



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Determinación del Nivel de Exposición de Viajeros Pendulares a Partículas Ultrafinas Según el Modo de Transporte en la ciudad de Bogotá**

**Leidy Tatiana Avila Prada**

Universidad Nacional de Colombia

Ingeniería, Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2016



# **Determinación del Nivel de Exposición de Viajeros Pendulares a Partículas Ultrafinas Según el Modo de Transporte en la ciudad de Bogotá**

**Leidy Tatiana Avila Prada**

Trabajo Final presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director:

Ph.D., Néstor Yesid Rojas

Línea de Investigación:

Calidad del Aire y Salud

Grupo de Investigación:

Calidad del Aire

Universidad Nacional de Colombia

Ingeniería, Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2016



*A mi familia y todas las personas que me apoyaron en el transcurso de esta etapa de mi vida, con su apoyo, comprensión y colaboración.*



## **Agradecimientos**

Quiero agradecer sinceramente al profesor Néstor Y. Rojas por compartir su tiempo, disposición y conocimiento, así como por sus comentarios y sugerencias que permitieron la consecución de este trabajo.

Al ingeniero Camilo Bernal, de la empresa Gesoltec, quien generosamente facilitó el equipo de medición en préstamo, sin el cual no habríamos podido realizar el presente estudio.





## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo determinar la exposición de los viajeros pendulares, es decir, aquella persona que hace un viaje periódico de ida y vuelta entre un sitio y otro, normalmente entre su domicilio y su sitio de trabajo o estudio, a las partículas ultrafinas (UFP) en Bogotá, mediante la medición de las concentraciones de UFP y la estimación de la dosis de exposición de un viajero promedio en cada modo de transporte. Se realizaron mediciones del número de partículas ultrafinas en microambientes de transporte asociado tanto con modos de transporte motorizado (Bus Rapid Transit - Transmilenio -, turismos) como con aquellos no motorizados (bicicleta y a pie) a lo largo de seis corredores, durante una serie de períodos de 1 hora. La exposición de los viajeros pendulares se calculó con base en los procedimientos del Manual de Factores de exposición de la EPA de Estados Unidos, teniendo en cuenta demografía de los viajeros pendulares y los resultados de la encuesta de movilidad anual de Bogotá.

Los resultados muestran que en los microambientes de transporte de Bogotá hay una concentración promedio de  $1,39E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>. Los modos de transporte con mayores concentraciones de UFP fueron la bicicleta y el automóvil con  $1,71E+05$ ,  $1,61E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los modos de transporte *BRT* y peatón presentaron concentraciones menores con  $1,29E+05$  y  $1,02E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>. Se encontró una disminución importante en las concentraciones de UFP cuando el desplazamiento se realizó sobre la Carrera Séptima durante la Ciclovía, de  $1,71E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> al realizar desplazamientos por las ciclorrutas ubicadas sobre las vías principales a  $4,71E+04$  partículas/cm<sup>3</sup>.

Las concentraciones de UFP obtenidas en la ciudad de Bogotá se encontraron por encima de las halladas en ciudades como Londres, Sídney y Flanders, en las que los valores estaban un orden de magnitud por debajo.

**Palabras clave:** Partículas ultrafinas, dosis, viajeros pendulares, factores de exposición.

## Abstract

This work aims to determine the exposure of commuters, that is, those people who make a regular round trip between one place and another, usually between their home and their work or study office, to ultrafine particles (UFP) in Bogotá, by measuring UFP concentrations and then estimating the exposure of an average commuter in each transportation mode. We measured the number concentration of ultrafine particles in transport microenvironments associated with both motorized (Bus Rapid Transit – Transmilenio –, passenger cars) and non-motorized (cycling and walking) transportation modes along six corridors during a series of 1-hour periods. We estimated Commuter exposure using the US EPA's Exposure Factors Handbook, considering commuter demographics and results from Bogotá's annual mobility survey.

Results from the particle number measurement campaign show that transportation microenvironments in Bogota have an average concentration of  $1,39E + 05$  particles/cm<sup>3</sup>. The transport mode with the highest concentration of UFP, were bicycle and car with  $1,71E+05$ ,  $1,61E+05$  particles/cm<sup>3</sup> respectively. BRT and pedestrian transports modes had lower concentrations with  $1,29E+05$  and  $1,02E+05$  particles/cm<sup>3</sup>. An important UFP concentrations decrease was also found when the route was made on the Carrera Septima during Ciclovía from an average of  $1,71e+05$  particles/cm<sup>3</sup> when route made by bike paths located on the main routes to  $4,71E+04$  particles/cm<sup>3</sup>.

Concentrations of UFP obtained in the city of Bogotá were found above those found in cities such as London, Sydney and Flanders, where values were an order of magnitude below.

**Keywords: Ultrafine particles, dose, commuter, exposure factors.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Estado del arte</b> .....	<b>5</b>
1.1 Material Particulado Atmosférico .....	6
1.2 Distribución de tamaño de partícula .....	7
1.3 Partículas Ultrafinas - UFP .....	8
1.4 Diámetro de Stokes (Dp) .....	9
1.5 Efectos Partículas Ultrafinas en la Salud .....	10
1.6 Determinación de exposición y dosis a partículas ultrafinas .....	11
1.6.1 Medición de la concentración de partículas ultrafinas.....	11
1.6.2 Determinación de la Dosis de Inhalación Promedio .....	13
1.6.3 Estudios de exposición de viajeros pendulares a UFP .....	15
<b>2. Metodología</b> .....	<b>21</b>
2.1 Selección de corredores viales .....	21
2.2 Determinación de Concentración de UFP – Monitoreo con equipo DiSCmini	24
2.3 Determinación de la Dosis de Inhalación Promedio .....	26
<b>3. Resultados</b> .....	<b>28</b>
3.1 Concentraciones.....	28
3.1.1 Comparación global entre modos de transporte .....	28
3.1.2 Comparación entre modos de transporte por cada vía .....	39
3.1.3 Comparación Específica por Vías .....	47
3.1.4 Comparación entre vías por cada modo de transporte .....	56
3.1.5 Concentraciones de UFP en Ciclovía .....	63
3.2 Dosis de Inhalación Promedio .....	64
3.2.1 Dosis de Inhalación Promedio con Estadísticas de Movilidad en Bogotá	64
3.2.2 Dosis de Inhalación Promedio con Trayecto Fijo y Duración Variable .	68
3.2.3 Dosis de Inhalación Promedio con Duración Fija y Trayecto Variable .	70
3.3 Discusión .....	73
<b>El estudio realizado por</b> .....	<b>76</b>
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>79</b>

XII Determinación de la Exposición de Viajeros Pendulares a Partículas Ultrafinas  
Según Modo de Transporte en Bogotá

---

4.1	Conclusiones.....	79
4.2	Recomendaciones.....	80
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>83</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Fuentes de generación de material particulado .....	6
<b>Figura 1-2.</b> Distribución por tamaño de las partículas. ....	9
<b>Figura 1-3.</b> Visión esquemática del DiSCmini: El aerosol se carga en un cargador de corona unipolar que controla la corriente de carga, el exceso de iones es eliminado en la trampa de iones, y el aerosol cargado se mide en dos etapas de electrómetro (D = etapa de difusión, M = etapa de filtro), permitiendo determinar el tamaño de las partículas y cantidad.....	13
<b>Figura 2-1.</b> Diagrama descriptivo trayectos y recorridos. ....	22
<b>Figura 2-2.</b> Desplazamientos campaña de monitoreo. (a) Mediciones con equipo DiSCmini en BRT. (b) Equipo DiSCmini. (c) Mediciones con equipo DiSCmini como peatón. ....	25
<b>Figura 3-1.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en diferentes modos de transporte. Notas: Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	30
<b>Figura 3-2.</b> Matriz de diagramas de Dispersión UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) según modo de transporte. Nota: Diagrama de dispersión indica la relación de las concentraciones de UFP entre los modos de transporte analizados. ....	33
<b>Figura 3-3.</b> Matriz de Diagramas de Dispersión UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) según modo de transporte en base logarítmica. Nota: Diagrama de dispersión indica la relación de las concentraciones de UFP entre los modos de transporte analizados.....	34
<b>Figura 3-4.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) con igualdad y sin igualdad de datos en diferentes modos de transporte. Nota: Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.....	36
<b>Figura 3-5.</b> Frecuencia de concentraciones por modo con equivalencia. Nota: modo I - BRT, modo II - automóvil, modo III - bicicleta, modo IV - peatón. ....	39

<b>Figura 3-6.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	41
<b>Figura 3-7.</b> Matriz de diagramas de Dispersión UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) según vía. Nota: Diagrama de dispersión indica la relación de las concentraciones de UFP entre las vías analizadas. ....	44
<b>Figura 3-8.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) con equivalencia y sin equivalencia de datos en vías analizadas. Nota: Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	46
<b>Figura 3-9.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Calle 26 en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	49
<b>Figura 3-10.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Carrera 30 en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	50
<b>Figura 3-11.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Autopista Norte en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	51
<b>Figura 3-12.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Autopista Sur en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	52
<b>Figura 3-13.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Avenida Caracas en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	53
<b>Figura 3-14.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Carrera 7 en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	54
<b>Figura 3-15.</b> Concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Carrera 13. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	56
<b>Figura 3-16.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en BRT en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	58

<b>Figura 3-17.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en Automóvil en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	59
<b>Figura 3-18.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en Bicicleta en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	61
<b>Figura 3-19.</b> Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) como Peatón en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	62
<b>Figura 3-20.</b> Concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en Bicicleta en Ciclovía. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP. ....	63
<b>Figura 3-21.</b> Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad. ....	66
<b>Figura 3-22.</b> Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad. ....	67
<b>Figura 3-23.</b> Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con trayecto fijo y duración variable. ....	69
<b>Figura 3-24.</b> Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con trayecto fijo y duración variable. ....	70
<b>Figura 3-25.</b> Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con duración fija y trayecto variable. ....	71
<b>Figura 3-26.</b> Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con duración fija y trayecto variable. ....	72

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1.</b> Modas de agrupación de partículas .....	7
<b>Tabla 1-2.</b> Revisión bibliográfica estudios de concentraciones de UFP en el mundo.....	17
<b>Tabla 2-1.</b> Muestreos realizados según modo de transporte y vía. ....	22
<b>Tabla 2-2.</b> Modos de transporte monitoreados por vía. ....	23
<b>Tabla 2-3.</b> Cobertura vía por modo de transporte. ....	23
<b>Tabla 2-4.</b> Peso promedio hombre y mujer adulto. ....	27
<b>Tabla 2-5.</b> Valores de Inhalación Estándar .....	27
<b>Tabla 3-1.</b> Desplazamientos por vía, según modo de transporte. ....	29
<b>Tabla 3-2.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo de transporte en la ciudad de Bogotá sin Equivalencia. ....	29
<b>Tabla 3-3.</b> Análisis numérico entre modos sin equivalencia. ....	31
<b>Tabla 3-4.</b> Análisis numérico entre modos sin equivalencia con base logarítmica. ....	35
<b>Tabla 3-5.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo de transporte en la ciudad de Bogotá con Equivalencia. ....	35
<b>Tabla 3-6.</b> Análisis numérico entre modos con equivalencia. ....	37
<b>Tabla 3-7.</b> Concentraciones promedio de UFP por modo según vía. ....	38
<b>Tabla 3-8.</b> Análisis estadístico ANOVA por modos de transporte.....	38
<b>Tabla 3-9.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en la ciudad de Bogotá sin Equivalencia.....	40
<b>Tabla 3-10.</b> Análisis numérico entre vías sin equivalencia. ....	42
<b>Tabla 3-11.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía con Equivalencia. ....	45
<b>Tabla 3-12.</b> Análisis numérico entre vías con equivalencia. ....	47
<b>Tabla 3-13.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Calle 26.....	48
<b>Tabla 3-14.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Carrera 30.....	49
<b>Tabla 3-15.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Autopista Norte. ....	51



<b>Tabla 3-16.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Autopista Sur.....	52
<b>Tabla 3-17.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Avenida Carcas.....	53
<b>Tabla 3-18.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Carrera 7.....	55
<b>Tabla 3-19.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Carrera 13.....	55
<b>Tabla 3-20.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en automóvil.....	57
<b>Tabla 3-21.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en automóvil.....	60
<b>Tabla 3-22.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en bicicleta.....	60
<b>Tabla 3-23.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía como peatón.....	62
<b>Tabla 3-24.</b> Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas en ciclovía.....	63
<b>Tabla 3-25.</b> Número de viajes estandarizado según encuesta de movilidad 2015.....	65
<b>Tabla 3-26.</b> Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad.....	65
<b>Tabla 3-27.</b> Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad.....	67
<b>Tabla 3-28.</b> Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio con trayecto fijo y duración variable por modo de transporte en Bogotá.....	68
<b>Tabla 3-29.</b> Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio con trayecto fijo y duración variable por modo de transporte en Bogotá.....	69
<b>Tabla 3-30.</b> Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio con duración fija y trayecto variable por modo de transporte en Bogotá.....	71
<b>Tabla 3-31.</b> Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio con duración fija y trayecto variable por modo de transporte en Bogotá.....	72
<b>Tabla 3-28.</b> Concentraciones de UFP en diferentes modos de transporte a nivel mundial.....	75



## Introducción

La contaminación atmosférica es la alteración ambiental con mayores costos sociales y ambientales en Colombia (Viceministerio de Ambiente, 2010), representando cerca de 5.000 muertes prematuras y casi 65.000 años de vida potencialmente perdidos (DALY). Dentro de los contaminantes atmosféricos, el material particulado PM10 es el contaminante de mayor interés para el país, como consecuencia de sus altos niveles de concentración en las diferentes ciudades del país y a la cercana exposición de la población, tanto en el aire ambiente como en espacios interiores.

A escala global, las mediciones de material particulado en el aire como PM10 son ahora menos relevantes que en décadas anteriores. En los países industrializados, el monitoreo de material particulado se centra en la concentración de las partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras – PM2.5 –, las cuales han mostrado una asociación más fuerte con los indicadores de salud. En Bogotá, Rojas & Galvis (2005) determinaron que el PM2.5 constituye entre el 70 y el 90% del PM10. Bogotá ha expandido recientemente su capacidad de monitoreo de PM2.5, de un solo equipo en 2008 a 10 equipos en 2014, lo cual permite determinar de mejor manera los impactos de la contaminación del aire de la ciudad sobre la salud de la población y generar políticas más acertadas para priorizar el control sobre las fuentes de emisión relacionadas con procesos de combustión.

Estudios internacionales han demostrado que son las partículas ultrafinas (UFP, por sus siglas en inglés), es decir, aquellas con tamaños inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$ , las que representan un mayor riesgo a la salud (United States Environmental Protection Agency, 2004; Wahlin, Palmgren, Van Dingenen, & Raes, 2000). Esto se debe a su pequeño tamaño, su gran número y su gran área superficial. Estas características les permiten depositarse en la región alveolar del pulmón humano con mayor eficiencia que las partículas más grandes (Daigle, y otros, 2003; Phalen, Oldham, & Nel, 2006; Frampton, 2007) y

aumentar su tiempo de residencia en los alveolos. Las UFP pueden viajar desde el pulmón a través de la sangre y la circulación linfática a otros órganos (Elder, y otros, 2006; Samet, y otros, 2009).

Las UFP emitidas por combustión de vehículos tienen el potencial de dañar las células pulmonares debido a su contenido de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Delfino, Sioutas, & Malik, 2005), las cuales se generan por la presencia de componentes de metales de transición que promueven la producción de las especies reactivas del oxígeno. Adicionalmente, las células blancas producen ROS al entrar en contacto con las UFP como respuesta a su ingreso al cuerpo (Li, 2003) aumentando la probabilidad de afectaciones al pulmón. Araujo y Nel (2009) indicaron que las UFP son más proaterogénicas que las partículas más grandes debido a su mayor biodisponibilidad de compuestos reactivos, a su contenido de compuestos redox-activos y a su capacidad de aumentar su tiempo de retención en el pulmón.

El microambiente del transporte se ha presentado como el de mayor interés para análisis de partículas ultrafinas, debido a que las concentraciones de contaminantes primarios provenientes del tráfico vehicular son particularmente altas cerca de las vías, especialmente los contaminantes de vida corta, como es el caso de las partículas ultrafinas (Gordon, y otros, 2012; Alex A. Karner, 2010; Gong, Xu, & Zhu, 2009; Ji Ping Shi, 1999). También se ha encontrado que las partículas con diámetros inferiores a  $0.1\mu\text{m}$  son el componente principal de las emisiones de los motores vehiculares, representando el 90% del total del número de partículas emitidas (Morawska, Ristovski, Jayaratne, Keogh, & Ling, 2008).

Se han realizado análisis actuales para comparar los niveles de concentración de partículas ultrafinas por modo de transporte, dentro de ellos se pueden encontrar el realizado por Ragettli (Martina S. Ragettli, 2013) en la ciudad de Basel, Suiza, en el cual el modo de transporte con mayor concentración de UFP fueron la bicicleta y el automóvil con  $1.23\text{E}+04$  partículas/ $\text{cm}^3$ , seguido por el tranvía y el bus con  $1.01\text{E}+04$  y  $0.71\text{E}+04$  partículas/ $\text{cm}^3$  respectivamente.

En el estudio realizado por Audrey de Nazelle (Audrey de Nazelle, 2012) en Barcelona, España el comportamiento fue similar, en él, el automóvil presentó la mayor

concentración, seguido por la bicicleta, el bus y el peatón con concentraciones de  $1.17E+05$ ,  $7.53E+04$ ,  $5.23E+04$  y  $5.06E+04$  partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente. Quiros (David C. Quiros, 2013) también realizó un estudio en Santa Mónica, California; donde encontraron concentraciones promedio de  $3.18E+04$ ,  $3.15E+04$  y  $2.84 E+04$  partículas/cm<sup>3</sup> para los modos de transporte de bicicleta, automovil y peatón respectivamente.

Morawska et al. (2008) realizaron un meta análisis de 71 estudios de UFP realizados en una amplia gama de entornos, encontrando concentraciones promedio de  $2.6E+03$ ,  $4.8E+03$ ,  $7.3E+03$ ,  $10.8E+03$ ,  $42.1E+03$ ,  $48.2E+03$ ,  $71.5E+03$  y  $167.7E+03$  partículas por cm<sup>3</sup> para los ambientes limpio, rural, urbano, efecto cañón, al borde de la vía, directamente en la vía y en túneles, respectivamente. Indicando que una mayor proximidad a vehículos se asocia con aumento de las concentraciones de UFP (Morawska, Ristovski, Jayaratne, Keogh, & Ling, 2008), debido a la proximidad a los vehículos (Ji Ping Shi, 1999).

En Bogotá se realizó un estudio empleando diferentes medios de transporte sobre la Calle 80, Carrera 7 y Carrera 13, en el cual se analizó material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), carbono negro equivalente (eBC) y partículas ultrafinas (R. Morales Betancourt, 2017), en él se estableció que el transporte público presenta las mayores concentraciones de todos los contaminantes estudiados. También se identificó que las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la ciudad sub-estima las verdaderas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en aproximadamente 4.5 veces.

Adicionalmente, estudios de patrones temporales llevados a cabo en diferentes regiones han encontrado que el tiempo pasado en el transporte normalmente constituye entre aproximadamente 5 y 10% del día (Klepeis, y otros, 2001), dependiendo de la ubicación y variando notablemente según la edad el sexo y ocupación, al igual que el modo de transporte empleado. La Encuesta de Percepción sobre las condiciones, calidad y servicio a los usuarios de *Bus Rapid Transit* (Transmilenio), Transporte Público Colectivo (TPC) y Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) del año 2013 (Vicepresidencia de Gobernanza Cámara de Comercio de Bogotá, 2013), muestra que en Bogotá se presentan tiempos de movilización de 63, 73 y 70 minutos, respectivamente. El Departamento Nacional de Planeación (DNP) encontró que un colombiano pasa el

equivalente a 20 días al año montado en un bus y la duración de un desplazamiento promedio está en 1,5 horas, siendo Bogotá la ciudad con mayor pérdida de número de horas productivas (Departamento Nacional de Planeación, 2015).

Considerando lo anterior, esta investigación se orienta a diseñar e implementar la metodología experimental para la recolección de muestras de partículas ultrafinas, determinar su nivel de concentración y variabilidad según el modo de transporte en 6 vías de la ciudad de Bogotá y estimar la exposición a partículas ultrafinas de los viajeros pendulares por modo de transporte, siendo un viajero pendular aquella persona que hace un viaje periódico de ida y vuelta entre un sitio y otro, normalmente entre su domicilio y su sitio de trabajo o estudio, Con tal propósito, se medirá la concentración de número de partículas ultrafinas en el aire y el nivel de exposición en trayectos de una hora y en diferentes tipos de vía, viajando en los modos de transporte correspondientes a *Bus Rapid Transit* (Transmilenio), vehículo particular, bicicleta y caminata.

## 1. Estado del arte

Según la Organización Mundial de la Salud (2006) la población de los centros urbanos tanto de países desarrollados como en vías de desarrollo, está expuesta a los problemas de la contaminación atmosférica por la presencia material particulado en el aire. La contaminación atmosférica es la alteración ambiental con mayores costos sociales y ambientales en el país (Viceministerio de Ambiente, 2010), dada la asociación existente entre concentraciones de contaminantes e índices de morbilidad y mortalidad, en particular por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Las partículas ultrafinas (material particulado con tamaños inferiores a  $0,1 \mu\text{m}$ ) representan un mayor riesgo a la salud (United States Environmental Protection Agency, 2004; Wahlin, Palmgren, Van Dingenen, & Raes, 2000), debido posiblemente a su tamaño, número y área superficial, que les permite depositarse en la región alveolar del pulmón humano con mayor eficiencia que las partículas más grandes (Daigle, y otros, 2003; Phalen, Oldham, & Nel, 2006; Frampton, 2007), y aumentar su tiempo de residencia en los alveolos.

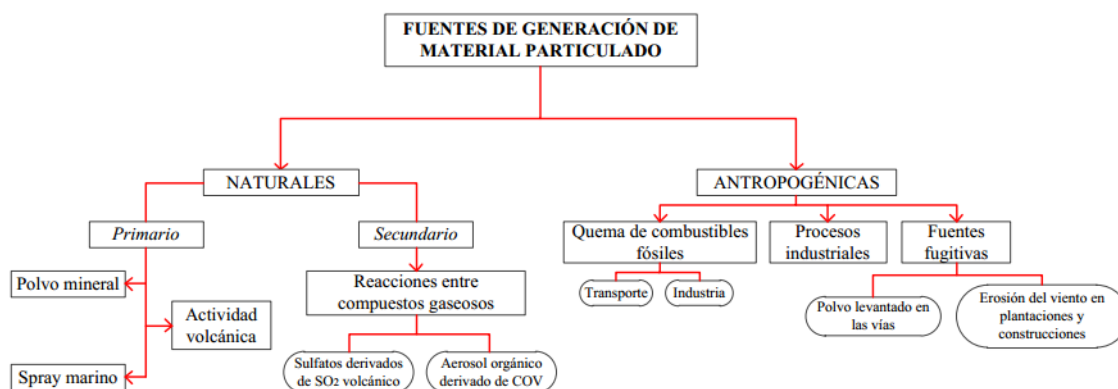
En Bogotá, la red de monitoreo de calidad del aire muestra que existen niveles de concentración de  $\text{PM}_{10}$  por encima de los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecidos por la norma actual de calidad del aire, especialmente en la zona suroccidental de la ciudad. Las mediciones de  $\text{PM}_{2.5}$  (partículas respirables) se realizan en 14 estaciones actualmente y para el año 2014 el promedio anual a nivel ciudad de  $\text{PM}_{2.5}$  fue de  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No existen registros oficiales de concentraciones de partículas ultrafinas, que ya no se expresa en términos máxicos sino en el número de partículas en un volumen unitario.

## 1.1 Material Particulado Atmosférico

Se considera material particulado a las partículas en suspensión presentes en la atmósfera, las cuales pueden ser sólidas, líquidas o presentar un núcleo sólido rodeado por líquido (United States Environmental Protection Agency, 2004). Se incluyen dentro del término de material particulado aquellas partículas con diámetros inferiores a  $0.01 \mu\text{m}$  hasta aquellas sedimentables con diámetro aerodinámico superior a  $20 \mu\text{m}$  (Salinas, 2012).

El material particulado es generado por fuentes naturales o antropogénicas, de manera directa o indirecta, cuando su emisión es directa se consideran partículas primarias, si son generadas por reacciones químicas en la atmósfera se consideran partículas secundarias, este hecho hace que presenten diferentes tamaños, propiedades termodinámicas, composición química y física (United States Environmental Protection Agency, 2004). La Figura 1-1 representa las principales fuentes de generación de material particulado.

**Figura 1-1.** Fuentes de generación de material particulado



**Fuente:** (Gonzales, 2012)

Las partículas secundarias reaccionan en la atmósfera con el vapor de agua y el oxígeno atmosférico ( $\text{O}_2$ ), así como con especies químicas reactivas como el ozono ( $\text{O}_3$ ), radicales hidroxilo ( $-\text{OH}$ ) y de nitrato ( $-\text{NO}_3$ ), y sustancias contaminantes como los óxidos de nitrógenos ( $\text{NO}_x$ ) y el dióxido de sulfuro ( $\text{SO}_2$ ).



