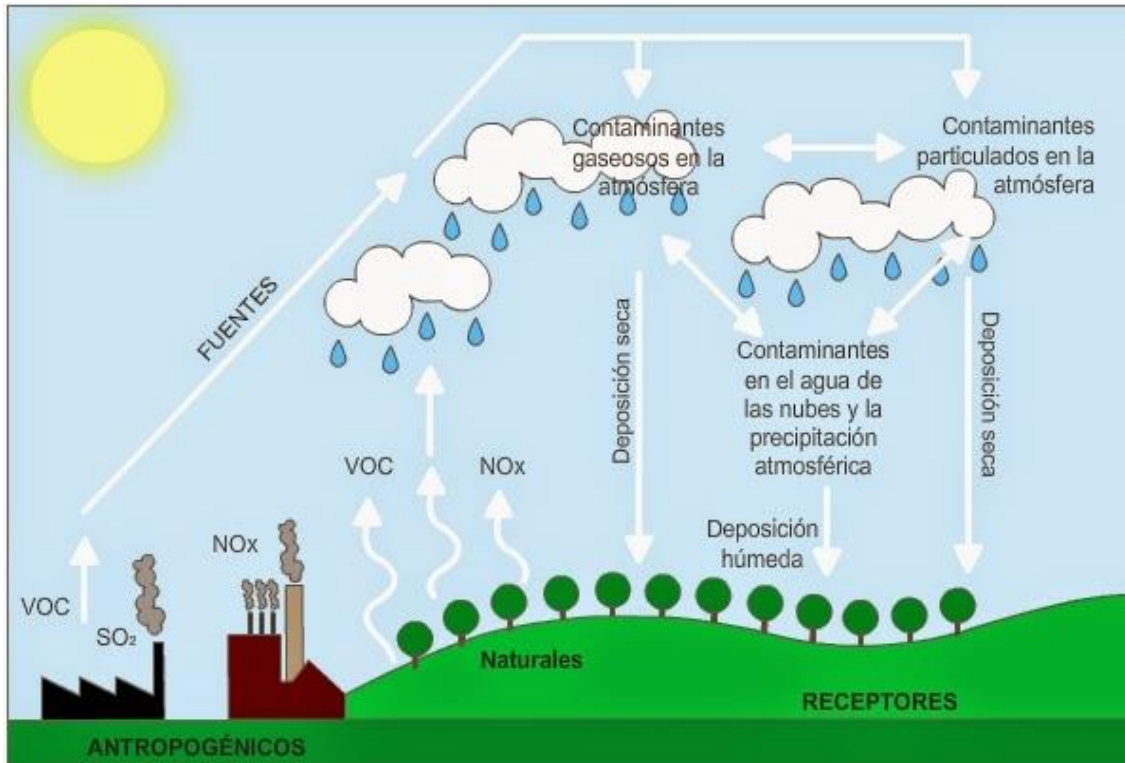
- Acidificación de lagos y arroyos
- Alteración en el balance nutricional de cuencas fluviales y aguas costeras
- Disminución en los nutrientes del suelo
- Daño en cultivos agrícolas y bosques sensibles
- Efectos nocivos sobre la diversidad y equilibrio de los ecosistemas

2.2. Mecanismos de limpieza atmosférica

- Los contaminantes atmosféricos que permanecen durante un cierto periodo de tiempo en la atmósfera cuentan con cuatro mecanismos básicos de limpieza que permiten eliminarlos o diluirlos, los cuales son (Zanón et ál, 2008):
- Transformación de sustancias en otras mediante reacciones químicas o fotoquímicas con gases atmosféricos o con otros contaminantes (Zanón et ál., 2008).
- Deposición sólida de compuestos insolubles o deposición seca: Contribuye a la eliminación de los contaminantes en forma de partículas, debido a su tamaño y masa, atraídas por la fuerza de gravedad sin la intervención de los hidrometeoros (agua de lluvia, rocío, neblina, nieve, entre otros). Las que tienen un diámetro superior a 100 micras precipitan cerca a la fuente, pero entre más pequeñas son, más difícil se hace su sedimentación. Las partículas menores a 10 micras quedan en la atmósfera en suspensión (Zanón, et ál., 2008).
- Deposición húmeda: lavado de la atmósfera mediante hidrometeoros como la lluvia, nieve o las nubes, que disuelven algunos de los compuestos gaseosos, líquidos o sólidos y los deposita en el suelo (Zanón et ál., 2008).
- Dispersión o difusión de contaminantes en la atmósfera, que los reparte de manera que el volumen de aire afectado por ellos es cada vez mayor, por lo cual la concentración es cada vez menor. Esto sucede principalmente por el movimiento turbulento de la atmósfera, es decir, por el viento (Zanón et ál.,2008).

Figura 4.

Mecanismos de limpieza de la atmósfera, deposición húmeda y seca



Nota. Representación gráfica de los mecanismos de limpieza atmosférica con sus respectivas fuentes y contaminantes. Tomado de: Por un futuro con ecología. Lluvia ácida y efecto invernadero. <http://porunfuturoconecologia26.blogspot.com/2014/05/lluvia-acida-y-efecto-invernadero.html>

En la **Figura 4** se aprecia gráficamente como se generan los mecanismos de limpieza de la atmósfera por deposición húmeda y seca.

2.3. Tiempo de vida de las partículas en la atmósfera

El tiempo de residencia de las partículas en la atmósfera depende de su tamaño, composición y propiedades termodinámicas. La vida media tiene una relación inversamente proporcional al tamaño de partícula. Para las partículas de nucleación es muy reducida, de horas; mientras que el tiempo de vida media en suspensión de las partículas gruesas incrementa al disminuir el diámetro, para $>20 \mu\text{m}$ es de varias horas, y de 2 a 4 días para partículas con diámetro entre 2 y $3 \mu\text{m}$. El mayor tiempo de residencia en la atmósfera es para las partículas de acumulación.

De acuerdo a su composición química, la vida media de las partículas se relaciona con el carácter higroscópico de estas. Las de acumulación y gruesas se comportan como núcleo de condensación ya que comúnmente tienen una fracción soluble en agua, por lo cual el mecanismo de limpieza de estas partículas es la deposición húmeda, y pueden durar alrededor de 10 días. Por otro lado, las partículas derivadas de la combustión poseen una naturaleza hidrofóbica y es necesario que la superficie se oxide para permitir su eliminación de la atmósfera por deposición húmeda, por lo cual su tiempo de vida es superior a la de la fracción soluble.

2.4. Normatividad colombiana para material particulado y otros contaminantes

En Colombia la normatividad que rige el control de calidad del aire ambiente en el país está dada por la **Resolución 2254 de 2017**, la cual estipula los niveles máximos permisibles de emisión de los contaminantes criterio y el tiempo de exposición, entre los cuales se encuentra el material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃ y CO, como se muestra en la siguiente tabla (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 1.

Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire

Contaminante	Nivel máximo Permisible (µg/m ³)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5000	8 horas
	35000	1 hora

Nota. Información de los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire de acuerdo a la resolución 2254 de 2017 estipulada por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

También se establece que para verificar el cumplimiento de esto se deben llevar a cabo mediciones en todos los puntos de monitoreo que se tengan en cada ciudad, para lo cual, las Autoridades Ambientales han instalado y puesto en operación Sistemas de Vigilancia –SVCA según lo definido en el Protocolo Para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire por el Ministerio de Ambiente.

Por otro lado, también se estipula los niveles de emisión en los cuales se debe declarar una alerta de emergencia, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Concentraciones ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) para los niveles de prevención, alerta o emergencia

Contaminante	Tiempo de exposición	Prevención	Alerta	Emergencia
PM ₁₀	24 horas	155-254	255-354	≥355
PM _{2.5}	24 horas	38-55	56-150	≥151
SO ₂	8 horas	139-167	168-207	≥208
NO ₂	1 hora	198-486	487-797	≥798
O ₃	1 hora	190-677	678-1221	≥1222
CO	8 horas	10820-14254	14255-17688	≥17689

Nota. Valores de concentración de contaminantes criterio estipulados para la prevención, alerta o emergencia. Tomado de: Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. Resolución 2254 de 2017. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Normatividad/Resolucion-2254-2017-calidad-del-aire.pdf>.

Finalmente, se establece el reporte del Índice de Calidad del Aire o ICA, el cual es un número adimensional que reporta la calidad del aire en función de un código de colores que está asociado a efectos generados por la contaminación, esto con el fin de reducir la exposición a altas concentraciones de contaminantes por parte de la población (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017).

3. METODOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN LA ESTIMACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

Para la caracterización de material particulado existen diversas metodologías y estrategias que se pueden dar por estimación, es decir, mediante modelos matemáticos que sirven para predecir el comportamiento de este teniendo en cuenta las fuentes de emisión; o bien se pueden dar por cuantificación, metodologías que implementan instrumentos de medición para determinar la cantidad exacta que se genera de material particulado apoyándose en modelos matemáticos.

En el presente capítulo veremos cuáles son las principales metodologías y estrategias que se emplean en la estimación de material particulado.

3.1. Inventario de emisiones

Un inventario de emisiones atmosféricas es un conjunto de datos que caracterizan y consolidan, mediante sumatoria, las emisiones de contaminantes atmosféricos, teniendo en cuenta el tipo de fuente y el tipo y cantidad de contaminantes emitidos, en un área geográfica e intervalo de tiempo determinados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), . Éstos, son instrumentos necesarios para la gestión de calidad del aire y toma de decisiones, ya que son el punto de partida para la implementación, evaluación y ajuste de programas y medidas de control, que ayudan a mejorar la calidad del aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Un inventario de emisiones atmosféricas es el resultado de acciones dirigidas a cumplir con criterios de calidad, coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad de la estimación de emisiones generada por una o varias fuentes de interés. El proceso de elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas consta de cuatro etapas: a) formulación, b) planificación, c) ejecución, d) evaluación y actualización (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Por otro lado, esta herramienta permite conocer la cantidad de fuentes existentes, los contaminantes que emiten y la cantidad de contaminantes emitida. El objetivo es cuantificar las emisiones generadas por un grupo de fuentes o actividades de interés. Adicionalmente, los inventarios de emisiones atmosféricas son una herramienta para la

cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO); la cual es necesaria para la formulación y seguimiento de las estrategias de mitigación, reporte de avances en el cumplimiento de los acuerdos internacionales y comercio de derechos de emisión (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Los principales usos de los inventarios de emisiones son:

- Informar y orientar a las autoridades ambientales y aquellas entidades involucradas en el control y prevención de la contaminación del aire.
- Evaluar los impactos ambientales generados por las emisiones ambientales a partir de los datos recolectados.
- Establecer objetivos y prioridades para llevar a cabo la gestión de la calidad del aire.
- Elaborar estudios de riesgos a la salud humana.
- Diseñar sistemas de monitoreo y control de emisiones.
- Modelamiento de la calidad del aire
- Identificar aportes de contaminantes atmosféricos por tipo de fuente, sector económico o zonas geográficas.
- Evaluar el cumplimiento de normas asociadas a emisiones contaminantes.
- Diseñar campañas de monitoreo de calidad del aire.
- Informar a la comunidad y a público en general.

Así mismo, existen varios tipos de inventarios de emisiones entre los cuales se encuentran:

- Inventario de emisiones atmosféricas para el reporte de emisiones: Recolectar y generar información consolidada de emisiones para la construcción de reportes de emisiones nacionales, regionales, locales o institucionales.
- Inventario de emisiones para la formulación y evaluación de estrategias: Generar información para formular y evaluar estrategias enfocadas a la prevención y control de la contaminación de aire.

- Inventario de emisiones atmosféricas para el diseño de SVCA: Soporte para el diseño del sistema de vigilancia del aire y campañas de monitoreo de calidad del aire.
- Inventario de emisiones atmosféricas para la gestión ambiental corporativa: Generar información de soporte para el diseño, implementación y seguimientos de mecanismos enfocados a la reducción de las emisiones de contaminantes al aire en actividades productivas o de servicio.
- Inventario de emisiones atmosféricas para modelación: Generar información de soporte para la modelación de la calidad del aire

Tabla 3.

Ejemplo de inventario de emisiones de contaminantes criterio en diferentes años para la ciudad de Bogotá

Estudio	Año Evaluado	Emision (Ton/año)					
		CO ₂	CO	NO _x	VOC	PM	SO ₂
Bottom-up	2013	7,254,350	717,945	48,927	74,579	1,327	12,085
Top-down	2013	10,458,221	866,445	66,540	91,885	1,163	24,109
SDA (2014)	2013	10,232,234	741,560	62,918	65,247	836	NA
Hernandes-Gonzales y Jimenez (2011)	2008	3,160,896	NA	NA	NA	NA	NA
Rojas y Peñaloza (2010)	2008	NA	706,932	57,658	108,011	1,594	13,009
SDA y UDC (2011)	2011	NA	NA	NA	48,350	NA	NA
SDA (2011)	2008	6,000,000	490,000	54,000	62,000	1,400	NA
Rodriguez y Beherentz (2009)	2008	4,800,000	450,000	30,000	60,000	1,100	NA
Promedio	-	6,984,284	662,147	53,340	72,868	1,237	13,068
Minimo	-	3,160,896	450,000	30,000	48,350	836	12,085
Maximo	-	10,458,221	866,445	66,540	108,011	1,594	14,109

Nota. Ejemplo de un inventario de emisiones comparativo que se realizó para la ciudad de Bogotá en diferentes años y evaluando los principales contaminantes del aire, conocidos como contaminantes criterio. Tomado de: Gale one file. Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&u=anon~1330695e&id=GALE|A499178813&v=2.1&it=r&sid=googleScholar&asid=ee71c21a>

3.2. Métodos de estimación de emisiones atmosféricas

Las metodologías implementadas para la estimación de emisiones atmosféricas incluyen y contemplan la medición de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} para fuentes fijas y móviles, las cuales se describen a continuación.

3.2.1. Medición directa

Este método es considerado el más preciso en temas de estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos, y consiste en la medición de cada una de las fuentes involucradas en las emisiones en un periodo de tiempo determinado, para lo cual se emplean sistemas de monitoreo continuo de emisiones o monitoreo paramétrico (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2002).

La medición directa se realiza a partir de un procedimiento de muestreo representativo, en el cual se recolecta una muestra del flujo cargado de partículas que se descarga a la atmósfera durante un año para luego ser analizada en el laboratorio. Generalmente se usan analizadores instrumentales que miden directamente la concentración de los contaminantes en la fuente emisora y reporta los valores de las emisiones de manera inmediata (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2002).

Cabe resaltar que de todos los tipos de fuentes emisoras (fijas, de área, móviles y naturales), este método de estimación de material particulado se aplica principalmente para las fuentes fijas.

Los sistemas de monitoreo continuo que se emplean en esta metodología, son muy precisos, ya que tienen en cuenta las variaciones que ocurren en todo momento durante el periodo de reporte; sin embargo son un poco costosos. El principio más utilizado es el de medición de opacidad, el cual es una medida sustituida para determinar la concentración de partículas. Otros principios utilizados incluyen métodos basados en la dispersión de luz, atenuación de radiación beta, electrificación de sondas, extinción de luz, centelleo óptico, entre otros (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2002).

3.2.2. Factores de emisión

Durante muchos años los factores de emisión han sido una herramienta fundamental en el desarrollo de inventarios de emisiones nacionales, regionales, estatales y locales para la gestión de la calidad del aire y el desarrollo de estrategias de control de emisiones.

