

**Estudio del Nivel de Exposición a PM2.5 en la Cicloinfraestructura Propuesta para la
Ciudad de Bucaramanga**

Jenny Andrea Téllez Montero

Dayana Marcela Villamizar Gonzáles

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Ambiental**

Director

Kento Taro Magara Gómez

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2019

Nota de Aceptación

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Mayo de 2019

Agradecimientos

Primeramente le doy gracias a Dios porque sin él nada en mi vida sería posible, él me dio la familia que tengo y hoy me siento inmensamente agradecida con mis padres por haberme forjado como la persona que soy; muchos de mis logros se los debo a ellos, entre los que se incluye este. Especialmente agradezco a mi padre quien me apoyo de principio a fin y participó como voluntario para pedalear en repetidas ocasiones durante los periodos de pruebas.

A nuestro director PhD Kento Taro Magara Gómez por brindarnos todas las bases desde la materia Contaminación Atmosférica y proporcionarnos las herramientas necesarias para la elaboración de este proyecto, siempre con la mejor disposición y mucha paciencia.

Por último me gustaría agradecer a todas las personas, amigos y familiares que nos colaboraron de manera voluntaria para desarrollar este estudio y llevarlo a cabalidad de forma exitosa.

Jenny A. Téllez Montero

Agradezco a todos los amigos, familiares y conocidos, en especial a mis padres que de una u otro forma contribuyeron al desarrollo de mi formación personal durante mis años de universidad y me brindaron todo el apoyo para poder culminar esta etapa de mi vida.

Dayana Marcela Villamizar G.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
 Capítulo 1. Objetivos	 13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
 Capítulo 2. Marco Teórico	 14
2.1 Marco Conceptual	14
2.1.1 Material Particulado Fino PM 2.5.....	14
2.1.2 Black Carbon (BC).	18
2.1.3 Alternativas de Mejoramiento de Movilidad Urbana.	21
2.1.4 Equipos utilizados para estudios de calidad de aire.	26
2.2 Marco Legal	27
 Capítulo 3. Metodología	 29
3.1 Revisión bibliográfica	29
3.2 Establecimiento de estrategias de muestreo y rutas	29
3.2.1 Estrategias de muestreo.....	29
3.2.2 Selección de las rutas.	33

3.3 Evaluación de los niveles de exposición a PM2.5 en los recorridos	35
3.3.1 Análisis espacial y temporal de los equipos móviles en tiempo real durante el recorrido. .	35
3.3.2 Comparación entre los equipos móviles en tiempo real.	35
3.4 Determinación del contenido de carbono negro (BC) en la muestra de PM2.5 colectada durante el recorrido.	36
3.4.1 Concentración total de PM2.5 en filtro (Uno por recorrido).	36
3.4.2 Determinación de Black Carbon (BC).	37
Capítulo 4. Resultados y Discusión	38
4.1 Distribuciones temporales de la concentración de PM2.5 para cada ruta en las diferentes franjas de muestreo.	38
4.2 Correlación de la concentración de PM2.5 con las variables meteorológicas	47
4.3 Correlación entre equipos	49
4.4 Determinación de concentración en masa de PM2.5	51
4.4.1 Selección del mejor medio de recolección de partículas.	51
4.5 Concentraciones de BC para cada ruta en las diferentes franjas de muestreo.	52
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas	63
Apéndices.....	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Red de la cicloinfraestructura propuesta para el año 2019.....	34
Figura 2. Concentración de PM2.5 vs. Tiempo Real, Jornada de la mañana	38
Figura 3. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde	39
Figura 4. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche.	41
Figura 5. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la mañana.	42
Figura 6. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde.	44
Figura 7. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche.	45
Figura 8. Humedad vs Concentración de PM2.5 vs, Jornada de la noche.	47
Figura 9. Temperatura vs Concentración de PM2.5 vs, Jornada de la noche.	48
Figura 10. Regresión lineal de PM2.5 Dusttrak vs prototipo en Tiempo real	49
Figura 11. Concentración de PM2.5 Dusttrak vs prototipo en Tiempo real.	50
Figura 12. Concentración de BC vs día de muestreo y franja del día, Ruta 1.	53
Figura 13. Concentración de BC vs día de muestreo y franja del día, Ruta 2.	54
Figura 14. Concentraciones de PM2.5 a través de la Ruta1.	56
Figura 15. Concentraciones de PM2.5 a través de la Ruta 2.	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios de interés.....	28
Tabla 2. Determinación de la concentración de PM2.5 y BC.....	52

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Concentraciones de PM2.5 Vs Tiempo de la Ruta 1 y 2 durante todo el muestreo	67
Apéndice B. Determinación de la concentración de PM2.5 y BC	75

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Estudio del Nivel de Exposición a PM2.5 en la Cicloinfraestructura Propuesta para la Ciudad de Bucaramanga.

AUTOR(ES): Jenny Andrea Tellez Montero y Dayana Marcela Villamizar Gonzáles

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

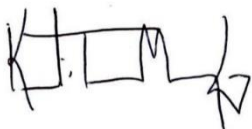
DIRECTOR(A): Kento Taro Magara Gómez

RESUMEN

En el presente estudio se determinó el nivel de exposición personal a PM2.5 de los usuarios de la cicloinfraestructura planeada para la ciudad de Bucaramanga, para esto se eligieron dos rutas, una que va desde la Cra 21-Calle 9 hasta la Cra 21-Calle 51 y otra que comprende la Cra 28-Calle 9 hasta la Cra 35-Calle 48, con el fin de evaluar las concentraciones de PM2.5 en tiempo real y determinar el contenido de Black Carbon (BC) presente en cada muestra recolectada durante los recorridos específicos de la cicloinfraestructura, los días Martes, Jueves y Sábado, en las tres franjas diarias teniendo en consideración las variables meteorológicas. Los muestreos se realizaron mediante tres equipos de medición: prototipo de monitoreo móvil, Dusttrak y bomba personal y para el análisis de BC se empleó un Transmisómetro Óptico SootScan™ Model OT21 ©by Magee Scientific. En total se colectaron 16 muestras (8 por ruta), de las cuales la que presentó mayor contenido de BC fue la del filtro número 1 de la Ruta 1. Finalmente este trabajo nos permitió determinar los puntos críticos donde se presentó la máxima concentración para cada tramo dentro de la cicloinfraestructura. Tomando como referencia la Resolución 2254 de Calidad de Aire. Siendo la Ruta 2 la ruta en la cual el biciusuario se encuentra más expuesto a altos niveles de PM2.5 durante todo el recorrido y así mismo plantear alternativas de mejoramiento de la movilidad urbana.

PALABRAS CLAVE:

Contaminación Atmosférica, PM2.5, Black Carbón (BC), cicloinfraestructura.



Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Study of the Level of Exposure to PM2.5 in the Proposed Cycloinfraestructure for the City of Bucaramanga.

AUTHOR(S): Jenny Andrea Tellez Montero y Dayana Marcela Villamizar Gonzáles

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

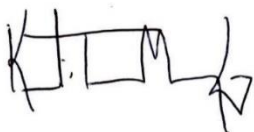
DIRECTOR: Kento Taro Magara Gómez

ABSTRACT

In the present study, the level of personal exposure to PM2.5 of the users of the planned cycloinfraestructure for the city of Bucaramanga was determined, for this two routes were chosen, one that goes from the Cra 21-Calle 9 to the Cra 21- Calle 51 and another that includes the Cra 28-Calle 9 to the Cra 35-Calle 48, in order to evaluate the concentrations of PM2.5 in real time and determine the content of Black Carbon (BC) present in each sample collected during the specific routes of the cycloinfraestructure, on Tuesdays, Thursdays and Saturdays, in the three daily intervals taking into consideration the meteorological variables. Sampling was carried out using three measuring devices: mobile monitoring prototype, Dusttrak and personal pump, and for the BC analysis a SootScan TM Optical Transmisometer Model OT21 © by Magee Scientific was used. In total, 16 samples were collected (8 per route), of which the one with the highest content of BC was that of filter number 1 of Route 1. Finally this work allowed us to determine the critical points where the maximum concentration was presented for each stretch within the cycloinfraestructure. Taking as reference the Resolution 2254 of Air Quality. Route 2 being the route in which the bicyclists is more exposed to high levels of PM2.5 during the entire route and also propose alternatives for improving urban mobility.

KEYWORDS:

Atmospheric Pollution, PM2.5, Black Carbon (BC), cycloinfraestructure.



Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

Hoy en día Bucaramanga está buscando ser una ciudad sostenible a través de la implementación de programas y estrategias de uso, promoción y apropiación de los sistemas de transporte menos contaminantes como la bicicleta.

La Estrategia de la Bicicleta como Medio de Transporte para Bucaramanga y su Área Metropolitana nace de una apuesta amplia y de largo plazo en la que incursionó la ciudad y su área metropolitana desde 2015, cuando adoptó su Plan Integral de Desarrollo Metropolitano, bajo el enfoque de “prosperidad urbana” promovido por ONU-Hábitat. El desarrollo de la cicloinfraestructura propuesta para el año 2019 en la ciudad busca conectar los tramos existentes con los futuros para crear una red más grande y que los usuarios puedan movilizarse sin problemas de manera más cómoda en todo el territorio. Las rutas propuestas para la construcción de esta cicloinfraestructura presentan tránsito de vehículos automotores, generadores de material particulado PM_{2.5}. Estas partículas por su tamaño son fácilmente respirables ya que viajan a profundidad en los pulmones, penetrando en el aparato respiratorio debido a esto, están asociadas a numerosos efectos negativos en la salud (Andalucía, 2004).

Por lo anterior es importante conocer las concentraciones a las cuales están expuestos los usuarios en la cicloinfraestructura. Con este fin se realizó el presente estudio, donde se hicieron recorridos en bicicleta pasando por las rutas propuestas y con ayuda de equipos que miden el material particulado PM_{2.5} en tiempo real y una bomba de succión de aire que captura este

material para la determinación de las diferentes concentraciones a las que se encuentran sometidos los usuarios, mostrando así datos que puedan servir como evidencia para que las entidades responsables, tomen decisiones para garantizar una mejor calidad de vida y gozar de un ambiente sano.

En Colombia, los estudios sobre los niveles a exposición de material particulado son muy pocos, uno de ellos se realizó en el año 2016 en la ciudad de Bogotá, donde el objetivo era caracterizar el rango de partículas finas (PM_{2.5}) y las concentraciones de carbono negro (BC) a las que están expuestos los usuarios de carriles de bicicletas. Usando una bicicleta equipada con un DustTrak y un microaetalómetro, midieron los niveles de concentración de PM_{2.5} y carbono negro (BC) a lo largo de los corredores de las bicicletas, durante los días de semana y los fines de semana. Los resultados indicaron que los usuarios de carriles para bicicletas en Bogotá están expuestos a niveles de contaminación del aire que superan los valores umbral establecidos como potencialmente peligrosos para la salud humana. Las concentraciones promedio para PM_{2.5} oscilaron entre 80 y 136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en días laborables y entre 30 y 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en fines de semana. Las concentraciones medias de carbono negro (BC) estuvieron entre 16 y 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los días laborales y en el rango de 10 y 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los fines de semana. De acuerdo con estos resultados, tanto el volumen de tráfico como las condiciones de difusión, se ven afectadas por muchos factores, incluida la geometría de la calle, afectando los niveles de exposición de los ciclistas. Teniendo en cuenta el importante papel que desempeña el ciclismo como un modo de transporte alternativo en las ciudades de América Latina, se considera que estos resultados proporcionan información útil para aumentar la apreciación de la exposición excesiva de los ciclistas a la contaminación del aire en Bogotá. (Franco, Segura, & Mura, 2016).

Capítulo 1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el nivel de exposición a PM2.5 de los usuarios de las cicloinfraestructuras planeadas para la ciudad de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer las estrategias de muestreo de PM2.5 más convenientes para el caso de estudio.
- Evaluar las concentraciones de PM2.5 en recorridos específicos de las cicloinfraestructuras en etapa de diseño con diferentes tiempos de duración, hora del día y día de la semana.
- Analizar el contenido de Carbono Negro (BC) en las muestras de PM2.5 colectadas durante los recorridos seleccionados.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Material Particulado Fino PM 2.5. Con base a la literatura, el PM2.5 representa la fracción respirable catalogada como fina, constituida por aquellas partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2.5 micrómetros, es decir, son 100 veces más delgadas que un cabello humano. Dado que generalmente las partículas varían en tamaño, composición y origen, se les suele clasificar por su tamaño, esta propiedad determina el transporte y remoción de la mismas en el aire, así como la deposición de partículas en el interior del sistema respiratorio; igualmente, el tamaño permite discriminar entre diversas fuentes emisoras y composición química de las partículas (Héctor Jorquera Gonzáles, 2018).

La OMS determinó sus concentraciones como de riesgo para la salud humana, así: $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual) y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media diaria). Estas concentraciones pueden afectarse por cambios en el clima (humedad, precipitaciones, vientos, etc.); además, es difícil controlar simultáneamente los múltiples contaminantes y separar e identificar los efectos de cada uno de ellos, debido a que muchos contaminantes se generan a través de la misma fuente y, por lo tanto, están correlacionados (OMS, 2005).

Principales Fuentes

La composición de estas partículas es mucho más tóxica en comparación al PM10, esto se debe a que su principal origen es antropogénico y se encuentran en zonas urbanas e industriales.

En algunas zonas, la quema de leña o material vegetal y otros combustibles de biomasa puede ser una fuente importante de contaminación atmosférica por partículas, siendo la mayor parte de las procedentes de la combustión de tipo fino (PM2.5) (OMS, 2005).

Pero, cabe resaltar la existencia de numerosos estudios en los cuales se ha concluido que en ámbitos urbanos el tráfico constituye la fuente más importante, debido a la combustión incompleta de combustibles fósiles, especialmente las emisiones de los vehículos diésel. Las partículas se originan en las emisiones de los motores de combustión interna de los vehículos, así como en el desgaste de pavimento, neumáticos y frenos (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (ECODES, 2013)).

Fuentes móviles: Se refiere a vehículos que operan con motores de combustión interna, incluyendo carros, motos, buses, camiones, tractores, etc. Sus emisiones provienen de los gases de escape, al polvo resuspendido de carreteras y a otros componentes originados por desgaste de frenos y partes metálicas, desgaste de neumáticos, etcétera.

Los motores diésel son mayoritariamente responsables del material particulado primario, mientras que los vehículos con motor a gasolina (o de ignición con chispa) aportan gases precursores de la formación de material particulado secundario. Los principales compuestos aportados por los vehículos a la masa del PM2.5, lo constituyen el carbono elemental, el orgánico y algunos componentes orgánicos tales como: alcanos, alquenos, alquinos, entre otros. El material particulado se forma en la cámara de combustión de los motores, como resultado de la combustión incompleta (Héctor Jorquera González, 2018).

Principales Componentes del PM2.5

La composición del PM2.5 puede llegar a ser muy variable, esta fundamentalmente formado por partículas secundarias: nitratos y sulfatos (originados por oxidación de NO_x y SO_x), aerosoles orgánicos, como el peroxiacetil nitrato (PAN) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA), entre otros. También puede contener aniones, cationes, metales, carbono orgánico, carbono elemental (black carbón), plomo, cadmio, amonio, entre otros compuestos de tipo orgánico (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (ECODES, 2013)).

Efectos Sobre la Salud

En las principales capitales de América Latina, el material particulado es considerado el contaminante del aire más crítico, dado que frecuentemente excede los límites establecidos por la normativa. Incluso a bajas concentraciones y con cortos tiempos de exposición, puede tener implicaciones en la salud humana. Esto quiere decir que es un contaminante del aire para el que no existe un umbral determinado y que cualquier exposición tiene un riesgo asociado. Por su tamaño, y porque casi siempre se compone de materiales tóxicos, representa un especial peligro, dado que tiene la facultad de penetrar hasta las vías respiratorias de las personas alcanzando bronquios y alvéolos (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

Los últimos trabajos científicos sugieren que este tipo de contaminación, y particularmente las partículas procedentes del tráfico urbano, está asociado con incrementos en la mortalidad de la población expuesta y al creciente desarrollo del asma y alergias entre la población infantil. En el caso de las PM2.5 su tamaño hace que sean 100% respirables ya que viajan profundamente en los pulmones, penetrando en el aparato respiratorio y depositándose en los alvéolos pulmonares,

por lo que pueden, potencialmente dañar cualquier órgano o sistema. Las partículas PM2.5, por tanto, se pueden acumular en el sistema respiratorio y están asociadas, cada vez con mayor consistencia científica, con numerosos efectos negativos sobre la salud, como el aumento de las enfermedades respiratorias y la disminución del funcionamiento pulmonar. Los grupos más sensibles niños, ancianos y personas con padecimientos respiratorios y cardíacos corren más riesgo de padecer los efectos negativos de este contaminante. La mortalidad en ciudades con niveles elevados de contaminación supera entre un 15% y un 20% la registrada en ciudades más limpias. Incluso en la unión europea (UE), la esperanza de vida promedio es 8,6 meses inferior debido a la exposición a las PM2.5 generadas por actividades humanas (Organización Mundial de la salud, 2018).

Efectos Sobre el Medio Ambiente

En el medio ambiente estas partículas son transportadas por el viento, luego pueden instalarse en el suelo o el agua y según su composición química los efectos de esta sedimentación pueden provocar que los lagos y arroyos se vuelvan ácidos, cambio en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales, reducción de los nutrientes del suelo, daño en los bosques sensibles y cultivo agrícolas, efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas y contribución a los efectos de la lluvia ácida entre otros (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2017).

La emisión de estas partículas tiene el potencial de afectar el clima de la tierra. Esto debido a su capacidad de absorber y dispersar la radiación solar, lo que afecta el balance de energía radiactiva de la tierra. Además, las partículas pueden actuar como núcleos de condensación del

vapor de agua e influir así en la formación de las nubes y alterar los patrones de precipitación a escala global, también pueden actuar como núcleos de congelación y acelerar los procesos de precipitación de nieve (Héctor Jorquera González, 2018).

