



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO
PARA DETERMINAR LA EXPOSICIÓN PERSONAL A $PM_{2.5}$
EN MICROAMBIENTES DE TRANSPORTE

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA
OSCAR ARRIETA GARCIA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara**

VOCAL: **Profesor: José Agustín García Reynoso**

SECRETARIO: **Profesor: Iván Yassmany Hernández Paniagua**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Alejandra Mendoza Campos**

2° SUPLENTE: **Profesor: Gema Luz Andraca Ayala**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. Gema Luz Andraca Ayala

SUSTENTANTE:

Oscar Arrieta García

Agradecimientos

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por todo el aprendizaje, las vivencias y los retos que me presentaron durante estos años, los cuales me han formado como la persona que soy ahora y han definido aquello en lo que quiero desempeñarme, además del cómo.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), por facilitar el uso de sus instalaciones e instrumentos, y a su plantilla laboral por el apoyo recibido para poder llevar a cabo este proyecto.

A el Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua, mi asesor, por abrirme la puerta para este trabajo. Su paciencia, dedicación y palabras me llevaron a poder realizar este trabajo y a tener la frente en alto durante todos los desafíos que se presentaron durante la realización del mismo.

A la Dra. Gema Luz Andraca Ayala, mi supervisor técnico, por su apoyo para concluir de manera satisfactoria este trabajo, además, por su genuina preocupación por la integridad de mis compañeros y mía durante los muestreos y dentro del CCA.

Al Dr. Arón Jazcilevich Diamant por su interés sobre el desarrollo del proyecto y por los consejos sobre el mismo.

A la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México por el financiamiento recibido para la realización de este trabajo a través del proyecto SECITI/103 "Exposición a la contaminación por material particulado en la Ciudad de México", a cargo de la Dra. Irma Aurora Rosas Pérez, a quién igualmente extendiendo este agradecimiento.

Al Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente por facilitar equipo para la realización del presente proyecto y en particular al Dr. Antonio Mediavilla Sahagún y a la M. en C. Jennifer García Escalante.

Al Dr. Ricardo Torres Jardón por el apoyo recibido para la realización de diversos experimentos de co-colocación.

A la M. en C. Leticia Martínez Romero por su ayuda para la realización de los experimentos de gravimetría.

Al M. en C. José Manuel Hernández Sólis por el apoyo recibido para la realización de las actividades del presente proyecto.

Al Ing. Wilfrido Gutiérrez López por el apoyo recibido con el mantenimiento de los instrumentos utilizados en el presente proyecto.

Al Ing. León Manuel García Espinoza por el apoyo recibido con el mantenimiento de los instrumentos utilizados en el presente proyecto.

A la I. Q. Samantha Salazar Durán por ser mi mentora en el aprendizaje de cómo debían realizarse los experimentos de este trabajo.

Índice

1. Introducción.....	1
2. Justificación.....	3
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo general.....	4
3.2. Objetivos particulares.....	4
4. Marco Teórico.....	5
4.1. Contaminación del aire.....	5
4.2. Contaminantes criterio.....	6
4.3. Partículas suspendidas (PM)	8
4.4. Fuente de emisión de PMs.....	10
4.5. Tamaños de PMs.....	12
4.6. ¿Qué son las PM _{2.5} ?.....	13
4.7. Panorama del PM _{2.5} en el mundo y México.....	14
4.8. Métodos de medición de PM _{2.5}	15
4.8.1. Medición directa.....	15
4.8.2. Medición indirecta.....	16
4.9. Daños a la salud causados por PM _{2.5}	16
4.10. El transporte público de la ZMVM.....	18
5. Antecedentes.....	20
5.1 Estudios previos de exposición personal a PM _{2.5} en el mundo.....	20
5.2. Estudios previos de exposición a PM _{2.5} en México	21
5.3. Uso de equipos GRIMM para medición de PM _{2.5}	22
6. Materiales y Métodos.....	24
6.1. Diseño de los experimentos.....	24
6.1.1. Muestreo de exposición personal a PM _{2.5} en el transporte público de la ZMVM.....	24
6.1.1.1. Metodología.....	24
6.1.1.2. El espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C.....	26
6.1.2. Validación de las observaciones del espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C.....	27

6.1.3. Comparación con mediciones validadas mediante gravimetría utilizando monitores portátiles pDR-1500 Thermo Scientific.....	29
6.2. Áreas de estudio.....	31
6.2.1. Metro de la ZMVM	31
6.2.2. Metrobús de la ZMVM	32
7. Resultados.....	35
7.1. Obtención del factor de corrección.....	35
7.2. Resultados de exposición personal a PM _{2.5} en el Metro de la ZMVM.....	40
7.2.1. Línea 1 del Metro.....	40
7.2.2. Línea 3 del Metro.....	44
7.3. Resultados de exposición personal a PM _{2.5} en el Metrobús de la ZMVM.....	46
7.3.1. Línea 1 del Metrobús.....	47
7.3.2. Línea 2 del Metrobús.....	53
7.3.3. Línea 7 del Metrobús.....	56
8. Discusión.....	60
8.1. Comparación de las observaciones de exposición personal a PM _{2.5} entre las líneas 1 y 3 del Metro de la ZMVM	60
8.2. Comparación de las observaciones de exposición personal a PM _{2.5} entre las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús de la ZMVM	60
8.3. Comparación de las observaciones de exposición personal a PM _{2.5} entre los 5 días de la semana laboral, muestreados en la línea 1 del Metrobús de la ZMVM durante el 2do periodo de muestreo.....	62
8.4. Comparación de las observaciones de exposición personal a PM _{2.5} en el transporte público de la ZMVM con estudios internacionales.....	64
9. Conclusiones.....	66
10. Referencias.....	68
11. Anexos.....	74
Anexo I. Memoria de Cálculo de la Gravimetría de los pDR-1500 Thermo Scientific.....	74

Anexo II. Factor de Corrección para un pDR-1500 Thermo Scientific.....	75
Anexo III. Factor de Corrección del espectrómetro de aerosoles GRIMM 11-C.....	76
Anexo IV. Resultados de los experimentos de co-colocación	78
Anexo V. Estadísticas generales de las campañas de muestreo.....	79

1. Introducción

El monitoreo de contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se realiza desde el año 1986 cuando fue creado el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México (CDMX). Entre los contaminantes monitoreados se encuentran las partículas suspendidas (PM), incluyendo aquellas iguales o menores a los 2.5 micrómetros, conocidas como $PM_{2.5}$. Los niveles actuales de $PM_{2.5}$ en la ZMVM representan una situación delicada para la salud de sus habitantes, por lo cual se emiten alertas generales en eventos de contingencia. El límite promedio de concentración diaria de $PM_{2.5}$ está establecido en $45 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el límite promedio anual de $12 \mu\text{g m}^{-3}$. Sin embargo, los datos de monitoreo existentes muestran que los promedios de concentración anual pueden llegar a exceder dicho límite hasta en más del doble (SEMARNAT, 2012).

Del total de emisiones de $PM_{2.5}$ en la ZMVM, alrededor del 31.0 % provienen de fuentes de emisión móviles (automotores). Esto resulta importante ya que, de los viajes realizado diariamente, 58.1 % tienen una duración de entre 30 minutos a 2 horas, tiempo en el cual la población puede estar expuesta a $PM_{2.5}$ proveniente de automotores (INEGI, 2017). Por lo cual, en el presente estudio se realizaron muestreos de $PM_{2.5}$ en diferentes rutas del Metro y Metrobús de la ZMVM, en diferentes horarios del día, para determinar la exposición personal en usuarios de dichos transportes. Las líneas seleccionadas son aquellas que recorren la ZMVM de este a oeste y de norte a sur, además de realizar los trayectos por avenidas de alto tránsito vehicular. Las líneas que sirvieron para determinar la exposición a $PM_{2.5}$ fueron la 1 y 3 del Metro; y 1, 2 y 7 del Metrobús.

Se corroboraron los niveles de exposición determinados en estudios previos, los que han sugerido que existen mayores niveles de concentración de $PM_{2.5}$ en el Metrobús comparados con los observados en el Metro. Las observaciones de $PM_{2.5}$ se realizaron con un espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C. Además, se realizaron validaciones con el GRIMM contra el equipo de referencia

de $PM_{2.5}$ de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) instalado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Por último, se recolectaron muestras de $PM_{2.5}$, en monitores portátiles pDR-1500 Thermo Scientific, con el objetivo de realizar determinaciones gravimétricas. Tales determinaciones sirvieron de manera indirecta para verificar el correcto funcionamiento del GRIMM y validar los datos medidos en campo.

2. Justificación

Este trabajo de tesis se llevó a cabo para complementar la información en México sobre la exposición personal a $PM_{2.5}$ en las personas que usan diferentes tipos de transporte público. También, forma parte de una investigación realizada por diferentes alumnos de licenciatura de la Facultad de Química de la UNAM bajo la asesoría de investigadores del CCA. Previamente se encontró que los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ en el Metro (línea 1 y 3) de la ZMVM son generalmente menores a los observados en el Metrobús (línea 1, 2 y 7), además, se observó la oportunidad de ampliar ese conocimiento para así determinar aquellos factores que pueden llegar a influenciar en los hallazgos encontrados. Con el fin de lograr esto, se hizo mayor hincapié en la información recolectada en la bitácora, tales como datos sobre el funcionamiento y tecnología empleada en los medios de transporte muestreados. De igual manera, se decidió realizar un muestreo para la línea 1 del Metrobús, que transita por una de las avenidas más concurridas de la ZMVM (Av. de los Insurgentes), en cada uno de los días de la semana laboral para identificar factores que modifican la concentración de $PM_{2.5}$.

En el trabajo previo de investigación se emplearon únicamente monitores portátiles pDR-1500 Thermo Scientific para medir las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el transporte público, información que se buscó complementar mediante el uso de un espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C. Este último, se diferencia de los equipos pDR por tener la capacidad de medir concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 de forma simultánea, además del número de partículas. La presente tesis incluye adicionalmente, una comparación entre las observaciones obtenidas con los diferentes equipos de medición, lo que permite determinar la viabilidad del uso de estos.

3.Objetivos

3.1. Objetivo general.

Evaluar y cuantificar los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ utilizando el equipo de medición espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C en rutas del Metro y Metrobús de la ZMVM que cruzan de norte a sur y de este a oeste, debido a su proximidad a avenidas de alto tráfico vehicular.

3.2. Objetivos particulares.

- Obtener perfiles espacio-temporales de la concentración ambiente de $PM_{2.5}$ de las líneas previamente mencionadas.
- Identificar cambios en las observaciones de $PM_{2.5}$ según los horarios de medición, temporada del año, ruta, tipo de transporte y modelo en los que se realizaron las mediciones.
- Comparar las observaciones obtenidas del GRIMM con las obtenidas por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), al igual que las de los pDR-1500 Thermo Scientific, después de haber realizado con estos un análisis gravimétrico.
- Realizar la validación de las observaciones de $PM_{2.5}$ en el transporte público con un factor de corrección construido en base a las observaciones de los experimentos de gravimetría de los pDRs y de co-colocación con la RAMA.

4. Marco Teórico

4.1. Contaminación del aire.

Se define como contaminación a la presencia en el ambiente de cualquier agente químico, físico o biológico que sea nocivo para la salud y/o el bienestar de los seres humanos, animales, vegetación e infraestructura (SEMARNAT, 2015). Por ende, la contaminación del aire es aquella donde el ambiente afectado por cualquiera de los agentes anteriores es la atmósfera (OMS, 2018).

La Organización Mundial de la Salud estimó en 2018, que al año mueren alrededor de 7 millones de personas por la contaminación del aire y/o enfermedades relacionadas directamente, lo que equivale a una de cada ocho muertes del planeta (OMS, 2018). Así, la contaminación del aire es uno de los problemas principales de salud actualmente, ya que puede ocasionar enfermedades como neumonía, accidentes cerebrovasculares, cardiopatías isquémicas, neumopatía obstructiva crónica, cáncer de pulmón, entre otras (Falcón-Rodríguez et al., 2016; OMS, 2018).

Las fuentes de emisión de los contaminantes atmosféricos son clasificadas de forma general en naturales (el ser humano no interviene) y antropogénicas (causadas por el ser humano). Este último grupo engloba a los combustibles, la minería, los procesos químicos y nucleares como generadores de contaminantes (SEMARNAT, 2013). Esta clasificación tiene subdivisiones, en el caso de las fuentes naturales, la clasificación se divide en geogénicas (eventos geológicos) y biogénicas (organismos vivos), mientras que, para las fuentes antropogénicas, se tienen fuentes fijas (no se mueven), móviles (se mueven) y fugitivas (no se mueven y tiene un espacio de distribución amplio) (INECC, 2007).

4.2. Contaminantes criterio.

Se define como contaminantes criterio de la atmósfera (CO, O₃, SO₂, NO₂, PMs y Pb) a aquellos que son establecidos por la Agencia de Evaluación Ambiental de los Estados Unidos (EPA), con el objetivo de definir sus niveles máximos para evitar daños tanto a la población como al medio ambiente (SEMARNAT, 2009). Muchos países han adoptado el concepto, pero los niveles máximos permitidos varían por nación. Para el caso de México, cada contaminante criterio tiene una NOM que define sus niveles permitidos. A continuación, se presenta una breve descripción de sus características fisicoquímicas:

- Bióxido de Azufre (SO₂): Este compuesto pertenece a la familia de los óxidos de azufre (SO_x). Estos se forman al quemar combustibles, como el combustóleo y el carbón mineral. El SO₂ es un gas incoloro y puede ser fácilmente disuelto en agua. En seres humanos puede causar irritación e inflamación aguda y/o hasta crónica de la mucosa conjuntival y respiratoria.
- Bióxido de Nitrógeno (NO₂): Este contaminante es el responsable de provocar, sobre zonas urbanas, la capa observable café-rojiza típica del smog. Pertenece a la familia de los óxidos de nitrógeno (NO_x), conocidos entre otras cosas por ser gases altamente reactivos. El NO₂ se forma cuando un combustible es quemado a altas temperaturas y/o contiene compuestos nitrogenados, como en la combustión por vehículos automotores. Sus efectos a la salud incluyen molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos y edema pulmonar.
- Plomo (Pb): El plomo es un metal que puede usarse en una gran variedad de industrias, como lo es la de los combustibles a la hora de fabricar gasolina, pero no es recomendable su uso ya que es altamente tóxico para las personas al acumularse en los órganos, provocando daños irreversibles. Ejemplos del deterioro crónico que puede causar este contaminante a la salud humana, incluyen daños al sistema nervioso, diarrea, vómitos,

dolores de cabeza, convulsiones, entre otros. El plomo llega a la atmósfera cuando la gasolina se consume en un motor, a excepción de este metal que es desechado como partícula. Hoy en día su emisión se ha logrado disminuir al ya no usarse en los combustibles.

- Monóxido de Carbono (CO): Es un gas incoloro e inodoro que se produce naturalmente cuando se oxida el metano (CH₄) y de forma antropogénica cuando un combustible, como la gasolina, se quema de manera incompleta por falta de oxígeno. Cuando se encuentra en altas concentraciones dentro del cuerpo humano, impide el transporte de oxígeno en este, lo que terminaría por causar un paro cardíaco por la falta de oxigenación al corazón.
- Ozono (O₃): Es un contaminante secundario, es decir, no es emitido a la atmósfera, sino que se forma en el aire cuando diferentes compuestos reaccionan entre sí. Estos compuestos son el dióxido de nitrógeno (NO₂) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), cuando se encuentran en la presencia de la luz solar. El O₃ es un compuesto incoloro, además de un agente oxidante. Los daños a la salud, que puede llegar a provocar en las personas, incluyen la inflamación pulmonar, la depresión del sistema inmunológico frente a enfermedades de los pulmones, cambios en las funciones del metabolismo pulmonar, entre otras.
- Partículas Suspendidas (PM): Es una mezcla compleja de diferentes elementos y sustancias en estado sólido o líquido que se encuentran suspendidas en el aire. La exposición prolongada a PMs causa daños crónicos a los sistemas respiratorios y cardiovasculares de la población.

4.3. Partículas suspendidas (PM).

Pueden encontrarse en fase líquida o sólida, además de presentarse en varias formas, tamaños y composiciones químicas. Estas diferencias en la constitución física y química, afectan el comportamiento de PMs en la atmósfera y el cuerpo humano (SEMARNAT, 2012). Una partícula suspendida puede encontrarse en forma elíptica, esférica, cúbica, irregular o de geometría fractal (Figura 4.1). Su composición química depende, tanto de su fuente emisora, como de su mecanismo de formación. Por ejemplo, si se realiza un muestreo de PMs en cualquier costa, se espera que la composición de este contaminante contenga cloruro de sodio, que proviene de la sal de mar (SEMARNAT, 2012).

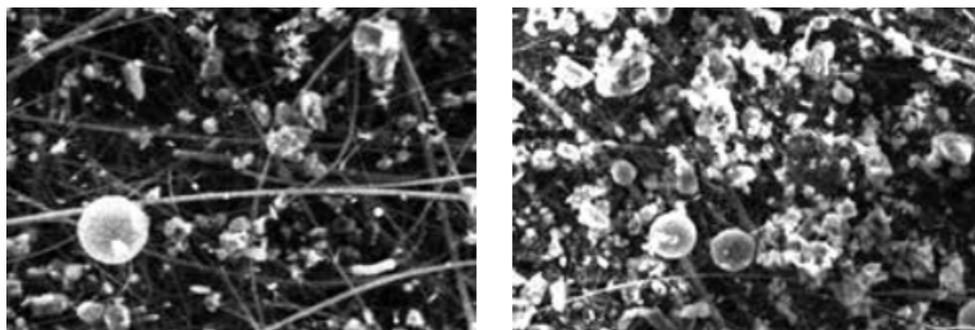


Figura 4.1. Fotos de PMs con diferentes formas (SEMARNAT, 2012).

La composición de PMs no es exclusiva de sólo un compuesto. Se tiene de ejemplo, que PMs formadas en la combustión están formadas del carbón y del material orgánico proveniente de los combustibles. Si este combustible resulta ser una gasolina, las PMs producidas incluirán en su composición al carbón elemental, al carbón orgánico y a pequeñas trazas proveniente de metales. Debido a este fenómeno, los diferentes compuestos que se pueden presentar en PMs son clasificadas en compuestos mayoritarios, aquellos que se encuentran en mayor proporción en la partícula, y en compuestos minoritarios, que son el caso contrario (SEMARNAT, 2012).

Entre los compuestos mayoritarios de PMs se pueden observar a los (SEMARNAT, 2012):

- Sulfatos: Se forman de la oxidación de SO_2 . Pueden encontrarse en la sal de mar y en el material mineral como es el yeso.
- Nitratos: Formados de la evaporación de amoníaco (NH_3) y ácido nítrico (HNO_3).
- Sodio: Se encuentra y se forma en el mar.
- Cloro: Se encuentra y se forma en el mar.
- Carbón Elemental: Se produce al quemar combustibles fósiles. Se encuentra constituido principalmente por hollín (carbono negro).
- Carbón orgánico: Se produce cuando se oxida un COV.
- Componentes minerales: Se obtienen del material del suelo y la roca cuando estos se ven afectados por la fuerza del viento, construcciones y/o demoliciones. Sus principales miembros incluyen el aluminio, la sílice, el calcio y el hierro.
- Agua: Ciertos componentes ya existentes en una partícula, pueden tomar agua de la atmósfera y convertirla en parte importante de la masa de esta. Algunos ejemplos de este tipo de componentes incluyen al nitrato de amonio (NH_4NO_3), al cloruro de sodio (NaCl) y al sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

En cambio, en los compuestos minoritarios de PMs se pueden observar a los (SEMARNAT, 2012):

- Elementos trazas: Se forman en procesos metalúrgicos y de combustión. Ejemplos de este tipo de elementos incluyen al plomo, al cadmio, al mercurio, al níquel, al cromo, al zinc y al manganeso.
- Compuestos orgánicos traza: Son compuestos orgánicos individuales que se encuentran en muy bajas concentraciones. Ejemplos incluyen los hidrocarburos aromáticos policíclicos y a los alifáticos.

4.4. Fuente de emisión de PMs.

Las PMs se clasifican por su tipo de emisión de la misma manera que los demás contaminantes atmosféricos (SEMARNAT, 2013). A continuación, se presenta una descripción más detallada de esta clasificación, centrándose específicamente en PMs.

Naturales (Figura 4.2): Las PMs se forman en fenómenos naturales, ejemplos incluyen a la erosión de las piedras y a las explosiones volcánicas. Debe de considerarse que, si el fenómeno natural se ve afectado por el ser humano, en cualquier forma posible, los contaminantes que se emitan ya no se clasifican como de emisión natural. La subdivisión para este tipo de fuentes incluye a las (INECC, 2007):

- a) Fuentes geogénicas: Se refieren a eventos geológicos como los dos ejemplos de fuentes naturales mencionados al inicio de esta sección. Este tipo de fuentes son las que producen la mayor cantidad de PMs de fuentes naturales (SEMARNAT, 2012).
- b) Fuentes biogénicas: La fuente de emisión es un organismo vivo como las bacterias o la vegetación (INECC, 2007).