Dentro de las principales fuentes naturales de estas partículas se encuentran las emisiones volcánicas, material mineral re suspendido, aerosol marino y emisiones biogénicas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001); por su parte las principales fuentes antropogénicas son la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, fuentes fugitivas no industriales como polvo de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, construcción y erosión eólica de las tierras de cultivo, entre otras, (Seinfeld & Pandis, 2006).

El interés en la medición de este tipo de contaminante se debe a su alto grado de correlación con el aumento de morbilidad por enfermedades respiratorias y cardíacas (Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007), en especial las partículas con menor diámetro ya que estudios internacionales han demostrado que las partículas más finas tienen mayor asociación con este indicador.

## 1.2 Distribución de tamaño de partícula

El diámetro de las partículas que componen el material particulado es altamente variable (hasta 6 órdenes de magnitud: se pueden encontrar desde nanómetros hasta cientos de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) y depende directamente de su fuente. La medición del tamaño de las partículas se puede realizar mediante microscopios electrónicos u ópticos, mediante dispersión de luz, movilidad eléctrica o comportamiento aerodinámico. Para las partículas pequeñas, es más importante la difusión, por lo que el Diámetro de Stokes es usado frecuentemente (United States Environmental Protection Agency, 2004).

Estas partículas tienen una distribución típica en la atmósfera, que consta de tres picos o “modas” (Whitby, 1978). La Tabla 1-1 presenta las características de estas modas de agrupación.

**Tabla 1-1.** Modas de agrupación de partículas

<b>Moda</b>	<b>Tamaño de partícula</b>	<b>Características principales</b>
<b>Nucleación</b>	< 0.01 $\mu\text{m}$	Formada por: - Condensación de vapores calientes de procesos de combustión. - Nucleación de especies atmosféricas.
<b>Aitken</b>	0.01 $\mu\text{m}$ – 0.1 $\mu\text{m}$	Pueden tener un origen primario o secundario a partir de coagulación de partículas de la moda nucleación.
<b>Acumulación</b>	0.1 $\mu\text{m}$ – 2.5 $\mu\text{m}$	Formada principalmente por coagulación de

		partículas de la moda nucleación y condensación de vapores sobre partículas existentes. El mecanismo de remoción atmosférica en esta moda es poco eficiente.
<b>Grueso</b>	> 2.5 $\mu\text{m}$	Formados por procesos mecánicos, incluyendo actividad antrópica y natural. Estas partículas tienen velocidades considerables de sedimentación, por ende se depositan fuera de la atmósfera en tiempos cortos.

**Fuente:** (Gonzales, 2012)

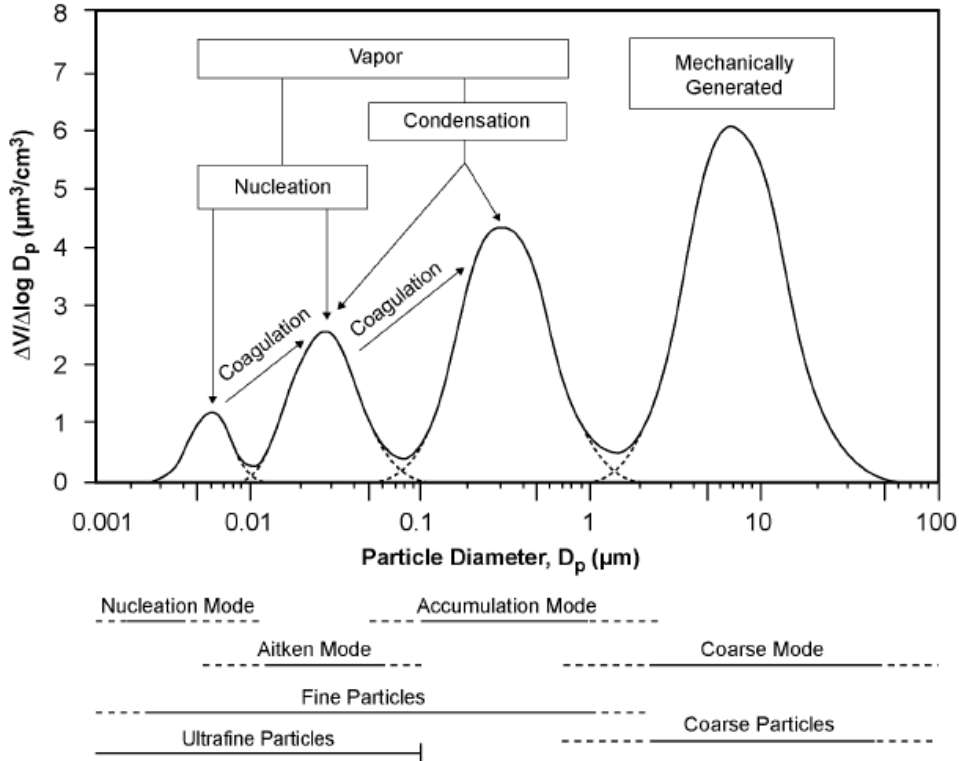
Dado que las partículas ultrafinas son generadas principalmente por la combustión incompleta de combustibles fósiles (Pope & Dockery, 2006), se pueden incluir dentro de las modas de Nucleación y Aitken.

### 1.3 Partículas Ultrafinas - UFP

Son consideradas partículas ultrafinas (UFP, por sus siglas en inglés) aquellas que presentan diámetros de 0.1  $\mu\text{m}$  (100nm) o inferiores, sus principales fuentes de generación primaria son los procesos de combustión (gasolina y diésel), quema de madera, quema de carbón para generación eléctrica, procesos industriales como fundiciones, plantas de cemento, acero y papel. Como partículas secundarias, se generan a partir de la reacción con compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de azufre y nitrógeno.

Las partículas ultrafinas primarias se caracterizan por tener una corta vida (suspensión en la atmósfera) que va de minutos a horas, debido a su rápida capacidad de crecimiento mediante coagulación (formación de una partícula a partir de la combinación de dos) o condensación (la baja presión de vapor de equilibrio de las moléculas del gas condensándose en una partícula), como se puede evidenciar en la Figura 1-2.

**Figura 1-2.** Distribución por tamaño de las partículas.



**Fuente:** (United States Environmental Protection Agency, 2004)

La importancia de su medición se basa en que su tamaño permite su paso desde los pulmones a la sangre y otras partes del cuerpo, además de presentar un mayor nivel de toxicidad por la presencia de sulfatos, nitratos, ácidos y metales.

### 1.4 Diámetro de Stokes ( $D_p$ )

Es el método más empleado para la determinación del diámetro de partículas ultrafinas, consiste en describir el tamaño de la partícula basado en la fuerza de arrastre aerodinámica sobre la misma cuando su velocidad es diferente a la del fluido en el que se encuentra. En una esfera de superficie lisa, el  $D_p$  es igual al diámetro de la partícula, mientras que las partículas con superficies irregulares el  $D_p$  es el diámetro de una esfera equivalente que puede tener la misma resistencia aerodinámica.

## 1.5 Efectos Partículas Ultrafinas en la Salud

El material particulado, se encuentra directamente relacionado con la generación de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente las partículas ultrafinas, las cuales según estudios internacionales recientes, han demostrado ser las que representan un mayor riesgo a la salud, debido posiblemente al número de partículas y el área de las mismas (United States Environmental Protection Agency, 2004; Wahlin, Palmgren, Van Dingenen, & Raes, 2000), que permite su deposición en los pulmones y un aumento en el tiempo de residencia en los alveolos.

Dichos estudios han demostrado que la exposición, incluso por cortos periodos de tiempo a concentraciones de estas partículas puede generar irritación e inflamación alveolar (Rojas & Galvis, 2005), infarto de miocardio, reducción de la función pulmonar y un incremento en su inflamación (Kaur & Nieuwenhuijsen, 2009).

En general la importancia de su medición se basa en que su tamaño permite el paso desde los pulmones a la sangre y otras partes del cuerpo, además de presentar un mayor nivel de toxicidad por la presencia de sulfatos, nitratos, ácidos y metales.

Entre los años 2007 a 2009 se realizaron en el país estudios pilotos para determinar la influencia de la calidad del aire en la salud de la población, el estudio realizado en Bogotá estableció que el 79.6% de los niños (menores a 5 años) ubicados en las zonas de mayor exposición presento silbidos o chillidos en el pecho, en comparación al 69% de los niños ubicados en zonas de menor exposición (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

También se cuenta con un estudio realizado en el año 2005 sobre enfermedad respiratoria aguda en niños menores a cinco años y contaminación atmosférica en la localidad de Puente Aranda determinando que un aumento de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración de  $\text{PM}_{10}$ , ocasionaría un incremento del 4% en las consultas por ERA, para los niños menores a cinco años (Arciniegas A. , Rodríguez, Pachón, Sarmiento, & Hernández, 2006). Esto muestra un avance de la ciudad en el estudio de este tipo de contaminantes y un interés en su manejo. Se requiere, sin embargo, un esfuerzo mucho

mayor para consolidar un sistema de vigilancia de salud ambiental que permita proporcionar información con mayor confiabilidad, consistencia y frecuencia.

El efecto de las partículas ultrafinas sobre la salud no ha sido estudiado aun en Colombia.

## **1.6 Determinación de exposición y dosis a partículas ultrafinas**

La exposición a contaminantes atmosféricos hace referencia a la concentración de contaminantes que una vez emitidos por una fuente natural o antropogénica pueden entrar en contacto con los seres vivos afectando su salud o el desarrollo de sus actividades diarias. Su evaluación se realiza determinando la concentración del contaminante objeto de estudio, así como la frecuencia y duración de la exposición. Las concentraciones de partículas ultrafinas se pueden determinar empleando métodos ópticos, de condensación y difusión.

### **1.6.1 Medición de la concentración de partículas ultrafinas**

#### **1.6.1.1 Contadores ópticos (OPC)**

Los contadores ópticos de partículas en aerosol (OPC, por sus siglas en inglés) basan su funcionamiento en la dispersión de la luz por las partículas, las mediciones son suministradas a partir del conteo de los pulsos de luz dispersada por las partículas.

El láser empleado por el equipo ilumina la muestra tomada, compuesta por aire, líquido y gases; cuando el haz de luz choca contra las partículas este es reflejado, las ópticas adicionales del equipo recogen la luz dispersa y la transmiten al fotodetector (Zambrano, 1998).

El fotodetector aglomera las fuentes de luz dispersas, su funcionamiento se basa en identificar el destello de luz y convertirlo en una señal eléctrica o pulso. Los pulsos dependen del tamaño de las partículas, por lo que las partículas pequeñas dispersan pulsos de luz pequeños y las partículas grandes dispersan pulsos de luz grandes.

Los pulsos son enviados a un analizador de altura de pulso, donde se examina la magnitud del pulso y se determina el tamaño de las partículas a partir de un depósito que contiene datos sobre cada pulso y su correlación con los tamaños de las partículas.

Los OPC permiten obtener la distribución de partículas en un intervalo de 100 nm a pocas decenas de  $\mu\text{m}$  (Renard, et al., 2016).

### **1.6.1.2 Contadores de partículas por condensación (CPC)**

Estos contadores cuentan con un depósito de líquido volátil, como el alcohol butílico, cuyos vapores se mezclan el aire de muestra. Esta mezcla pasa a una cámara de condensación fría, donde los vapores se sobresaturan y condensan sobre las partículas. Al hacer esto, el alcohol rodea las partículas y aumenta su tamaño a uno fácilmente detectable.

El uso de CPC no brinda información sobre la distribución de tamaño de partícula. El rango de medida de la mayoría de los CPC supera 1  $\mu\text{m}$  por lo que para conocer la contribución de las nano partículas es necesario una etapa de separación, la utilización en paralelo con un equipo capaz de detectar las partículas mayores de 1  $\mu\text{m}$  (o el punto de corte de interés) como un OPC (Optical Particle Counter) y restar a la medida del CPC la contribución de las partículas más grandes obtenida mediante la lectura del OPC (Tanarro & Gálvez, 2009).

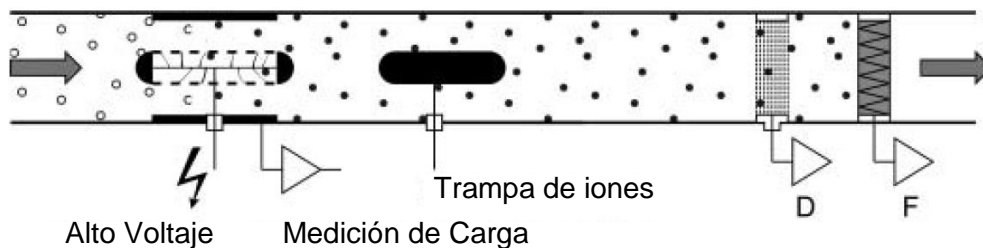
### **1.6.1.3 Contadores de partículas por pantallas de difusión**

Este mecanismo de carga es el resultado de colisiones al azar entre iones y partículas, a causa del movimiento Browniano (movimiento térmico aleatorio debido a la energía cinética de iones y partículas). Al presentarse estas colisiones, los iones son atrapados por las partículas, y estas adquieren su carga (Vivas, 2007). El proceso se presenta cuando hay un campo eléctrico externo bajo o igual a cero, y puede ser caracterizado como bipolar o unipolar dependiendo de la polaridad de los iones presentes en el gas.

La Figura 1-3 presenta el método de carga unipolar del aerosol, seguido de la detección con electrómetros, empleado en el Miniature Diffusion Size Classifier (DiSCmini, por su

nombre comercial) creado por Fierz (M. Fierz, 2011). En ella, se puede observar que el aerosol es cargado en un difusor eléctrico estándar positivo unipolar, el cual imparte una carga promedio a las partículas, aproximadamente proporcional al diámetro de las partículas.

**Figura 1-3.** Visión esquemática del DiSCmini: El aerosol se carga en un cargador de corona unipolar que controla la corriente de carga, el exceso de iones es eliminado en la trampa de iones, y el aerosol cargado se mide en dos etapas de electrómetro (D = etapa de difusión, M = etapa de filtro), permitiendo determinar el tamaño de las partículas y cantidad.



**Fuente:** (M. Fierz, 2011)

Después de la carga, el exceso de iones se elimina en una trampa de iones. Las partículas cargadas fluyen a través de una fase de difusión, que es básicamente en una pila aislada conectada a un electrómetro sensible. Algunas de las partículas son capturadas en esta etapa y generan una difusión  $I_{difusión}$ , mientras que las partículas restantes en el flujo pasan a una segunda etapa que cuenta con un Filtro de Alta Eficiencia de Arrastre de Partículas (HEPA, por sus siglas en inglés), donde todas las partículas son capturadas, y se genera la corriente  $I_{filtro}$ .

### 1.6.2 Determinación de la Dosis de Inhalación Promedio

La dosis se considera como la cantidad de contaminante en forma biológica disponible que ingresa al cuerpo de los seres vivos. Existen cuatro (4) tipos de dosis (United States Environmental Protection Agency, 2016), los cuales se presentan a continuación.

- **Dosis Potencial:** Cantidad de contaminante inhalado (ubicado en la boca o la nariz), parte del contaminante no es absorbido por el cuerpo.
- **Dosis Aplicada:** Cantidad de contaminante en la barrera de absorción (tracto respiratorio) que puede ser absorbida por el cuerpo.

- **Dosis Interna:** Cantidad de contaminante que pasa la frontera de cambio (pulmón) y entra a la sangre, o la cantidad de contaminante que puede interactuar con los órganos y tejidos para causar efectos biológicos.
- **Dosis Biológica:** Cantidad de contaminante que interactúa con el tejido interno objetivo u órganos.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) recomienda emplear la Dosis de Inhalación Potencial Diaria Promedio - ADD (*Average Daily Dose*) o Tasa Potencial para determinar el nivel de exposición personal

El cálculo de la Dosis de Inhalación Potencial Diaria Promedio - ADD o Tasa Potencial es resultado de factores como la concentración del contaminante, la tasa de inhalación, tiempo de exposición, frecuencia de exposición, duración de la exposición y peso corporal.

La ADD generalmente es expresada como masa de contaminante por unidad de peso corporal sobre tiempo (mg/kg-día). La Ecuación 1-1 presenta su cálculo.

$$ADD = \frac{C_{air} * InhR * ET * EF * ED}{BW * AT} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Donde:

ADD = Dosis de Inhalación Potencial Diaria Promedio (mg/kg-día)

$C_{air}$  = Concentración de contaminante en el aire (mg/m<sup>3</sup> o partículas/cm<sup>3</sup>)

InhR = Tasa de Inhalación (m<sup>3</sup>/hora), representa el volumen de aire inhalado en un periodo de tiempo. Periodos largos de inhalación normalmente se expresan en unidades de m<sup>3</sup>/día, periodos cortos se relacionan típicamente a niveles de actividad y se expresan en unidades de m<sup>3</sup>/hora o m<sup>3</sup>/minuto.

ET = Tiempo de exposición (horas/día)

EF = Frecuencia de Exposición (días/año)

ED = Duración de la Exposición (años), hace referencia a la cantidad de tiempo que un individuo o población está expuesta al contaminante evaluando y típicamente se da en años.



AT = Tiempo promedio (días) es la cantidad de tiempo sobre el cual se promedia la exposición y es igual a la Duración de Exposición (ED) para evaluar los contaminantes que no presentan riesgo cancerígeno. Para las evaluaciones de contaminantes crónicos (por ejemplo el cáncer), el tiempo promedio es sustituido por la dosis diaria promedio en el tiempo de vida (LADD) en donde el tiempo de vida (LT, en días) se sustituye por AT.

BW = Peso corporal (kg)

### **1.6.3 Estudios de exposición de viajeros pendulares a UFP**

A nivel mundial se han realizado un gran número de estudios orientados a determinar el nivel de exposición de la población a partículas ultrafinas, durante sus desplazamientos en diferentes medios de transporte. La Tabla 1-2 presenta estudios realizados a nivel mundial sobre la exposición de partículas ultrafinas en medios de transporte.



**Tabla 1-2.** Revisión bibliográfica estudios de concentraciones de UFP en el mundo.

Referencia	Parámetro(s) de medición	Materiales e Instrumentos empleados	Lugar	Metodología	Medios de Transporte	Número de repeticiones	Hora	Resultados Obtenidos
(Zwack, Paciorek, Spengler, & Levy, 2011)	Partículas Ultrafinas (<6nm)	- Contador de partículas de condensación a base de agua (WCPCs) - TSI, Minneapolis, Modelo 3781. -Dispositivo GPS para registro de tiempo y locación. -Registrador de datos HOBO Pro (ONSET Computer Corporation, Bourne, MA) para medición de temperatura y humedad relativa. -Estación meteorológica WeatherWizard III (Davis Instruments Corp., Hayward, CA) para registro de velocidad del viento y dirección, ubicadas en las azoteas de 3 edificios dentro del área de influencia. -Contador automático de tráfico.	Nueva York, USA	Se realizó una campaña de monitoreo móvil de 3 semanas. Se usaron 3 sets de monitoreo durante 2 sesiones diarias de 3 horas	Caminata	2 viajes diarios durante 3 semana en 4 zonas (Total 120 repeticiones)	9:00 am–12:00 pm  2:00pm – 5:00pm	5.7E+04 partículas/ vehículo-km
(Knibbs & de Dear, 2010)	Partículas Ultrafinas (Rango 10nm a > 1000nm) And P.M 2,5	Contador de partículas de condensación - A TSI 3007	Sídney, Australia	Las mediciones se realizaron durante los desplazamientos en una ruta similar. Se llevó a cabo un viaje en cada modo de transporte durante las dos de la mañana y de la tarde horas punta en toda una semana de trabajo , para un total de 40 viajes	Tren Autobús Ferry Automóvil	2 viajes diarios durante 1 semana por c/medio de transporte (Total 40 repeticiones)	2:00a.m. 2:00p.m.	2.8E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en tren 8.4E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en bus 7.5E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en auto 3.7E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en ferry

Referencia	Parámetro(s) de medición	Materiales e Instrumentos empleados	Lugar	Metodología	Medios de Transporte	Número de repeticiones	Hora	Resultados Obtenidos
(Zuurbier et al., 2010)	Partículas ultrafinas, PM <sub>2.5</sub> .	Reflectómetro (modelo M43D, Difusión Systems Ltd., Londres, Reino Unido)	Arnhem, Países Bajos	Se realizaron mediciones en automóviles a diésel y gasolina, buses eléctricos y a diésel y bicicleta. La tasa de ventilación por minuto se midió en 34 voluntarios. Se empleó la misma ruta con una extensión de 22km para los 3 medios de transporte. Los automóviles condujeron la ruta dos veces, los autobuses la recorrieron alrededor de uno y dos tercios de veces, y las bicicletas fueron conducidas alrededor de una vez y se duplicaron en una pequeña parte (10 %) de la ruta para completar 2 horas. Se midió la reflectancia en 5 posiciones diferentes en cada filtro y se calculó la media en un coeficiente de absorbancia.	Bicicleta Automóvil Autobús	15 bicicleta, 15 automóvil, 15 bus (Total repeticiones 47)	8:00am – 10:00am	3.85E+04 partículas/cm <sup>3</sup> para buses diésel  4.66E+04 partículas/cm <sup>3</sup> para ciclistas en vías con alta intensidad de tráfico  2.92E+04 partículas/cm <sup>3</sup> en buses eléctricos
(Wang, Costabileb, Li, Fang, & Alligrini, 2010)	Partículas ultrafinas, partículas de aerosoles atmosféricos	-Sistema de escaneo de partículas por tamaño (SMPS 3936, TSI) -Analizador de la movilidad diferencial manométrica (N-DMA 3085) -Velocidad del viento (GILL UVW Anemómetro / YOUNG)	Roma, Italia.	Mediciones en puntos fijos de las vías. Entre las opciones de software de las propiedades físicas, la difusión fue etiquetada para la corrección de la pérdida de difusión dentro de la SMPS. Las pérdidas		24 mediciones	ND	1.9E+04 partículas/cm <sup>3</sup>

Referencia	Parámetro(s) de medición	Materiales e Instrumentos empleados	Lugar	Metodología	Medios de Transporte	Número de repeticiones	Hora	Resultados Obtenidos
		-Precipitación (Pluviómetro / LSI-LASTEM) -Humedad y Temperatura (Termo higrómetro / LSI-LASTEM) -Radiación (Radiómetro Global / LSI-LASTEM) -Presión Barométrica (sensor / LSI-LASTEM)		sufridas durante el muestreo no se corrigieron. EL tiempo de medición de la concentración del número de partículas fue de 5 min Se empleó el programa Sigmaplot (Versión 9) para el análisis de datos.	Estación de Tren  2 Vías			
(Berghmans et al., 2009)	Partículas Ultrafinas (0.02 – 1 mm) y PM <sub>10</sub>	-Contador de partículas de condensación a base de alcohol isopropílico – P-TRAKs (TSI Modelo 8525)  -GPS comercial  -Video Cámara	Flanders, Bélgica.	Se seleccionaron 2 rutas que incluyeran 4 áreas de la ciudad (vía nacional, centro de la ciudad, área residencial y complejo deportivo)  6 mediciones se realizaron en una ruta de 17km de largo (1 hora) y 1 en una ruta de 6km de longitud (20 min).	Bicicleta	7 mediciones, distribuidas en 2 rutas	7:30am – 8:30am  11:49am – 12:49pm  6:33am – 7:28am  2:04pm – 3:03pm  7:29am – 7:48am  7:40am – 8:39am	2.1E+04 partículas/cm <sup>3</sup>
(Cheng, Liu, & Lin, 2009)	Partículas Ultrafinas	-Contador de partículas por condensación (CPC) -Sistema de escaneo de partículas por tamaño (SMPS) -Impactador eléctrico de baja presión (ELPI) -Impactador de cascada con nano micro-orificio (NanoMOUDI)	Taipéi, China	Las mediciones se realizaron en 4 rutas del metro y 5 estaciones, las mediciones se realizaron de forma aleatoria.  Cada medición tuvo una duración de 1 hora.	Metro	ND	7:00am – 9:00 am    5:00pm – 7:30pm	1.55E+04 partículas/cm <sup>3</sup> en las plataformas de las estaciones    1.06E+04 partículas/cm <sup>3</sup>
(Barone & Zhu, 2008)	Partículas Ultrafinas (50 nm)	-Muestreador de aerosol nanométrico -Microscopio electrónico de transmisión	Los Ángeles. U.S.A	Las muestras fueron tomadas mientras se conducía en 2 vías de Los Ángeles, durante 1 hora.	Automóvil	9 mediciones	10:00am – 2:00pm	5.25E+04 partículas/cm <sup>3</sup>

Referencia	Parámetro(s) de medición	Materiales e Instrumentos empleados	Lugar	Metodología	Medios de Transporte	Número de repeticiones	Hora	Resultados Obtenidos
		-Analizador de movilidad diferencial (DMA, Modelo 3080, TSI Inc., Shoreview, MN) -Muestreador de nano-aerosoles (NAS, Modelo 3089, TSI Inc., Shoreview, MN)						
(Kaur et al., 2006)	Partículas Ultrafinas (0.02 – 1 µm)	Contador de partículas de condensación a base de alcohol isopropílico – P-TRAKs (TSI Modelo 8525)	Londres, Inglaterra	Las mediciones se realizaron en 2 rutas (tráfico promedio de 83.000 y 18.000 vehículos diarios)	Caminata Bicicleta Autobús Automóvil Taxi	3 viajes diarios durante 3 semanas en 2 vías y 5 medios de transporte (Total 450 repeticiones)	ND	4.6E+04 partículas /cm <sup>3</sup> como peatón 8.4E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en bicicleta 9.5E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en bus 3.7E+04 partículas /cm <sup>3</sup> en automóvil 1.08E+05 partículas /cm <sup>3</sup> en taxi

**Fuente:** (Knibbs & de Dear, 2010; Zuurbier, et al., 2010; Wang, Costabileb, Li, Fang, & Alligrini, 2010; Berghmans, et al., 2009; Cheng, Liu, & Lin, 2009; Barone & Zhu, 2008; Kaur, et al., 2006; Secretaria Distrital de Ambiente, 2016)

## 2. Metodología

La etapa experimental se llevó a cabo mediante el diseño de una campaña de medición de partículas ultrafinas en los modos de transporte *Bus Rapid Transit* (Transmilenio), vehículo particular, bicicleta y peatón en seis (6) vías de la ciudad caracterizadas por permitir el uso de por lo menos tres (3) de modos de transporte a analizar y el uso de un contador de partículas en tiempo real. Posteriormente, se estimó la exposición de los viajeros pendulares por modo de transporte, trayecto y vía empleando la ecuación establecida por la US EPA (Environmental Protection Agency , 2009).