Los efectos radiativos de las partículas se producen de dos formas: el efecto directo, por el que las partículas dispersan y absorben radiación infrarroja solar y térmica, y el efecto indirecto, en el que las partículas modifican las propiedades de nubosidad. Los sulfatos, los nitratos y el carbón orgánico pueden reflejar la radiación solar incidente y dar lugar a un efecto de enfriamiento, pero otros componentes de las partículas, como el hollín (carbono negro), absorbe la radiación solar y contribuyen al calentamiento. Ambos efectos afectan al balance radiativo global y se cuantifican a través del término “forzamiento radiativo”; este se define como la medida de la influencia que un factor ejerce en la modificación del equilibrio entre la energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera, y es un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial de cambio climático. En este contexto, las partículas que tienen un efecto de enfriamiento presentan un forzamiento radiativo negativo, y aquellas que tienen un forzamiento radiativo positivo son las que favorecen el calentamiento (EFEVerde, 2014).

2.1.2 Black Carbon (BC). El BC se produce de forma natural y por actividad humana, se forma durante la combustión y es emitido cuando existe una limitante de oxígeno y calor disponible en el proceso de combustión para quemar completamente el combustible. El BC se emite originalmente como pequeñas esferas, entre las cuales se aglomeran para formar partículas más grandes, estas partículas absorben fuertemente la luz solar y le dan al hollín el color negro.

Este contaminante es un importante constituyente de la fracción ultrafina, una subclase del PM_{2.5} (C. G. D. Hernández, 2016).

Principales Fuentes

Las fuentes principales incluyen las emisiones de los motores diésel, las cocinas, la quema de madera y los incendios forestales.

El BC permanece en la atmósfera solo por unos días o algunas semanas después de la liberación en la atmósfera, durante este corto período de tiempo el carbono negro puede tener importantes impactos negativos directos e indirectos sobre el clima, las regiones glaciares, la agricultura y la salud humana (C. G. D. Hernández, 2016).

Efectos Sobre la Salud

La inhalación de carbono negro está asociada con problemas de salud que incluyen enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer e incluso defectos de nacimiento. Según los datos de la Comisión Europea que refleja el estudio, la mala calidad del aire provocada en parte por esta sustancia es “la primera causa de muerte prematura en materia medioambiental en Europa, con un total de 600.000 fallecimientos al año” y riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (EFEVerde, 2014).

En un estudio mencionado en la tesis de maestría de Díaz Hernández, Delfito et al argumenta que la exposición de 24 horas al BC a una concentración promedio de entre $1.59 - 1.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$

tiene efectos negativos en la presión sanguínea, cambios en la frecuencia cardiaca y puede usarse como un biomarcador en la sangre (Hernández, C. G. D, 2016).

Efectos Sobre el Medio Ambiente

El carbono negro es cuantitativamente considerado el segundo causante del cambio climático que causa cambios en los patrones de lluvia y nubes (EPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2017). El principal impacto negativo de esta materia sobre el medio ambiente reside en sus efectos radiativos, que “absorben la luz solar convirtiéndola en calor y reduciendo la cantidad de partículas que se reflejan y se redistribuyen al espacio”. Además, los sedimentos de carbón pueden oscurecer superficies de nieve y hielo provocando que se calienten y se fundan más rápidamente o asentarse en las nubes, alterando su localización y los ciclos de lluvia.

Al hablar del clima o salud respiratoria siempre se piensa en el CO₂ y los gases de efecto invernadero, pero un gramo de BC provoca un impacto climático entre 100 y 2.000 veces mayor que el CO₂. El cambio climático podría mitigarse más rápidamente a través de la reducción de esta materia y los efectos positivos sobre la salud serían más evidentes (EFEVerde, 2014).

El tiempo de vida corto del BC significa que las concentraciones atmosféricas son altas cerca de las fuentes de emisión y periodos y temporadas de emisión. Esta alta variabilidad espacial y temporal afecta el impacto del BC en el clima.

La localización geográfica y la altitud determinan de manera importante el impacto del BC en el clima. Las partículas finas emitidas en la combustión, incluyendo el BC pueden ser transportadas miles de kilómetros lejos de las fuentes de emisión. Las partículas tienen un buen efecto en la absorción total de radiación solar por la atmósfera cuando son emitidas en colores claros o transportadas a superficies claras, superficies reflectivas como hielo, nieve y desiertos. En la ausencia de PM, un alto porcentaje de luz solar no podría ser reflejada por estas superficies de regreso al espacio. Por ello, cualquier absorción tanto de la luz entrante como reflejada por el PM sobre estas superficies calienta más que el obscurecimiento de las superficies. Además, el efecto radiativo neto del BC puede ser sensitivo a la altura. Así como las partículas suspendidas sobre los desiertos o glaciares claros, las partículas suspendidas en los cúmulos de nube pueden absorber tanto radiación solar entrante o saliente de la tierra, incrementando el efecto radiativo neto de la absorción de luz por las partículas (Hernández, C. G. D, 2016).

2.1.3 Alternativas de Mejoramiento de Movilidad Urbana. En algunos sectores donde se presentan niveles representativos de contaminación atmosférica derivada del transporte, se hace necesaria la elaboración de programas y/o estrategias de reducción, minimización y mitigación de la misma; identificando acciones y medidas que permitan disminuir los niveles de concentración de los contaminantes a niveles por debajo de los máximos establecidos en la legislación. De esta manera, la autoridad ambiental competente deberá considerar para su aplicación acciones y medidas tales como las que se describen a continuación.

Mejoramiento de la malla vial

Para el desarrollo de esta alternativa se deben hacer cambios en la infraestructura de transporte con el propósito de mejorar sus especificaciones técnicas iniciales según la ley 1682

de infraestructura que comprende las actividades de: ampliación de calzada, construcción de nuevos carriles, rectificación (alineamiento horizontal y vertical), construcción de obras de drenaje y sub-drenaje, construcción de estructura del pavimento, estabilización de afirmados, tratamientos superficiales o riego, señalización vertical, demarcación lineal y construcción de afirmado. También se deberá tener en cuenta la definición de programas de mejoramiento del espacio público (Departamento Nacional de Planeación Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas, 2017).

Mediante la adopción de planes de movilidad regidos por el mantenimiento y mejora de las vías y todos sus componentes, se podrán incorporar estrategias de control de tráfico centralizado. Se trata de complejos centros de control de la administración del tráfico, con el fin de darle un manejo mucho más avanzado; es decir, espacios donde se recibe toda la información de los sistemas que ha instalado la ciudad y desde los cuales se analiza, por ejemplo, cómo se mueve determinada autopista, en qué punto hay que atender una emergencia, dónde están ubicadas las patrullas de apoyo o cuándo es necesario hacer modificaciones a la red semafórica para agilizar la movilidad (Departamento Nacional de Planeación Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas, 2017).

Renovación del parque automotor

Esto se puede lograr priorizando la incorporación de tecnologías de cero y bajas emisiones mediante la definición de programas de estímulos para el uso y la adquisición de vehículos eléctricos, así como el mantenimiento preventivo vehicular. Es decir, renovar la tecnología del parque automotor que opera con combustible diésel, eliminando los vehículos con motores de

más de quince años a través de los mecanismos de chatarrización e integración del transporte público. Esto producirá una reducción por lo menos del 50% en las emisiones de cada vehículo, o un 20% en las emisiones totales de las fuentes móviles. Deben crearse incentivos para la renovación vehicular, combinando instrumentos económicos y controles efectivos a las emisiones.

Otras medidas serían la exigencia de la revisión de sistemas de escape en la revisión técnico-mecánica y de gases para reducir la exposición y contaminación que se genera por el parque automotor y priorizar la incorporación de tecnologías de cero y bajas emisiones mediante la definición de programas de estímulos para el uso y la adquisición de vehículos eléctricos teniendo en cuenta que el modelo de ocupación actual no es sostenible en el mediano y largo plazo, así como el mantenimiento preventivo vehicular (Hunter-Henin, 2007).

Por ejemplo, en la ciudad de Medellín el pasado 08 de Abril del presente año, lanzaron el plan de renovación del parque automotor del Valle de Aburrá es una de las principales estrategias del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para reducir las emisiones de PM2.5 en la región metropolitana, pues es evidente que el sector transporte es el que más aporta a la contaminación del aire está en el sistema de carga, camiones, volquetas y algunos buses y busetas que ya cumplieron su vida útil. La línea 3 de ese Plan busca la transformación hacia un sistema de movilidad de bajas emisiones y pretende en el mediano plazo (2023) mejorar progresivamente la calidad del aire del Área Metropolitana para salvaguardar la salud pública y proteger el ambiente, así como como para elevar el bienestar social y propiciar un desarrollo metropolitano sostenible (EL TIEMPO, 2018).

Ampliación de la cobertura del transporte público

En el ámbito local la población mantiene la necesidad permanente de moverse a diferentes destinos que les permitan satisfacer sus requerimientos de educación, trabajo, ocio, salud, entre otros, no obstante, la cobertura del transporte muchas veces limita el acceso de la población a estos satisfactores que forman parte de su vida diaria. En pocas palabras, la movilidad no se distribuye de forma equitativa: hay personas que tienen más posibilidades de moverse que otras, hay quienes pueden moverse mucho más rápido y en más direcciones (D. Hernández, 2017).

La accesibilidad a bienes, servicios y oportunidades es clave para el bienestar de las personas y, por ese motivo, convierte al transporte público en una política social similar a muchas otras de mayor tradición, como la salud o la educación. Así se hace necesaria la cobertura del servicio público, para una movilidad urbana sostenible, teniendo en cuenta que el ámbito local está en una situación de transición cotidiana en base a la dinámica demanda del transporte público por parte de la población, regularmente. La eliminación de la sobreoferta y de la guerra del centavo a través de la integración de los sistemas de transporte y el recaudo unificado contribuirá a la reducción de un 20% en las emisiones de material particulado (Hunter-Henin, 2007).

Las instituciones distritales deben reducir sus emisiones a través de la implementación de producción más limpia y controles de emisiones.

Las industrias que cumplen con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) deben desarrollar mecanismos para informar e incentivar a las empresas para aprovechar los beneficios

ambientales y económicos de la aplicación de los principios de producción más limpia y los controles de emisiones atmosféricas (Hunter-Henin, 2007).

Implementación de una red de monitoreo de calidad de aire

Debe crearse una red de monitoreo de calidad de aire para la ciudad de Bucaramanga con nuevas tecnologías que permita recolectar información sobre la concentración de contaminantes de origen antropogénico y natural y el comportamiento de las variables meteorológicas que regulan la distribución de los mismos en la atmósfera y que incluyan mediciones de contaminantes que podrían resultar más impactantes (v.g. VOCs o contaminantes peligrosos, otras mediciones de material particulado) en tiempo real. En pro de la eficiencia y modernización de la infraestructura de monitoreo de los contaminantes del aire (emisión-inmisión) (Hunter-Henin, 2007).

Cicloinfraestructura

Involucra componentes técnicos, servicios e instalaciones para el desarrollo del ciclismo como actividad física. Abarca el acondicionamiento y construcción en intersecciones y franjas de circulación, señalización y semaforización, con el fin de proporcionar los espacios apropiados y también la regulación del tráfico automotor y elementos complementarios como mobiliario urbano (Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada, 2014).

Cabe resaltar que la falta de infraestructura adecuada para caminar y circular en bicicleta también contribuyen al incremento en el uso del automóvil (Héctor Jorquera González, 2018). Una red de ciclo-infraestructura sirve para fomentar el uso de la bicicleta como medio de

transporte cotidiano, ofreciendo una alternativa de movilidad dentro y entre los municipios; para que las personas circulen en bicicleta con agrado y otras se sientan atraídas a hacerlo, sin sesgo por condición física, género o edad. Esta red se ajustará a las características topográficas y contexto de la zona urbana para facilitar el uso de la bicicleta donde sea necesario y posible (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016).

2.1.4 Equipos utilizados para estudios de calidad de aire. Para este tipo de estudios existe una amplia gama de equipos que incluye tipos como por ejemplo: Monitor de partículas T640, muestreador de partículas HI-VOL, entre otros (Instrumentación, 2019). Aparte de los equipos comerciales que ya existen, en los últimos años se vienen desarrollando prototipos a nivel de academia principalmente con base en sensores de bajo costo, que permiten realizar las mediciones de concentración de material particulado. Estos sensores generalmente se diseñan y se construyen en China y pueden estar en un rango de precios entre 5 y 200 \$USD; pero comparado con el precio de un equipo comercial es mucho más económico.

El propósito de incluir las mediciones del prototipo que emplea los sensores de bajo costo en nuestro estudio era simplemente corroborar su funcionamiento comparando su desempeño en esas condiciones experimentales, es decir, usualmente son equipos que se usan fijos, mas no en movimiento, esa es la gran diferencia. Cabe resaltar que los datos que tomamos como base para el análisis de la exposición fueron los datos obtenidos por medio del DustTrack.

Para la medición personal se utilizan bombas para muestreo personales que tienen flujos entre 5 y 15 LPM por lo general. Entre las cuales, algunas de las más comunes son: Bomba SKC AirChek 3000, SKC bomba SIDEKICK, entre otras (VERTEX, 2019).

2.2 Marco Legal

Nuestro estudio se basa en la legislación vigente para Calidad de Aire (inmisión), según el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible, fundamentado en las siguientes resoluciones:

Resolución 610 del 2010

“Por la cual se modifica la Resolución 601 de 2006, donde se establece la Norma de Calidad de Aire o Nivel de Inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia”. Específicamente contiene las descripciones alusivas a la terminología respectiva, establece los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio y contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos, también se referencian los debidos procedimientos de medición de la calidad del aire, las obligaciones de las autoridades ambientales y la declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017).

Resolución 2254 del 2017

“Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”. Establece el objeto, ámbito de aplicación y niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire, niveles máximos permisibles a 2030, niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos del aire, diseño, re-diseño y operación de Sistemas de Vigilancia de la calidad del aire, monitoreo de la calidad del aire realizado por las autoridades ambientales competentes,

monitoreo en tiempo real de contaminantes del aire en puntos críticos, monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por parte de proyectos, obras o actividades, declaratoria, rangos de concentración, calculo, representatividad espacial, finalización o re-categorización y coordinación institucional para la atención de los niveles de prevención, alerta o emergencia y sus debidos rangos de concentración; también contiene las áreas fuentes de contaminación, índice de calidad del aire (ICA) y por último los debidos procesos de socialización y divulgación de resultados respectivos a la información del estado de la calidad del aire a la ciudadanía (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017).

A continuación, se muestran los niveles máximos permisibles para contaminantes criterios de interés para este estudio según la Resolución 610 de 2010 y la Resolución 2254 de 2017.

Tabla 1.

Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios de interés

Resolución	Año en el que se debe regir la norma	Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu g/m^3$)	Tiempo de exposición
Resolución 610 de 2010	2010	PM2.5	25	Anual
		PM2.5	50	24 horas
		CO	10.000	8 horas
		CO	40.000	1 hora
Resolución 2254 de 2017	2018	PM2.5	25	Anual
		PM2.5	37	24 horas
		CO	5.000	8 horas
		CO	35.000	1 hora

Fuente: Autoras

A partir del 1 de Enero del 2030 el nivel máximo permisible de PM2.5 para un tiempo de exposición anual será de 15 ($\mu g/m^3$).

Capítulo 3. Metodología

3.1 Revisión bibliográfica

Esto se llevó a cabo, a partir de una investigación documental soportada en las fuentes bibliográficas debidamente referenciadas en la lista de referencias del presente trabajo. Entre ellas las bases de datos de la Universidad Pontificia Bolivariana- Seccional Bucaramanga, específicamente *Science Direct*, la cual es una plataforma multidisciplinar muy completa, considerada como la principal fuente mundial de investigación científica, técnica y médica. Explora revistas, libros y artículos. Entre otras.

3.2 Establecimiento de estrategias de muestreo y rutas

3.2.1 Estrategias de muestreo. Se establecieron de acuerdo a los equipos disponibles (prototipo de monitoreo móvil, DustTrak y bomba personal) y también a los requerimientos de este estudio, en base al cumplimiento de los objetivos.

Este trabajo se realizó en la cicloinfraestructura propuesta para el año 2019 en la ciudad de Bucaramanga; se seleccionaron dos rutas como se muestra en la figura 1 para realizar los muestreos teniendo en cuenta que la Ruta 1 y la Ruta 2 pasan por toda la red de la cicloinfraestructura facilitando la movilidad del ciclista.

Recolección de muestras

La recolección de muestras se hizo por medio de una estación móvil que tiene dos sensores que usan técnica óptica para la clasificación y conteo del material particulado en tiempo real, simultáneamente se tiene una bomba SKC Leland Legacy que recolecta las muestras en filtros de cuarzo de 1,2 μm de poro, con un tamaño de 37mm y un flujo de 12 LPM y el DustTrak™ II AEROSOL MONITOR MODELO 8530EP para la obtención de una lectura de masa de aerosol en tiempo real. La toma de muestras se realizó 3 veces por semana, los días martes, jueves y sábado. Así mismo, los días de muestreo se dividieron en 3 franjas de 8:00 a 11:00 am, de 11:00 a 2:00 pm y de 4:00 a 7:00 pm (para cada franja se usó un filtro) con una duración de 2 semanas para cada ruta de muestreo, teniendo una duración total de 4 semanas. El nivel de exposición se mide analizando las gráficas de distribución temporal que arroja el DustTrack y el promedio de concentración de PM_{2.5} recolectado en filtro por medio de la bomba personal, que también estaba ubicada en la misma bicicleta.

Los estudios de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio de análisis de estudios ambientales (LEA) ubicado en el edificio K-614 de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Allí realizamos el análisis respectivo de las muestras colectadas, empleando la presente metodología descrita.

Toma de variables meteorológicas

Se recolectó la información meteorológica respectiva a los periodos de muestreo, la cual fue suministrada por la CDMB a partir de la estación más cercana a las rutas de muestreo, ubicada en

la Ciudadela Real de Minas con el fin de tener conocimiento de datos de: temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad, intensidad de lluvia y presión.