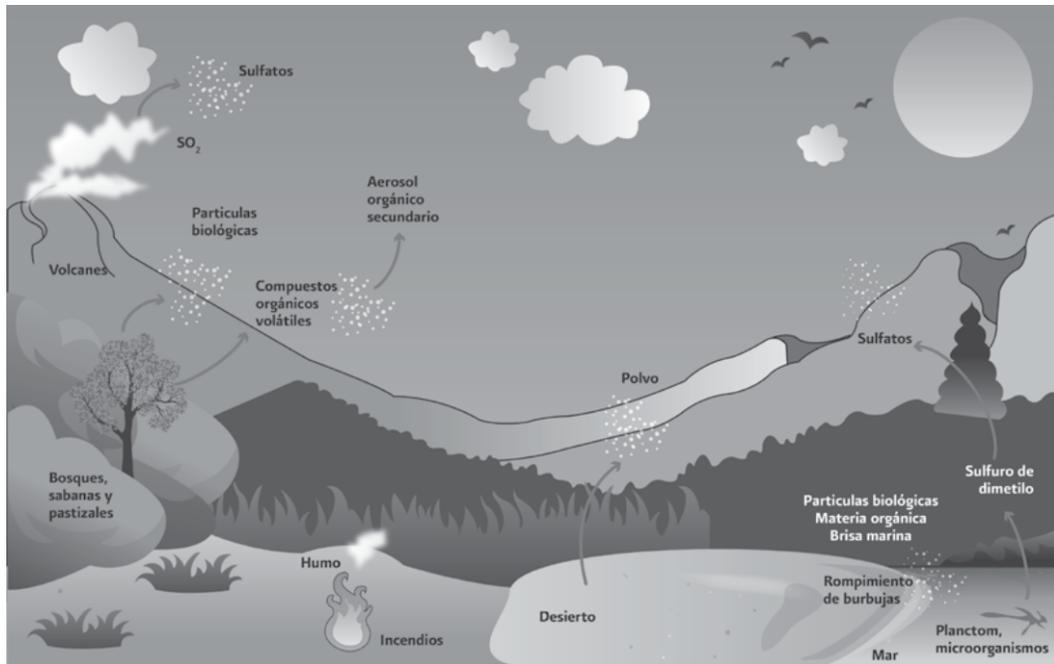


Figura 4.2. Diferentes fuentes de emisión natural de PMs (SEMARNAT, 2012).

Antropogénicas: Las PMs son producidas por actividades del ser humano, un ejemplo muy claro es la combustión realizada en las fábricas o los vehículos motorizados. Se subdivide en los siguientes tipos de fuentes (Arciniegas-Suárez, 2011):

- a) Fuentes fijas: Las emisiones se originan en espacios que no pueden cambiar su posición actual, como lo son las casas y las fábricas. (INECC, 2007).
- b) Fuentes móviles: Las emisiones tienen origen en espacios que se encuentran en constante movimiento, como lo es cualquier vehículo motorizado (INECC, 2007).
- c) Fuentes fugitivas o de área: Se caracterizan en que las emisiones se dan en espacios que no cambian su posición, como las fuentes fijas, y que tienen un área de emisión bastante amplia, a comparación de una chimenea. Ejemplos incluyen calles, terrenos de demolición y áreas agrícolas (SEMARNAT, 2012).

4.5. Tamaños de PMs.

Una clasificación importante para las PMs es la de su tamaño. Esta característica es la que define cuanto tiempo se mantendrá este contaminante suspendido en la atmósfera, además de la zona del cuerpo humano donde impactará y del daño de salud que causará en una persona. Es esta la clasificación principal para diferenciar PMs en trabajos de investigación (INECC, 2005).

Las PMs pueden tener diferentes formas, lo que complica la realización de esta clasificación. Para solucionar este problema se utilizan diámetros equivalentes, que estandarizan la forma de PMs a esferas, siendo el diámetro aerodinámico el de uso más común. Este se define como el diámetro de una esfera de densidad unidad con la misma velocidad de depósito gravitacional que la partícula que se está midiendo. La unidad usada para registrar este tipo de diámetro son los micrómetros (μm) (Arciniegas-Suárez, 2011).

PM_{10} se refiere a PMs que tienen un tamaño menor o igual a los 10 micrómetros. Comparando con algún objeto, una PM_{10} mide menos que una partícula fina de arena o el diámetro de un cabello humano (Figura 4.3), que miden 90 y 70 micrómetros respectivamente. PM_{10} es uno de los 2 tamaño estándar para muestrear PMs (SEMARNAT, 2012).

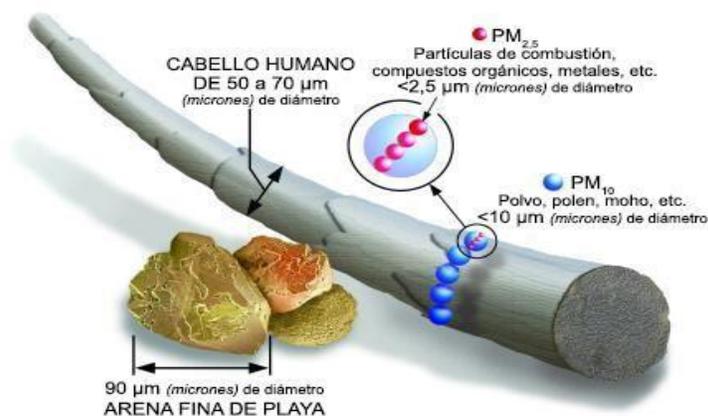


Figura 4.3. Comparación entre los tamaños de $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , granos de arena y cabello humano (EPA, 2018).

4.6. ¿Qué son las PM_{2.5}?

PM_{2.5} es la segunda medida estándar de las PMs y son aquellas que miden 2.5 micrómetros o menos. Se caracterizan por tener una gran solubilidad, ser capaces de absorber humedad de su medio circundante, por mantenerse flotando en la atmósfera de días hasta semanas y por viajar de cientos a miles de kilómetros antes de impactar en alguna superficie (Linares-Gil & Díaz-Jiménez, 2009).

El menor tamaño de una PM_{2.5} la vuelve más peligrosa, debido a que puede mantenerse más tiempo sobre la atmósfera, es más probable a incrustarse en las vías respiratorias de las personas y llega a causar mayores daños a la salud del cuerpo humano (SEMARNAT, 2012). Las Tablas 4.1 y 4.2 muestran las diferencias de composición y fuentes de emisión de PMs según su tamaño.

Tabla 4.1. Comparación de la composición de PMs según su tamaño.

	Tipo de partícula	
	≤ PM _{2.5}	PM _{2.5} -PM ₁₀
Composición	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sulfatos, nitratos, amonios y iones de hidrógeno. ▪ Carbón elemental. ▪ Gran variedad de compuestos orgánicos. ▪ Metales: Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc. ▪ Agua ligada a PMs. ▪ Bacterias y virus. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nitratos, cloruros y sulfatos de reacciones de HNO₃, HCl y SO₂ con PMs gruesas. ▪ Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti y Fe). ▪ CaCO₃, CaSO₄, NaCl y sal marina. ▪ Bacterias, polen, moho, esporas de hongos, detritos de plantas y animales.

Adaptado de la "Guía Metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}", SEMARNAT, 2012, página 23. Disponible en línea: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2020.

Tabla 4.2. Fuentes de emisión de PMs según su tamaño.

	Tipo de partícula	
	$\leq PM_{2.5}$	$PM_{2.5}-PM_{10}$
Fuente de emisión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Combustión fósil y combustibles de biomasa, temperaturas altas de procesos industriales, fundidoras, refinerías, acereras, etc. ▪ Oxidación atmosférica de NO_2, SO_2 y compuestos orgánicos, incluidos especies orgánicas biogénicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Re-suspensión de PMs depositadas en las calles. ▪ Llantas, residuos de los caminos y de balatas de freno. ▪ Suspensión de suelos (cultivos, minería y calles no pavimentadas). ▪ Construcciones y demoliciones. ▪ Cenizas de combustión de carbón no controlado, petróleo y madera. ▪ Brisa marina.

Adaptado de la "Guía Metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ ", SEMARNAT, 2012, página 29. Disponible en línea: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2020.

4.7. Panorama del $PM_{2.5}$ en el mundo y México

Un informe realizado por el grupo IQ Air en 2018 (Figura 4.4), estimó que los 5 países con mayor concentración media anual de $PM_{2.5}$ son Bangladesh ($97.1 \mu g m^{-3}$), Pakistán ($74.3 \mu g m^{-3}$), India ($72.5 \mu g m^{-3}$), Afganistán ($61.8 \mu g m^{-3}$) y Bahréin ($59.8 \mu g m^{-3}$). Todos estos países pertenecen al continente asiático, el cual es considerado, por este documento, el continente con mayores concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ (IQ Air, 2018).

El mismo reporte menciona para la zona de Latinoamérica y del Caribe, que el Top 5 de países con mayor concentración media anual de $PM_{2.5}$ se conforma de Perú ($28.0 \mu g m^{-3}$), Chile ($24.9 \mu g m^{-3}$), México ($20.3 \mu g m^{-3}$), Brasil ($16.3 \mu g m^{-3}$) y Colombia ($13.9 \mu g m^{-3}$). Las posiciones a nivel mundial de estas naciones son 21, 26, 33, 44 y 50, respectivamente. Estos niveles de $PM_{2.5}$ afectan,

predominantemente, la salud de grupos vulnerables, como lo son los niños y los adultos mayores (IQ Air, 2018).

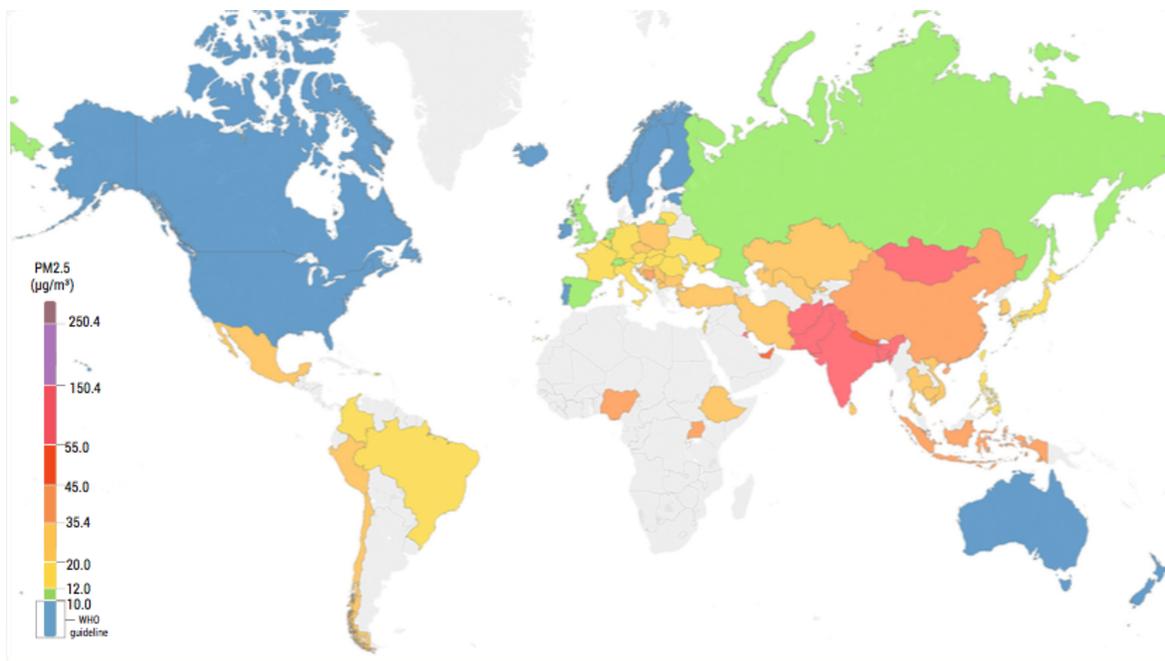


Figura 4.4. Mapa con las estimaciones de las concentraciones de PM_{2.5} en el mundo durante el año 2018 (IQ Air,2018).

Un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en 2017, estimó que las 5 zonas del país con los promedios anuales más altos de concentración de PM_{2.5} son la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (43.0 µg m⁻³), la ZMVM (29.0 µg m⁻³), Tijuana (28.0 µg m⁻³), la Zona Metropolitana de Guadalajara (27.0 µg m⁻³) y Atitalaquia (26.0 µg m⁻³). Siendo la mayoría zonas industriales y/o estando en el centro del país (INECC, 2018).

4.8. Métodos de medición de PM_{2.5}

4.8.1. Medición directa

Este tipo de métodos se basan en la toma de muestras de aire ambiente (SEMARNAT, 2012). Un muestreo de este tipo puede realizarse de manera continua o discreta. En la primera se tiene la ventaja de la precisión, ya que se toman en cuenta todas las variables que pueden modificar el flujo. Existen varios principios que se utilizan en los instrumentos que hacen muestreo continuo. Estos

incluyen la opacidad, la dispersión de luz, la atenuación de radiación beta, la electrificación de ondas, la extinción de luz y el centelleo óptico. Con esta diversidad de principios, se debe de tener cuidado al momento de interpretar los resultados, debido a que la definición de concentración de una fracción determinada de PMs entre un método y otro son distintos (SEMARNAT, 2012).

Los métodos discretos son aquellos que extraen una muestra de flujo con las PMs, para poder determinar una concentración a flujo estable en un tiempo corto. El método determina un promedio de concentración de $PM_{2.5}$ durante el tiempo que se tomó la muestra. Una de las características principales de este método es que las PMs del flujo deben mantenerse en este para que la medición pueda considerarse correcta (SEMARNAT, 2012).

4.8.2. Medición indirecta.

Este tipo de mediciones son las más comunes para medir $PM_{2.5}$ debido a su sencillez. Su desventaja radica en que se obtienen resultados inexactos, si se comparan con las obtenidos en mediciones directas, además de que, en las mediciones, se realizan suposiciones que no se pueden comprobar. En cambio, 2 ventajas de este método son que se puede acotar la magnitud de las emisiones y que se pueden dar buenos indicios del nivel global de las emisiones de $PM_{2.5}$ (SEMARNAT, 2013).

4.9. Daños a la salud causados por $PM_{2.5}$.

El efecto de $PM_{2.5}$ dentro del cuerpo humano y en la salud de las personas, dependerá de sus características físicas y químicas, como tamaño, forma, densidad y composición. Existen 4 formas en las que una $PM_{2.5}$ puede depositarse en los pulmones, siendo estas (CCSSO, 2009):

1. Intercepción: Viaja tan cerca de una superficie, que termina por tocarla y adherirse a esta.
2. Impacto: Tiene una ruta de movimiento cuando está en la atmósfera (puede llegar a ser modificada por el viento), misma que seguirá ya dentro del

cuerpo. Si en esta ruta se encuentra algún objeto o superficie, la partícula termina por adherirse a esta.

3. Sedimentación: Influenciada por la fuerza de gravedad, la partícula puede depositarse en alguna superficie, como la de los pulmones, incluyendo la zona de los bronquios y bronquiolos.
4. Difusión: Únicamente sucede con PMs que son más pequeñas a los 0.5 μm . Al tener esas dimensiones se depositan en alguna superficie, como la de los pulmones.

La Tabla 4.3 presenta la diferencia entre PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ al depositarse en el cuerpo. La Figura 4.5 presenta de forma clara las zonas donde se depositan las diferentes PMs.

Tabla 4.3. Características de la deposición de PMs en el sistema respiratorio según su tamaño.

Tamaño	Área de deposición	Método de deposición
$\leq \text{PM}_{2.5}$	Tráquea, Región Bronquial y Bronquiolar.	Sedimentación.
PM_{5-10}	Región Naso-Faringal.	Impacto.

Adaptado de “¿Cómo entran los particulados al sistema respiratorio?”, Centro Canadiense de Seguridad y Salud, 2009. Disponible en línea: http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/how_do.html. Último acceso: 15 de febrero de 2020.

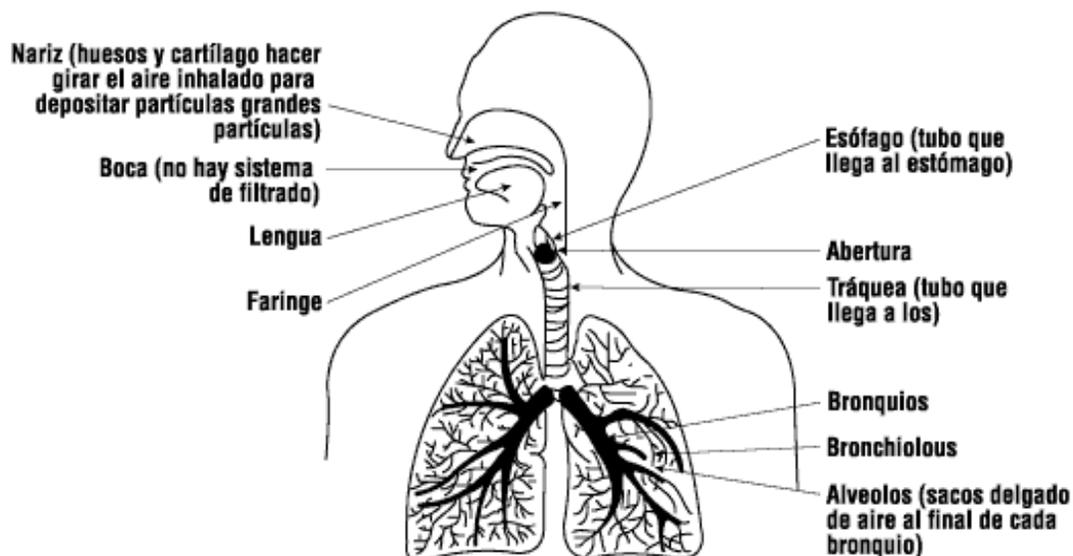


Figura 4.5. Diagrama del sistema respiratorio humano (CCSSO, 2009).

Las PMs pueden causar, en los seres humanos, problemas crónicos de tipo respiratorios y/o cardiovasculares, afectando principalmente a niños y adultos mayores (OMS, 2018). Cuando hablamos de $PM_{2.5}$, el riesgo es mayor, debido a su facilidad para llegar hasta los pulmones y el torrente sanguíneo (INECC, 2005). Entre las diferentes enfermedades que llegan a presentarse debido a este contaminante se conoce al asma, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, la fibrosis pulmonar, los daños a biomoléculas y el depósito de plaquetas en las arterias (Falcón-Rodríguez et al., 2016).

4.10. El transporte público en la ZMVM.

Según el informe de la INECC (2018) mencionado en la sección 4.7, diferentes regiones dentro de la ZMVM presentan diferentes concentraciones de $PM_{2.5}$, es decir existen variaciones espaciales debido a condiciones que afectan la emisión y/o permanencia de $PM_{2.5}$ en el ambiente (INECC, 2007). Por ello la población se verá afectada por la relación de $PM_{2.5}$ con las actividades de su vida diaria y donde las realiza. Una actividad que resulta básica para poder realizar las demás actividades cotidianas es viajar, ya sea para ir a trabajar, participar en actividades culturales o simplemente para que una persona regrese a su casa. El Instituto Nacional de Estadística y Geología (INEGI) determinó en 2017 que entre semana se realizan alrededor de 34.6 millones de viajes en la ZMVM. De éstos, 15.6 millones son en transporte público, siendo el tipo de transporte más usado por las personas, con una preferencia para vehículos de modalidad colectiva de 3 de cada 4 habitantes (INEGI, 2017).

En la ZMVM se realizan 4.5 millones de viajes a la semana en Metro, mientras en el Metrobús se realizan 1.1 millones de viajes. Estos dos tipos de vehículos se encuentran en el 2do y 4to lugar de uso de transporte público más populares entre los usuarios, respectivamente. Además, el tiempo de estos viajes por individuo y motivo varía, como en el caso de ir al trabajo (Figura 4.6), donde es más común hacer viajes de 31 minutos a una hora, seguidos de viajes de una a dos horas (INEGI, 2017).



Figura 4.6. Porcentajes de la población de la ZMVM, según la cantidad de tiempo en la que tardan en llegar a su trabajo (INEGI, 2017).

El transportarse es indispensable y requiere de periodos de tiempo considerables, pero puede resultar en un riesgo para la población si los niveles de contaminación, incluyendo $PM_{2.5}$, son relativamente altos en estos viajes. Lamentablemente, no existe, a la fecha y a nivel mundial, una normatividad aplicable para microambientes de transporte que permitan apoyar en la protección de la salud de los usuarios. De tal forma que estudios de exposición personal pueden permitir conocer los niveles de exposición en tales microambientes con miras a generar estrategias que permitan mitigar la exposición de la población cuando se traslada diariamente.

5. Antecedentes

5.1. Estudios previos de exposición personal a PM_{2.5} en el mundo.

Alrededor del mundo los estudios sobre exposición personal a PM_{2.5} en microambientes de transporte son amplios. Por ejemplo, Adams et al. (2001) en Londres, estudió la exposición a PM_{2.5} en diferentes tipos de vehículos, incluyendo el autobús, la bicicleta, el Metro y el carro. Dicho estudio mostró promedios de concentración de PM_{2.5} parecidas en aquellos transportes que se encuentran al aire libre, un ejemplo serían los promedios de concentración de 34.5 µg m⁻³ en la bicicleta y de 39.0 µg m⁻³ en el camión, durante julio de 1999. El Metro, que no cumple la característica anterior, mostró un promedio de 247.2 µg m⁻³, para el mismo periodo de tiempo.