### 2.1 Selección de corredores viales

Se realizó una campaña de medición para determinar las concentraciones de partículas ultrafinas por metro cúbico en cuatro (4) modos de transporte (*Bus Rapid Transit*, vehículo particular, bicicleta y caminata), en seis (6) vías de la ciudad de Bogotá (Calle 26, Carrera 30, Autopista Norte, Autopista Sur, Carrera Séptima y Avenida Caracas; la Carrera 13 se usará para hacer las mediciones en bicicleta a cambio de las Carrera Séptima y Avenida Caracas dado que en estas vías no se cuenta con ciclorrutas), caracterizadas por la presencia de al menos tres de los modos de transporte a analizar.

Se planteó realizar tres (3) mediciones por modo de transporte en cada vía, entre los días lunes a viernes en horas valle de la mañana (9:00 – 11:00 am). Debido a condiciones logísticas no fue posible realizar la totalidad de los desplazamientos, la Tabla 2-1 presenta la cantidad de mediciones realizadas según modo de transporte y vía.

**Tabla 2-1.** Muestreos realizados según modo de transporte y vía.

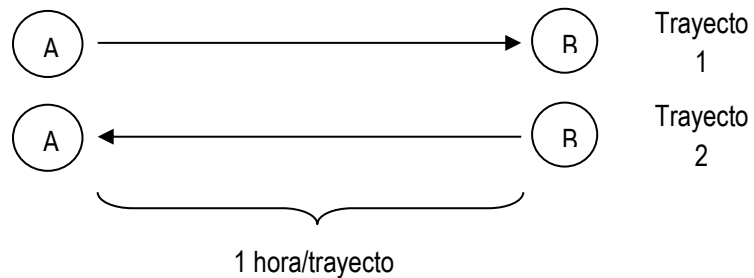
Modo de Transporte	Vías Monitoreadas						
	Calle 26	Carrera 30	Autopista Norte	Autopista Sur	Caracas	Carrera 7	Carera 13
BRT	5	4	4	2	2		
Auto	9	9	4	3	5	3	
Bicicleta	1	2	2				1
Peatón	3	2	1	1	2		

**Fuente.** El Autor.

Los desplazamientos se realizaron en hora valle con el fin de facilitar los desplazamientos con el equipo de medición y obtener las concentraciones promedio a las que se encuentra expuesto un viajero pendular.

Cada recorrido consta de dos (2) trayectos, el primero de ida desde un punto inicial A hasta un punto B y, el segundo de retorno desde del punto B hasta el punto A. La duración de cada trayecto fue de mínimo 1 hora, sin importar el modo de transporte empleado.

**Figura 2-1.** Diagrama descriptivo trayectos y recorridos.



**Fuente.** El Autor.

No se realizaron mediciones de concentración de UFP bajo condiciones de alta humedad relativa o lluvia, con el fin de realizar comparaciones bajo condiciones meteorológicas similares y como requerimiento del equipo para trabajar en condiciones óptimas.



La Tabla 2-2 presenta los modos de transporte empleados en cada vía objeto del presente estudio.

**Tabla 2-2.** Modos de transporte monitoreados por vía.

<b>Modo de Transporte</b>	<b>Vías Monitoreadas</b>					
<i>BRT</i>	Calle 26	Carrera 30	Autopista Norte	Autopista Sur	Caracas	Carrera 7
<i>Auto</i>	Calle 26	Carrera 30	Autopista Norte	Autopista Sur	Caracas	Carrera 7
<i>Bicicleta</i>	Calle 26	Carrera 30	Autopista Norte	Carrera 13		
<i>Peatón</i>	Calle 26	Carrera 30	Autopista Norte	Autopista Sur	Caracas	

**Fuente.** El Autor.

La cobertura de las vías por modo de transporte se presenta en la Tabla 2-3:

**Tabla 2-3.** Cobertura vía por modo de transporte.

<b>Cobertura de la Vía</b>	<b>Modo de Transporte</b>			
	<b>Bus Rapid Transit (Transmilenio)</b>	<b>Vehículo particular</b>	<b>Bicicleta</b>	<b>Caminata</b>
	Calle 26 desde el Portal el Dorado hasta el Portal Norte, tomando la Carrera 30 en sentido norte desde la Calle 26.	Calle 26 desde la estación Quinta Paredes hasta el Portal del Norte, tomando la Carrera 30.	Calle 26 desde estación Quinta Paredes hasta Portal El Dorado.	Calle 26 desde estación Quinta Paredes hasta estación Modelia.
	Calle 26 desde el Portal el Dorado hasta San Mateo, tomando la Carrera 30 hacia el sur desde la Calle 26.	Carrera 30 desde la intersección con la Av. Américas hasta la estación San Mateo, tomando la Carrera 30 al sur.	Carrera 30 desde Calle 6 sur hasta intersección Autopista Norte.	Carrera 30 desde Calle 6 sur hasta la Calle 53.
	Calle 26 desde Portal el Dorado hasta estación Alcalá sobre la Avenida Caracas.	Av. Caracas desde la Calle 26 hasta el Portal del Norte.	Autopista Norte desde la Calle 116 hasta estación Cardio Infantil.	Autopista Sur desde estación Alquilería hasta Portal del Sur.
	Calle 26 desde el Portal el Dorado hasta la estación Museo Nacional, ubicado en la Carrera 7.	Calle 26 desde estación Quinta Paredes hasta Carrera 7 con Calle 116.	Carrera 13 desde la Calle 33 hasta la Calle 63.	Av. Caracas desde la Calle 26 hasta estación Flores.

		<p>Carrera Séptima desde la Calle 33 hasta la Calle 72 (recorrido realizado durante ciclovía).</p>	<p>Autopista Norte desde la Calle 116 hasta estación Cardio Infantil.</p>
--	--	--	---

**Fuente.** El Autor.

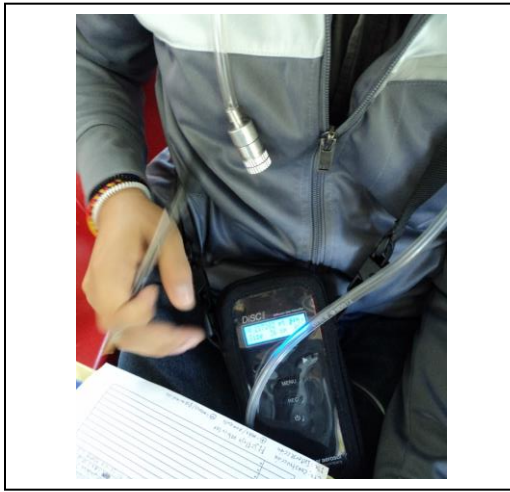
Como se puede observar en la Tabla 2-3, los modos de transporte con mayor velocidad de desplazamiento logran cubrir 2 o 3 vías en un solo recorrido, por tal razón la caminata y la bicicleta requirieron un mayor número de recorridos. Dado que solo se contó con un equipo, las mediciones no se realizaron de forma paralela o simultánea en diferentes modos de transporte, lo cual habría sido deseable.

## 2.2 Determinación de Concentración de UFP – Monitoreo con equipo DiSCmini

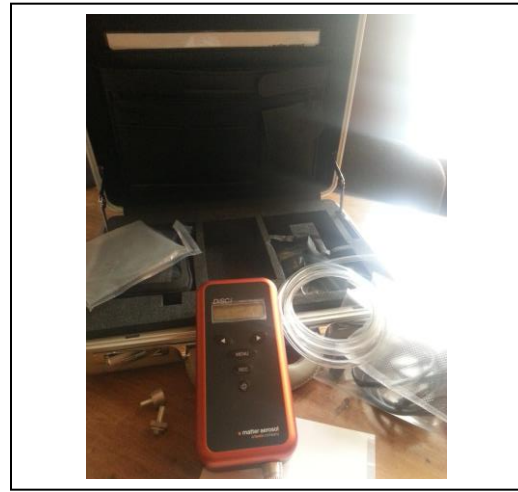
Los niveles de UFP se midieron usando un monitor DiSCmini® (Matter Aerosol, Suiza), el cuál es un contador de partículas óptico y portátil, con una frecuencia de registro de 1 Hz. Durante cada periodo de medición la sonda de muestreo del instrumento, se ubicó a la altura de la solapa de la persona que realizo el muestreo. Se usó una bitácora para registrar la presencia de vehículos pesados, emisiones visibles y alto potencial de contaminación, intersecciones viales y observaciones meteorológicas cualitativas.

La calibración del equipo se realiza en fábrica de manera anual, con un aerosol de Cloruro de Sodio (NaCl) casi mono-disperso, en el que se verifica el tamaño de partículas entre 20 y 240 nm. El DiSCmini empleado para el presente estudio se calibró en el mes Septiembre del 2014 y en Noviembre de 2015.

**Figura 2-2.** Desplazamientos campaña de monitoreo. (a) Mediciones con equipo DiSCmini en BRT. (b) Equipo DiSCmini. (c) Mediciones con equipo DiSCmini como peatón.



(a)



(b)



(c)

Los muestreos en los modos de BRT y automóvil se realizaron con el aire acondicionado apagado y las ventanas delanteras ligeramente abiertas (10-20 cm). Las mediciones en los modos de transporte bicicleta y peatón se hicieron sobre la ciclorruta o a una distancia de 3-5 metros de la carretera.

Dos (2) mediciones se llevaron a cabo por modo de transporte a lo largo de cada vía entre lunes y viernes en las horas de la mañana (9:00 a 11:00 am) durante aproximadamente 1 hora.

Se aplicó una prueba t-Student para muestras independientes para probar las diferencias en los niveles de UFP entre modos de transporte y sentido a lo largo de la misma vía. Para evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los modos de transporte en las medias geométricas generales de las mediciones de las UFP, se confirmó la homocedasticidad mediante el test de Levene antes de la aplicación de la prueba de ANOVA en una sola vía.

Se filtraron los datos obtenidos con el equipo DiSCmini, separando los valores que se obtuvieron en corredores viales que no fueron objeto de monitoreo del presente estudio, así como los valores de concentraciones superiores a 1'000.0000 de partículas/cm<sup>3</sup>, siendo este el nivel máximo de medición para el equipo. La clasificación de datos se realizó por modo de transporte, vía y sentido de circulación. Los datos clasificados fueron analizados empleando el test t-Student, el test de Levene y por último la prueba de ANOVA en una sola vía.

## 2.3 Determinación de la Dosis de Inhalación Promedio

La exposición se estimó como dosis diaria de partículas ultrafinas (ADD) según el modo de transporte, trayecto y vía con base a la fórmula establecida en el Manual de factores de exposición de la EPA-US expresada en la sección 1.6.2.

Para las características intrínsecas de la población, se tomó una mujer y un hombre adulto promedio. La US EPA, en el desarrollo de la distribución estadística o rangos de factores estándar empleados en la evaluación de la exposición (United States Environmental Protection Agency, 1985), estableció valores de tasa de inhalación estándar, los cuales se tomaron como base para el presente trabajo.

De acuerdo al censo realizado en el año 2005 por el DANE, el grupo poblacional con mayor número de individuos es el establecido entre 25 – 29 años para los dos géneros, razón por la cual se tomó este grupo poblacional para la estimación de la dosis.

La Tabla 2-4 presenta los pesos promedios con los cuartiles de los mismos y sus respectivas desviaciones estándar.

**Tabla 2-4.** Peso promedio hombre y mujer adulto.

Edad	Genero	Promedio	Percentil								
			5	10	15	25	50	75	85	90	95
25 < 35	M	78,7 (0,0034)	58,4 (0,35)	61,9 (0,69)	64,6 (0,31)	68,4 (0,43)	76,7 (0,50)	84,6 (0,53)	90,2 (1,00)	94,2 (0,90)	101,3 (0,90)
	F	64,2 (0,0037)	46,4 (0,55)	48,7 (0,35)	50,2 (0,40)	53,2 (0,47)	59,9 (0,32)	68,7 (1,00)	77,3 (1,57)	83,2 (1,31)	92,7 (2,17)

**Fuente.** (United States Environmental Protection Agency, 1985)

Las tasas de inhalación estándar para la población objeto se obtuvieron de la Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos (Departamento de Salud Humana y Servicios de los Estados Unidos, 1992). La tasa de dosis empleada para los desplazamientos realizados como peatón fue la establecida por Lordo (Lordo, Stanford, & Mohnson, 2006), como actividad “light intensity”. La Tabla 2-5 presenta las tasas de inhalación de un hombre y una mujer promedio en descanso y actividad ligera.

**Tabla 2-5.** Valores de Inhalación Estándar

Volumen/minuto (L/min)	Hombre	Mujer
Descanso	7,5	6,0
Actividad Moderada	20,0	19,0
Actividad Ligera	12,97	10,55

**Fuente.** (Departamento de Salud Humana y Servicios de los Estados Unidos, 1992; Lordo, Stanford, & Mohnson, 2006)

Estos valores fueron empleados en el cálculo de la dosis diaria de partículas ultrafinas (ADD). Adicionalmente se consideraron variaciones en los datos de frecuencia y tiempo de exposición, empleando los valores de la encuesta de movilidad del año 2015 (Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria Distrital de Movilidad, 2015), en uno de los casos, desplazamientos fijos con variaciones de tiempo y tiempos fijos con variaciones de desplazamiento, en los otros dos.

Por su parte, la Tasa de inhalación fue manejada en cm<sup>3</sup>/hora, con el fin de emplear las mismas unidades de medida.

## 3. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del monitoreo de partículas ultrafinas realizado durante los meses de noviembre de 2014 a diciembre de 2015 en los modos de transporte *Bus Rapid Transit* (BRT), automóvil, bicicleta y peatón sobre la Calle 26, Avenida NQS, Autopista Norte, Autopista Sur, Carrera Séptima, Avenida Caracas y Carrera 13. Se presenta el análisis de los niveles de contaminación por UFP y las dosis de los viajeros pendulares.

### 3.1 Concentraciones

A continuación se presentan las concentraciones de partículas ultrafinas encontradas en la ciudad durante el desarrollo del presente trabajo mediante el uso del contador de partículas por difusión.

#### 3.1.1 Comparación global entre modos de transporte

Debido a que no todos los modos de transporte fueron analizados en todas las vías, las concentraciones de UFP se analizaron bajo dos escenarios. El análisis Con Equivalencia presenta la misma cantidad de datos para cada modo, mientras el análisis Sin Equivalencia se realizó con el total de datos obtenidos.

El análisis Con Equivalencia, al tomar la misma cantidad de datos para cada uno de los modos de transporte, asegura condiciones de análisis sin sesgo, así como una disminución en la variabilidad de los datos.

La Tabla 3-1 presenta las mediciones realizadas en cada vía, según modo de transporte, permitiendo identificar las vías en las que no se realizaron mediciones con Bicicleta y Peatón.

**Tabla 3-1.** Desplazamientos por vía, según modo de transporte.

Vía	Modo (km recorridos)			
	BRT	Automóvil	Bicicleta	Peatón
Calle 26	X	X	X	X
Carrera 30 N	X	X	X	X
Carrera 30 S	X	X	X	X
Auto Norte	X	X	X	X
Auto Sur	X	X		X
Caracas	X	X		X
Carrera 7	X	X		
Carrera 13			X	

**Fuente:** El Autor.

### 3.1.1.1 Análisis sin Equivalencia

Los valores promedios de concentración de UFP se encontraron en la misma escala logarítmica, indicando bajas diferencias entre todos los modos de transporte. Los dos modos con mayores concentraciones fueron la bicicleta y el automóvil con  $1,7 \times 10^5$  y  $1,6 \times 10^5$  partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente. Las concentraciones encontradas en BRT y peatón fueron similares entre ellas y presentaron una disminución de aproximadamente  $1,01 \times 10^5$  con respecto a los demás modos. Los desplazamientos en bicicleta presentaron la mayor dispersión de datos, seguidos por aquellos en automóvil, como se presenta en la Tabla 3-2.

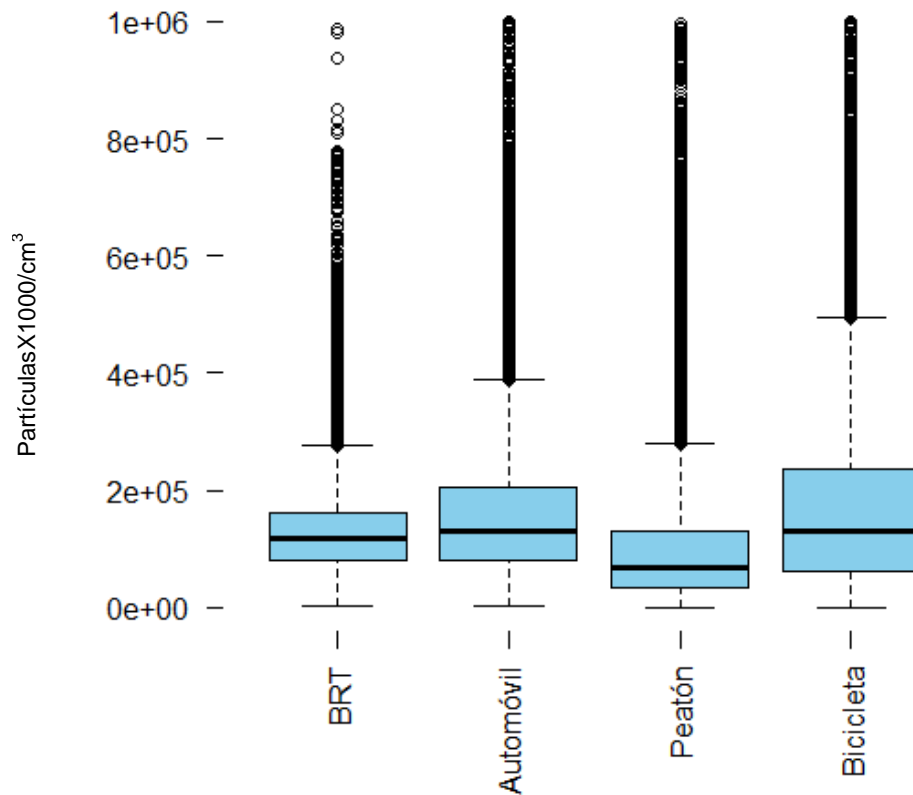
**Tabla 3-2.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo de transporte en la ciudad de Bogotá sin Equivalencia.

Modo de Transporte	Min	Max	Promedio	Mediana	Primer Cuartil	Tercer Cuartil	Desviación Estándar
BRT	1,23E+03	9,88E+05	1,29E+05	1,17E+05	8,18E+04	1,60E+05	7,00E+04
Auto	3,32E+03	9,99E+05	1,61E+05	1,30E+05	8,20E+04	2,05E+05	1,16E+05
Peatón	1,01E+03	9,97E+05	1,02E+05	6,82E+04	3,29E+04	1,31E+05	1,08E+05
Bicicleta	2,74E+02	9,99E+05	1,71E+05	1,30E+05	6,12E+04	2,35E+05	1,48E+05

**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-1 presenta el consolidado de la concentración de partículas ultrafinas en los modos de transporte objeto de estudio (BRT, Auto, Peatón y Bicicleta) en las seis (6) vías seleccionadas.

**Figura 3-1.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en diferentes modos de transporte. Notas: Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente.** El Autor.

La mayor desviación estándar de los datos se puede observar en las medidas por bicicleta, lo cual sugiere una alta asimetría de los mismos, seguido por el automóvil, peatón y BRT.

La cercanía de las ciclorrutas a las vías y la alta influencia de las emisiones frescas de los vehículos parecen explicar la alta concentración a lo largo de las ciclorrutas. No ocurre lo mismo con las zonas de circulación de peatones, a pesar de que son contiguas



a las ciclorrutas. La corta distancia adicional sobre los andenes parece ser suficiente para que las concentraciones de partículas sean reducidas.

La Tabla 3-3 presenta un análisis numérico con el Rango Intercuartil, valores de Asimetría y Curtosis, que permiten establecer con mayor claridad el comportamiento de las concentraciones de UFP.

**Tabla 3-3.** Análisis numérico entre modos sin equivalencia.

<i>Modo de Transporte</i>	<i>Rango Intercuartil</i>	<i>CV</i>	<i>Skewness (Asimetría)</i>	<i>Curtosis</i>
<i>BRT</i>	7,84E+04	0.54	2.23	11.69
<i>Auto</i>	1,23E+05	0.72	1.93	5.61
<i>Peatón</i>	9,83E+04	1.06	2.73	11.10
<i>Bicicleta</i>	1,73E+05	0.87	1.68	3.79

**Fuente.** El Autor.

El alto rango intercuartil para los modos de transporte automóvil y bicicleta indican una baja agrupación en los datos, así como una alta desviación estándar, que se traduce en una varianza elevada. Las medias para el modo BRT presentan una desviación bastante baja con relación a los demás modos, lo cual indica que los datos pueden presentar una agrupación central.

Los elevados valores de asimetría o skewness observados sugieren que los datos en todas las mediciones presentan una desviación considerable más no excluyente, indicando que existe una gran cantidad de datos fuera de los cuartiles, como se puede evidenciar en la Figura 3-1.

Por su parte la curtosis es una medida de la forma, donde valores cercanos a 3 indican que los datos se asemejan a una distribución normal. En este caso, las mediciones para desplazamiento en bicicleta se encuentran muy cercanas a este valor, lo cual permite pensar que si se establece una función de probabilidad, la que más probablemente se ajuste sea la normal; los demás modos, debido a sus valores altos de curtosis, indican que las distribuciones más cercanas al modelo de los datos son apuntaladas.

Los datos máximos y media en todas las mediciones son muy similares, probablemente debido a que los valores de UFP medidos son muy similares, independientemente del modo de transporte.

Los datos mínimos más bajos observados se encuentran en las mediciones con bicicleta y peatón respectivamente debido a la distancia que existe entre la fuente y la medición en algunos sectores del recorrido.

En este análisis, debido a que no se cuenta con el mismo número de mediciones en cada modo de transporte, no es conveniente realizar un estudio completo multivariado, ya que no se cuenta con igualdad de condiciones de medida y muestra.

