

**EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
POR MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5} Y PM₁₀ EN LOS HABITANTES DE LA
ZONA BAJA DE MELÉNDEZ EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI**

**JOHANA STHEFANIA BOLAÑOS BOLAÑOS
TATIANA LOZANO MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
JUNIO 2025**

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR
MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5} Y PM₁₀ EN LOS HABITANTES DE LA ZONA BAJA
DE MELÉNDEZ EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI

JOHANA STHEFANIA BOLAÑOS BOLAÑOS – 201825068 - 3754
TATIANA LOZANO MARTÍNEZ – 201827094 - 3754

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERA SANITARIA Y AMBIENTAL

DIRECTOR: PhD. JUAN PABLO SILVA VINASCO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
JUNIO 2025

DEDICATORIA

Dedico este logro, primero que todo a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para seguir adelante, por ser mi guía en cada paso y por no dejarme rendir ante las dificultades. A mis padres Rubio y Maria Soledad, pilares fundamentales de mi vida, por su amor incondicional, su apoyo constante y los innumerables sacrificios que hicieron para que pudiera estudiar y cumplir esta meta.

A mis hermanos, Cristian y Katherine, por su respaldo constante, por estar siempre presentes y por ser parte esencial de este camino lleno de esfuerzo y perseverancia.

A toda mi familia, que de una u otra forma estuvo presente y me brindo su apoyo en este proceso. En especial, a mi tía Alegría, cuyo nombre refleja la luz que ha sido en mi vida. Su bondad, generosidad y fortaleza me han dejado enseñanzas profundas que llevaré siempre conmigo, y aunque su tiempo con nosotros se esté agotando, su huella será eterna en mi corazón.

Johana Sthefania Bolaños Bolaños

A mi familia, por todo el amor y apoyo incondicional. Por darme razones para persistir, aun cuando el camino se torna difícil. Me esfuerzo para, algún día, poder retribuirles todos los sacrificios que han hecho por mí.

Tatiana Lozano Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia, cuyo acompañamiento constante fue fundamental en cada etapa de esta carrera. Su apoyo moral, su disposición para ayudar en momentos de dificultad y su confianza en mis capacidades fueron un impulso invaluable para alcanzar esta meta.

A mi amiga y compañera, Tatiana, por su dedicación, compromiso y por no rendirse incluso en los momentos más difíciles. Gracias por el trabajo en equipo, por las risas, el apoyo mutuo y por caminar juntas este proceso con tanta entrega y perseverancia.

A nuestro director, Juan Pablo Silva, por su dedicación y constante guía, así como por su valiosa orientación que enriqueció cada etapa de este proceso. Gracias por motivarnos y apoyarnos de manera incondicional para culminar este trabajo con éxito.

A la Universidad del Valle, por darme la oportunidad de formarme como profesional y a sus docentes, por brindarme una formación académica de calidad, por su dedicación y compromiso en la enseñanza.

A los residentes y trabajadores del barrio Meléndez, quienes nos recibieron y acogieron con amabilidad, y colaboraron con nosotras brindándonos su tiempo, confianza y valiosa información. Su disposición y apoyo fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo.

A mis compañeras de la Universidad del Valle, por su compañerismo, apoyo y por compartir conmigo este camino de formación.

Johana Sthefania Bolaños Bolaños

Agradezco profundamente a mi familia. A mi abuela Rosalba y a mi madre Ángela, por confiar en mí y llenarme de amor y cobijo. A mi padre Cristóbal, por brindarme su apoyo y las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. A mis hermanos Juan y Cristian, y a mi primo Felipe, por alentarme a culminar este trabajo. A mi tía Francia y a mi tío Julio, por estar presentes. A quienes ya no me acompañan en este plano terrenal, pero cuya presencia sigo sintiendo en cada paso.

A mi amiga y compañera, Sthefania, por su dedicación y compromiso con este trabajo. Por sacar ánimos para seguir pese a las dificultades. Gracias por tu apoyo incondicional y por compartir conmigo este proceso lleno de aprendizajes.

A nuestro director, Juan Pablo Silva, por su acompañamiento constante y sus significativos aportes. Su disposición, franqueza y motivación fueron fundamentales para mantenernos enfocadas.

A mi querida Univalle, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y nutrirme de profesores brillantes e inspiradores. Por las risas y tropiezos, que me dejaron enseñanzas de vida, y por regalarme amistades que me acompañaron a transitar este camino.

A los habitantes y trabajadores del barrio Meléndez, quienes nos recibieron y estuvieron dispuestos a colaborar con amabilidad y una sonrisa, a pesar de las arduas jornadas de trabajo que muchos enfrentan en su día a día.

A mis amigas, por su compañía incondicional y apoyo constante. Gracias por ser sostén. A Selvita, por llegar a mi vida para brindarme compañía, ternura y alegría.

Tatiana Lozano Martínez

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la exposición a material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los habitantes de la zona baja de Meléndez de la ciudad de Santiago de Cali. Se determinaron las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en seis puntos estratégicos de la zona de estudio (Calle 5ta, Tienda de Pedro, IPS Meléndez, Unicatólica, Súper Inter y Control) empleando el sensor remoto AirBeam3, durante cuatro períodos de monitoreo y todos los días de la semana. Se evidenció que los puntos de monitoreo Calle 5ta e IPS Meléndez registraron las mayores concentraciones de material particulado, principalmente en el periodo de 6:00-9:00. Las concentraciones promedio en estos puntos considerando toda la jornada de monitoreo fueron de $19,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $18,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $23,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $22,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En contraste, en el punto de monitoreo Control se obtuvieron las concentraciones promedio más bajas, con $14,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $16,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

Con respecto a la exposición a material particulado, para la estimación de las dosis inhaladas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se consideraron dos intensidades de actividad (ligera y moderada) tanto para hombres como mujeres en un rango de edad de 16 a 80 años. Se determinó que IPS Meléndez y Calle 5ta representan los puntos más críticos de exposición, con dosis máximas de $PM_{2.5}$ de $1,198 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,937 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y $0,902 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,706 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, mientras que para PM_{10} , fueron de $1,869 \mu\text{g}/\text{min}$ y $1,333 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y $1,408 \mu\text{g}/\text{min}$ y $1,004 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, respectivamente. Por otro lado, se evidenció que la dosis potencialmente inhalada por hombres es un 32,76% mayor en comparación con la de las mujeres, indicando un mayor riesgo de exposición para hombres.

Se estableció la percepción de la calidad del aire a través de la aplicación de una encuesta dirigida tanto a residentes como vendedores de la zona de estudio, a partir de la cual se determinó que más de la mitad de la población considera que la calidad del aire en el barrio Meléndez es regular, y que tan solo el 2,96% se informa a través de fuentes oficiales. Sin embargo, se observó una alta sensibilización sobre los riesgos para la salud asociados a la contaminación atmosférica.

Palabras clave: material particulado, dosis de exposición, percepción de la calidad del aire, concentraciones ambientales, contaminación atmosférica.

ABSTRACT

This study evaluated exposure to particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) among residents of the lower area of Meléndez in Santiago de Cali, Colombia. Ambient concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were measured at six strategic locations within the study area (Calle 5ta, Tienda de Pedro, IPS Meléndez, Unicatólica, Súper Inter, and Control) using the AirBeam3 remote sensor. Monitoring was conducted during four different time periods and across all days of the week. Results showed that the monitoring points at Calle 5ta and IPS Meléndez recorded the highest particulate matter concentrations, particularly during the 6:00-9:00 period. Average concentrations at these sites for the full monitoring schedule were 19,5 µg/m³ and 18,8 µg/m³ for PM_{2.5}, and 23,7 µg/m³ and 22,9 µg/m³ for PM₁₀, respectively. In contrast, the Control site recorded the lowest average concentrations, with 14,8 µg/m³ for PM_{2.5} and 16,4 µg/m³ for PM₁₀.

To assess exposure, inhaled doses of PM_{2.5} and PM₁₀ were estimated based on two levels of physical activity (light and moderate) for both men and women aged 16 to 80 years. The highest exposure levels were found at IPS Meléndez and Calle 5ta, with maximum PM_{2.5} doses of 1,198 µg/min and 0,937 µg/min for men, and 0,902 µg/min and 0,706 µg/min for women, respectively. For PM₁₀, the maximum doses were 1,869 µg/min and 1,333 µg/min for men, and 1,408 µg/min and 1,004 µg/min for women. Additionally, it was found that the potential inhaled dose for men was 32,76% higher compared to women, indicating a greater risk of exposure for men.

Perceptions of air quality were assessed through a survey administered to both residents and street vendors in the study area. More than half of the respondents perceived the air quality in the Meléndez neighborhood as average, while only 2,96% reported obtaining information from official sources. However, there was a high level of awareness regarding the health risks associated with air pollution.

Keywords: particulate matter, exposure dose, air quality perception, ambient concentrations, air pollution.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. OBJETIVOS	17
4.1. Objetivo general	17
4.2. Objetivos específicos	17
5. MARCO CONCEPTUAL	18
5.1. Contaminación atmosférica	18
5.2. Fuentes de emisión	18
5.3. Contaminantes atmosféricos	19
5.3.1. Material particulado (PM)	19
5.3.2. Ozono (O ₃)	20
5.3.3. Monóxido de carbono (CO)	20
5.3.4. Dióxido de azufre (SO ₂)	20
5.3.5. Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	21
5.4. Evaluación de la exposición	22
5.5. Marco político y legislativo de la calidad del aire	23
5.5.1. Documento CONPES 3943 de 2018: Política para el mejoramiento de la calidad del aire	23
5.5.2. Resolución 2254 de 2017	23
5.5.3. Guías mundiales de calidad del aire de la OMS	24
6. METODOLOGÍA	25
6.1. Zona de estudio	25
6.2. Monitoreo de material particulado PM _{2.5} y PM ₁₀	26
6.3. Análisis de las concentraciones ambientales de PM _{2.5} y PM ₁₀	29
6.4. Percepción de la calidad del aire	30
6.5. Estimación de la exposición a material particulado PM _{2.5} y PM ₁₀	31
7. RESULTADOS	34
7.1. Concentraciones ambientales de material particulado PM _{2.5} y PM ₁₀ en la zona baja de Meléndez	34
7.1.1. Concentraciones de PM _{2.5} y PM ₁₀ durante los días de la semana	34
7.1.2. Concentraciones de PM _{2.5} y PM ₁₀ por periodo de medición y día de la semana	37
7.1.3. Concentraciones de PM _{2.5} y PM ₁₀ por punto de monitoreo, periodo de medición y día de la semana	40
7.1.4. Concentraciones de PM _{2.5} y PM ₁₀ por punto de monitoreo y periodo de medición	44
7.1.5. Análisis y discusión de los resultados sobre las concentraciones de material particulado	45
7.2. Percepción de la calidad del aire	54

7.2.1.	Análisis y discusión de los resultados sobre la percepción de la calidad del aire	59
7.3.	Exposición a las concentraciones ambientales de material particulado PM _{2.5} y PM ₁₀	62
7.3.1.	Dosis potencialmente inhalada de PM _{2.5} y PM ₁₀ por día.....	62
7.3.2.	Dosis potencialmente inhalada de PM _{2.5} y PM ₁₀ por periodo.....	65
7.3.3.	Análisis y discusión de los resultados sobre las dosis de exposición a PM.....	68
8.	CONCLUSIONES	73
9.	RECOMENDACIONES	75
10.	REFERENCIAS	77
11.	ANEXOS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zona de estudio	25
Figura 2. AirBeam3	26
Figura 3. Variación temporal de PM _{2.5} durante los días de la semana	35
Figura 4. Variación temporal de PM ₁₀ durante los días de la semana	35
Figura 5. Concentraciones de PM _{2.5} por periodo y día	38
Figura 6. Concentraciones de PM ₁₀ por periodo y día.....	39
Figura 7. Concentraciones de PM _{2.5} por punto, periodo y día.....	41
Figura 8. Concentraciones de PM ₁₀ por punto, periodo y día.....	42
Figura 9. Variación horaria del volumen vehicular, Calle 13 con Carrera 100, 2014.....	46
Figura 10. Variación horaria de las componentes meridional y zonal del viento, su velocidad y la altura de CLA.....	48
Figura 11. Variación diurna de la velocidad del viento, estación Univalle, primer trimestre 2024)	49
Figura 12. Rango de edad	54
Figura 13. Ocupación.....	54
Figura 14. Problemáticas ambientales	55
Figura 15. Percepción de la calidad del aire	55
Figura 16. Medios de comunicación.....	56
Figura 17. Sistema de movilidad preferido.....	56
Figura 18. Uso del transporte informal	57
Figura 19. Transporte informal	57
Figura 20. Impacto en la salud.....	57
Figura 21. Enfermedades respiratorias	58
Figura 22. Enfermedades cardiovasculares	58
Figura 23. Enfermedades respiratorias en menores de edad.....	58
Figura 24. Horas de permanencia	59
Figura 25. Permanencia semanal	59
Figura 26. Dosis inhalada de PM _{2.5} por día.....	63
Figura 27. Dosis inhalada de PM ₁₀ por día.....	63
Figura 28. Dosis inhalada de PM _{2.5} por periodo	65
Figura 29. Dosis inhalada de PM ₁₀ por periodo.....	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica.....	19
Tabla 2. Principales contaminantes atmosféricos	21
Tabla 3. Niveles máximos permisibles en la Resolución 2254 de 2017 y niveles máximos recomendados por la OMS.....	24
Tabla 4. Puntos de monitoreo de material particulado.....	27
Tabla 5. Concentraciones promedio de PM _{2.5} y PM ₁₀ por punto y periodo.....	44
Tabla 6. Resultados de diferentes estudios sobre exposición a material particulado	68

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Plantilla de la encuesta sobre la percepción de la calidad del aire.....	90
Anexo B. Resultados de la encuesta sobre la percepción de la calidad del aire.....	94
Anexo C. Concentraciones promedio de material particulado por día, periodo y punto	95
Anexo D. Dosis inhaladas de material particulado por día	98
Anexo E. Dosis inhaladas de material particulado por periodo	100

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica representa una alarmante problemática a nivel de los entornos urbanos, debido a que se considera como la mayor amenaza ambiental para la salud, ocasionando casi 6,5 millones de muertes anuales (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018). Igualmente, se precisa que el 86% de la población mundial que vive en áreas urbanas se encuentra expuesta a niveles de material particulado nocivo para la salud, así, por ejemplo, para el 2019 se indicó que ocurrieron 1,8 millones de defunciones asociadas a este contaminante en el mundo (Southerland *et al.*, 2022). En Colombia, este también es un problema ambiental sensible, de tal manera que se atribuyen alrededor de 10.000 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades relacionadas con la contaminación del aire urbano (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2017). Para el caso particular de la ciudad de Santiago de Cali, el 9,5% del total de las muertes se asocia con la contaminación atmosférica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], 2018).