Descripción de los equipos de medición

Prototipo de monitoreo móvil de medición de concentración de PM2.5 en tiempo real durante el tiempo de recorrido.

En el caso de la medición de material particulado, se optó por usar un prototipo de monitoreo móvil que consta de dos sensores de fabricantes diferentes para realizar una medición redundante y así aumentar la precisión de la misma. Los sensores fueron elegidos siguiendo las recomendaciones de la comunidad científica. Estos sensores son: el OPC N2 fabricante Alphasense air (Alphasense air sensors for air quality networks, 2013) y el PMS1003 de plantower (plantower, 2015). Ambos sensores usan técnica óptica para clasificación y conteo del material particulado. Siguiendo los requerimientos para la estación, se agregó un sensor para medición de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. Se seleccionó el sensor BME280 del fabricante BOSCH Sensortech (Adafruit Industries, 2006) por sus características superiores e integración de la medición de las tres variables en un solo chip. Para cumplir con la característica de estación modular se seleccionó el módulo de Adafruit Industries que contiene este sensor (Dominguez, R.; Barrero, 2018).

Equipo móvil de medición de PM2.5 en tiempo real durante el tiempo de recorrido.

El equipo móvil que empleamos fue el DustTrak™ II AEROSOL MONITOR MODELO 8530EP, el cual es un fotómetro laser de dispersión de luz en tiempo real, que mide simultáneamente concentraciones de fracciones de masa segregadas por el tamaño

correspondiente a fracciones PM_{2.5}. Además de las lecturas de masa de aerosoles en tiempo real, este equipo también mide los contaminantes que se derivan del mismo, tales como el polvo, el humo, los gases o los vapores (TSI Understanding, 2013). Este equipo actualmente tiene un certificado de calibración del fabricante que todavía está vigente.

Es importante destacar que fue necesario equipar la bicicleta de forma adecuada para hacer el muestreo en tiempo real durante el recorrido del biciusuario en las rutas seleccionadas para la recolección de las muestras.

Medición de exposición personal a PM_{2.5}

Por medio de la bomba SKC Leland Legacy se realizó una recolección de muestra en filtros de fibra de cuarzo de 1,2 µm de poro y un tamaño de 37 mm; con un flujo de 5 a 15 LPM, durante un periodo de tiempo de 3 horas por franja, en términos de longitud de la ruta, vías cercanas, ritmo de pedaleo, cantidad de muestra recogida, entre otros. Para la calibración de la bomba contamos con el apoyo del Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT) de gases, ubicado en el Parque Tecnológico UIS Guatiguará, en donde se midieron los flujos con un equipo certificado para garantizar que las condiciones del flujo a las cuales fueron tomadas las muestras fueran las esperadas.

Este equipo portátil estuvo ubicado cerca de las vías respiratorias del biciusuario con el fin de recolectar el volumen de aire aspirado por la bomba durante el periodo de muestreo.

Posición geográfica de la muestra móvil en GPS durante el tiempo de recorrido.

Durante los recorridos respectivos al muestreo, se dispuso de una aplicación móvil GPS con el fin de tener datos de posicionamiento en tiempo real.

3.2.2 Selección de las rutas. Para seleccionar las rutas respectivas al muestreo se tuvo en cuenta la red de cicloinfraestructura propuesta a 2019 como parte del convenio de cooperación internacional entre ONU-Hábitat, el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) y la Alcaldía de Bucaramanga quienes presentaron los diseños definitivos que se desarrollaran en la “Estrategia 2019-2030 para Bucaramanga y su Área Metropolitana, La bicicleta como medio de transporte”.

Destacando la importancia de algunas características tales como: la integración de esta nueva red con la cicloinfraestructura existente, se ubica en la meseta de Bucaramanga, debido a que es la zona de mayor actividad, demanda, y no tiene mayores pendientes topográficas, las rutas propuestas conectan con los destinos de mayor importancia en la ciudad garantizando su uso permanente, destinos educativos como la UIS y la Calle de los Estudiantes, destinos comerciales como el Centro y Cabecera del Llano y algunas zonas residenciales en Real de Minas y San Francisco, (ver Figura 1) con el objetivo de determinar los niveles de exposición allí presentes.

También, cabe resaltar que para garantizar un muestreo óptimo, es decir, para que sea significativo es indispensable recolectar una cantidad suficiente de muestra de PM_{2.5} en los filtros.

3.3 Evaluación de los niveles de exposición a PM2.5 en los recorridos

3.3.1 Análisis espacial y temporal de los equipos móviles en tiempo real durante el recorrido. El análisis espacial usualmente se refiere a la influencia de fenómenos meteorológicos, accidentes (paro de camioneros, incendios, etc.) en un solo lugar. Según los resultados, se pudo analizar como varia la concentración de PM2.5 con respecto a la ubicación exacta de cada punto a través de las rutas escogidas para hacer el recorrido. Por medio de este análisis se buscó evaluar el impacto de diferentes fuentes, teniendo en cuenta que cada ruta de muestreo puede ser afectada por estas, se realizó el respectivo análisis espacial.

Para el análisis temporal nos basamos en la influencia de la ubicación con respecto a la concentración. Es decir, de las diferentes fuentes que afectan cada localización en la cual se recolecta el PM; determinando como cambian los niveles de exposición registrados en los equipos móviles con respecto al tiempo (hora del día). Y por consiguiente los efectos de variables meteorológicas, actividades diarias (horas pico, fluidez del tráfico vehicular) entre otras.

3.3.2 Comparación entre los equipos móviles en tiempo real. En el estudio se compararon las distribuciones espaciales y temporales para ambas rutas obtenidas por ambos equipos, tomando como valor base el obtenido por el DustTrak. Esto se realizó mediante gráficas de distribución espacial y temporal durante cada periodo de muestreo.

3.4 Determinación del contenido de carbono negro (BC) en la muestra de PM2.5 colectada durante el recorrido.

3.4.1 Concentración total de PM2.5 en filtro (Uno por recorrido). Para obtener el total de PM2.5 se llevaron al laboratorio cada uno de los filtros empleados durante el periodo experimental en las rutas de interés donde se realizó el respectivo análisis, para determinar la concentración en las muestras.

Determinación de concentración en masa de PM2.5

Para la determinación de la concentración total de PM 2.5 en las muestras se usaron filtros de fibra de cuarzo de 1,2 µm de poro, por medio del método gravimétrico. Previamente se pusieron dentro de un desecador durante un tiempo mínimo de 24h. Posteriormente se retiraron los filtros en recipientes cerrados; una vez realizado el muestreo, por último se llevaron al laboratorio para pesarlos nuevamente y realizar el respectivo análisis, para el cual se emplearon las siguientes fórmulas:

$$\frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Volumen total de la muestra}}$$

Ecuación 1. Ecuación de Gravimetría

$$\frac{V_1 * P_1}{T_1} = \frac{V_2 * P_2}{T_2}$$

Ecuación 2. Ley combinada de los gases.

Teniendo en cuenta que el volumen total de la muestra se debía conseguir a condiciones estándar 1 atmosfera y 25°C.

Concentración total de BC (Uno por filtro)

Se tomó una muestra de BC por cada filtro y se realizó el respectivo análisis en el laboratorio para determinar la concentración total de BC en cada una respectivamente.

3.4.2 Determinación de Black Carbon (BC). Para la evaluación del material particulado Black Carbon se utilizó un instrumento llamado Analizador Transmisómetro óptico, que contiene una fuente de luz de 2 longitudes de onda; 880 nm, que proporciona la medición cuantitativa de BC y 370nm para la evaluación cualitativa de ciertos compuestos orgánicos aromáticos. Este enfoque de longitud de onda proporcionó información adicional para la determinación de la distribución de las potenciales fuentes de BC.

El instrumento acepta directamente filtros de 25, 37 y 47 mm de diámetro, fabricados en teflón, fibra de cuarzo, fibra de vidrio y fibra de vidrio revestido con teflón. El equipo arroja una unidad de atenuación la cual convertimos a unidad de concentración por medio de la siguiente fórmula:

$$BC \left(\frac{mg}{m^3} \right) = \frac{\left(\frac{IR}{16,6} * \frac{\pi * 37mm^2}{39.5} \right)}{volumen\ del\ muestro\ (m^3)}$$

Ecuación 3. Cálculo de BC en unidades de concentración

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1 Distribuciones temporales de la concentración de PM2.5 para cada ruta en las diferentes franjas de muestreo.

Ruta 1

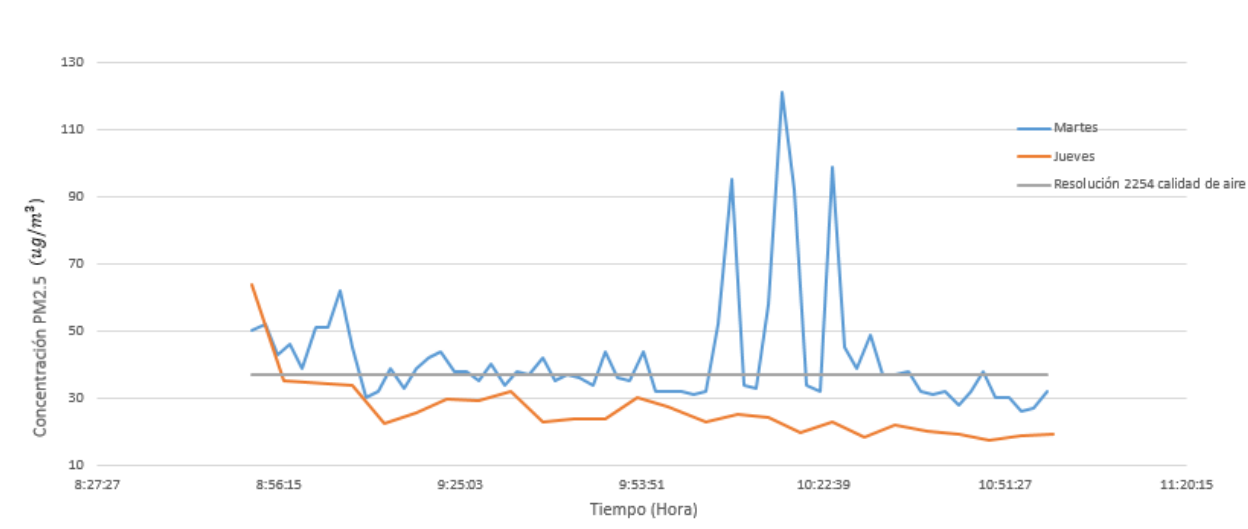


Figura 2. Concentración de PM2.5 vs. Tiempo Real, Jornada de la mañana. Fuente: Autoras

En la figura 2 se puede evidenciar que el día martes las concentraciones de PM2.5 en promedio se dieron de la siguiente manera: a las 09:06a.m se presentó el primer incremento de la concentración con un valor de $62\mu\text{g}/\text{m}^3$ en cercanías de la Cra 22-Calle 15, pero a partir de las 09:08a.m decreció de forma inconsistente hasta las 10:04a.m donde aumentó de nuevo entre 10:00a.m-10:30a.m y se reflejó el punto máximo de concentración de la franja de la mañana a las 10:16a.m con un valor de $121\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el radio comprendido entre la Cra 21-Calle 28 y la Cra 21-Calle 31 aproximadamente. Es posible, que esto se deba a que a estas horas hubo mayor

flujo vehicular en estos puntos a causa de la proximidad con la hora pico y también al tránsito de vehículos tipo diésel en esta zona.

Por otra parte el día jueves inicio con su punto máximo a las 8:52a.m con una concentración de $64\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la Cra 21-Calle 17, es decir, se acerca tanto al punto como a la hora en la que fue registrado el día martes, el cual se presentó en la zona del Boulevard Santander, este máximo se puede considerar como un punto que se debe evitar a la hora de transitar en bicicleta durante la jornada de la mañana. A simple vista se observa que entre los días martes y jueves el día que presenta una mayor concentración de material particulado es el día martes, ya que tomando como referencia los niveles descritos en la normativa vigente el comportamiento de las concentraciones estuvo por encima de lo establecido durante el tiempo de muestreo a diferencia del día jueves que se mantuvo por debajo.

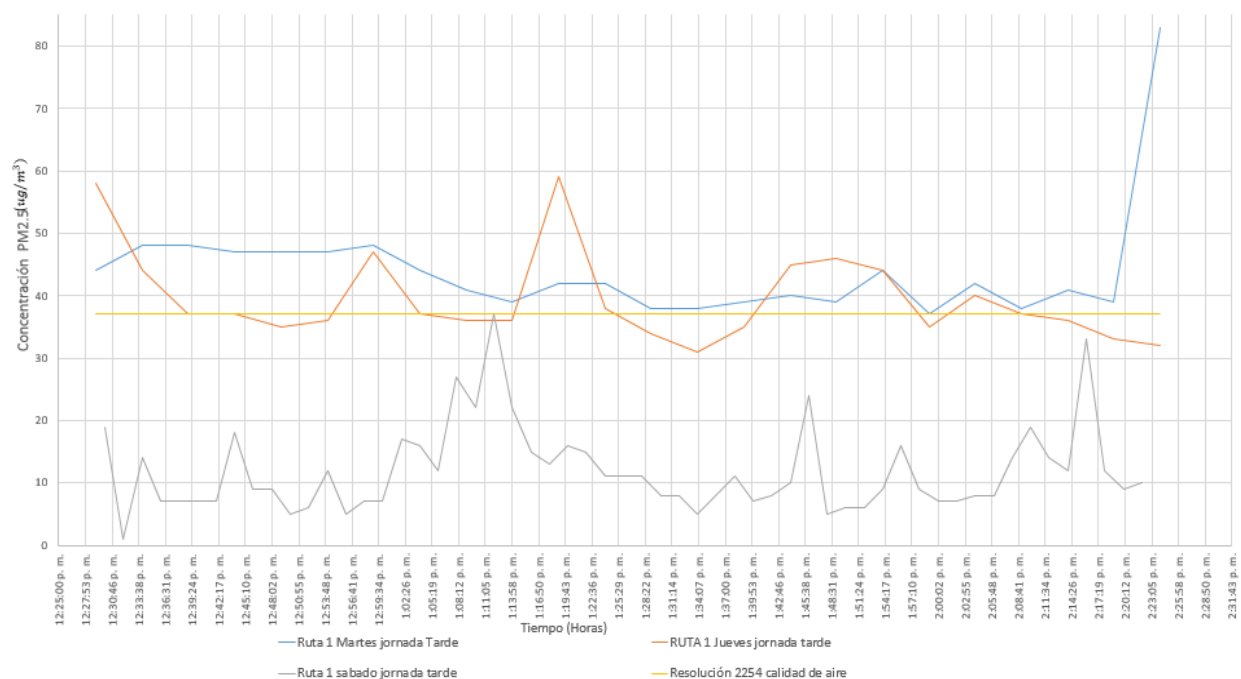


Figura 3. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde Fuente: Autoras

Podemos observar que el día martes el mayor punto de concentración se presentó a las 02:24p.m y fue de $83\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la Cra 21-Boulevard Santander, esto puede atribuirse a la presencia de factores externos como actividades antropogénicas inicialmente de 12:34p.m a 12:59p.m arrojó niveles de concentración entre $47\text{-}48\mu\text{g}/\text{m}^3$ en aproximación a la Cra 21-Calle 31 y posteriormente desde la 01:14p.m hasta las 02:19p.m los niveles de concentración se mantuvieron entre 37 y $44\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una hora aproximadamente en el punto de la Cra 21-Calle 36.

El día jueves presentó cuatro picos altos, de los cuales dos predominaron, uno al inicio del muestreo de $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:29p.m en la Cra 21-Calle 16 y el otro más adelante, a la 01:19p.m con un valor de $59\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la Cra 21-Calle 17 en cercanías del Bulevar Santander, es decir, en el mismo punto y los otros dos, uno de $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el otro de $46\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:59p.m y a la 01:49p.m respectivamente ubicados en la Cra 21-Calle 31.

Por último el día sábado reflejó que el punto máximo se tomó a la 01:12p.m registrando una ubicación en la Cra 21-Calle 36 con una concentración de $37\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se puede evidenciar que en este día no se exceden los límites permisibles según la resolución 2254 de calidad de aire, a diferencia de los días martes y jueves donde sobresalen altos niveles de concentración para la jornada de la tarde. Específicamente, el martes es el día más crítico ya que a diferencia del jueves que tiene algunos puntos más altos, en el día martes se presentan valores demasiado elevados durante la toda ruta, es decir, es el día de mayor exposición para el ciclista durante la franja de la tarde.

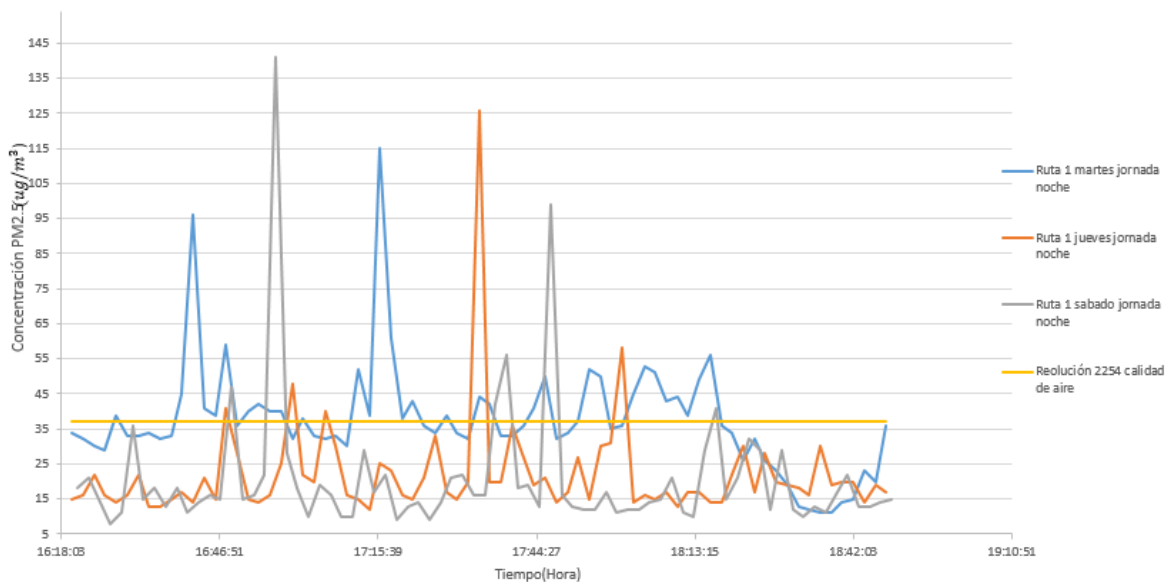


Figura 4. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche. Fuente: Autoras

En la figura 4 se observa que el día martes las concentraciones presentaron tendencias cercanas a sobrepasar la norma durante todo el tiempo de muestreo, los picos máximos de la franja fueron de 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:42p.m y de 115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:16p.m entre la Cra 21-Calle 27 y la Cra 21-Calle 31 respectivamente. A diferencia del día jueves que en promedio no registró valores tan cercanos a la norma durante todo el recorrido pero si se evidenciaron máximos significativos con el pico más alto de 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:34p.m en la Cra 21-Calle 36.