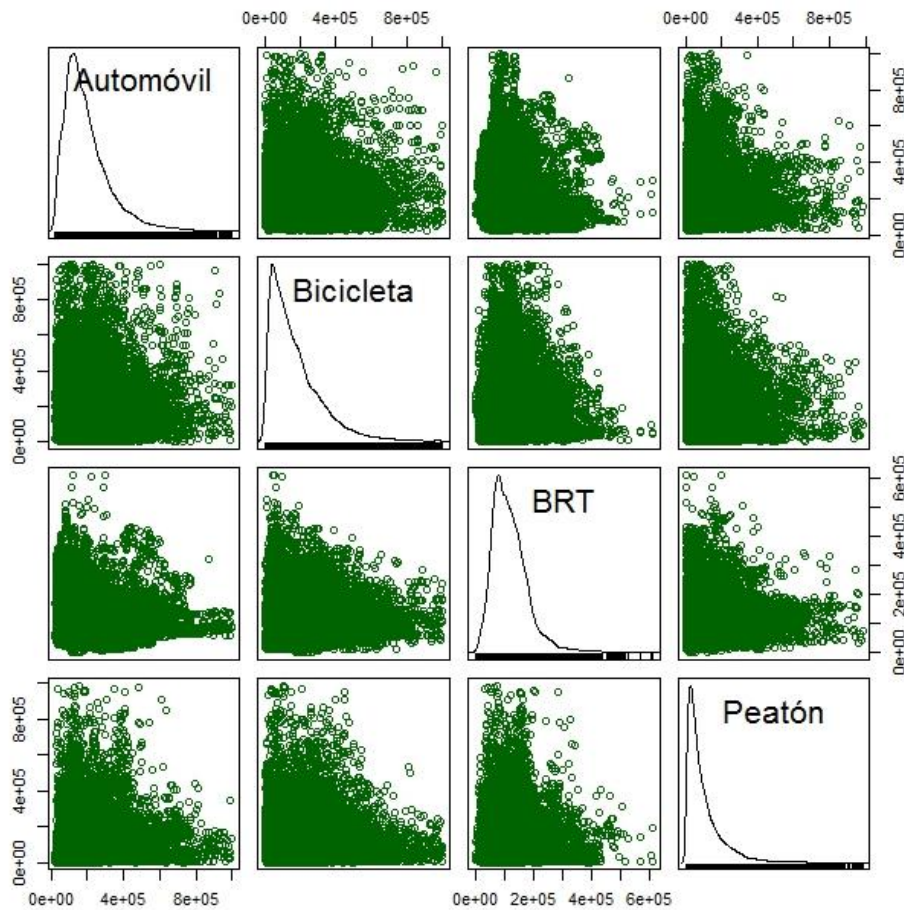
La Figura 3-2 presenta la comparación entre los gráficos de dispersión de los modos de transporte analizados. Se puede observar que la distribución de todos los modos presenta asimetría a la derecha o positiva, así como un comportamiento leptocúrtico<sup>1</sup>, debido a que sus valores de curtosis son superiores a 3<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Gráficas que presentan una forma más apuntada y con colas menos anchas que la normal.

<sup>2</sup> Valor establecido en la curtosis, para que las gráficas presenten una distribución normal.

**Figura 3-2.** Matriz de diagramas de Dispersión UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) según modo de transporte. Nota: Diagrama de dispersión indica la relación de las concentraciones de UFP entre los modos de transporte analizados.

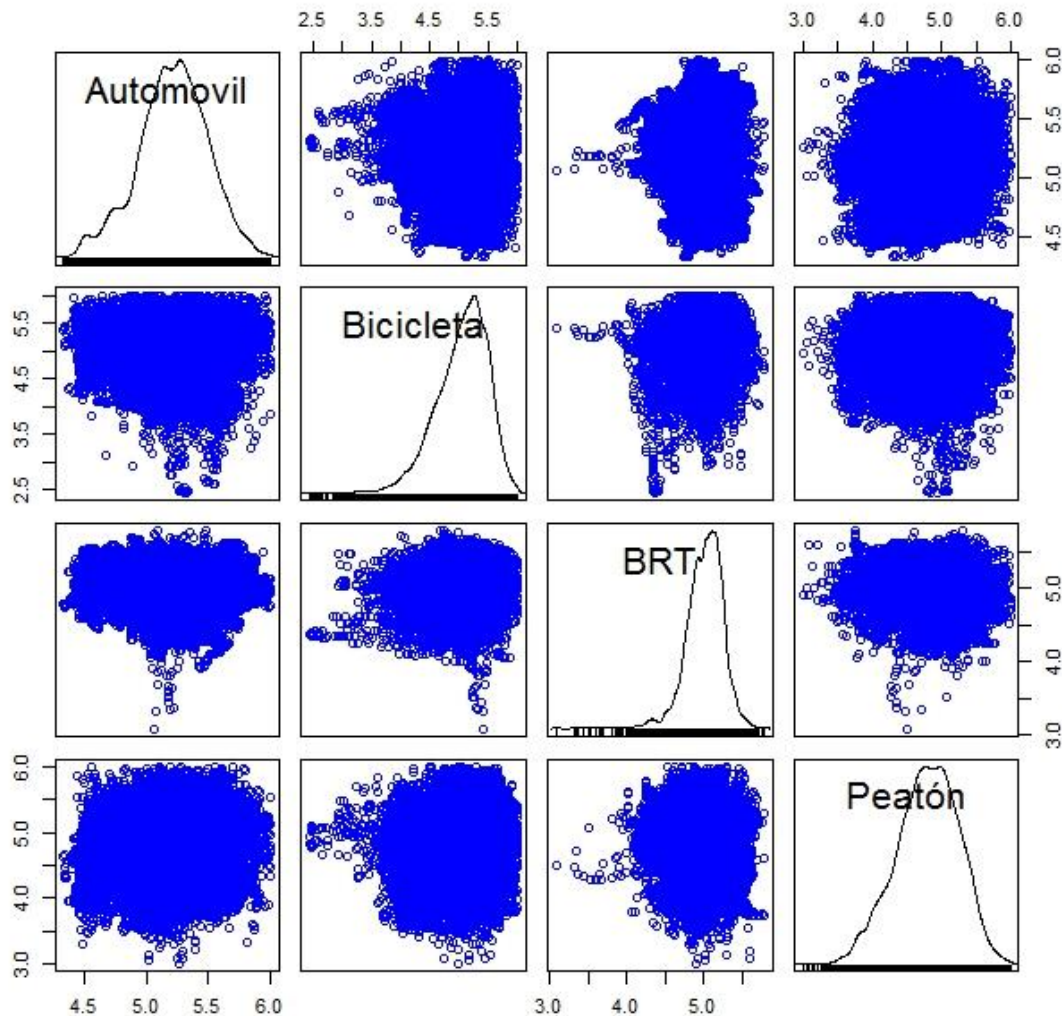


**Fuente:** El Autor.

Debido a que las mediciones con BRT y Bicicleta presentan valores de curtosis muy cercanos a 3, se puede concluir que son las más oprobadas a presentar un comportamiento normal.

Las concentraciones de contaminantes atmosféricos presentan generalmente una distribución Lognormal. La Figura 3-3 presenta la distribución de las concentraciones de UFP en base logarítmica.

**Figura 3-3.** Matriz de Diagramas de Dispersión UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) según modo de transporte en base logarítmica. Nota: Diagrama de dispersión indica la relación de las concentraciones de UFP entre los modos de transporte analizados.



**Fuente:** El Autor.

Los modos de transporte de BRT y bicicleta presentaron una distribución cercana a la normal bajo el análisis con base logarítmica, al igual que el análisis realizado sin ella.

**Tabla 3-4.** Análisis numérico entre modos sin equivalencia con base logarítmica.

<b>Modo de Transporte</b>	<b>Rango Intercuartilico</b>	<b>CV</b>	<b>Skewness (Asimetría)</b>	<b>Curtosis</b>
<i>BRT</i>	0.29	0.04	-0.52	1.75
<i>Auto</i>	0.39	0.06	-0.21	0.17
<i>Peatón</i>	0.60	0.09	-0.30	-0.07
<i>Bicicleta</i>	0.58	0.08	-0.80	1.31

**Fuente.** El Autor.

El rango intercuartil presenta la mayor dispersión de datos en los modos de peatón y bicicleta, indicando que el análisis con base logarítmica y sin esta presenta diferencias en la concentración de los datos, más no en la distribución de los mismos.

### 3.1.1.2 Análisis con Equivalencia

El análisis con equivalencia se realizó igualando la cantidad de datos obtenidos en las mediciones, con el fin de obtener un resultado comparativo. La cantidad de datos analizados por modo fue de 28.237, cantidad máxima de datos obtenida para el modo de bicicleta.

La Tabla 3-5 presenta el análisis descriptivo de las concentraciones de UFP con equivalencia en la cantidad de datos.

**Tabla 3-5.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo de transporte en la ciudad de Bogotá con Equivalencia.

<b>Modo de Transporte</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mediana</b>	<b>Primer Cuartil</b>	<b>Tercer Cuartil</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<i>BRT</i>	1,23E+03	6,08E+05	1,18E+05	1,09E+05	7,59E+04	1,50E+05	5,97E+04
<i>Auto</i>	2,12E+04	9,99E+05	1,98E+05	1,67E+05	1,09E+05	2,52E+05	1,30E+05
<i>Peatón</i>	1,01E+03	9,85E+05	1,00E+05	6,54E+04	3,15E+04	1,30E+05	1,06E+05
<i>Bicicleta</i>	2,74E+02	9,99E+05	1,71E+05	1,30E+05	6,12E+04	2,35E+05	1,48E+05

**Fuente.** El Autor.

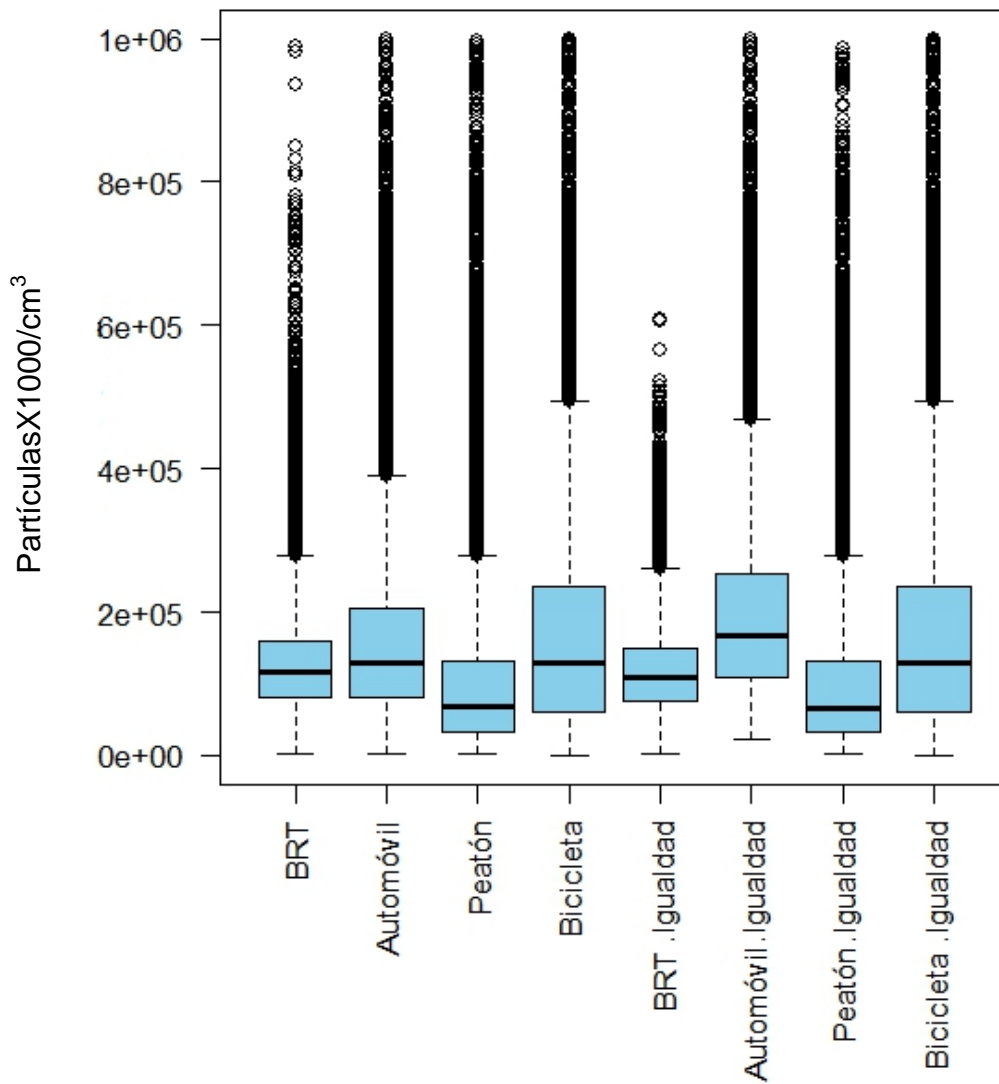
Al realizar la comparación de los promedios entre los datos sin igualdad y con igualdad, se encontró que los valores son muy similares, presentándose las mayores diferencias en el modo de automóvil y BRT con un aumento en el primero de  $1,04 \times 10^4$  y una disminución de  $3,74 \times 10^4$  en el segundo.

Las desviaciones estándar son bastantes altas, exceptuando el modo BRT, lo cual indica un agrupamiento central de datos en este medio de transporte. Los demás modos de

transporte presentaron comportamientos muy similares con respecto a los datos sin equivalencia.

La Figura 3-4 presenta la comparación entre el comportamiento de la concentración de partículas ultrafinas en los modos de transporte con igualdad de datos y sin ella, en las seis (6) vías seleccionadas.

**Figura 3-4.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) con igualdad y sin igualdad de datos en diferentes modos de transporte. Nota: Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

La Tabla 3-6 presenta un análisis numérico de los datos con equivalencia, en el que se indica el Rango Intercuartil, valores de Asimetría y Curtosis, que permiten establecer con mayor claridad el comportamiento de las concentraciones de UFP.

**Tabla 3-6.** Análisis numérico entre modos con equivalencia.

<i>Modo de Transporte</i>	<i>Rango Intercuartil</i>	<i>CV</i>	<i>Skewness (Asimetría)</i>	<i>Curtosis</i>
<i>BRT</i>	7,37E+04	0.50	1.37	3.91
<i>Auto</i>	1,43E+05	0.65	1.68	4.09
<i>Peatón</i>	9,90E+04	1.05	2.62	10.33
<i>Bicicleta</i>	1,73E+05	0.87	1.68	3.79

**Fuente.** El Autor.

El alto rango intercuartil aumentó para todos los modos de transporte, excepto para la bicicleta, en la cual se mantuvo estable, dado que es el modo de transporte tomado como referencia para la equivalencia de datos.

La asimetría y la curtosis observadas disminuyeron considerablemente, debido probablemente a que en el análisis sin equivalencia existía la presencia de datos atípicos que sesgaban la medida.

Los valores máximos son similares en todos los modos de transporte, exceptuando el BRT, donde el valor máximo obtenido en los datos con equivalencia es menor, debido probablemente a que durante las mediciones adicionales realizadas se presentó un evento de altas concentraciones de partículas UFP.

Las medias sin embargo, presentan valores similares, indicando que el evento con valores superiores de emisiones presenta un bajo nivel de representatividad en el conjunto total de datos.

Se puede establecer que las variaciones entre los dos grupos de datos no son significativos. Sin embargo, en el análisis con equivalencia, el promedio del modo de automóvil aumentó, pasando a ser el modo con mayor concentración, seguido de la bicicleta.

La asimetría y curtosis muestran que se obtuvo una mayor centralización de los datos, excepto para el modo de peatón.

### 3.1.1.3 Análisis ANOVA para Modos de Transporte

El análisis ANOVA se realizó tomando los datos con equivalencia, analizando el promedio de las concentraciones de UFP en cada una de las vías por modo, como se presenta en la Tabla 3-7.

**Tabla 3-7.** Concentraciones promedio de UFP por modo según vía.

Vía	Concentración UFP			
	BRT	Automóvil	Bicicleta	Peatón
<i>Calle 26</i>	1,12E+05	2,10E+05	1,76E+05	8,82E+04
<i>Carrera 30</i>	1,33E+05	1,97E+05	1,85E+05	1,38E+05
<i>Auto Norte</i>	1,23E+05	1,81E+05	1,62E+05	6,59E+04
<i>Auto Sur</i>	1,13E+05	2,14E+05	1,74E+05	1,61E+05
<i>Caracas</i>	9,41E+04	1,22E+05	1,74E+05	9,13E+04

**Fuente:** El autor.

Se establecieron convenciones para los modos, siendo BRT (I), automóvil (II), bicicleta (III) y peatón (IV). La Tabla 3-8 presenta el análisis descriptivo de los datos luego de ser agrupados por modo para el Análisis de Varianza (ANOVA).

**Tabla 3-8.** Análisis estadístico ANOVA por modos de transporte.

	Promedio	Desviación Estándar	se (mean)	Rango Intercuartil	Skewness (Asimetría)	Curtosis
<i>BRT</i>	1,15E+05	1,46E+04	6,55E+03	1,41E+04	-0.34	0.06
<i>Automóvil</i>	2,02E+05	1,07E+04	4,80E+03	1,60E+04	0.44	-1.79
<i>Bicicleta</i>	1,72E+05	1,00E+04	4,50E+03	7,06E+03	-1.32	2.00
<i>Peatón</i>	1,05E+05	3,92E+04	1,75E+04	5,27E+04	0.53	-0.77

**Fuente:** El Autor.

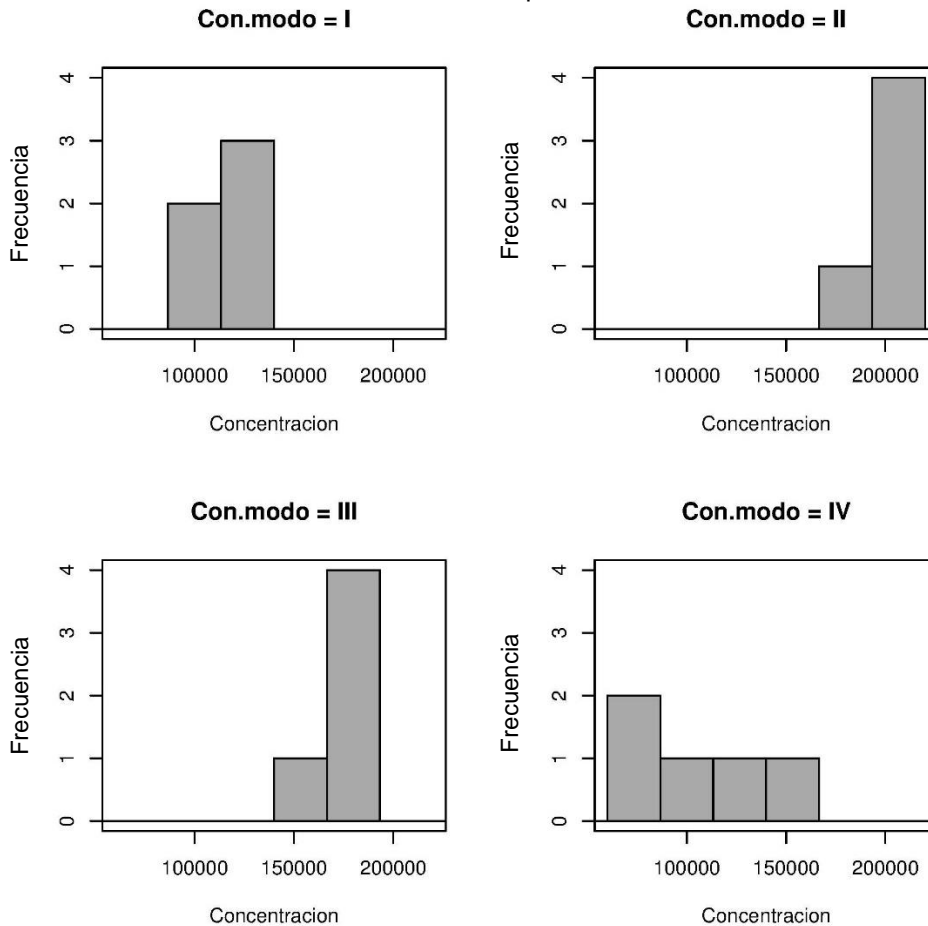
La mayor concentración de UFP se presentó en el modo automóvil, seguido de bicicleta, BRT y peatón, al igual que en los análisis iniciales.

Con el fin de determinar la distribución del promedio total de concentraciones de UFP, se empleó el Test de Normalidad Shapiro, obteniendo un p-valor de 0,31, al ser menor de 0,5 se puede establecer que la distribución de los datos no es normal.

La Figura 3-5 presenta la frecuencia de las concentraciones en cada uno de los modos analizados, con los datos en igualdad de condiciones para todas las vías.



**Figura 3-5.** Frecuencia de concentraciones por modo con equivalencia. Nota: modo I - BRT, modo II - automóvil, modo III - bicicleta, modo IV - peatón.



**Fuente:** El autor.

Se puede observar que los datos con mayor distribución de datos y menores concentraciones de UFP son los del peatón (modo IV), los demás modos presentan una distribución menor, relativamente similar entre ellos.

### 3.1.2 Comparación entre modos de transporte por cada vía

Esta sección presenta las concentraciones de UFP en cada modo de transporte por vía, con el fin de determinar si los modos presentaron el mismo comportamiento en todas las vías o si existen variaciones importantes entre ellos.

### 3.1.2.1 Análisis sin Equivalencia

Las vías analizadas presentaron concentraciones de UFP con promedios entre  $1,1 \times 10^5$  partículas/cm<sup>3</sup> en la Avenida Caracas a  $1,7 \times 10^5$  partículas/cm<sup>3</sup> en la Autopista Sur. Se presenta una dispersión importante de los datos en todas las vías como se evidencia en la Tabla 3-9.

**Tabla 3-9.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en la ciudad de Bogotá sin Equivalencia.

Vía	Min	Max	Promedio	Mediana	Primer Cuartil	Tercer Cuartil	Desviación Estándar
Calle 26	1,13E+03	9,99E+05	1,25E+05	9,73E+04	5,48E+04	1,56E+05	1,13E+05
Carrera 30	8,95E+02	9,99E+05	1,68E+05	1,36E+05	6,73E+04	2,33E+05	1,35E+05
Autopista Norte	1,66E+03	9,99E+05	1,37E+05	1,14E+05	6,54E+04	1,74E+05	1,10E+05
Autopista Sur	1,01E+03	9,97E+05	1,74E+05	1,40E+05	8,57E+04	2,26E+05	1,27E+05
Caracas	1,03E+03	9,94E+05	1,11E+05	8,69E+04	5,41E+04	1,39E+05	8,99E+04
Carrera 7	3,32E+03	5,70E+05	1,16E+05	1,03E+05	7,00E+04	1,44E+05	6,79E+04
Carrera 13	2,74E+02	9,98E+05	1,02E+05	6,41E+04	2,92E+04	1,33E+05	1,17E+05

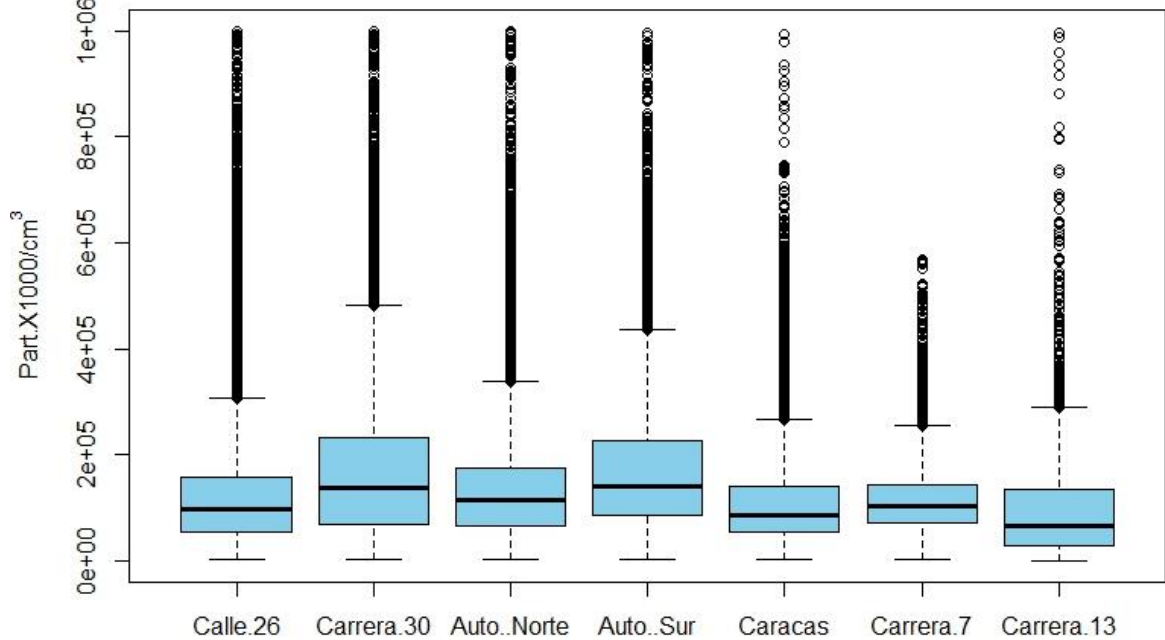
**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-6 presenta el consolidado de la concentración de partículas ultrafinas en las vías objeto de estudio (Calle 26, Avenida NQS, Autopista Norte, Autopista Sur, Carrera Séptima y Avenida Caracas) para los cuatro (4) modos de transporte analizados, La Carrera 13 se monitoreó exclusivamente en bicicleta para poder tener una referencia cercana a la Carrera 7 y la Avenida Caracas. Por tal razón, no se incluye en la gráfica general de vías. Para verificar cuáles modos de transporte fueron analizados en cada vía durante el presente estudio, remitirse a la Tabla 3-3.

Se puede identificar que la vía con mayor promedio de concentración es la Autopista Sur, seguida por la Carrera 30. Las vías que presentaron mayores concentraciones también presentaron mayor dispersión en los datos recolectados.

Las altas concentraciones en la Autopista Sur se deben probablemente a la alta presencia de vehículos pesados, congestión vehicular y áreas de la vía sin pavimentar. La Carrera 30 presenta altas concentraciones debido probablemente a la congestión vehicular de la misma y a la presencia esporádica de vehículos pesados.