Un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con una actividad asociada a la liberación de ese contaminante. Estos factores generalmente se expresan como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite el contaminante (por ejemplo, kilogramos de partículas emitidas por mega gramo de carbón quemado). Dichos factores facilitan la estimación de las emisiones de diversas fuentes de contaminación atmosférica. En la mayoría de los casos, estos factores son simplemente promedios de todos los datos disponibles de calidad aceptable, y generalmente se supone que son representativos de los promedios a largo plazo para todas las instalaciones en la categoría de fuente (es decir, un promedio de la población) (Environmental Protection Agency [EPA], s.f.).

La ecuación general para la estimación de emisiones es:

$$E = A \times EF \times \left(\frac{1 - ER}{100} \right)$$

Donde,

- E: Emisiones estimadas
- A: Tasa de actividad
- EF: Factor de emisión
- ER: Eficiencia global de reducción de emisiones %

La principal fuente de información con respecto a los factores de emisión es la EPA, ya que ha asumido la extensa tarea de compilar dichos factores para una gran cantidad de fuentes, a partir de lo cual se hace un reporte conocido como AP-42 que se actualiza por lo menos cada 3 años.

3.2.3. Factor de actividad

Al tener los factores de emisión definidos para cada fuente o categoría de fuentes, se determina un factor de actividad. Este permite relacionar la magnitud de una variable de interés de una actividad en un tiempo determinado. En el caso de fuentes móviles vehiculares, el factor de actividad pueden ser las toneladas de combustible utilizado o los kilómetros recorridos durante un año; para procesos industriales puede corresponder a la tasa de producción (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

En los casos en los que no es posible contar con información de cada fuente requerida para estimar el factor de actividad, se debe acudir al uso de métodos de estimación por análisis estadístico, modelos o proyecciones a partir de información disponible.

3.2.4. Modelos de emisión

Los modelos de emisión están basados en ecuaciones empíricas desarrolladas para ciertos procesos y tipos de fuentes. Estas ecuaciones en su mayoría, son desarrolladas por computadores de tal manera que un gran número de ecuaciones e interacciones puedan ser ejecutadas con facilidad. Los datos requeridos para los modelos de emisión varían de acuerdo a la fuente, pero en la mayoría de los casos se necesita como mínimo un parámetro físico de la fuente de interés.

“Los modelos de emisión están diseñados para generar estimaciones más exactas que las obtenidas con factor de emisión, sin embargo, esta exactitud depende en gran parte de la calidad de los datos de entrada y los supuestos en que se base” (SEMARNAT, 2005).

El uso de modelos se hace necesario debido a que el funcionamiento de las fuentes de emisión varía ampliamente, pero siguiendo ciertos patrones. Tal es el caso de los vehículos, por ejemplo, en los que se dan variaciones en los patrones de manejo y de arranque, y que presentan una distribución de tecnologías que, además de variar de un año a otro, también varían de un lugar a otro. Así mismo, se usan modelos también para estimar las emisiones de los vehículos que no circulan por caminos o carreteras, como es el caso de los equipos agrícolas y los equipos de construcción (tractores,

excavadoras, etc.); sin embargo, los vehículos de este tipo se consideran frecuentemente fuentes de área y no fuentes móviles ([Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2002).

4. METODOLOGÍAS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO APLICABLES

Siendo el material particulado uno de los principales contaminantes del aire, según estudios realizados por la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos el material particulado resuspendido es el responsable de casi el 90% de las emisiones de material particulado. El material particulado resuspendido proviene de fuentes fugitivas de contaminación, las cuales comprenden emisiones que no son canalizadas por ductos, chimeneas u otros sistemas hacia el exterior, tales como aquellas provenientes de calles pavimentadas y sin pavimentar, actividades de construcción pesada y demoliciones, actividades agrícolas, entre otras (Ministerio del medio Ambiente de Chile, s.f.).

A lo largo del desarrollo investigativo sobre material particulado resuspendido, la principal entidad gubernamental que se ha destacado en su estudio ha sido “*The Environmental Protection Agency*” o EPA (Agencia de protección Ambiental).

En este capítulo se hará énfasis en aquellas metodologías que se han implementado para la cuantificación de material particulado resuspendido generado por la actividad vehicular en carreteras pavimentadas y sin pavimentar.

La metodología desarrollada por la EPA para la cuantificación de material particulado resuspendido en vías se denomina “Método para cuantificar las emisiones de material particulado resuspendido (PM10 y/o PM2.5) en carreteras pavimentadas y sin pavimentar”. El método se basa en la medición del aumento de las concentraciones de PM sobre los niveles ambientales de fondo en una o más ubicaciones que están directamente influenciadas por el polvo de la carretera que se emite por la interacción de los neumáticos del vehículo con la superficie de la carretera.

Este método se puede aplicar a cualquier camino pavimentado o sin pavimentar (tierra o grava) que tenga 100 metros o más de longitud.

En los siguientes numerales se hará una explicación detallada de cómo funciona el método desarrollado por la EPA.

4.1. Principio del método de cuantificación de material particulado resuspendido

Durante el desplazamiento de un vehículo, las llantas de este interactúan con la superficie de la carretera mediante fuerzas aerodinámicas y de fricción. Estas interacciones dan como resultado la emisión de PM desde la superficie del camino a través de procesos de suspensión mecánica y aerodinámica y, en menor grado, la abrasión de los materiales del camino. En vías sin pavimentar o de tierra, las llantas de los vehículos interactúan directamente con agregados y partículas de tierra sueltas y erosionables. En vías pavimentadas, pueden existir partículas suspendibles sueltas o agregados erosionables en la superficie del camino y pueden tener su origen en varias fuentes. Las fuentes de polvo del camino en vías pavimentadas incluyen material del suelo de origen geológico que puede haber sido transportado al camino por el viento o por medios mecánicos, polvo por el desgaste de los frenos y los neumáticos, y el polvo por la erosión del agregado o cemento de la calzada.

Cuando las llantas de los vehículos suspenden el PM del polvo del camino, ya sea por medios mecánicos o aerodinámicos, la columna de PM detrás de cada llanta se dispersa con la distancia desde la llanta y en la estela del vehículo. Este método de prueba se basa en el principio de que un vehículo de prueba que cuantifica solo el aumento en la concentración de PM por encima del fondo ambiental a una velocidad de viaje conocida y a una distancia fija de los neumáticos del vehículo pueden proporcionar mediciones repetibles y calibrarse (escalarse) de manera confiable según un estándar externo para medir las emisiones de partículas de polvo de la carretera

Las cuatro suposiciones principales que se invocan en la aplicación de este método de prueba son: 1) que para un vehículo de prueba dado, bajo condiciones meteorológicas ambientales que caen dentro de las pautas prescritas, el grado de dispersión (dilución) que ocurre con la distancia desde las llantas del vehículo está controlado principalmente por la velocidad del vehículo; 2) que dentro de ciertos límites de distancia de los neumáticos del vehículo, otros factores tales como la actividad de otros vehículos en la carretera, la magnitud de las emisiones de partículas de polvo de la carretera y el mecanismo de emisión de partículas de polvo de la carretera tienen un efecto insignificante en el grado de dispersión de la estela de polvo; 3) que las emisiones

de polvo de la carretera son el resultado únicamente de la interacción de los neumáticos del vehículo con la superficie de la carretera y que el arrastre aerodinámico de polvo de la turbulencia creada por la carrocería del vehículo es insignificante; y 4) que las diferencias en términos de emisiones de polvo de la carretera entre el vehículo de prueba utilizado y otros vehículos en la carretera que surgen de las diferencias en el peso del vehículo, la aerodinámica y las características de los neumáticos son pequeñas o pueden ser explicadas a través de relaciones matemáticas conocidas o supuestas.

4.1.1. Medición de concentraciones de PM mediante un sistema móvil

Este método requiere que los sistemas de medición móviles sean capaces de resolver las concentraciones de PM con alta resolución de tiempo. Por lo general, este nivel de medición resuelta en el tiempo solo está disponible a partir de instrumentos que explotan las propiedades ópticas de las partículas de aerosol para estimar las concentraciones de masa. El nefelómetro DustTrak (**Figura 5**), fabricado por TSI, Inc, se ha utilizado ampliamente con el método de prueba descrito aquí porque permite inferir las concentraciones de PM de las propiedades de dispersión de la luz de los aerosoles. El DustTrak está equipado con entradas selectivas de tamaño nominal para PM10, PM2.5 y otras fracciones de tamaño.

Figura 5.

TSI, DustTrak



Nota. Instrumento de nefelométrico DustTrak para la cuantificación de material particulado. Tomado de: Direct Industry. Aparato de vigilancia de aerosol. <https://www.directindustry.es/prod/tsi/product-22441-1061587.html>

Por lo general, debido a razones logísticas y de seguridad, los instrumentos para medir las concentraciones de PM, ya sean nefelómetros o algún otro dispositivo, no se colocan en el lugar donde es deseable medir la concentración de PM. Más bien, se utiliza una línea de entrada de muestra para canalizar el aire de la muestra desde la ubicación deseada a una ubicación más conveniente para colocar dispositivos de medición de PM, como el interior del vehículo de prueba. Uno o más dispositivos de medición de PM obtienen sub muestras de esta línea de entrada de muestra. La decisión de utilizar o no una línea de entrada de muestra y la configuración específica dependen en gran medida de dónde sea deseable muestrear la concentración de PM.

4.1.2. Medición de la ubicación y velocidad del vehículo

Los sistemas de monitoreo móvil ofrecen una herramienta para medir las emisiones de polvo de la carretera en muchas millas de carretera, lo que permite una gran cantidad de mediciones a través de una red de carreteras en comparación con lo que se puede lograr utilizando otros métodos (por ejemplo, inferencia a partir de la carga de limo). Para poder usar de manera óptima la información recolectada por los sistemas de medición móviles, las mediciones de la concentración de PM deben vincularse directamente a una ubicación en la red de carreteras. Además, debe conocerse la velocidad de desplazamiento del vehículo de ensayo para que se pueda aplicar el valor correcto de $K_i(v)$ en la ecuación X. Para obtener estas mediciones de alta resolución de tiempo, debe usarse un GPS que proporcionara ambos parámetros, junto con el sistema de monitoreo móvil.

4.1.3. Calibración del sistema de monitoreo móvil

Los sistemas de monitoreo móvil requieren calibración contra un estándar externo para que se puedan cuantificar los coeficientes $K_i(v)$ en la Ecuación X. La calibración es el momento de relacionar las mediciones de concentración de PM obtenidas con (probablemente) un método de medición basado ópticamente a bordo del vehículo de prueba de monitoreo móvil con las mediciones de flujo horizontal de PM que se obtienen utilizando instrumentos basados en masa para la medición de PM. Este último

proporciona esencialmente una estimación de los primeros principios de las emisiones de PM del vehículo de prueba. Y este método es el que se describe a continuación.

El monitoreo móvil puede servir como un medio para la comparación relativa del potencial de emisión de polvo de la carretera. Por ejemplo, si la velocidad se mantiene constante, entonces se puede calcular la relación entre el potencial de emisión de dos secciones de carreteras, tratamientos o tiempos de muestreo diferentes porque a una velocidad dada, el factor de calibración es constante para un vehículo determinado. Esto puede ser muy útil para cuantificar la efectividad relativa de la aplicación de tratamientos superficiales o comparar diferentes tipos de carreteras dentro de la misma instalación con la intención de identificar qué carreteras son los mayores contribuyentes a las emisiones de polvo de la carretera de esa instalación. Sin embargo, si se van a utilizar técnicas de monitoreo móvil para obtener estimaciones de emisiones absolutas (es decir, en unidades de gramos de PM por actividad), entonces se necesita una calibración contra un estándar externo. Una vez que se establece una calibración para el vehículo de prueba, también se necesitan factores de corrección adicionales para tener en cuenta las diferencias entre las características del vehículo de prueba y la combinación de vehículos que recorrerían un segmento de carretera de interés para una estimación precisa de las emisiones absolutas.

El principio básico es que la concentración de PM se mide a varias alturas sobre el suelo a favor del viento de la carretera de prueba de calibración y en contra del viento de la carretera de prueba utilizada para la calibración del sistema de monitoreo móvil. La velocidad y la dirección del viento también se miden simultáneamente a varias alturas diferentes sobre el suelo. A través de la integración numérica del flujo del PM a varias alturas diferentes, es posible cuantificar la velocidad a la que el PM se ha agregado a la atmósfera por el viaje de un vehículo a lo largo de la carretera de prueba. La suposición invocada en el uso de este método es que la carretera de prueba es esencialmente una fuente homogénea de emisiones de polvo de la carretera, de modo que las pequeñas variaciones en la dirección del viento no afectan significativamente lo que se mide mediante la instrumentación de perfil de la estela. En la práctica, esto requiere que el camino de prueba sea de grado constante (preferiblemente nivelado) y razonablemente homogéneo en apariencia en la escala de unos pocos metros cuadrados de área.

Cabe destacar que la técnica anterior para la calibración del sistema de monitoreo móvil requiere que las emisiones de polvo de carretera PM de un vehículo de prueba dado sean mucho mayores en magnitud que las emisiones de PM del tubo de escape del vehículo de prueba. Esta consideración es especialmente importante cuando la carretera de prueba tiene un potencial de emisión de polvo muy bajo. Dado que lo que se busca es la relación entre la concentración de partículas que mide el monitor móvil a una velocidad de desplazamiento determinada y el flujo horizontal de partículas medido por el método de perfilado de estela, el procedimiento de calibración puede realizarse en una carretera sin pavimentar, siempre que las emisiones de polvo de la carretera sean homogéneas a lo largo del tramo de carretera utilizado. El uso de una carretera sin pavimentar mejora en gran medida la intensidad de la señal de la columna de polvo generada por el vehículo de prueba de monitoreo móvil sobre la intensidad de la señal de una carretera limpia y pavimentada.

Figura 6.

Vehículo de prueba para monitoreo móvil



Nota. Ejemplo fotográfico de una línea de entrada de muestra PM que se encuentra en un remolque detrás del vehículo de prueba. Tomado de: Environmental Protection Agency (EPA). Other Test Method – 34: Method to Quantify Road Dust Particulate Matter Emissions (PM10 and/or PM2.5) from Vehicular Travel on Paved and Unpaved Roads. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-08/documents/otm34.pdf>

4.1.4. Cuantificación de las emisiones de polvo PM de la carretera

Una vez recogidos los datos de medición, se aplican una serie de criterios de validez. Se aplican varios criterios para filtrar las mediciones cuando el sistema de monitoreo móvil viajaba demasiado lentamente, acelerando o desacelerando fuera de un rango prescrito, realizando un giro o bajo la influencia del escape o la columna de polvo de la carretera de otro vehículo. Dependiendo del propósito de las mediciones, otros criterios que podrían usarse para filtrar o combinar mediciones pueden ser la proximidad a una intersección, la proximidad a una fuente conocida de material de escombros de la carretera, como un sitio de construcción, y la temporada o el mes en que se realizaron las pruebas. Si bien no es una parte requerida del método de prueba descrito, no se puede exagerar la utilidad del software del Sistema de Información Geográfica (SIG) para mapear la ruta de medición, seleccionar subconjuntos específicos de datos y examinar las tendencias espaciales.

Finalmente, el procedimiento de calibración debe utilizarse para traducir la señal en bruto del sistema de monitoreo móvil a un factor de emisión basado en la masa utilizando la Ecuación X.