En Estados Unidos, Quiros et al. (2013), no solo trabajó con PM_{2.5} sino también realizaron muestreos de partículas ultrafinas (UFC). El estudio se realizó para observar la exposición cuando la población se traslada caminando, en bicicleta y en carro, este último tanto con ventanas abiertas y cerradas. Se realizaron mediciones en los horarios de las 8:30 a 9:30, 12:30 a 14:30 y 17:00 a 19:00 PST. La media de concentración de PM_{2.5} general varió de 2.0 a 15.0 µg m⁻³. También se determinó que la exposición a PM_{2.5} es 15 veces mayor en autos con las ventanas abiertas que en la bicicleta y 30 veces mayor que al caminar.

Okokon et al. (2017) realizó muestreos de exposición personal a PM_{2.5} en las ciudades de Helsinki, Finlandia; Rotterdam, Países Bajos y Thessaloniki, Grecia. Estos muestreos se realizaron para viajes en bicicleta, carro y autobús. El estudio incluyó el muestreo de PM_{2.5}, PM₁₀, carbono negro y de ruido. Los resultados mostraron que la ciudad más contaminada, en general, fue Thessaloniki, teniendo la media de concentración de PM_{2.5} más alta del muestreo, con un valor de 85.0 µg m⁻³. Las tres ciudades mostraron que las concentraciones de PM_{2.5} fueron mayores en el transporte público que en el privado.

5.2. Estudios previos de exposición a PM_{2.5} en México.

Los estudios sobre exposición a PM_{2.5} en México se han centrado en la ZMVM, sin embargo, la mayoría se realizaron antes de 2010 por lo cual nuevos estudios son necesarios para actualizar la información existente. Por ejemplo, el estudio “Evaluación de los beneficios de la exposición personal de pasajeros por la instrumentación de cambios en el transporte público”, realizado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) y el Centro de Transporte Sustentable (CTS) en 2004, comparó la exposición personal a CO, PM₁₀, PM_{2.5} y benceno entre la línea 1 del Metrobús, recientemente construida, con los microbuses y autobuses que seguían la misma ruta (INE y CTS, 2006).

Los resultados del Metrobús para concentraciones de PM_{2.5} mostraron un nivel promedio de 111.0 µg m⁻³, además de una relación PM_{2.5}/PM₁₀ de 0.61, para los 68 viajes realizados por toda la línea (Indios Verdes-San Ángel) y un promedio de 209.0 µg m⁻³, con una relación PM_{2.5}/PM₁₀ de 0.67, para el recorrido de la zona norte de la línea (Indios Verdes-Reforma) realizando la misma cantidad de viajes. Ello mostró que en la zona norte de la ZMVM se observan mayores niveles de exposición a PM_{2.5} que en la zona sur. Finalmente, los porcentajes de reducción de la mediana de PM_{2.5} del Metrobús contra la de los microbuses fueron de 35 %, y contra los autobuses de 23 % (INE y CTS, 2006).

Hernández-Paniagua et al. (2018) realizaron muestreos de exposición personal a PM_{2.5} durante los días 10 a 14 de noviembre de 2014 en los microambientes de 5 formas de traslado (caminata, bicicleta, trolebús, bus a diésel y carro, convencional o híbrido eléctrico) sobre la Av. Miguel Ángel de Quevedo de la CDMX. Los resultados mostraron que los niveles de exposición personal tienen heterogeneidad espacial únicamente en los casos de la caminata y la bicicleta. Estos 2 medios de traslado mostraron el mayor y menor promedio aritmético de PM_{2.5}, caminata: 16.5 µg m⁻³ y bicicleta: 81.7 µg m⁻³.

Tiburcio (2019) evaluó los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en las líneas 1 y 3 del Metro y en las líneas 1 y 2 del Metrobús de la ZMVM durante la temporada seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. Ella reportó que el Metrobús presentó una media de concentración de $PM_{2.5}$ que osciló entre 15.1 a 144.5 $\mu g m^{-3}$, mayor a la del Metro de 8.3 a 38.5 $\mu g m^{-3}$. Igualmente se observó que las concentraciones de PMs son mayores en la mañana y en la temporada seca caliente. La extensión del trabajo anterior impidió que se validaran los resultados obtenidos, por lo que no se pueden comparar con las observaciones obtenidas en la presente tesis (Tiburcio, 2019).

5.3. Uso de equipos GRIMM para medición de $PM_{2.5}$.

El equipo usado en esta tesis para cuantificar la exposición personal a $PM_{2.5}$ fue el espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C. Diferentes modelos a este han sido usados previamente en distintos estudios. Por ejemplo, Cheng & Lin (2010) usó el GRIMM modelo 1.108 para determinar la concentración y la distribución del tamaño de PMs en la estación de transporte Taipéi, ubicada en la ciudad China del mismo nombre. En dicho estudio se observó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ oscilaban entre 3.8 a 59.7 $\mu g m^{-3}$, mientras que la distribución del tamaño se encontraba entre 0.3 a 12.5 μm .

Cheng & Li (2010), fue otro estudio donde se utilizó el mismo modelo de GRIMM en una taquilla de peaje ubicada en Taipéi para comparar las observaciones de PM_{10} contra $PM_{2.5}$. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ oscilaron entre 6.5 a 187.9 $\mu g m^{-3}$. Se observó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron mayores cuando había vehículos en la caseta de peaje y cuando la temperatura fue baja.

Cheng (2008) realizó un muestreo simultáneo de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con el espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 1.108, el DustTrak TSI modelo 8520 y el SA muestreador dicotómico 241 en una fundidora de acero. Él comparó los primeros dos equipos contra el tercero usando el método de gravimetría. Se encontró que el DustTrak sobre-estimaba sus observaciones, mientras que el

GRIMM las sub-estimaba. Al final se determinaron factores de corrección de 0.74 para el DustTrak y de 1.33 para el GRIMM, con la función de poder corregir los resultados de estos equipos.

6. Materiales y métodos

6.1. Diseño de los experimentos.

6.1.1. Muestreo de exposición personal a $PM_{2.5}$ en el transporte público de la ZMVM.

6.1.1.1. Metodología.

En el presente trabajo se realizaron un total de 12 muestreos de los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en los sistemas de transportes colectivo Metro, líneas 1 y 3, y Metrobús, líneas 1, 2 y 7, de la ZMVM. Todos los muestreos fueron realizados durante las rutas completas en trayectos definidos como ida y regreso. Se definió como origen de los viajes las direcciones de oeste a este y de sur a norte, con excepción de la línea 7 del Metrobús en la que los viajes iniciaron en la dirección de norte a suroeste.

Los muestreos realizados se dividen en dos periodos con la finalidad de determinar las variaciones temporales entre ambas. El 1er periodo de muestreo se realizó en los meses de octubre y noviembre de 2018, que corresponde a la temporada seca fría, y comprendió 5 muestreos, uno para cada línea previamente mencionada. Todos los muestreos se realizaron durante los miércoles, considerando que son representativos de los días laborales (Hernández-Paniagua et al., 2018).

El segundo periodo de muestreo se realizó en los meses de febrero a mayo de 2019, que corresponden al final de la temporada seca fría y a la temporada seca caliente. En total se realizaron 7 muestreos, dos de estos para las líneas 2 y 7 del Metrobús. Los otros cinco muestreos se realizaron en la línea 1, del mismo medio de transporte, para cada uno de los cinco días de la semana laboral, con la finalidad de detectar cambios en los niveles de $PM_{2.5}$ originados por diferencias en

los patrones del transporte día a día. La Tabla 6.1 muestra el calendario de todos los muestreos realizados en ambas temporadas.

Tabla 6.1. Calendario de muestreos de exposición personal a PM_{2.5} realizados en el Metro y Metrobús de la ZMVM.

Año y temporada	Transporte	Línea	Fecha
2018-Seca fría	Metro	3	Miércoles 10 de octubre
		1	Miércoles 17 de octubre
	Metrobús	1	Miércoles 24 de octubre
		2	Miércoles 31 de octubre
		7	Miércoles 7 de noviembre
2019-Seca fría y seca caliente	Metrobús	1	Lunes 11 de febrero
			Martes 19 de febrero
			Miércoles 3 de abril
			Jueves 21 de febrero
			Viernes 15 de febrero
		2	Miércoles 8 de mayo
		7	Lunes 25 de febrero

Todos los muestreos tuvieron 2 mediciones durante las horas pico de traslado, tanto de tráfico vehicular como de usuarios, correspondientes a los traslados para ir a trabajar (mañana) y para regresar al hogar (noche). En el caso del Metro se realizó una tercera medición al medio día para obtener una referencia de cambios originados por la disminución de los factores anteriores. La Tabla 6.2 muestra la hora de inicio de los viajes realizados. Terminado un muestreo, la información recolectada fue descargada del equipo, respaldada y archivada, según la fecha y horario que le corresponde a cada uno.

Tabla 6.2. Hora de inicio promedio de los viajes realizados para la medición de la exposición personal a PM_{2.5} en el Metro y Metrobús de la ZMVM.

Transporte	Viaje	Hora de inicio (CDT)*
Metro	Mañana	07:20
	Tarde	12:00
	Noche	17:20
Metrobús	Mañana	07:20
	Noche	Reinicio a las 10:00 CDT**

*Los horarios de inicio son aproximados, considerando el tiempo de traslado a los puntos de inicio de los muestreos.

**Solo aplica para el 1er periodo de muestreo.

Para que las observaciones obtenidas de una misma línea sean comparables, los muestreos se realizaron en el 4to vagón de los trenes del Metro, mientras que en la línea 1 y 2 del Metrobús se realizaron en la parte media del último vagón (los camiones pueden ser de 2 a 3 vagones). Finalmente, en la línea 7, que tiene camiones de dos pisos, el muestreo se realizó en los asientos de en medio del primer piso.

Durante los muestreos se registró en la bitácora la fecha y línea para cada muestreo, la apertura y cierre de puertas de cada estación; y las observaciones necesarias, ya fueran de la estación o del viaje, que pudieran representar información valiosa para explicar las observaciones obtenidas. Se registró también información de los camiones como modelos y números de serie de cada uno (Anexo V).

6.1.1.2. El espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C.

La Figura 6.1 muestra al equipo GRIMM 11-C que fue utilizado para medir los niveles de $PM_{2.5}$ en el transporte público de la ZMVM. El GRIMM realiza mediciones de la concentración de PMs con una resolución máxima de tiempo de 6 seg. y está equipado con un filtro gravimétrico que permite recolectar PMs después de la medición óptica. Es capaz de obtener mediciones de concentración de PMs en partículas, como l^{-1} , y de concentración de masa en $\mu g m^{-3}$ (GRIMM AEROSOL TECHNIK GmbH & Co. KG, 2016).

El aire ambiente es muestreado por un cabezal y posteriormente pasa a una cámara de medición en donde las PMs recolectadas son cuantificadas por la intensidad en la que se dispersa un haz de luz, creado de un diodo láser, a la que se les somete. Este método, clasificado como de medición directa continua, es conocido como fotometría de dispersión de luz. Finalmente, las mismas PMs se introducen en el filtro gravimétrico con la ayuda de una bomba reguladora de flujo. El equipo incluye un sensor de temperatura y humedad relativa que permiten realizar correcciones a las observaciones .



Figura 6.1. Espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C.

6.1.2. Validación de las observaciones del espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C.

En el presente trabajo se realizó la validación de las mediciones de PM_{2.5} del GRIMM en el transporte público, mediante experimentos de co-colocación contra el equipo de referencia Thermo Anderson 5028i, el cual está instalado en la unidad de la RAMA localizada en el techo del CCA de la UNAM en el sur de la ZMVM. El GRIMM se colocó lo más cercano posible a la toma de muestra que suministra aire ambiente al equipo de referencia de la RAMA. El monitor portátil se protegió del sol usando una sombrilla (Figura 6.2).

El equipo de referencia usa tecnología de beta atenuación (método de medición directa continua), que consiste en que un elemento radiactivo emite electrones de alta energía a través de una cinta de fibra de vidrio. El fenómeno anterior sucede una 1a vez con la cinta sin muestra y una 2a con muestra. En ambos casos se obtiene una medición de radiación, donde la que representa la cinta limpia tiene un valor mayor que la medición de la cinta con la muestra. Esta disminución o atenuación de la señal de radiación se usa para determinar la masa de PMs (Thermo Fisher Scientific, 2018). Las observaciones de concentración de PM_{2.5}

obtenidas con ambos equipos se usaron para determinar posibles sub- o sobre-estimaciones de los datos obtenidas con el equipo GRIMM, y con ello corregir los resultados obtenidos durante los muestreos en el transporte público. En total, se realizaron 11 mediciones para determinar la correlación entre ambos instrumentos.

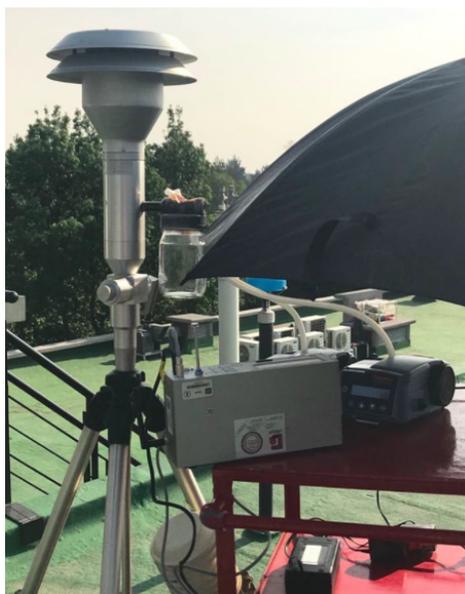


Figura 6.2. Experimento de co-colocación del equipo GRIMM 11-C junto a la entrada de la toma de muestra para el equipo de referencia de la RAMA.

La duración de los experimentos de co-colocación fue de 5 horas con intervalos de 15 minutos antes y después de los mismos para estabilizar y apagar los equipos. La Tabla 6.3 muestra las fechas, temporada, año y horario de realización de los experimentos de co-colocación. Se registró en la bitácora las horas de encendido y apagado del GRIMM. Terminado cada experimento, la información obtenida fue descargada del equipo, para posteriormente ser respaldada y archivada según la fecha y horario que le corresponde a cada uno.

Tabla 6.3. Fechas y horarios de experimentos de co-colocación realizados entre el GRIMM y la RAMA.

Año y temporada	Fecha de experimento de co-colocación	Horario (CDT)
2018-Seca fría	26 de septiembre	9:45-15:15
	3 de octubre	
2019-Seca caliente	8 de marzo	8:45-14:15
	22 de marzo	
	27 de marzo	
	24 de abril	
	3 de mayo	
	13 de mayo	
2019-Húmeda	4 de septiembre	8:45-14:15
	12 de septiembre	
	18 de septiembre	

6.1.3. Comparación con mediciones validadas mediante gravimetría utilizando monitores portátiles pDR-1500 Thermo Scientific.

En estudios paralelos se realizaron determinaciones de la masa de $PM_{2.5}$ recolectando muestras con monitores portátiles pDR-1500 Thermo Scientific (Figura 6.3), que realizan mediciones directas continuas de nefelometría. Para ello los equipos pDR se equiparon con filtros de fibra de vidrio marca whatman de diámetro de 37 mm (Figura 6.4), los cuales fueron estabilizados durante 24 h en un desecador y posteriormente pesados en una balanza analítica Sartorius (precisión de 0.000001 g). Al finalizar cada uno de los experimentos o muestreos, los filtros utilizados fueron recuperados y guardados en una Caja Petri, sellada con Parafilm, para evitar su contaminación.



Figura 6.3. Monitor de aerosoles personal pDR-1500 Thermo Scientific (Thermo Scientific, 2008).

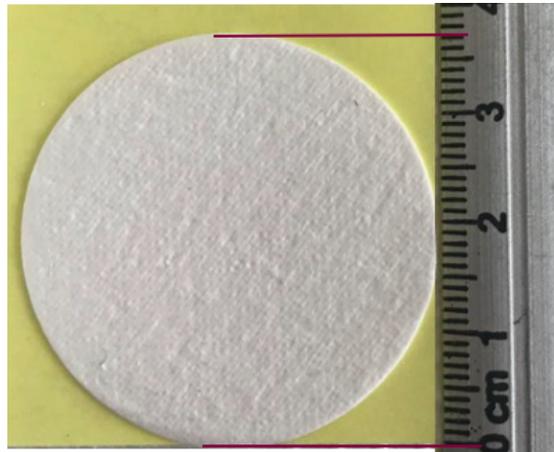


Figura 6.4. Filtros usados por los pDR-1500 Thermo Scientific para la recolección de partículas.

Cuando se recuperaron todos los filtros utilizados, se estabilizaron en el desecador y se pesaron nuevamente. Los pesos obtenidos antes y después de su uso, se utilizaron para calcular la masa total recolectada en cada filtro, al igual que se calculó la masa total medida usando las concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas en los pDRs (Anexo I). Ambas masas se usaron para realizar una regresión lineal, de la cual se determinó un factor de corrección para las observaciones de dichos equipos (Anexo II).

Posteriormente, se calcularon los promedios de concentración de $PM_{2.5}$ de un pDR para cada viaje de una terminal a otra, utilizando las observaciones corregidas, y los promedios de cada viaje para el GRIMM. Los promedios por viaje de ambos equipos, se usaron para construir regresiones lineales, una por cada periodo de muestreo, de las cuales se determinaron factores de corrección indirectos para las observaciones del GRIMM, los cuales están dados por la expresión matemática que representa la regresión. Dichas regresiones se presentan en la Sección de Resultados (Sección 7.1).

6.2. Áreas de estudio.

6.2.1. Metro de la ZMVM.

El Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro inició operaciones en 1967 con 16 estaciones en una longitud de 12.7 km. Actualmente cuenta con 12 líneas, 195 estaciones y una longitud de toda la red de 226.5 km (Portal Oficial del Metro de la CDMX, 2019). Las líneas en las cuales se realizaron muestreos fueron:

Línea 1: Tiene 49 trenes con capacidad de 1530 personas cada uno. Recorre la ciudad de este a oeste y tiene una longitud de 18.8 km. Se compone de 20 estaciones, de estas, 6 tienen transbordo con otra línea, 12 son de paso, 1 es una terminal en la superficie y la última es transbordo y terminal a la vez. La línea recorre de forma subterránea avenidas de alto tránsito vehicular como Av. Jalisco, Av. Chapultepec, Av. General Emiliano Zapata, Calz. Ignacio Zaragoza, Av. Río Churubusco, entre otras (Portal Oficial del Metro de la CDMX, 2019).

Línea 3: Tiene 52 trenes con capacidad de 1520 personas cada uno. Recorre la ciudad de norte a sur a lo largo de 23.6 km y un total de 21 estaciones, de las cuales 6 son transbordos, 13 son de paso y 2 son terminales. La mayoría de su trayecto es subterráneo, pasando por avenidas como Calz. Vallejo, Av. Cuauhtémoc, Av. Universidad y Av. Copilco. Solo 4 estaciones se encuentran en la superficie, recorriendo parte de Av. de los Insurgentes Norte. Todas estas avenidas son de importancia para el flujo vehicular de la CDMX (Portal Oficial del Metro de la CDMX, 2019).

En las diferentes líneas del Metro de la ZMVM se usan distintos modelos de trenes (Figura 6.5). La Tabla 6.4 presentan los trenes que se usan para las líneas 1 y 3 del Metro, además de sus características particulares (Portal Oficial del Metro de la CDMX, 2019).

Tabla 6.4. Características particulares de los trenes de las líneas 1 y 3 del Metro de la ZMVM.

Modelo	Altura del riel al techo (m)	Ancho exterior (m)	Longitud del tren (m)	Número de carros	Líneas donde circula	Tipo de Rodadura
NM-79	3.6	2.5	147.6	9	3	Neumática
NM-83A	3.6	2.5	147.6	9	1 y 3	Neumática
NM-83B	3.6	2.5	147.6	9	1	Neumática
NE-92	3.6	2.5	147.6	9	1	Neumática

Adaptado de “Parque Vehicular”, Portal Oficial del Metro de la CDMX, 2019. Disponible en línea: <https://metro.cdmx.gob.mx/parque-vehicular>. Último acceso: 13 de febrero de 2020.



Figura 6.5. Modelos de tren usados en las líneas 1 y 3 del Metro. a) NM-79, b) NM-83A, c) NM-84B y d) NE-92 (Portal Oficial del Metro de la CDMX, 2019).

6.2.2. Metrobús de la ZMVM.

El Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de México, o Metrobús, inició operaciones en 2005 con 37 estaciones, en un tramo de 28.1 km, para su primera línea. En la actualidad consta de 7 líneas con 239 estaciones y con una longitud de red de 125.0 km (Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019). Las líneas en las cuales se realizaron muestreos fueron:

Línea 1: Recorre la ciudad de norte a sur y tiene una longitud de 30.0 km. Se compone de 47 estaciones, de las cuales 3 pueden funcionar como terminales. La línea se encuentra construida sobre Av. de los Insurgentes, uno de los principales ejes viales de la CDMX (Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).

Línea 2: Recorre la ciudad de este a oeste, tiene una longitud de 20.0 kilómetros y se compone de 36 estaciones, contando con 2 de estas como terminales. Su recorrido pasa por avenidas de alto tránsito vehicular como los son Viaducto

Miguel Alemán, Insurgentes Sur, Av. Río Churubusco, Tlalpan, Av. Rojo Gómez y la Calz. de Ignacio Zaragoza (Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).

Línea 7: Recorre la ciudad de norte a suroeste en un total de 15.0 kilómetros de longitud. Tiene 31 estaciones, donde 2 funcionan como terminales. Es la última línea del Metrobús en ser construida y es operada con camiones equipados con motores modernos (Euro VI). El recorrido se realiza entre Prolongación de los Misterios, Calz. de los Misterios y en Paseo de la Reforma, siendo esta última la avenida de mayor importancia en la CDMX (Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).