**Figura 3-6.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

La mayor desviación de los datos se presenta en la Carrera 13, debido probablemente a la baja cantidad de mediciones realizadas en esta vía. La Carrera 30 y la Autopista Sur, además de presentar las mayores concentraciones, también presentaron las mayores desviaciones estándar, lo cual se puede relacionar a la presentación de eventos de altas emisiones por vehículos pesados, congestiones vehiculares y tramos sin pavimentar, este último exclusivamente para la Autopista Sur.

La Carrera 7 y la Avenida Caracas presentaron la menor dispersión de datos y las menores concentraciones de UFP. Es importante considerar que sobre ninguna de estas vías se realizaron mediciones en bicicleta, lo que puede influir en su promedio de concentración.

Los datos mínimos más bajos observados se encuentran en las mediciones realizadas en la Carrera 13, debido posiblemente a que solo se realizaron desplazamientos en bicicleta, el tamaño de la vía es menor a de las demás y la no presencia de BRT sobre ella.

La Carrera 30 también presentó datos con bajos niveles de concentración, debido probablemente a la presencia de áreas en la vía que permiten una mayor dispersión de contaminantes, tramos con menor afluencia vehicular y condiciones meteorológicas, como la dirección y velocidad del viento, que influyen en la cantidad de UFP detectadas por el contador.

Los datos máximos y la media en todas las mediciones son similares, probablemente debido a que los valores de UFP medidos se realizaron en vías principales y en los mismos horarios.

La Tabla 3-10 presenta el análisis numérico con el Rango Intercuartil, valores de Asimetría y Curtosis, que permiten establecer con mayor claridad el comportamiento de las concentraciones de UFP en cada una de las vías objeto de estudio.

**Tabla 3-10.** Análisis numérico entre vías sin equivalencia.

<i>Vía</i>	<i>Rango Intercuartilico</i>	<i>CV</i>	<i>Skewness (Asimetría)</i>	<i>Curtosis</i>
<i>Vía 1 - Calle 26</i>	1,01E+05	0.91	2.79	11.45
<i>Vía 2 – Carrera 30</i>	1,66E+05	0.81	1.55	3.63
<i>Vía 3 – Autopista Norte</i>	1,08E+05	0.79	2.27	8.32
<i>Vía 4 – Autopista Sur</i>	1,40E+05	0.73	1.84	5.02
<i>Vía 5 – Caracas</i>	8,50E+04	0.81	2.32	8.71
<i>Vía 6 – Carrera 7</i>	7,36E+04	0.59	1.68	5.33
<i>Vía 7 – Carrera 13</i>	1,03E+05	1.15	2.87	12.16

**Fuente.** El Autor.

El alto rango intercuartil permite identificar la dispersión de datos, por lo que se obtiene una distribución de las vías igual a la obtenida con la desviación estándar.

La asimetría o skewness para todas las vías presenta valores elevados, indicando que los datos presentan una separación de los datos centrales.

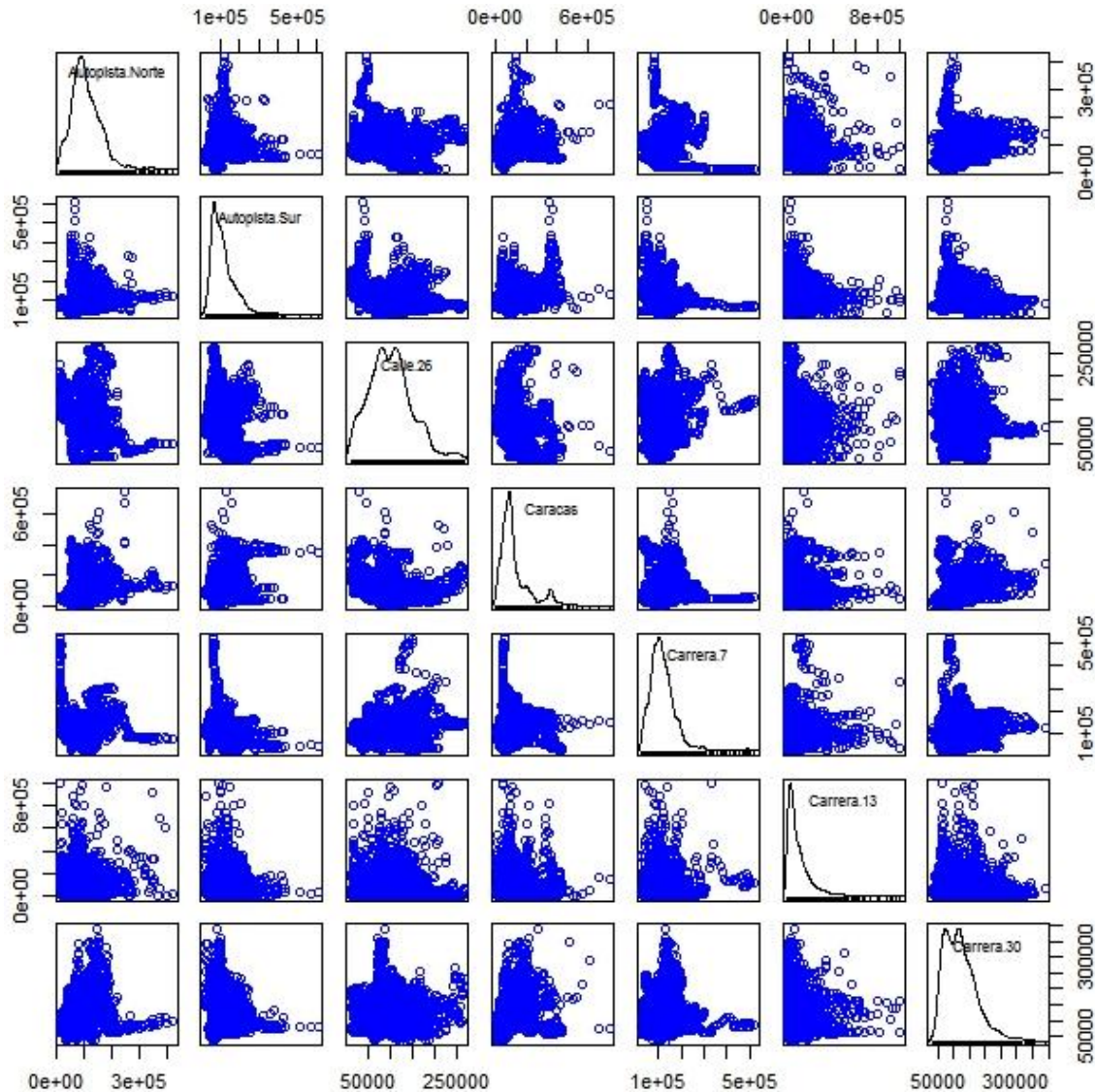
La curtosis en este caso la Carrera 30 es la única vía con una distribución cercana a la normal; las demás vías debido a sus valores altos de curtosis indican que las distribuciones se acercan más a un modelo apuntalado.

La Figura 3-7 presenta la comparación entre los gráficos de dispersión de las vías analizadas, se puede observar que la distribución de todas las vías presenta asimetría a la izquierda, así como un comportamiento leptocúrtico, debido a que sus valores se encuentran muy por encima de 3.

Se puede observar que la relación entre las diferentes vías y sus respectivas concentraciones de UFP es muy baja, razón por la que las gráficas presentan una gran dispersión.

Las vías con comportamientos más similares son Autopista Sur, Autopista Norte, Caracas, Carrera 7 y Carrera 13. La Calle 26 y la Carrera 30 presentan una mayor dispersión de los datos y, dos picos en su distribución, indicando dos grupos de datos con alta frecuencia en diferentes concentraciones de UFP.

**Figura 3-7.** Matriz de diagramas de Dispersión UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) según vía. Nota: Diagrama de dispersión indica la relación de las concentraciones de UFP entre las vías analizadas.



**Fuente:** El Autor.

Se puede concluir que la carrera 30 y la Autopista Sur presentaron las mayores concentraciones de UFP, a pesar de que todas las vías presentaron concentraciones similares.

La Carrera 13, al presentar concentraciones de UFP analizadas únicamente en el modo de transporte de bicicleta, presentó el menor promedio de concentraciones. Sin embargo, la información no es suficiente para realizar una comparación representativa.

### 3.1.2.2 Análisis con Equivalencia

En el análisis con equivalencia de las vías, al igual que en el de modos, se igualó la cantidad de datos obtenidos en todas las mediciones, con el fin de obtener un resultado comparativo.

En este análisis no se incluyeron la Carrera 13 ni la Carrera 7, debido a la poca cantidad de datos recolectados sobre estas vías y la baja representatividad de los mismos.

El número de datos analizados por cada vía fue de 16.752, número máximo de datos obtenidos en la Autopista Sur, razón por la cual los datos de las demás vías fueron igualados a esta cantidad.

La Tabla 3-11 presenta el análisis descriptivo de las concentraciones de UFP con equivalencia en la cantidad de datos, para las vías objeto de estudio.

**Tabla 3-11.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía con Equivalencia.

<i>Vía</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>Calle 26</i>	1,23E+03	9,98E+05	1,49E+05	1,16E+05	7,87E+04	1,75E+05	1,23E+05
<i>Carrera 30</i>	2,56E+03	9,80E+05	1,70E+05	1,44E+05	8,64E+04	2,24E+05	1,18E+05
<i>Autopista Norte</i>	1,11E+04	8,53E+05	1,57E+05	1,36E+05	9,44E+04	1,85E+05	9,91E+04
<i>Autopista Sur</i>	1,01E+03	9,97E+05	1,74E+05	1,39E+05	8,57E+04	2,26E+05	1,27E+05
<i>Caracas</i>	4,60E+03	9,93E+05	1,18E+05	9,59E+04	6,13E+04	1,47E+05	8,48E+04

**Fuente.** El Autor.

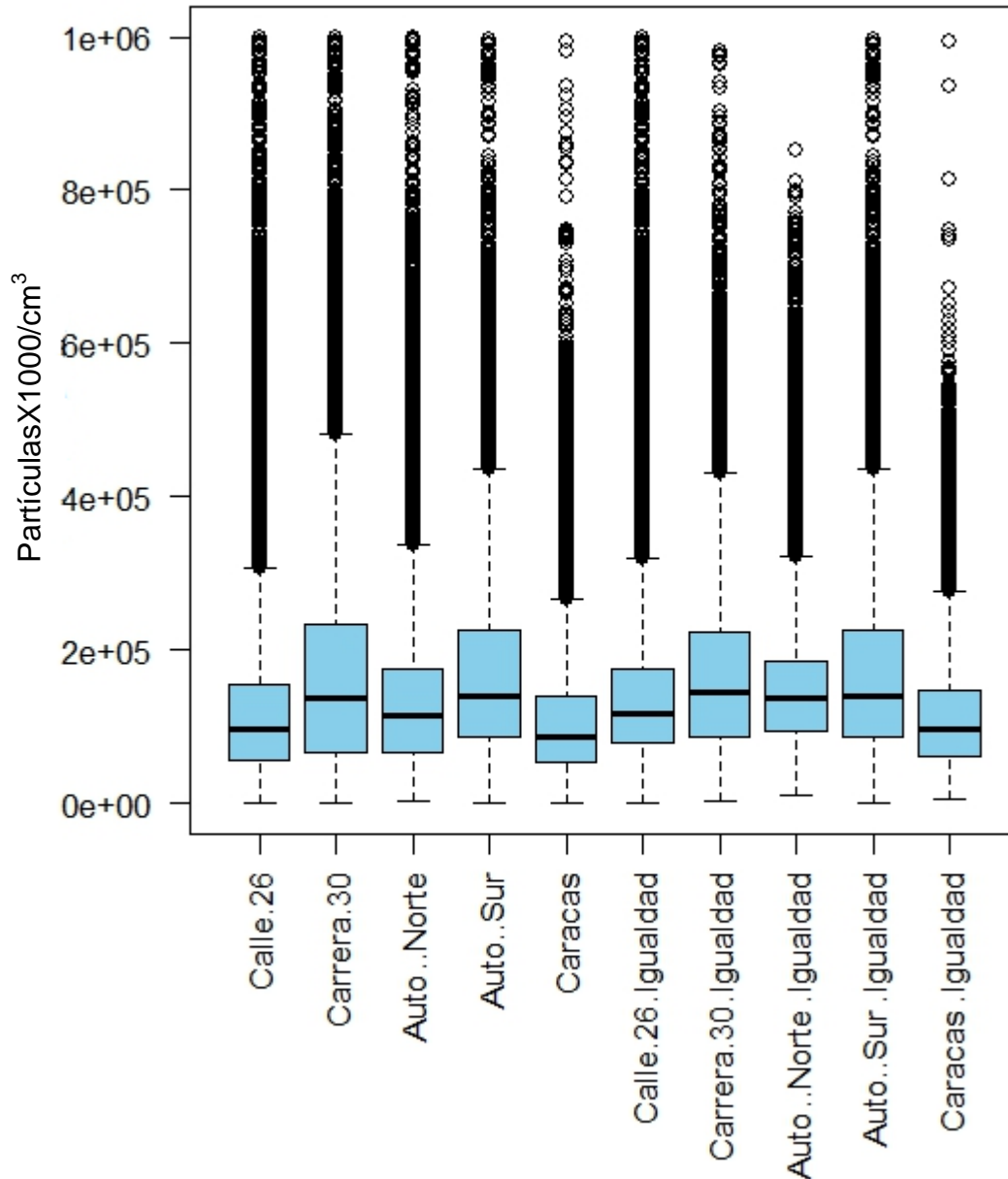
Al realizar la comparación de los promedios entre los datos sin equivalencia y con equivalencia, se encontró que los valores aumentaron en un promedio de 1,09E+04 en el análisis con equivalencia.

La vía cuyo promedio aumento más fue la Calle 26, seguida de la Autopista Norte, con 2,45E+04 y 2,03E+04 partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente.

Las desviaciones estándar disminuyeron con respecto al análisis sin equidad, la Caracas sigue presentando la menor dispersión de datos, mientras la dispersión de todas las vías disminuyo, excepto en la Calle 26, donde aumento en 9,60E+03 partículas/cm<sup>3</sup>. En general el comportamiento es similar entre los dos análisis.

La Figura 3-8 presenta la comparación entre el comportamiento de la concentración de partículas ultrafinas en las vías analizadas con equivalencia de datos y sin ella.

**Figura 3-8.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) con equivalencia y sin equivalencia de datos en vías analizadas. Nota: Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-8 permite observar una disminución de los datos atípicos en el análisis con equivalencia además de un comportamiento muy similar para todas las vías.



La Tabla 3-12 presenta un análisis numérico de los datos con equivalencia, en el que se indica el Rango Intercuartil, valores de Asimetría y Curtosis, que permiten establecer con mayor claridad el comportamiento de las concentraciones de UFP.

**Tabla 3-12.** Análisis numérico entre vías con equivalencia.

<i>Vía</i>	<i>Rango Intercuartil</i>	<i>CV</i>	<i>Skewness (Asimetría)</i>	<i>Curtosis</i>
<i>Calle 26</i>	9,64E+04	0.8251816	2.76	10.15
<i>Carrera 30</i>	1,38E+05	0.6929784	1.65	4.48
<i>Autopista Norte</i>	9,10E+04	0.6305426	2.12	6.41
<i>Autopista Sur</i>	1,41E+05	0.7274763	1.84	5.02
<i>Caracas</i>	8,61E+04	0.7172127	1.99	5.98

**Fuente.** El Autor.

El alto rango intercuartil disminuyó para todas las vías, excepto en la Avenida Caracas, donde se presentó un aumento de  $1,09E+03$  partículas/cm<sup>3</sup>, y la Autopista Sur, donde se mantuvo estable (dado que es la vía tomada como referencia para la equivalencia de datos).

La asimetría y curtosis observadas disminuyeron, debido probablemente a que en el análisis sin equivalencia existía la presencia de datos atípicos que sesgaban la medida.

Los valores máximos son similares en todas las vías, se presentó una pequeña disminución en la Autopista Norte y la Carrera 30, indicando que la equivalencia contribuyó en bajas proporciones a una mayor concentración de los datos.

Las medias presentaron un aumento en todas las vías al realizar el análisis con equidad de datos en bajos niveles, sin embargo continúan presentando valores similares.

Se puede establecer que las variaciones entre los dos grupos de datos no son significativos.

### 3.1.3 Comparación Específica por Vías

Esta sección presenta el análisis específico de cada una de las vías analizadas durante el presente estudio, con el fin de identificar diferencias importantes entre las mismas.

### 3.1.3.1 Concentraciones de UFP en la Calle 26

La Tabla 3-13 presenta la descripción estadística de las concentraciones de UFP obtenidos en la Calle 26.

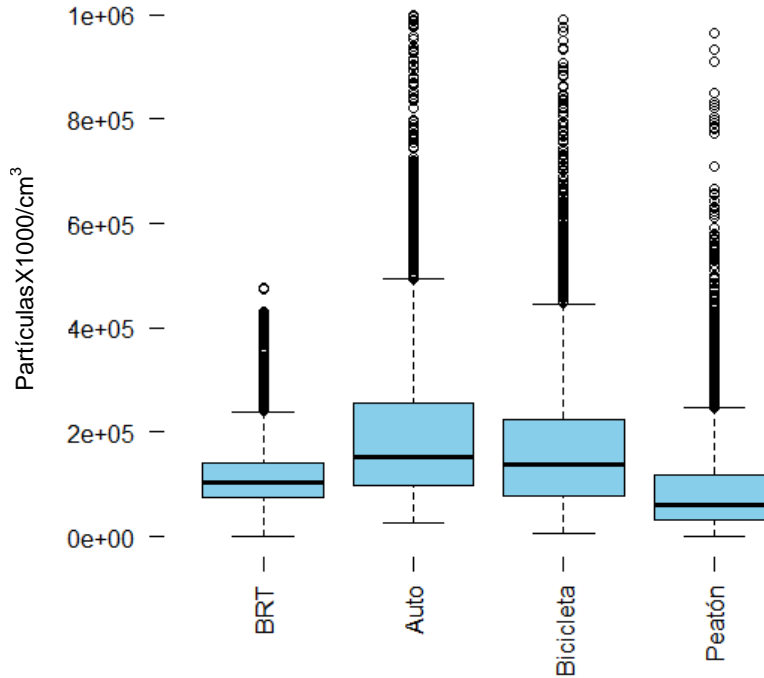
**Tabla 3-13.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Calle 26.

<i>Calle 26</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>BRT</i>	1,23E+03	4,78E+05	1,12E+05	1,05E+05	7,50E+04	1,41E+05	5,46E+04
<i>Auto</i>	2,72E+04	9,99E+05	2,10E+05	1,53E+05	9,65E+04	2,55E+05	1,72E+05
<i>Bicicleta</i>	4,56E+03	9,91E+05	1,76E+05	1,37E+05	7,79E+04	2,25E+05	1,45E+05
<i>Peatón</i>	1,13E+03	9,64E+05	8,82E+04	6,06E+04	3,18E+04	1,18E+05	8,52E+04

**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-9 presenta la distribución de las partículas ultrafinas en la Calle 26 por modo de transporte. En ella se puede evidenciar que los dos modos de transporte con mayores concentraciones son el automóvil y la bicicleta, seguido por el *BRT* y, finalmente, el peatón. Los modos de transporte con mayores concentraciones también presentan una mayor dispersión de datos, mientras la variación entre modos es relativamente baja.

**Figura 3-9.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Calle 26 en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



Fuente: El Autor.

### 3.1.3.2 Concentraciones de UFP en la Carrera 30

Las concentraciones por modos en la Carrera 30 presentaron comportamientos similares a las de la Calle 26, el modo de transporte con mayor concentración de UFP fue el automóvil, seguido por la bicicleta, el BRT (TransMilenio) y, finalmente, el peatón.

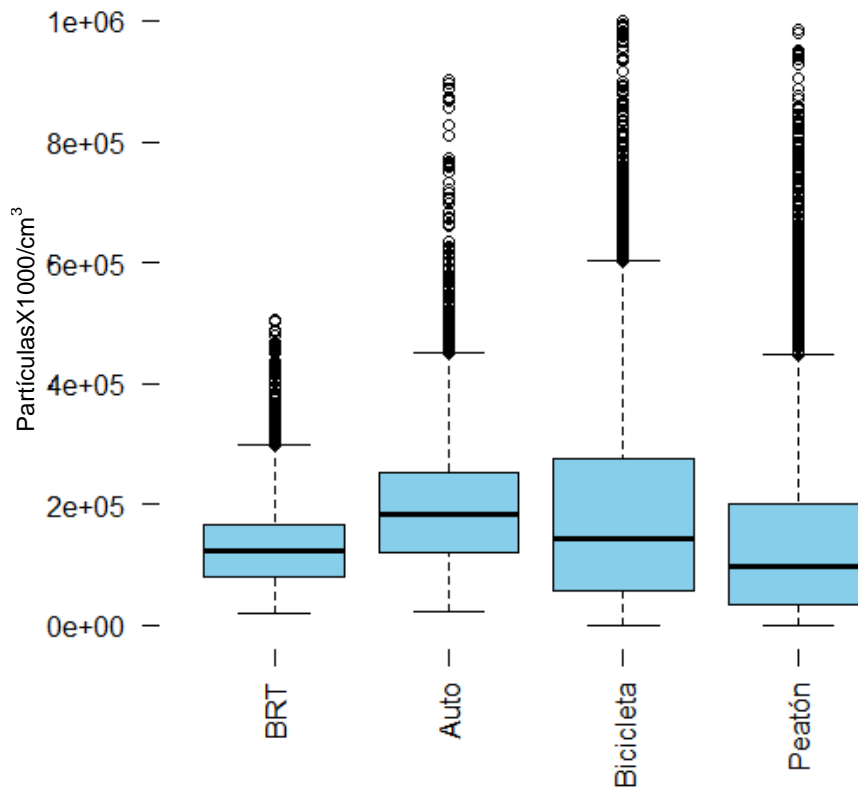
**Tabla 3-14.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Carrera 30.

<i>Carrera 30</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>BRT</i>	1,87E+04	5,07E+05	1,33E+05	1,23E+05	8,01E+04	1,67E+05	6,97E+04
<i>Auto</i>	2,33E+04	9,02E+05	1,97E+05	1,83E+05	1,20E+05	2,52E+05	1,10E+05
<i>Bicicleta</i>	8,95E+02	9,99E+05	1,85E+05	1,44E+05	5,74E+04	2,76E+05	1,57E+05
<i>Peatón</i>	1,21E+03	9,85E+05	1,38E+05	9,72E+04	3,46E+04	2,00E+05	1,38E+05

Fuente: El Autor.

La Carrera 30 presentó menores concentraciones con relación a la Calle 26 en Automóvil con una diferencia de  $1,24E+04$  partículas/cm<sup>3</sup>. Aunque la bicicleta no presenta las mayores concentraciones, es el modo con mayor dispersión de datos, seguido por el peatón, que a su vez presenta las menores concentraciones de partículas.

**Figura 3-10.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Carrera 30 en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.

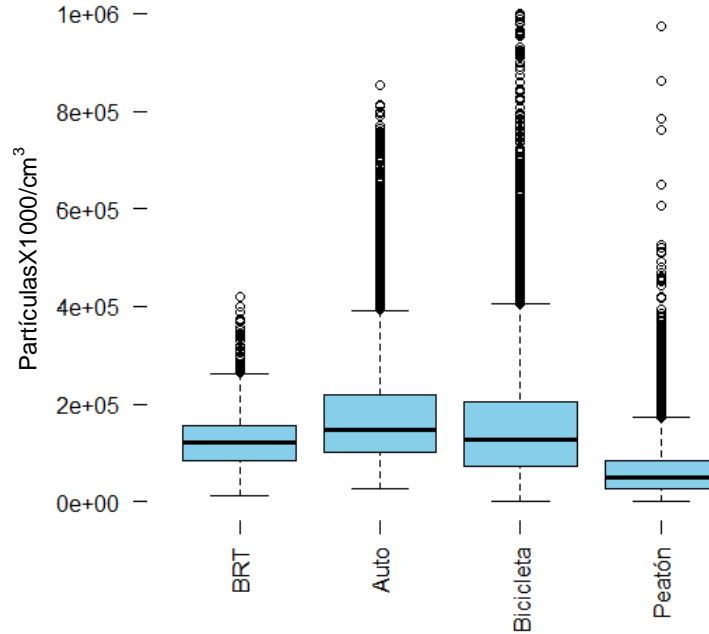


Fuente: El Autor.

### 3.1.3.3 Concentraciones de UFP en la Autopista Norte

La Autopista Norte presentó la misma distribución de concentración entre los cuatro modos de transporte analizados, con concentraciones promedio de  $1,23E+05$ ,  $1,81E+05$ ,  $1,62E+05$  y  $6,59E+04$  partículas/cm<sup>3</sup> para BRT, auto, bicicleta y peatón, respectivamente.

**Figura 3-11.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Autopista Norte en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

Por su parte en la Autopista Norte presentaron las menores concentraciones de partículas en el modo de transporte de peatón, seguido por el BRT, la bicicleta y el auto con concentraciones promedio de 6,59E+04, 1,23E+05, 1,62E+05 y 1,81E+05 partículas/cm<sup>3</sup>. Por su parte, el BRT presentó la menor desviación estándar y el modo con mayor dispersión de datos fue la bicicleta.