Todos estos fundamentos se utilizan, para que mediante la siguiente ecuación se puedan obtener el factor de emisión.

$$EF_{ps} = MSC_{i,v,ps} \times K_i(v)$$

Donde

EF_{ps} es el factor de emisión de polvo de carretera PM en gramos de PM por kilómetro recorrido del vehículo $MSC_{i,v,ps}$ es la concentración de PM medida por un sistema de medición móvil específico i que opera a velocidad v , y K_i es una función de la velocidad de desplazamiento del sistema de medición móvil y es específico del sistema de medición móvil i que se está usando. El subíndice ps se refiere a un rango de tamaño de partícula específico (por ejemplo, PM10, PM2.5).

4.2. Interferencias con el método

4.2.1. Fuentes de PM de otros vehículos, actividades o modos de emisión de polvo en la carretera

El concepto de sistema de monitoreo móvil se basa en la suposición de que, a raíz de los neumáticos del vehículo de prueba, la concentración medida de PM está dominada por el polvo de la carretera que se ha emitido a través del contacto de los neumáticos del vehículo con la superficie de la carretera. Esta suposición puede ser violada bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, bajo ciertas condiciones, el escape de otros vehículos (por ejemplo, camiones Diésel) puede resultar en concentraciones mucho más altas de PM que las que pueden ser causadas por las emisiones de polvo de la carretera. Las concentraciones de fondo de PM se monitorean en un lugar del vehículo de prueba que no está a raíz de los neumáticos del vehículo de prueba. El propósito del monitoreo de esta concentración de fondo es identificar los períodos en que la concentración de fondo es elevada debido a fuentes de PM distintas del polvo de carretera emitido por el vehículo de prueba.

En ciertas configuraciones de carreteras, la emisión de polvo de la carretera puede estar dominada por un proceso distinto a la interacción de los neumáticos del vehículo con la carretera. Por ejemplo, las emisiones de polvo PM en una carretera pavimentada con una orilla sin pavimentar pueden estar dominadas por la interacción de las estelas del vehículo con el material en las orillas sin pavimentar. En este caso, las técnicas de monitoreo móvil no podrían examinar adecuadamente este modo de emisión de polvo en la carretera.

4.2.2. Lluvia y charcos

La instrumentación utilizada para medir PM, como los nefelómetros, proporciona datos falsos en presencia de niebla y aerosol resultantes de que el vehículo de prueba viaje sobre superficies húmedas. Por lo tanto, el uso de sistemas de monitoreo móviles mientras las carreteras están mojadas o en proceso de secado después de un evento de precipitación es probable que resulte en estimaciones altamente erróneas. Bajo ciertas

condiciones, conducir a través de un charco puede resultar en la necesidad de realizar un mantenimiento y servicio extensos de los instrumentos de medición de PM.

4.3. Análisis de datos y cálculos.

4.3.1. Revisión los registros de datos sin procesar de un segundo

Realizar comprobaciones de control de calidad para datos de concentración faltantes, anómalos e inválidos de un segundo.

4.3.2. Cálculo de las concentraciones netas de PM brutas de un segundo

La señal bruta del método de monitoreo móvil es la concentración de PM en la estela de los neumáticos del vehículo corregida para la concentración de PM de fondo.

La señal en bruto viene dada por

$$MSC_{ps,t} = C_{wake,ps,t} - C_{back,ps,t}$$

donde $MSC_{ps,t}$ es la concentración bruta de PM en la fracción de tamaño denotada por ps (por ejemplo, PM10) del sistema de monitoreo móvil en el momento t , $C_{wake,ps,t}$ es la concentración de PM medida a raíz de los neumáticos del vehículo de prueba en el momento t , y $C_{back,ps,t}$ es la concentración de PM de fondo medida en el upstream de los neumáticos del vehículo (generalmente hacia la parte delantera del vehículo) en el momento t . A menos que haya una razón para no hacerlo (por ejemplo, como parte de los objetivos de un estudio específico), para los sistemas de monitoreo móvil configurados para medir la concentración de PM en la estela de los neumáticos por separado en los lados izquierdo y derecho del vehículo de prueba, $C_{wake,ps,t}$ debe reflejar el promedio de las dos mediciones.

4.3.2. Aplicación de criterios de validez basados en el GPS

Los sistemas de monitoreo móvil están sujetos a interferencias resultantes de condiciones de conducción específicas. Si la velocidad del vehículo de prueba es demasiado baja, los vientos cruzados pueden afectar a la calidad de la medición; Los vientos cruzados darán lugar a que la posición de la estela cambie con respecto a la

carrocería del vehículo de prueba y la ubicación de la línea de entrada de la muestra (generalmente fijada con respecto a la carrocería del vehículo) también se desplazará con respecto a la posición normal (sin viento) de la estela. Durante la aceleración, la desaceleración y los giros, las mediciones de concentración de PM pueden no reflejar las condiciones normales de conducción. A menos que los objetivos de una campaña de medición incluyan la caracterización de las emisiones de polvo de carretera PM del tráfico "Stop and go", es mejor excluir los períodos de aceleración lineal o angular porque no está claro en este momento cómo tales mediciones realizadas por el vehículo de prueba pueden relacionarse con otros vehículos. Los criterios de las directrices se proporcionan en la **Tabla 4**. Tenga en cuenta que se ha obtenido empíricamente una relación entre los vehículos de prueba y otros vehículos basada en la masa y la velocidad para el viaje a velocidad constante en una carretera relativamente nivelada.

Tabla 4.

Ejemplo de criterios aplicados para garantizar mediciones válidas basadas en las condiciones de conducción del vehículo

Parámetro	Umbral de validez	Premisa
Velocidad	Menos de 11 millas/ h- vías pavimentadas (5 m/s)	Minimizar las perturbaciones debidas a los vientos ambientales. Los vientos cruzados modifican la orientación efectiva de la ubicación de muestreo con respecto a los neumáticos del vehículo cambiando la forma de la estela y el centro de masa
Aceleración	Menos de 1.3 millas/h/s (0.7 m/s ²)	El cizallamiento lateral durante la aceleración y el flujo de aire transitorio alrededor de las líneas de entrada de muestra hacen que las mediciones durante los momentos de alta aceleración no sean confiables.
Desaceleración	Valor absoluto menor que 1.3 millas/h/s (0.7 m/s ²)	La aplicación de los frenos libera partículas de polvo y puede dar lugar a lecturas de polvo falsas y altas en carretera.
Angulo de la llanta	Menos de 3 grados respecto a la carrocería del vehículo.	Los giros hacen que las ruedas delanteras formen un ángulo con la carrocería del vehículo. Esto a su vez cambia la forma de la estela del neumático con respecto a las líneas de entrada de muestra. Los datos asociados con giros bruscos no son válidos.

Nota. Criterios de las directrices aplicados para garantizar mediciones válidas basadas en las condiciones de conducción del vehículo. Tomado de: Environmental Protection Agency (EPA). Other Test Method – 34: Method to Quantify Road Dust Particulate Matter Emissions (PM10 and/or PM2.5) from Vehicular Travel on Paved and Unpaved Roads. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-08/documents/otm34.pdf>

4.4. Estimación de las emisiones de PM10 "no tubo de escape" de las calles para la modelización práctica de la contaminación atmosférica del tráfico

4.4.1. Modelo EPA modificado (solución a corto plazo) y aplicación.

Se realizó una primera modificación del modelo EPA, dividiendo la emisión en emisión del tubo de escape y emisión por re-suspensión.

$$e = e_{\text{tubo de escape}} + e_{\text{re-suspensión}}$$

definiéndose la re-suspensión como las aportaciones de la abrasión de la superficie de la calle, la abrasión de los componentes del vehículo (embrague, frenos, neumáticos) y la emisión del polvo depositado en la carretera, que se origina en el exterior de la calle y que puede ser aplastado por los neumáticos.

$$e_{\text{re-suspensión}} = e_{\text{abrasión calle}} + e_{\text{componentes abrasión vehículo}} + e_{\text{emisión de polvo carretera}}$$

Al igual que en el modelo EPA, la contribución por re suspensión se considera dependiente de la carga de limo, el peso medio de la flota de vehículos y el número de días lluviosos. La fórmula modificada que se propone es:

$$e_{\text{re-suspensión}} = a * k * (sL)^{0.52} * W^{2.14} \left[\frac{1}{0.85} * (1 - 0.5 * r) \right] - e_{\text{tubo de escape}}(2000)$$

tomando los factores de emisión de escape de 2000 porque las mediciones en que se basan los parámetros de la fórmula anterior se realizaron en el año 2000.

Donde:

- e= Factor de emisión [g/VKT]
- a = factor de corrección aplicado en Alemania [-]
- k = factor de emisión EPA = 0.18 g/km
- sL = PM75 fracción de la carga de limo de la calle [g/m²],
- W = peso medio de un vehículo de la flota [t]
- r = Carga días lluviosos precipitación > 0.1 mm por día) durante el año, por ejemplo, r = 0.3 [-] para 122 días de lluvia por año.

Como se ha derivado de la fórmula de la EPA (EPA, 1997), la fórmula anterior sólo debe utilizarse con el peso medio de un vehículo de la flota como entrada. Por lo tanto, no debe usarse por separado para automóviles o camiones.

El artículo en el cual se trata el modelo anterior abarca un estudio de dos calles de Alemania que busca obtener los resultados de carga de limo de estas y los factores de emisión PM10 para estas calles, deducidos a partir de las mediciones de concentración de PM10 y NO_x.

El artículo presenta una primera propuesta para Alemania de un método operativo para disuadir las emisiones “no tubos de escapes” de las calles individuales. En este método se modifica la EPA, utilizando como parámetros: ubicación de la calle, tipo de calle, carga de tráfico, peso promedio de un vehículo de flota, número anual de días de lluvia y calidad de la superficie de la calle. En este estudio se concluyó que la calidad de la superficie de la calle podría tener una influencia significativa en la emisión de PM10 y que esta modelación aun no logra ser totalmente satisfactoria.

4.5. Estimación de factores de emisión de PM10 y PM2.5, en las vías urbanas de Mexicali, Baja California, México.

4.5.1. Metodología US EPA, AP-42

Se diseñó un mapa geofrenciado en AutoCAD 2007, en donde se localizaron los sitios de muestreo. Este diseño, se apoyó en la información digitalizada de instituciones gubernamentales y de organismos desconcentrados. Después se procedió al diseño del tamaño de la muestra (n) y selección de sitios con el apoyo del método de área geo estadística. Como resultado se obtuvo un numero de 30 (n).

En este estudio se estimó un peso vehicular de 3045 kg, para vías no pavimentadas y de 2718 kg, para vías pavimentadas. De manera similar se llevó la estimación de carga para las vías pavimentadas con un rango de 2 a 21 g/m² para 3560 autos promedio/día y una velocidad promedio de 30 km/h. Para el porcentaje de sedimentos en las vías no pavimentadas resultó en un intervalo de 1.84-8.93%, para 894 autos promedio/día, con una velocidad de 24,4 km/h, donde la US EPA recomienda del 4 a 7% de contenido de sedimento para peso de vehículos de 1176kg.

Con base en la obtención de valores medios de las variables independientes requeridas, se estimó el FE en las vías pavimentadas y no pavimentadas, se indica más

adelante, las cuales se utilizaron en otros estudios, unos en Chihuahua y otro en México D.F, respectivamente se observan variables distintas para cada tipo de viabilidad.

En el caso de las vías pavimentadas, las variables independientes para estimar el FE, le corresponde a la constante del multiplicador del tamaño de la partícula (k) para PM10 y PM2.5 un valor de 4.6 y 2.1 g/VKT, respectivamente, Cs, se refiere al contenido de sedimentos del material de la superficie del camino (g/m²) y P al peso promedio del vehículo (Mg).

$$FE = k \left(\frac{Cs}{2}\right)^{0.65} * \left(\frac{P}{3}\right)^{1.5}$$

En las vías no pavimentadas, existe una diferencia en la manera de conocer el contenido de sedimento en la superficie del camino, el cual se mide a través del porcentaje de material (s) que se queda retenido en la malla No. 200. El valor de k, es adimensional, y corresponde a un valor de 0.36 y 0.095 para PM10 y PM2.5 y las variables independientes nuevas son velocidad promedio del vehículo (v, km/gr), número promedio de ruedas (r) y número de días con una precipitación >= a 0.25 mm (p), por características de la región y día de monitoreo, este valor será de 2 días.

$$FE = k * (1.7) * \left(\frac{s}{12}\right) * \left(\frac{P}{2.7}\right)^{0.7} * \left(\frac{r}{4}\right)^{0.5} * \left(\frac{365 - p}{365}\right)$$

4.5.2. Resultados

Los resultados totales promedios de los FE, de ambos tipos de vías, los cuales se calcularon usando el método US EPA, AP-42, se determinaron usando dos variables, la velocidad media y contribución de peso.

Tabla 5.

Resultados de factores de emisión de acuerdo al modelo US EPA, AP-42

FE, kg/VKT	Tipo de vía	Valor	Desviación estándar	Error
PM ₁₀	No pavimentada	2.33	1.20	0.22
PM _{2.5}	No pavimentada	0.58	1.30	0.05
PM ₁₀	Pavimentada	0.92	0.22	0.04
PM _{2.5}	Pavimentada	0.73	0.32	0.06

Nota. Factores de emisión calculados de acuerdo al modelo de la EPA para vías pavimentadas y no pavimentadas. Tomado de: Estimación de Factores de Emisión de PM10 y PM2.5, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México. Información tecnológica, 21(4). Meza et ál., 2009

Comparando estos resultados con las otras ciudades, se logra observar que no hay punto de comparación, siendo México D.F una ciudad con poco material particulado, debido a la limpieza de sus calles.

Tabla 6.

Comparación de mediciones de FE, g/VKT 42

Parámetros	FE, (D.F., México)	FE, (Chih., Chih.)	FE, (Nevada, EEUU)	FE, (Mexicali, B.C)
PM ₁₀ (pav.)	0.429	378	90-840	923
PM _{2.5} (pav.)	0.103	1,730	6-87	734
PM ₁₀ (no pav.)	207.8	182	-	2,330
PM _{2.5} (no pav)	30.4	48	-	580

Nota. *Medición de los Factores e emisión en diferentes ciudades de México y estados unidos. Estimación de Factores de Emisión de PM₁₀ y PM_{2.5}, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México. Información tecnológica, 21(4). Meza et ál., 2009*

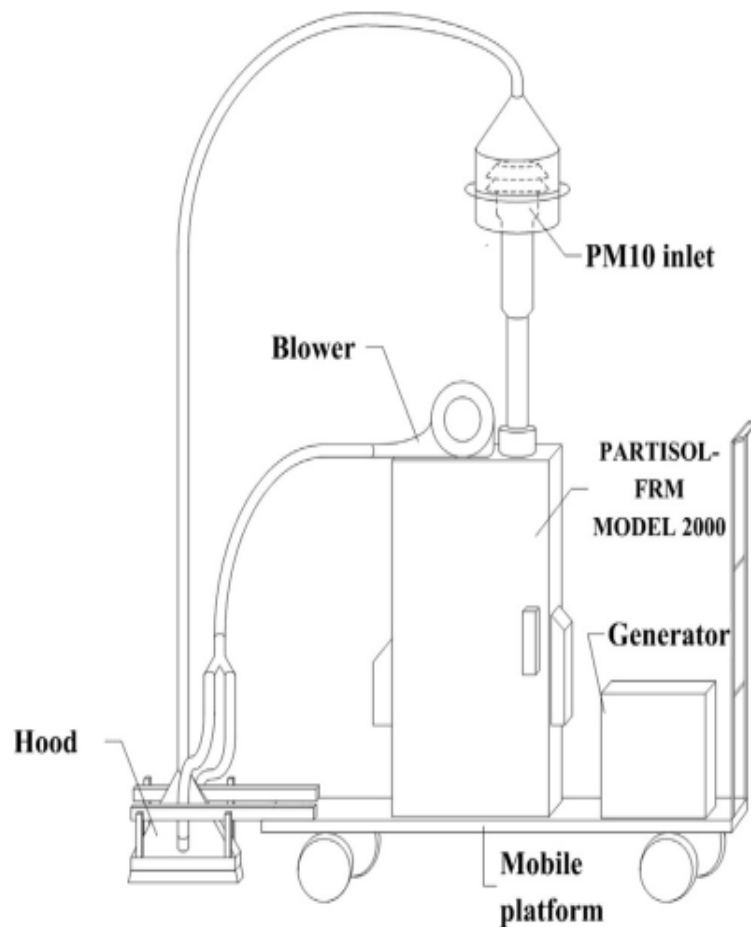
4.6. Muestreo y caracterización de materiales resuspendidos y polvo de carretera respirable

4.6.1. Metodología Unidad de resuspensión y muestreo

La metodología en este trabajo, fue desarrollar y construir un muestreador móvil de polvo de carretera resuspendido PM₁₀, el cual induce la resuspensión y recoge partículas en línea directamente de las superficies de las carreteras. Una campana rectangular de acero inoxidable se fijó en la parte delantera de un carro de laboratorio. Se conectó un soplador de hojas a la campana a través de dos boquillas a través de una manguera flexible dividida. Esta configuración fue diseñada para inducir turbulencias dentro del capo que pueden resuspender una parte del polvo de la carretera de las superficies sólidas. La **Figura 7** muestra más concretamente como es el modelo.