Lo último sugiere la necesidad de monitorear la calidad del aire en los entornos urbanos de Colombia y determinar la potencial exposición a material particulado por parte de sus habitantes. En el caso de la ciudad de Cali existe una red de monitoreo con nueve estaciones que miden las concentraciones ambientales de contaminantes como el material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} , entre otros. Esta red cuenta con estaciones que se ubican en zonas estratégicas de la ciudad con coberturas alrededor de los 3-4 km a la redonda que se espera brinden información de la calidad del aire a una escala mediana. Sin embargo, dicha escala no permite detectar situaciones particulares que se pueden presentar en localidades y barrios, las cuales pueden afectar la calidad del aire y la exposición de las personas que viven en dichas vecindades. Así, cobra importancia caracterizar estas zonas en términos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

El barrio Meléndez es una zona residencial tradicional de la ciudad de Cali caracterizada por una gran cantidad de población asentada (4.866 habitantes para 2015), situación que ha propiciado un desarrollo urbanístico parcialmente desordenado y, donde se conjugan actividades comerciales y de servicios, acompañado a ello se evidencia un pobre desarrollo de infraestructura vial, con una alta concentración de fuentes móviles que van desde automóviles particulares, motocicletas y transporte público, de carga e informal. Por lo anterior, se plantea la hipótesis de que en el barrio Meléndez existe un deterioro en la calidad del aire debido a material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), cuyas concentraciones ambientales probablemente no consigan ser detectadas por la estación de monitoreo Univalle.

En el presente trabajo se evalúa la exposición a la contaminación atmosférica por material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los habitantes de la zona baja de Meléndez de la ciudad de Santiago de Cali. Para ello, se analizan las concentraciones de PM medidas en la zona de estudio bajo un enfoque descriptivo, se establece la percepción de la calidad del aire por parte de los habitantes del sector y se estima la exposición a dichas concentraciones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El inminente deterioro de la calidad del aire está directamente relacionado con afecciones en la salud humana, trascendiendo fronteras a lo largo de los años sin reconocer límites. Esta situación demanda una atención inmediata a nivel global puesto que se estima que en 2019 se provocaron alrededor de 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo relacionadas con la contaminación atmosférica (OMS, 2022). El acelerado desarrollo urbano y diversas actividades antropogénicas, como la industria, la generación de energía y la agricultura, han contribuido significativamente a esta problemática (Boldo, 2016). Adicionalmente, como lo indica Patiño & Patiño (2021), se destaca que la movilidad motorizada y con ello la combustión de combustibles fósiles, como el diésel y la gasolina, se ha identificado como el principal generador de contaminantes atmosféricos, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y material particulado (PM).

El PM es un indicador clave de la contaminación del aire y representa un mayor riesgo para la salud que otros contaminantes atmosféricos. Las partículas en suspensión se clasifican principalmente en dos categorías de acuerdo con su tamaño: (i) partículas gruesas (PM₁₀), cuyo diámetro aerodinámico es inferior o igual a 10 µm y (ii) partículas finas (PM_{2.5}), las cuales tienen un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 µm. Esta clasificación se basa en su capacidad de penetración en el tracto respiratorio considerando que estas partículas pueden depositarse en el árbol traqueobronquial, los bronquiolos y los alvéolos. Además de las fuentes antropogénicas, existen fuentes naturales de PM, entre las que se encuentran los volcanes, tormentas de polvo, incendios, vegetación y aerosol marino (Kim *et al.*, 2015).

Los impactos a la salud causados por la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ comprenden la exacerbación de enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas, disminución de la función pulmonar, ataques cardíacos no mortales, ritmo cardíaco irregular, agravamiento del asma, mortalidad prematura y la aparición de múltiples síntomas respiratorios. Cabe resaltar que los menores, adultos mayores y personas con enfermedades cardíacas tienen un mayor riesgo de padecer dichos efectos en la salud. Asimismo, la exposición a altos niveles de PM se ha relacionado con la aparición de problemas gestacionales y/o neonatales como bajo peso al nacer, partos prematuros y muerte fetal e infantil (Kim *et al.*, 2015).

Teniendo en cuenta las repercusiones causadas por la presencia de PM_{2.5} y PM₁₀ en el aire, es evidente el impacto negativo en la salud y calidad de vida de las personas expuestas a estos contaminantes. En Colombia, la Resolución 2254 de 2017 establece los estándares máximos permisibles de la calidad del aire, fijando niveles de 75 µg/m³ y 37 µg/m³ para PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente, para un tiempo de exposición de 24 horas (MinAmbiente, 2017). Sin embargo, de acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2020), en algunas regiones del país no se cumple con los límites establecidos en la resolución, superando los valores permitidos. Es relevante destacar que los niveles establecidos en esta resolución se encuentran considerablemente por encima de los estándares recomendados por la OMS (2021), donde se establecen valores de 15 µg/m³ y 45 µg/m³ para

PM_{2.5} y PM₁₀, respectivamente. Esto indica que las personas están expuestas a un mayor riesgo de contaminación atmosférica que pueden afectar su salud de manera significativa.

La ciudad de Santiago de Cali cuenta con un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCASC) compuesto por nueve estaciones que monitorean las concentraciones de contaminantes criterio (NO_x, SO_x, O₃, PM_{2.5} y PM₁₀) y las condiciones meteorológicas (dirección y velocidad del viento, radiación solar, presión barométrica, precipitación, temperatura y humedad relativa) en la ciudad (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente [DAGMA], 2013).

Entre las estaciones de monitoreo se encuentra la estación Univalle ubicada al sur de la ciudad, la cual reporta información horaria de las concentraciones de PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y O₃ (DAGMA, 2013). Durante los años 2018 y 2019, el Índice de Calidad del Aire (ICA) predominante en esta estación de monitoreo fue “Aceptable”, no obstante, cabe mencionar que en 2019 se reportaron las categorías “Dañina a la salud para grupos sensibles” y “Dañina a la salud” en ciertas ocasiones (DAGMA, 2019, 2020). Esta tendencia es preocupante considerando que la categoría “Aceptable” está asociada con la aparición de posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles, además, se presume que esta estación no tiene una cobertura completa del sur de la ciudad si se tiene en cuenta que es la única estación ubicada en esta zona, la cual se ha expandido en el transcurso de los años. Por tanto, es posible que la información reportada por la estación Univalle no represente la calidad del aire de ciertos barrios clave de la ciudad como Meléndez.

El barrio Meléndez se encuentra ubicado en la comuna 18, al suroccidente de la ciudad de Cali. En el año 2015, su población era de 4.866 habitantes, con una densidad poblacional de 284 habitantes/hectárea, mientras que para 2027, se estima que la población alcanzará los 6.301 habitantes (Departamento Administrativo de Planeación Municipal [DAPM], 2017). En este sector predomina el uso residencial del suelo, sin embargo, sobre las vías principales priman actividades comerciales y de servicios (Aristizábal *et al.*, 2011; DAPM, 2014). Respecto a la movilidad, el barrio se caracteriza por presentar problemas de congestión vehicular en la Carrera 94, siendo esta la principal vía de entrada y salida del sector; la situación anterior se agudiza en horas pico debido al regular estado de la infraestructura vial (DAPM, 2017). Sumado a ello, se tiene la presencia de transporte informal y el sistema de transporte público del Masivo Integrado de Occidente (MIO), lo que contribuye a incrementar el flujo vehicular.

Por lo anterior, se establece la hipótesis de que en el barrio Meléndez existe un deterioro en la calidad del aire debido a material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), cuyas concentraciones ambientales posiblemente no sean detectadas por la estación de monitoreo Univalle. Esto se debe a que una red de monitoreo dispersa es inadecuada para proporcionar información local, debido a la heterogeneidad de los ambientes urbanos y la influencia de diversos factores en la contaminación del aire a nivel de vecindad, como las condiciones meteorológicas, los flujos de tráfico y las fuentes locales (Heintzelman *et al.*, 2023; Zhong *et al.*, 2023).

Esto último lleva a considerar que, si bien los datos a escala urbana proporcionados por las estaciones de monitoreo son relevantes, se requiere determinar la calidad del aire a una escala

local, específicamente a nivel de vecindad (menos de 2 km), como se plantea en este trabajo de grado. Esto permitirá detectar problemas particulares, por ejemplo, influencia del tráfico y situaciones de salud de las comunidades. En ese orden de ideas, el presente trabajo pretende responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la exposición a la contaminación atmosférica por material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los habitantes de la zona baja de Meléndez?

3. JUSTIFICACIÓN

La contaminación atmosférica causada por la presencia de material particulado tiene graves impactos en la salud, por lo que se han establecido niveles máximos permisibles de $PM_{2.5}$ y PM_{10} a nivel nacional e internacional. No obstante, en Colombia, los estándares de calidad del aire son notablemente flexibles en comparación con los lineamientos establecidos por la OMS.

Si bien en la ciudad de Santiago de Cali se cuenta con un SVCA, que representa un avance significativo en la gestión de la calidad del aire, aún se requieren de mayores esfuerzos para la prevención y mitigación de esta problemática considerando que el ICA predominante reportado en la estación de monitoreo Univalle es “Aceptable”, sin embargo, en diversas ocasiones se han reportado otras categorías del ICA superiores que suponen un mayor riesgo para la salud de las personas expuestas. Además, se presume que dicha estación de monitoreo no sea representativa para barrios de importancia del sur de la ciudad como Meléndez, el cual se caracteriza por ser un sector comercial con problemas de movilidad vehicular.

En ese orden de ideas, el presente trabajo de grado se justifica en las siguientes dimensiones:

1. En lo social: Los habitantes de la zona baja de Meléndez podrán conocer su nivel de exposición a la contaminación atmosférica por material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}). Esto se puede constituir como un instrumento para promover la gobernanza de la calidad del aire en comunidades de la zona.
2. En lo ambiental: La determinación de las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} a una escala local aporta información que puede complementar los datos generados por el SVCA de la ciudad, de tal manera que sirva de insumo para la identificación y comprensión de los problemas particulares a nivel de vecindad en la zona estudiada.
3. En lo técnico: La información a obtener determinará la influencia de las fuentes móviles en la calidad del aire de la zona baja de Meléndez, la cual ha experimentado un crecimiento de manera inusitada, pero sin un desarrollo en infraestructura para la movilidad; ello contribuirá a la planificación, gestión y ordenamiento del territorio en términos de movilidad.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar la exposición a la contaminación atmosférica por material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los habitantes de la zona baja del barrio Meléndez en la ciudad de Santiago de Cali.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones ambientales de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la zona baja de Meléndez.
- Definir la percepción de la calidad del aire en la zona de estudio por parte de los habitantes del sector.
- Establecer la exposición a las concentraciones ambientales de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los habitantes de la zona baja de Meléndez.

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1. Contaminación atmosférica

Hace referencia a la presencia de gases y partículas sólidas o líquidas en la atmósfera, en concentraciones altas o por tiempos prolongados, que pueden afectar negativamente el ambiente y la salud de las personas (IDEAM, 2016). Los contaminantes atmosféricos son emitidos como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de ambas (DNP, 2018), entre los que sobresalen el PM ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), O_3 , NO_x , CO y SO_x por ser considerados los contaminantes más preocupantes para la salud pública (OMS, 2021).

Los diferentes contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en contaminantes primarios, siendo estos emitidos directamente a la atmósfera, como por ejemplo el CO; o contaminantes secundarios, los cuales se forman a partir de reacciones químicas de contaminantes primarios en la atmósfera, un ejemplo de este tipo de contaminante es el O_3 , formado por compuestos orgánicos volátiles (COVs) y NO_x (Ubilla & Yohannessen, 2017).

5.2. Fuentes de emisión

La emisión se define como la cantidad de sustancia contaminante descargada a la atmósfera por una determinada fuente en un período de tiempo, la cual se expresa en unidad de masa por unidad de tiempo (por ejemplo, kg/h o Tm/año) (Boldo, 2016). Existen numerosas fuentes de emisión que, por su naturaleza, pueden clasificarse como fuentes físicas, biológicas y químicas; o también como fuentes naturales o antropogénicas. La contaminación térmica directa, bien sea natural o antropogénica, constituye la fuente de contaminación física más relevante, considerando que el clima local resulta alterado por el calor generado en la industria, las viviendas, la agricultura y el transporte. Por otro lado, la contaminación térmica indirecta es una consecuencia del efecto invernadero y está relacionada con la contaminación química antropogénica y su evolución con respecto a los gases de efecto invernadero (Popescu & Ionel, 2010).