**Tabla 3-15.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Autopista Norte.

<i>Autopista Norte</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>BRT</i>	1,11E+04	4,21E+05	1,23E+05	1,21E+05	8,49E+04	1,57E+05	5,20E+04
<i>Auto</i>	2,63E+04	8,53E+05	1,81E+05	1,49E+05	1,02E+05	2,18E+05	1,16E+05
<i>Bicicleta</i>	1,81E+03	9,99E+05	1,62E+05	1,28E+05	7,14E+04	2,05E+05	1,36E+05
<i>Peatón</i>	1,66E+03	9,74E+05	6,59E+04	4,96E+04	2,59E+04	8,51E+04	6,23E+04

**Fuente:** El Autor.

### 3.1.3.4 Concentraciones de UFP en la Autopista Sur

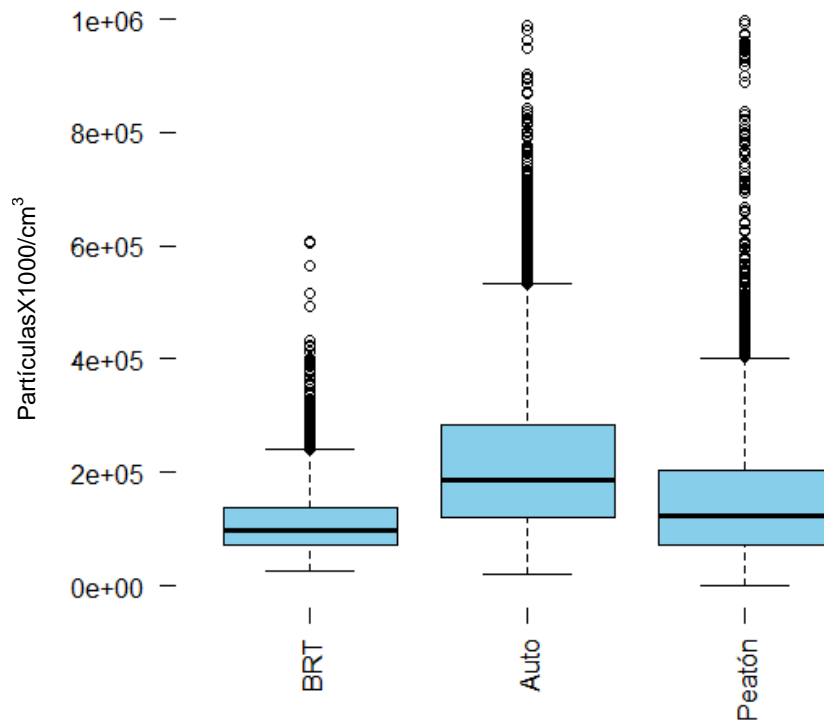
La Figura 3-12 presenta las concentraciones de UFP en la Autopista Sur, siendo la única vía en la que las concentraciones para el modo peatón son mayores a las del *BRT*, además de ser la vía con concentraciones de UFP más altas en dicho modo.

**Tabla 3-16.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Autopista Sur.

<i>Autopista Sur</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>BRT</i>	2,58E+04	6,07E+05	1,13E+05	9,84E+04	7,14E+04	1,39E+05	5,86E+04
<i>Auto</i>	2,13E+04	9,90E+05	2,14E+05	1,85E+05	1,19E+05	2,85E+05	1,34E+05
<i>Peatón</i>	1,01E+03	9,97E+05	1,61E+05	1,24E+05	7,12E+04	2,04E+05	1,38E+05

**Fuente:** El Autor.

**Figura 3-12.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Autopista Sur en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.

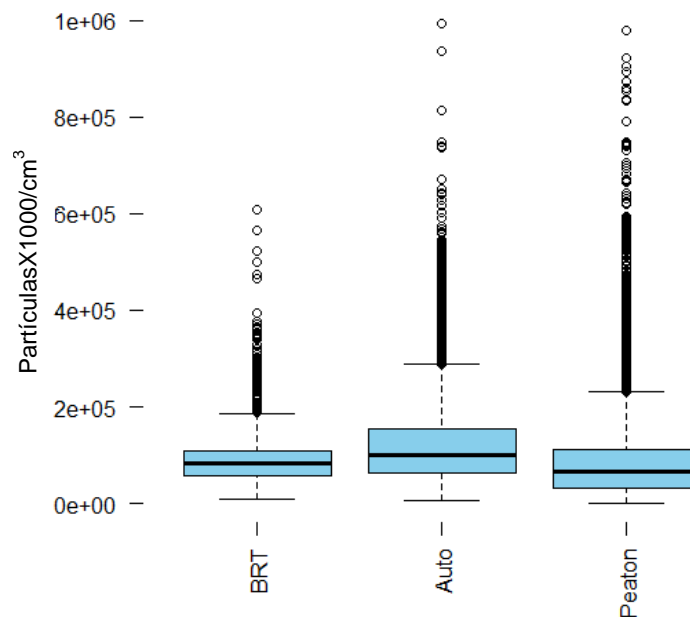


**Fuente:** El autor

### 3.1.3.5 Concentraciones de UFP en la Avenida Caracas

Sobre la Avenida Caracas, la distribución de concentraciones fue similar a las demás vías, siendo el automóvil el modo con mayor concentración. Sin embargo, la dispersión de los datos es menor a las demás vías, como se puede observar en la Figura 3-13 y en la Tabla 3-17.

**Figura 3-13.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Avenida Caracas en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

La vía con menor promedio de concentración de UFP es la Avenida Caracas con un promedio general de 1,11E05 partículas/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 3-17.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Avenida Caracas.

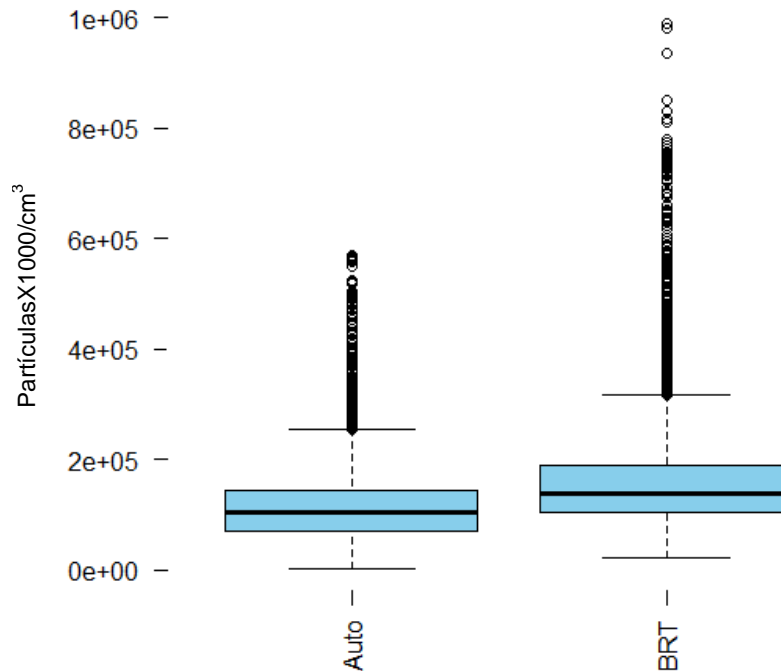
<i>Caracas</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>BRT</i>	8,16E+03	6,08E+05	9,41E+04	8,25E+04	5,59E+04	1,08E+05	6,45E+04
<i>Auto</i>	4,60E+03	9,94E+05	1,22E+05	9,92E+04	6,26E+04	1,53E+05	8,66E+04
<i>Peatón</i>	1,03E+03	9,81E+05	9,14E+04	6,52E+04	3,30E+04	1,12E+05	9,79E+04

**Fuente:** El Autor.

### 3.1.3.6 Concentraciones de UFP en la Carrera 7

La Figura 3-14 presenta las concentraciones de partículas sobre la Carrera 7 en automóvil y BRT. En este modo, las mediciones se realizaron en horas de la tarde y los buses empleados fueron híbridos que normalmente realizan su desplazamiento por la misma vía que los automóviles.

**Figura 3-14.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Carrera 7 en diferentes modos de transporte. Notas: (a) El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

En la Tabla 3-18 se da a conocer la descripción estadística de las concentraciones obtenidas sobre esta vía.



**Tabla 3-18.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Carrera 7.

<i>Carrera 7</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>Auto</i>	3,32E+03	5,70E+05	1,16E+05	1,03E+05	7,00E+04	1,44E+05	6,79E+04
<i>BRT</i>	2,34E+04	9,88E+05	1,57E+05	1,39E+05	1,04E+05	1,89E+05	8,59E+04

**Fuente:** El Autor.

### 3.1.3.7 Concentraciones de UFP en la Carrera 13

En la Carrera 13 se monitorearon las concentraciones de UFP en bicicleta dado que este modo no pudo ser analizado en la Carrera 7 ni en la Caracas y ésta vía era la más cercana para la obtención de datos.

La concentración promedio de UFP obtenida fue de 1.02E+05 partículas/cm<sup>3</sup>, presentando las concentraciones más bajas con relación a las demás vías monitoreadas.

La Tabla 3-19 presenta los valores estadísticos de las concentraciones de UFP sobre la Carrera 13.

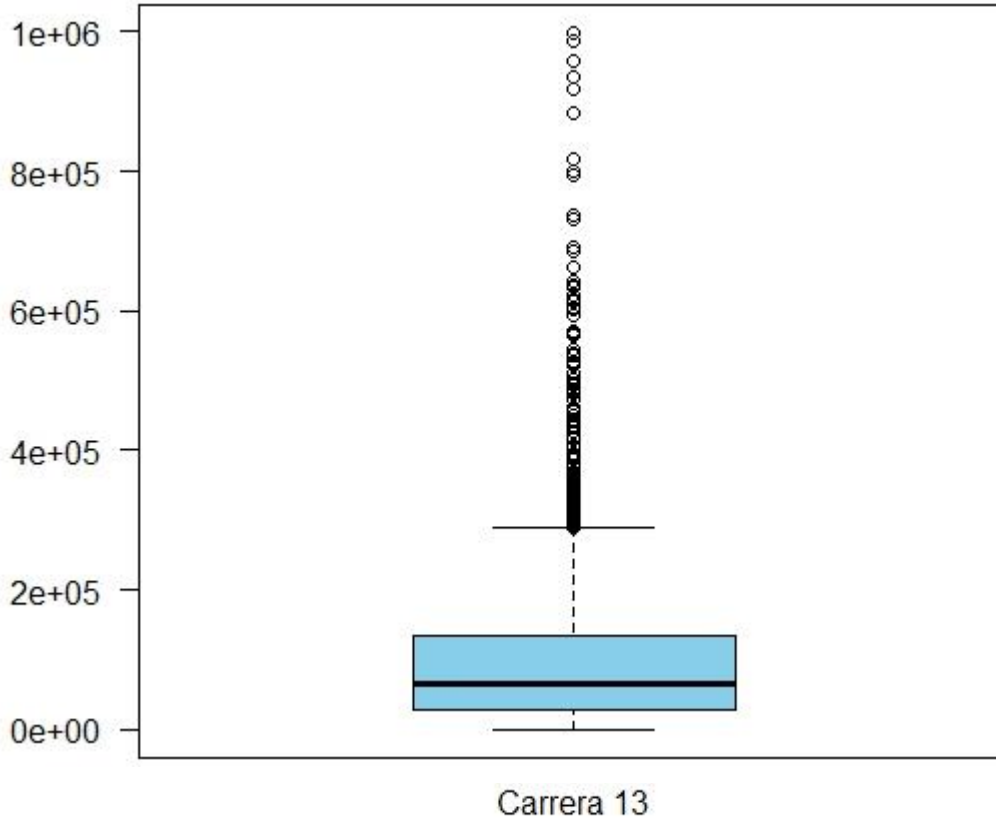
**Tabla 3-19.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por modo en la Carrera 13.

<i>Vía 7 – Calle 13</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>Bicicleta</i>	2,74E+02	9,98E+05	1,02E+05	6,41E+04	2,92E+04	1,33E+05	1,17E+05

**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-15 presenta las concentraciones de UFP sobre la Carrera 13, obtenidas en los desplazamientos en bicicleta.

**Figura 3-15.** Concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en la Carrera 13. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



Las concentraciones de partículas en las vías de la ciudad se encuentran por encima de los promedios encontrados en otros países, caracterizados por su nivel de desarrollo y la presencia de vías rápidas con alta afluencia vehicular, como se puede evidenciar en la Tabla 1-2 y en la Figura 3-27.

### 3.1.4 Comparación entre vías por cada modo de transporte

El comportamiento de las concentraciones de UFP en los modos de transporte puede variar en cada una de las vías observadas, razón por la cual en el desarrollo de este subcapítulo se analizará su comportamiento en cada una de las vías monitoreadas.

### 3.1.4.1 Concentraciones de UFP en BRT

El BRT presentó las mayores concentraciones de UFP en la Carrera 7, los desplazamientos en esta vía se realizaron en vehículos híbridos sobre la misma vía en la que se desplazan los automóviles y motocicletas, se presentaron importantes congestiones vehiculares durante los mismos, siendo estas probablemente las razones de las altas concentraciones y dispersión de datos.

La Tabla 3-20 presenta los datos estadísticos de las concentraciones de UFP en los desplazamientos en BRT.

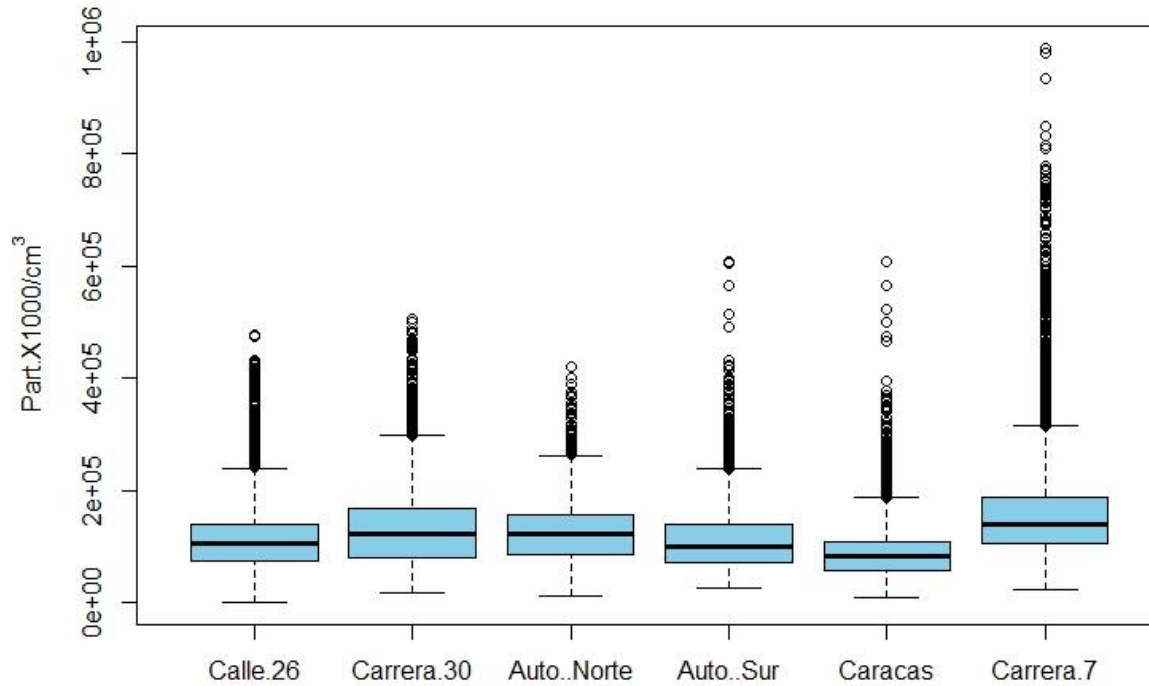
**Tabla 3-20.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en automóvil.

<i>Modo BRT</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<b>Calle 26</b>	1,23E+03	4,78E+05	1,12E+05	1,05E+05	7,50E+04	1,41E+05	5,46E+04
<b>Carrera 30</b>	1,87E+04	5,07E+05	1,33E+05	1,23E+05	8,01E+04	1,67E+05	6,97E+04
<b>Autopista Norte</b>	1,11E+04	4,21E+05	1,23E+05	1,21E+05	8,49E+04	1,57E+05	5,20E+04
<b>Autopista Sur</b>	2,58E+04	6,07E+05	1,13E+05	9,84E+04	7,14E+04	1,39E+05	5,86E+04
<b>Caracas</b>	8,16E+03	6,08E+05	9,41E+04	8,25E+04	5,59E+04	1,08E+05	6,45E+04
<b>Carrera 7</b>	2,34E+04	9,88E+05	1,57E+05	1,39E+05	1,04E+05	1,89E+05	8,59E+04

**Fuente:** El Autor.

En la Figura 3-16 se observan las concentraciones de UFP en los desplazamientos en BRT. La mayor dispersión de datos se presentó en la Carrera 7, seguido por la Carrera 30.

**Figura 3-16.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en BRT en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



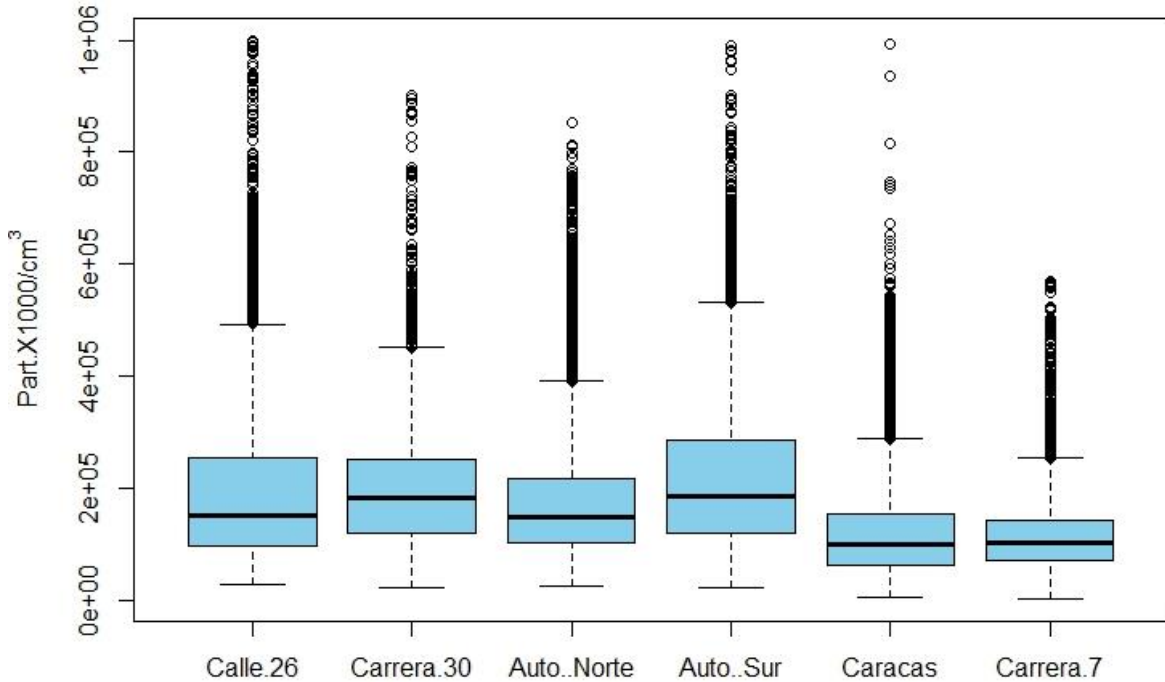
**Fuente:** El Autor.

### 3.1.4.2 Concentraciones de UFP en Automóvil

Los desplazamientos realizados en auto abarcaron todas las vías objeto de estudio, la velocidad promedio empleada en esta fue de 50 – 60 km/hora cuando las vías se encontraban despejadas y de 20 – 40 km/hora cuando se presentó congestión vehicular.

La Figura 3-17 presenta el comportamiento de las UFP en automóvil en cada una de las vías monitoreadas.

**Figura 3-17.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en Automóvil en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.

La Autopista Sur presentó las mayores concentraciones en este modo, lo cual se puede deber a la presencia de vehículos pesados en cercanías al automóvil, los altos niveles de congestión vehicular que presenta esta vía y la presencia de áreas sin pavimentar cercanas a la Autopista. La Calle 26 presentó una concentración similar a la Autopista Sur, lo cual se debe probablemente a la frecuencia en el paso de buses BRT.

La Tabla 3-21 presenta la descripción estadística de las concentraciones obtenidas en automóvil, se puede observar que los datos con mayor dispersión fueron los obtenidos en la Calle 26, seguida por la Autopista Sur con  $1,72E+05$  y  $1,34E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente.

**Tabla 3-21.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en automóvil.

<i>Modo Automóvil</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<b>Calle 26</b>	2,72E+04	9,99E+05	2,10E+05	1,53E+05	9,65E+04	2,55E+05	1,72E+05
<b>Carrera 30</b>	2,33E+04	9,02E+05	1,97E+05	1,83E+05	1,20E+05	2,52E+05	1,10E+05
<b>Autopista Norte</b>	2,63E+04	8,53E+05	1,81E+05	1,48E+05	1,02E+05	2,18E+05	1,16E+05
<b>Autopista Sur</b>	2,13E+04	9,90E+05	2,14E+05	1,85E+05	1,19E+05	2,85E+05	1,34E+05
<b>Caracas</b>	4,60E+03	9,94E+05	1,22E+05	9,92E+04	6,26E+04	1,53E+05	8,66E+04
<b>Carrera 7</b>	3,32E+03	5,70E+05	1,16E+05	1,03E+05	7,00E+04	1,44E+05	6,79E+04

Fuente: El Autor.

### 3.1.4.3 Concentraciones de UFP en Bicicleta

La Carrera 30 presentó las mayores concentraciones de UFP en los desplazamientos realizados en bicicleta con un promedio de  $1,85E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> seguida por la Calle 26 con  $1,76E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>.

La Tabla 3-22 presenta la descripción estadística de las concentraciones de UFP en los desplazamientos en bicicleta.

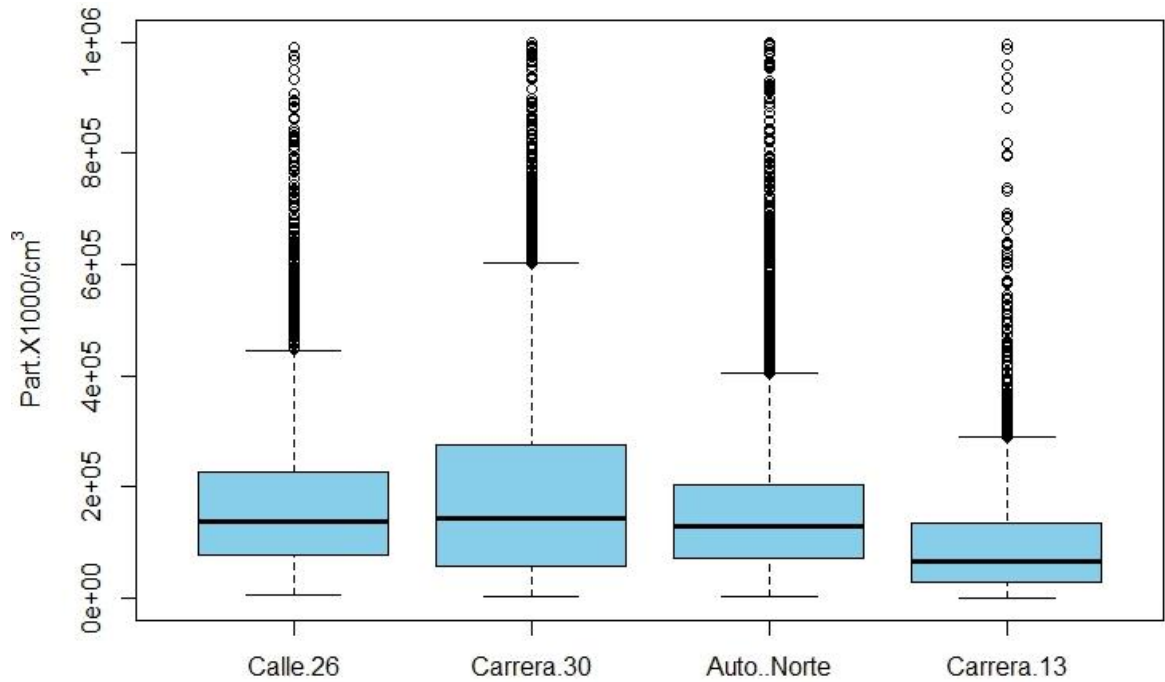
**Tabla 3-22.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía en bicicleta.

<i>Modo Bicicleta</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<b>Calle 26</b>	4,56E+03	9,91E+05	1,76E+05	1,37E+05	7,79E+04	2,25E+05	1,45E+05
<b>Carrera 30</b>	8,95E+02	9,99E+05	1,85E+05	1,44E+05	5,74E+04	2,76E+05	1,57E+05
<b>Autopista Norte</b>	1,81E+03	9,99E+05	1,62E+05	1,28E+05	7,14E+04	2,05E+05	1,36E+05
<b>Carrera 13</b>	2,74E+02	9,98E+05	1,02E+05	6,41E+04	2,92E+04	1,33E+05	1,17E+05

Fuente: El Autor.