Finalmente el día sábado reflejó que durante todo el tiempo de recorrido las concentraciones se encontraron en un rango de 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo valores menores en comparación con los demás días, pero en esta franja el sábado registró el pico máximo de la ruta, a las 04:57p.m con un valor de 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el mismo punto de la Cra 21-Boulevard Santander. Siendo el día de mayor exposición para el biciusuario durante la franja nocturna.

Con base en lo anterior, al comparar las 3 franjas podemos concluir que en la Ruta 1 la franja más crítica fue la de la noche, debido a las altas concentraciones que presentó; esto se refleja porque durante los tres días se registraron más puntos que superan la norma a diferencia de la jornada de la tarde que en los días martes y jueves presentaron puntos altos de concentración pero el día sábado los valores registrados no sobrepasaron la norma. Lo cual se puede atribuir a que se presenta un alto flujo vehicular debido a las jornadas laborales. Y en la franja de la mañana se evidenció que el día jueves durante el tiempo de recorrido estuvo por debajo de la norma. Así mismo podemos notar que los puntos que presentan los máximos niveles de concentración registrados reincidenten con respecto a la ubicación para las 3 franjas.

Ruta 2

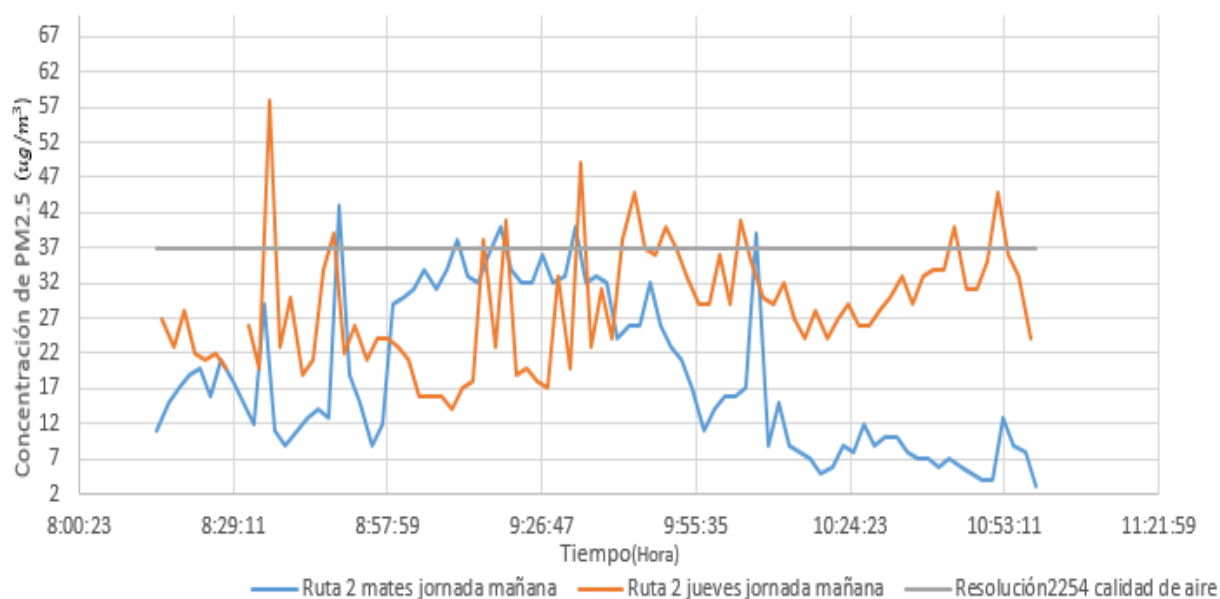


Figura 5. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la mañana. Fuente: Autoras

En la figura 5 se puede observar que el día martes presenta puntos donde hay un aumento en la concentración, el pico más alto es de $43\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se presenta a las 08:49a.m sobre la Cra 29-Calle 30. Así mismo, el día jueves refleja valores más elevados que el martes, reportando un pico de $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:36a.m en el sector de la Cra 27- Calle 30, pero en general las concentraciones se encontraron en un rango de $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $37\mu\text{g}/\text{m}^3$ estando estos valores por debajo de la normativa colombiana de calidad de aire que se toma como referencia.

Esto se puede atribuir al horario en el cual se desarrolló este muestreo y las variables locales en la zona de estudio, principalmente las actividades antropogénicas que pueden llegar a influenciar directamente tanto la distribución como la formación de partículas. Por lo tanto, podemos decir que el día jueves registró el pico más alto de concentración de PM_{2.5} con un valor de $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:36a.m durante la franja de la mañana, es decir, es el día de mayor exposición para el biciusuario durante este tramo de la cicloinfraestructura.

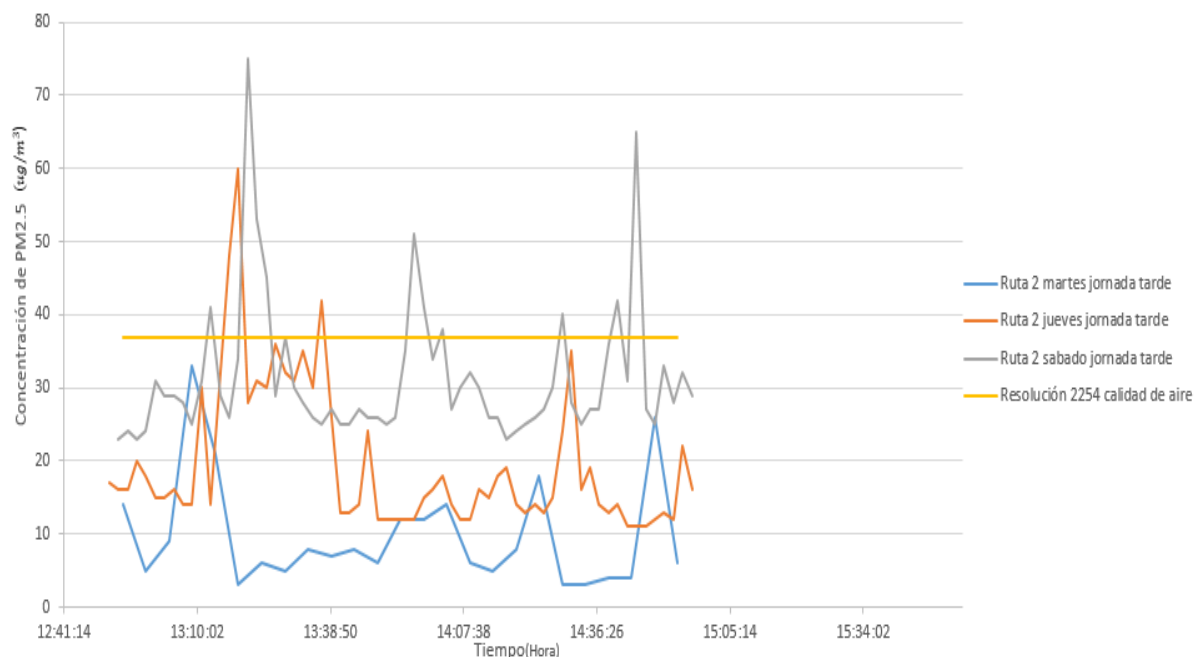


Figura 6. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde. Fuente: Autoras

Según la figura 6 el día martes presentó niveles de concentración por debajo de la norma de referencia durante todo el tiempo de muestreo, siendo el pico más alto a la 01:09p.m con una concentración de $33\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la Cra 29-Calle 30. Así mismo, el día jueves presento la misma tendencia, pero se alcanzaron dos puntos elevados que sobrepasaron el rango establecido, con valores de $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42\mu\text{g}/\text{m}^3$ a la 01:19p.m en aproximación a la Cra 29-Calle 30 también y a las 02:31p.m cerca de la Cra 31- Calle 33 respectivamente.

El sábado fue el día que reflejó mayor tendencia a sobrepasar la norma, esto se pudo notar ya que los picos en este día predominaron con valores de $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ a la 01:21p.m en la Cra 31-Calle 32, $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ a la 01:57p.m en la Cra 31-Calle 35 y $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 02:45p.m en la Calle 41- Av la Rosita. Teniendo en cuenta el cambio de horario del pico y placa para este día en específico.

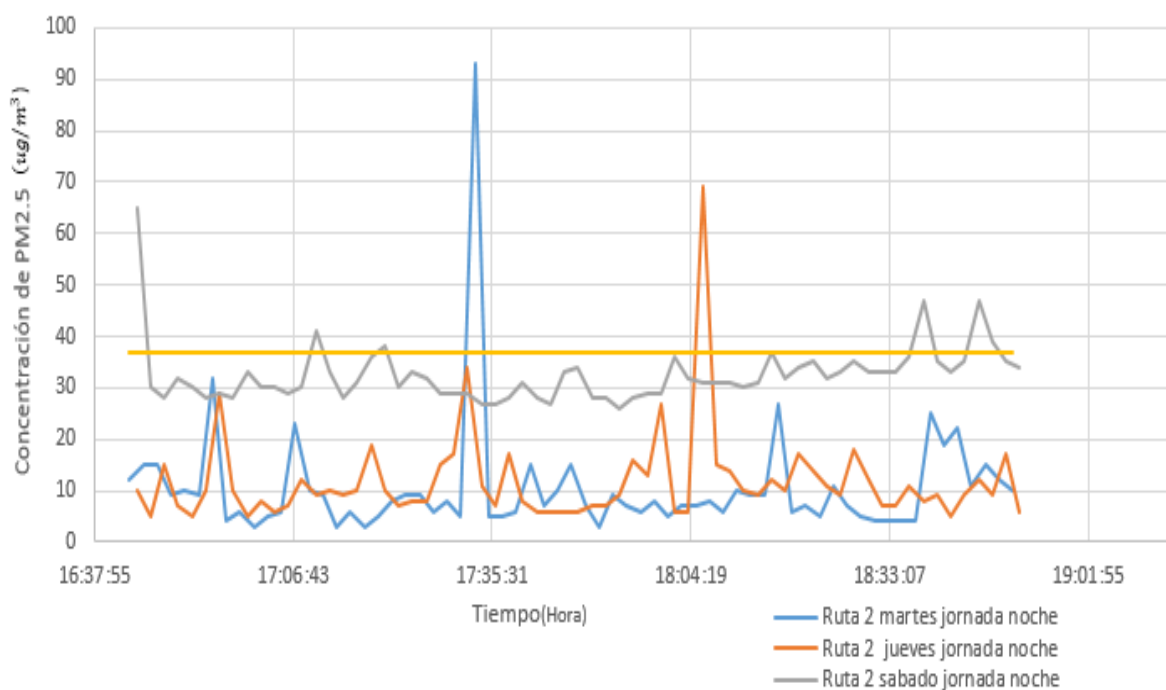


Figura 7. Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche. Fuente: Autoras

La figura 7 evidencia que el pico máximo de toda la franja se registró el día martes con un valor de $93\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:33p.m en el sector de la Cra 30- Calle 36, siendo el único punto tan alto, ya que el resto de concentraciones de ese día se mantienen muy por debajo de los valores establecidos en la norma que tomamos como base durante todo el muestreo. El día jueves tuvo un comportamiento similar al martes, pero en este caso el único máximo registrado fue de $69\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 06:06p.m en la Cra 23- Av la Rosita; muy posiblemente esto se deba a la hora pico, que transcurre entre el mismo lapso que se registraron los niveles más altos de concentración de PM2.5 en esta franja.

El día sábado fue el día en el cual se alcanzaron valores que se mantuvieron más cercanos a la normativa de referencia durante toda la franja. Ubicando el punto más elevado al inicio del

muestreo, exactamente a las 04:44p.m con un valor de $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ cerca de la Cra 23- Calle 40 y otros dos picos importantes en la última hora de muestreo, ambos de $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 06:38p.m en la Cra 26- Calle 48 y a las 06:46p.m en la Cra 27-Calle 45 respectivamente. En toda la Ruta 2, el sábado fue el día en el que se registraron los niveles de material particulado PM2.5 con mayor predominancia, tanto en la franja de la tarde como en la de la noche en base a la norma empleada.

Durante el tiempo de muestreo respectivo a la Ruta 2 podemos determinar que la franja de la noche fue la que presentó los valores más elevados en aproximación con la resolución 2254 de calidad de aire. Esto quiere decir que en el horario que cubre la franja nocturna el ciclista está más expuesto, ya que se registran los niveles de concentración de PM2.5 más críticos del día tanto en la Ruta 1 como en la Ruta 2, esto evidencia que en la noche hay un mayor aporte de fuentes generadoras. Por lo tanto, se destaca el hecho de que a estas horas culminan las jornadas laborales en horario de oficina, por ende la hora pico y el levantamiento de la restricción del pico y placa incide en los resultados obtenidos.

Es probable que el punto crítico en cada gráfica se deba a la cercanía del ciclista a la fuente generadora teniendo en cuenta que el muestreo fue de tipo móvil. También es importante destacar que entre días hubo similitud en cuanto a los puntos de altas concentraciones y la ubicación en GPS de los mismos para cada ruta en específico.

Por último, comparando la Ruta1 con la Ruta 2 en términos de niveles máximos de exposición para el ciclista a través del recorrido según la normativa descrita por la OMS y la norma

colombiana de referencia, la Ruta 1 registró mucho más valores de puntos críticos durante todo el muestreo.

4.2 Correlación de la concentración de PM2.5 con las variables meteorológicas

Para los periodos de tiempo analizados no se observó correlación entre las variables meteorológicas (Temperatura ambiente vs Concentración y Humedad vs Concentración) como se evidencia en las figuras 8 y 9 mostradas a continuación.

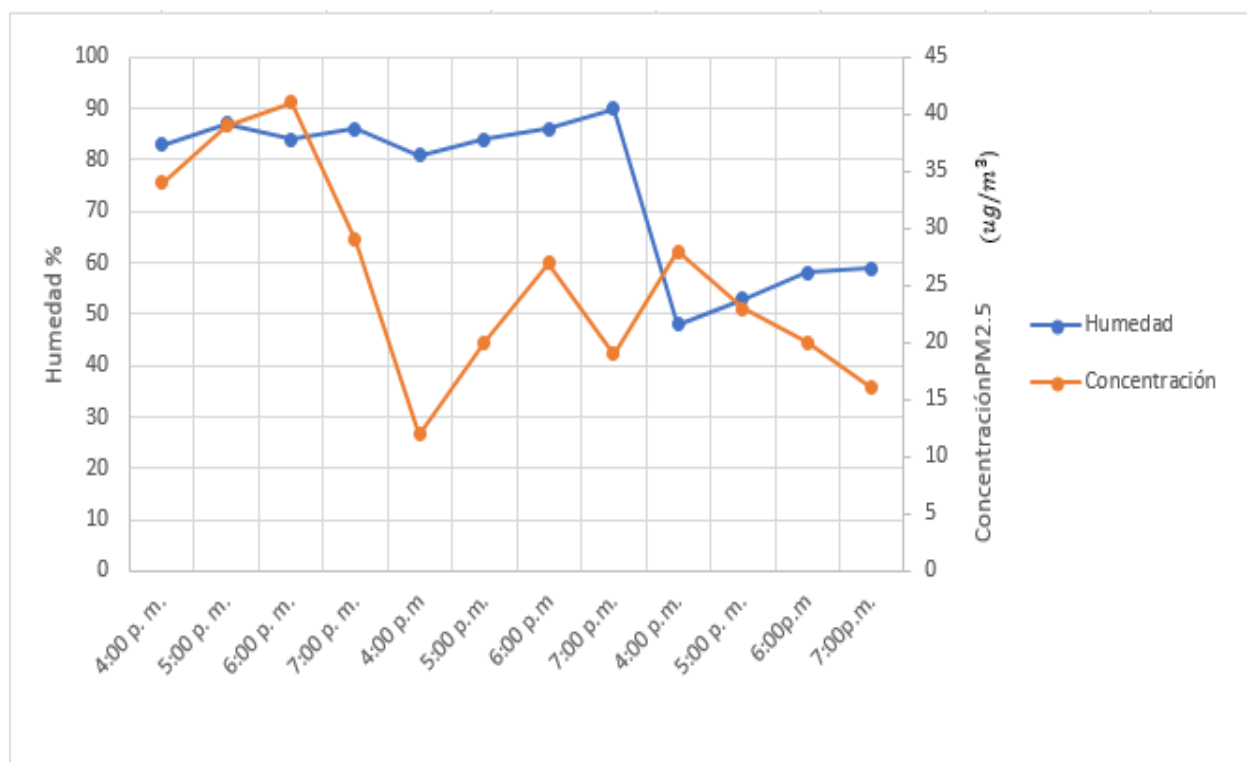


Figura 8. Humedad vs Concentración de PM2.5 vs, Jornada de la noche. Fuente: Autoras

Según la figura 8 podemos observar que a mayor humedad la concentración es mayor, es decir, son directamente proporcionales. A pesar de que la concentración de material particulado fino

puede verse afectado por algunas variables meteorológicas en este estudio no se evidenció debido a que los periodos de muestreo son muy cortos y los cambios en las variables respectivas no fueron significativos.