Las líneas del Metrobús de la ZMVM se operan con diferentes tipos de camiones (Figura 6.6). La Tabla 6.5 presenta a los camiones usados en las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús, a que línea pertenecen y las características de estos (Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).

Tabla 6.5. Características particulares de los camiones de las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús de la ZMVM.

Tipo de camión	Longitud (m)	Capacidad (personas)	Línea donde circula	Ventaja ecológica
Articulado	18	160	1 y 2	Sustituye 126 autos
Biarticulado	24	240	1	Su uso ahorra 460,000 litros de gasolina al día
Dos pisos	12	130	7	Certificación ambiental oficial Euro VI

Adaptado de “Flota”, Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019. Disponible en línea: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/flota>. Último acceso: 13 de febrero de 2020.



Figura 6.6. Tipos de camión usados en las líneas 1, 2 y 7 de Metrobús. **a)** Articulado, **b)** biarticulado y **c)** dos pisos (Portal Oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).

7. Resultados

7.1. Obtención del factor de corrección.

La Figura 7.1 muestra dos ajustes obtenidos en experimentos de co-colocación utilizando promedios horarios, mientras que el Anexo IV presenta los parámetros de ajuste de todos los experimentos realizados. Los coeficientes de correlación (R^2) obtenidos variaron entre 0.01 y 0.95. Debido a lo anterior, no fue posible obtener un factor de corrección estadísticamente significativo para las mediciones obtenidas con el GRIMM utilizando el equipo de referencia de la RAMA, por lo cual este método se descartó para determinar un factor de corrección global.

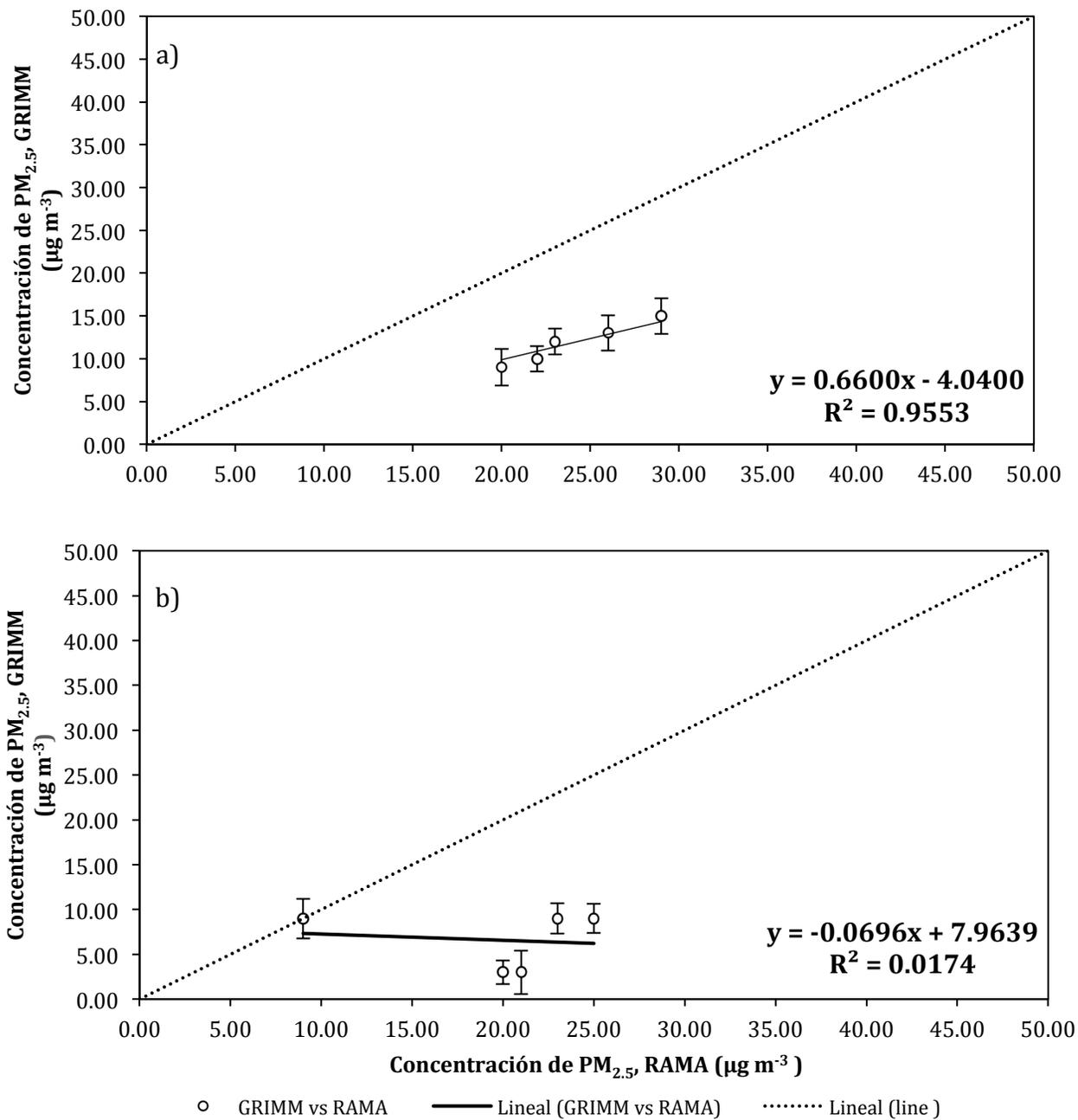


Figura 7.1. Comparación entre el GRIMM 11-C vs el equipo de referencia de la RAMA utilizando promedios horarios de las concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas en los días a) 3 de mayo de 2019 y b) 27 de marzo de 2019.

La Figura 7.2 presenta las regresiones lineales correspondientes a ambos periodos de muestreo, entre los promedios por viaje (de una terminal a otra) de las concentraciones de $PM_{2.5}$ de un pDR, corregidas por determinación gravimétrica (Anexo II), contra las concentraciones obtenidas con el GRIMM. A pesar de que el método gravimétrico es el más usado para obtener factores de corrección para monitores personales de PMs (Wang et al., 2016), no se realizó uno directamente con el GRIMM, ya que este recolecta conjuntamente todas las partículas menores a $10 \mu m$ sin realizar alguna separación.

Por lo anterior, se realizó la comparación entre las concentraciones de $PM_{2.5}$, medidas por los pDRs, ya corregidas, y el GRIMM. Al realizar la regresión lineal para cada periodo de muestreo (Anexo III) se obtuvieron coeficientes de correlación estadísticamente significativos, de $R^2=0.80$ en el 1er periodo (Figura 7.2a) y de $R^2=0.90$ en el 2do (Figura 7.2b). El uso de 2 factores de corrección implica una diferencia en el funcionamiento del equipo GRIMM según la época del año. Se observó, que en el 1er periodo de muestreo (octubre-noviembre 2018) la humedad relativa en el ambiente fue alta (promedio de 59.9 %) influyendo en la precisión de las mediciones. En comparación, en el 2do periodo (febrero-mayo 2019) la humedad relativa fue menor (promedio de 39.6 %). Un alto porcentaje de humedad relativa afecta el funcionamiento de los equipos que operan con dispersión de luz, como el GRIMM, sobre-estimando los valores de concentración de $PM_{2.5}$ (Jayaratne et al., 2018).

En las regresiones lineales obtenidas para ambos periodos de muestreo, se observa que el equipo GRIMM subestima las concentraciones de $PM_{2.5}$. En el caso del 1er periodo de muestreo, las observaciones son aproximadamente 3 veces menores que los valores corregidos con pDRs, mientras que en el 2do periodo son aproximadamente 5.5 veces menores. Este problema revela claramente la importancia del uso de un factor de corrección de mediciones en campo (Anexo III). Los datos que se presentan en las siguientes secciones de

Resultados, corresponden a las mediciones de $PM_{2.5}$, obtenidas con el GRIMM, corregidas.

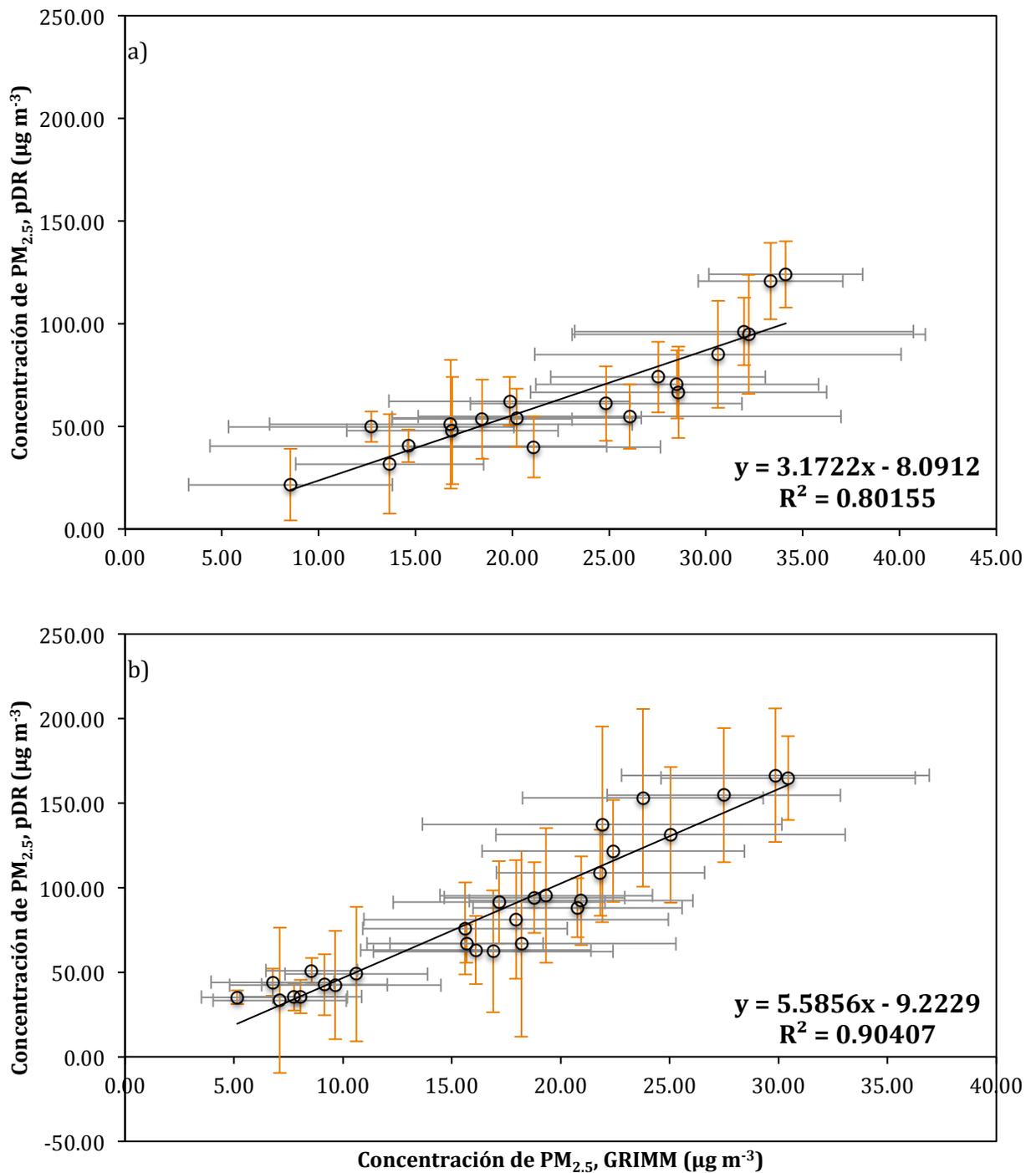


Figura 7.2. Correlación entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ determinadas con el GRIMM 11-C y las corregidas por gravimetría de un pDR-1500, para el a) 1er y b) 2do periodo de muestreo.

7.2. Resultados de exposición personal a PM_{2.5} en el Metro de la ZMVM.

7.2.1. Línea 1 del Metro.

La Tabla 7.1 muestra los trayectos realizados en la línea 1 del Metro.

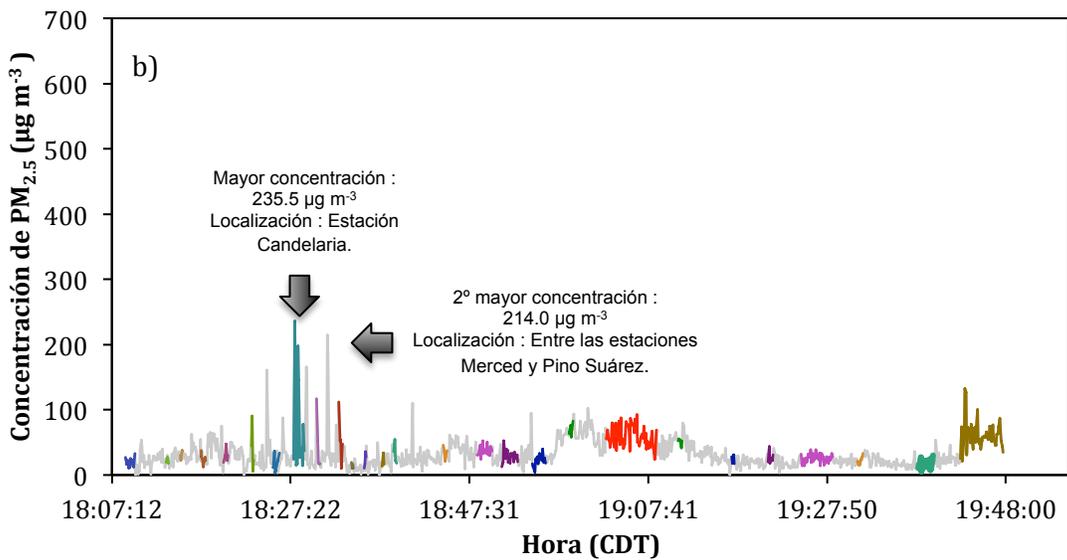
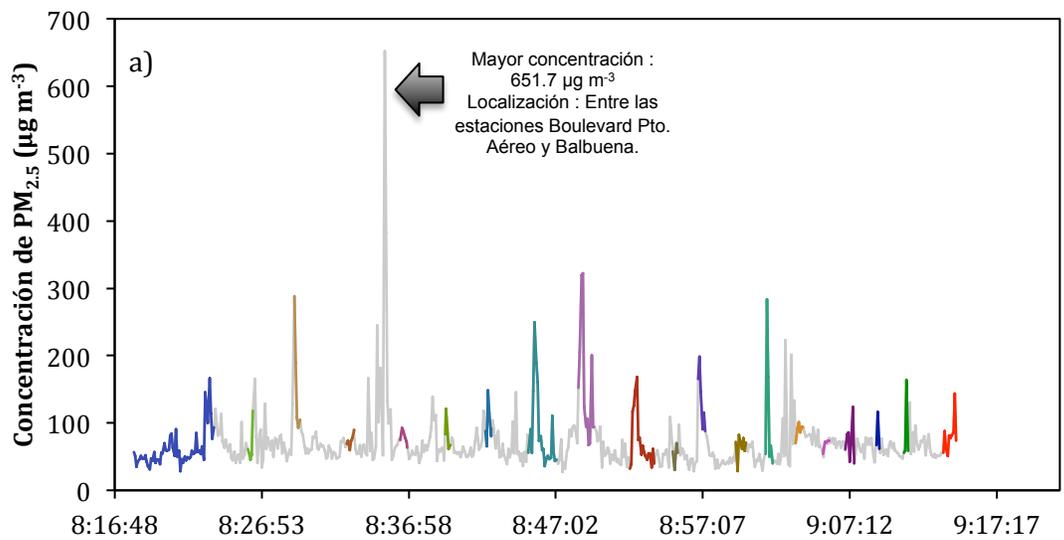
Tabla 7.1. Descripción de los trayectos de la línea 1 del Metro.

Trayecto	Dirección	Dirección según los puntos cardinales
Ida	De Observatorio a Pantitlán	Oeste a este
Regreso	De Pantitlán a Observatorio	Este a oeste

La Figura 7.3 muestra los perfiles de las variaciones espacio-temporal de las concentraciones de PM_{2.5} de los viajes realizados en la línea 1 del Metro. En los viajes del horario de la mañana, se presentaron los mayores promedios y valores de concentración de PM_{2.5} (52.2 y 72.8 $\mu\text{g m}^{-3}$, ida y regreso, respectivamente), mientras que en los viajes de la noche se observaron los menores (37.2 y 36.3 $\mu\text{g m}^{-3}$, ida y regreso, respectivamente). El viaje más largo realizado fue el de regreso por la noche (36.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ en 59 min. y 54 seg.), cuando se observó el mayor número de usuarios. Los viajes realizados en esta línea mostraron concentraciones promedio de PM_{2.5} bajas, comparadas con las observadas en otros muestreos en el mismo periodo (Anexo V).

Las estaciones que mostraron las concentraciones de PM_{2.5} más altas para esta línea fueron Observatorio, Candelaria, La Merced y Balderas. La primera de estas estaciones se encuentra a nivel de la superficie, junto a una central de camiones a diésel, la segunda y tercera tienen grandes áreas de ventilación hacia la superficie y la cuarta estación funciona como transbordo con la línea 3 del Metro. Dichas características pueden tener influencia sobre las altas concentraciones de PM_{2.5} observadas en comparación con el resto de la línea. De igual manera, se observaron picos de concentración de PM_{2.5} entre los túneles de las estaciones, por ejemplo, entre Boulevard Puerto Aéreo y Balbuena durante el viaje de regreso de la mañana con un valor de 651.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Figura 7.3a). Estos picos de concentración pueden deberse a las grandes áreas de ventilación existentes entre

estaciones, por las cuales pueden transportarse al interior masas de aire enriquecidas con $PM_{2.5}$.



- | | | |
|---------------------------|------------------------|----------------------|
| — Tiempo vs Concentración | — Pantitlán | — Zaragoza |
| — Gómez Farías | — Boulevard Pto. Aéreo | — Balbuena |
| — Moctezuma | — San Lázaro | — Candelaria |
| — Merced | — Pino Suárez | — Isabel la Católica |
| — Salto del Agua | — Balderas | — Cuauhtémoc |
| — Insurgentes | — Sevilla | — Chapultepec |
| — Juanacatlán | — Tacubaya | — Observatorio |

Figura 7.3. Variación espacio-temporal de las concentraciones de PM_{2.5} en la línea 1 del Metro, dirección Pantitlán-Observatorio, en los horarios de la a) mañana y la b) noche.

La Figura 7.4 corresponde a una gráfica caja y bigotes de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$) observadas en la línea 1 del Metro, donde la línea horizontal (-) muestra la mediana, el diamante rojo (\blacklozenge) el promedio aritmético, los extremos de la caja los percentiles 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95. En dicha, se muestra que las concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas en esta línea disminuyen a lo largo del día. Se observa que, aunque durante las mediciones nocturnas existen menores concentraciones de $PM_{2.5}$, se presentan mayores variaciones que en los horarios matutinos. Por último, se observa que la mayoría de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los viajes de ida oscilaron entre 27.4 a 57.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la mañana, de 16.7 a 53.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la tarde y de 0.5 a 39.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la noche. Para los viajes de regreso las concentraciones oscilaron entre 27.4 a 78.5 $\mu\text{g m}^{-3}$, 6.2 a 49.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 0.5 a 45.5 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

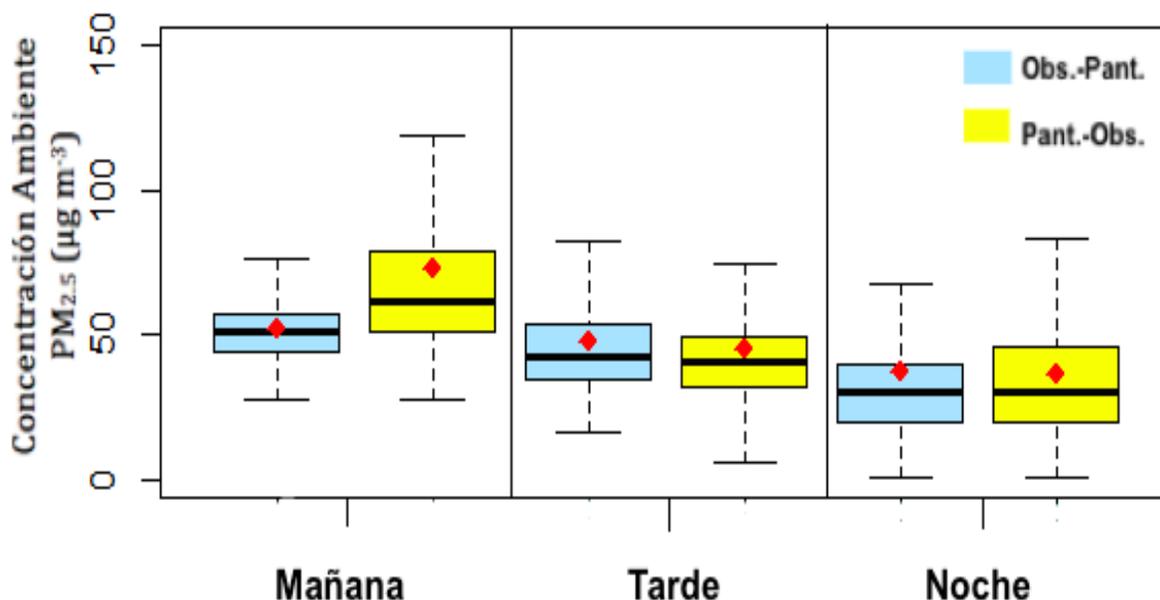


Figura 7.4. Gráfica caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la línea 1 del Metro, Observatorio (Obs.) - Pantitlán (Pant.).