La dispersión de las concentraciones en todas las vías fue similar en los desplazamientos en bicicleta. Además, sus valores se encontraron muy cercanos al promedio de concentración de las mismas.

**Figura 3-18.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en Bicicleta en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



Fuente: El Autor.

### 3.1.4.4 Concentraciones de UFP como Peatón

Durante los desplazamientos realizados como peatón, las concentraciones de UFP más altas se presentaron en la Autopista Sur con 1,61E+05 partículas/cm<sup>3</sup>, seguida por la Carrera 30, indicando un comportamiento similar a los desplazamientos en automóvil.

La Tabla 3-23 presenta el comportamiento estadístico de las concentraciones de UFP como peatón.

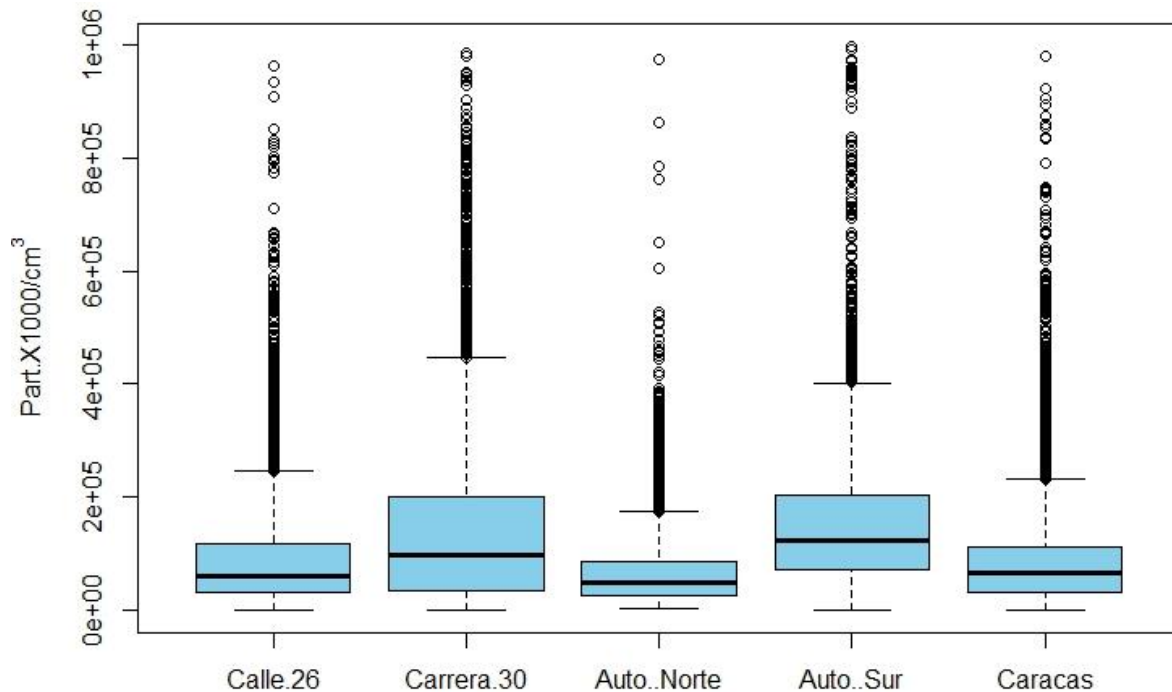
**Tabla 3-23.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas por vía como peatón.

<i>Modo Peatón</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<b>Calle 26</b>	1,13E+03	9,64E+05	8,82E+04	6,06E+04	3,18E+04	1,17E+05	8,52E+04
<b>Carrera 30</b>	1,21E+03	9,85E+05	1,38E+05	9,72E+04	3,46E+04	2,00E+05	1,38E+05
<b>Autopista Norte</b>	1,66E+03	9,74E+05	6,59E+04	4,96E+04	2,59E+04	8,51E+04	6,23E+04
<b>Autopista Sur</b>	1,01E+03	9,97E+05	1,61E+05	1,24E+05	7,12E+04	2,04E+05	1,38E+05
<b>Caracas</b>	1,03E+03	9,81E+05	9,14E+04	6,52E+04	3,30E+04	1,12E+05	9,79E+04

**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-19 presenta las concentraciones en los desplazamientos como peatón en las vías seleccionadas para el presente trabajo, sobre la Carrera 7 no se realizaron desplazamientos como peatón, por lo que no se tiene información al respecto.

**Figura 3-19.** Comparación concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) como Peatón en diferentes vías de Bogotá. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



**Fuente:** El Autor.



### 3.1.5 Concentraciones de UFP en Ciclovía

El modo de bicicleta presentó una concentración promedio de UFP de 4,71E+04 partículas/cm<sup>3</sup> durante una medición realizada en la ciclovía<sup>3</sup> sobre la Carrera Séptima. La Tabla 3-24 presenta el comportamiento estadístico de las concentraciones de UFP para los desplazamientos realizados en este modo.

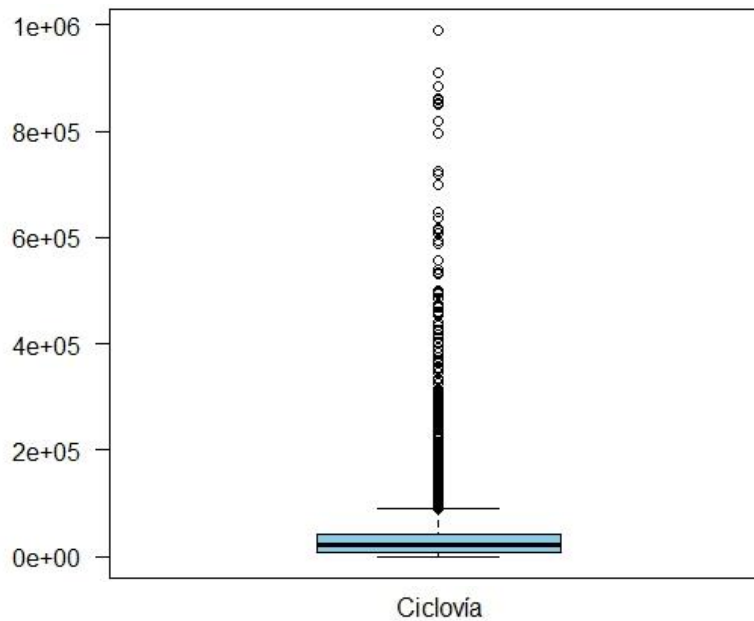
**Tabla 3-24.** Descripción estadística concentraciones de partículas ultrafinas en ciclovía.

<i>Ciclovía</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>Primer Cuartil</i>	<i>Tercer Cuartil</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>Bicicleta</i>	3,69E+02	9,89E+05	3,47E+04	2,08E+04	9,06E+03	4,19E+04	5.36E+04

**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-20 presenta las concentraciones en los desplazamientos en bicicleta durante la ciclovía en Carrera Séptima.

**Figura 3-20.** Concentración de UFP (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,1 micrómetros) en Bicicleta en Ciclovía. Nota: El Diagrama de cajas y bigotes muestra la concentración más baja, el cuartil más bajo, la mediana, el cuartil superior y los niveles máximos de UFP.



<sup>3</sup> Actividad realizada en la ciudad de Bogotá durante los días domingos y festivos, en la que se cierra el paso vehicular sobre las principales vías, para permitir el paso de bicicletas y peatones. Los desplazamientos se realizan sobre las vías vehiculares.

Los desplazamientos en este modo presentaron una disminución de  $1,29E+05$  con respecto a los recorridos realizados sobre las ciclorrutas.

## **3.2 Dosis de Inhalación Promedio**

El cálculo de la dosis se realizó considerando variaciones en los datos de frecuencia y tiempo de exposición.

En el primer caso se tomaron el total de datos sin equivalencia y los datos de sugeridos por la Encuesta de Movilidad del año 2015 con respecto a frecuencia y tiempo, para el segundo caso se consideró la concentración de UFP en un trayecto fijo y tiempos variables de acuerdo al modo transporte y por último se consideró un lapso igual de tiempo para todos los modos de transporte de 2 minutos.

Las dosis se obtuvieron a partir de la concentración promedio por modo de transporte, considerando solamente los días laborales al año y empleando la tasa de inhalación de descanso para los desplazamientos en BRT y auto y, la tasa de inhalación de actividad ligera para los desplazamiento en bicicleta y como peatón, en el total de los casos.

### **3.2.1 Dosis de Inhalación Promedio con Estadísticas de Movilidad en Bogotá**

La encuesta de movilidad del año 2015 (Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria Distrital de Movilidad, 2015) presenta el total de viajes considerando viajes peatonales mayores o iguales a 15 minutos, dado que el 100% de los viajes se obtienen incluyendo otros modos de transporte, como Moto, Taxi, Alimentador, entre otros, se realizó la estandarización de los datos, considerando únicamente los modos de transporte objeto del presente estudio y tomando como 100% de los viajes 242, por ser el total de los días laborales de un año promedio, como se presenta en la Tabla 3-25.

**Tabla 3-25.** Número de viajes estandarizado según encuesta de movilidad 2015.

<i>Modo de Transporte</i>	<b>Porcentaje Encuesta de Movilidad</b>	<b>Porcentaje Estandarizado</b>	<b>Número de Viajes Estandarizado (Viajes)</b>
<i>TM</i>	16,2%	29,7%	72
<i>Auto</i>	13,2%	24,2%	59
<i>Bici</i>	4,5%	8,3%	20
<i>Peatón</i>	20,6%	37,8%	91

**Fuente:** Encuesta de Movilidad 2015. Modificada por El Autor.

Las dosis obtenidas según modo de transporte para un hombre promedio, según los datos estadísticos de movilidad se presentan en la Tabla 3-26.

**Tabla 3-26.** Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad.

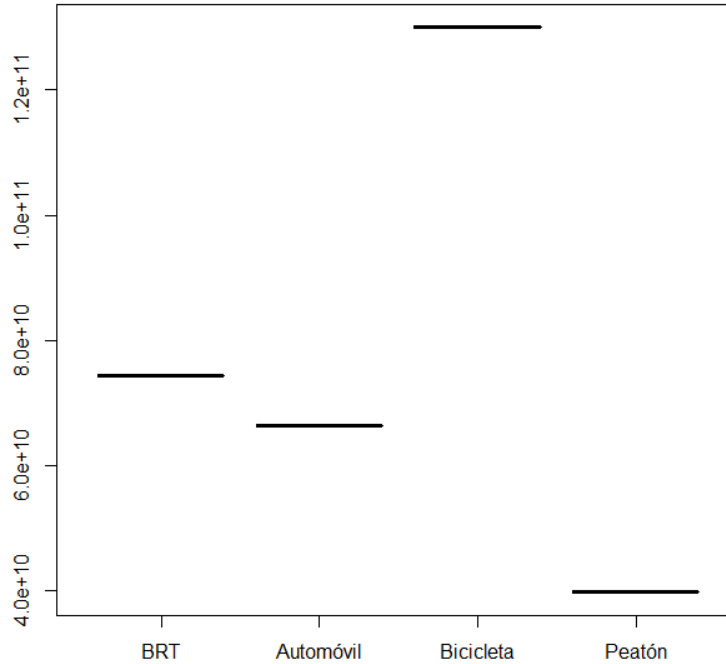
<b>HOMBRE PROMEDIO CON ESTADÍSTICAS DE MOVILIDAD</b>							
<b>Concentración Promedio Modo</b>		<b>Tasa de Inhalación (m3/hora)</b>	<b>Tiempo de Exposición (horas/día)</b>	<b>Frecuencia de Exposición (días/año)</b>	<b>Duración de Exposición (años)</b>	<b>Tiempo Promedio (Días)</b>	<b>ADD (ptc/día)</b>
<b>Concentración (ptc/m3)</b>	<b>Modo</b>						
1,29E+11	BRT	0,45	1,28E+00	72	72	5179	7,44E+10
1,61E+11	Automóvil	0,45	9,17E-01	59	72	4220	6,64E+10
1,71E+11	Bicicleta	1,2	6,33E-01	20	72	1439	1,30E+11
1,02E+11	Peatón	0,78	5,00E-01	91	72	6586	3,97E+10

**Fuente:** El Autor.

La Figura 3-21 presenta las dosis de inhalación de UFP para un hombre promedio en la ciudad de Bogotá según modo de transporte y considerando las estadísticas de movilidad del año 2015.

**Figura 3-21.** Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad.

**ADD Hombre con datos estadísticos (ptc/día)**



**Fuente:** El Autor.

La tasa de inhalación empleada en los desplazamientos en bicicleta y peatón generan un aumento en la dosis de estos modos de transporte, dado que la bicicleta presentó la mayor concentración entre estos dos, es el modo de transporte con mayor dosis de inhalación promedio reportada.

El peatón presentó la menor dosis de inhalación ya que presenta la menor concentración de UFP, así como el tiempo de exposición más bajo de acuerdo a la información de movilidad empleada.

La Tabla 3-27 presenta las dosis promedio diarias para una mujer promedio; dado que la tasa de inhalación es menor para las mujeres, las dosis de inhalación de UFP son menores en todos los modos de transporte en comparación con las dosis obtenidas para los hombres.

**Tabla 3-27.** Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad.

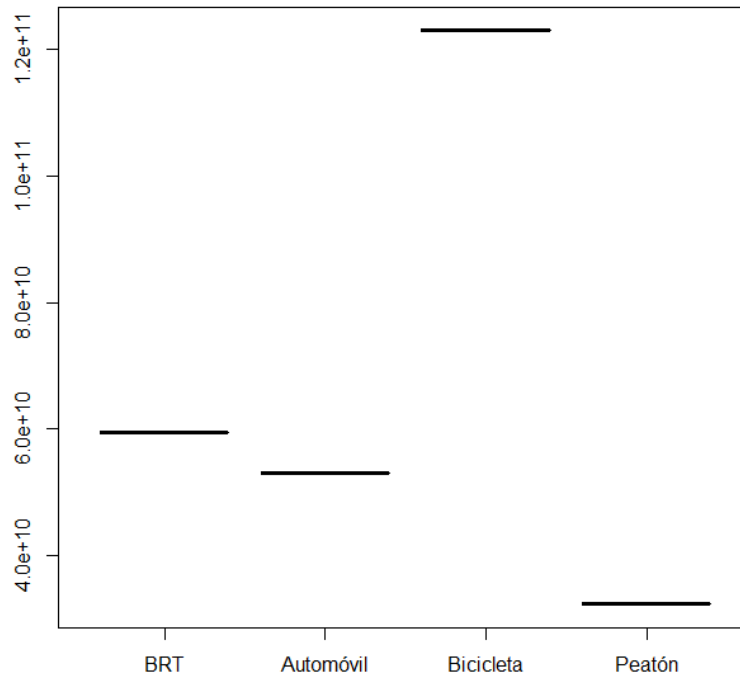
MUJER PROMEDIO CON ESTADÍSTICAS DE MOVILIDAD							
Concentración Promedio Modo		Tasa de Inhalación (m3/hora)	Tiempo de Exposición (horas/día)	Frecuencia de Exposición (días/año)	Duración de Exposición (años)	Tiempo Promedio (Días)	ADD (ptc/día)
Concentración (ptc/m3)	Modo						
1,29E+11	BRT	0,36	1,28E+00	72	79	5683	5,95E+10
1,61E+11	Automóvil	0,36	9,17E-01	59	79	4630	5,31E+10
1,71E+11	Bicicleta	1,14	6,33E-01	20	79	1579	1,23E+11
1,02E+11	Peatón	0,63	5,00E-01	91	79	7226	3,23E+10

Fuente: El Autor.

La dosis de inhalación promedio para las mujeres de la ciudad de Bogotá por modo de transporte se presenta en la Figura 3-22.

**Figura 3-22.** Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con estadísticas de movilidad.

**ADD Mujer con datos estadísticos (ptc/día)**



Fuente: El Autor.

### 3.2.2 Dosis de Inhalación Promedio con Trayecto Fijo y Duración Variable

La Dosis de inhalación se obtuvo considerando el mismo tramo de vía para cada uno de los modos de transporte, sin importar la duración del desplazamiento en cada uno de ellos. Los tramos se eligieron considerando el modo de transporte con menor desplazamiento, para este caso el peatón.

La Tabla 3-28 presenta las dosis promedio diarias para un hombre promedio considerando un trayecto fijo.

**Tabla 3-28.** Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio con trayecto fijo y duración variable por modo de transporte en Bogotá.

HOMBRE CON TRAYECTO FIJO Y DURACIÓN VARIABLE							
Concentración Promedio Modo		Tasa de Inhalación (m3/hora)	Tiempo de Exposición (horas/día)	Frecuencia de Exposición (días/año)	Duración de Exposición (años)	Tiempo Promedio (Días)	ADD (ptc/día)
Concentración (ptc/m3)	Modo						
1,33E+11	BRT	0,45	1,18E-01	72	72	5179	7,10E+09
1,83E+11	Automóvil	0,45	1,68E-01	59	72	4220	1,38E+10
1,62E+11	Bicicleta	1,2	4,12E-01	20	72	1439	8,01E+10
1,05E+11	Peatón	0,78	9,85E-01	91	72	6586	8,08E+10

**Fuente:** El Autor.

El peatón presentó la dosis promedio de inhalación más alta al considerar un recorrido fijo, debido al aumento del tiempo de exposición con respecto a los demás modos y a la tasa de inhalación de la actividad. Es importante considerar que este modo de transporte presenta la menor concentración de UPF, lo que implica que altos periodos de exposición influye directamente con la dosis de inhalación.

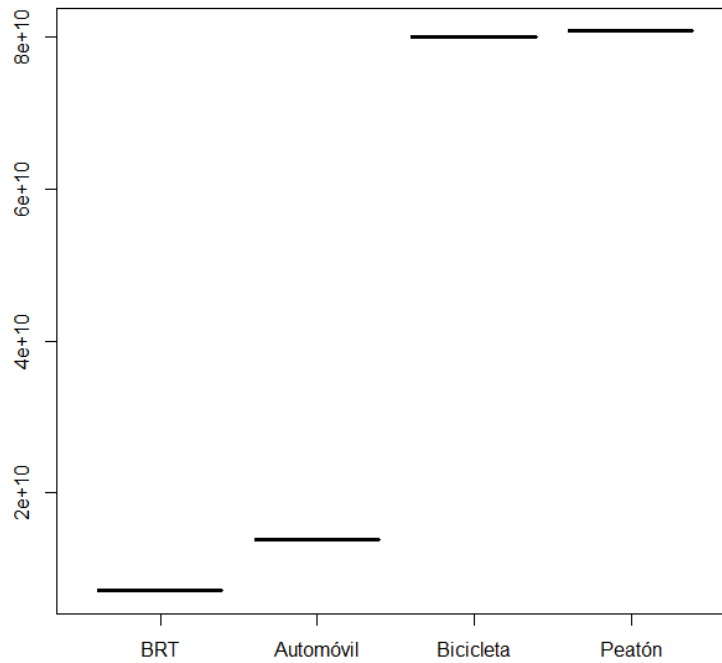
La amplia variación entre los tiempos de recorrido se ve reflejada en las dosis de inhalación obtenidas.

El BRT presentó la menor dosis de inhalación ya que obtuvo la menor concentración de UFP después del peatón y los menores tiempos de desplazamiento.

La Figura 3-23 presenta la dosis de inhalación promedio para los hombres al considerar trayectos fijos.

**Figura 3-23.** Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con trayecto fijo y duración variable.

**ADD Hombre con Trayecto Fijo y Duración Variable (ptc/día)**



**Fuente:** El Autor.

Las dosis de inhalación obtenidas para un hombre promedio según modo de transporte, con recorrido fijo y duración variable se presentan en la Tabla 3-29.

**Tabla 3-29.** Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio con trayecto fijo y duración variable por modo de transporte en Bogotá.

MUJER CON TRAYECTO FIJO Y DURACIÓN VARIABLE							
Concentración Promedio Modo		Tasa de Inhalación (m3/hora)	Tiempo de Exposición (horas/día)	Frecuencia de Exposición (días/año)	Duración de Exposición (años)	Tiempo Promedio (Días)	ADD (ptc/día)
Concentración (ptc/m3)	Modo						
1,33E+11	BRT	0,36	1,18E-01	72	79	5683	5,68E+09
1,83E+11	Automóvil	0,36	1,68E-01	59	79	4630	1,10E+10
1,62E+11	Bicicleta	1,14	4,12E-01	20	79	1579	7,61E+10
1,05E+11	Peatón	0,63	9,85E-01	91	79	7226	6,57E+10

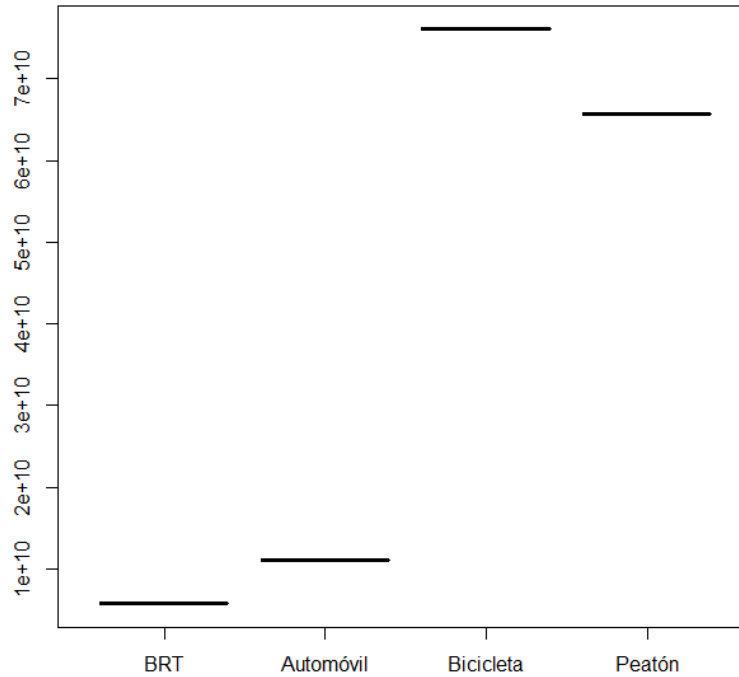
**Fuente:** El Autor.

Se puede evidenciar una disminución en la dosis de inhalación para la mujer en los modos de transporte con actividad ligera debido a que la tasa de inhalación es menor para este género.

La dosis de inhalación para una mujer promedio considerando trayectos fijos y duración variable se presenta en la Figura 3-24.

**Figura 3-24.** Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con trayecto fijo y duración variable.

**ADD Mujer con Trayecto Fijo y Duración Variable (ptc/día)**



**Fuente:** El Autor.

La distribución de dosis de inhalación para los dos géneros es igual, siendo el BRT el que presenta menor dosis seguido por el automóvil. En los modos con actividad ligera la mujer presenta menor dosis de inhalación en el peatón, seguido por la bicicleta, mientras en el hombre el peatón presenta una mayor dosis de inhalación que la bicicleta.

### 3.2.3 Dosis de Inhalación Promedio con Duración Fija y Trayecto Variable

Para este análisis se tomaron tiempos de desplazamientos de dos (2) minutos para cada modo de transporte en cada una de las vías objeto de estudio.

Las dosis de inhalación promedio diarias para hombre y mujer se presentan en las Tablas 3-30 y 3-31 respectivamente.



**Tabla 3-30.** Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio con duración fija y trayecto variable por modo de transporte en Bogotá.

HOMBRE CON DURACIÓN FIJA Y TRAYECTO VARIABLE							
Concentración Promedio Modo		Tasa de Inhalación (m3/hora)	Tiempo de Exposición (horas/día)	Frecuencia de Exposición (días/año)	Duración de Exposición (años)	Tiempo Promedio (Días)	ADD (ptc/día)
Concentración (ptc/m3)	Modo						
1,33E+11	BRT	0,45	3,33E-02	72	72	5179	2,00E+09
2,03E+11	Automóvil	0,45	3,33E-02	59	72	4220	3,04E+09
1,38E+11	Bicicleta	1,2	3,33E-02	20	72	1439	5,51E+09
1,01E+11	Peatón	0,78	3,33E-02	91	72	6586	2,62E+09

**Fuente:** El Autor.

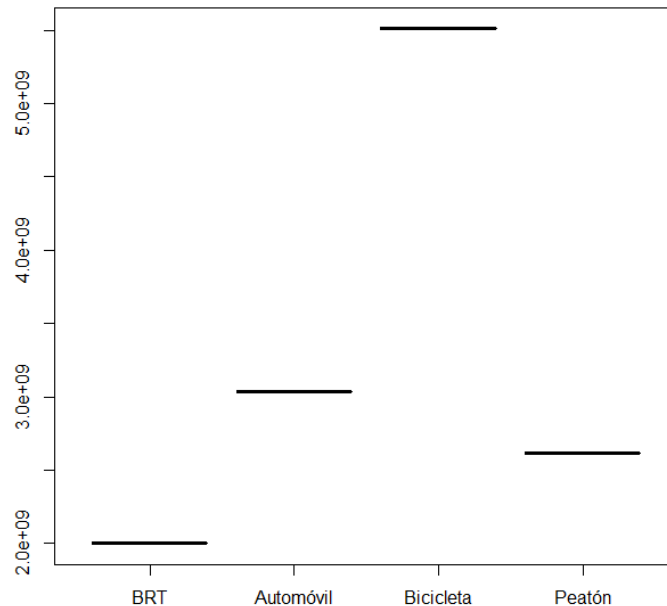
Al considerarse un tiempo de desplazamiento igual para todos los modos, la bicicleta presenta la mayor dosis de inhalación, debido a la mayor tasa de inhalación con respecto a los demás modos.