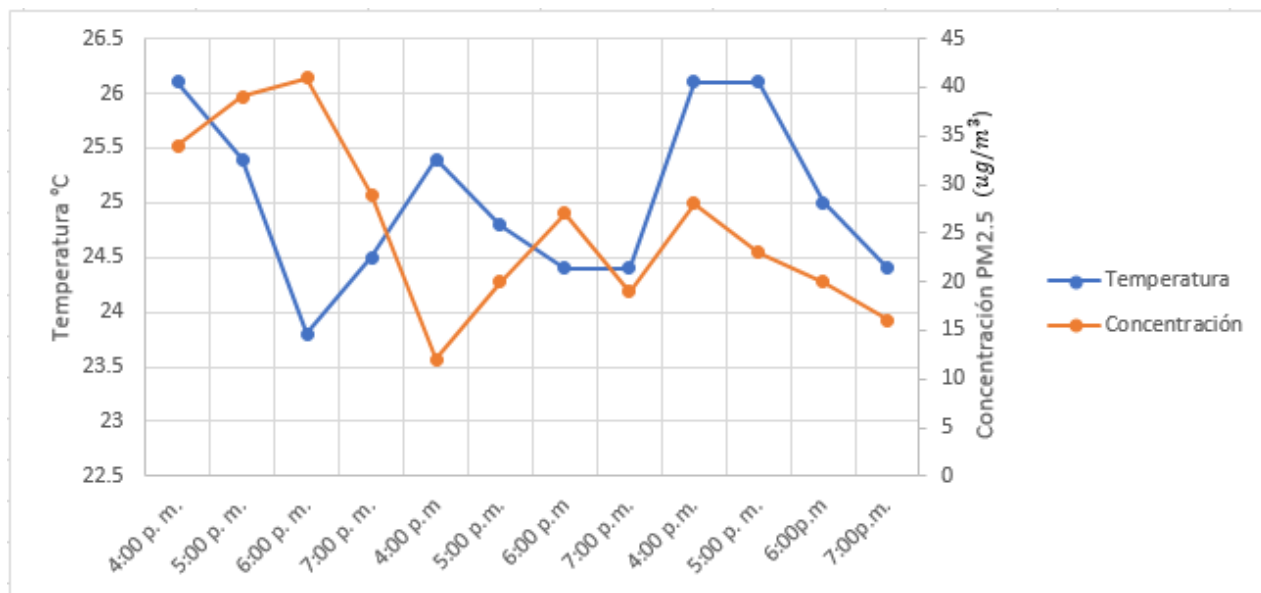


Figura 9. Temperatura vs Concentración de PM2.5 vs, Jornada de la noche. Fuente: Autoras

En la figura 9 se observa que no hay una relación inversamente proporcional clara, tal como se espera, debido a que la variación de la temperatura no es significativa, para conocer esta correlación se requieren tiempos de muestreo más extensos.

El material particulado fino tiene un alto contenido de líquido, es decir, sustancias que se han condensado y forman gotas que se consideran partículas; si la temperatura es muy alta, varias de estas sustancias no van a condensar, se van a mantener gaseosas, esto influye en el comportamiento de la concentración, ya que si la temperatura baja es probable que a menor temperatura haya más material particulado. Con las variaciones de temperatura de Bucaramanga

no hay ninguna correlación entre temperatura y PM2.5 porque no varía mucho. (Entre 22-27 °C en promedio) como se mencionó anteriormente.

Con esto se concluye que para poder establecer una correlación que se evidencie claramente entre estas dos variables y la concentración de PM2.5 se requieren tiempos de muestreo mayores para ver una variación más significativa en las condiciones climáticas; ya que pueden verse influenciadas por agentes externos como el transporte regional (el material partícula viene de otro lado) o puede ser que se presente el fenómeno de inversión térmica entre otros, siendo estos fenómenos impredecibles.

4.3 Correlación entre equipos

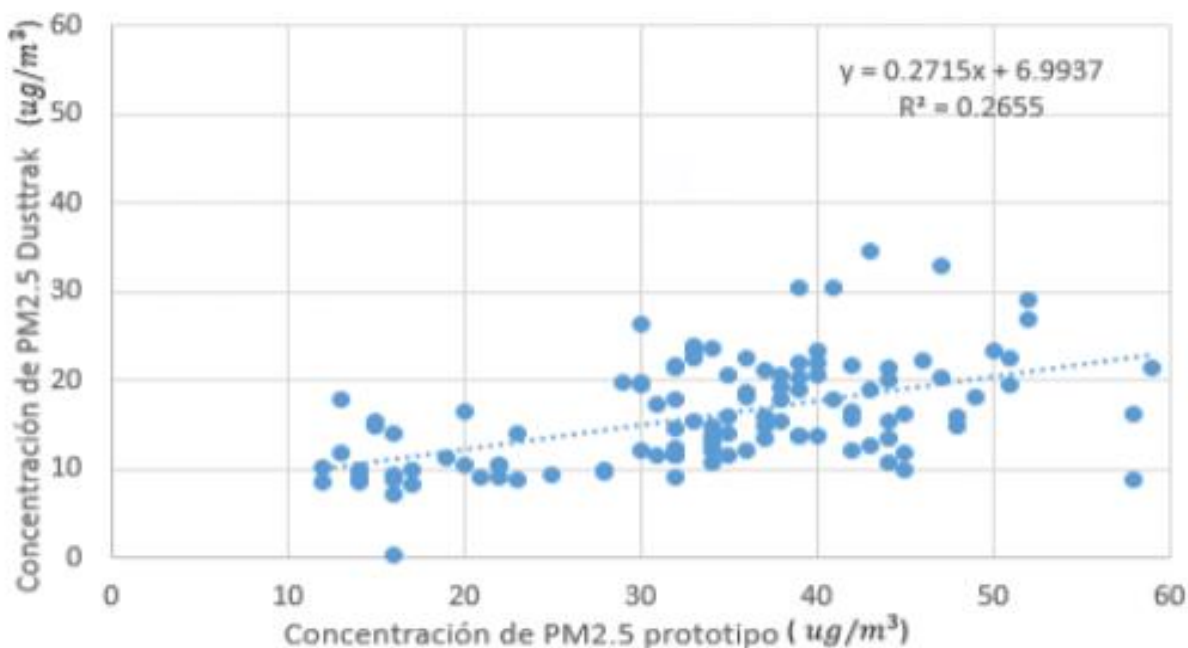


Figura 10. Regresión lineal de PM2.5 DustTrak vs prototipo en Tiempo real. Fuente: Autoras

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables. En esta figura se presentan los datos de concentración registrados por los equipos de medición de material particulado en tiempo real. Al aplicar el análisis de regresión lineal el R^2 es 0.2812 y la ecuación es $y=7607x-8.3353$, como R^2 no se acerca a 1 se concluye que no hay una buena correlación entre los equipos de medición de PM 2.5 (el equipo comercial (DustTrack) y el prototipo de monitoreo móvil (que contiene sensores de bajo costo)). Esto sucede probablemente porque en algunos momentos se presentaron anomalías y registraron errores o la diferencia en los tiempos de respuesta que pudieron variar entre ambos equipos.

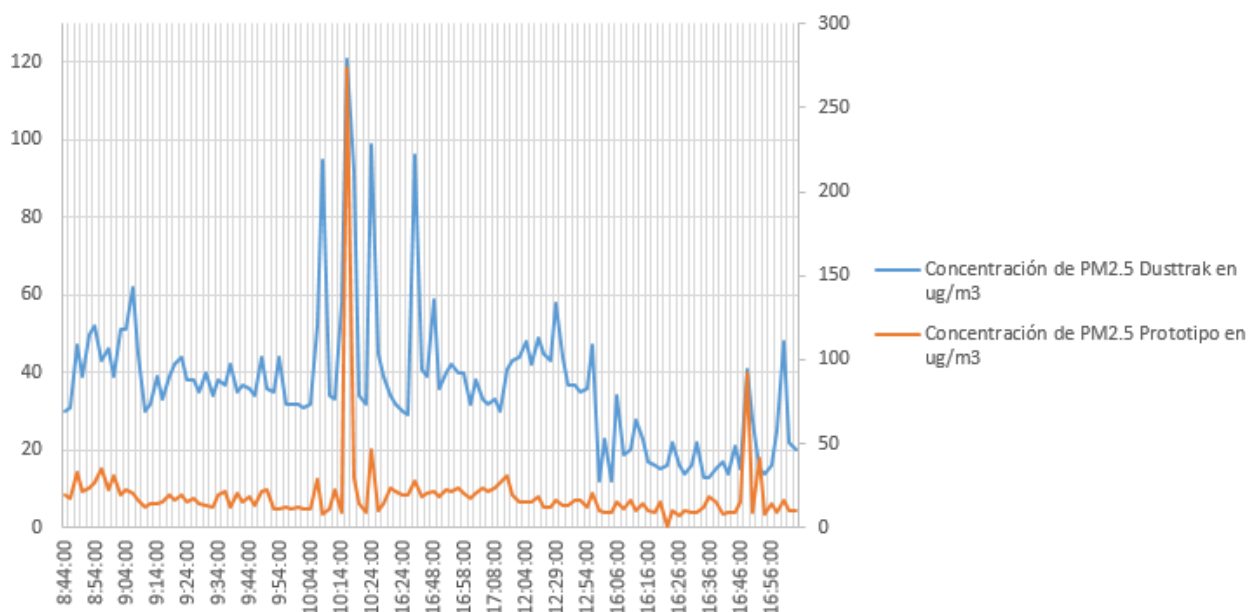


Figura 11. Concentración de PM2.5 DustTrak vs prototipo en Tiempo real. Fuente: Autoras

En la figura 11 se observa que la tendencia en el comportamiento temporal de las concentraciones en cada equipo (DustTrak y prototipo) es similar para los picos que se presentaron a las 10:16 a.m. y las 16:48 p.m., pero también se muestra que probablemente hay un

error consistente en la medición de las concentraciones para el caso del prototipo, ya que se ve claramente una diferencia de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aproximadamente.

4.4 Determinación de concentración en masa de PM_{2.5}

4.4.1 Selección del mejor medio de recolección de partículas. Teniendo en cuenta que para poder colectar suficiente muestra en los filtros se necesitaba un flujo de 12 LPM y un recorrido continuo y repetitivo en la bicicleta de 3 horas. Se probaron 3 tipos de filtro en las pruebas piloto para saber cuál era el que mantenía esta condición. Inicialmente se probaron filtros de membrana de teflón de $1,2 \mu\text{m}$ de poro con un flujo de 8 LPM pero estos se rompían, los de teflón PTFE de $2 \mu\text{m}$ de poro no dejaban pasar el flujo de aire, presentaban una caída de presión demasiado grande, es decir, obstruían el flujo y por último los de cuarzo fueron los únicos que sirvieron ya que, estos no presentaron los problemas mencionados anteriormente y trabajaban con las condiciones requeridas.

El análisis gravimétrico no se pudo realizar debido a que posteriormente los filtros mostraron que pueden ser higroscópicos, es decir, absorben humedad, a pesar de que al final de cada muestreo se dejaron en el desecador por un mínimo de 24h. Lo que se evidenció por medio de la variabilidad de las masas medidas en el salón de pesaje del laboratorio, el cual presenta variaciones en la humedad, debido a condiciones no ideales como una fuga que hay en el techo y la remoción de los filtros del aire acondicionado, por esta razón la concentración total de PM_{2.5} utilizada para el análisis se tomó como el valor promedio registrado por el DustTrak.

4.5 Concentraciones de BC para cada ruta en las diferentes franjas de muestreo.

Tabla 2.

Determinación de la concentración de PM2.5 y BC

ID Filtro	Concentración PM2.5 (µg/m3)	BC (µg/m3)	UV (µg/m3)	BC/PM2.5	UV/PM2.5
1	38	3.3745	2.3430	8.8803%	6.1659%
2	43	2.9534	2.1137	6.8684%	4.9156%
3	35	2.0012	1.5357	5.7176%	4.3878%
4	56	2.8088	2.0079	5.0158%	3.5856%
5	41	2.0783	1.5377	5.0691%	3.7506%
6	21	1.5670	1.1464	7.4620%	5.4589%
7	11	1.6935	1.3726	15.3958%	12.4781%
8	20	3.0769	2.3380	15.3847%	11.6901%
9	18	2.1729	1.6681	12.0718%	9.2670%
10	11	2.7224	1.9961	24.7492%	18.1463%
11	9	1.9749	1.5013	21.9437%	16.6808%
12	32	2.9835	2.1098	9.3236%	6.5932%
13	19	1.7273	1.3308	9.0909%	7.0042%
14	9	2.1402	1.6387	23.7797%	18.2073%
15	30	2.3333	1.7377	7.7776%	5.7924%
16	33	1.4334	1.1925	4.3436%	3.6136%

Fuente: Autoras

Las concentraciones de BC se midieron directamente de los filtros, utilizando el equipo SootScan™ Model OT21 Optical Transmissometer ©by Magee Scientific. A continuación se presenta el análisis de BC el cual se realizó por cada ruta, es decir, para la Ruta 1 y Ruta 2, dentro de las cuales se emplearon 8 filtros por ruta, 16 en total (como se explica en la metodología, estrategias de muestreo, referirse a la pág. 30).

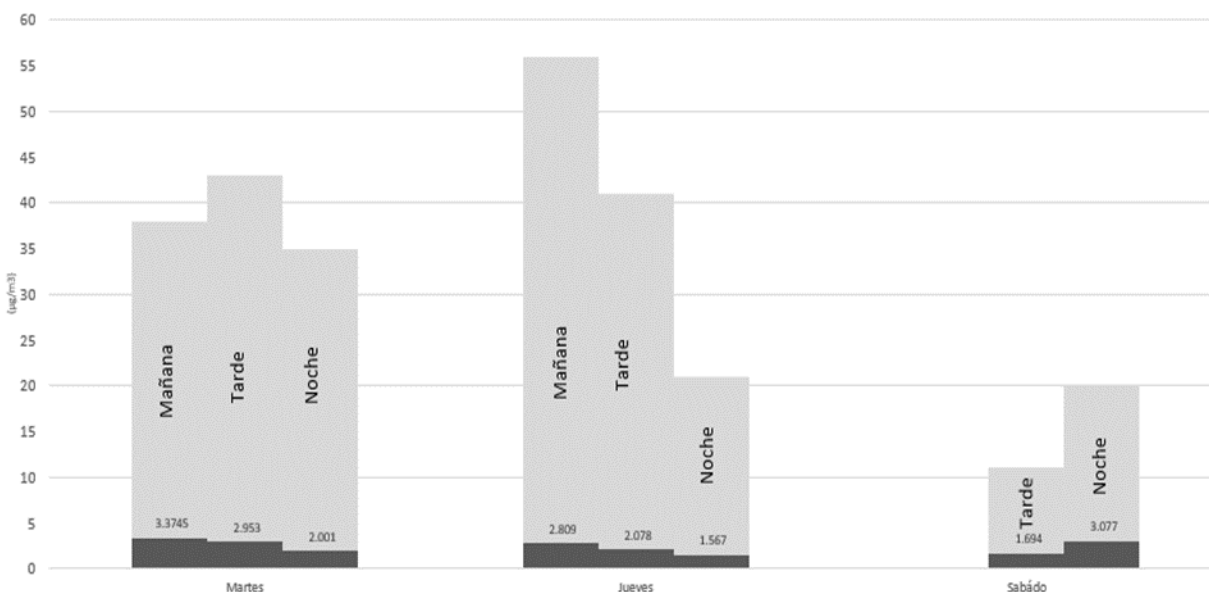


Figura 12. Concentración de BC vs día de muestreo y franja del día, Ruta 1. Fuente: Autoras

En la figura 12 podemos observar el contenido de BC en cada barra, para cada día. Para el día martes el filtro de la jornada de la mañana presentó un alto contenido de BC que correspondió al 8.88%, que en microgramo equivale a $3.37\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentración de PM2.5 en esa muestra. Así mismo para el día jueves el filtro de la jornada de la mañana presentó un alto contenido de BC que correspondió al 5.01% representando el $2.80\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentración de PM2.5 en la muestra y para el día sábado el filtro que registró el mayor contenido de BC fue el usado en la jornada de la noche que correspondió al 15.3% representando el $3,07\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentración de PM2.5 en la muestra.

Por lo anterior podemos deducir que para la Ruta 1 el filtro del día martes en la jornada de la mañana fue el que presentó un valor alto de concentración ($3.37\mu\text{g}/\text{m}^3$) de BC, según este valor se infiere que en esta jornada es mayor el tránsito de vehículos pesados y sistemas de transporte masivo como buses y busetas siendo los principales posibles generadores de BC allí presentes.

Teniendo en cuenta que si el BC refleja valores altos, esto se atribuye a la combustión de vehículos tipo diésel haciendo un aporte importante a la concentración de PM_{2.5} de esta zona.