Las fuentes biológicas incluyen mascotas, plantas, humanos, instalaciones sanitarias, materiales de construcción y demás elementos empleados en las edificaciones. Los contaminantes emitidos por dichas fuentes comprenden bacterias, hongos, virus, algas, insectos y sus subproductos como endotoxinas, micotoxinas, COVs, entre otros. Estos contaminantes biológicos impactan principalmente los espacios interiores y puede ocasionar diversas afectaciones a la salud como infecciones respiratorias, alergias, enfermedades infecciosas y demás efectos indirectos (Kumar *et al.*, 2021).

La contaminación química, de origen natural o antropogénica, se refiere a la presencia de compuestos químicos diferentes a los constituyentes naturales del aire. Entre las fuentes naturales se pueden mencionar las erupciones volcánicas, la descomposición de compuestos orgánicos y los incendios naturales. Por otro lado, las principales fuentes antropogénicas son la incineración de combustibles fósiles para producir energía, los procesos industriales y el transporte (Popescu & Ionel, 2010), de acuerdo con la OMS (2021), estas últimas predominan

sobre las fuentes naturales desde el inicio de la industrialización.

Las fuentes antropogénicas se clasifican en fuentes fijas y móviles, las primeras se refieren a fuentes de emisión situadas en un punto determinado e inamovible y a su vez se dividen en puntuales (la emisión se efectúa por ductos o chimeneas) y dispersas o de área (los focos de emisión de una fuente fija se encuentran dispersos en un área). Por otro lado, las fuentes móviles corresponden a aquellas susceptibles a desplazarse (MinAmbiente, 1995).

Entre las fuentes fijas se pueden mencionar instalaciones industriales en las que operan equipos de combustión con evacuación de gases a través de chimeneas o ductos, o bien, donde se presenta la evaporación de sustancias no confinadas (por ejemplo, durante una quema a cielo abierto o durante el almacenamiento y distribución de combustibles) (DNP, 2018). Las fuentes móviles comprenden los automotores o vehículos de transporte motorizados, los cuales figuran como uno de los principales contribuyentes de emisiones atmosféricas en los entornos urbanos, tanto de gases de efecto invernadero como de otros contaminantes atmosféricos (MinAmbiente, 1995; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2020; Van *et al.*, 2018). En la Tabla 1 se presentan algunos ejemplos de fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica.

Tabla 1. Fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica

Fuente	Ejemplos
Puntuales	Fábricas, centrales eléctricas, plantas de fundición.
De área	Explotaciones agrícolas, quemas a cielo abierto, estaciones de servicio.
Móviles	Todas las formas de transporte que queman combustibles fósiles.

Fuente: Adaptado de Brusseau *et al.* (2019); DNP (2018)

5.3. Contaminantes atmosféricos

5.3.1. Material particulado (PM)

Hace referencia a la mezcla de partículas sólidas y líquidas, principalmente de sustancias orgánicas e inorgánicas que se encuentran en el aire y contribuyen a la contaminación atmosférica, se componen principalmente de sulfatos, nitratos, amonio, cloruro de sodio, carbono, partículas de polvo, hollín, cenizas y agua, estos compuestos pueden desencadenar reacciones químicas en la atmósfera generando contaminantes secundarios. El material particulado se clasifica en función de su tamaño, siendo PM_{2.5} y PM₁₀ la forma más común de categorizarlo (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. [EPA], 2023).

El PM_{2.5} incluye partículas de tamaño igual o menor a 2,5 µm de diámetro aerodinámico, es decir, son partículas ultrafinas y pueden ser incluso más pequeñas que un cabello humano. Están compuestas por una variedad de componentes, que incluyen partículas de combustión, componentes orgánicos, metales, y otros materiales, los cuales tienen la capacidad de evadir las defensas presentes en el sistema respiratorio ingresando incluso hasta los alvéolos

pulmonares, afectando de esta manera la salud humana (Kim *et al.*, 2015).

El PM₁₀ hace referencia a partículas de tamaños que varían entre 2,5 y 10 µm de diámetro aerodinámico y están formadas principalmente por componentes inorgánicos, metales pesados y otros componentes orgánicos asociados a partículas de carbón, que al ser inhaladas tienden a ser retenidas por las vías respiratorias del cuerpo humano. Se caracterizan por poseer un pH básico causado por la combustión no controlada (EPA, 2023).

5.3.2. Ozono (O₃)

El O₃ es un gas altamente reactivo y oxidante, que se encuentra naturalmente en la estratosfera donde desempeña una función vital al absorber parte de la radiación ultravioleta proveniente del sol (Nuvolone *et al.*, 2018). En la troposfera, es un contaminante secundario considerado como el más representativo y tóxico de los oxidantes fotoquímicos, que se forma a partir de una serie de reacciones en la atmósfera impulsadas por la energía transferida a las moléculas de NO₂ cuando absorben la luz de la radiación solar. Los COVs especialmente los insaturados, junto con el NO₂ son los precursores que más contribuyen a la formación del O₃ (OMS, 2006). La exposición a este contaminante se ha asociado, principalmente, con efectos a corto plazo en los sistemas respiratorio y cardiovascular (Nuvolone *et al.*, 2018).

5.3.3. Monóxido de carbono (CO)

El CO es un gas tóxico, incoloro, no irritante, inodoro e insípido, que se produce por la combustión incompleta de combustibles carbonáceos como la madera, la gasolina, el carbón, el gas natural y el queroseno (OMS, 2022). Los vehículos automotores constituyen la principal fuente de emisión de CO en los ambientes urbanos. La exposición a bajos niveles de este contaminante puede causar dificultades para respirar, fatiga, mareos y otros síntomas similares a los de la gripe (OMS, 2023). Además, una vez ingresa al organismo a través del sistema respiratorio y se incorpora en el torrente sanguíneo, puede causar hipoxia y necrosis en los tejidos corporales, lo que puede ocasionar la muerte. Por lo anterior, el CO es considerado un contaminante altamente tóxico para la sangre y el sistema nervioso (Peng *et al.*, 2022).

5.3.4. Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ es un gas incoloro e irritante que tiene una densidad superior a la del aire. Este compuesto desempeña un papel crucial en la generación de la lluvia ácida, dado que se convierte en ácido sulfúrico (H₂SO₄) al reaccionar con el agua. El SO₂ proviene principalmente de fuentes de origen antropogénico, como procesos industriales, la quema de combustibles fósiles, refinerías de petróleo, plantas de cemento, entre otros. También surge debido a la actividad volcánica y geotérmica. Los óxidos de azufre presentan una relación con enfermedades del aparato circulatorio y el sistema respiratorio como el cáncer de pulmón (Frías, 2021).

5.3.5. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El NO₂ es un contaminante tóxico e irritante que participa junto con el monóxido de nitrógeno (NO) en la creación de lluvia ácida y smog fotoquímico. Además, actúa como un potenciador de partículas finas y es un precursor en la formación del ozono. Estos factores lo hacen altamente relevante en la atmósfera debido a su naturaleza peligrosa (Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro [CeMCAQ], 2020). El NO₂ puede generarse también mediante la reacción del NO con el oxígeno presente en la atmósfera, en este proceso, el NO se oxida parcialmente, transformándose en NO₂. El NO₂ es emitido por la combustión de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel, procedente del transporte y por la combustión en calefacciones domésticas (Frías, 2021). Este gas afecta, principalmente, el sistema respiratorio, acentuando el asma y generando síntomas como tos y sibilancias, también contribuye al desarrollo de la enfermedad pulmonar obstructiva (Ubilla & Yohannessen, 2017).

En la Tabla 2 se presentan los principales contaminantes atmosféricos, junto con sus fuentes de emisión y potenciales efectos en la salud.

Tabla 2. Principales contaminantes atmosféricos

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos en la salud
PM ₁₀	Suspensión o resuspensión de polvo, tierra, u otros materiales presentes en vías, la agricultura, minería, tormentas de viento o volcanes.	- Irrita la nariz y la garganta - Causa daño pulmonar y bronquitis - Aumenta el riesgo de sufrir un paro cardíaco - Produce efectos cancerígenos si transporta compuestos tóxicos - Puede ocasionar la muerte prematura
PM _{2.5}	Procesos de combustión, tales como el uso de vehículos de gasolina y diésel, generación de energía y procesos industriales.	- Reseca las fosas nasales - Puede causar reacciones alérgicas, neumonía, bronconeumonía, síndrome bronquial obstructivo y enfermedad pulmonar crónica (EPOC) - Exacerba los ataques de asma - Disminuye la función pulmonar - Aumenta el riesgo de cáncer de pulmón
O ₃	Se forma en la atmósfera por reacciones del NO _x y COVs en presencia de calor y luz solar.	- Puede causar irritación ocular - Puede irritar las vías respiratorias - Induce tos intensa, falta de aliento e irritación pulmonar - Conduce a una mayor susceptibilidad a enfermedades respiratorias - Exacerba los ataques de asma

Continuación Tabla 2. Principales contaminantes atmosféricos

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos en la salud
NO ₂	Combustión a alta temperatura y tráfico vehicular.	- Irritante respiratorio - Puede agudizar enfermedades respiratorias preexistentes - Puede conducir a la hiperreactividad bronquial y a una disminución de la función pulmonar en personas asmáticas
CO	Combustión incompleta del gas natural, carbón o madera y tráfico vehicular.	- Reduce el transporte de O₂ en el organismo - Es tóxico en concentraciones elevadas, causando dolor de cabeza, náuseas, reducción de la capacidad de raciocinio e incluso la muerte
SO ₂	Quema de combustibles, empresas eléctricas, procesos industriales y la extracción de metales a partir de minerales.	- Irritante respiratorio - Puede agravar enfermedades respiratorias preexistentes - Aumenta los síntomas respiratorios en adultos - Afecta la función pulmonar en menores

Fuente: Adaptado de Frías (2021); Pénard & Annesi (2004); Ubilla & Yohannessen (2017)

5.4. Evaluación de la exposición

La exposición hace referencia al contacto de un individuo con un agente específico, para evaluar la exposición se debe describir tanto cualitativa como cuantitativamente este contacto, así como el ingreso (dosis) de dicho agente en el organismo. Para lo anterior se deben identificar: (i) los grupos de individuos expuestos a concentraciones determinadas en períodos de tiempo establecidos, (ii) la dosis de ingreso al organismo y (iii) la contribución de las fuentes emisoras, rutas, vías y factores individuales que inciden en la exposición y en la dosis (Rodríguez & Núñez, 2016).

La evaluación de la exposición consta de las siguientes etapas (Acevedo, 2006; Moreno & Dolores, 2003):

- **Caracterización del escenario de exposición:** La caracterización del escenario de exposición se logra mediante la recopilación de datos en la región de estudio y sus alrededores, donde se exploran las conexiones entre los contaminantes y las poblaciones posiblemente afectadas. Esto implica determinar la distancia y dirección de las comunidades expuestas en relación con la fuente de contaminación. En este proceso, es esencial enfocarse en aquellos receptores con una mayor probabilidad de exposición, como individuos que trabajan o residen cerca de la fuente.

- **Identificación de la ruta de exposición:** Es esencial abordar de manera integral las diversas fuentes de contaminación, los tipos de contaminantes liberados y su comportamiento en conjunto, teniendo en cuenta especialmente la ubicación de los receptores sensibles. Peña *et al.* (2001), enfatizan que únicamente las vías de exposición eficaces deben ser tomadas en cuenta como relevantes y, por lo tanto, merecen una evaluación adecuada.
- **Cuantificación de la exposición:** La cuantificación de la exposición implica la identificación del patrón local en términos de magnitud, frecuencia, duración y vía por la cual se produce la exposición. Para lograr esto, es necesario calcular tanto la concentración de contaminantes como la dosis de exposición. La concentración de contaminante se refiere a la cantidad de dicho contaminante presente en un medio, como el aire, el agua, el suelo u otros. Por otro lado, la dosis de exposición se expresa en términos de dosis externa y dosis absorbida. La dosis externa representa la cantidad de contaminante con la cual los receptores entran en contacto en relación a su peso corporal y durante un período de tiempo determinado (mg/kg-d); en el contexto de la evaluación de riesgos, la dosis externa a menudo se denomina ingesta, ingreso o incorporación. Con respecto a la dosis absorbida, esta se define como la fracción de la dosis externa que penetra en el torrente sanguíneo y se vuelve disponible para su distribución en los diferentes órganos.

5.5. Marco político y legislativo de la calidad del aire

5.5.1. Documento CONPES 3943 de 2018: Política para el mejoramiento de la calidad del aire

El documento CONPES 3943 presenta la política para el mejoramiento de la calidad del aire en Colombia, cuyo objetivo general es reducir la concentración de contaminantes en el aire que afectan la salud y el ambiente. Consecuentemente, esta política establece tres objetivos específicos: (i) reducir las emisiones de contaminantes al aire provenientes de fuente móviles, (ii) reducir las emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes fijas y (iii) mejorar las estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación del aire. Para el cumplimiento de los objetivos, la política propone diferentes líneas de acción entre las que sobresalen la renovación y modernización del parque automotor, el mejoramiento de la calidad de los combustibles y biocombustibles, el desarrollo y la implementación de mejores técnicas y prácticas en la industria, la optimización de la gestión de la información de emisiones y calidad del aire y la promoción de la gobernanza y participación ciudadana en la prevención, reducción y control de la contaminación atmosférica (DNP, 2018).

5.5.2. Resolución 2254 de 2017

La Resolución 2254 de 2017 establece la norma de calidad del aire en Colombia, en la cual se definen los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃ y CO) en el aire, además, precisa elementos técnicos integrales para mejorar la gestión de la calidad del aire, con el propósito de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo en la

salud causado por la exposición a contaminantes atmosféricos (MinAmbiente, 2017).