Figura 7.

Unidad móvil de muestro para material resuspendido PM10



Nota. Representación gráfica de la unidad móvil para muestrear el material particulado resuspendido PM10. Tomado de: Sampling and characterization of resuspended and respirable road dust. Journal of Aerosol Science, 65, pp.69-76. Jancsek-Turoczi et ál., 2013

4.6.2. Resultados.

Teniendo en cuenta que la recolección de PM10 resuspendida no es cuantitativa, se puede estimar una carga superficial de PM1' a partir de los datos medidos teniendo en cuenta el caudal del soplador y del muestreador PM10. Con estos datos y los de localización, GPS y fecha de muestreo, se llegó a la **Tabla 7**, donde se tabulan los resultados de esta metodología.

Tabla 7.

Resultados

Código	Localización	GPS	Fecha	Concentraciones absolutas de masa		PM ₁₀ (mg m ⁻³)	PM ₁ (mg m ⁻³)	Carga superficial de PM ₁₀ (mg m ⁻²)
				PM ₁₋₁₀ (mg)	PM ₁ (mg)			
1	Egyetem Str	47105'13"/1 7154'30"	22 Sept	36.35	5.12	18.2	2.56	4.54
2	Cholnoky Str	47105'25"/1 7155'27"	23 Sept.	39.19	5.36	19.6	2.68	4.88
3	Jutasi Str	47106'20"/1 7154'42"	24 Sept.	30.75	0.46	15.4	0.23	3.42

Nota. Resultado de las concentraciones obtenidas para PM₁₀ de acuerdo a la localización y GPS de cada muestra. Tomado de: Sampling and characterization of resuspended and respirable road dust. Journal of Aerosol Science, 65, pp.69-76. Jancsek-Turoczi et ál., 2013

4.7. Emisiones vehiculares de PM₁₀ de alta resolución sobre la mega ciudad de Delhi: Contribuciones relativas de fuentes de escape y no escape.

Estudios recientes proyectan un aumento en las emisiones no de escape en el futuro a pesar de una reducción en las emisiones de escape. Este estudio busca cuantificar las emisiones que no se dan debido al escape, esto debido a que hay muy poca información sobre estos. Este estudio se enfoca principalmente en los PM debidos al desgaste del neumático, el desgaste de la carretera y la resuspensión, en una mega ciudad de india, Delhi.

4.7.1. Metodología aplicada.

La resuspensión de material particulado, se calculó mediante la última ecuación que estableció la US EPA AP-42, esta ecuación depende del peso del vehículo, la carga de lima y el número de días lluviosos por año.

$$EF = k * (sL)^{0.91} * W^{1.02} \left(1 - \frac{P}{4 \times N}\right)$$

Donde:

- EF= factor de emisión (g/VKT)
- k=constante de tamaño de partícula (g/VKT)
- sL= carga de finos en la superficie del suelo (g/m²),
- W= peso promedio del vehículo que transita por la vía (ton),
- P= número de días húmedos con al menos 0.254mm de precipitación durante un periodo promedio.
- N= número de días en un periodo promedio (365 por año)

4.7.2. Resultados

En este estudio, los resultados se compararon con otros estudios realizados antes, que incluían alguna estimación de resuspensión o tenían información sobre emisiones de escapeo. La **Tabla 8**, no incluye información de estudios que solo tuviera datos de emisiones de escape solamente.

Tabla 8.

Emisiones de escape y de no escape (Gg/año) reportadas por diferentes estudios

Studies	Domain	Year	Brake Wear (Gg/year)	Tyre Wear (Gg/year)	Road Wear (Gg/year)	Total Wear (Gg/year)	Resuspension (Gg/year)	Non-Exhaust (Gg/year)	Exhaust (Gg/year)	Total (Gg/year)
Kumari et al. (2013)	Delhi	2006	0.37	0.41	0.42	1.2	16.8*	18.0*	6.0	24.0*
Gargava et al. (2014)	Delhi	2007	-	-	-	2.4 [#]	28.2	30.6 [#]	3.5	34.1 [#]
Singh et al. Present Study	Delhi	2010	0.93	0.6	0.52	2.1	25.0	27.0	4.5	31.5
Nagpure et al. (2016)	Delhi	2011	1.4	0.4	0.4*	2.2*	18.2	20.4*	5.0	25.4*
Sharma et al. (2016)	Delhi	2014	-	-	-	2.5 [#]	29.1	31.6 [#]	4.7	36.3 [#]
ARAI (2018)	Delhi	2017	-	-	-	2.8 [#]	24.0	26.8 [#]	12.8	39.6 [#]
Sahu et al. (2011)	NCR [~]	2010	-	-	-	12.2 [#]	131.3	143.4 [#]	30.3	173.7 [#]
Guttikunda and Calori (2013)	NCR [~]	2010	-	-	-	3.0 [#]	25.5	28.5 [#]	14.6	43.1 [#]
ARAI (2018)	NCR	2016	-	-	-	15.5 [#]	137.2	152.7 [#]	68.6	221.2 [#]
SAFAR (2018)	NCR [~]	2018	-	-	-	13.5 [#]	136.0	149.5 [#]	43.2	192.7 [#]

Nota. Emisiones reportadas en diferentes estudios y en diferentes años en la ciudad de Delhi Tomado de High resolution vehicular PM10 emissions over megacity Delhi: Relative contributions of exhaust and non-exhaust sources. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134273>

En la **Tabla 8** se pueden observar variaciones significativamente grandes. Suponiendo que las emisiones s no cambien drásticamente en unos pocos años, se pueden comparar las emisiones s en el mismo dominio. Se ha informado que la emisión total para Delhi varía de 24 a 39 Gg / año con un valor medio y mediano de 31.8 y 32.8 Gg / año, respectivamente. Se ha informado que la emisión de resuspensión varía entre 16,8 y 29,1 Gg/año con un valor medio de 23,5 y 24,5 Gg/año, respectivamente.

En la **Tabla 9** se observa un resumen de los principales estudios que se presentaron en este capítulo y su principal objetivo investigativo.

Tabla 9.

Resumen de las investigaciones y su principal objetivo

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	OBJETIVO INVESTIGACIÓN	AUTORES
Estimación de las emisiones de PM10 "no tubo de escape" de las calles para la modelización práctica de la contaminación atmosférica del tráfico	El objetivo de esta investigación es presentar para Alemania un método operativo para disminuir las emisiones de "no tubos de escape". Presentando una modificación del modelo AP-42 de la US EPA, teniendo en cuenta parámetros como: tipo de calle, ubicación de la calle, carga de tráfico, peso promedio del vehículo, número anual de días de lluvia y calidad de la superficie de la calle.	(During, I., Jacob, J., Lohmeyer, A., Lutz, M. and Reichenbacher, W., 2002).
Estimación de factores de emisión de PM10 y PM2.5, en las vías urbanas de Mexicali, Baja California, México.	El objetivo de esta investigación es estimar los factores de emisión (FE) que permitan valorar la cantidad de material particulado de las vías pavimentadas y no pavimentadas de la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Esto empleando el modelo AP-42 de la US EPA, bajo un diseño estadístico al azar.	(Meza, L. Quintero, M. García, R. Ramírez, J., 2009)
Muestreo y caracterización de materiales resuspendidos y polvo de carretera respirable.	El objetivo de esta investigación era desarrollar y construir un muestreador móvil de polvo de carretera resuspendido PM10 que simula los efectos del tráfico o los vientos en las superficies de las carreteras y recoge muestras PM1-10 resuspendidas en un separador de ciclones y muestras PM1 en filtros.	(Jancsek-Turoczi, Hoffer, Nyiro-Kosa, Gelencser, 2013)

Tabla 10. (Continuación)

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	OBJETIVO INVESTIGACIÓN	AUTORES
Emisiones vehiculares de PM10 de alta resolución sobre la mega ciudad de Delhi: Contribuciones relativas de fuentes de escape y no escape	El objetivo de este estudio es cuantificar las emisiones que no se dan debido al escape, esto debido a que hay muy poca información sobre estos. Este estudio se enfoca principalmente en los PM debidos al desgaste del neumático, el desgaste de la carretera y la re-suspensión, en una mega ciudad de india, Delhi.	(Singh, V. Biswal, A. Kesarkar, A.P. Suman Mor, Ravindra, K., 2020)
Re suspensión del polvo de carretera: una revisión	Este artículo tiene como objetivo presentar las diversas metodologías que se han desarrollado hasta ahora para recoger el polvo de la carretera, que van desde el barrido de cucharas más rudimental hasta dispositivos más sofisticados con entradas selectivas de tamaño para capturar la fracción más preocupante: el material particulado resuspendido inhalable.	(Casotti, I. Alves, C., 2021)

Nota. Resumen del principal objetivo de los artículos presentados en el capítulo 3.

5. GRADO DE AVANCE EN LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO EN COLOMBIA

Para establecer el grado de avance en la aplicación de las metodologías de estimación y cuantificación de material particulado resuspendido mencionadas en el capítulo 3, a continuación, se presentarán los resultados de estudios que se han realizado en diferentes ciudades de Colombia

5.1. Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá

Las emisiones de PM10 resuspendido en vías fueron estimadas a partir de factores de emisión y datos complementarios de actividades vehiculares, la ecuación más simplificada para calcular la emisión es

$$E = EF \times A$$

Dónde: E representa la emisión, EF el factor de emisión y A es la actividad realizada.

Para determinar el factor de emisión se puede usar lo expuesto en el AP-42 de la EPA, donde se muestra como obtener este factor a partir de diversas fuentes o actividades.

Para vías pavimentadas se utiliza la siguiente ecuación.

$$EF = k * (sL)^{0.91} * W^{1.02} \left(1 - \frac{P}{4 \times N}\right)$$

Donde:

- EF= factor de emisión para vías pavimentadas, posee las mismas unidades que k
- k=constante de tamaño de partícula (g/VKT)
- VKT: vehículo-kilómetro recorrido.,
- sL= carga de finos en la superficie del suelo (g/m²),
- W= peso promedio del vehículo que transita por la vía (ton),

- P= número de días húmedos con al menos 0.254mm de precipitación durante un periodo promedio.
- N= número de días en un periodo promedio (365 por año)

Para las vías sin pavimentar se tienen las siguientes dos ecuaciones.

1. Para vías sin pavimentar en zonas industriales:

$$EF = k * (s/12)^a * (W/3)^b * \left(\frac{365 - P}{365}\right)$$

2. Para vehículos que circulan por vías accesibles al público y de peso liviano:

$$EF = \left(\frac{k * (s/12)^a * (W/3)^d}{\left(\frac{M}{0.5}\right)^c} - c \right) * \left(\frac{365 - P}{365}\right)$$

Donde:

- EF: factor de emisión en las unidades de K
- k, a, b, c y d= constantes empíricas (a partir de AP-42, tabla 13.2.2-2)
- s= constante de finos en la superficie (4-6%, AP-42, tabla 13.2.2-3)
- W= peso promedio de vehículos que transitan por la vía (ton)
- S= velocidad promedio del vehículo (m/s)
- C= corrección del factor de emisión respecto al desgaste de llantas, frenos y superficie del suelo (AP42, tabla 13.2.2-4)

5.1.1. Resultados

Tabla 11.

Emissiones estimadas de PM2.5 y PM10 por suspensión de polvo y abrasión en Bogotá.

		PM _{2.5} (Ton/año)	PM ₁₀ (Ton/año)
Vías pavimentadas	Resuspensión	1160±750	4830±1,700
	Abrasión	320±50	570±150
Vías sin pavimentar	Resuspensión (industrial)	1,140±250	11,600±1,600
	Resuspensión (vía pública)	240±150	6,300±1,700
Total		2,860±1,200	23,300±5,000

Nota. Emisiones estimadas PM2.5 y PM10 en vías pavimentadas y sin pavimentar generadas por resuspensión de polvo y abrasión. Tomado de: Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Beltrán, Benalcázar y Rojas, 2012.

En la figura anterior se observa los valores calculados para cada PM por resuspensión de polvo y desgaste superficial en Bogotá. Se estima que las emisiones de PM2.5 y PM10 son de 2860 Ton/año y 23300 Ton/año, respectivamente. El PM2.5 resuspendido es aproximadamente 30% del PM10 emitido en vías pavimentadas, mientras que en vías sin pavimentar llega a ser el 8%. Aunque la longitud en vías sin pavimentar es significativamente menor que las vías pavimentadas, las emisiones generadas son mayores, debido a la presencia de material suelto. Debido al método utilizado, la incertidumbre de estos datos se encuentra cerca del 40% para PM2.5 y del 20% para PM10.

En este artículo compararon los resultados con dos estudios, mostrando resultados consistentes a comparación de un estudio, pero a la vez mostrando cifras significativamente en comparación al segundo estudio, llegando a la conclusión de que se obtiene una sobreestimación del material particulado resuspendido

5.2. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá

En Bogotá, estudios previos han demostrado que las emisiones de material resuspendido constituyen una parte sustancial del inventario de emisiones e impactan de manera importante la calidad del aire de la ciudad. Esta investigación estimó los factores de emisión (FE) de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de la vía principal del barrio Caracolí, en la localidad de Ciudad Bolívar.

5.2.1. Metodología empleada

Se compararon los valores de tendencia central de material particulado por fuentes (resuspensión, por combustión y no definida), obtenidos a partir de monitores automáticos de PM10, PM2.5 y BC a micro escala antes, durante y después de la pavimentación. Estas mediciones se obtuvieron a partir de un análisis estadístico-experimental de las concentraciones de contaminantes citados. Permitiendo determinar el valor cuantitativo del impacto de la pavimentación.