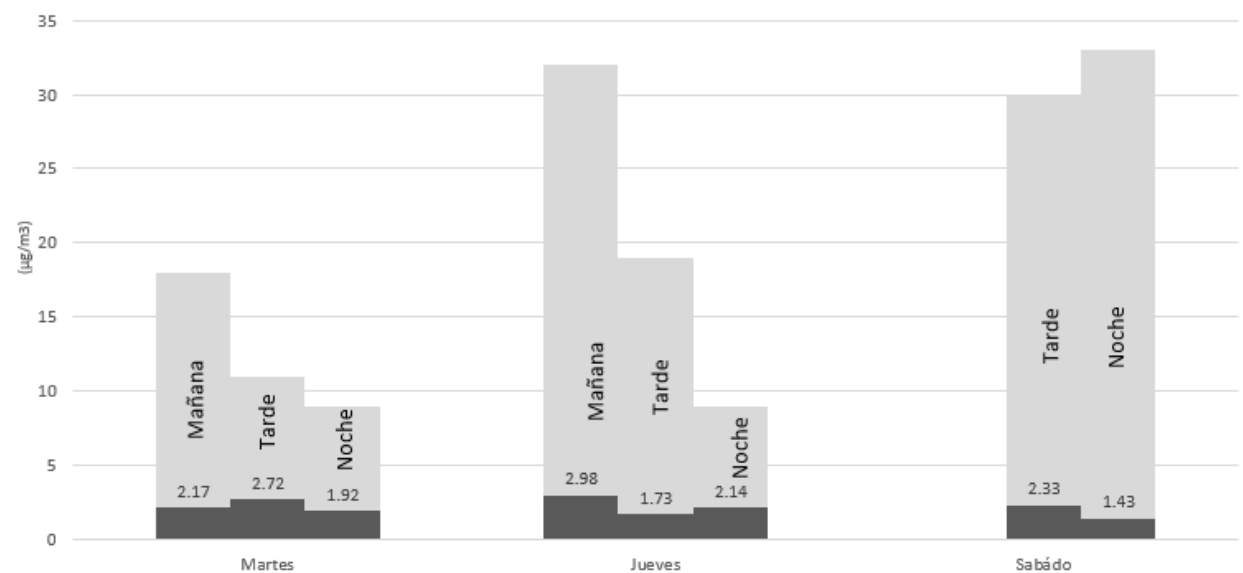


Figura 13. Concentración de BC vs día de muestreo y franja del día, Ruta 2. Fuente: Autoras

En la figura 13 podemos observar el contenido de BC en cada barra, para cada día. El día martes el filtro de la jornada de la tarde arrojó un alto contenido de BC que representa el 24.7%, equivalente al 2.72µg/m³ de la concentración de PM_{2.5} en esa muestra. Por otra parte, el día jueves el filtro de la jornada de la mañana presentó un alto contenido de BC que correspondió al 9.09% representando el 2.98µg/m³ de la concentración de PM_{2.5} en la muestra y para el día sábado el filtro que registró mayor contenido de BC fue el usado en la jornada de la tarde con un 7.7% representando el 2.33µg/m³ de la concentración de PM_{2.5} en la muestra.

Para la Ruta 2 el filtro del día martes en la jornada de la tarde fue el que presentó un valor alto de concentración ($2.72\mu\text{g}/\text{m}^3$) de BC, esto nos indica que probablemente en esta jornada hay mayor tránsito de vehículos generadores de BC.

Por último comparando el contenido de BC para las dos rutas, el día de mayor concentración de BC ($3.37\mu\text{g}/\text{m}^3$) fue el martes en la jornada de la mañana en la Ruta 1. Esto quiere decir que en esta jornada el tráfico vehicular es alto y las principales fuentes generadoras incluyen vehículos diésel de combustión que están cerca al ciclista durante el recorrido realizado en la ruta. Se encuentra que probablemente los biciusuarios se exponen a niveles mayores de ($2\mu\text{g}/\text{m}^3$) de concentraciones de BC, ya que el BC es un contaminante primario que sale directamente de la fuente.

de concentración y por último la Cra 21- Calle 30 con 0.099 mg/m^3 y la Cra 21- Calle 36 con 0.041 mg/m^3 .



Figura 15. Concentraciones de PM2.5 a través de la Ruta 2. Fuente: Autoras

Así mismo. Se ilustra la Ruta 2 en la franja de la noche para el día sábado. Se observa que en la Cra 30- Calle 29 su valor de concentración es 0.075 mg/m^3 , siendo para esta ruta uno de los puntos más críticos, luego en la Cra 23- Calle 24 con 0.051 mg/m^3 , y por último la Cra 26 -Calle 48 con 0.065 mg/m^3 .

Por medio de los valores meteorológicos suministrados por la CDMB se pudo asumir que la dirección del viento en la Ruta 1 es de oeste a noreste (WNW) con una velocidad promedio de 2.2m/s y la de la Ruta 2 de oeste a sudeste (NNW) con una velocidad de 2.1 m/s, esto quiere decir que probablemente el desplazamiento del contaminante va desde la Cra 21 –Calle 36 hasta la Cra 21 -Calle 9 ubicándonos en el mapa de la Ruta 1 figura 14 y para la Ruta 2 el contaminante viajaría desde Cra 27 -Calle 36 hasta la Cra 27- Calle 41, como se puede observar en la figura 15. También se puede concluir que el valor de la velocidad del viento al no variar significativamente representa que las partículas de PM_{2.5} presentan una mala dispersión y por lo tanto es grave porque permanecen en el mismo lugar entonces cada vez que un ciclista pase por esa zona se estará exponiendo.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se encontró que el punto máximo en la Ruta 1 para franja de la mañana fue de $121\mu g/m^3$ a las 10:16 a.m en la Cra 21- Calle 30, para la franja de la tarde $83\mu g/m^3$ a las 02:24 p.m en la Cra 21 -Boulevard Santander y para la franja de la noche $141\mu g/m^3$ a las 04:47 p.m en el misma zona donde se registró el punto máximo de la franja de la tarde. En base a esto se determinó que los usuarios de la cicloinfraestructura planeada para la ciudad de Bucaramanga se exponen a niveles mayores de PM2.5 el día sábado en la jornada nocturna durante este tramo, ya que se evidencia el punto crítico de la Ruta 1.

Para la Ruta 2 en la franja de la mañana el punto máximo fue $58\mu g/m^3$ a las 08:36 a.m en la Cra 27- Calle 30, para la franja de la tarde $75\mu g/m^3$ a las 01:21 p.m en la Cra 31- Calle 32 y para la franja de la noche $93\mu g/m^3$ a las 05:33 p.m en la Cra 30 -Calle 36; en esta ruta el ciclista se ve más expuesto a altas concentraciones de PM2.5 en la franja de la noche del día martes.

Entre las dos rutas evaluadas, la ruta que presenta mayores concentraciones de PM 2.5 durante el tiempo de recorrido fue la Ruta 1. Según los resultados y tomando como referencia la Resolución 2254 de Calidad de Aire los puntos mencionados anteriormente exceden los valores permisibles establecidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible.

Se determinó que para la Ruta 1 el contenido de BC en el filtro para la franja de la mañana el día martes presentó una concentración elevada de carbono negro de $3,37\mu\text{g}/\text{m}^3$ con respecto al filtro utilizado en la franja de la mañana el día jueves con un valor de $2,80\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, el día sábado arrojó el contenido más alto de BC durante la franja de la noche con un valor de $3,07\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se comprobó que durante el periodo de muestreo el ciclista estuvo más expuesto a la fuente directamente en la Ruta 1 debido a que las concentraciones de (BC) fueron mayores en el día martes con $3,37\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la franja de la mañana.

Según los resultados para la Ruta 2 pudimos inferir que el día martes el filtro de la jornada de la tarde fue el que presentó un alto contenido de BC ($2.72\mu\text{g}/\text{m}^3$), así mismo el día jueves registro un valor de $2.98\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la franja de la mañana y por último el día sábado en la jornada de la tarde $2.33\mu\text{g}/\text{m}^3$. Entre los 3 días el filtro que reportó mayor concentración de BC fue el número 12 empleado el día jueves en la franja de mañana con una concentración de $2.98\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Podemos concluir que durante los muestreos el ciclista se encuentra más expuesto a la fuente directamente en la Ruta 1, debido a que las concentraciones de BC halladas en los filtros colectados fueron superiores con respecto a la Ruta 2.

En la actualidad se están desarrollando equipos de bajo costo que emplean sensores para la medición de $\text{PM}_{2.5}$, por esta razón es necesario implementar los ajustes necesarios durante el proceso de construcción de estos equipos, en pro de que registren datos de mayor confiabilidad al igual que los equipos comerciales como el DustTrak.

Se necesita un tiempo de muestreo mayor para que se refleje correlación entre los datos de concentración de PM_{2.5} y las variables meteorológicas, y así ver cómo estas inciden en el comportamiento de las partículas.

5.2 Recomendaciones

En base a los estudios de calidad de aire se pueden determinar los puntos más críticos dentro de una ruta para así evitarlos, todo esto con el fin de mitigar los altos niveles de contaminación presentes a través de la cicloinfraestructura propuesta para la ciudad de Bucaramanga. Así mismo se recomienda crear rutas alternas que presenten menor exposición, donde el biciusuario no esté en cercanía con los vehículos tipo diésel, ya que generan el mayor aporte al material particulado fino.

En otros estudios similares o de este tipo recomendamos tener en cuenta los dos fenómenos que se presentan durante el año en esta región del país, el fenómeno del niño y de la niña, con el fin de estudiar más a fondo la variabilidad en el comportamiento de las concentraciones.

No es recomendable emplear filtros de fibra de cuarzo en el análisis gravimétrico para el cálculo de concentraciones de PM_{2.5}, debido a que estos pueden presentar higroscopicidad.

Se recomienda tomar en consideración las alternativas de mejoramiento de movilidad urbana planteadas en el marco teórico, con el propósito de reducir tanto los niveles críticos de contaminación como todos los impactos asociados a estos. Resaltando que el PM_{2.5} es el

contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional y está asociado a numerosos efectos negativos en la salud y el medio ambiente. Estas alternativas se enfocan en el sector transporte ya que es considerada la fuente emisora principal de PM_{2.5} y BC.

Es primordial implementar medidas de prevención para los biciusuarios, tales como: que un mismo vehículo tenga restricción (pico y placa) más de un día en la semana, incentivar la medida del día sin carro tanto como sea posible y que se implementen automóviles que usen como combustible la energía eléctrica ya que así se estarían controlando los contaminantes producidos por la actividad del transporte.

Referencias Bibliográficas

- Adafruit Industries. (2006). Adafruit BME280 I2C or SPI Temperature Humidity Pressure Sensor ID: 2652 - \$19.95 : Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits. Retrieved December 6, 2018, from <https://www.adafruit.com/product/2652>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2017). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente. Retrieved from <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Alphasense air sensors for air quality networks. (2013). Alphasense. Retrieved December 6, 2018, from <http://www.alphasense.com/index.php/products/optical-particle-counter/>
- Andalucía, C. de M. A. de la J. (2004). *La bicicleta como medio de transporte*. [https://doi.org/Depósito Legal: GR-1441/04](https://doi.org/Depósito%20Legal:GR-1441/04)
- Departamento Nacional de Planeación Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas. (2017). Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden, 1–64. Retrieved from https://proyectostipo.dnp.gov.co/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=214&Itemid=280
- Dominguez, R.; Barrero, J. (2018). Reporte Técnico : Arquitectura Conceptual Hardware Racimo Aire, 1–7.
- EFEVerde. (2014). CAMBIO CLIMÁTICO “Black carbon”, el segundo mayor causante del cambio climático.
- EL TIEMPO. (2018). Lanza plan para renovar parque automotor del Aburrá a energías limpias -

- Medellín - Colombia - ELTIEMPO.COM. Retrieved from www.eltiempo.com/colombia/medellin/lanzan-plan-para-renovar-parque-automotor-del-aburra-a-energias-limpas-347258
- Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada. (2014). PLAN MAESTRO 2006 - 2030 “Confianza en el futuro.” *Revista Metro*. Retrieved from http://www.metrodemedellin.gov.co/Portals/4/archivos_metro/proyectos/Plan_Maestro_Metro_2006-2030.pdf
- EPA Agencia de Proteccion Ambiental de los Estados Unidos. (2017). Black Carbon Research. Retrieved from <https://www.epa.gov/air-research/black-carbon-research#main-contentE>
- Franco, J. F., Segura, J. F., & Mura, I. (2016). Air Pollution alongside Bike-Paths in Bogotá-Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 77. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00077>
- Héctor jorquera González. (2018). *INTRODUCCIÓN A LA CONTAMINACION ATMOSFÉRICA*. (A. Edicion uc, Ed.).
- Hernández, C. G. D. (2016). Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos Sustentante : Carlos Guadalupe Díaz Hernández Director de tesis : Dr . Alfredo Campos Trujillo.
- Hernández, D. (2017). y desigualdad : cobertura y capacidad de pago en la ciudad de Montevideo.
- Hunter-Henin, M. (2007). France horizontal application and the triumph of the European convention on human rights. *Human Rights and the Private Sphere: A Comparative Study*, 98–124. <https://doi.org/10.4324/9780203944974>
- Instrumentación, P. (2019). Medidor de particulas | PCE Instruments.<https://www.pce->

instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-particulas-kat_71033.htm?fbclid=IwAR0g_IZEGRVWu8wh5AAyljuCFNwXv7pTTffnUo0S__IW3wXhiDlAfIOALNQ .

Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2017). Resolución 2254. Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res 2254 de 2017.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf)

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (ECODES, 2013). Ciudades y transporte, 64. Retrieved from file:///C:/Users/MARTA LUZ ARANGO/Downloads/m1-ciudad-transporte.pdf

Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*. <https://doi.org/978-958-57674-9-2>

OMS. (2005). Actualización mundial 2005, 1–21.

Organización Mundial de la salud. (2018). Calidad del aire y salud. Retrieved from [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Plantower. (2015). PMS 1003-PM2.5-Plantower Technology. Retrieved December 6, 2018, from <http://www.plantower.com/en/content/?106.html>

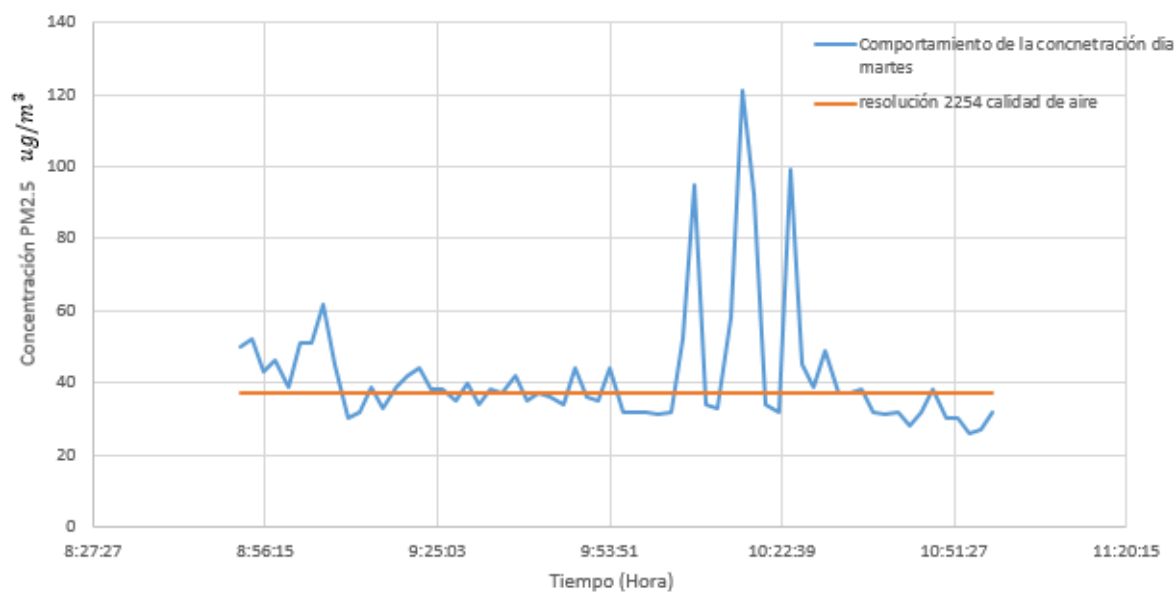
TSI Understanding, A. (2013). Monitor De Aerosoles Dusttrak™ Drx Modelos 8533 , 8533Ep Y 8534, (8534).

VERTEX. (2019). *Bombas y accesorios de muestreo - alto y bajo caudal - bombas mixtas*. <https://www.vertex.es/higiene/bombas-accesorios-muestreo>.