7.2.2. Línea 3 del Metro.

La Tabla 7.2 muestra los trayectos realizados en la línea 3 del Metro.

Tabla 7.2. Descripción de los trayectos de la línea 3 del Metro.

Trayecto	Dirección	Dirección según los puntos cardinales
Ida	De Universidad a Indios Verdes	Sur a norte
Regreso	De Indios Verdes a Universidad	Norte a sur

La Figura 7.5 muestra un perfil típico de las variaciones espacio-temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los viajes realizados en la línea 3 del Metro. Se observan los mayores promedios y valores de concentración de $PM_{2.5}$ en los viajes de la tarde (98.9 y 96.5 $\mu g m^{-3}$, ida y regreso, respectivamente), mientras que los menores se presentan en los viajes de regreso de la mañana y de la noche (78.9 y 72.6 $\mu g m^{-3}$, respectivamente), pero es en estos horarios donde se observaron los valores máximos de concentración de $PM_{2.5}$ (222.8 y 302.1 $\mu g m^{-3}$, mañana y noche, respectivamente). El viaje más largo se realizó en la noche en el trayecto de ida (82.6 $\mu g m^{-3}$ en 1 hora, 47 min. y 54 seg.) el cual coincidió con la mayor cantidad de usuarios (Anexo V).

Los perfiles de concentración de $PM_{2.5}$ para esta línea incrementan al viajar en dirección Indios Verdes y disminuyen en el sentido contrario, lo cual puede deberse a que la sección de estaciones Indios Verdes-La Raza se encuentra junto al arroyo vehicular. Además, se observaron altas concentraciones de $PM_{2.5}$ en la Raza, Etiopía, Zapata, Coyoacán, Copilco, Guerrero, Miguel Ángel de Quevedo, Universidad e Indios Verdes. Las características que pueden influenciar este hecho son que estas estaciones están a nivel piso, son un transbordo y/o tienen una gran área de ventilación por la cual masas de aire enriquecidas con $PM_{2.5}$ pueden viajar al interior de las mismas.

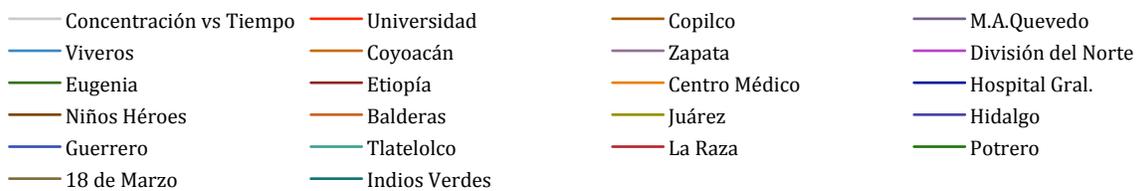
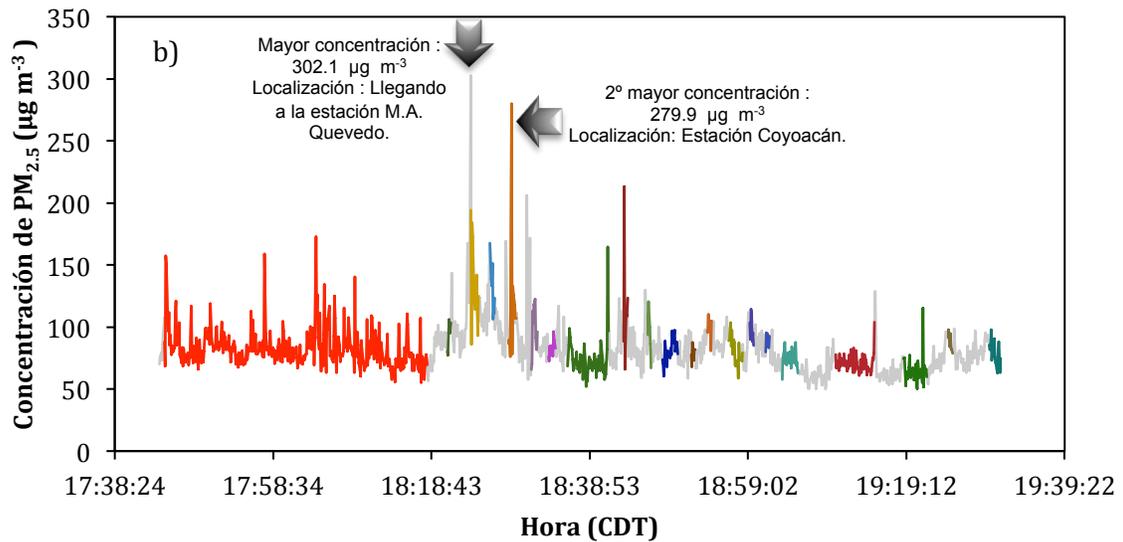
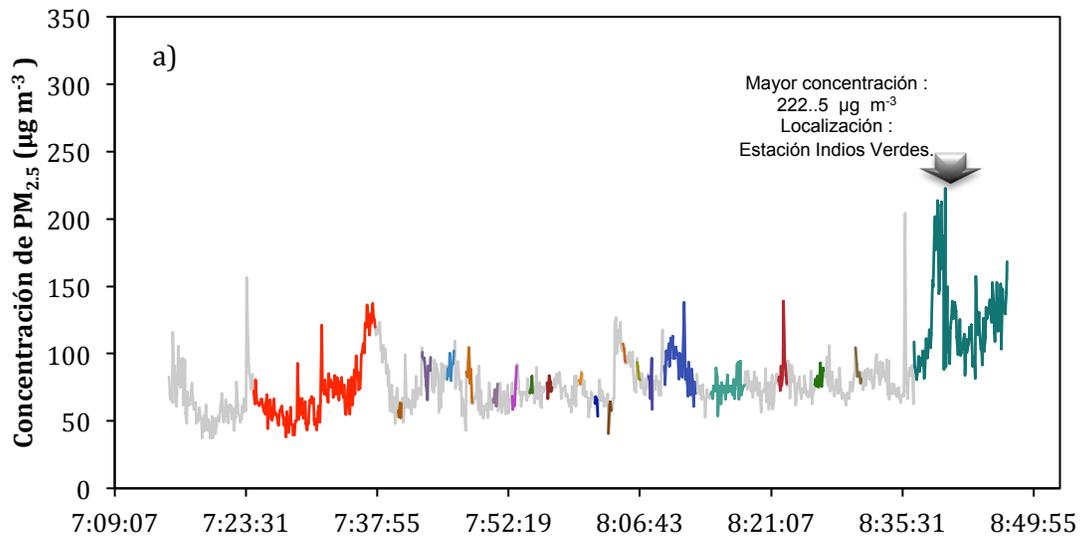


Figura 7.5. Variación espacio-temporal de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en la línea 3 del Metro, dirección Universidad-Indios Verdes, en el horario de la a) mañana y de la b) noche.

La Figura 7.6 muestra una gráfica caja y bigotes de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$) observadas en la línea 3 del Metro, donde la línea horizontal (-) muestra la mediana, el diamante rojo (\blacklozenge) el promedio aritmético, los extremos de la caja los percentiles 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95. Se puede observar, que las concentraciones aumentan en el horario de la tarde y disminuyen en el de la noche, siendo esta línea la única que mostró tal comportamiento. Es posible que el incremento en los niveles ambiente de $PM_{2.5}$ derivados de la producción secundaria al mediodía originen el perfil observado, sin embargo, se requieren más mediciones para confirmar dicho perfil.

Finalmente, se observa que la mayoría de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los viajes de ida oscilaron entre 37.3 a 89.9 $\mu\text{g m}^{-3}$ para la mañana, de 69.2 a 107.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ para la tarde y de 50.3 a 89.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ para la noche, mientras que en los viajes de regreso variaron entre 40.1 a 90.6 $\mu\text{g m}^{-3}$, 67.4 a 104.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 40.4 a 77.9 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

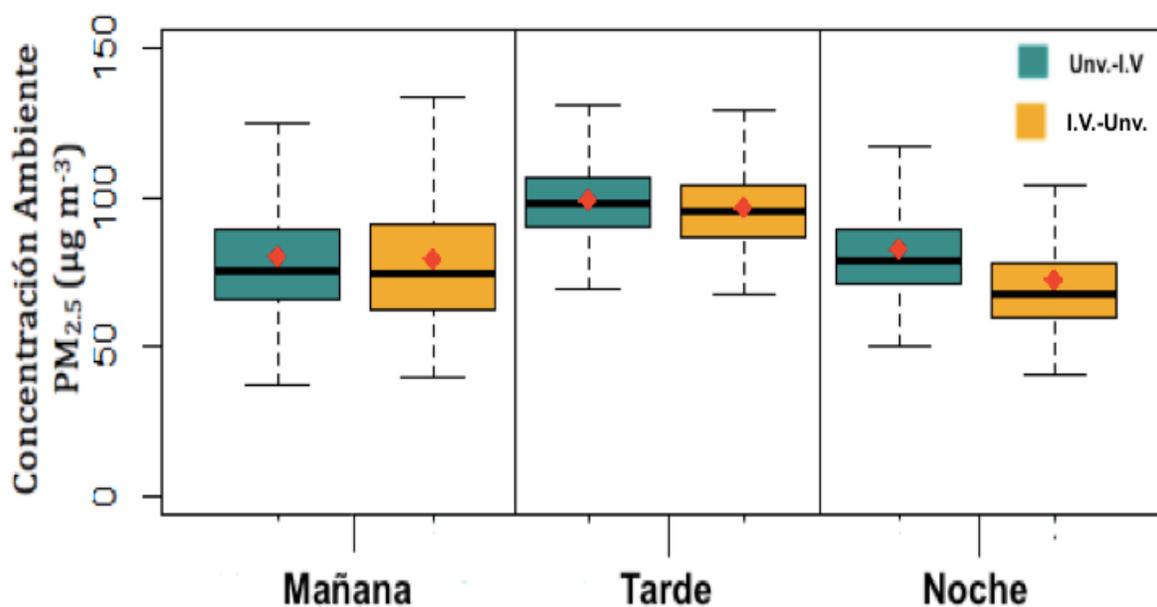


Figura 7.6. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la línea 3 del Metro, Universidad (Unv.) - Indios Verdes (I.V.).

7.3. Resultados de exposición personal a PM_{2.5} en el Metrobús de la ZMVM.

7.3.1 Línea 1 del Metrobús.

Los trayectos correspondientes a la línea 1 del Metrobús se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Descripción de los trayectos de línea 1 del Metrobús.

Trayecto	Dirección	Dirección según los puntos cardinales
Ida	Del Caminero a Indios Verdes	Sur a norte
Regreso	De Indios Verdes al Caminero	Norte a sur

La Figura 7.7 muestra los perfiles de las variaciones espacio-temporal de las concentraciones de PM_{2.5} en los viajes realizados en la línea 1 del Metrobús. Se observa que en los viajes correspondientes al horario de la mañana se presentan los mayores promedios y valores de concentración de PM_{2.5} (86.1 y 99.3 $\mu\text{g m}^{-3}$, 1er y 2do periodo, respectivamente), mientras que los menores se presentan en la noche (68.4 y 69.9 $\mu\text{g m}^{-3}$, 1er y 2do periodo, respectivamente). El viaje más largo registrado fue el de regreso en el horario de la mañana del día jueves 21 de febrero de 2019 (30.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ en 1 h 49 min. y 12 seg.) debido al mal funcionamiento de la línea en ese momento (Anexo V).

En todos los viajes, el perfil de concentraciones de PM_{2.5} muestra un incremento que coincide con las zonas de alto tráfico vehicular durante el recorrido. Generalmente, el valor máximo se observa entre las estaciones de Reforma a Buenavista, donde se ubican cruces amplios entre las calles y circulan numerosos vehículos a diésel. También se observa que cuándo los camiones del Metrobús viajan en dirección Indios Verdes o norte, la concentración de PM_{2.5} tiende a ser mayor al final de la ruta que al inicio, pasando lo contrario al viajar en la dirección opuesta. Tales variaciones son menos claras durante los viajes del horario de la noche.

Las estaciones que presentaron las mayores concentraciones de PM_{2.5} durante ambos periodos de muestreo fueron San Simón, Plaza de la República, La Joya y

Reforma. Dichas estaciones están ubicadas en zonas de alto tránsito vehicular, son transbordos, bases y/o están contiguas junto a centros de otros vehículos de diésel, características que pueden influenciar en los altos niveles de concentración de $PM_{2.5}$ registrados en estas zonas.

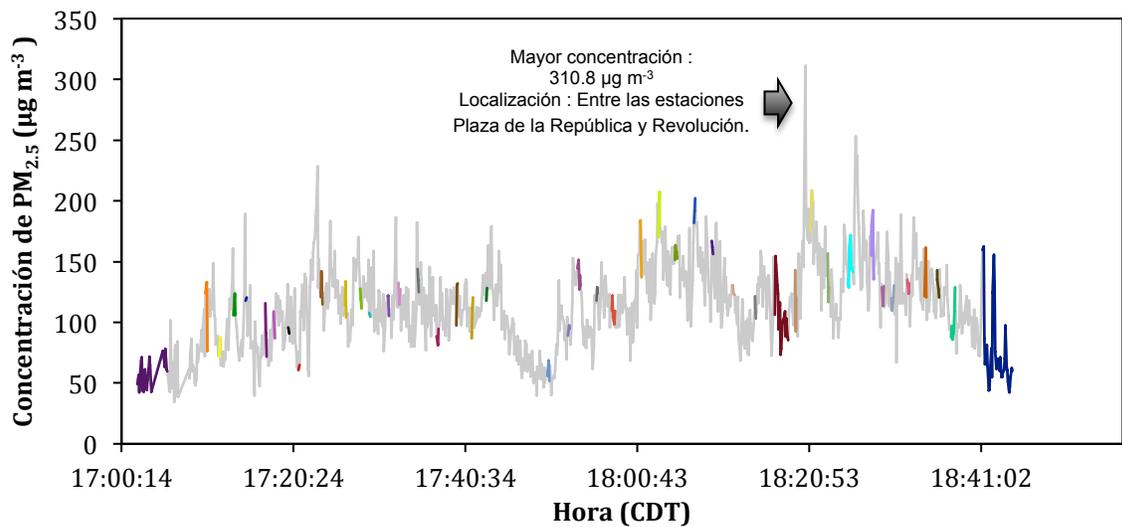
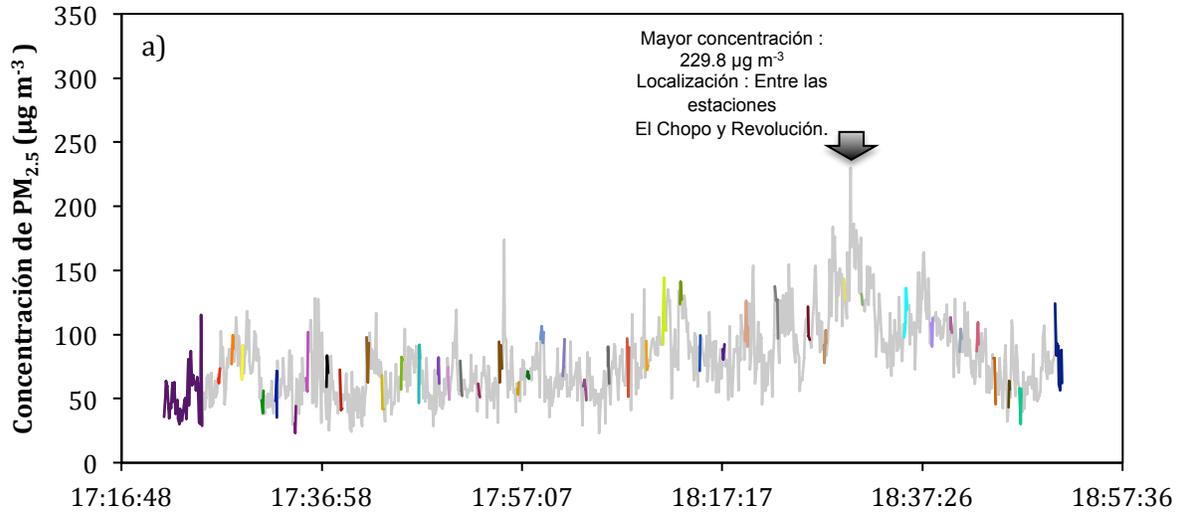


Figura 7.7. Variación espacio-temporal de las concentraciones de PM_{2.5} en la línea 1 del Metrobús en el horario de la noche, dirección El Caminero-Indios Verdes, los días a) lunes y b) miércoles.

Las Figuras 7.8 y 7.9, correspondientes al 1er y 2do periodo de muestreo respectivamente, muestran gráficas caja y bigotes de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($\mu g m^{-3}$) observadas en la línea 1 del Metrobús, donde la línea horizontal (-) muestra la mediana, el diamante rojo (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja los percentiles 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

Se observa, para ambos períodos, que los niveles de concentración de las PMs disminuyen con el paso del día, mientras que no se observó un comportamiento constante de aumento o disminución de las variaciones de las concentraciones de PMs en el transcurso del mismo, ya que en ambos horarios de muestreo existe una gran cantidad de vehículos en el arroyo vehicular que pueden causar estas variaciones. En la Figura 7.9 se observa que en el día miércoles se presentan las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ entre los días de la semana laboral, mientras que el jueves es cuando se observaron las concentraciones más bajas. La Tabla 7.4 presenta la descripción de las concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas en dicha línea.

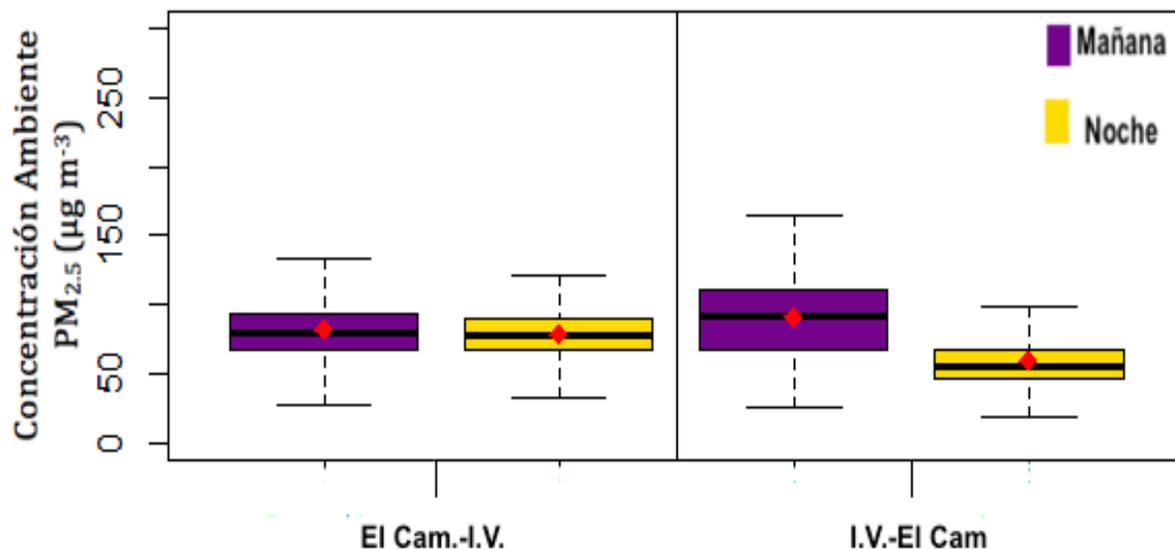


Figura 7.8. Gráfica caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la línea 1 del Metrobús, El Caminero (El Cam.) - Indios Verdes (I.V.), durante el 1er periodo de muestreo.

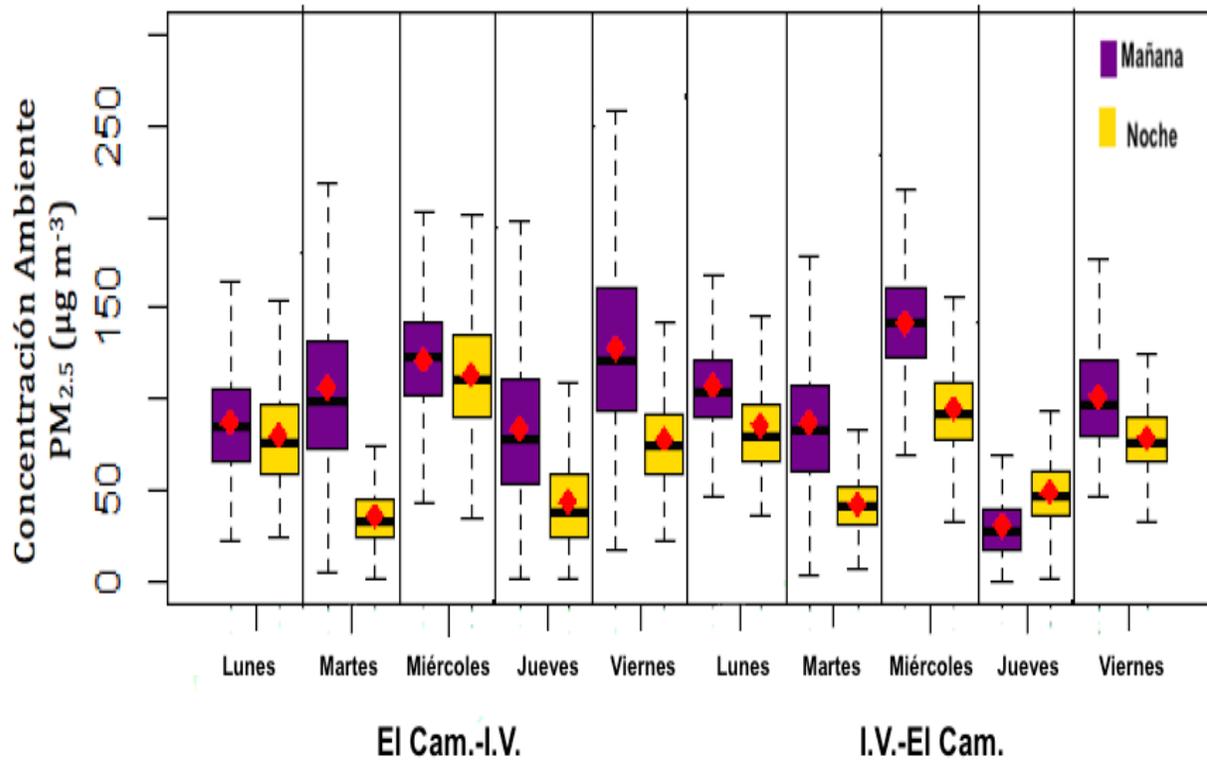


Figura 7.9. Gráfica caja y bigotes de las concentraciones ambiente de PM_{2.5} observadas en la línea 1 del Metrobús, El Caminero (El Cam.) - Indios Verdes (I.V.), durante el 2do periodo de muestreo.