5.5.3. Guías mundiales de calidad del aire de la OMS

La última versión de las guías mundiales de calidad del aire de la OMS, publicada en 2021, ofrece recomendaciones basadas en la evidencia científica sobre los niveles de los principales contaminantes atmosféricos que implican riesgo para la salud (PM, O₃, NO₂, SO₂ y CO). Además, las guías establecen metas intermedias para estos contaminantes al igual que ofrecen declaraciones sobre buenas prácticas relacionadas con la gestión de ciertos tipos de material particulado. Estas guías se publican periódicamente desde 1987 para ayudar a los gobiernos y la sociedad civil a reducir los niveles de exposición a la contaminación atmosférica y los efectos adversos derivados, lo que ha impulsado a las autoridades y la sociedad civil a incrementar los esfuerzos para mejorar la calidad del aire (OMS, 2021).

En la Tabla 3 se consignan los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio establecidos en la Resolución 2254 de 2017 y los niveles máximos recomendados por la OMS.

Tabla 3. Niveles máximos permisibles en la Resolución 2254 de 2017 y niveles máximos recomendados por la OMS

Contaminante	Nivel máximo (µg/m ³)		Tiempo de exposición
	Resolución 2254 de 2017	OMS	
PM ₁₀	50	15	Anual
	75	45	24 horas
PM _{2.5}	25	5	Anual
	37	15	24 horas
SO ₂	50	40	24 horas
	100	-	1 hora
NO ₂	60	10	Anual
	-	25	24 horas
	200	-	1 hora
O ₃	100	100	8 horas
	-	60	Temporada alta ^a
CO	-	4.000	24 horas
	5.000	-	8 horas
	35.000	-	1 hora

^a Promedio de las concentraciones máximas diarias de O₃ (medias octohorarias) en los seis meses consecutivos con la concentración media móvil de O₃ más alta.

Fuente: Adaptado de MinAmbiente (2017); OMS (2021)

6. METODOLOGÍA

6.1. Zona de estudio

El barrio Meléndez se encuentra ubicado en la Comuna 18 al suroccidente de la ciudad de Santiago de Cali, Valle del Cauca, en las coordenadas 3°23'39" latitud Norte y 76°33'14" longitud Oeste, limitando al norte con el barrio Nápoles, al sur con la Carrera 94, al este con la Calle 5 y al oeste con la Calle 4.

Este barrio es principalmente residencial, aunque en la zona este se presentan usos del suelo de tipo dotacional y mixto, lo que incluye equipamientos públicos, comerciales y de servicios que complementan la actividad residencial (DAPM, 2014). El barrio Meléndez presenta una densidad poblacional media (284 hab/ha para el año 2015) en comparación con otros barrios del sector como Alto Chorros (490 hab/ha) y Alto Jordán (461 hab/ha). No obstante, el sector en su conjunto se caracteriza por la presencia de asentamientos sobrepoblados, como consecuencia de un desarrollo urbano no planificado. En términos de movilidad, uno de los principales desafíos del sector es la congestión vehicular frecuente en la Carrera 94, debido a que esta se constituye como la principal vía de acceso al barrio y un corredor importante de actividad económica (DAPM, 2017). Además, la presencia de transporte informal agrava dicha problemática.

El área de estudio para la realización del presente proyecto de grado corresponde a un sector de la zona baja del barrio Meléndez, el cual limita al norte con la Carrera 92, al sur con la Carrera 94, al este con la Calle 5 y 4e y al oeste con la Calle 4 (Figura 1).

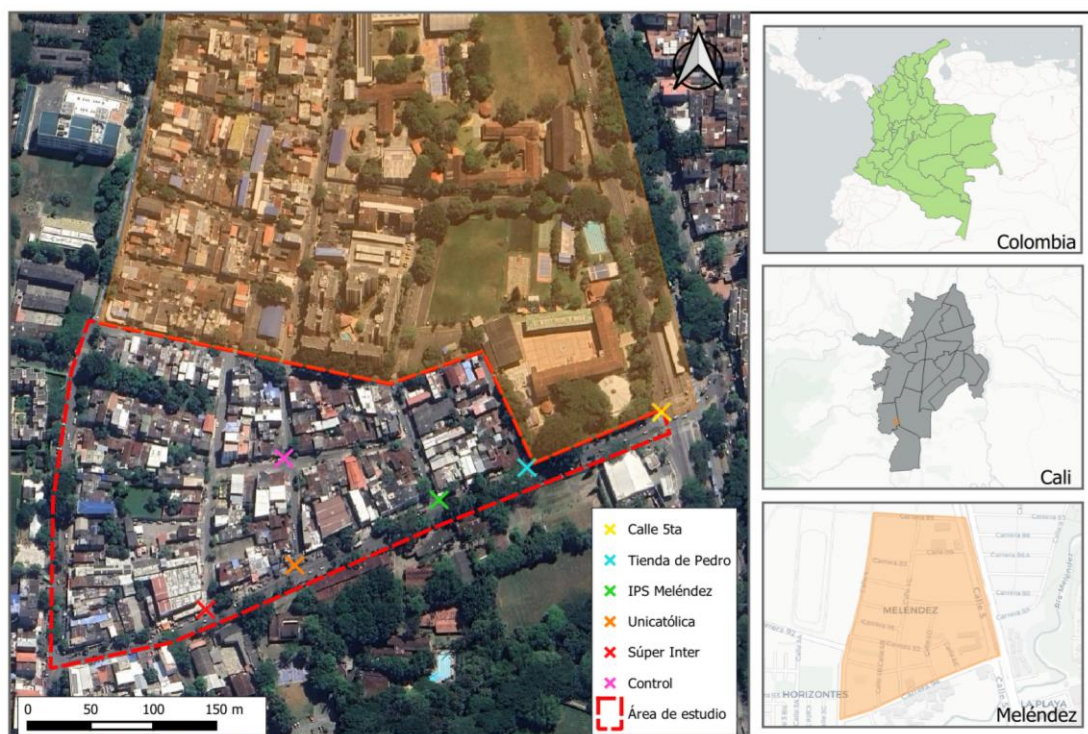


Figura 1. Zona de estudio

6.2. Monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Para determinar las concentraciones ambientales de material particulado se utilizó el sensor remoto de bajo costo AirBeam3 (HabitatMap), el cual mide PM_1 , $PM_{2.5}$ y PM_{10} , así como también la temperatura y la humedad relativa. Este dispositivo utiliza un método de dispersión de luz para medir PM, para ello, el aire pasa a través de una cámara con un sensor donde la luz de un láser dispersa las partículas en la corriente de aire. Esta dispersión de la luz es registrada por un detector y convertida en una medida que estima el número de partículas (South Coast Air Quality Management District, 2023).



Figura 2. AirBeam3

Fuente: BreatheSafeAir (2024)

Para seleccionar los puntos de monitoreo, se realizó un reconocimiento y recorrido por el área objeto de estudio, evaluando factores como el tráfico vehicular, la densidad poblacional y la presencia de fuentes fijas de emisión de material particulado, como estaciones de gasolina y establecimientos de venta de comida que utilicen carbón como fuente de energía para la cocción de los alimentos, esto con el fin de identificar los puntos más representativos para el monitoreo de las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

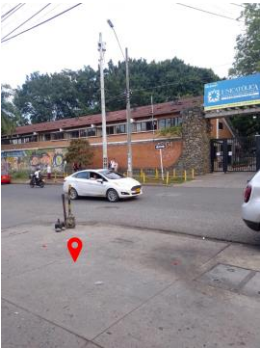
En este sentido, se seleccionaron cinco puntos de monitoreo ubicados a lo largo de la Carrera 94, considerando que, según el DAPM (2017), esta vía se constituye como un corredor de actividad comercial, donde se evidencia una alta concentración vehicular y una afluencia considerable de peatones (zona expuesta). Además, se estableció un punto de monitoreo como zona de control, de modo tal que sea posible realizar comparaciones con la zona expuesta. En la Tabla 4 se presentan las principales características de los puntos de monitoreo seleccionados.

El monitoreo de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se llevó a cabo de manera intermitente durante un período de ocho meses, entre enero y agosto del 2024, con el fin de realizar seis muestreos repetidos para cada día de la semana en los seis puntos de monitoreo durante las cuatro franjas horarias establecidas: (i) 6:00-9:00, (ii) 9:00-12:00, (iii) 12:00-15:00 y (iv) 15:00-18:00. En ese sentido, se obtuvieron un total de 1.008 sesiones de monitoreo, cada una con una duración de 15 minutos. Para evitar posibles interferencias en las mediciones, se procuró que los muestreos no se llevarán a cabo bajo la cobertura directa de árboles, asimismo, se excluyeron períodos de lluvia.

Tabla 4. Puntos de monitoreo de material particulado

Punto	Dirección / Coordenadas geográficas	Descripción	Registro fotográfico
Calle 5ta	Cra. 94, con Cl. 5 / 3°22'36"N 76°32'34"O	En este punto se ubica un cruce semafórico, y en sus cercanías se encuentran la estación del MIO Meléndez y una estación de gasolina. Además, las inmediaciones operan como sitio de abordaje de transporte informal. Debido a esto y a la convergencia de vías importantes, es un punto de alto tránsito vehicular y peatonal.	
Tienda de Pedro	Cra. 94, con Cl. 4e / 3°22'34"N 76°32'38"O	Este punto suele funcionar como sitio de abordaje de camperos y transporte informal, principalmente motocicletas. Sin embargo, el flujo vehicular en la Calle 4e es menor en comparación con otros puntos, ya que se trata de un sector predominantemente residencial. Por otro lado, en este sitio opera un punto de venta de jugo de caña, donde el uso de un trapiche con motor a base de gasolina puede contribuir a la emisión de PM.	
IPS Meléndez	Cra. 94, con Cl. 4d / 3°22'34"N 76°32'40"O	Contiguo a este punto se encuentra la IPS Meléndez, por lo tanto, la circulación de vehículos y peatones es continua cuando esta institución presta sus servicios (días hábiles). Además, frente a este punto se ubica una panadería altamente concurrida, la cual puede considerarse como una fuente fija de emisión de PM.	

Continuación Tabla 4. Puntos de monitoreo de material particulado

Punto	Dirección / Coordenadas geográficas	Descripción	Registro fotográfico
Unicatólica	Cra. 94, con Cl. 4c / 3°22'32"N 76°32'44"O	Frente a este punto se sitúa la institución universitaria Unicatólica, lo que ocasiona frecuentes congestiones vehiculares durante las horas de ingreso y salida de la institución. Además, cerca de este punto se localizan establecimientos de venta de comida que utilizan carbón para la preparación de alimentos, los cuales actúan como fuentes de emisión fijas de PM.	
Súper Inter	Cra. 94, con Cl. 4b / 3°22'31"N 76°32'46"O	Próximo a este punto se encuentra el supermercado Súper Inter Meléndez, que es altamente frecuentado. Por ello, frente a este establecimiento suelen estacionarse vehículos de transporte informal.	
Control	Cra. 93, con Cl. 4c / 3°22'35"N 76°32'44"O	El sector donde se ubica este punto es principalmente residencial, por lo que el tránsito de vehículos y peatones es reducido. Sin embargo, cerca de este punto, y durante los días no hábiles y festivos, se sitúa ocasionalmente una fuente de emisión fija de PM debido a la preparación de alimentos en leña. Cabe mencionar que esta situación se desconocía al momento de seleccionar los puntos de monitoreo.	

Dado que durante cada período de medición se procuró abarcar los seis puntos de monitoreo, se estableció un tiempo de traslado entre estos para garantizar la recolección sistemática de los datos. En el período de 6:00-9:00, las sesiones de medición se realizaron en el siguiente orden: Calle 5ta (6:00-6:15), Tienda de Pedro (6:30-6:45), IPS Meléndez (7:00-7:15), Unicatólica (7:30-7:45), Súper Inter (8:00-8:15) y Control (8:30-8:45). Este esquema se replicó en cada

una de las franjas horarias establecidas, con la diferencia de que en los periodos de 9:00-12:00 y 15:00-18:00, el monitoreo inició en Control y finalizó en Calle 5ta.

Si bien esta configuración del protocolo de monitoreo pudo influir en los niveles registrados en algunos puntos debido al horario asignado, se definió con el fin de garantizar condiciones replicables. Además, esta decisión se ajusta al objetivo del estudio, centrado en comparar la exposición entre puntos, periodos y días bajo condiciones consistentes.

6.3. Análisis de las concentraciones ambientales de PM_{2.5} y PM₁₀

En primer lugar, se llevó a cabo la depuración de los datos, lo que incluyó la eliminación de registros duplicados e incompletos. Asimismo, se descartaron los datos atípicos, los cuales se identificaron como aquellos que excedían la media de la distribución en más de tres desviaciones estándar. Esto se realizó teniendo en cuenta que, si bien algunos de estos datos podrían deberse a eventos puntuales de contaminación, su inclusión afectaría negativamente la representatividad de los resultados, debido a que tienden a sobredimensionar las condiciones típicas de exposición en el área de estudio. Además, las mediciones obtenidas mediante sensores de bajo costo pueden presentar sesgos sistemáticos en comparación con los datos reportados por las estaciones de monitoreo oficiales (EPA, 2024; Giordano *et al.*, 2021). Dichos sesgos se relacionan con la sensibilidad de los sensores frente a las propiedades de las partículas y factores meteorológicos, principalmente la humedad relativa (Badura *et al.*, 2019; Bulot *et al.*, 2019).

Posteriormente, se calcularon las concentraciones promedio por minuto para cada sesión de monitoreo, de acuerdo con los lineamientos del Manual de Operación de SVCA, el cual especifica que para el cálculo de promedios se requiere de al menos el 75% de los datos para el período de tiempo a evaluar (MinAmbiente, 2010). Este procedimiento se llevó a cabo considerando que el equipo de medición AirBeam3 registra las concentraciones de PM con una frecuencia de un segundo. Estos datos son transmitidos en tiempo real a través de conexión Bluetooth a la aplicación AirCasting (Heimbinder & Lim, 2021), la cual permite la visualización de los parámetros medidos mediante mapas de calor y series de tiempo, además, brinda la facilidad de obtener los datos en un formato CSV (BreatheSafeAir, 2024).