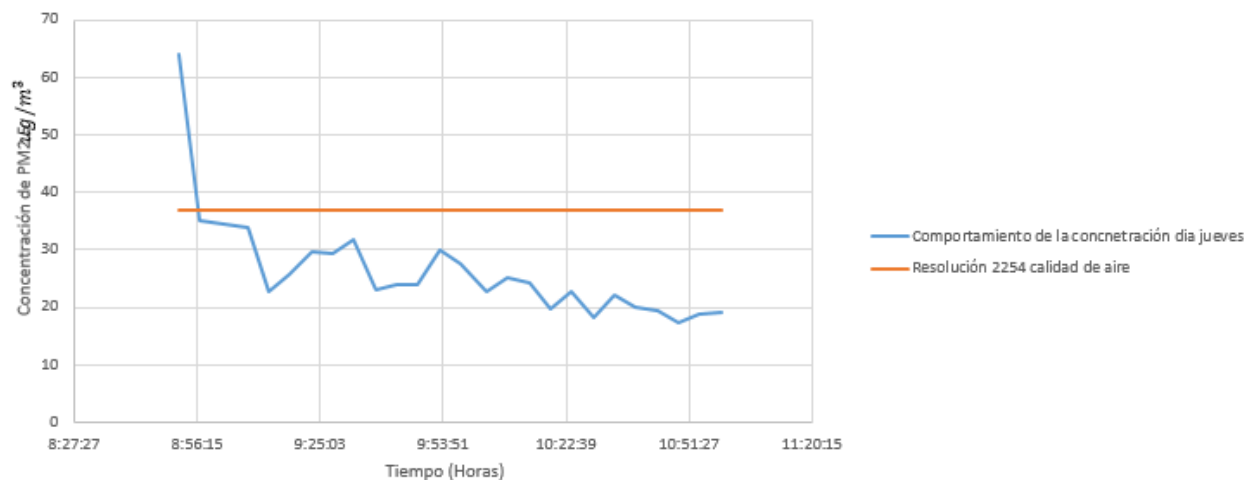
Apéndices

Apéndice A. Concentraciones de PM2.5 Vs Tiempo de la Ruta 1 y 2 durante todo el muestreo

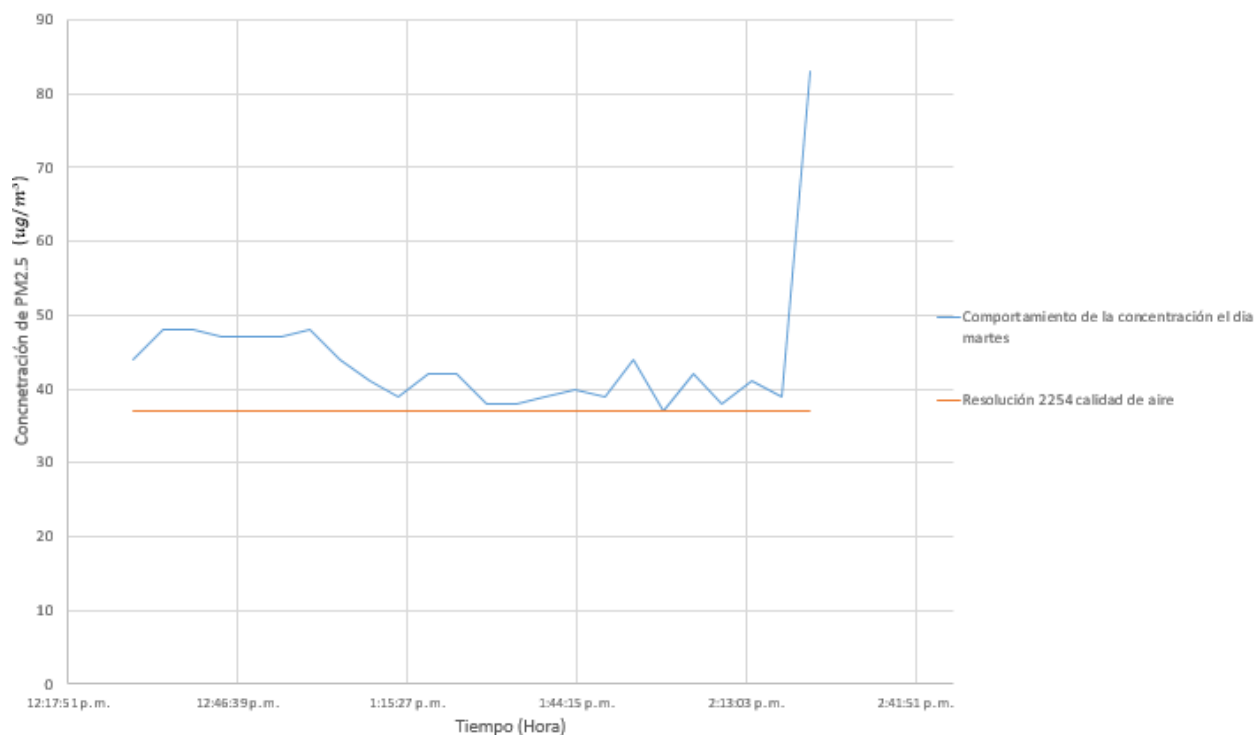
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la mañana día martes Ruta 1



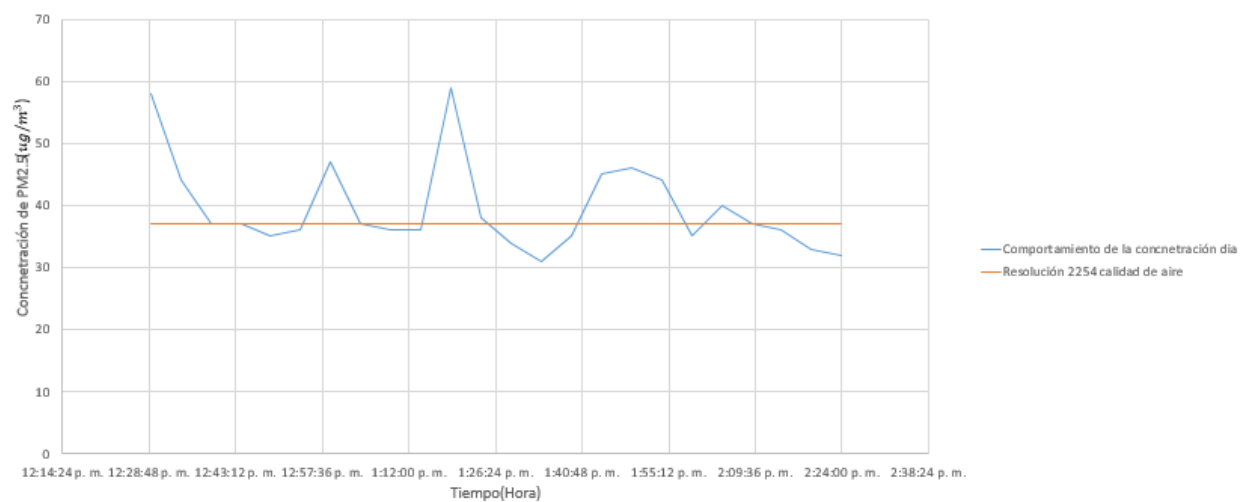
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la mañana día jueves Ruta 1



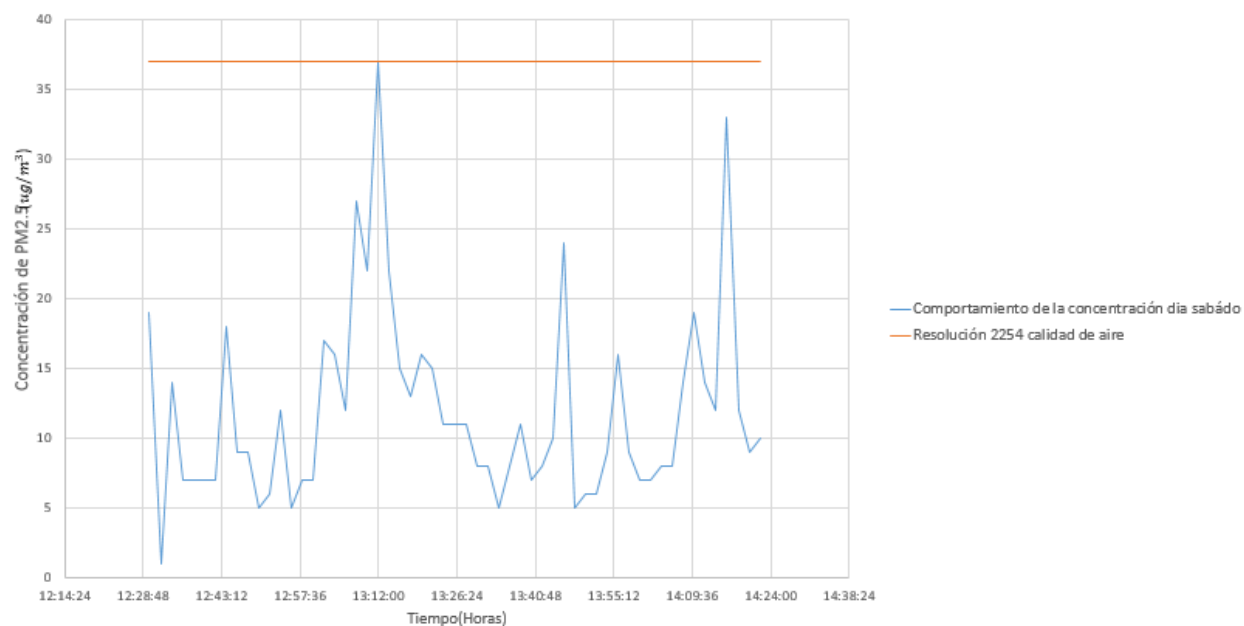
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde día martes Ruta 1



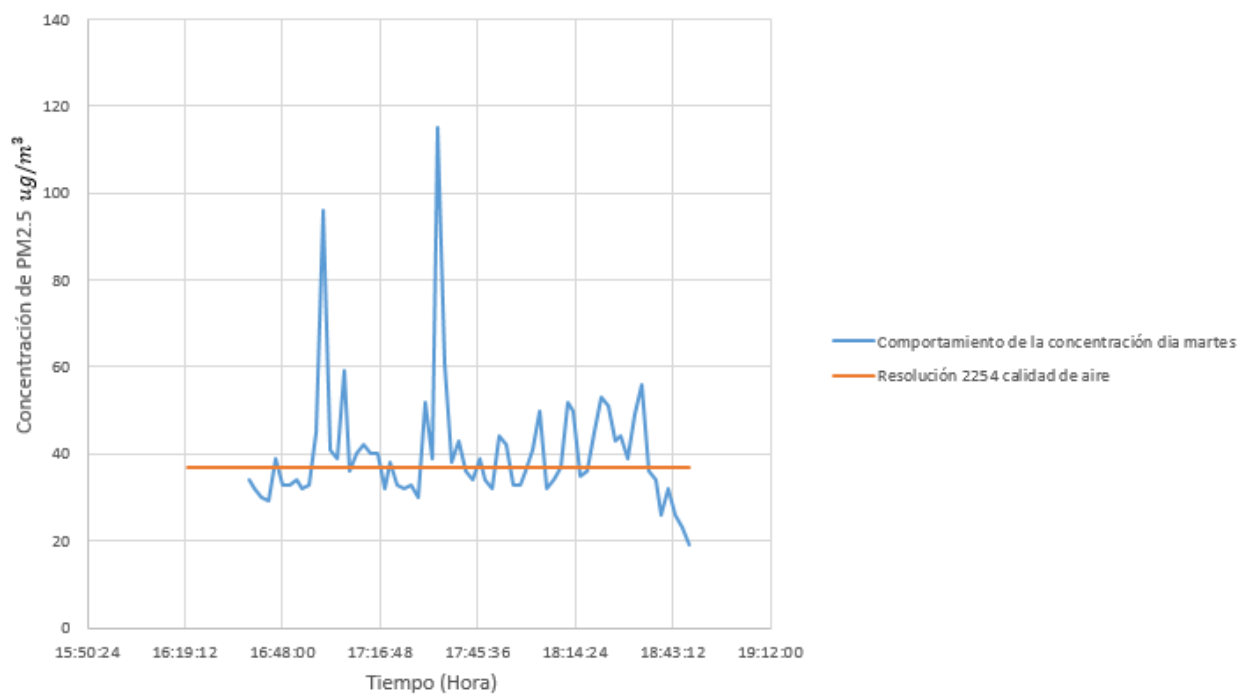
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde día jueves Ruta 1



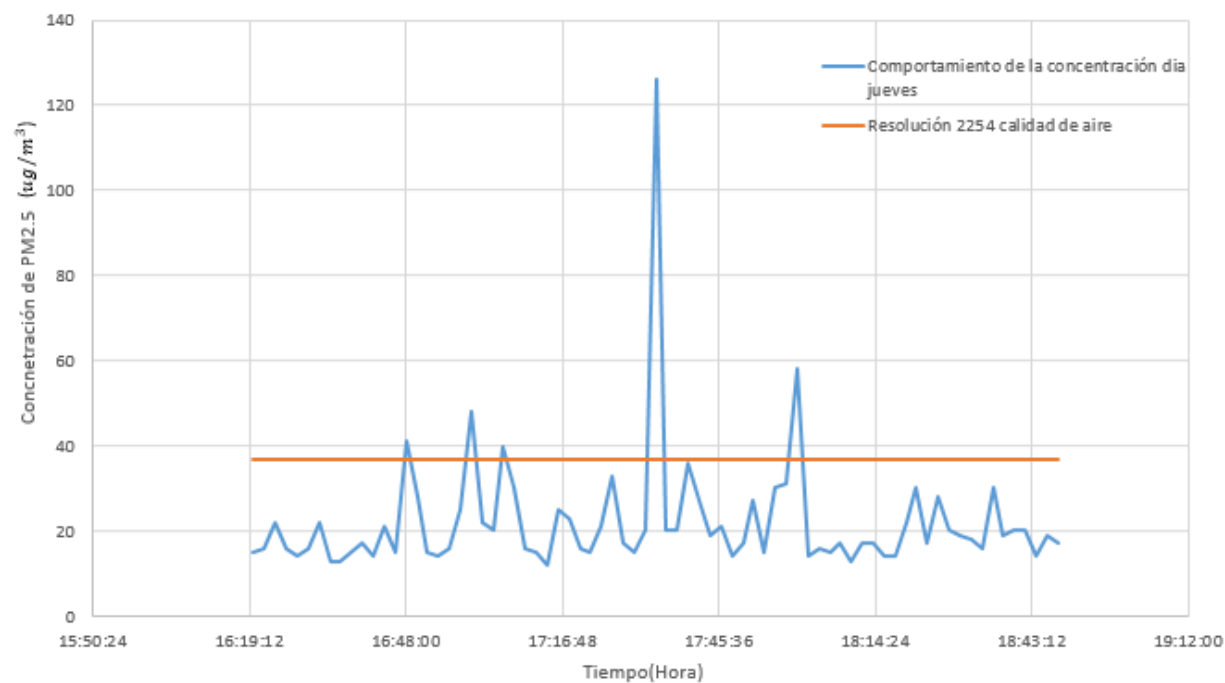
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde día sábado Ruta 1



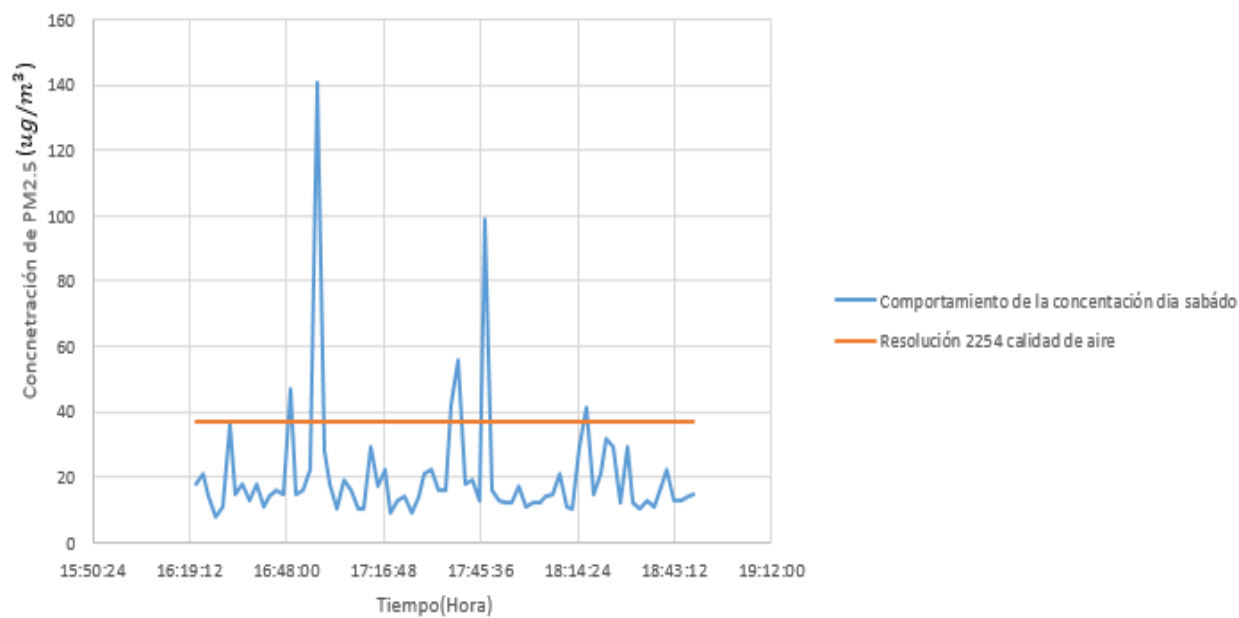
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche día martes Ruta 1



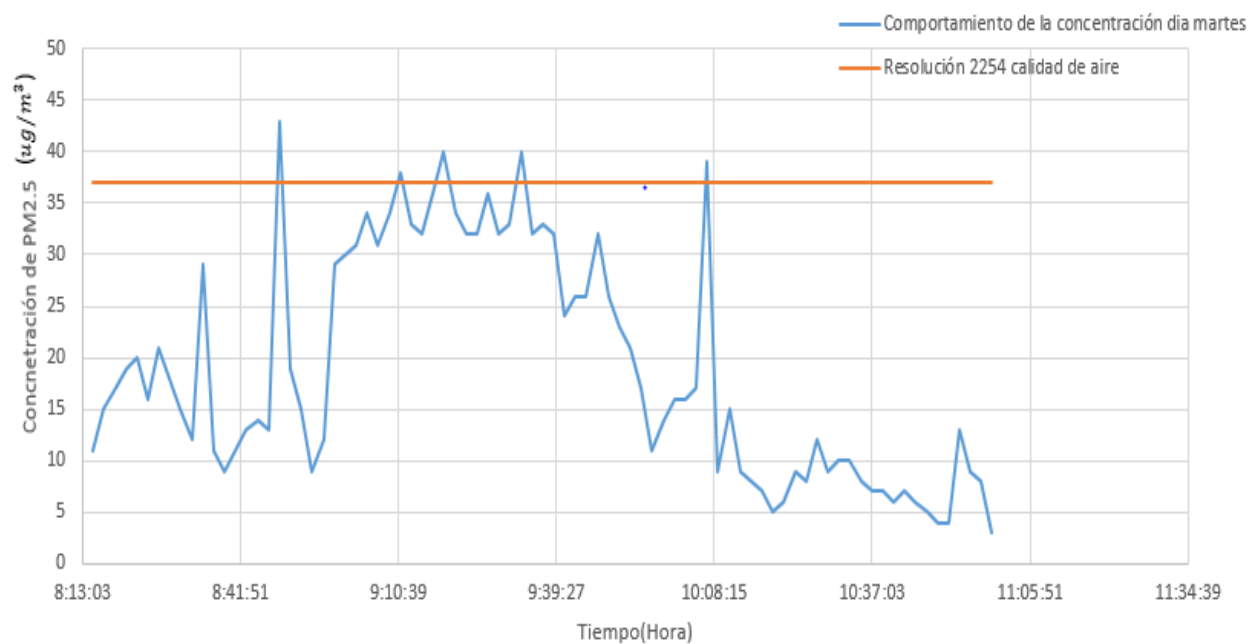
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche día jueves Ruta 1