Tabla 7.4. Oscilación de las concentraciones de PM_{2.5} en la línea 1 del Metrobús.

Día	Temporada	Horario	Viaje	Rango de concentración de PM _{2.5} (µg m ⁻³)
Miércoles 24 de octubre de 2018	Seca fría	Mañana	Ida	15.7 - 93.7
			Regreso	25.2 - 111.2
		Noche	Ida	21.4 - 89.6
			Regreso	18.2 - 67.7
Lunes 11 de febrero de 2019	Seca fría	Mañana	Ida	22.1 - 105.3
			Regreso	36.0 - 121.2
		Noche	Ida	23.2 - 96.3
			Regreso	35.5 - 97.5
Martes 19 de febrero de 2019	Seca fría	Mañana	Ida	4.7 - 132.1
			Regreso	3.6 - 107.0
		Noche	Ida	0.5 - 44.4
			Regreso	7.0 - 51.7
Miércoles 3 de abril de 2019	Seca caliente	Mañana	Ida	42.2 - 142.7
			Regreso	12.6 - 160.6
		Noche	Ida	34.3 - 134.3
			Regreso	32.3 - 109.2
Jueves 21 de febrero de 2019	Seca fría	Mañana	Ida	0.5 - 111.1
			Regreso	0.2 - 38.8
		Noche	Ida	0.8 - 58.4
			Regreso	1.4 - 59.5
Viernes 15 de febrero de 2019	Seca fría	Mañana	Ida	16.5 - 160.6
			Regreso	45.5 - 120.4
		Noche	Ida	22.6 - 92.1
			Regreso	33.2 - 89.6

7.3.2. Línea 2 del Metrobús.

La Tabla 7.5 muestra los trayectos realizados en la línea 2 del Metrobús.

Tabla 7.5. Descripción de los trayectos de la línea 2 del Metrobús.

Trayecto	Dirección	Dirección según los puntos cardinales
Ida	De Tacubaya a Tepalcates	Oeste a este
Regreso	De Tepalcates a Tacubaya	Este a oeste

La Figura 7.10 presenta los perfiles de variación espacio-temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los viajes realizados en la línea 2 del Metrobús. Se observa que los promedios y valores de concentración de $PM_{2.5}$ son mayores en los viajes de la mañana (182.0 y 160.3 $\mu g m^{-3}$, 1er y 2do periodo, respectivamente) que en los viajes de la noche (92.4 y 109.2 $\mu g m^{-3}$, 1er y 2do periodo, respectivamente). El viaje más largo realizado fue el viaje de regreso de la mañana del 1er periodo de muestreo (135.0 $\mu g m^{-3}$ en 1 hora, 12 min. y 18 seg.) debido al tránsito vehicular (Anexo V).

Los perfiles de concentraciones observados en esta línea presentan un incremento cuando los camiones viajan en dirección a Tepalcates, y disminuyen cuando los vehículos se acercan a la última estación. Esto puede deberse a que la sección del recorrido cercana a Tepalcates pasa por la Calz. de Ignacio Zaragoza, la cual contiene un gran flujo vehicular debido al entronque con diferentes autopistas como la México-Puebla.

En diversos muestreos se observó claramente un aumento en la concentración de $PM_{2.5}$ al momento de ingresar a los camiones del Metrobús. Ello puede implicar que existen factores en los propios vehículos que afectan las concentraciones de $PM_{2.5}$ y que incrementan la exposición dentro de los mismos. Las estaciones de Tacubaya, Tepalcates, Rojo Gómez, las Américas y Dr. Vértiz fueron las que presentaron las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$. Ello puede deberse a que estas se ubican en cruces con grandes avenidas de la ZMVM como los son Av. Rojo Gómez, Dr. José María Vertiz y Tlalpan.

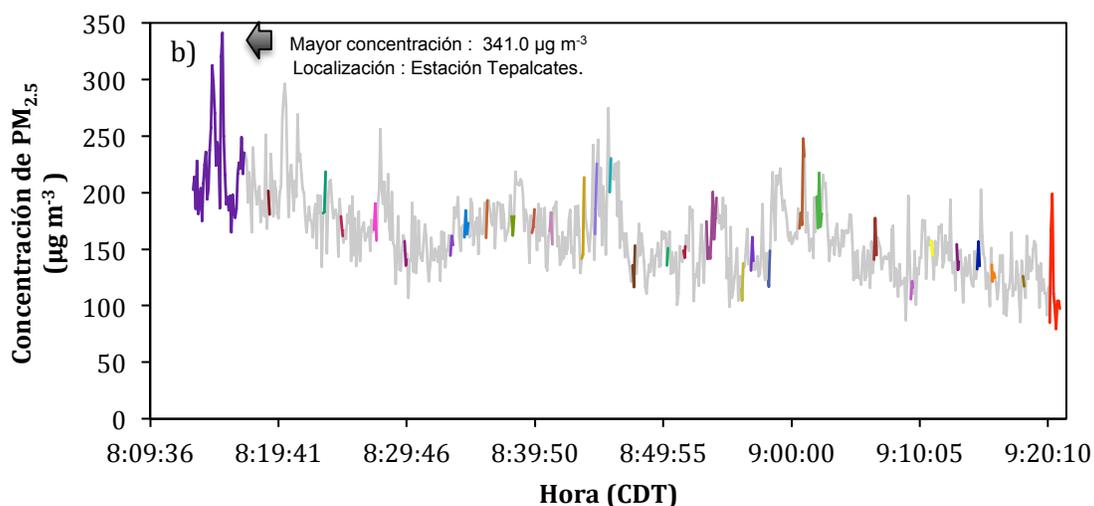
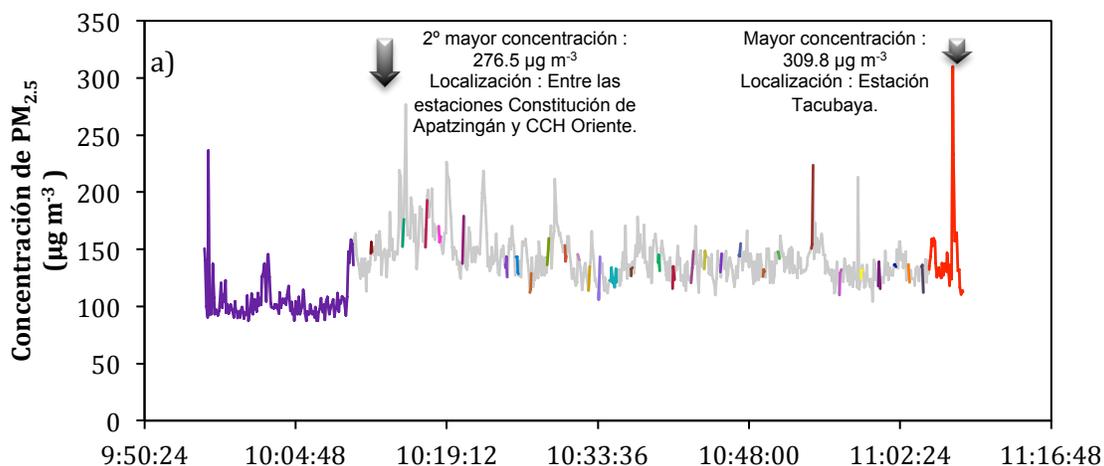


Figura 7.10. Variación espacio-temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la línea 2 del Metrobús durante el horario de la mañana, dirección Tepalcates – Tacubaya, en el a) 1er y b) 2do periodo de muestreo.

La Figura 7.11 muestra una gráfica caja y bigotes de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$) observadas en la línea 2 del Metrobús, donde la línea horizontal (-) muestra la mediana, el diamante rojo (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja los percentiles 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95. Se observó, que las concentraciones disminuyen al avanzar el día. El 2do periodo de muestreo exhibió los valores de concentración de $PM_{2.5}$ más altos de esta línea, a excepción del viaje de ida en la mañana del 1er periodo, cual tiene un percentil 75 mayor a los percentiles 95 de los demás viajes realizados en esta ruta y presenta las concentraciones de $PM_{2.5}$ más altas de todos los muestreos. El camión en el que se realizó este viaje tenía un motor Euro III y circulaba con las ventanas abiertas (Anexo V), lo que posiblemente provocaría una mayor auto contaminación de $PM_{2.5}$ que en otros vehículos de la flota del Metrobús.

Se observa también que, en el 1er periodo de muestreo, la mayoría de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la mañana oscilaron entre 65.2 a 260.6 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el viaje de ida y de 87.4 a 147.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el de regreso. En la noche, las concentraciones oscilaron de 33.5 a 105.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 40.1 a 107.7 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. En el 2do periodo de muestreo, los viajes de la mañana mostraron valores entre 57.2 a 180.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el viaje de ida y de 79.6 a 184.6 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el de regreso, mientras que para la noche las concentraciones oscilaron de 42.7 a 128.0 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 55.6 a 123.4 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

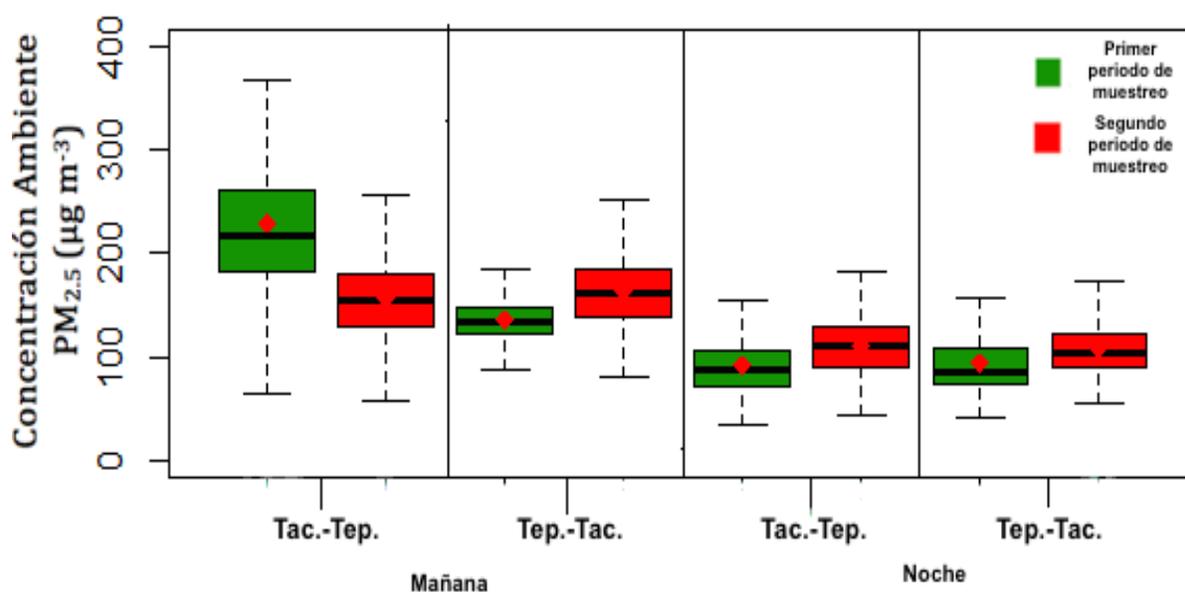


Figura 7.11. Gráfica caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la línea 2 del Metrobús Tacubaya (Tac.) - Tepalcates (Tep.).

7.3.3. Línea 7 del Metrobús.

La Tabla 7.6 muestra los trayectos correspondientes a la línea 7 del Metrobús.

Tabla 7.6. Descripción de los trayectos de la línea 7 del Metrobús.

Trayecto	Dirección	Dirección según los puntos cardinales
Ida	De Indios Verdes a Campo Marte	Norte a sureste
Regreso	De Campo Marte a Indios Verdes	Sureste a norte

La Figura 7.12 presenta los perfiles de variación espacio-temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los viajes realizados en la línea 7 del Metrobús. En los viajes de la mañana se observan los mayores promedios y valores de concentración de $PM_{2.5}$ (61.5 y $44.2\ \mu g\ m^{-3}$, 1er y 2do periodo, respectivamente), mientras que en la noche se observaron los menores (32.7 y $27.3\ \mu g\ m^{-3}$, 1er y 2do periodo, respectivamente). El viaje más largo correspondió al viaje de ida en la mañana del segundo periodo de muestreo ($44.6\ \mu g\ m^{-3}$ en 1 hora, 31 min. y 48 seg.) por la cantidad de tráfico vehicular durante la realización de este (Anexo V).

La línea 7 mostró los promedios de concentración de $PM_{2.5}$ más bajos entre todas las líneas muestreadas del Metrobús. Dichas concentraciones pueden deberse a la configuración y uso de los camiones de esta línea, que incluyen el uso de aire acondicionado continuo, cuales están equipados con un filtro de aire para retener PMs dentro de estos microambientes (ROIGSAT, 2015). De forma clara, altas concentraciones de $PM_{2.5}$ se presentaron cuando las puertas del camión se abrieron o el muestreo se realizó fuera de este.

También se observó que las concentraciones disminuyen al viajar en dirección Indios Verdes y aumentan en la dirección opuesta. Las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ en esta línea se observaron para ambos periodos de muestreo en las estaciones de Tres Culturas, La Diana, Garibaldi e Indios Verdes. Estas se caracterizan por ubicarse en zonas de alto tránsito vehicular, estar cercanas a centrales de vehículos a diésel y/o ser transbordo. Dichas características pueden influenciar a las concentraciones registradas en estas estaciones.

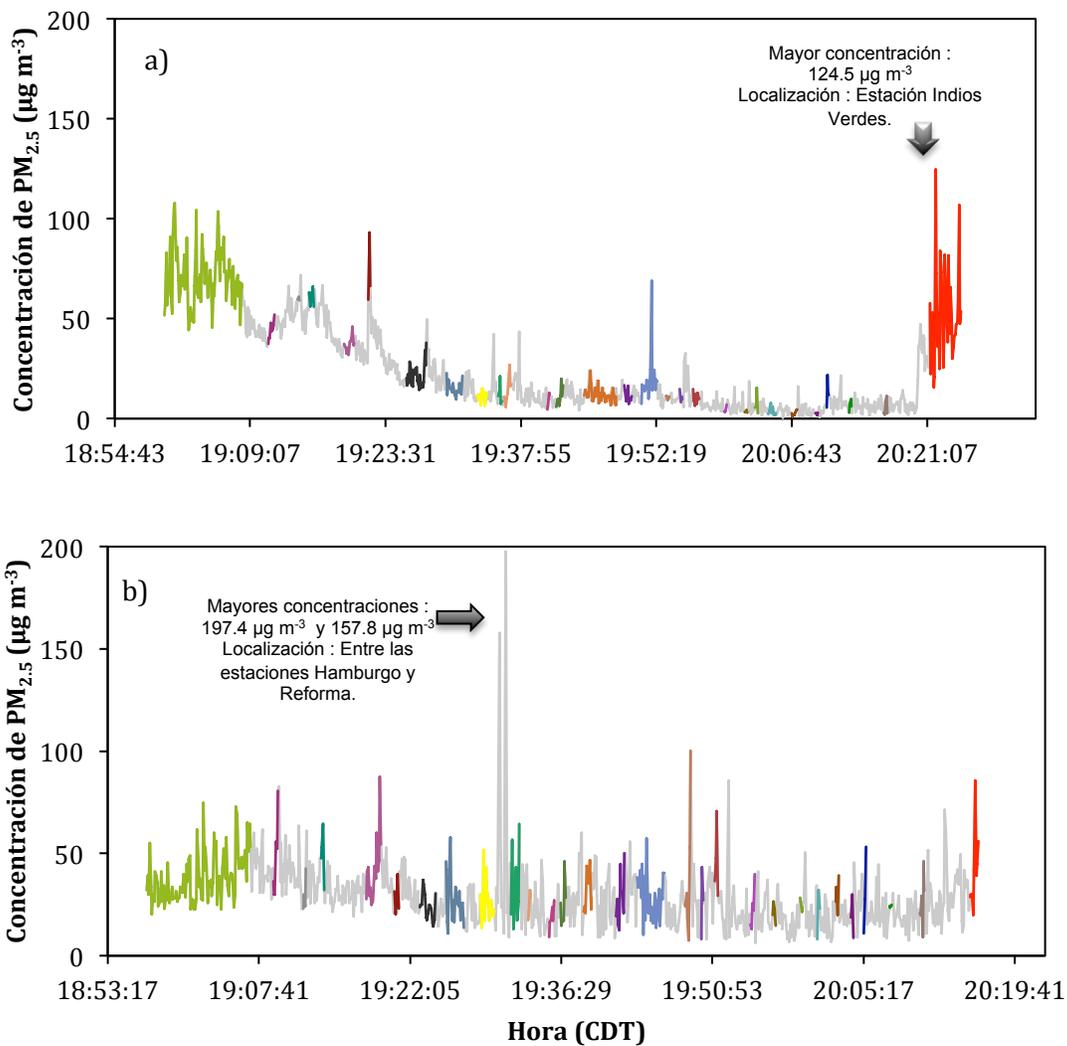


Figura 7.12. Variación espacio-temporal de las concentraciones de PM_{2.5} en la línea 7 del Metrobús durante el horario de la noche, dirección Campo Marte–Indios Verdes, en el a) 1er y b) 2do periodo de muestreo.

La Figura 7.13 muestra una gráfica caja y bigotes de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$) observadas en la línea 7 del Metrobús, donde la línea horizontal (-) muestra la mediana, el diamante rojo (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja los percentiles 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95. Se observó, que las concentraciones fueron mayores durante el 1er periodo de muestreo. La mayoría de las concentraciones de $PM_{2.5}$ oscilaron entre 27.4 a 71.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ para el viaje de ida de la mañana y de 22.0 a 63.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ para el viaje de regreso. En la noche los valores oscilaron de 19.2 a 42.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 0.4 a 40.1 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Para el 2do periodo de muestreo, las concentraciones oscilaron entre 13.7 a 56.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ y de 21.5 a 49.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los viajes de ida y regreso de la mañana. Finalmente, en la noche se observan valores que oscilan de 5.3 a 28.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 6.4 a 36.6 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

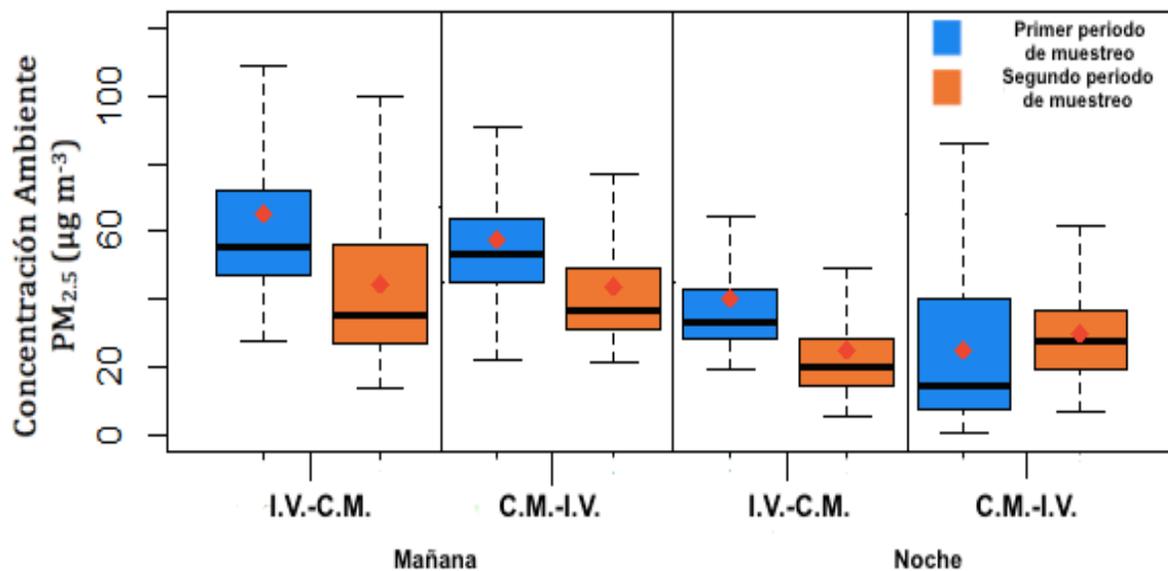


Figura 7.13. Gráfica caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la línea 7 del Metrobús, Indios Verdes (I.V.) - Campo Marte (C.M.).