Finalmente, se obtuvo una serie representativa de datos para cada combinación de punto de monitoreo, día de la semana y período de medición. Para ello, se promediaron las concentraciones registradas en las seis sesiones de monitoreo para cada minuto. Los resultados se representaron por medio de series temporales, diagramas de cajas y alambres, y gráficos de medias con barras de error, con el objetivo de analizar el comportamiento de las concentraciones, así como la variabilidad temporal y espacial. Además, estos valores se contrastaron con los niveles máximos establecidos en la Resolución 2254 de 2017 (MinAmbiente, 2017) y las directrices de la OMS (2021) para un tiempo de exposición de 24 horas. Esta comparación se realizó como una aproximación, dado que la jornada de monitoreo empleada en este estudio no garantiza la representatividad para este periodo. No obstante, se consideró pertinente incluir este contraste como contexto para la interpretación preliminar de los niveles registrados.

6.4. Percepción de la calidad del aire

La percepción de la calidad del aire en el área de estudio se evaluó mediante la aplicación de una encuesta estructurada dirigida a vendedores ambulantes, empleados de establecimientos comerciales y residentes permanentes de la zona. Para estimar la cantidad de vendedores y empleados, se realizó un recorrido por el área de estudio, realizando un conteo detallado de esta población para garantizar su adecuada representación en la encuesta. Se identificaron 94 establecimientos comerciales y 41 puestos de venta ambulante, para un total de 408 empleados y 53 vendedores. En el caso de los residentes, se contabilizaron 279 viviendas usando la herramienta Google Earth y, con base en los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2019), se asumió un promedio de tres personas por hogar, lo que resultó en una estimación de 837 residentes.

El tamaño de la muestra se determinó mediante un enfoque de muestreo por atributos, mediante la Ecuación 1 (Klinger, 2011). Para ello se definió un nivel de confianza del 95% y un error muestral del 8%. Asimismo, se asumió una proporción esperada (P) de 0,5, dado que este valor maximiza el tamaño de la muestra.

$$n = \frac{N \times P \times Q}{(N - 1) \times V(\hat{P}) + P \times Q} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

n es el tamaño de la muestra

N es el tamaño de la población

P es la proporción esperada de ocurrencia

Q es la proporción de no ocurrencia ($Q = 1 - P$)

$$V(\hat{P}) = \left(\frac{\delta}{z}\right)^2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$V(\hat{P})$ es la varianza de P

δ es el error muestral

z es el nivel de confianza

Las encuestas se realizaron de forma voluntaria y con previo consentimiento informado, procurando abarcar de manera equitativa las siete manzanas que conforman el área de estudio. Para ello, se recorrieron las manzanas de forma sucesiva, lo que permitió asegurar una cobertura adecuada de la zona, así como garantizar una muestra representativa y diversa.

El cuestionario incluyó preguntas con opciones de respuesta definidas (ver Anexo A), abarcando una amplia variedad de temas sociodemográficos, ambientales, de movilidad, salud

y tiempos de exposición. Se abordaron aspectos como el género, la edad, el nivel educativo, la ocupación de los encuestados y su residencia en el barrio Meléndez, para entender la composición de la población. Además, se investigaron los principales problemas ambientales percibidos en el área, centrándose en la calidad del aire y sus fuentes de contaminación. Los encuestados evaluaron la influencia de distintos tipos de transporte y comercios en la contaminación atmosférica, expresando también su opinión sobre el estado actual de la calidad del aire y los medios a través de los cuales se informan sobre este tema.

También se exploraron los hábitos de movilidad de los habitantes, indagando sobre su medio de transporte preferido, su opinión sobre el transporte público, y el uso de opciones de transporte informales, además de las razones que los llevan a optar por estos medios. Un apartado importante fue la relación percibida entre la calidad del aire y la salud, donde se preguntó si los encuestados creen que la mala calidad del aire afecta su bienestar y si han experimentado enfermedades respiratorias o cardiovasculares. Finalmente, se recopiló información sobre el tiempo de exposición de los encuestados al ambiente del barrio, considerando tanto el número de horas diarias como la frecuencia semanal que permanecen en la zona, lo que aporta datos sobre su potencial exposición a la contaminación.

6.5. Estimación de la exposición a material particulado PM_{2.5} y PM₁₀

Existen diversos factores que influyen significativamente en la concentración de material particulado a la que están expuestos los habitantes de una zona. Entre estos factores se encuentran la densidad y composición del tráfico vehicular, las condiciones meteorológicas, la configuración de las vías y las dinámicas de movilidad de la población. La interacción de estos elementos puede generar variaciones espaciales y temporales en los niveles de contaminación, lo que incide directamente en la exposición de las personas a estos contaminantes (Morales *et al.*, 2017).

En particular, las intersecciones viales congestionadas representan puntos críticos, donde la acumulación de emisiones vehiculares puede elevar significativamente la concentración de contaminantes. En estos puntos, los peatones están expuestos a niveles elevados de PM, especialmente durante los ciclos semafóricos que generan paradas y arranques frecuentes en el tráfico. Por esta razón, el cálculo preciso de la dosis inhalada en estos entornos resulta fundamental para comprender y mitigar los riesgos asociados a la contaminación del aire en zonas urbanas. Esta dosis depende de factores como la concentración ambiental de PM, la tasa de respiración y el tiempo de exposición (He & Gao, 2021).

La tasa de inhalación o ventilación pulmonar se determinó con base en las recomendaciones del Manual de Factores de Exposición de la EPA (2011). Para ello, se consideró un grupo etario de 16 a 80 años, incluyendo tanto hombres como mujeres, y se analizaron dos niveles de intensidad de actividad: ligera y moderada. La actividad ligera se asocia con un equivalente metabólico (MET) de 1,5 a 3, mientras que la actividad moderada corresponde a un rango de 3 a 6 METS (EPA, 2011).

Con base en estos criterios, se seleccionaron dos tasas de inhalación diferenciadas para hombres y mujeres, permitiendo estimar con mayor precisión la cantidad de aire inhalado en función del nivel de esfuerzo físico. Para una intensidad de actividad ligera, se consideró una tasa de inhalación de 0,0138 m³/min para hombres y 0,0113 m³/min para mujeres, mientras que, para una intensidad de actividad moderada, las tasas fueron de 0,0308 m³/min para hombres y 0,0232 m³/min para mujeres.

Una vez determinada la tasa de inhalación, es posible calcular la dosis potencialmente inhalada, la cual se encuentra en función de esta tasa, así como de la concentración del contaminante en una zona específica y el tiempo de exposición. Esta relación se expresa mediante la Ecuación 3.

$$D_{habitante}^j = C_i^j \times IR_i \times \Delta t_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$D_{habitante}^j$ es la dosis inhalada del contaminante j (μg)

C_i^j es la concentración del contaminante j en una zona específica i ($\mu g/m^3$)

IR_i es la tasa de inhalación para un habitante en las condiciones i (m^3/min)

Δt_i es el tiempo de exposición de un habitante en las condiciones i (min)

A partir de este modelo general, se han desarrollado diferentes metodologías para calcular y expresar la dosis inhalada en función de distintas variables, permitiendo representarla en términos del tiempo de exposición ($\mu g/min$), la distancia recorrida ($\mu g/km$) o el peso corporal del individuo ($\mu g/kg$) (Morales *et al.*, 2017).

Con el fin de facilitar la comparación con otros estudios, se decidió normalizar la dosis inhalada en función de la unidad de tiempo. Se calculó la dosis potencialmente inhalada para cada uno de los periodos de monitoreo, así como una dosis potencial inhalada para cada día. Este cálculo se realizó mediante la aplicación de las Ecuaciones 4 y 6, respectivamente.

$$D^p = \frac{IR_{H-M} \times C_i^p \times \Delta t_p}{\Delta t_p} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

D^p es la dosis inhalada por periodo ($\mu g/min$)

IR_{H-M} es la tasa de inhalación diferenciada para hombres y mujeres (m^3/min)

C_i^p es la concentración promedio del contaminante en el periodo i ($\mu g/m^3$)

Δt_i^p es el tiempo de duración del periodo i (3 horas)

$$D^d = \frac{IR_{H-M} \times \Delta t_i \times \frac{\sum_{i=1}^4 C_i^p \Delta t_i^p}{\sum_{i=1}^4 \Delta t_i^p}}{\Delta t_i} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

D^d es la dosis inhalada por día ($\mu g/min$)

Al simplificar la Ecuación 5, se obtiene que la dosis inhalada diaria depende exclusivamente de la tasa de inhalación, así como de la concentración promedio y la duración de cada periodo.

$$D^d = IR_{H-M} \times \frac{\sum_{i=1}^4 C_i^p \Delta t_i^p}{\sum_{i=1}^4 \Delta t_i^p} \quad (\text{Ecuación 6})$$

7. RESULTADOS

7.1. Concentraciones ambientales de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en la zona baja de Meléndez

A continuación, se presenta el comportamiento de las concentraciones de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en la zona de estudio a partir de un enfoque descriptivo, considerando las variaciones por día de la semana, periodo de medición y punto de monitoreo. Asimismo, se compararon y discutieron los resultados en relación con estudios locales e internacionales en el contexto urbano.

7.1.1. Concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ durante los días de la semana

En las Figuras 3 y 4 se presentan las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, respectivamente, registradas durante los días de la semana, a partir de mediciones realizadas en los seis puntos de monitoreo durante los cuatro periodos de medición. En estas gráficas, cada punto de muestreo se representa con un color diferente para evidenciar la variación espacial y temporal de ambos contaminantes. Además, se contrastaron los niveles obtenidos con los límites establecidos por la Resolución 2254 de 2017 (MinAmbiente, 2017) y con los estándares de la OMS (2021), con el propósito de identificar los picos máximos registrados a lo largo de cada día.

Durante el lunes se observa un comportamiento variable de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, con valores máximos registrados durante horas de la mañana (35 µg/m³ para PM_{2.5} y 50,76 µg/m³ para PM₁₀), de modo que, se superó el límite de la OMS tanto para PM_{2.5} como PM₁₀. Conforme avanza el día, las concentraciones disminuyen y tienden a estabilizarse entre las 7:30 y el final del periodo de 9:00-12:00. Este patrón también se observa entre las 12:00 y 15:45, momento a partir del cual se evidencia una disminución considerable de las concentraciones que continúa hasta el final del periodo de 15:00-18:00, manteniéndose por debajo del límite de la OMS para PM_{2.5}. Por su parte, ninguna concentración excedió los límites de la Resolución 2254 de 2017 para ambos contaminantes.

Para el martes se observa de manera similar picos máximos de concentración en las primeras horas de la mañana, alcanzando los 41,62 µg/m³ para PM_{2.5} y 64,55 µg/m³ para PM₁₀. Con esta concentración máxima de PM_{2.5} se excedió tanto el límite de la OMS como de la Resolución 2254 de 2017, mientras que, para el caso del PM₁₀, solamente se sobrepasó el umbral de la OMS. A medida que avanza el día, los niveles de contaminación muestran una tendencia decreciente, aunque con fluctuaciones presentadas al medio día (28,10 µg/m³ para PM_{2.5} y 38,10 µg/m³ para PM₁₀) y al final del último periodo de monitoreo (30,97 µg/m³ para PM_{2.5} y 43,33 µg/m³ para PM₁₀), las cuales exceden el umbral de la OMS para PM_{2.5}, mientras que para PM₁₀, no se supera dicho estándar.



Figura 3. Variación temporal de $PM_{2.5}$ durante los días de la semana



Figura 4. Variación temporal de PM_{10} durante los días de la semana

El miércoles se evidencia un comportamiento similar al del día anterior, con concentraciones máximas de 43,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 68,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} registradas en horas de la mañana, superando para $\text{PM}_{2.5}$ tanto el límite de la OMS como el de la Resolución 2254 de 2017, al contrario, para PM_{10} , solamente se excedió el umbral de la OMS. En el transcurso del día, las concentraciones tienden a disminuir, sin embargo, se presentan ciertos incrementos puntuales al medio día (29,76 para $\text{PM}_{2.5}$ y 40,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}) y al final del periodo de 15:00-18:00 (31,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 54,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}), sobrepasando el estándar de la OMS para $\text{PM}_{2.5}$, mientras que para PM_{10} , el límite solo se superó al final de la jornada de monitoreo.

Durante el jueves, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} alcanzaron picos máximos durante las primeras horas del día (46,05 para $\text{PM}_{2.5}$ y 92,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}), al igual que en los días previos. Con estos valores máximos se excedieron tanto los límites de la OMS como los de la Resolución 2254 de 2017 para ambos contaminantes. A partir de las 8:00 se observa una disminución progresiva de las concentraciones, las cuales tienden a estabilizarse manteniéndose por debajo de los 26,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 35,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , de modo que, para $\text{PM}_{2.5}$ se superó el umbral de la OMS en la mayoría de los casos, mientras que para PM_{10} , las concentraciones se mantuvieron por debajo de este límite. Cabe destacar que a diferencia de los días martes y miércoles, no se presentaron incrementos pronunciados al medio día y al final del periodo de 15:00-18:00.

El viernes, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} muestran un comportamiento similar al del día anterior, alcanzando las mayores concentraciones al inicio de la jornada de monitoreo (38,12 para $\text{PM}_{2.5}$ y 57,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}), indicando que para $\text{PM}_{2.5}$ se sobrepasó tanto el umbral de la OMS como el de la Resolución 2254 de 2017, mientras que para PM_{10} , se excedió el límite de la OMS. En las horas posteriores se observa una disminución en las concentraciones que tienden a estabilizarse hasta el final del último periodo de monitoreo. Durante este lapso, la mayoría de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ permanecieron por encima del estándar de la OMS, mientras que las de PM_{10} se mantuvieron por debajo de dicho umbral.