Los FE se estimaron mediante un análisis estadístico-experimental, que incluyó la eliminación de las concentraciones de fondo mediante el análisis de vientos abajo y vientos arriba de la fuente, junto con la corrida inversa de AEROMOD y SCREEN3. Las variables meteorológicas para la corrida de los modelos se obtuvieron a partir de mediciones de campo durante el monitoreo de contaminantes.

El monitor utilizado fue el DustTrak DRX 8533, para la medición fotométrica en tiempo real de concentraciones de PM cada 10 segundos, un aetalometro microAeth integrado Modelo AE51 para la medición de concentraciones cada 10 segundos de carbono negro. Así mismo, se instaló una estación meteorológica automática integrada Davis Vantage Pro 2, para la medición de las variables meteorológicas: velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación y radiación solar.

Para el procesamiento de la información, se obtuvieron varios criterios de selección para poder estimar los factores de emisión asociados a re suspensión de manera experimental, estos fueron:

- La relación de PM_{2.5}/PM₁₀ (<0.4) para asociar su origen a re suspensión de material particulado.
- La tendencia lineal entre PM_{2.5} y PM₁₀, con un valor de $R^2 \geq 0.9$, dentro de un conjunto al azar mínimo de cinco parejas de datos consecutivos, con lo que se podía inferir que se registra una misma fuente y comportamiento para PM_{2.5} y PM₁₀.
- La tendencia lineal entre PM_{2.5} y BC, con un valor de $R^2 \leq 0.6$, con el propósito de excluir concentraciones de PM provenientes directamente de fuentes de combustión ($R^2 > 0.6$).
- Cada dato aceptado fue asociado a vientos abajo o a vientos arriba del punto de monitoreo. Se promedian los valores de concentración asociados a V_{ab} y V_{ar} para obtener un valor delta de concentración ($\Delta C = V_{Ab} - V_{Ar}$)

Posteriormente se empearon dos modelos gaussianos de dispersión para determinar los factores de emisión, uno simple (SCREEN3) y otro refinado (AERMOD View)

5.2.2. Resultados.

Al comparar las concentraciones promedio de PM del antes vs después de la pavimentación se aprecian reducciones en fuente geológica, por combustión y no definida. Las máximas horas de concentraciones para ambas etapas se presentaban a las 12pm +o- 2 horas.

Tabla 12.

Resultados de análisis comparativos entre el antes y después de la pavimentación.

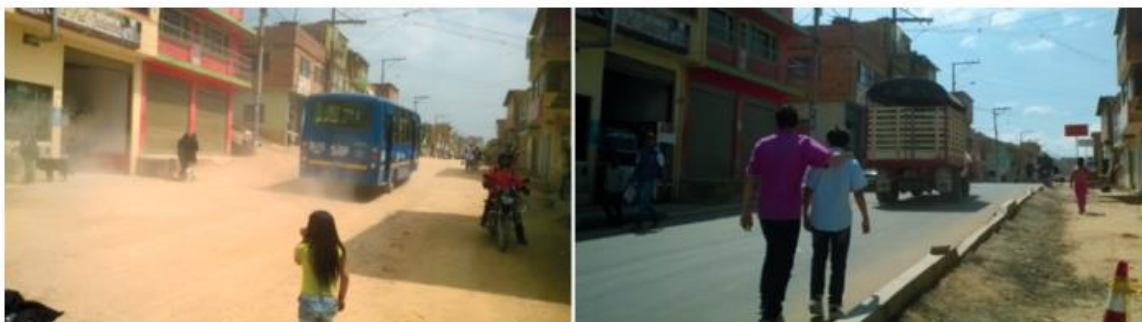
Clasificación asociada	Estadístico	Antes de pavimentar			Después de pavimentar			Cambio en PM _{2,5} (%)	Cambio en PM ₁₀ (%)
		PM _{2,5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	% de Datos	PM _{2,5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	% de Datos		
Fuente Geológica	\bar{X}	381	1025	14,1	17	48	0,1	95,7	95,4
	σ	313	860		13	37			
	Rango	134 - 1000	364 - 2732		1 - 32	5 - 92			
Fuente por combustión	\bar{X}	87	117	51,5	54	70	93	-37,4	-40,3
	σ	29	41		23	25			
	Rango	57 - 126	72 - 170		32 - 90	44 - 104			
Fuente no definida	\bar{X}	160	339	34,4	86	161	6,9	46,3	52,5
	σ	75	157		82	162			
	Rango	87 - 288	176 - 594		29 - 219	52 - 431			

Nota. Análisis comparativo antes y después de pavimentar de acuerdo a la fuente de generación. Tomado de: Universidad Militar Nueva Granada. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>

El material particulado asociado a fuente geológica, obtuvo el mayor porcentaje de reducción en concentración. Esto es un impacto positivo que deriva en menos efectos adversos al comercio, progreso en la calidad visual, aumento en la visibilidad y en el mejoramiento de la calidad del aire como se observa en la **Figura 8**.

Figura 8.

Antes vs después de la pavimentación



Nota. Representación visual de la misma vía antes y después de ser pavimentada. Se visualiza disminución en el material particulado resuspendido. Tomado de: Universidad Militar Nueva Granada. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>

También se vieron los resultados durante los días más representativos del proceso de pavimentación en donde se iba evidenciando que las concentraciones por re suspensión durante la pavimentación disminuían.

Tabla 13.

Resultados de análisis durante los días más representativos del proceso de pavimentación

Clasificación	13/01/2015			14/01/2015			15/01/2015			16/01/2015		
	Excavación frente al punto de monitoreo			Aplicación de fresado estabilizado frente al punto de monitoreo			Excavación y aplicación de fresado (carril más cercano)			Excavación y aplicación de fresado (carril más cercano)		
	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n
Fuente Geológica*	233	627	575	147	394	898	107	285	77	164	437	345
Fuente por combustión*	234	360	68	174	240	146	84	120	1473	102	149	526
Fuente no definida*	192	424	1681	122	270	1354	88	178	974	124	268	1585
	TOTAL			TOTAL			TOTAL			TOTAL		
	2324			2398			2524			2456		
Clasificación	17/01/2015			21/01/2015			22/04/2015			23/04/2015		
	Excavación y aplicación de fresado (carril más cercano)			Excavación cercana al punto de monitoreo (carril más lejano)			Aplicación de emulsión			Aplicación de mezcla asfáltica densa en caliente		
	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	n
Fuente Geológica*	-	-	0	38	105	806	-	-	0	-	-	0
Fuente por combustión*	105	124	2462	72	89	544	26	35	2127	71	85	2586
Fuente no definida*	179	343	65	37	83	1158	63	111	40	76	129	45
	TOTAL			TOTAL			TOTAL			TOTAL		
	2527			2508			2167			2631		

Nota. Análisis de las emisiones generadas durante el proceso de pavimentación de acuerdo a la fuente generadora. Tomado de: Universidad Militar Nueva Granada. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>

También se muestra un resumen de los datos resultantes de FE calculados para PM10 y PM2.5 en las etapas del antes, durante y después de la pavimentación. En la determinación de estos FE los eventos de contaminación estuvieron asociados a un número de datos superiores a 10000.

Tabla 14.

Concentraciones de material particulado y factores de emisión FE obtenidos para las 3 etapas de modelos de dispersión.

ETAPA	VARIABLES	PM ₁₀	PM _{2,5}	ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA**
(1) ANTES (n = 13132)	Datos asociados a resuspensión de PM (%)'	30,7	30,7	(B) Atmósfera moderadamente inestable Rad. Solar = 35,6 cal/cm ² *h
	Promedio VAb (µg/m ³)	381,5	195,70	
	Promedio VAr (µg/m ³)	302,0	190,2	
	Delta (µg/m ³)	79,5	5,5	
	FE AERMOD (µg/m ³ *s)	60 + 0,50	4,3 + 0,20	
	FE SCREEN3 (µg/m ³ *s)	25 + 0,50	1,7 + 0,20	
(2) DURANTE (n = 12480)	Datos asociados a resuspensión de PM (%)'	4,7	4,7	(A – B) atmósfera extremadamente inestable a moderadamente inestable Rad. Solar = 41,3 cal/cm ² *h
	Promedio VAb (µg/m ³)	257,0	124,51	
	Promedio VAr (µg/m ³)	214,5	107,7	
	Delta (µg/m ³)	42,5	16,8	
	FE AERMOD (µg/m ³ *s)	28 + 0,27	11+0,13	
	FE SCREEN3 (µg/m ³ *s)	13,0+0,27	3,6 + 0,13	
(3) DESPUÉS (n = 15071)	Datos asociados a resuspensión de PM (%)'	0,1	0,1	(A) atmósfera extremadamente inestable Rad. Solar = 53,1 cal/cm ² *h
	Promedio VAb (µg/m ³)	79,4	62,11	
	Promedio VAr (µg/m ³)	75,0	55,2	
	Delta (µg/m ³)	4,4	6,9	
	FE AERMOD (µg/m ³ *s)	0,2 + 0,10	3,0 + 0,08	
	FE SCREEN3 (µg/m ³ *s)	0,8 + 0,10	1,2 + 0,08	

Nota. Concentraciones de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de la vía. Tomado de: Universidad Militar Nueva Granada. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>

5.3. Desarrollo y Evaluación de un Inventario Integral de Emisiones Atmosféricas para el Modelaje de la Calidad del Aire en la Megaciudad de Bogotá.

En esta investigación se desarrolló un inventario de emisiones para la ciudad de Bogotá, para 2012, que por primera vez aumenta las fuentes industriales y móviles

tradicionales al tener en cuenta, fuentes comerciales, fuentes biogénicas, y polvo resuspendido. Caracterizando las metodologías para estimar cada fuente anualmente.

5.3.1. Metodología empleada.

El material resuspendido, se estimó a partir de tres fuentes: carreteras (pavimentadas y sin pavimentar), construcción de edificios y carreteras, y extracción de materiales (arenas, arcillas). Este artículo solo describió estimaciones de partículas resuspendidas, solo de carreteras, dada la importancia de la emisión de esta fuente. Se utilizaron bases de datos de la AP-42 (Capítulo 13.2). Para llevar a cabo esta metodología en este estudio, se tuvieron que realizar extensas campañas de campo, para poder cuantificar las cargas de limo y calcular así los EF para carreteras pavimentadas y no pavimentadas.

Para vías pavimentadas se utiliza la siguiente ecuación.

$$EF = q * (sL)^{0.67} * W^{0.85}$$

Donde:

- EF= factor de emisión para vías pavimentadas (g/VKT)
- q= es un multiplicador específico del tamaño de partícula.
- VKT: vehículo-kilómetro recorrido.,
- sL= carga de finos en la superficie del suelo (g/m²),
- W= peso promedio del vehículo que transita por la vía (ton),
- P= número de días húmedos con al menos 0.254mm de precipitación durante un periodo promedio.

Para las vías sin pavimentar se tienen las siguientes dos ecuaciones.

Para vías sin pavimentar en zonas industriales:

$$EF = g * (s/12)^a * (W/3)^b$$

Para vehículos que circulan por vías accesibles al público y de peso liviano:

$$EF = \left(\frac{g * (s/12)^a * (v/30)^d}{\left(\frac{M}{0.5}\right)^c} - c \right)$$

Donde:

- EF: factor de emisión (g/VKT)
- k, a, b, c y d= constantes empíricas
- s= constante de finos en la superficie (%)
- W= peso promedio de vehículos que transitan por la vía (ton)
- v= velocidad promedio del vehículo (m/s)

C= corrección del factor de emisión respecto al desgaste de llantas, frenos y superficie del suelo (AP42, tabla 13.2.2-4)

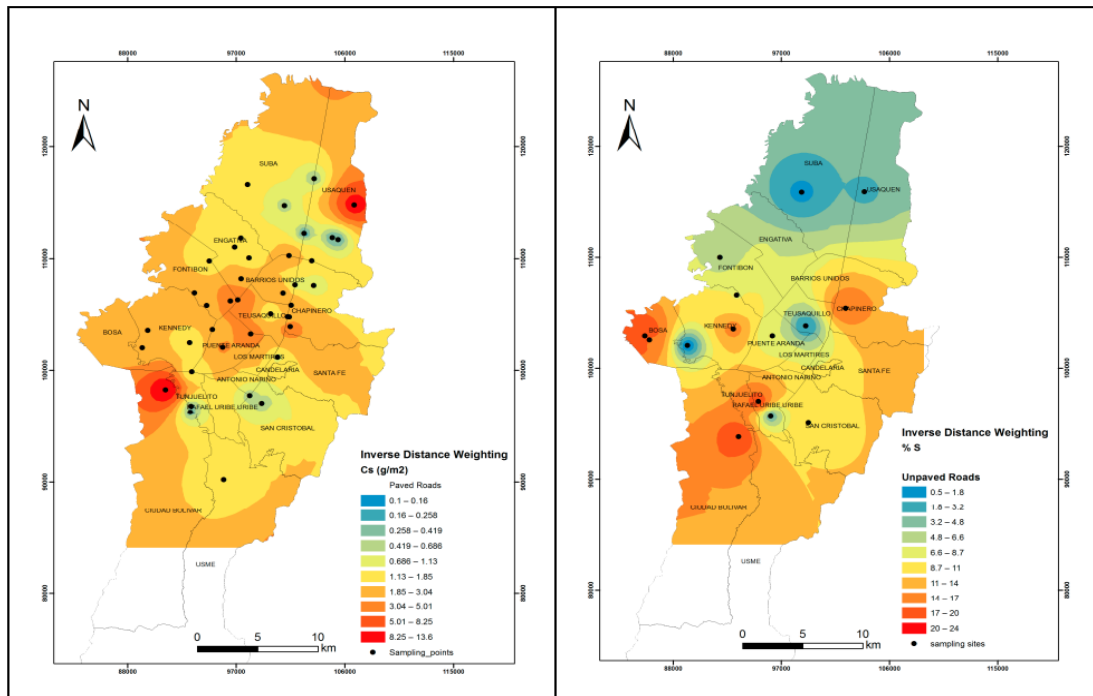
El trabajo en campo fue realizado en 30 puntos diferentes para carreteras pavimentadas y 15 puntos diferentes para carreteras sin pavimentar. Durante el muestro, se midió el tráfico también. A Las muestras se les saco el contenido de humedad y se les realizo un análisis granulométrico. Se sacó contenido de limo y carga de limo.

5.3.2. Resultados.

Las cargas de polvo estimadas a través del trabajo de campo según los métodos AP-42 en carreteras pavimentadas, fueron muy heterogéneas, con un rango de 0.1 a 10.6 g/m². Los valores más altos se dan en las afueras de Bogotá debido a las condiciones de las carreteras (sitios sin pavimentar o de canteras). Los contenidos de limo también fueron diversos, presentándose en un rango de 3 a 30%. Como se observa en la **Figura 9**.

Figura 9.

Interpolación de cargas de polvo en carreteras asfaltadas (Izquierda) y contenidos de limo en carreteras sin pavimentar (Derecha).



Nota. Representación gráfica de las concentraciones de material particulado resuspendido en carreteras asfaltadas y sin pavimentar. Tomado de: Universidad Militar Nueva Granada. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>

La contribución de las carreteras sin pavimentar a las RPM es mucho mayor que las de las carreteras pavimentadas. Siendo este valor cinco veces más en PM10 y el doble en PM2.5 como se observa en la **Tabla 14**. Esto demostrando que el efecto de pavimentar una carretera puede disminuir de manera drástica los RPM en la ciudad.

Tabla 15.