8. Discusión

8.1. Comparación de las observaciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ entre las líneas 1 y 3 del Metro de la ZMVM.

Las líneas 1 y 3 del Metro de la ZMVM presentaron demoras cuando se observó una alta demanda de usuarios, principalmente en el horario de la noche. Las observaciones durante este horario muestran que el incremento en el tiempo de traslados no tiene un efecto en el aumento de las concentraciones de $PM_{2.5}$, debido a que durante la noche se presentaron los promedios de concentración de PMs más bajos (36.7 y 77.6 $\mu\text{g m}^{-3}$, L1 y L3, respectivamente).

La línea 3 del Metro presentó las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ en el horario de la tarde, mientras que en la línea 1 fue en la mañana. La línea 1 mostró un promedio de concentración global de $PM_{2.5}$ menor (48.6 $\mu\text{g m}^{-3}$) a la línea 3 (85.1 $\mu\text{g m}^{-3}$), lo cual puede deberse a que las estaciones con áreas de ventilación más amplias se encuentran en esta última, cuales se ubican debajo de zonas de alto tránsito vehicular. Por ejemplo, en la estación Etiopía, que se localiza debajo de las estaciones de la línea 1 y 3 del Metrobús, se observaron incrementos en la concentración de $PM_{2.5}$ en varios de los muestreos realizados. Otro factor que puede influenciar en las diferencias en las concentraciones de exposición a $PM_{2.5}$ entre líneas es la cantidad de estaciones a nivel de superficie y su proximidad a arroyos vehiculares.

8.2. Comparación de las observaciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ entre las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús de la ZMVM.

Entre todos los muestreos realizados, las menores concentraciones de $PM_{2.5}$ se observaron durante la temporada seca fría de 2018-2019 (octubre-febrero). Se realizaron muestreos en el camión con clave CE4-17MSA-2305 (Anexo V) de la línea 2 del Metrobús para el mismo horario (noche) en ambos periodos de muestreo, donde se observaron promedios de concentración de 90.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el 1er periodo (octubre) y de 110.0 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el 2do (mayo). Dicha diferencia entre ambos periodos, que es de alrededor de un 17.4 %, concuerda con la afirmación

inicial. Las observaciones sugieren que existe influencia del ambiente sobre los valores de exposición, aunque estos son contrarios al ciclo anual de $PM_{2.5}$. Sin embargo, se requieren más muestreos en la temporada seca caliente para reafirmar el comportamiento anterior.

En las tres líneas del Metrobús, las concentraciones de $PM_{2.5}$ mostraron un comportamiento típico con las emisiones vehiculares de $PM_{2.5}$, con los promedios de concentración de mayor valor por la mañana y los menores por la noche. Esto se observa de manera clara en los promedios de concentración dentro del camión TSA-343 de la línea 2 del Metrobús (Anexo V), que se muestreo tanto en la mañana ($156.8 \mu\text{g m}^{-3}$) como en la noche ($108.4 \mu\text{g m}^{-3}$) del día 8 de mayo de 2019, lo que representa una diferencia de alrededor de 30.1 % menos entre el 1er horario y el 2do.

La línea 2 del Metrobús mostró los promedios globales de concentración de $PM_{2.5}$ de mayor valor entre las 3 líneas muestreadas en ambos periodos de muestreo (137.2 y $134.7 \mu\text{g m}^{-3}$, 1er y 2o periodo, respectivamente), mientras que la línea 7 mostró los menores (47.1 y $35.7 \mu\text{g m}^{-3}$, 1er y 2o periodo, respectivamente). El primer factor que puede influenciar dichas observaciones son los tipos de vehículos que circulan sobre el arroyo vehicular donde transitan dichas rutas del Metrobús. Por ejemplo, la línea 7 recorre una sección de Av. Paseo de la Reforma donde no circula un número significativo de camiones de carga que puedan contribuir a incrementar los niveles de PMs próximos al transporte público y sus microambientes de transporte. En contraste, en la línea 1 que circula sobre la Av. de los Insurgentes y la línea 2 que circula sobre una sección del Eje 4 Sur, hay circulación constante de vehículos a diésel tanto de carga como de transporte público.

Además, los diferentes tipos de camiones del Metrobús también tienen un efecto sobre los niveles de exposición. Por ejemplo, la línea 7 opera con camiones con tecnología Euro VI, mientras que las líneas 1 y 2 los camiones que las operan están equipados con tecnología Euro V y III. De acuerdo a un reporte de monitoreo técnico realizado sobre el Metrobús de la ZMVM se determinó que los

modelos que operan con tecnología Euro más moderna, como la V y VI, emiten una menor cantidad de PMs al aire en comparación con el modelo Euro III (CDM, 2015). Lo anterior explica las concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas en los microambientes de este transporte, en particular las determinadas en los camiones Euro III y VI.

Por último, la línea 7 del Metrobús es la única que opera con aire acondicionado de forma continua, lo cual permite que los filtros de retención de PMs remuevan $PM_{2.5}$ emitidas tanto por los propios camiones como las que entran al microambiente, lo que sucede únicamente cuando se abren las puertas ya que las ventanas se encuentran selladas para esta línea (ROIGSAT, 2015).

8.3. Comparación de las observaciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ entre los 5 días de la semana laboral, muestreados en la línea 1 del Metrobús de la ZMVM durante el 2do periodo de muestreo.

El miércoles fue el día de la semana que mostró el mayor promedio de concentraciones de $PM_{2.5}$ ($117.8 \mu\text{g m}^{-3}$), aunque este muestreo se realizó en el mes de abril de 2019 (temporada seca caliente), mientras que los demás se realizaron en febrero del mismo año (temporada seca fría). Es recomendable que para poder determinar que el día miércoles presenta las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ durante la semana laboral, todos los muestreos sean realizados en el mismo mes y semana.

El siguiente día con el mayor promedio de concentración de $PM_{2.5}$ es el viernes ($96.4 \mu\text{g m}^{-3}$), lo cual pudiera estar relacionado con una mayor cantidad de tráfico vehicular durante la hora pico de tránsito. En cambio, el jueves, que tiene una actividad vehicular moderada a comparación del viernes, mostró el menor promedio de concentración ($51.4 \mu\text{g m}^{-3}$) (IMCO, 2017). Lo anterior implica que los patrones de uso de transporte privado y público de cada día influyen en los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ a que está expuesta la población en sus traslados diarios.

La mayor cantidad de muestreos realizados en la línea 1 del Metrobús permitió identificar características de los camiones que pueden afectar las concentraciones de PM_{2.5} dentro del microambiente. Estas incluyen el uso de aire acondicionado y el que se encuentren abiertas las ventanas o escotillas. La Tabla 8.1 muestra los promedios de concentración de PM_{2.5} de los viajes clasificados según las características anteriores.

Tabla 8.1. Promedios de la concentración de PM_{2.5} para diferentes condiciones en la línea 1 del Metrobús, durante el 2do periodo de muestreo.

Caso	Horario	Prom. PM_{2.5} (µg m⁻³)	Desviación Estándar
Ventanas abiertas	Mañana	92.5	36.6
	Noche	69.9	31.8
Ventanas cerradas	Mañana	109.6	19.2
	Noche	ND	ND
Escotilla abierta	Mañana	85.8	31.0
	Noche	83.2	7.0
Escotilla cerrada	Mañana	124.9	4.1
	Noche	68.5	38.8
Aire acondicionado	Mañana	104.6	24.6
	Noche	66.9	24.3
Sin aire acondicionado	Mañana	107.9	21.3
	Noche	67.9	39.3

ND: No disponible.

En los viajes de la mañana donde los camiones circulan con las ventanas abiertas, el promedio de concentración de PM_{2.5} fue menor que en los viajes con las ventanas cerradas. Sin embargo, la falta de datos con ventanas cerradas durante la noche no permite determinar que el comportamiento anterior suceda en cualquier horario. No obstante, dicho fenómeno puede explicarse porque los camiones de esta línea circulan normalmente con las ventanas abiertas lo que permite circulación de aire que puede evitar que las PMs se acumulen dentro de los camiones. Relativo a las escotillas, el promedio de concentración de PM_{2.5} de mayor valor en los viajes de la mañana es el de los camiones que circulan con las escotillas cerradas, mientras que en el horario de la noche es lo contrario. Por ello

no es claro la influencia de una escotilla y su configuración en los niveles de concentración de PMs en los microambientes de los vehículos.

El sistema de aire acondicionado contiene filtros que pueden remover las PMs del microambiente del medio de transporte y tener una influencia significativa sobre los niveles de exposición de los usuarios. Sin embargo, los promedios de concentración observados cuando el aire acondicionado operaba y no operaba difieren en menos de un 3.0 % para los 2 horarios. Estos resultados se explican porque la línea 1 del Metrobús opera con camiones, de tecnología Euro III y V, que emiten concentraciones de $PM_{2.5}$ relativamente mayores que en la línea 7, en conjunto con el transporte al interior de emisiones de vehículos en el arroyo vehicular a través de ventanas y/o escotillas que se encuentran abiertas en la mayoría de los viajes. Así, a pesar de que los camiones de la línea 1 están equipados con filtros de aire acondicionado, la circulación con ventanas abiertas resulta en un efecto no significativo de remoción de PMs.

8.4. Comparación de las observaciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ en el transporte público de la ZMVM con estudios internacionales.

Alrededor del mundo se han realizado diversos estudios sobre la exposición personal a $PM_{2.5}$ en diferentes tipos de transporte público. Adams et al. (2001) en el centro de Londres observaron durante el invierno del 2000, que en los camiones que operan con diésel las concentraciones de $PM_{2.5}$ oscilaron entre 7.9 y 97.4 $\mu g m^{-3}$. Tal rango de concentraciones es similar al observado en la línea 1 del Metrobús de la ZMVM, con un promedio de concentración de 77.2 $\mu g m^{-3}$. La comparación de los niveles de $PM_{2.5}$ de los Metros de la ZMVM y Londres, muestran que las concentraciones fueron mayores en el segundo, oscilando entre 105.3 a 371.2 $\mu g m^{-3}$, a comparación de la oscilación de 0.5 a 78.5 $\mu g m^{-3}$ y de 37.3 a 107.1 $\mu g m^{-3}$ para las líneas 1 y 3 del Metro de la ZMVM, respectivamente.

Okokon et al. (2017) determinaron promedios de concentración de $PM_{2.5}$ en 3 ciudades europeas para camiones a diésel de 85.0 $\mu g m^{-3}$ en Thessaloniki (Grecia), de 21.0 $\mu g m^{-3}$ en Rotterdam (Países Bajos) y de 29.0 $\mu g m^{-3}$ en Helsinki (Finlandia) para los meses de abril y junio. Tales valores son menores al promedio

de concentración observado, de alrededor de $126.3 \mu\text{g m}^{-3}$, en los camiones del Metrobús de la ZMVM durante el mismo periodo del año. McNabola et al. (2008) en Dublín reportaron una concentración promedio de $\text{PM}_{2.5}$ de $128.2 \mu\text{g m}^{-3}$ para camiones a diésel obtenida durante 18 meses de muestreo, la cual es, aproximadamente 48.9 % más grande que el promedio de concentración de $86.1 \mu\text{g m}^{-3}$ correspondiente a todos los muestreos realizados en el Metrobús de la ZMVM durante 8 meses de muestreo.

Finalmente, en la CDMX, Hernández-Paniagua et al. (2018) reportaron un promedio de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ de $49.8 \mu\text{g m}^{-3}$ dentro de camiones a diésel que circulan sobre un trayecto de la Av. Miguel Ángel de Quevedo durante la temporada seca fría. Dicho valor representa alrededor del 68.9 % del promedio global de concentración de $72.3 \mu\text{g m}^{-3}$ observado en el Metrobús de la ZMVM, para la misma temporada del año. Velasco et al. (2019) determinaron un promedio de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ de $34.0 \mu\text{g m}^{-3}$ para un trayecto del Metro de la ZMVM (línea 1 y 3) que recorre de manera subterránea 2.2 km de la Av. Cuauhtémoc. Este valor corresponde aproximadamente al 50.9 % del promedio global de concentración de $66.8 \mu\text{g m}^{-3}$, determinado de las observaciones obtenidas en las mismas líneas. La diferencia entre estos valores puede deberse a la falta de corrección de las observaciones de los estudios de Hernández-Paniagua et al. (2018) y Velasco et al. (2019).

Los promedios y la variación de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ del transporte de la CDMX, reportados en este trabajo de tesis, son generalmente mayores a los rangos reportados en estudios internacionales. En casos donde las concentraciones fueron menores, como entre los Metros de la ZMVM y Londres, resulta que este último presentó los niveles de concentración de mayor valor entre todas las formas de transporte muestreadas en el estudio Adams et al. (2001). Es posible que diferencias tecnológicas y en la infraestructura de transporte ocasionen los diferentes valores de exposición reportados.

9. Conclusiones

En el presente trabajo se realizaron determinaciones de la exposición personal a $PM_{2.5}$ en las líneas 1 y 3 del Metro, y 1, 2 y 7 del Metrobús de la ZMVM. Las determinaciones se realizaron en los meses de octubre de 2018 a mayo de 2019 utilizando un espectrómetro de aerosoles GRIMM modelo 11-C. Se realizaron experimentos de co-colocación utilizando el equipo GRIMM contra el equipo de referencia de $PM_{2.5}$ que pertenece a la RAMA instalado en el CCA, además de comparaciones de las observaciones del GRIMM contra datos corregidos por determinaciones gravimétricas de pDRs-1500 Thermo Scientific. Con ambos se determinaron factores de corrección de las mediciones de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidas con el monitor personal GRIMM. Los experimentos realizados permitieron caracterizar el funcionamiento del equipo GRIMM en campo y la corrección de las observaciones de exposición en microambientes de transporte.

Las observaciones obtenidas muestran que las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los microambientes del transporte público dependen del contacto de éstos con las emisiones de $PM_{2.5}$ sobre el arroyo vehicular. Las líneas 1 y 3 del Metro son mayoritariamente subterráneas, por lo que su contacto con el arroyo vehicular se produce por la ventilación, que permite que masas de aire enriquecidas en $PM_{2.5}$ puedan transportarse al interior del mismo. Las zonas subterráneas del Metro donde se presentan los niveles más altos de concentración de $PM_{2.5}$ son las que tienen un área de ventilación amplia y/o que en el exterior a estas existe abundante tráfico.

El Metrobús transita dentro de arroyos vehiculares. Los camiones de las L1 y L2 tienen ventanas (incluyendo escotillas) que se pueden abrir sin restricción, a diferencia de los camiones de la L7 que no permiten la apertura de estas. Las ventanas abiertas en los camiones pueden permitir el transporte de las emisiones de vehículos en el arroyo vehicular (dependientes de la cantidad de vehículos tipo diésel) al interior de los camiones incrementando las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la L1 y L2, mientras que en la L7 el transporte al interior de los camiones es

significativamente menor, lo que explica las bajas concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas.

El uso de tecnologías de combustión más modernas en los camiones del Metrobús también permite que los niveles de $PM_{2.5}$ al interior de los camiones se minimicen en comparación con camiones con tecnología previa. Se observaron los menores niveles de $PM_{2.5}$ en los camiones de la L7 que operan con ventanas cerradas y aire acondicionado continuo, lo que incrementa la eficiencia de los filtros de retención de PMs.

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ a las que las personas se exponen varió según los horarios en los que realizan sus traslados, las concentraciones de exposición a $PM_{2.5}$ disminuyen del horario pico de tránsito de la mañana a la noche. Las actividades antropogénicas, que varían a lo largo de la semana laboral, también mostraron afectar las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los transportes analizados. Finalmente, se observaron mayores niveles de exposición a $PM_{2.5}$ en la temporada seca caliente, comparados con los valores de la temporada seca fría.

Los niveles promedio de exposición a $PM_{2.5}$ determinados en la ZMVM sugieren que los usuarios del transporte público experimentan una exposición a $PM_{2.5}$ parecida o mayor a las observadas en los mismos medios de transportes en países europeos. La información reportada en la presente tesis puede ser utilizada por las autoridades competentes en temas de movilidad, salud y medio ambiente para impulsar políticas que mitiguen la exposición a $PM_{2.5}$ de los usuarios del transporte público de la ZMVM. Medidas simples como regular la circulación con ventanas cerradas y la operación permanente del aire acondicionado en toda la flota del Metrobús podrían ser implementadas de forma inmediata y repercutir de forma positiva sobre la salud de la población.

10. Referencias

1. Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N., McMullen, M.A.S. & Khandelwal, P. (2001). Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 279(1-3), 29-44.
2. Arciniegas-Suárez, C.A. (2011). Diagnóstico y control del material particulado: partículas suspendidas y fracción respirable PM₁₀. *Luna Azul*, (34), 195-213.
3. CCSSO. (2009). ¿Cómo entran los particulados al sistema respiratorio?, Centro Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional. Disponible en línea: http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/how_do.html. Último acceso: 15 de febrero de 2021.
4. CDM. (2015). Monitoring report form (Version 05.1). Reporte de Emisiones, Clean Development Mechanism, México. Disponible en línea: <https://unfccc.int/resource/docs/2014/cmp10/spa/05s.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
5. Cheng, Y.-H., & Li, Y.-S. (2010). Influences of Traffic Emissions and Meteorological Conditions on Ambient PM₁₀ and PM_{2.5} Levels at a Highway Toll Station. *Aerosol and Air Quality Research*, 10, 456-462.
6. Cheng, Y.-H., & Lin, Y.-L. (2010). Measurement of Particle Mass Concentrations and Size Distributions in an Underground Station. *Aerosol and Air Quality Research*, 10, 22-29.
7. Cheng, Y.-S. (2008). Comparison of the TSI Model 8520 and GRIMM Series 1.108 Portable Aerosol Instruments Used to Monitor Particulate Matter in an Iron Foundry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(3), 157-168.
8. EPA. (2018). Conceptos básicos sobre el material particulado, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Disponible en línea: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
9. Falcón-Rodríguez, C., Osornio-Vargas, A., Sada-Ovalle, I. & Segura-Medina, P. (2016). Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Frontiers in Immunology*, 7(3), 1-9.

10. GRIMM AEROSOL TECHNIK GmbH & Co. KG. (2016). Portable Laser Aerosol Spectrometer 11-C, Alemania. Disponible en línea: <http://www.raeco.com/products/particulate/Grimm-11-C/GRIMM-11C-ds-r1-2016-08.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
11. Hernández-Paniagua, I., Andraca-Ayala, G.L., Diego-Ayala, U., Ruiz-Suarez, L.G., Zavala-Reyes, J.C., Cid-Juárez, S., Torre-Bouscoulet, L., Gochicoa-Rangel, L., Rosas-Pérez, I. & Jazcilevich, A. (2018). Personal Exposure to PM_{2.5} in the Megacity of Mexico: A multi-mode transport study. *Atmosphere*, 9(57), 1-14.
12. IMCO. (2017). Índice de Tráfico, Instituto Mexicano para la Competitividad. Disponible en línea: <https://imco.org.mx/indice-de-traffic-2017-via-tomtom/>. Último acceso: 24 de abril de 2021.
13. INECC. (2018). Informe de Calidad del Aire, 2017 México. Informe Ambiental, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Ciudad de México. Disponible en línea: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2017.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
14. INECC. (2005). Partículas Suspendidas, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Disponible en línea: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/517/cap4.pdf>. Último acceso: 15 de febrero de 2021.
15. INECC. (2007). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Disponible en línea: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
16. INE y CTS. (2006). Evaluación de los beneficios en la exposición personal de pasajeros por la instrumentación de cambios en el transporte público. Instituto Nacional de Ecología y Centro de Transporte Sustentable. Disponible en línea: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35980582/inf_final_metrobus_2005.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1539646126&Signatures=QCDovyHd7lzyWHZpnUZPtarYNAU%3D&response-

content-disposition=inline%3B%20filename%3DEvaluacion_de_los_bene.

Último acceso: 13 de febrero de 2021.