Para el sábado se observa que las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} se mantuvieron relativamente estables a lo largo del día, teniendo en cuenta que no se presentaron cambios abruptos, exceptuando el periodo de 9:00-12:00, donde las concentraciones disminuyeron hasta los 9,11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 9,52 para PM_{10} , situándose por debajo de ambos límites para cada contaminante. De igual forma que los otros días, el pico máximo se presentó en horas de la mañana, con 34,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 46,45 para PM_{10} , superando los límites de la OMS.

Durante el domingo se evidencia que las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} se mantuvieron relativamente estables hasta el mediodía, a partir de este momento, las concentraciones comienzan a disminuir gradualmente hasta las 16:15, teniendo en cuenta que al final del periodo de 15:00-18:00 se presenta un leve incremento. Este patrón presenta ciertas similitudes con el comportamiento observado el día lunes. A diferencia de los demás días, el pico máximo de concentración se alcanzó en el periodo de 9:00-12:00, con valores de 27,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 41,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , superando el límite de la OMS para $\text{PM}_{2.5}$, mientras que para PM_{10} no se excedió este límite.

De manera general, las concentraciones de material particulado presentaron un comportamiento similar a lo largo de la semana, alcanzado los valores máximos en horas de la mañana y mostrando una tendencia decreciente en las horas posteriores. Sin embargo, este patrón fue menos evidente el sábado, ya que no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones registradas en el periodo de 6:00-9:00 y en la tarde. Por otro lado, se identificó una mayor concentración de material particulado durante los días hábiles en comparación con el domingo, donde las concentraciones fueron menores. En particular, el jueves registró el pico más alto de concentración, mientras que el domingo presentó el más bajo.

7.1.2. Concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ por periodo de medición y día de la semana

Las Figuras 5 y 6 muestran la distribución de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ para cada día de la semana en los cuatro periodos de monitoreo. En ellas se destacan los valores atípicos, así como las medias y medianas. Además, los valores obtenidos se contrastan con los límites recomendados por la OMS (2021) y la Resolución 2254 de 2017 (MinAmbiente, 2017). Este análisis facilita la identificación de tendencias diarias y la variación de material particulado en función del periodo de monitoreo.

En el periodo de 6:00-9:00, las concentraciones más altas se registraron el jueves con medianas de 31,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y 44,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀. Además, este día presentó la mayor variabilidad con un rango intercuartílico (IQR) de 10,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y de 19,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀. Cabe destacar que, para PM₁₀, se registró un valor atípico de 92,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el umbral de la Resolución 2254 de 2017. En contraste, los valores atípicos observados en los demás días se mantuvieron por debajo de este límite. Para PM_{2.5}, se presentaron valores atípicos los días martes, miércoles y viernes que excedieron dicho umbral.

Se evidencia que los días no hábiles registraron las menores concentraciones, así como una menor variabilidad. Esto se refleja en medianas más bajas en comparación con los días hábiles, exceptuando el lunes, cuyas medianas (17,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y 19,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀) son inferiores a las del sábado y domingo. Sin embargo, los datos registrados el lunes presentaron una mayor variabilidad. Con respecto a los límites de la OMS, se observa que para PM_{2.5}, las medianas de todos los días superaron dicho umbral, a diferencia del PM₁₀, donde las medianas no superaron este límite en su mayoría.

En el periodo de 9:00-12:00, se observa una disminución en las concentraciones de material particulado para la mayoría de los días en comparación con el periodo anterior. Sin embargo, el domingo presenta un comportamiento distinto, registrando una mediana más alta y una mayor dispersión. De hecho, las medianas de PM_{2.5} (17,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y PM₁₀ (19,55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) alcanzaron sus valores más elevados en este periodo, lo que indica que las concentraciones fueron significativamente mayores este día. Se destaca que, para este día, la mediana se encuentra más próxima al tercer cuartil, lo que sugiere que la mayoría de las mediciones se concentraron en niveles altos.

Se observa que las medianas de $PM_{2.5}$ correspondientes a los días martes, miércoles, viernes y sábado permanecieron por debajo del límite establecido por la OMS, mientras que para los días lunes, jueves y domingo superaron dicho umbral. En contraste, para PM_{10} , ninguna de las medianas sobrepasó este límite. Por último, se destaca la presencia de valores atípicos en todos los días, lo que indica una alta variabilidad en las concentraciones, influenciada por las condiciones específicas de este periodo.

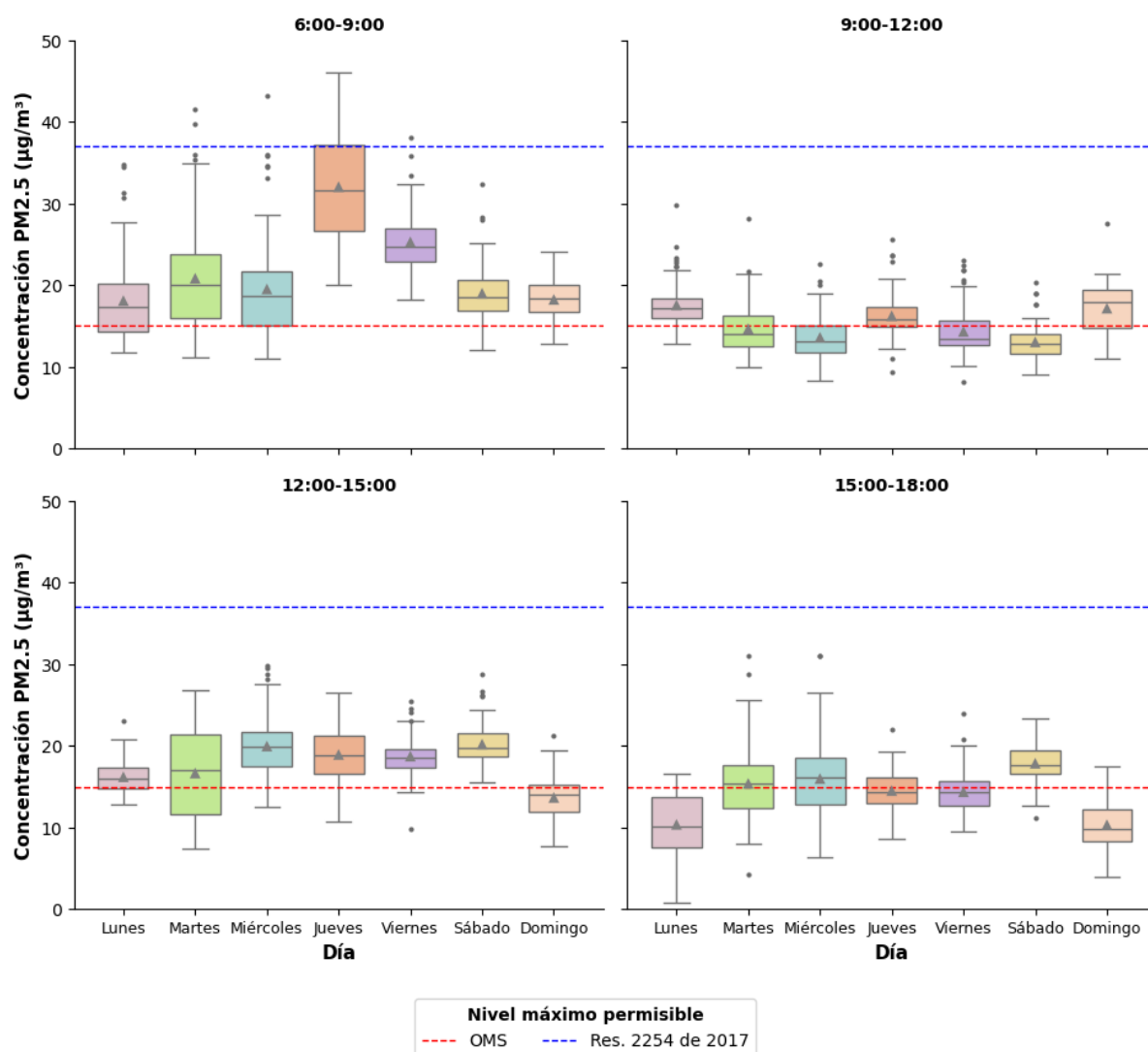


Figura 5. Concentraciones de $PM_{2.5}$ por periodo y día

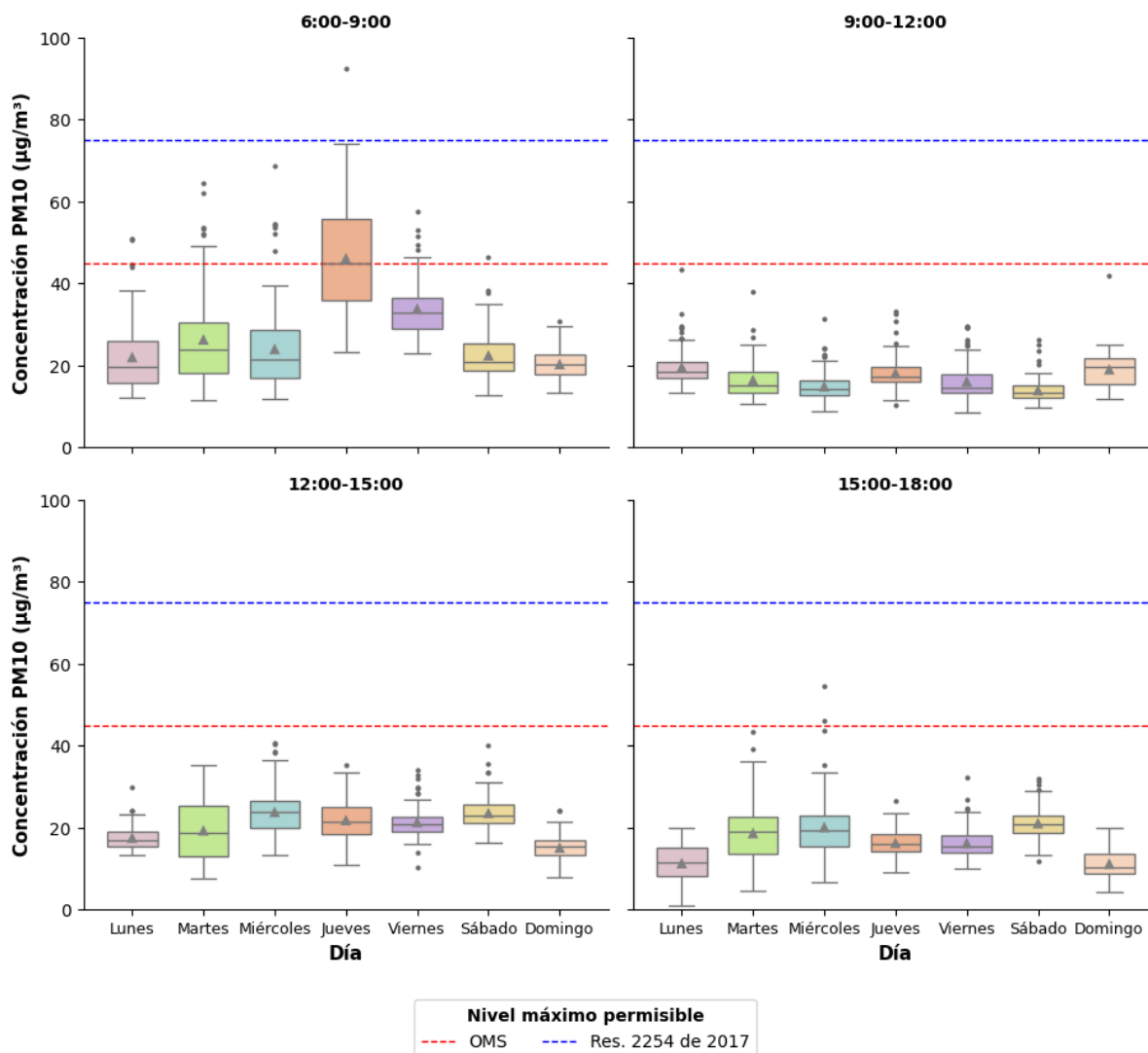


Figura 6. Concentraciones de PM₁₀ por periodo y día

Durante el periodo de 12:00-15:00, se observa un incremento en las concentraciones con respecto al periodo anterior, aunque sin superar las registradas en el periodo de 6:00-9:00. Esto se evidencia en que, con excepción del domingo, las medianas de todos los días superaron el umbral de 15 µg/m³ recomendado por la OMS para PM_{2.5}, mientras que, para PM₁₀ no se superó el límite de 45 µg/m³. Asimismo, se observa una mayor variabilidad en la mayoría de los días en comparación con el periodo de 9:00-12:00, reflejada en un IQR más amplio. En particular, el martes presentó la mayor dispersión de los datos con un IQR de 9,73 µg/m³ para PM_{2.5} y 12,22 µg/m³ para PM₁₀. Los días miércoles y sábado presentaron las medianas más altas, con valores de 19,86 µg/m³ y 19,82 µg/m³ para PM_{2.5}, y 23,73 µg/m³ y 22,95 µg/m³ para PM₁₀, respectivamente. Además, los valores atípicos de estos días alcanzaron los niveles máximos, aunque sin exceder los límites de la Resolución 2254 de 2017.