Emisiones de partículas resuspendidas (RPM) de carreteras pavimentadas y no pavimentadas

Emisión (ton/año)	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀ (ton/año/km)	PM _{2.5} (ton/año/km)
Vías pavimentadas	32,847	10,786	4.5	1.5

Tabla 16. (Continuación)

Emisión (ton/año)	PM₁₀	PM_{2.5}	PM₁₀ (ton/año/km)	PM_{2.5} (ton/año/km)
Vías sin pavimentar	32,680	3,268	25.1	2.5
Total	65,527	14,054		

Nota. Resumen de las emisiones de partículas resuspendidas PM₁₀ y pM_{2.5} en carreteras pavimentadas y sin pavimentar. Tomado de: Universidad Militar Nueva Granada. Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>

- Análisis del artículo.

El material particulado resuspendido, es una fuente de contaminación que se puede disminuir de manera drástica, nada más pavimentando una carretera, esto se evidencia cuando se analizan los resultados que se obtienen, viendo como la contaminación de material resuspendido es muy baja en carreteras pavimentadas en comparación a las vías sin pavimentar.

El método empleado en este estudio, es muy parecido a estudios que se mencionan anteriormente, teniendo una pequeña variación y es que, en esta metodología no tienen en cuenta los años lluvia, que es una variable que puede afectar el material particulado resuspendido.

5.4. Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo (2019)

En este proyecto se buscó estimar los factores de emisión de material resuspendido en la vía mediante un método de monitoreo pasivo en algunas vías de la ciudad de Bogotá.

5.4.1. Metodología implementada durante la investigación

Para el cálculo de los factores de emisión, fue necesario utilizar los cálculos obtenidos mediante el muestreo, el análisis de la muestra y el análisis granulométrico.

Esto con el fin de poder utilizar las siguientes ecuaciones. La primera para calcular el flujo de deposición y la segunda para el cálculo del factor de emisión.

$$j \left(\frac{mg}{m^2 * h} \right) = \frac{m^\infty}{A * t}$$

$$EF \left(\frac{mg}{VKT} \right) = \frac{j * \text{amplitud del carril} * 1000 * \# \text{horas dia}}{\# \text{vehiculos dia}}$$

- m^∞ = Valor calculado en la matriz de resultados para cada uno de los muestreos
- A = valor del área del colector en m²
- t = número de horas de sol a las que estuvo expuesto el muestreador

5.4.2. Resultados

Los resultados que se obtuvieron para la carga recolectada fueron:

Tabla 17.

Masa total de carga recolectada

Muestreador	Peso final Calle 80 (g)	Peso final Calle 100 (g)	Peso final Auto norte (g)	Peso final Auto sur (g)
1	0.11144	0.23157	0.01995	0.14318
2	0.07257	0.15779	0.01529	0.08184
3	0.04522	0.15131	-	0.06617
4	0.03329	0.08907	0.01455	0.04423
5	0.02678	0.06094	0.01247	0.0523
6	0.01704	0.05798	0.01176	0.04472
7	0.01496	0.05307	0.00936	0.03121
8	-	0.03602	0.00511	0.0422
9	0.0129	0.02968	0.00443	0.01972
10	0.00489	0.02919	0.00202	-
11	0.02094	0.02968	0.00086	0.02233
12	0.01961	0.01779	0.00033	0.01953
13	0.00271	0.015	-	0.01881
14	0.00342	0.00873	0.00028	0.01815
15	0.00164	0.00663	0.00015	0.01713

Nota. *Tabla de resumen de la carga recolectada en cada una de las muestras realizadas en cada una de las zonas indicadas.* Tomado de: Universidad de La Salle. Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1138

También se obtuvo un flujo vehicular por tipo de vehículo.

Tabla 18.

Flujo vehicular por tipo de vehículo

Zona	Tipo de vehículo	Día	% de flujo vehicular	Total vehículos día
Calle 80	Taxi y particular	41855	81	51673
	Buses y vehículos grades	4134	8	
	Motos	5684	11	
Calle 100	Taxi y particular	41051	70	58645
	Buses y vehículos grades	14075	24	
	Motos	3519	6	
Autopista sur	Taxi y particular	46099	75	61465
	Buses y vehículos grades	9834	16	
	Motos	5532	9	
Autopista norte	Taxi y particular	50779	72	70526
	Buses y vehículos grades	14105	20	
	Motos	5642	8	

Nota. Relación del flujo vehicular de acuerdo al tipo y la zona evaluada. Tomado de: Universidad de La Salle. Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1138

Con los resultados obtenidos previamente, se procedió a calcular el de deposición y los factores de emisión correspondientes para cada zona.

Tabla 19.

Factor de emisión de las áreas de estudio

	Calle 80	Calle 100	Autopista norte	Autopista sur
J (mg/m²h) =	0.7	2.1	1	1.5
EF₁₀ (mg/(VKT) =	3.1	7.7	3.1	5.1

Nota. Factores de emisión calculados en cada una de las áreas de estudio. Tomado de: Universidad de La Salle. Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1138

Los datos obtenidos en este estudio indican que para cada una de las zonas los factores de emisión varían entre 3.1 mg/VKT a 7.7 mg/VKT. Y al ser comparados con otros estudios similares de otras zonas del mundo, indican que son factores de emisión bajos, siendo los más bajos los encontrados para París que fueron de 5.4 mg/VKT.

Tabla 20.

Comparación factores de emisión

Ciudad		EF ₁₀ (mg/VKT)	Referencia
París	Auteuil	5.8	(Amato F.F., 2016)
	Bvd. Massena	5.4	
	Av. Italie	9	
	Auteuil II	17	
Zúrich	Weststrasse LVD	24	
	Weststrasse HDVa	71	
Barcelona	Primera campaña 4 ^a	12	(Amato F.F., 2016b)
	Primera campaña 7 ^a	14.9	
	Segunda campaña 4B	22.7	
	Segunda campaña 7B	16.7	
	Segunda campaña 5B	47.1	
Bogotá	Calle 80 Trans. 80 ^a	3.1	Campaña actual
	Calle 100 con AK 49	7.7	
	Autopista norte	3.1	
	Autopista sur Ak. 64	5.1	

Nota. Comparación de diferentes estudios respecto al estudio actual con datos obtenidos en algunas ciudades de Europa. Tomado de: Universidad de La Salle. Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1138

Este método empleado fue eficiente para el cálculo requerido, sin embargo, es un método que depende de muchos factores externos principalmente del periodo climático en el que se realiza las pruebas, pues si llegan a ser periodos húmedos, los lapsos de recolección de masa serán largos y estarán expuestos a lluvias que afectarán su comportamiento.

- **Análisis del artículo**

Esta metodología se diferencia de las demás ya que no emplea de manera directa la carga de sedimentos, además de que no es una ecuación la cual se haya deducido para otro país o ciudad como lo hacen en otros estudios, si no que todos sus parámetros y variables, son obtenidos a través de cierta metodología o muestreos para poder sacarlos, un ejemplo de esto es (j) cuyo valor se obtiene a partir de los datos obtenidos a partir del muestreo.

Los valores obtenidos indican que la contaminación por re suspensión de partículas en la ciudad de Bogotá es baja a comparación de ciudades como Barcelona o Zúrich, donde llegan a tener valores de 47,1 y 71 mg/VKT respectivamente.

Este método también se diferencia ya que la forma pasiva en la que se realiza el muestreo es totalmente diferente a las metodologías que se aplican en otros estudios, pues normalmente se realizan con instrumentos especializados que se montan en un aparato móvil en el cual se realiza el muestreo. Esta metodología pasiva, lo que hace es colocar la zona de muestreo en un poste e instalan esta mediante ciertos parámetros, en los cuales siempre van a constar de tres muestreadores los cuales cada uno posee cinco unidades de recolección. Esto permitiendo realizar un análisis de la muestra y un análisis granulométrico.

5.5. Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de re suspensión en vías de Bogotá.

Investigación realizada en el año 2017 con el fin de determinar los factores de emisión del material susceptible de re suspensión a partir de la identificación de la carga de sedimentos en vías de Bogotá y establecer y analizar la distribución espacial del material particulado susceptible de ser resuspendido en vías de la ciudad de Bogotá. Esto mediante la implementación de un modelo de calidad del aire, en donde encontraron que el mayor aporte de material particulado proviene de la re-suspensión en vías pavimentadas y no pavimentadas de la ciudad (alrededor de 90%), esto producto de las corrientes de viento y la turbulencia que generan los vehículos, aunque estos resultados

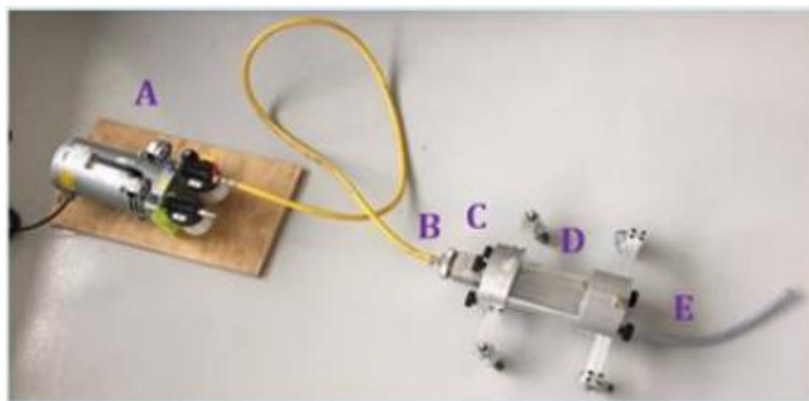
pueden estar sobreestimados debido a que se realizó mediante la metodología de la EPA, la cual tiene cierta incertidumbre.

5.5.1. Metodología implementada durante la investigación (Amato)

En este estudio se empleó la metodología desarrollada por el investigador Fulvio Amato, la cual consiste en un instrumento tipo aspiradora que tiene un impactado y una cámara de sedimentación donde se separa partículas menores a $10\mu\text{m}$ y su captura es en un filtro ubicado en la salida del equipo. Este instrumento y metodología esta validada a nivel internacional y presenta una menor incertidumbre a la desarrollada por la EPA.

Figura 10.

Equipo de Medición- Cámara de sedimentación



Nota. Representación del esquema que compone el equipo de medición – cámara de sedimentación del material particulado. Tomado de: Universidad de la Salle. Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de re suspensión en vías de Bogotá. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/707

En la figura anterior se observa el equipo de medición utilizado, donde A es la bomba de succión, B porta filtros, C placas de impactación, D la cámara de sedimentación y E la entrada de material particulado.

Para la actualización de inventario de emisiones, se empleó una metodología de barrido de la EPA, en 40 puntos de la ciudad, de los cuales finalmente se seleccionaron 21 puntos de estudio.

En este estudio para calcular el factor de emisión se utilizó la siguiente ecuación

$$EF = 45.9 \times Cs^{0.81}$$

Donde:

- EF= factor de emisión (ug/veh-km)
- Cs= carga de sedimento (ug/m2).

Esta fórmula se utilizó debido a que es el resultado experimental obtenido a partir de 3 estudios realizados en ciudades diferentes, dos en España y uno en Suiza. Los valores de 45.9 y 0.81 fueron calculados para estas ciudades, siendo así Cs la única variable que se presenta y que se determina de acuerdo a los trabajos realizados en campo para este proyecto de investigación.

Esta carga de sedimento se determina mediante un muestro, en donde se tiene en cuenta el peso inicial, peso final y el área muestreada.

$$Cs = \frac{\text{Peso final} - \text{peso inicial}}{\text{Area muestreada}}$$

5.5.2. Resultados.

Tabla 21.

Resultados de Carga de sedimento

Punto	Dirección	Masa (g)	Área (m ²)	Cs(g/m ²)	Cs (g/m ²) promedio	Cs (mg/m ²) promedio	Cs (ug/m ²) promedio																																																																																																																																																																																																								
1	AC 145 x KR 104	0.00260	1	0.00260	0.00352	3.515	3515																																																																																																																																																																																																								
		0.00443	1	0.00443				2	AK 72 x AC 138	0.00170	1	0.00170	0.00122	1.220	1220	0.00074	1	0.00074	3	AK 45 x CL 127	0.00313	1	0.00313	0.00201	2.010	2010	0.00089	1	0.00089	4	AK 80 x AC 555	0.00818	1	0.00818	0.01286	12.860	12860	0.01754	1	0.01754	5	DG 78BIS S X AK 1	0.00109	1	0.00109	0.00124	1.240	1240	0.00139	1	0.00139	6	AC 60A S X KR 19C	0.00516	1	0.00516	0.00441	4.410	4410	0.00366	1	0.00366	7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240	8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195	0.00684	1	0.00684	9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884
2	AK 72 x AC 138	0.00170	1	0.00170	0.00122	1.220	1220																																																																																																																																																																																																								
		0.00074	1	0.00074				3	AK 45 x CL 127	0.00313	1	0.00313	0.00201	2.010	2010	0.00089	1	0.00089	4	AK 80 x AC 555	0.00818	1	0.00818	0.01286	12.860	12860	0.01754	1	0.01754	5	DG 78BIS S X AK 1	0.00109	1	0.00109	0.00124	1.240	1240	0.00139	1	0.00139	6	AC 60A S X KR 19C	0.00516	1	0.00516	0.00441	4.410	4410	0.00366	1	0.00366	7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240	8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195	0.00684	1	0.00684	9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835						
3	AK 45 x CL 127	0.00313	1	0.00313	0.00201	2.010	2010																																																																																																																																																																																																								
		0.00089	1	0.00089				4	AK 80 x AC 555	0.00818	1	0.00818	0.01286	12.860	12860	0.01754	1	0.01754	5	DG 78BIS S X AK 1	0.00109	1	0.00109	0.00124	1.240	1240	0.00139	1	0.00139	6	AC 60A S X KR 19C	0.00516	1	0.00516	0.00441	4.410	4410	0.00366	1	0.00366	7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240	8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195	0.00684	1	0.00684	9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																	
4	AK 80 x AC 555	0.00818	1	0.00818	0.01286	12.860	12860																																																																																																																																																																																																								
		0.01754	1	0.01754				5	DG 78BIS S X AK 1	0.00109	1	0.00109	0.00124	1.240	1240	0.00139	1	0.00139	6	AC 60A S X KR 19C	0.00516	1	0.00516	0.00441	4.410	4410	0.00366	1	0.00366	7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240	8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195	0.00684	1	0.00684	9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																												
5	DG 78BIS S X AK 1	0.00109	1	0.00109	0.00124	1.240	1240																																																																																																																																																																																																								
		0.00139	1	0.00139				6	AC 60A S X KR 19C	0.00516	1	0.00516	0.00441	4.410	4410	0.00366	1	0.00366	7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240	8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195	0.00684	1	0.00684	9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																							
6	AC 60A S X KR 19C	0.00516	1	0.00516	0.00441	4.410	4410																																																																																																																																																																																																								
		0.00366	1	0.00366				7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240	8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195	0.00684	1	0.00684	9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																		
7	AC 68S x AK 51	0.00524	1	0.00524	0.00524	5.240	5240																																																																																																																																																																																																								
8	KR 95A x CL 54 S	0.00755	1	0.00755	0.00720	7.195	7195																																																																																																																																																																																																								
		0.00684	1	0.00684				9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525	0.00169	1	0.00169	10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																					
9	AK 50 x AC 3	0.00136	1	0.00136	0.00153	1.525	1525																																																																																																																																																																																																								
		0.00169	1	0.00169				10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650	0.00074	0.5	0.00148	11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																
10	AK 72 X AC 26S	0.00191	0.5	0.00382	0.00265	2.650	2650																																																																																																																																																																																																								
		0.00074	0.5	0.00148				11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105	0.00535	1	0.00535	12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																											
11	KR 10 x CL 17S	0.00286	1	0.00286	0.00411	4.105	4105																																																																																																																																																																																																								
		0.00535	1	0.00535				12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025	0.02157	1	0.02157	13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																						
12	AC 26 x TV93	0.02248	1	0.02248	0.02203	22.025	22025																																																																																																																																																																																																								
		0.02157	1	0.02157				13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720	14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085	0.00724	1	0.00724	15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																	
13	AK 86 x AC 17	0.00472	1	0.00472	0.00472	4.720	4720																																																																																																																																																																																																								
14	AK 7 x AC 45	0.00693	1	0.00693	0.00709	7.085	7085																																																																																																																																																																																																								
		0.00724	1	0.00724				15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880	16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975	0.00098	1	0.00098	17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																																				
15	AK 7 x AC 85	0.00588	1	0.00588	0.00588	5.880	5880																																																																																																																																																																																																								
16	AK 7 x AC 127	0.00097	1	0.00097	0.00098	0.975	975																																																																																																																																																																																																								
		0.00098	1	0.00098				17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085	0.00303	1	0.00303	18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																																																							
17	AC 24 x KR 68B	0.00514	1	0.00514	0.00409	4.085	4085																																																																																																																																																																																																								
		0.00303	1	0.00303				18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260	0.00954	1	0.00954	19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																																																																		
18	AC 100 x TV 60	0.00298	1	0.00298	0.00626	6.260	6260																																																																																																																																																																																																								
		0.00954	1	0.00954				19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765	0.00567	1	0.00567	20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																																																																													
19	AK 45 x AC 170	0.00586	1	0.00586	0.00577	5.765	5765																																																																																																																																																																																																								
		0.00567	1	0.00567				20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570	21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																																																																																								
20	AK 86 x AC 80	0.00757	1	0.00757	0.00757	7.570	7570																																																																																																																																																																																																								
21	AC 17 x AK 96G-20	0.01884	1	0.01884	0.01884	18.835	18835																																																																																																																																																																																																								