17. INEGI. (2017). Encuesta Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Disponible en línea: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/eod/2017/doc/resultados_eod_2017.pdf. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
18. IQ Air. (2018). 2018 Air Quality Report Region & City PM_{2.5} Ranking. IQ Air. Air Visual. Disponible en línea: <https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2018-en.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
19. Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M. & Morawska, L. (2018). The influence of humidity in the performance of a low-cost air particle mass and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques*, (11), 4883-4890.
20. Linares-Gil, C., & Díaz-Jiménez, J. (2009). ¿Qué son los PM_{2.5} y cómo afectan a nuestra salud? *Ecologista en Acción*, (58), 46-49.
21. McNabola, A., Broderick, B.M. & Gill, L.W. (2008). Relative exposure to fine particulate matter and VOCs between transport microenvironments in Dublin: Personal exposure and uptake. *Atmospheric Environment*, 42, 6496-6512.
22. Okokon, E.O., Yli-Tuomi, T., Tururen, A.W., Taimisto, P., Pennanen, A., Vouitsis, I., Samaras, Z., Voogt, M., Keuken, M. & Lanki, T. (2017). Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities. *Environmental Research*, 154, 181-189.
23. OMS. (2018). Calidad del Aire y Salud, Organización Mundial de la Salud. Disponible en línea: [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Último acceso: 13 de febrero de 2021.
24. OMS. (2018). Contaminación del aire de interiores y salud, Organización Mundial de la Salud. Disponible en línea: <https://www.who.int/es/news->

- room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
- 25.OMS. (2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado, Organización Mundial de la Salud. Disponible en línea: <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 - 26.Portal Oficial del Metro de la CDMX. (2019). La Red, Portal Oficial del Metro de la CDMX. Disponible en línea: <https://metro.cdmx.gob.mx/la-red/mapa-de-la-red>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 - 27.Portal Oficial del Metro de la CDMX. (2019). Parque Vehicular, Portal Oficial del Metro de la CDMX. Disponible en línea: <https://metro.cdmx.gob.mx/parque-vehicular>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 - 28.Portal Oficial del Metrobús de la CDMX. (2019). Fichas Técnicas de las Líneas del Metrobús, Portal Oficial del Metrobús de la CDMX. Disponible en línea: <http://data.metrobus.cdmx.gob.mx/fichas.html#uno>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 - 29.Portal Oficial del Metrobús de la CDMX. (2019). Flota, Portal Oficial del Metrobús de la CDMX. Disponible en línea: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/flota>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 - 30.Quiros, D.C., Lee, E., Wang, R. & Zhu, Y. (2013). Ultrafine particle exposures while walking, cycling, and driving along an urban residential roadway. *Atmospheric Environment*, 73, 185-194.
 - 31.ROIGSAT. (2015). ¿Para qué sirven los filtros en el aire acondicionado?, ROIGSAT. Disponible en línea: <https://www.roigsat.com/es/iltros-aire-acondicionado/>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 - 32.SEMARNAT. (2013). Calidad del Aire: Una Práctica de Vida. Informe Ambiental, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México. Disponible en línea:

- <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
33. SEMARNAT. (2009). Contaminantes Criterios, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en línea: <https://web.archive.org/web/20100323014252/http://www.ine.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 34. SEMARNAT. (2015). Glosario de Educación Ambiental, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/glosario-de-educacion-ambiental>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 35. SEMARNAT. (2012). Guía Metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}. Guía Informativa, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México. Disponible en línea: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 36. SEMARNAT. (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Informe Ambiental, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México. Disponible en línea: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf. Último acceso: 13 de febrero de 2021.
 37. Thermo Scientific. (2008). MIE pDR-1500 instruction manual, Unión Europea. Disponible en línea: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/manuals/manual-pDR-1500.pdf>. Último acceso: 5 de marzo de 2021.
 38. Thermo Fisher Scientific. (2017). Thermo Scientific Modelo 5028i, Estados Unidos. Disponible en línea: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/Datasheets/epm-Datasheet-5028i-ES.pdf>. Último acceso: 15 de febrero de 2021.
 39. Tiburcio, A. (2019). Estudio a la exposición personal a PM_{2.5} en el Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México (Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en línea:

http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/2LJLHMIXCKBY4AJFBTR99XEHKXYCRTMLVNG1K226FHH57V69Q-67259?func=full-set-set&set_number=017843&set_entry=000002&format=999. Último acceso: 15 de febrero de 2021.

40. Velasco, E., Retama, A., Segovia, E., & Ramos, R. (2019). Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 219, 1-38.
41. Wang, Z., Calderón, L., Patton, A.P., Sorensen-Allacci, M.A., Senick, J., Wener, R., Andrews, C.J. & Mainelis, G. (2016). Comparison of real-time instruments and gravimetric method when measuring particulate matter in a residential building. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(11), 1109-1120.

11. Anexos

Anexo I. Memoria de cálculo de la gravimetría de los pDR-1500 Thermo Scientific.

Se presentan a continuación los cálculos realizados con las observaciones de la determinación gravimétrica de los pDR-1500. Los resultados correspondientes son las masas recolectadas y medidas en tiempo real por los equipos, cuáles deben ser comparadas para determinar cómo es el funcionamiento real de los pDRs.

A) Cálculos para obtener la masa recolectada o de la gravimetría:

- 1) Restar los valores obtenidos del pesado del filtro del pDR después de un muestreo, conocidos como peso final del filtro (g), con los valores obtenidos del pesado del mismo filtro antes del muestreo, llamado peso inicial del filtro (g). El resultado debe presentarse en μg (Ecuación I).

$$\text{Masa de partículas } (\mu\text{g}) = (\text{Peso final } (g) - \text{Peso inicial } (g)) * \left[\frac{1 \times 10^6 \mu\text{g}}{1 g} \right] \quad (\text{I})$$

B) Cálculos para determinar la masa medida por el pDR:

- 1) Calcular la masa de $\text{PM}_{2.5}$ medida (μg) con cada una de las concentraciones registradas (Ecuación II):

$$\text{Masa de partículas } (\mu\text{g}) = \text{concentración } \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) * \text{Flujo } \left(\frac{\text{L}}{\text{min}} \right) * \left[\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right] * \left[\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right] * [1 \text{ seg}] \quad (\text{II})$$

- 2) Sumar todos los valores obtenidos del punto 1 para obtener el valor de la masa total medida.

Nota: El flujo usado para el monitor personal fue de 1.52 L/min, en todos los muestreos.

Anexo II. Factor de corrección para un pDR-1500 Thermo Scientific.

Tabla I. Pesos y masas obtenidos en los experimentos de gravimetría.

No.	Fecha	Gravimetría			
		Peso inicial (g)	Peso final (g)	Masa recolectada (µg)	Masa medida por el pDR (µg)
1	11-feb-19	0.06648000	0.0664100	-70.0*	14.5
2	15-feb-19	0.06653000	0.0665600	30.0	20.0
3	19-feb-19	0.06748500	0.0675200	35.0	17.8
4	21-feb-19	0.06738500	0.0674200	35.0	14.3
5	25-feb-19	0.06671000	0.0667200	10.0	9.1
6	22-mar-19	0.06717500	0.0671900	15.0	8.0
7	27-mar-19	0.06748500	0.0675100	25.0	9.2
8	03-abr-19	0.06822000	0.0682900	70.0	30.1
9	24-abr-19	0.06771000	0.0677475	37.5	23.7
10	03-may-19	0.06606333	0.0661000	36.7	13.3
11	13-may-19	0.07001000	0.0700500	45.0	55.9
12	04-sep-19	0.06833500	0.0683450	10.0	8.6
13	12-sep-19	0.06903000	0.0690450	15.0	9.5

*Un valor negativo en cualquiera de los pesos recolectados puede deberse a una mala estabilización y/o pesado del filtro correspondiente.

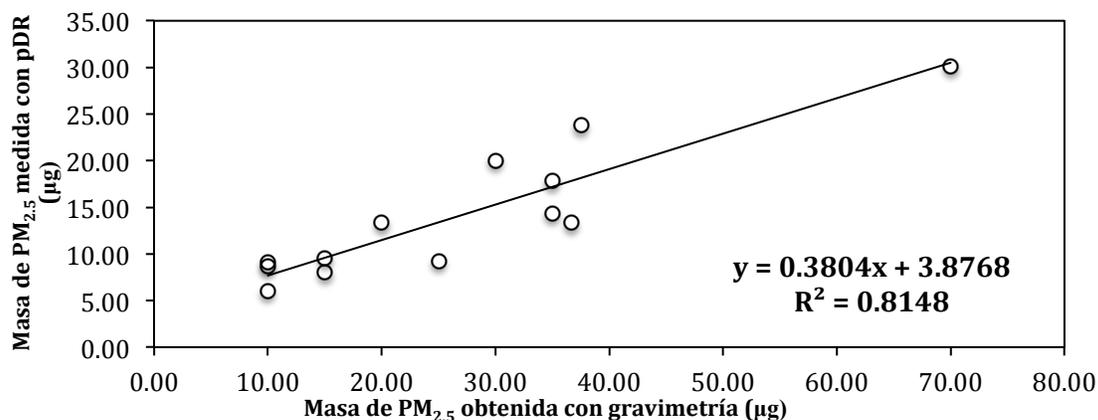


Figura I. Correlación entre los valores de masa de PM_{2.5} determinadas con un pDR-1500 contra los recolectados con gravimetría.

El factor de corrección anterior corresponde al pDR con el coeficiente de correlación (R^2) de mayor valor o que estadísticamente fue más satisfactorio.

Anexo III. Factor de corrección del espectrómetro de aerosoles GRIMM 11-C.

Tabla II. Promedios de la concentración de PM_{2.5} del GRIMM y pDR, en los muestreos del transporte público en 2018.

Fecha	Línea	Horario	Viaje	Prom. PM _{2.5} GRIMM (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Prom. PM _{2.5} pDR (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Humedad Relativa (%)
10-oct-18	M3	Mañana*	Ida	27.3	4.9	66.4	7.9	71.9
			Vuelta	26.1	4.8	42.4	25.8	67.6
		Tarde	Ida	34.1	4.0	124.1	16.2	64.2
			Vuelta	33.3	3.7	120.7	18.6	60.3
		Noche	Ida	28.5	7.3	70.4	16.7	69.5
			Vuelta	24.8	7.0	61.0	18.1	67.0
17-oct-18	M1	Mañana	Ida	18.4	4.6	53.5	19.3	60.9
			Vuelta	26.1	10.9	54.8	15.8	64.0
		Tarde	Ida	16.9	5.5	48.0	26.1	53.9
			Vuelta	16.8	9.4	51.1	31.4	50.4
		Noche	Ida	14.6	10.3	40.4	7.9	60.4
			Vuelta	12.7	7.4	49.8	7.4	61.7
24-oct-18	MB1	Mañana	Ida	28.6	7.6	66.6	22.2	ND
			Vuelta	30.6	9.5	85.0	26.0	51.7
		Noche	Ida	27.5	5.5	74.1	17.2	53.8
			Vuelta	21.1	6.5	39.9	14.9	ND
31-oct-18	MB2	Mañana*	Ida	75.7	23.7	316.0	76.6	65.7
			Vuelta	47.4	8.2	224.9	18.4	ND
		Noche	Ida	32.0	8.8	96.2	16.5	60.1
			Vuelta	32.2	9.1	94.8	29.1	58.9
07-nov-18	MB7	Mañana	Ida	20.2	6.4	54.2	14.2	67.6
			Vuelta	19.9	6.2	62.2	11.8	ND
		Noche	Ida	13.7	4.9	31.6	24.3	57.7
			Vuelta	8.5	5.3	21.6	17.4	56.8
Promedio								59.9

Nota: Los horarios marcados con un asterisco (*) no fueron tomados en cuenta para realizar la regresión lineal correspondiente por ser atípicos al comportamiento observado.

ND: No disponible.

Tabla III. Promedios de la concentración de PM_{2.5} del GRIMM y pDR, en los muestreos del transporte público en 2019.

Fecha	Línea	Horario	Viaje	Prom. PM _{2.5} GRIMM (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Prom. PM _{2.5} pDR (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Humedad Relativa (%)
11-feb-19	MB1	Mañana	Ida	17.2	4.9	91.4	24.5	52.2
			Vuelta	20.8	4.8	88.0	17.5	40.6
		Noche	Ida	16.1	5.3	63.1	20.2	41.2
			Vuelta	16.9	5.5	62.3	36.1	37.9
15-feb-19	MB1	Mañana	Ida	25.0	8.0	131.3	40.2	55.4
			Vuelta	19.3	4.9	95.3	39.8	45.0
		Noche	Ida	15.6	4.7	75.9	27.3	36.4
			Vuelta	15.7	3.5	66.9	11.3	40.7
19-feb-19	MB1	Mañana	Ida	21.9	8.3	137.5	57.9	37.7
			Vuelta	18.0	7.0	81.2	35.1	28.8
		Noche	Ida	8.1	2.8	35.6	10.0	30.3
			Vuelta	9.2	2.9	42.6	18.0	26.7
21-feb-19	MB1	Mañana	Ida	18.2	7.1	66.8	54.9	40.9
			Vuelta	7.1	3.1	33.3	43.0	28.9
		Noche	Ida	9.7	4.9	42.4	32.0	33.8
			Vuelta	10.6	3.3	48.9	39.8	28.5
25-feb-19	MB7	Mañana	Ida	7.8	2.4	35.4	8.0	65.3
			Vuelta	8.6	2.1	51.0	7.4	64.2
		Noche	Ida	5.1	1.6	35.3	4.1	57.2
			Vuelta	6.8	2.8	44.1	8.1	56.4
03-abr-19	MB1	Mañana	Ida	23.8	5.5	153.1	52.5	41.3
			Vuelta	27.5	5.4	154.7	39.7	33.9
		Noche	Ida	22.4	6.0	121.7	30.1	39.5
			Vuelta	18.8	4.2	94.1	20.9	34.5
08-may-19	MB2	Mañana	Ida	29.9	7.1	166.4	39.4	33.6
			Vuelta	30.4	5.8	164.9	24.8	36.0
		Noche	Ida	21.8	4.8	108.9	25.5	23.8
			Vuelta	20.9	5.1	92.3	26.3	19.3
Promedio								39.6

Anexo IV. Resultados de los experimentos de co-colocación.

Tabla IV. Ecuaciones lineales de los experimentos de co-colocación.

Fecha	Ecuación lineal	Coefficiente de correlación R^2
26 de septiembre de 2018	$0.4557x+17.4080$	0.4912
3 de octubre de 2018	$0.5560x+ 4.4000$	0.4963
22 de marzo de 2019	$0.3797x+ 0.1729$	0.6848
24 de abril de 2019	$0.3202x+ 3.8227$	0.4625
13 de mayo de 2019	$0.1354x+ 24.789$	0.9551
4 de septiembre de 2019	$0.0281x+ 6.6829$	0.0650

Nota: No se incluyeron en esta tabla los experimentos de co-colocación donde la información obtenida era insuficiente para obtener una regresión lineal de 5 puntos, correspondientes a los promedios horarios de las concentraciones de $PM_{2.5}$.

Anexo V. Estadísticas generales de las campañas de muestreo.

Tabla V. Bitácora de los camiones usados en los muestreos del Metrobús.

Temporada	Línea	Día	Horario	Prom. PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Máximo (µg m ⁻³)	Operador	Marca y modelo	Motor	Ventanas abiertas	Escotilla abierta	Uso de aire acondicionado		
Finales de la seca fría		Lunes	Mañana Ida	86.5	28.7	192.4	CISA-120	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	X	X	-		
			Mañana Regreso ^a	107.7	27.5	267.8	CISA-1112-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	-		
			Noche Ida ^b	79.5	29.6	229.8	RECSA-1095-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-		
					Noche Regreso ^b	85.9	32.8	339.9	RECSA-1095-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-
		Martes	Mañana Ida	105.9	48.6	495.7	CISA-137	DINA Brighter Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	-	X	-		
			Mañana Regreso	87.2	40.4	296.9	ND	ND	ND	X	X	X		
			Noche Ida	35.1	15.8	127.6	ND	ND	ND	X	-	X		
Noche Regreso ^b	42.1		16.3	122.0	RECSA-1095-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	-				
Seca caliente	1	Miércoles	Mañana Ida	122.0	30.8	249.4	CISA-1102-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	-	X	X/-		
			Mañana Regreso	141.8	31.1	302.5	CISA-1027-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	-		
			Noche Ida	113.2	35.1	310.8	CISA-1031-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-		
					Noche Regreso	94.4	23.8	186.3	RECSA-1086-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	X
		Jueves	Mañana Ida ^c	83.0	43.5	334.9	CISA-109	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	-	X	-		
			Mañana Regreso	30.2	19.3	214.8	CISA-1018-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-		
			Noche Ida	43.7	27.0	186.3	CE4-17MSA-1308	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	-		
Noche Regreso	48.6		19.0	253.3	RECSA-1084B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	X				
Finales de la Seca Fría		Viernes	Mañana Ida ^c	127.8	47.2	338.8	CISA-109	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	-	-	-		
			Mañana Regreso ^a	101.4	29.5	311.4	CISA-1112-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	-		
		Noche Ida ^d	77.7	26.4	191.3	CISA-1043-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	X			
		Noche Regreso ^d	78.7	20.1	204.7	CISA-1043-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	X			
Seca caliente	2	Miércoles	Mañana Ida ^e	156.8	38.9	284.0	TSA-343	MarcoPolo Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	X	X	-		

Seca caliente	2	Miércoles	Mañana Regreso	163.7	36.3	341.0	CE4-17MSA-2303	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	-
			Noche Ida ^f	110.0	26.8	191.3	CE4-17MSA-2305	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-
			Noche Regreso ^o	108.4	28.1	243.2	TSA-343	MarcoPolo Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	X	X	-
Finales de la seca fría	7	Miércoles	Mañana Ida	44.6	26.0	186.3	OL7-827	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
			Mañana Regreso	43.8	19.3	140.5	OL7-818	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
			Noche Ida	24.9	20.0	265.0	OL7-807	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
			Noche Regreso	29.7	15.6	197.4	SBR-941	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
			Mañana Ida	81.4	24.3	244.7	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Seca fría	2	Miércoles	Mañana Regreso	90.7	30.0	283.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
			Noche Ida	78.0	19.4	207.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
			Noche Regreso	58.8	21.3	282.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
			Mañana Ida	229.0	75.2	612.7	TSA-340	MarcoPolo Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroIII	X	X	-
			Mañana Regreso	135.0	26.0	309.8	CE4-17MSA-2308	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-
Seca fría	7	Miércoles	Noche Ida ^f	90.8	28.0	201.6	CE4-17MSA-2305	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	-	X
			Noche Regreso	94.0	28.8	190.2	CE4-17MSA-2310	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor Diésel en Tecnología EuroV	X	X	-
			Mañana Ida	65.3	30.9	222.2	OL7-1143	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
	7	Miércoles	Mañana Regreso	57.6	22.7	245.4	SBR-915	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
			Noche Ida	40.4	21.5	206.0	OL7-822	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X
			Noche Regreso	25.0	23.2	124.5	SBR-928	Enviro500 2017	Motor Diésel en Tecnología EuroVI	-	-	X

Nota 1: Se marcaron con una misma letra aquellos viajes donde se usó el mismo camión.

Nota 2: Se uso una cruz (X) para marcar cuando un camión cumple con una característica particular y un guion (-) cuando no.

ND: No disponible.

Tabla VI. Promedios de la concentración de PM_{2.5} de los muestreos realizados en el Metro.

Metro	Horario	Viaje	Prom. PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Máximo (µg m ⁻³)
Línea 3 Metro	Mañana	Ida	80.8	25.4	222.5
		Vuelta	78.9	23.4	222.8
	Tarde	Ida	98.9	12.9	151.2
		Vuelta	96.5	12.4	161.9
	Noche	Ida	82.6	21.0	302.1
		Vuelta	72.6	22.7	263.8
Línea 1 Metro	Mañana	Ida	52.2	14.8	217.1
		Vuelta	72.8	46.5	651.7
	Tarde	Ida	47.7	26.7	298.7
		Vuelta	45.2	32.4	413.5
	Noche	Ida	37.2	56.6	740.2
		Vuelta	36.3	26.8	235.5

Tabla VII. Promedios de la concentración de PM_{2.5} de los muestreos realizados en 2018.

Transporte	Línea	Horario	Prom. PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Desviación Estándar	Prom. PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Desviación Estándar
Metrobús	1	Mañana	86.1	27.7	77.2	26.8
		Noche	68.4	22.5		
	2	Mañana	182.0	71.7	137.2	69.3
		Noche	92.4	28.5		
	7	Mañana	61.5	27.8	47.1	29.7
		Noche	32.7	23.7		
Metro	1	Mañana	62.5	34.6	48.6	35.5
		Tarde	46.5	28.9		
		Noche	36.7	41.3		
	3	Mañana	79.9	24.5	85.1	22.6
		Tarde	97.7	12.7		
		Noche	77.6	22.1		

Tabla VIII. Promedios de la concentración de PM_{2.5} de los muestreos realizados en 2019.

Transporte	Línea	Horario	Prom. PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Desviación Estándar	Prom. PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Desviación Estándar
Metrobús	1	Mañana	99.3	46.7	84.6	44.1
		Noche	69.9	35.7		
	2	Mañana	160.3	37.7	134.7	41.7
		Noche	109.2	27.5		
	7	Mañana	44.2	23.5	35.7	22.6
		Noche	27.3	27.4		

Tabla IX. Promedios de la concentración de PM_{2.5} de los muestreos realizados durante una semana de 2019 para la línea 1 del Metrobús.

Día	Horario	Prom. PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Desviación Estándar	Prom. PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Desviación Estándar
Lunes	Mañana	97.1	30.0	89.9	31.5
	Noche	82.7	31.4		
Martes	Mañana	96.5	45.6	67.6	45.2
	Noche	38.6	16.4		
Miércoles	Mañana	131.9	32.5	117.8	34.9
	Noche	103.8	31.7		
Jueves	Mañana	56.6	42.5	51.4	35.0
	Noche	46.2	23.8		
Viernes	Mañana	114.6	41.6	96.4	38.6
	Noche	78.2	23.4		

Tabla X. Promedios globales de la concentración de PM_{2.5}.

Caso	Prom. PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Desviación Estándar
Metrobús 1er periodo	87.2	55.8
Metrobús 2do Periodo	85.0	47.9
Metrobús Total	86.1	50.2
L1 Metrobús	80.9	41.9
L2 Metrobús	136.0	57.3
L7 Metrobús	41.4	27.0
Metrobús T. Seca fría	72.3	40.3
Metrobús T. Seca caliente	126.3	38.7
Metro	66.8	34.7
Todos los viajes	76.5	48.1