Las concentraciones del periodo de 15:00-18.00 muestran una reducción respecto al periodo anterior, también se observa que el rango inferior es más amplio lo que indica que se alcanzaron niveles más bajos en este periodo. Particularmente, los días lunes y domingo registraron las

concentraciones más bajas, con sus primeros cuartiles situados en $7,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, y $8,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , respectivamente, lo que indica que el 25% de los datos son inferiores a estos valores. El lunes presentó la mayor variación de los datos con un IQR de $6,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $6,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Con respecto a las medianas, los días martes, miércoles y sábado excedieron el estándar de la OMS para $\text{PM}_{2.5}$, mientras que para PM_{10} , ninguna sobrepasó este límite. Sin embargo, el miércoles se registraron dos valores atípicos por encima de dicho umbral. La mediana más alta de este periodo se presentó el sábado, con $17,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $20,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

A diferencia del periodo de 6:00-9:00, donde se evidencia una diferencia significativa en las concentraciones registradas entre los días hábiles y no hábiles, en los demás periodos no se observó este comportamiento, ya que, en estos periodos, las medianas más altas se registraron en al menos un día no hábil, principalmente el sábado.

A modo de conclusión, se observa una disminución de las concentraciones de material particulado en el transcurso del día. En el periodo de 6:00-9:00 se alcanzaron las concentraciones más altas, siendo el único en donde se registraron valores que superaron los límites establecidos por la Resolución 2254 de 2017, lo que indica que este rango horario representa el escenario más crítico en términos de contaminación. En contraste, los niveles más bajos se presentaron en el periodo de 15:00-18:00. No obstante, el periodo de 9:00-12:00 mostró un comportamiento más estable, sin alcanzar los niveles máximos observados en los demás periodos y manteniéndose por debajo de los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

En cuanto a la variabilidad entre días, no se identificó una tendencia clara, ya que cada periodo presentó un comportamiento distinto. Sin embargo, se observó que el domingo registró las concentraciones más bajas en la mayoría de los periodos, con excepción del periodo de 9:00-12:00. Además, se destaca el comportamiento del día lunes, cuyas concentraciones se asemejan a las de los días no hábiles, esto se podría atribuir a que las mediciones incluyeron días festivos correspondientes al 13 de mayo y 01 de julio.

7.1.3. Concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} por punto de monitoreo, periodo de medición y día de la semana

En las Figuras 7 y 8 se presentan las medias de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} por día y periodo en cada punto de medición. En estas, el promedio de cada periodo se representa con un símbolo y color diferente, mientras que las barras de error indican el rango de variación de los datos. Esto permite analizar la variabilidad de los datos y comparar tendencias entre diferentes días, periodos y puntos de monitoreo.

En términos generales, se evidencia el patrón general previamente identificado en todos los puntos de monitoreo, caracterizado por concentraciones máximas de material particulado en el periodo de 6:00-9:00, seguido de una disminución en los periodos posteriores.

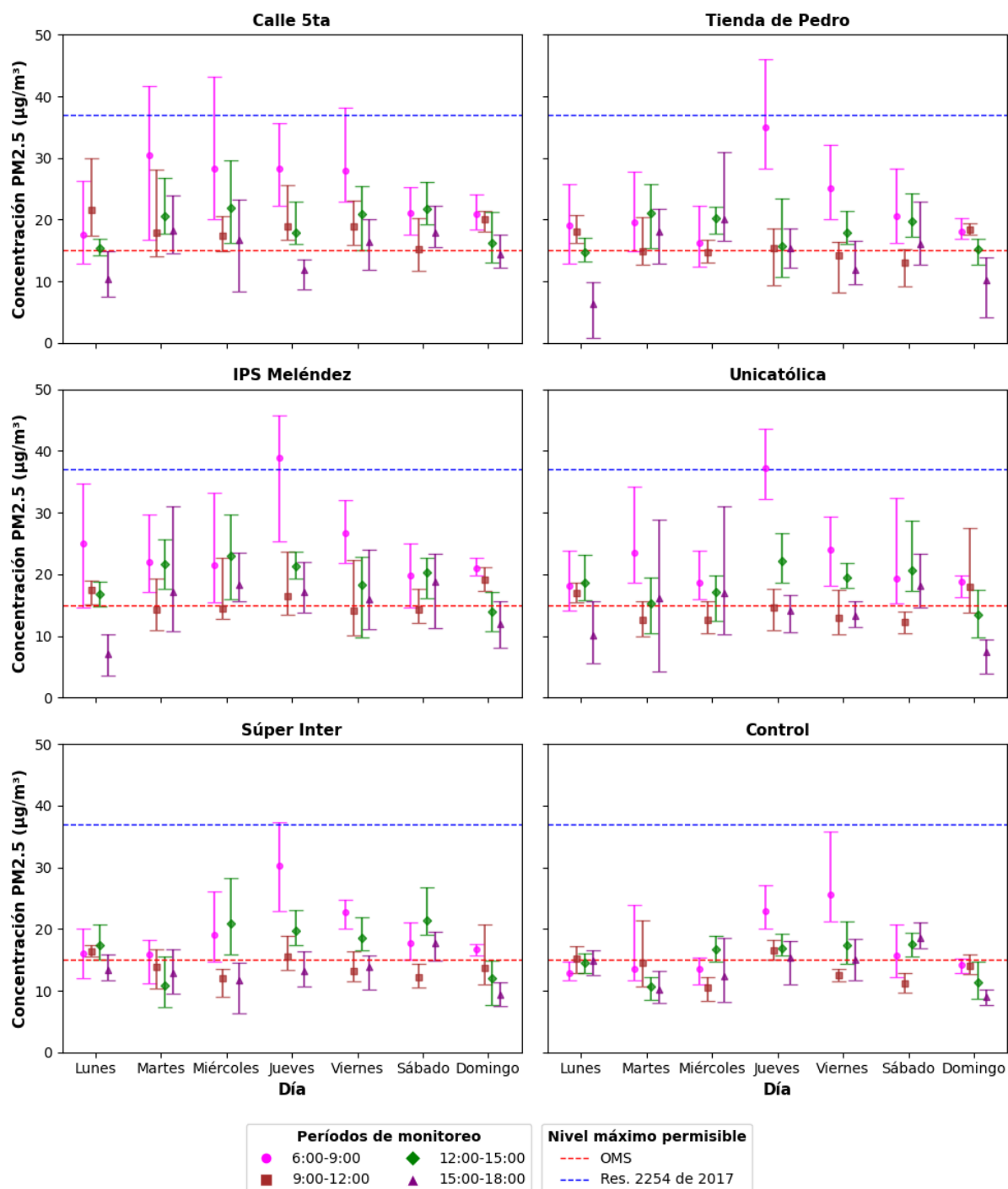


Figura 7. Concentraciones de PM_{2.5} por punto, periodo y día

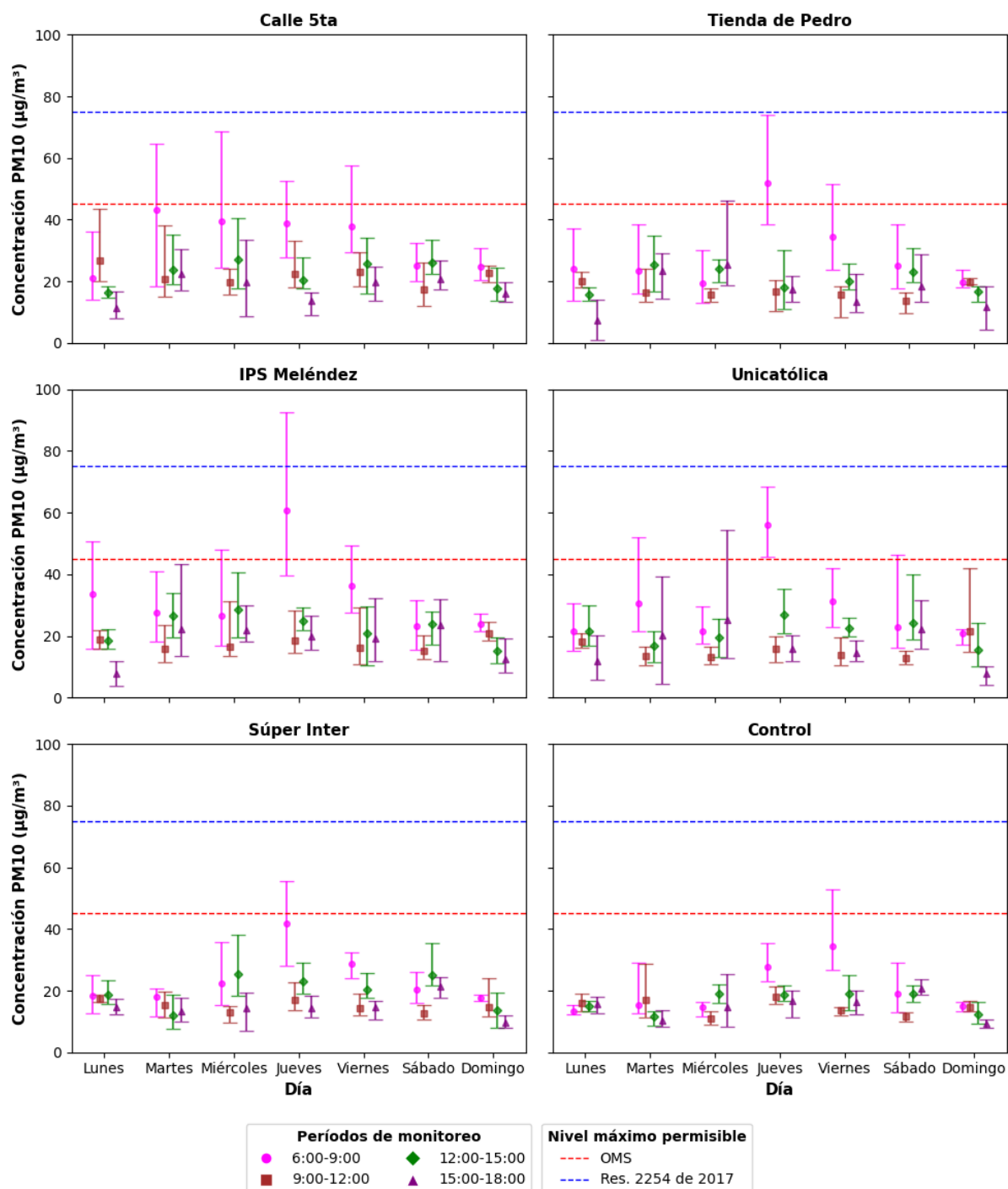


Figura 8. Concentraciones de PM₁₀ por punto, periodo y día

Para Calle 5ta, los días lunes y sábado presentan una excepción a este patrón, registrando los valores promedio más altos en los periodos de 9:00-12:00 y 12:00-15:00, respectivamente. Este comportamiento podría estar asociado a variaciones específicas en el flujo vehicular o en las actividades comerciales de la zona durante estos días. Durante los días martes, miércoles, jueves y viernes se alcanzan los promedios más altos alrededor de los 30 µg/m³ para PM_{2.5} y 40 µg/m³ para PM₁₀, superando el límite de la OMS para PM_{2.5}, al contrario de PM₁₀, que se situaron por debajo del umbral de 45 µg/m³. En general, se evidencia que la mayoría de

concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas excedieron el límite de $15 \mu g/m^3$, exceptuando ciertos valores obtenidos en el periodo de 15:00-18:00 principalmente. En contraste, las concentraciones de PM_{10} se encuentran mayormente por debajo del límite de $37 \mu g/m^3$, salvo por algunos registros en el periodo de 6:00-9:00. Por último, los martes y miércoles muestran la mayor variabilidad, con valores que superaron el umbral establecido en la Resolución 2254 de 2017 para $PM_{2.5}$, mientras que, en el caso de PM_{10} , las concentraciones se mantuvieron por debajo del límite normativo.

En Tienda de Pedro, la concentración promedio máxima se registró el jueves en el período de 6:00-9:00, con $35 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $51,99 \mu g/m^3$ para PM_{10} , asimismo, la mayor dispersión también se presentó en este día y periodo, de modo que, se superó para $PM_{2.5}$ el estándar de la Resolución 2254 de 2017, y aunque para PM_{10} no se excedió el límite de $75 \mu g/m^3$, se alcanzó un valor máximo de $74,01 \mu g/m^3$. Los niveles más bajos se registraron el lunes y domingo en el periodo de 15:00-18:00, con concentraciones promedio de $6,33 \mu g/m^3$ y $10,17 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$, y $7,19 \mu g/m^3$ y $11,76 \mu g/m^3$ para PM_{10} , respectivamente, situándose por debajo de los estándares de la OMS.

En IPS Meléndez se presentó la concentración promedio más alta entre todos los puntos de monitoreo, con valores de $38,88 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $60,67 \mu g/m^3$ para PM_{10} , registrados el jueves en el periodo de 6:00-9:00, con los que se superó el límite de la Resolución 2254 de 2017 para $PM_{2.5}$, mientras que, para PM_{10} , se mantuvo por debajo de este límite. Además, durante este día y periodo se presentó la mayor dispersión de los datos, con valores que oscilaron entre $25,34 \mu g/m^3$ y $45,80 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$, y $39,68 \mu g/m^3$ y $92,52 \mu g/m^3$ para PM_{10} , respectivamente, de modo que, se excedieron los umbrales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 para ambos contaminantes. Por otro lado, la concentración promedio más baja se presentó el día lunes en el periodo de 15:00-18:00, con $7,12 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $7,81 \mu g/m^3$ para PM_{10} , sin sobrepasar los límites recomendados por la OMS.