Nota. Resultados obtenidos en la carga de sedimento en cada uno de los puntos estipulados. Tomado de: Universidad de la Salle. Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de re suspensión en vías de Bogotá. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/707

Una vez obtenidos estos resultados de carga de sedimento, se procedió a calcular los factores de emisión cuyos resultados se muestran en la siguiente figura, y también el valor de la carga de sedimento utilizado para su respectivo cálculo.

Tabla 22.

Resultados de Factor de emisión por punto

Punto	Dirección	Cs(ug/m ²)	EF(ug/veh -km)	EF(mg/veh -km)
1	AC 145 x KR 104	3515	34198.91	34.20
2	AK 72 x AC 138	1220	14513.23	14.51
3	AK 45 x AC 127	2010	21747.11	21.75
4	AK 80 x AC 55S	12860	97790.77	97.79
5	DG 78BIS S X AK 1	1240	14705.65	14.71
6	AC 60A S X KR 19C	4410	41096.79	41.10
7	AC 68S x AK 51	5240	47257.53	47.26
8	KR 95 x CL 54 S	7195	61095.28	61.10
9	AK 50 x AC 3	1525	17388.47	17.39
10	AK 72 X AC 26S	2650	27204.57	27.20
11	KR 10 x CL 17S	4105	38778.98	38.78
12	AC 26 x TV 93	22025	151207.93	151.21
13	AK_86_x_AC_17	4720	43421.59	43.42
14	AK 7 x AC 45	7085	60337.59	60.34
15	AK 7 x AC 85	5880	51881.00	51.88
16	AK 7 x AC 127	975	12103.37	12.10
17	AC_24_X_KR_68B	4085	38625.87	38.63
18	AC 100 x TV 60	6260	54580.55	54.58
19	AK_45_x_AC_170	5765	51057.57	51.06
20	AK 86 x AC 80	7570	63662.01	63.66
21	AC 17 x AK 96G-20	18840	133238.03	133.24

Nota. Factores de emisión calculados en cada uno de los puntos estipulados de acuerdo a la carga obtenida. Tomado de: Universidad de la Salle. Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de re suspensión en vías de Bogotá. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/707

De estos resultados se observó que la zona con mayor factor de emisión fue la 12 con 151.21 mg/veh-km y la de menor fue el punto 16 con 12.1 mg/veh-km. Todo esto para obtener un valor promedio de 51.2 mg/veh-km para el factor de emisión en la ciudad de Bogotá.

Este factor de emisión promedio se compara con valores obtenido en otros países europeos, en donde se concluyó que se obtiene un valor más bajo en comparación a

estos otros países, pero al utilizar valores que se implementaron para unas ciudades diferentes a Bogotá, se genera cierta incertidumbre, por lo cual se recomienda replantear estos valores de la ecuación a las condiciones de la ciudad.

- Análisis del artículo

La metodología empleada en este estudio a pesar de tener menor incertidumbre que la EPA, posee su porcentaje de desviación a los valores reales que se deberían medir, esto debido a que las constantes que se usan en la ecuación para el cálculo del factor de emisión, son valores que se dedujeron para ciudades europeas, las cuales se encuentran con factores climatológicos y urbanos totalmente diferentes.

Otro punto que afecta esta metodología, es que la humedad puede afectar el muestreo para obtener la carga de sedimento, esto debido a que los eventos de precipitación se ven afectados por esto. Por lo cual es mejor realizarlos en una época seca. Además de también verse afectada por el material resuspendido que generan las construcciones que se encuentran cerca de las zonas de muestreo.

5.6. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – año base 2017)

En un estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia, Determinan a las fuentes móviles en rutas son una de las fuentes de emisión más contaminantes de acuerdo a diferentes estudios reportados en literatura. Además, revisando los inventarios de emisiones atmosféricas para la ciudad de Manizales en los años 2014 y 2017, y utilizando el modelo IVE determinaron que este tipo de fuente aporta más del 80% al total de emisiones de monóxido de carbono, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno y gases de efecto invernadero.

Cabe resaltar que las emisiones por fuentes móviles en ruta comprenden tres tipos de emisiones: asociadas al tubo de escape, emisiones evaporativas y emisiones de material particulado resuspendido. En este trabajo se estimaron las emisiones

relacionadas al tubo de escape y evaporativas aplicando el modelo COPERT versión 5.4 para la ciudad de Manizales.

5.6.1. Modelo COPERT

COPERT es un modelo para el cálculo de emisiones del sector de transporte por carreteras tanto a nivel local como nacional, desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). Este modelo estima emisiones en caliente, frío, evaporativas y no exhosto; de contaminantes criterio, GEI, COV, COVNM y metales. Es aplicable para inventarios de emisiones atmosféricas a nivel local y nacional, para este último caso considera diferentes tipos de carretera como: urbana, rural e intermunicipales.

La metodología puede estimar las emisiones de tres formas diferentes, según la información que se disponga, esto dependiendo de la información de entrada. Las tres formas son las siguientes: 1. Estimación de emisiones a partir de las ventas de combustible anuales, 2. Estima emisiones a partir de kilometraje promedio anual por tecnología vehicular y 3. Estima emisiones a partir de información de una combinación de datos del parque automotor como: categoría y tecnología vehicular, kilometraje anual y acumulativo promedio por categoría y tecnología vehicular y velocidad promedio por categoría y tecnología vehicular, entre otras. Este último es la forma más detallada tanto en datos de entrada como en cálculos internos que realiza el software para la estimación de emisiones.

Para la estimación de los datos se utiliza una combinación de emisiones del parque automotor, actividad vehicular, condiciones climatológicas y calidad de los combustibles para el cálculo de los FE y emisiones. El cálculo de las emisiones totales se basa en la siguiente ecuación.

$$E_{total} = E_{caliente} + E_{frío} + E_{evaporativas} + E_{no\ exhosto}$$

Donde $E_{caliente}$, son emisiones provenientes del tubo de escape. $E_{frío}$, emisiones mientras el motor aun no alcanza la temperatura optima de funcionamiento. $E_{evaporativas}$, emisiones por evaporación en los tanques de combustible, en los sistemas de inyección y las líneas de repartición de combustible. $E_{no\ exhosto}$, emisiones por abrasión de la carretera, desgaste de frenos y neumáticos.

Para el cálculo de las anteriores emisiones, se utilizan las ecuaciones que se encuentran en la siguiente figura.

Tabla 23.

Ecuaciones para la estimación de emisiones por tipo

Tipo de emisión	Ecuación	No.
Caliente	$E_{i,j,k} = N_{j,k} \times VKT_{j,k} \times FE_{i,j,k}$	(2.3)
Frío	$E_{Frío} = \beta \times FE_{i,j,k} \times N_{j,k} \times VKT_{j,k} \times [(FE'/FE) - 1]$	(2.4)
Evaporativa	$E_{Evap} = \sum_s D_s \times \sum_j N_j \times (HS_j + e_{d,j} + RL_j)$	(2.5)
<p>Donde:</p> <p>$E_{i,j}$, son las emisiones de la especie i por categoría del vehículo j, tipo de vía k y motor estabilizado térmicamente. $N_{j,k}$, es el número de vehículos en circulación por categoría j. $VKT_{j,k}$, son los kilómetros recorridos por categoría de vehículo j y tipo de vía k. $FE_{i,j,k}$, es el factor de emisión en caliente de la especie i por categoría de vehículo j y tipo de vía k. β, es la fracción del kilometraje conducido con el motor en frío u operando en una temperatura por debajo de la ideal para una categoría y tecnología vehicular, que depende directamente del tiempo de un viaje. D_s, es el número total de días con una temperatura ambiente específica que afecte al factor de emisión (día). N_j, es el número de vehículos a gasolina de una categoría j (veh). HS_j, es el promedio de emisiones que se dan cuando se apaga un motor y la temperatura del combustible se encuentra elevada, por lo que se pueden presentar fugas (g/día). $e_{d,j}$, es el promedio de emisiones diurnas debido a los cambios de temperatura que se dan en el día por lo que genera una evaporación del combustible (g/día). RL_j, es el promedio de las emisiones por pérdidas en funcionamiento que son el resultado de los vapores generados en el tanque de combustible (g/día) (Emisia SA, 2020).</p>		

Nota. Ecuaciones empleadas en la estimación de emisiones de acuerdo al tipo, ya sea caliente, frío o evaporativa. Tomado de: Universidad Nacional de Colombia. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>

En el caso de las fuentes móviles en ruta, los FE para cada contaminante son específicos según el tipo de vehículo, peso bruto vehicular, cilindraje, tecnología vehicular y tipo de combustible. COPERT 5.4 define los FE en función de la velocidad vehicular promedio como se muestra en la siguiente ecuación.

$$FE = \frac{\text{Alpha} \times V^2 + \text{Beta} \times V + \text{Gamma} + \frac{\text{Delta}}{V}}{(\text{Epsilon} \times V^2 + \text{Zeta} \times V + \text{Eta}) \times (1 - RF)}$$

Donde Alpha, beta, gamma, delta, épsilon, zeta y eta, son parámetros adimensionales proporcionados por COPERT, específicos para la categoría y tecnología vehicular, el peso vehicular bruto y el tipo de combustible usado. V, es la velocidad promedio vehicular para cada tecnología vehicular. RF, es el factor de reducción de emisiones específico para cada tecnología vehicular.

5.6.1.a Corrección y/o ajustes de factores de emisión. Los factores de emisión base en COPERT son corregidos a partir de cuatro componentes: 1. Edad del vehículo (asociado al kilometraje acumulativo – aplica para la categoría de vehículos particulares y vehículos de carga livianos), 2. Mejoras en la calidad del; combustible a través de los años, 3. Pendiente de la vía (aplica para la categoría de bus y camión), 4. Porcentaje de carga transportada (aplica para la categoría de bus y camión).

5.6.2. Resultados

El software COPERT 5.4 estima un solo FE diario por contaminante teniendo en cuenta las condiciones de hora pico y valle, además de tener en cuenta las condiciones del motor del vehículo en frío y caliente. Los resultados obtenidos mediante el software se muestran en la siguiente figura donde se obtienen datos según categoría vehicular, características de combustible e información meteorológica de la ciudad. Los datos obtenidos son un promedio ponderado de los FE (El FE de PM_{2.5} es igual para PM₁₀) según las tecnologías vehiculares y la subcategoría asociada al PBV y/o cilindraje.

Tabla 24.

Factores de emisión en ruta por vehículo ajustados a las condiciones de *Manizales año 2017-COPERT 5.4*

Categoría vehicular	Combustible	FE (g/km)									
		CO	NO _x	SO ₂	BC	PM _{2.5}	COVNM	COV	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Vehículo particular	Gasolina	5.69	0.75	0.02	0.002	0.02	0.82	0.87	180.29	0.02	0.05
	Diésel	0.20	0.57	0.003	0.036	0.06	0.03	0.03	172.14	0.008	0.004
	GNV	0.54	0.09	0.00	0.00	0.02	0.03	0.10	167.68	0.003	0.07
Moto 2T	Gasolina	16.21	0.03	0.009	0.02	0.21	8.38	8.53	86.99	0.002	0.15
Moto 4T	Gasolina	11.52	0.33	0.008	0.005	0.03	1.01	1.16	73.46	0.002	0.15
Taxi	Gasolina	4.48	0.48	0.019	0.00	0.02	0.47	0.50	176.82	0.01	0.04
	Diésel	0.17	0.58	0.003	0.04	0.06	0.03	0.03	169.84	0.01	0.003
	GNV	0.55	0.09	0.00	0.00	0.02	0.03	0.10	177.51	0.003	0.07
Camión	Diésel	1.38	5.29	0.01	0.12	0.25	0.38	0.47	552.83	0.01	0.09
Bus	Diésel	1.64	7.23	0.01	0.15	0.29	0.34	0.50	684.78	0.01	0.16

Nota. Resumen de los factores de emisión calculados de acuerdo a la categoría vehicular y el tipo de combustible. Tomado de: Universidad Nacional de Colombia. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>

El software arroja resultados funcionales para ciudades que no poseen pendientes mayores al 6%, además de presentar importantes actualizaciones en los FE conforme se desarrollan nuevas tecnologías vehiculares. Teniendo lo anterior en cuenta el realizar un estudio con esta metodología en la ciudad de Manizales donde hay pendientes con un mayor grado de inclinación al anteriormente mencionado, lo más probable es que el software tire valores no tan precisos, además de aumentar este margen de error en las categorías diferentes a las de camión y bus, debido a que el software no les aplica la corrección por pendiente.