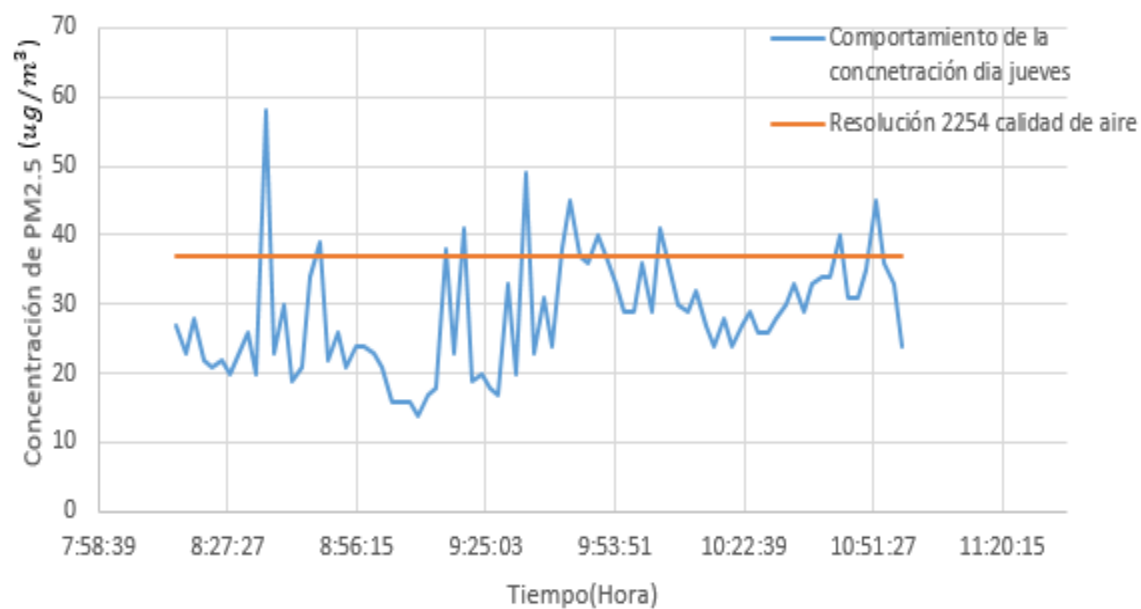
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche día sábado Ruta 1



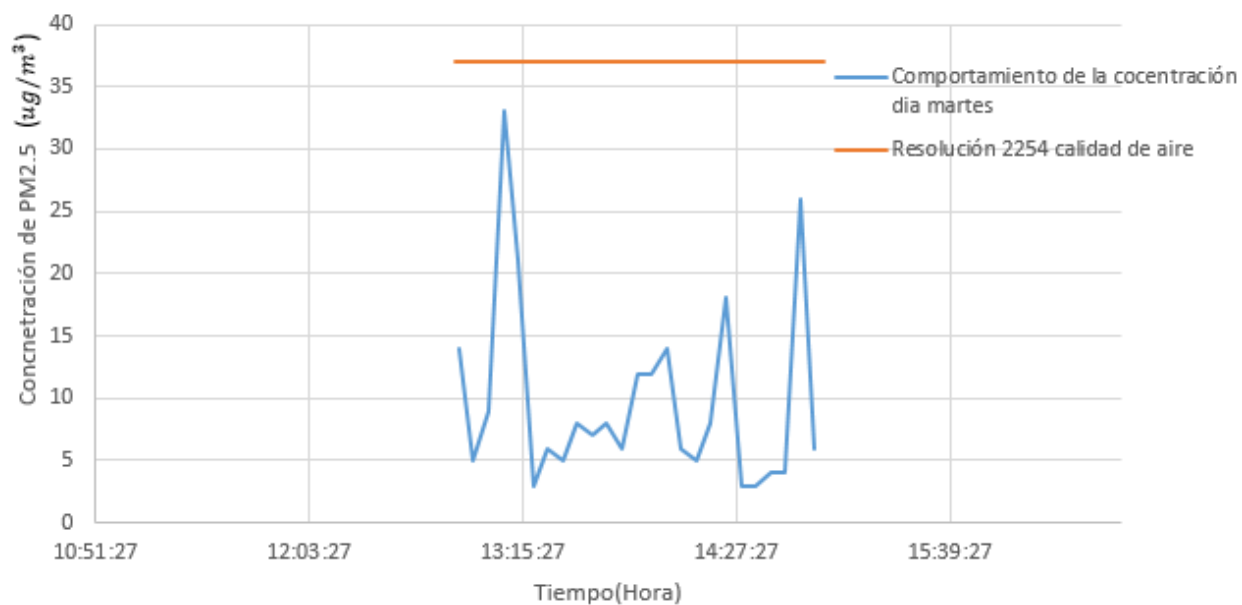
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la mañana día martes Ruta 2



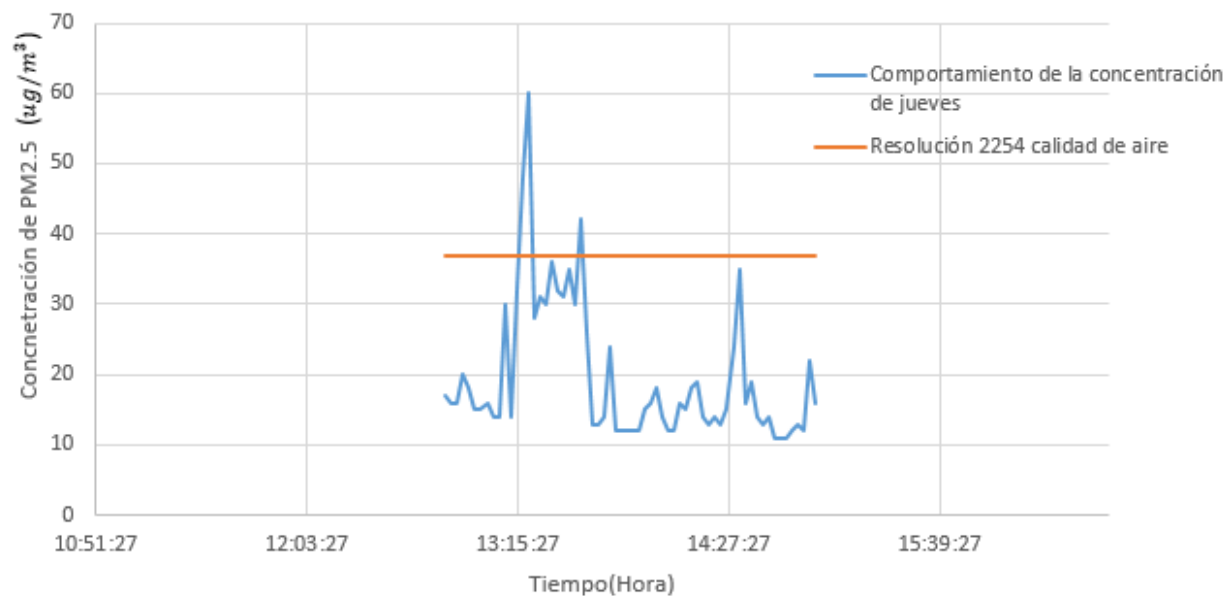
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la mañana día jueves Ruta 2



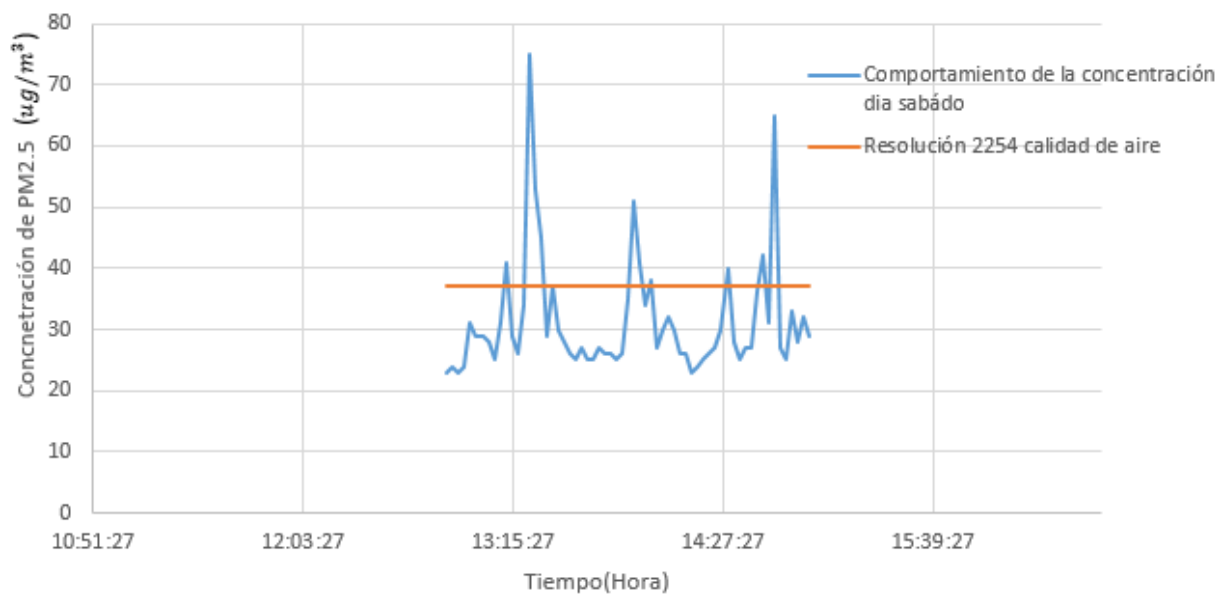
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde día martes Ruta 2



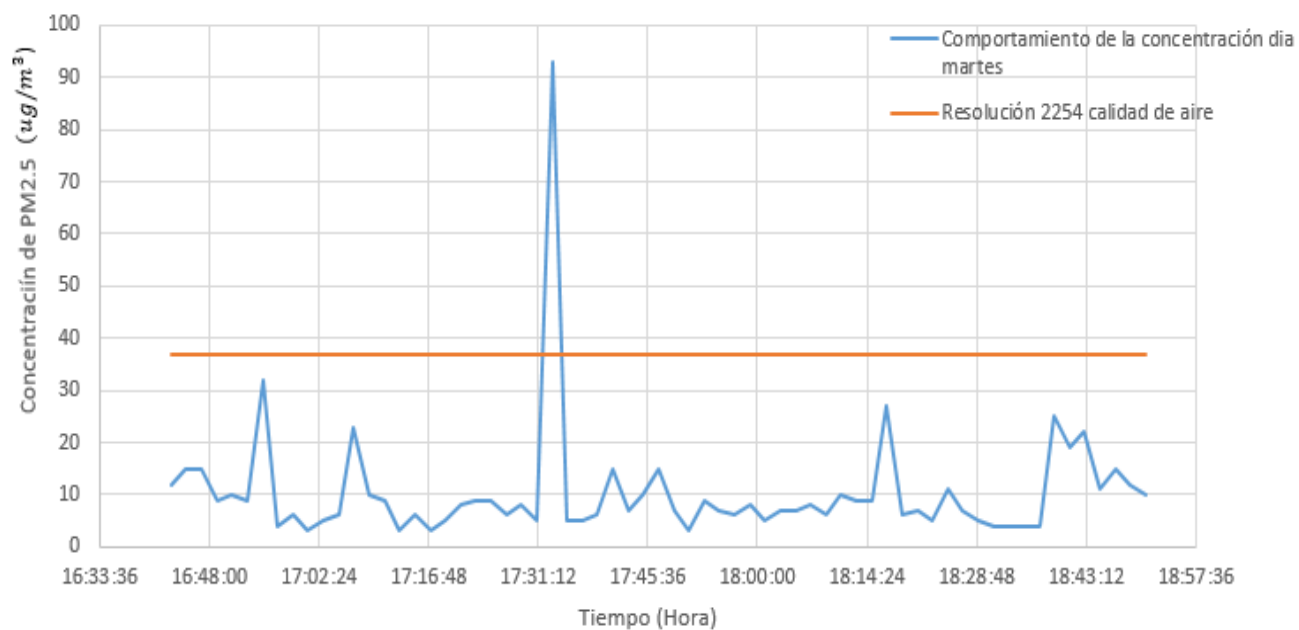
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde día jueves Ruta 2



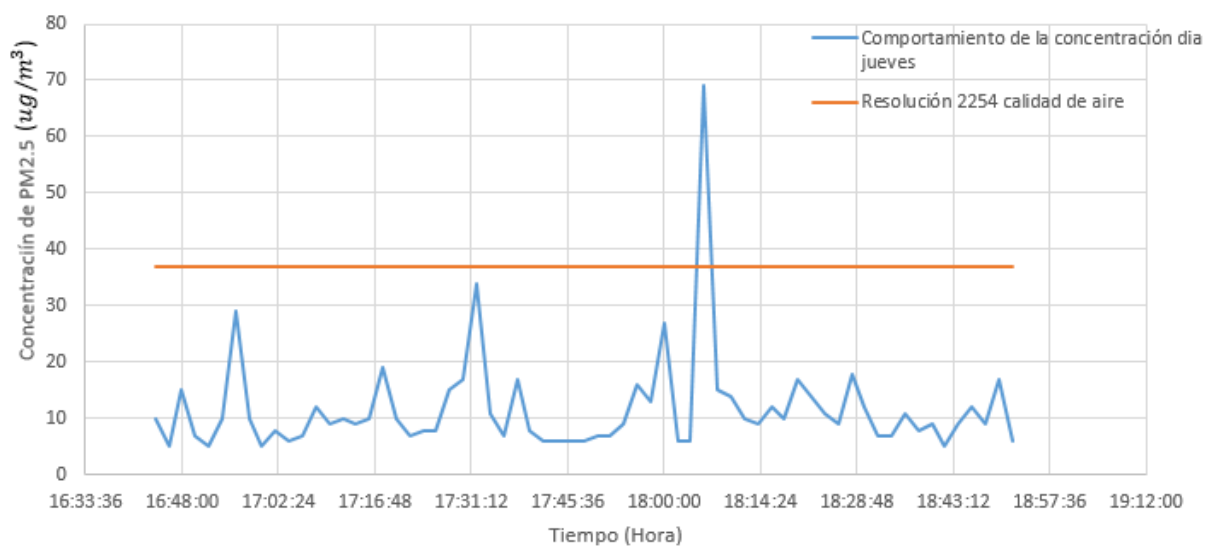
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la tarde día sábado Ruta 2



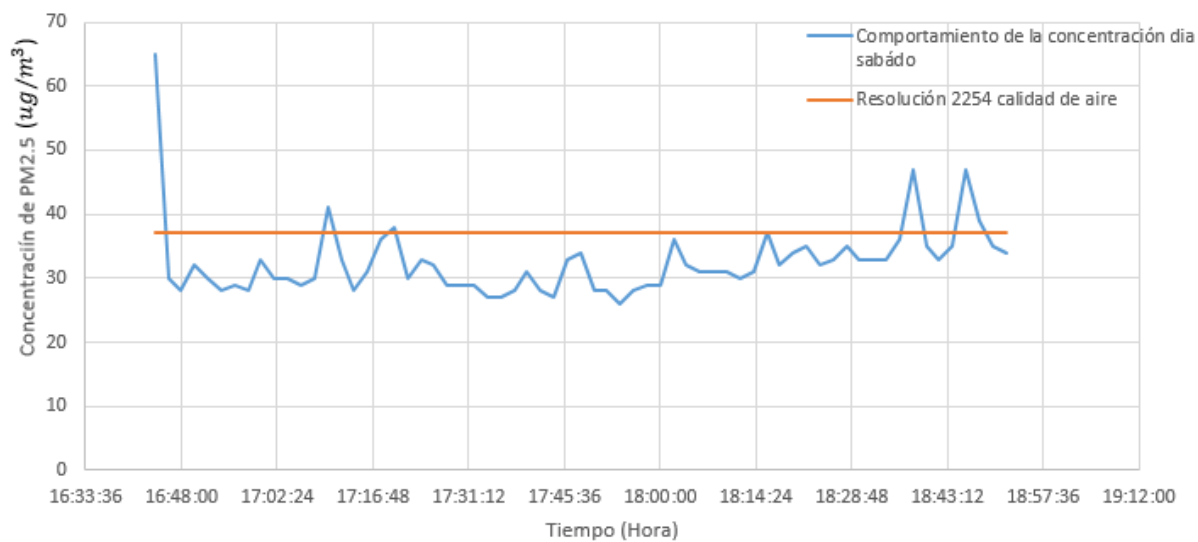
Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche día martes Ruta 2



Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche día jueves Ruta 2



Concentración de PM2.5 vs Tiempo Real, Jornada de la noche día sábado Ruta 2



Apéndice B. Determinación de la concentración de PM2.5 y BC

ID Filtro	Hora	Día	IR	UV	Concentración PM2.5 (µg/m3)	BC (µg/m3)	UV (µg/m3)	BC/PM2.5	UV/PM2.5
1	8:44 a 11:48	martes	115	190	38	3.3745	2.3430	8.8803%	6.1659%
2	12:30 a 15:30		101	172	43	2.9534	2.1137	6.8684%	4.9156%
3	16:20 a 19:20		69	126	35	2.0012	1.5357	5.7176%	4.3878%
4	8:00 a 11:00	jueves	97	165	56	2.8088	2.0079	5.0158%	3.5856%
5	11:46 a 14:57		71	125	41	2.0783	1.5377	5.0691%	3.7506%
6	16:00 a 19:00		54	94	21	1.5670	1.1464	7.4620%	5.4589%
7	12:05 a 15:05	sábado	56	108	11	1.6935	1.3726	15.3958%	12.4781%
8	16:00 a 19:00		99	179	20	3.0769	2.3380	15.3847%	11.6901%
9	8:15 a 11:15	martes	75	137	18	2.1729	1.6681	12.0718%	9.2670%
10	12:00 a 15:00		94	164	11	2.7224	1.9961	24.7492%	18.1463%
11	15:55 a 18:55		68	123	9	1.9749	1.5013	21.9437%	16.6808%
12	7:45 a 11:00	jueves	104	175	32	2.9835	2.1098	9.3236%	6.5932%
13	12:15 a 15:20		60	110	19	1.7273	1.3308	9.0909%	7.0042%
14	16:25 a 19:25		73	133	9	2.1402	1.6387	23.7797%	18.2073%
15	12:59 a 3:59	sábado	79	140	30	2.3333	1.7377	7.7776%	5.7924%
16	16:40 a 19:43		49	97	33	1.4334	1.1925	4.3436%	3.6136%