El BRT presenta la menor dosis de inhalación ya que cuenta con una concentración de UFP inferior al automóvil, siendo la influencia de esta, mayor que la frecuencia de exposición, ya que el BRT presenta una frecuencia de viajes mayor que el automóvil.

Las Figuras 3-25 y 3-26 presentan la dosis de inhalación promedio para hombre y mujer considerando desplazamientos de igual duración.

**Figura 3-25.** Dosis de Inhalación Promedio de un hombre promedio por modo de transporte en Bogotá con duración fija y trayecto variable.

**ADD Hombre con Duración Fija y Trayecto Variable (ptc/día)**



**Fuente:** El Autor.

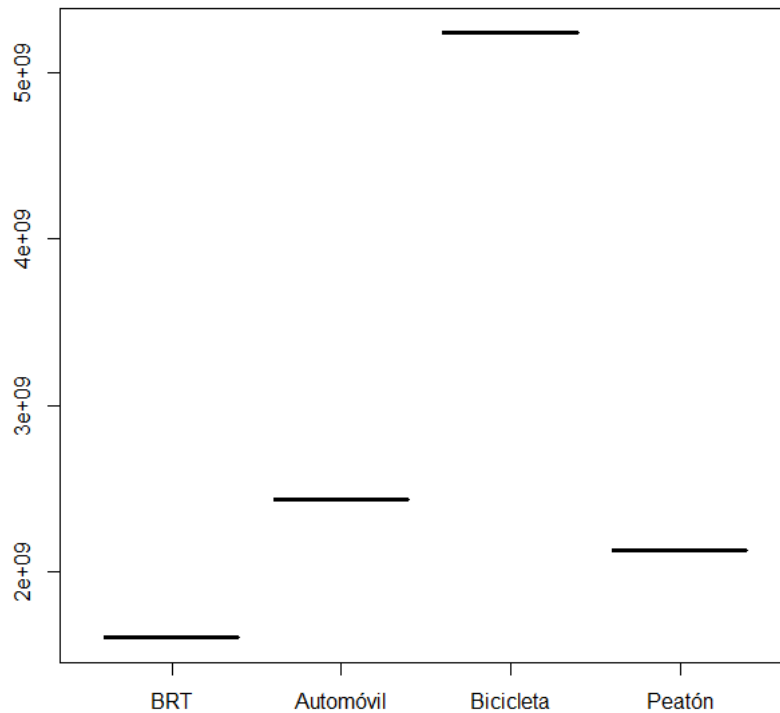
**Tabla 3-31.** Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio con duración fija y trayecto variable por modo de transporte en Bogotá.

MUJER CON DURACIÓN FIJA Y TRAYECTO VARIABLE							
Concentración Promedio Modo		Tasa de Inhalación (m3/hora)	Tiempo de Exposición (horas/día)	Frecuencia de Exposición (días/año)	Duración de Exposición (años)	Tiempo Promedio (Días)	ADD (ptc/día)
Concentración (ptc/m3)	Modo						
1,33E+11	BRT	0,36	3,33E-02	72	79	5683	1,60E+09
2,03E+11	Automóvil	0,36	3,33E-02	59	79	4630	2,43E+09
1,38E+11	Bicicleta	1,14	3,33E-02	20	79	1579	5,24E+09
1,01E+11	Peatón	0,63	3,33E-02	91	79	7226	2,13E+09

**Fuente:** El Autor.

**Figura 3-26.** Dosis de Inhalación Promedio de una mujer promedio por modo de transporte en Bogotá con duración fija y trayecto variable.

**ADD Mujer con Duración Fija y Trayecto Variable (ptc/día)**



**Fuente:** El Autor.

Se puede observar que el BRT presentó las dosis promedio de inhalación más bajas en los análisis con trayecto y tiempo fijo, en el estudio realizado con las estadísticas de movilidad el modo de transporte con menor tasa de inhalación fue el peatón.

La bicicleta obtuvo las dosis de inhalación más altas en los análisis con la información de estadísticas de movilidad y con igual tiempo de recorrido, mientras que el peatón

presentó las mayores dosis cuando se realizó el análisis con el mismo recorrido para el género masculino.

### 3.3 Discusión

El modo de transporte que presentó mayores concentraciones de UFP en el análisis sin equivalencia fue la bicicleta, lo cual puede explicarse por la influencia de emisiones frescas de los vehículos y la cercanía de las ciclorrutas a las vías. Su media, sin embargo, es muy cercana a la obtenida en el modo automóvil. En el análisis con equivalencia, el automóvil presentó el mayor promedio de concentración de UFP, seguido por la bicicleta.

El cálculo de dosis de inhalación bajo tres (3) condiciones diferentes permitió observar que el peatón presentó la menor dosis al tomar los datos estadísticos de movilidad, debido a que este modo presenta la menor concentración de partículas y el menor tiempo de exposición. En el análisis con el mismo trayecto, el peatón presentó la mayor dosis en el género masculino, debido a un tiempo de exposición superior al de los demás modos, explicado por la velocidad de desplazamiento. La mujer en este caso presentó una mayor dosis de inhalación con los desplazamientos en bicicleta, debido a la baja tasa de inhalación de los desplazamientos como peatón.

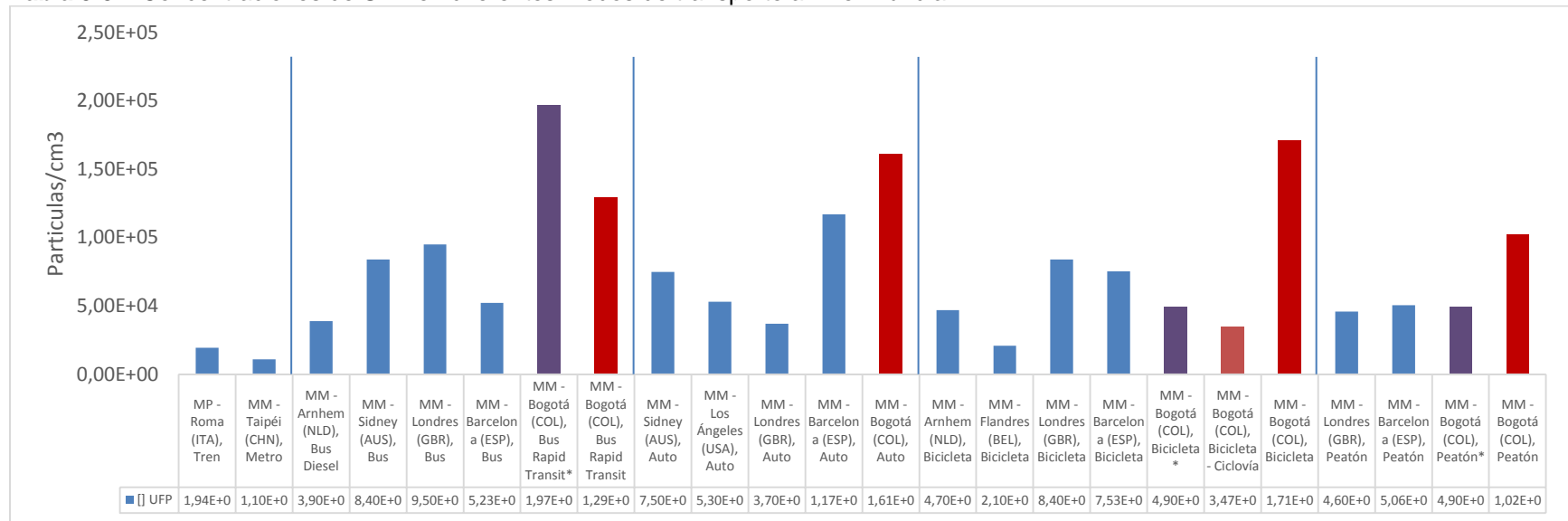
Los desplazamientos en bicicleta presentaron las mayores dosis de inhalación de partículas ultrafinas cuando se emplearon los datos de movilidad, dado que, además de presentar altos promedios de concentración, requieren un mayor esfuerzo físico y, por ende, una tasa de inhalación más alta.

El cálculo de dosis de inhalación con el mismo tiempo de desplazamiento presentó a la bicicleta como el modo con mayor dosis de inhalación, mientras el BRT presentó la menor dosis con un valor cercano al obtenido con los desplazamientos como peatón.

El modo automóvil presentó las mayores concentraciones de UFP en todas las vías analizadas, excepto en la Carrera 7, en la que el BRT tuvo las mayores concentraciones. El BRT y peatón presentaron las menores concentraciones de UFP, en términos generales.

La Figura 3-27 presenta las concentraciones de UFP encontradas en otros países, mostrando que las concentraciones obtenidas en el presente estudio presentan los mayores valores, debido probablemente a que en Bogotá los buses y camiones a diesel no utilizan los filtros de partículas que sí usan en los países en los cuales se han realizado estos estudios. Es posible que exista también un efecto negativo de la altitud de Bogotá en la eficiencia de la combustión, tanto en los motores a gasolina como en los motores a diesel.

**Tabla 3-32.** Concentraciones de UFP en diferentes modos de transporte a nivel mundial.



Nota: Las concentraciones identificadas con (\*) hacen referencia al estudio realizado por R. Morales Betancourt, B. Galvis, S. Balachandran y otros (R. Morales Betancourt, 2017).

Fuente: El Autor.

Bogotá presenta un promedio general de  $1,39E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> sin considerar diferencias entre modos de transporte o vías. En ciudades como Londres y Sídney se han reportado concentraciones de  $3,70E+04$  y  $7,50E+04$  partículas/cm<sup>3</sup>, respectivamente, entre una cuarta parte y la mitad del promedio en Bogotá. Cabe resaltar que la desviación estándar obtenida en Bogotá es de  $5,95E+04$ , por lo que los datos obtenidos tienen un alto nivel de dispersión.

Al realizarse la comparación con el estudio realizado por R. Morales Betancourt, B. Galvis, S. Balachandran y otros (R. Morales Betancourt, 2017), se evidencia una variación importante en los resultados, ya que en dicho estudio el BRT presentó las mayores concentraciones de UFP con  $1,97E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>, mientras en el actual estudio el BRT fue el segundo modo con concentraciones más bajas, siendo sobrepasado únicamente por el peatón con  $1,29E+05$  y  $1,02E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente, lo anterior se puede deber a la configuración de las vías, el número de desplazamientos realizados y las fechas de ejecución de los recorridos.

Por otra parte los desplazamientos realizados en bicicleta presentaron concentraciones de UFP promedio de  $4,66E+04$  en Holanda,  $2,10E+04$  en Bélgica,  $7,53E+04$  en España,  $2,26E+04$  en Suiza y  $8,40E+04$  en Inglaterra. Bogotá presentó una concentración promedio de  $1,71E+05$  partículas/cm<sup>3</sup> al realizar desplazamientos por las ciclorrutas ubicadas sobre las vías principales, es decir, entre 7 y 30 veces las concentraciones de dichas ciudades. Mientras tanto, el desplazamiento efectuado sobre la Carrera Séptima durante la Ciclovía mostró concentraciones de tan solo  $1,70E+04$  partículas/cm<sup>3</sup>, nivel comparable con la situación en las ciudades europeas, debido a la ausencia de vehículos a combustión en las vías contiguas.

El modo peatón, aunque presentó las menores concentraciones en el estudio actual, con  $1,02E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>, también presentó concentraciones superiores a las presentadas por estudios llevados a cabo en ciudades como Londres, Barcelona y Basel los cuales presentaron concentraciones promedio de  $4,60E+04$ ,  $5,06E+04$  y  $1,95E+04$  partículas/cm<sup>3</sup> respectivamente.

El estudio realizado por R. Morales Betancourt, B. Galvis, S. Balachandran y otros (R. Morales Betancourt, 2017) presentó un promedio de UFP de  $4,9E+04$  partículas/cm<sup>3</sup> para los desplazamientos realizados como peatón, siendo la mitad del valor obtenido en

el presente estudio. Esto se puede deber a la diferencia en la distancia entre el peatón y la vía durante los recorridos realizados en cada uno de los diseños experimentales, a las condiciones de tráfico de cada una de las vías, así como a las condiciones meteorológicas presentadas durante los desplazamientos.





## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

El presente estudio analizó las concentraciones de UFP por modo de transporte y vía en la ciudad de Bogotá en horas valle y estableció las Dosis de Inhalación Promedio a UFP para el género masculino y femenino, en los modos de transporte objeto.

Los modos de bicicleta y automóvil presentaron las concentraciones de UFP más altas, con  $1.71E+05$  y  $1.61E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>, respectivamente, bajo el análisis sin equivalencia. La bicicleta presentó un alto nivel de exposición, explicado por su cercanía a las fuentes de emisión y a la exposición directa en el microambiente. Por su parte, el automóvil presentó altas concentraciones debido probablemente a su inmersión dentro de las demás fuentes de emisión y a la alta densidad del tráfico bogotano, que lo ubica dentro de congestiones.

El análisis con equivalencia y el análisis sin equivalencia de datos no presentaron grandes diferencias. Sin embargo, en el análisis con equivalencia la concentración promedio de UFP para el automóvil presentó un aumento, presentando una media de  $1,98E+05$  partículas/cm<sup>3</sup>, mayor que el promedio de la bicicleta.

Las vías con mayores niveles de concentración de UFP fueron la Autopista Sur y la Carrera 30, debido probablemente a la alta presencia de vehículos pesados y la presencia de congestiones vehiculares.

La mayor dosis promedio de inhalación se encontró en el modo de bicicleta, debido al alto nivel de concentración y a una mayor tasa de inhalación asociada a la actividad

física. El automóvil presentó una dosis de inhalación inferior a la de la bicicleta, debido a que cuenta con una tasa de inhalación menor.

El cálculo de dosis de inhalación obtenido al manejar trayectos fijos y tiempo variable, dejó al peatón como el modo de transporte con mayor dosis, debido al aumento del tiempo de exposición de este modo en comparación con los demás y la tasa de inhalación empleada para el cálculo.

El BRT presentó la menor dosis de inhalación para un hombre promedio en los análisis realizados con trayecto fijo - tiempo variable y trayecto variable – tiempo fijo con valores de  $7.10E+09$  y  $2.00E+09$  ptc/día, gracias al bajo nivel de concentración que presentó durante los muestreos. En el análisis realizado con datos estadísticos el peatón presentó la menor concentración para un hombre y una mujer promedio con  $3.97E+10$  ptc/día y  $3.23E+10$  respectivamente. A pesar de ser microambientes contiguo al de las ciclorrutas, la distancia adicional parece ser suficiente para reducir la concentración de partículas ultrafinas y, por ende, la dosis inhalada por los peatones.

## 4.2 Recomendaciones

Es conveniente realizar el estudio en horas pico y horas valle, para identificar el nivel de variación entre las dos actividades vehiculares. Se recomienda obtener un mayor número de datos para mejorar la representatividad del estudio, así como emplear GPS y un analizador portátil de condiciones ambientales.

Las concentraciones de UFP obtenidas en los desplazamientos en bicicleta sobre las ciclorrutas y su comparación con las concentraciones obtenidas durante la ciclovía, permiten establecer la conveniencia de construir las ciclorrutas con una distancia mayor a las vías vehiculares, así como la ubicación de las mismas en vías secundarias.

Los peatones presentaron un nivel de exposición mayor durante los desplazamientos en los que los andenes se encontraban con mayor proximidad a las vías vehiculares, por lo que es recomendable ampliar el espacio de circulación en los mismos.

Se observa la necesidad de implementar en toda la flota vehicular de la ciudad los filtros de partículas empleados en otros países, con el fin de disminuir las emisiones de UFP.



## Bibliografía

- Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria Distrital de Movilidad. (2015). *Encuesta de Movilidad 2015*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Alex A. Karner, D. S. (2010). Near Roadway Air Quality: Synthesizing the Findings from Real-World Data. *Environmental Health Perspectives*, 2-73.
- Araujo, J. A., & E Nel, A. (2009). Particulate matter and atherosclerosis: role of particle size, composition and oxidative stress. *Particle and Fibre Toxicology*, 6-24.
- Arciniegas, Á., Rodríguez, C., Pachón, J., Sarmiento, H., & Hernández Flórez, L. J. (2006). Relación entre enfermedad respiratoria aguda en niños menores a cinco años y contaminación atmosférica en Bogotá. 145-154.
- Arciniegas, A., Rodríguez, C., Pachón, J., Sarmiento, H., & Hernández, L. J. (2006). Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá. *Acta Nova*, 145 - 154.
- Audrey de Nazelle, S. F. (2012). A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmospheric Environment*, 151 - 159.
- Barone, T. L., & Zhu, Y. (2008). The morphology of ultrafine particles on and near major freeways. *Atmospheric Environment*, 6749–6758.
- Berghmans, P., Bleuxa, N., Int Panisa, L., Mishraa, V., Torfsa, R., & Van Poppela, M. (2009). Exposure assessment of a cyclist to PM10 and ultrafine particles. *Science of the total Environment*, 1286-1298.
- Cheng, Y.-H., Liu, C.-C., & Lin, Y.-L. (2009). Levels of ultrafine particles in the Taipei Rapid Transit System. *Transportation Research Part D*, 479–486.
- Daigle, C., Chalupa, D., Gibb, F., Morrow, P. O., Utell, M., & Frampton, M. (2003). Ultrafine Particle Deposition in Human  $\lambda$ s During Rest and Exercise. *Inhalation Toxicology*, 539-552.

- David C. Quiros, E. S. (2013). Ultrafine particle exposures while walking, cycling, and driving along an urban residential roadway. *Atmospheric Environment*, 185 - 194.
- Delfino, R., Sioutas, C., & Malik, S. (2005). Potential Role of Ultrafine Particles in Associations Between Airborne Particles Mass and Cardiovascular Health. *Environmental Health Perspectives*, 934-946.
- Departamento de Salud Humana y Servicios de los Estados Unidos. (1992). *Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos*. Atlanta: Departamento de Salud Humana y Servicios de los Estados Unidos.
- Departamento Nacional de Planeación. (7 de Mayo de 2015). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/DNP%20advierte%20que%20se%20avecina%20colapso%20de%20movilidad%20en%20las%20principales%20capitales.aspx>
- Elder, A., Gelein, R., Silva, V., Feikert, T., Opanashuk, L., Carter, J., & Finkelstein, J. (2006). Translocation of Inhaled Ultrafine Manganese Oxide Particles to the Central Nervous System. *Environmental Health Perspectives*, 1172-1178.
- Environmental Protection Agency . (2009). *Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment)*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency
- Frampton, M. (2007). Does Inhalation of ultrifine Particles Cause Pulmonary Vascular Effects in Humans? *Inhalation Toxicology*, 75-79.
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*, 81-92.
- Gong, L., Xu, B., & Zhu, Y. (2009). Ultrafine Particles Deposition Inside Passenger Vehicles. *Aerosol Science and Technology*, 544-553.
- Gonzales, C. (2012). *Calidad del Aire en la Zona Centro y Oriente de la Ciudad de Manizales: Influencia del Material Particulado (PM10) y Lluvia Ácida*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Gordon, M., Staebler, R. M., Liggio, J., Li, S.-M., Wentzell, J., Lu, G., & Lee, P. (2012). Measured and modeled variation in pollutant concentration near roadways. *Atmospheric Environment*, 138-145.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). *Climate Change 2001 Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Ji Ping Shi, A. K. (1999). Measurements of ultrafine particle concentration and size distribution in the urban atmosphere. *The Science of the Total Environment*, 51-64.
- Kaur, S., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2009). Determinants of Personal Exposure to PM<sub>2.5</sub>, Ultrafine Particle Counts, and CO in a Transport Microenvironment. *Environmental Science & Technology*, 4737 - 4743.
- Kaur, S., Clark, R., Walsh, P., Arnold, S., Colvilea, R., & Nieuwenhuijsen, M. (2006). Exposure visualisation of ultrafine particle counts in a transport microenvironment. *Atmospheric Environment*, 386–398.
- Klepeis, N., Nelson, W., Ott, W., Robinson, J., Tsang, A., Switzer, P., . . . Engelmann, W. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 231-252.
- Knibbs, L., & de Dear, R. (2010). Exposure to ultrafine particles and PM<sub>2.5</sub> in four Sydney transport modes. *Atmospheric Environment*, 3224-3227.
- Li, N. S. (2003). Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage. *Environmental Health Perspectives*, 455–460.
- Lordo, B., Stanford, J., & Mohnson, M. (2006). *Revision of the Metabolically-Derived Ventilation Rates Within the Exposure Factors Handbook*. Battelle Institute, Columbus, OH. Prepared for USEPA/ORD, Contract No. EP-C-04-027. USEPA/ORD.
- M. Fierz, C. H. (2011). Design, Calibration, and Field Performance of a Miniature Diffusion Size Classifier, *Aerosol Science and Technology*. *Aerosol Science and Technology*, 1-10.
- Martina S. Ragettli, E. C.-F.-S. (2013). Commuter exposure to ultrafine particles in different urban locations, transportation modes and routes. *Atmospheric Environment*, 376 - 384.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E., Keogh, D., & Ling, X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications. *Atmospheric Environment*, 8113–8138.
- Phalen, R., Oldham, M., & Nel, A. (2006). Tracheobronchial Particle Dose Consideration. *Toxicological Sciences*, 126-132.

- 
- Pope, C. A., & Dockery, D. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 709 –742.
- R. Morales Betancourt, B. G.-B.-M. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, 135 - 145.
- Renard, J.-B., Dulac, F., Berthet, G., Lurton, T., Vignelles, D., Jégou, F., . . . Charpentier, P. (2016). LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles – Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 1721–1742.
- Rojas, N., & Galvis, B. (2005). Relación entre PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 54-60.
- Salinas, P. (2012). *Contaminación atmosférica por material particulado y consultas de urgencia por morbilidad respiratoria en menores de 5 años en la ciudad de Valdivia, periodo mayo-julio, año 2010*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Samet, J., Rappold, A., Graff, D., Cascio, W., Berntsen, J., Huang, Y., & Devil, R. (2009). Concentrated Ambient Ultrafine Particle Exposure Induces Cardiac Changes in Young Healthy Volunteers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1034-1042.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (18 de Enero de 2016). Exposición personal a Nanopartículas en buses de Transmilenio en el corredor vial de la avenida Caracas en la ciudad de Bogotá. Bogotá, Bogotá, Colombia.
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Second Edition*. New York: Wiley.
- Tanarro, C., & Gálvez, V. (2009). Nanopartículas: ¿un riesgo pequeño? *Seguridad y Salud en el Trabajo*, 34 - 43.
- United States Environmental Protection Agency. (1985). *Development of statistical distribution or ranges of standard factor used in exposure assessment*. Washington: United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency. (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. United States: U.S. Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency. (13 de Abril de 2016). *Exposure Assessment Tools by Routes - Inhalation*. Obtenido de Exposure Assessment



Tools by Routes - Inhalation: <https://www.epa.gov/expobox/exposure-assessment-tools-routes-inhalation>

- Viceministerio de Ambiente. (2010). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Viceministerio de Ambiente. (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Vicepresidencia de Gobernanza Cámara de Comercio de Bogotá. (2013). *Resultados Encuesta de Percepción sobre las Condiciones, Calidad y Servicio a los Usuarios de Transmilenio, TPC y SITP*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Vivas, M. (2007). *Cargadores de Aerosoles Submicrométricos: Cargador Bipolar Radiactivo de Baja Actividad y Cargador Unipolar Corona*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Wahlin, P., Palmgren, F., Van Dingenen, R., & Raes, F. (2000). Pronounced decrease of ambient particle number emissions from diesel traffic in Denmark after reduction of the sulphur content in diesel fuel. *Atmospheric Environment*, 3549-3552.
- Wang, F., Costabile, F., Li, H., Fang, D., & Alligrini, I. (2010). Measurements of ultrafine particle size distribution near Rome. *Atmospheric Research*, 69–77.
- Whitby, K. (1978). The physical characteristics of sulfate aerosols. *Atmospheric Environment*, 135-159.
- Zambrano, C. (1998). *Medición y evaluación de la contaminación del aire, debido a partículas menores a 10 micrometros en la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil: Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- Zurbier, M., Hoek, G., Oldenwening, M., Lenters, V., Meliefste, K., van den Hazel, P., & Brunekreef, B. (2010). Commuters' Exposure to Particulate Matter Air Pollution Is Affected by Mode of Transport, Fuel Type, and Route. *Environmental Health Perspectives*, 783-789.