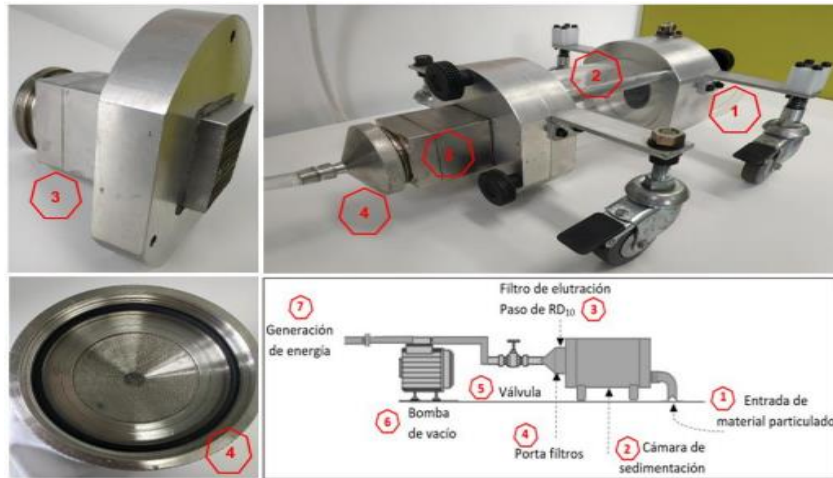
5.6.3. Metodología Amato

En este mismo estudio se llevó a cabo la estimación de emisiones del material particulado susceptible de re suspensión mediante información local utilizando la metodología Amato para el año 2017. Esta metodología es la misma que se empleó en

el estudio de la Salle que se mencionó anteriormente, teniendo en cuenta los mismos factores de carga de sedimentos, recolección de muestras y selección de puntos de monitoreo. Pero durante este estudio el equipo para el muestreo, se desarrolló con el mismo funcionamiento, pero con materiales y acabados diferentes como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11.

Equipo "RD10 in road dust" para el muestreo de RD10



Nota. Representación del equipo Road Dust empleado para el muestreo de material particulado resuspendido. Tomado de: Universidad Nacional de Colombia. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>

5.6.4. Resultados

Las cargas de sedimentación promedio obtenidas para los 21 puntos de la ciudad de Manizales fueron:

Tabla 25.*Carga de sedimento en la ciudad de Manizales*

Punto No.	Sector	ID	Cs (mg/m²)
1	Vía Gallinazo	IND1*	26.75
2	Sena	IND2	11.72
4	Enea	COM2	8.54
20	Chipre	COM1	7.53
8	Cruz Roja. Av Kevin	AVK1	7.19
16	Carrera 22 Centro	CEN2	7.14
19	Agustinos Centro	CEN5	6.52
14	La Estación Av. Santander	AVS3	6.46
18	Gobernación Centro	CEN3	5.92
21	Salida Manizales	AV2	5.03
17	Galería Av. Gilberto	CEN4	4.16
13	Vía Neira Av. Kevin	AVK2	3.57
11	Estadio Av. Paralela	AVP1	3.17
12	Cementerio Av. Paralela	AVP2	2.73
10	Cable Av. Santander	AVS2	2.72
5	Construcción	CONST	2.52
9	Palermo Residencial	RES1	2.22
7	Batallón Av. Santander	AVS1	1.96
6	Panamericana	AV1	1.74
15	Fundadores Centro	CEN1	1.43
3	Vía Maltería	IND3	0.77

Nota. Carga de sedimento calculada en cada uno de los puntos establecidos en la ciudad de Manizales. Tomado de: Universidad Nacional de Colombia. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>

Ya teniendo estas cargas de sedimento, se procedió a calcular el factor de emisión por cada punto, de donde se sacó una emisión de partículas promedio y una emisión de partículas promedio sin valores extremos, donde se descartan el valor mínimo y máximo de este factor de emisión calculado. Estos resultados se ven representados en la siguiente tabla.

Tabla 26.

Factores de emisión obtenidos para la ciudad de Manizales

Punto No.	Nombre	ID	Cs	FE	FE
			($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{VKT}$)	(g/VKT)
1	Vía Gallinazo	IND1	26752	176999	0.177
2	Sena	IND2	11715	90676	0.091
3	Vía Maltería	IND3	772	10018	0.010
4	Enea	COM2	8540	70193	0.070
5	Construcción	CONST	2524	26152	0.026
6	Panamericana	AV1	1741	19358	0.019
7	Batallón Av. Santander	AVS1	1955	21264	0.021
8	Cruz Roja. Av Kevin	AVK1	7188	61047	0.061
9	Palermo Residencial	RES1	2224	23604	0.024
10	Cable Av. Santander	AVS2	2724	27818	0.028
11	Estadio Av. Paralela	AVP1	3169	31446	0.031
12	Cementerio Av. Paralela	AVP2	2729	27860	0.028
13	Neira Av. Kevin	AVK2	3571	34640	0.035
14	La Estación Av. Santander	AVS3	6465	56024	0.056
15	Fundadores Centro	CEN1	1427	16478	0.016
16	Carrera 22 Centro	CEN2	7137	60696	0.061
17	Galería Av. Gilberto	CEN4	4163	39222	0.039
18	Gobernación Centro	CEN3	5924	52195	0.052
19	Agustinos Centro	CEN5	6517	56389	0.056
20	Chipre	COM1	7525	63355	0.063
21	Salida Manizales	AV2	5025	45681	0.046
Promedio			5704	48148	0.048
Promedio sin valores extremos			4856	43374	0.043

Nota. Factores de emisión calculados para cada uno de los puntos establecidos en la ciudad de Manizales de acuerdo a la carga de sedimento en cada uno. Tomado de: Universidad Nacional de Colombia. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>

Este factor de emisión se comparó con otras ciudades y países en donde solo se mostró superior a la ciudad de Barcelona, las demás ciudades y países que se compararon, tuvieron un valor mayor en el factor de emisión. Cabe resaltar que como se mencionó anteriormente, la ecuación que se utilizó para el cálculo de los FE, está adaptada para tres ciudades europeas diferentes, por lo cual pueden existir desviaciones en los datos, esto debido a que las condiciones de Manizales son diferentes a las de estas ciudades.

Tabla 27.

Comparativo de factores de emisión

Ciudad	FE (mg/VKT)
Bogotá	51.2
Turín	72
Barcelona	34
España	85
Finlandia	121
Suecia	198
Alemania	57
Dinamarca	46
Manizales (Valencia, 2019)	49
Manizales (Presente estudio)	43.4

Nota. Comparativo de los resultados obtenidos de los factores de emisión para la ciudad de Manizales respecto a algunas ciudades de Europa. Tomado de: Universidad Nacional de Colombia. Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>

- **Análisis del artículo**

Los FE obtenidos en este estudio, permiten determinar que la ciudad de Manizales posee una muy baja contaminación debido a material resuspendido, esto se puede deber a que no es una ciudad muy grande por lo cual el tráfico de vehículos puede ser menor, comparándola con otras grandes ciudades ya sea de Colombia o de otros países.

La metodología COPERT 5.4, mostro ser una metodología acertada, pero principalmente para ciudades que no poseen grandes pendientes como lo es en la ciudad de Manizales, esto debido a que el programa no tiene en cuenta las correcciones para

pendientes mayores a 6%, generando un error en los cálculos en las zonas de muestreo donde haya pendientes de estas características.

La metodología que se menciona anteriormente, también es muy buena debido a que estima un FE diario por contaminante, y lo bueno de esto es que tiene en cuenta diferentes factores como lo son, la hora pico y valle, las condiciones del motor del vehículo en caliente o frío, tipo de combustible, entre otras. Esto beneficia mucho esta metodología, pues tiene en cuenta factores que otros métodos no.

La otra metodología utilizada en este estudio fue la Amato, la cual como se mencionó anteriormente en otro estudio donde se utilizó esta misma metodología a pesar de poseer una menor incertidumbre que la metodología EPA. Las constantes utilizadas en este estudio pertenecían a ciudades las cuales poseen características totalmente diferentes a las de la ciudad de Manizales. Generando un pequeño error en el cálculo de los FE. Además, también se debe tener en cuenta que el estudio tiene que realizarse en una época seca para disminuir el porcentaje de error.

Al comparar los artículos que emplearon esta misma metodología, se puede evidenciar que el aparato de muestreo utilizado en este, utilizó componentes más modernos y mejor estructurados, dando entrada a un aparato de muestreo más completo.

A pesar de ser de los estudios más recientes, aun no se desarrolla una metodología de muestreo, en donde la humedad no afecte la precipitación y que esto se cause desviaciones en los resultados finales de cargas de sedimento y FE. Por lo cual se sigue recomendando realizar esta metodología en épocas secas.

6. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica que se realizó en el presente trabajo de las metodologías empleadas en la estimación y cuantificación de material particulado resuspendido, se concluye que el principal referente que se tiene es el protocolo implementado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en el AP-42, tomando en cuenta que el material particulado resuspendido que se estudio es aquel que se genera por la actividad vehicular en carreteras pavimentadas y sin pavimentar principalmente, siendo este el más completo; sin embargo, logra complementarse con metodologías como la implementada por la Agencia Europea de Ambiente.

Por otro lado, a partir de las investigaciones presentadas en esta investigación se logra evidenciar que existe una limitante a la hora de implementar la metodología de la EPA ya que tiene factores de emisión estándar, que, a la hora de aplicar a determinadas ciudades con variables como el clima, la calidad de las vías, el parque automotor, entre otras, lo que se hace es una sobreestimación del material particulado resuspendido y no se llega a un valor más real.

En cuanto al grado de avance investigativo en la aplicación de las metodologías de estimación y cuantificación de material particulado resuspendido en Colombia, se evidencio que en Colombia se ha investigado desde hace aproximadamente 10 años (iniciando en el 2012 con las primeras investigaciones) y que desde el inicio se ha implementado la metodología EPA con pequeñas variaciones en la cuantificación, unas se han dado a través de campañas de monitoreo, mientras que otras se han desarrollado a través de software que permiten establecer valores con un margen de error menor.

Finalmente se concluye que a pesar de que la metodología desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental es la más completa y es el principal referente, no es la metodología que da los mejores resultados, ya que, por ejemplo, en ciudades como Bogotá, no se tiene valores de factores de emisión que se ajusten a las características de la ciudad, pues en las investigaciones analizadas aquí siempre se ajustan valores de ciudades europeas, lo que da como resultado una sobre estimación en la cuantificación del material particulado. Mientras que metodologías como la de Amato presentan una menor incertidumbre en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- A, Fernández. (11 de diciembre de 2019). Historia de la contaminación. Junior Report. *La vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20181211/453406386366/cambio-climatico-historia-contaminacion-cronologia.html>
- Área Metropolitana Valle de Aburrá. (s.f.). Principales contaminantes del aire. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes.aspx>
- Beltrán, D., Benalcázar, L. and Rojas, N. (2012). Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por re suspensión de polvo y abrasión en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.
- Carmona Aparicio, L.G, et al. (septiembre de 2016) "Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia." *Revista Tecnura*, vol. 20, no. 49, pp. 59+. link.gale.com/apps/doc/A499178813/IFME?u=anon~1330695e&sid=googleScholar&xid=ee71c21a
- Casotti Rienda, I. and Alves, C., 2021. Road dust resuspension: A review. *Atmospheric Research*, 261, p.105740.
- During, I., Jacob, J., Lohmeyer, A., Lutz, M. and Reichenbacher, W. (2002). Estimation of the “non exhaust pipe” pm10 emissions of streets for practical traffic air pollution modelling. University of Technology, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Particulate Matter (PM) Basics. Recuperado de <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Overview of Greenhouse gases. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2006). 13.2.2 Unpaved Roads. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources*, AP-42, 1–20.

- Environmental Protection Agency (EPA). (2014). Other Test Method – 34: Method to Quantify Road Dust Particulate Matter Emissions (PM10 and/or PM2.5) from Vehicular Travel on Paved and Unpaved Roads.<https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-08/documents/otm34.pdf>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2011). 13.2.1 Paved Roads. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, AP-42. <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/index.html>
- Environmental Protection Agency (EPA). (s.f.). Efectos del material particulado sobre la salud y el medio ambiente.<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Espinosa, J., Pinto, L., Galvis, B. and Pachon, J. (2016). Vista de Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. Revista Universidad Militar.<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1797/1794>
- Espitia Cano, S. O., & Porras Montaña, S. P. (2017). Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de re suspensión en vías de Bogotá. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/707
- Gómez García, J. S. (2019). Estimación de factores de emisión de polvo resuspendido en algunas vías de Bogotá mediante un método de monitoreo pasivo. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1138
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). Conceptos básicos de cambio climático.<http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.) Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527666/Protocolo+fuentes+fijas.pdf/65780586-e70d-434a-9da7-264d3649b2ba>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2016). Contaminación y calidad ambiental. Calidad del aire.<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2007). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos.
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (26 septiembre de 2002). Métodos de estimación de emisiones de PM2.5.
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/metodos.pdf>
- Jancsek-Turóczi, B., Hoffer, A., Nyírő-Kósa, I. and Gelencsér, A. (2013). Sampling and characterization of resuspended and respirable road dust. *Journal of Aerosol Science*, 65, pp.69-76.
- Pachón, J. (01 de diciembre de 2013). Universidad de la Salle. Tendencias en investigación sobre calidad del aire en Colombia a partir de los resultados del IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública (Casap) 2013.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1145&context=ep>
- Meza, L., Quintero, M., García, R. and Ramírez, J. (2010). Estimación de Factores de Emisión de PM10 y PM2.5, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México. *Información tecnológica*, 21(4). [Archivo en PDF].
- Méndez Espinosa, J. F., Pinto Herrera, L. C., Galvis Remolina, B. R., & Pachón Quinche, J. E. (2017). Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 27(1), 43-60.
<https://doi.org/10.18359/rcin.1797>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Contaminación Atmosférica.
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/contaminacion-atmosferica>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas.
https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (01 de noviembre de 2017). Resolución 2254 del 2017 de Calidad del aire. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Normatividad/Resolucion-2254-2017-calidad-del-aire.pdf>
- Ministerio de Ambiente de Chile (s.f.). Conceptos de calidad del aire. Fuentes fugitivas. <https://ppda.mma.gob.cl/conceptos-de-calidad-del-aire/>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (02 de mayo de 2018). Calidad del aire y salud. [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2018). Infografía. ¿Cuáles son las fuentes de la contaminación del aire?. <https://www.paho.org/es/documentos/infografia-cuales-son-fuentes-contaminacion-aire-2018>
- Pachón, J.E.; Galvis, B.; Lombana, O.; Carmona, L.G.; Fajardo, S.; Rincón, A.; Meneses, S.; Chaparro, R.; Nedbor-Gross, R.; Henderson, B. Development and Evaluation of a Comprehensive Atmospheric Emission Inventory for Air Quality Modeling in the Megacity of Bogotá. *Atmosphere* 2018, 9, 49. <https://doi.org/10.3390/atmos9020049>
- Secretaria de Ambiente y Recursos Naturales. (16 de junio 2018). Fuentes de contaminación atmosférica. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica#:~:text=Fuentes%20de%20%C3%A1rea,Fuentes%20naturales%20o%20biog%C3%A9nicas.>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change* (2^a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Singh, V. Biswal, A. Kesarkar, A.P. Suman Mor, Ravindra, K. (10 de enero de 2020). High resolution vehicular PM10 emissions over megacity Delhi: Relative contributions of exhaust and non-exhaust sources. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134273>
- TuBuenSitio. (2021). Material particulado (PM2,5 y PM10). <https://tubuensitio.com/material-particulado/>

- Trejos, E. (2021). Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – Año base 2017). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>
- US-EPA. (Julio de 2020). Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>
- Velasco, J. (26 de mayo de 2014). Lluvia ácida y efecto invernadero. <http://porunfuturoconecologia26.blogspot.com/2014/05/lluvia-acida-y-efecto-invernadero.html>
- Zanón, M. P., & Triola, M. C. (2008). *El Medio atmosférico: Meteorología y contaminación*. Edicions Universitat Barcelona. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=cPYrHVmslewC&oi=fnd&pg=PA13&dq=mecanismos+de+limpieza+atmosferica&ots=ELmvuQt7wQ&sig=3B8_Ab6pdr0H12wG6-,HJIRUNG0k#v=onepage&q=mecanismos%20de%20limpieza%20atmosferica&f=false, pág. 47.