En Unicatólica, al igual que en Calle 5ta, los días lunes y sábado no siguieron el patrón general de mayores concentraciones en el periodo de 6:00-9:00. En su lugar, los promedios más altos se registraron en el periodo de 12:00-15:00, aunque sin una diferencia significativa respecto a los valores observados en el primer periodo de monitoreo. Por otro lado, la mayor variabilidad se observa los días martes y miércoles en el periodo de 15:00-18:00. Sin embargo, la mayor concentración promedio se registró el jueves en el periodo de 6:00-9:00, con valores de $37,28 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $55,96 \mu g/m^3$ para PM_{10} , excediendo el límite de la Resolución 2254 de 2017 para $PM_{2.5}$, a diferencia de PM_{10} , que no se superó. Las concentraciones promedio más bajas se registraron, al igual que en Tienda de Pedro, los días lunes y domingo, con $10,12 \mu g/m^3$ y $7,37 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$, y $11,76 \mu g/m^3$ y $7,78 \mu g/m^3$ para PM_{10} , manteniéndose por debajo de los estándares de la OMS.

En Súper Inter y Control se registraron las menores concentraciones en comparación con los demás puntos de monitoreo, con valores promedio que en su mayoría no superaron los $20 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $25 \mu g/m^3$ para PM_{10} . Por su parte, la concentración promedio más alta en Súper Inter se presentó en el periodo de 6:00-9:00, con $30,19 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $41,73 \mu g/m^3$ para

PM₁₀, mientras que, en Control, se registró el viernes en el mismo periodo de monitoreo, con 25,53 µg/m³ para PM_{2.5} y 34,53 µg/m³ para PM₁₀, sin superar los límites de la Resolución 2254 de 2017. También se evidencia que la mayor dispersión de los datos coincide con los días y periodos en donde se presentó la concentración promedio más alta.

En conclusión, aunque Tienda de Pedro, IPS Meléndez y Unicatólica registraron concentraciones promedio más altas que Calle 5ta, estos valores máximos corresponden a picos eventuales asociados a episodios de alta contaminación ocurridos el jueves. En contraste, Calle 5ta presentó concentraciones elevadas en la mayoría de los días de la semana, lo que indica una mayor exposición acumulada a material particulado. Por otro lado, Súper Inter y Control registraron las concentraciones más bajas, lo que sugiere que son los puntos de monitoreo con menor exposición dentro de la zona de estudio.

7.1.4. Concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ por punto de monitoreo y periodo de medición

En la Tabla 5 se presentan las concentraciones promedio de material particulado por punto de monitoreo y periodo de medición. Estos valores se calcularon sin distinguir entre días de la semana, con el fin de ofrecer una visión general de la variación espacial y temporal de las concentraciones en el área de estudio.

Tabla 5. Concentraciones promedio de PM_{2.5} y PM₁₀ por punto y periodo

Periodo de medición	Punto de monitoreo						Promedio	
	Calle 5ta	Tienda de Pedro	IPS Meléndez	Unicatólica	Súper Inter	Control		
PM _{2,5}	6:00-9:00	24,9 ± 6,3	21,9 ± 6,9	24,9 ± 7,3	22,8 ± 7,0	19,8 ± 5,3	16,9 ± 5,4	21,9 ± 6,7
	9:00-12:00	18,6 ± 3,1	15,5 ± 2,4	15,7 ± 2,9	14,3 ± 2,7	13,9 ± 2,1	13,5 ± 2,6	15,2 ± 3,1
	12:00-15:00	19,2 ± 3,5	17,8 ± 3,1	19,3 ± 3,6	18,1 ± 3,6	17,2 ± 4,5	15,0 ± 3,0	17,8 ± 3,8
	15:00-18:00	15,1 ± 3,4	14,0 ± 5,1	15,2 ± 4,9	13,7 ± 4,8	13,1 ± 2,8	13,6 ± 3,5	14,1 ± 4,3
	Promedio	19,5 ± 5,5	17,3 ± 5,6	18,8 ± 6,3	17,2 ± 6,0	16,0 ± 4,7	14,8 ± 4,0	17,3 ± 5,6
PM ₁₀	6:00-9:00	32,9 ± 11,6	28,3 ± 12,6	33,1 ± 14,4	29,1 ± 13,0	23,9 ± 9,0	19,9 ± 8,6	27,9 ± 12,6
	9:00-12:00	21,8 ± 5,0	16,9 ± 2,9	17,5 ± 3,9	15,5 ± 4,0	14,9 ± 2,6	14,5 ± 3,5	16,9 ± 4,5
	12:00-15:00	22,4 ± 5,7	20,3 ± 4,7	22,7 ± 5,6	20,9 ± 5,2	19,7 ± 6,0	16,4 ± 3,4	20,4 ± 5,6
	15:00-18:00	17,7 ± 5,0	16,7 ± 7,2	18,2 ± 7,1	16,8 ± 7,9	14,6 ± 3,7	14,8 ± 4,2	16,5 ± 6,2
	Promedio	23,7 ± 9,2	20,6 ± 9,1	22,9 ± 10,7	20,6 ± 9,8	18,3 ± 7,0	16,4 ± 5,8	20,4 ± 9,1

Las concentraciones promedio refuerzan el patrón previamente descrito, con valores elevados en el periodo de 6:00-9:00 en todos los puntos de monitoreo. En este periodo, Calle 5ta e IPS Meléndez registraron las medias más altas, con 24,9 µg/m³ para PM_{2.5}, y 32,9 y 33,1 µg/m³ para PM₁₀, respectivamente. Conforme avanza la jornada, se observa una disminución en los

niveles de PM, con las concentraciones más bajas registradas en los periodos de 9:00-12:00 y 15:00-18:00. Cabe destacar un leve repunte en las concentraciones durante el periodo de 12:00-15:00, con incrementos del 17% para PM_{2.5} y del 21% para PM₁₀ respecto al periodo anterior, aunque sin alcanzar los niveles observados en las primeras horas del día, lo que concuerda con las tendencias observadas en las series temporales.

En cuanto a la distribución espacial, Calle 5ta e IPS Meléndez registraron las concentraciones medias más altas durante toda la jornada de monitoreo de manera consistente, lo que sugiere la presencia de fuentes locales de emisión o condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de contaminantes en estos puntos. En contraste, Súper Inter y Control presentaron los valores más bajos, mientras que Tienda de Pedro y Unicatólica mostraron concentraciones intermedias, con variaciones mínimas entre sí.

Por otro lado, el análisis de la desviación estándar muestra que la mayor heterogeneidad espacial se presentó en los periodos de 6:00-9:00 y 15:00-18:00, con coeficientes de variación (CV) entre el 32% y 45%. En los demás periodos, el CV no superó el 27%, lo que indica una mayor dispersión en los niveles de material particulado al inicio y al final de la jornada de monitoreo.

7.1.5. Análisis y discusión de los resultados sobre las concentraciones de material particulado

Los resultados evidencian un patrón horario consistente entre los días de la semana, caracterizado por picos de concentración en horas de la mañana y una posterior disminución a lo largo del día. Durante los días hábiles, las concentraciones máximas variaron según el día de la semana, oscilando entre 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 46,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5}, y entre 50,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 92,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀. Este comportamiento puede estar asociado con el incremento del tráfico vehicular en horas de la mañana, como consecuencia de los desplazamientos hacia los lugares de trabajo, estudio y otras actividades productivas.

Estudios realizados en otras ciudades del mundo reportaron patrones similares en la variación diurna de material particulado. En cinco megaciudades de la India (Chennai, Calcuta, Hyderabad, Bombay y Nueva Delhi) se alcanzaron picos de PM_{2.5} entre las 8:00 y 10:00, mientras que los niveles más bajos se registraron entre las 15:00 y 16:00 (Singh *et al.*, 2021). De igual manera, en las cuatro regiones tailandesas, los niveles máximos de PM_{2.5} se presentaron entre las 8:00 y 11:00 (Buya *et al.*, 2024). En el Área Metropolitana de Lima también se alcanzaron concentraciones máximas de PM_{2.5} y PM₁₀ en horas de la mañana, específicamente entre las 6:00 y 10:00 (Campos *et al.*, 2024). En el contexto nacional también se identificaron similitudes en la variación horaria de material particulado. En ciudades como Bogotá, Caldas, Itagüí y Medellín, se presentan dos picos en la concentración de PM_{2.5} a lo largo del día: un máximo en la mañana, entre las 8:00 y 9:00, y otro en la noche, entre las 21:00 y 22:00 (Casallas *et al.*, 2022).

Tanto en los estudios nacionales como internacionales, los niveles elevados de material particulado registrados en la mañana se asociaron con el tráfico vehicular. Esto responde al

hecho de que las emisiones del transporte son una fuente significativa de PM en centros urbanos (Grange *et al.*, 2021; Hay *et al.*, 2023; Belachsen & Broday, 2024). En un metaanálisis que incluyó 169 ciudades a nivel mundial, Heydari *et al.* (2020) estimaron que el tráfico contribuye, en promedio, con el 27% de las emisiones de PM, variando entre el 5% y 61% dependiendo de la región y el tamaño poblacional.

La influencia del tráfico en los niveles de material particulado también ha sido evidenciada en contextos particulares, como durante los confinamientos por la pandemia de COVID-19. Durante ese periodo, las concentraciones de PM se redujeron, en promedio, en un 38% a nivel mundial (Vang *et al.*, 2020). En Shanghái, los niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ disminuyeron en un 34,4% y 31,9%, respectivamente, en estaciones de monitoreo de carretera durante los primeros cuatro meses del 2020, en comparación con el mismo periodo de los años 2018 y 2019 (Wu *et al.*, 2021). Arregocés *et al.* (2021) analizaron las concentraciones de PM_{2.5} antes y durante el confinamiento (enero-junio 2020), reportando que, en Bogotá, las concentraciones semanales de PM_{2.5} se redujeron entre un 41% y 84%. En ambos estudios, las reducciones en los niveles de PM se asociaron con las restricciones al transporte durante los periodos de confinamiento.

Los datos de una estación maestra ubicada aproximadamente a 600 m del área de estudio, en la intersección de la Calle 13 con Carrera 100, indican que, para el año 2014, la mayor concentración vehicular se presentó a las 7:00 y 8:00, registrando un pico de 3.727 vehículos y 2.324 motocicletas a las 7:00 (Figura 9). En un estudio más reciente, Echeverry *et al.* (2023) analizaron la variabilidad temporal del parque automotor en la ciudad durante el primer semestre del 2020, reportando que los registros de una cámara de fotodetección cercana a la estación Univalle mostraron un incremento en el tránsito vehicular desde las 6:00. Este cambio en los horarios de mayor flujo vehicular se relaciona con la modificación de la medida de Pico y Placa, que restringe el tránsito vehicular durante los días hábiles según el último dígito de la placa. En 2014, esta medida regía de 7:00 a 10:00, y de 17:00 a 20:00 (Alcaldía de Santiago de Cali, 2014), mientras que para 2020, operaba de 6:00 a 10:00, y de 16:00 a 20:00 (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020).

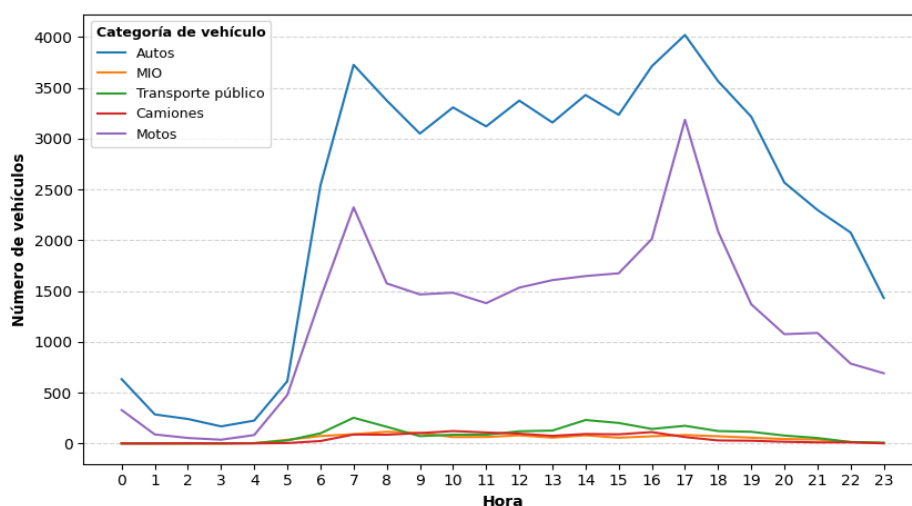


Figura 9. Variación horaria del volumen vehicular, Calle 13 con Carrera 100, 2014

Fuente: Elaboración propia con base en datos del DAPM & Universidad del Valle (2015)

Cabe destacar que, en el 2024, cuando se llevó a cabo el monitoreo de material particulado en la zona de estudio, la medida de Pico y Placa se extendió de 6:00 a 20:00 de manera continua (Alcaldía de Santiago de Cali, 2024-a), por lo que se esperaría una reducción de la densidad vehicular en horas de la tarde, con una consecuente disminución en los niveles de PM. No obstante, se debe tener en cuenta que el parque automotor en la ciudad ha crecido sostenidamente en los últimos años, con un incremento del 224,47% entre el 2000 y 2019. Además, las motocicletas, las cuales están exentas de la medida del Pico y Placa, han presentado un crecimiento acelerado desde 2009, con una tasa de motorización de 88,96 motocicletas por cada 1.000 habitantes en el año 2019 (DAPM, 2020). En ese sentido, la dinámica del flujo vehicular en la ciudad de Cali sugiere que otros factores, como las condiciones meteorológicas, podrían tener una mayor influencia en las menores concentraciones observadas en horas de la tarde.

De acuerdo con Bamola *et al.* (2024), las condiciones meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la humedad relativa y la altura de la capa límite atmosférica (CLA) influyen significativamente en las concentraciones de material particulado. Zoran *et al.* (2020) determinaron una correlación positiva entre los niveles de PM y la humedad relativa, y correlaciones negativas con la temperatura, la velocidad del viento y la CLA. En particular, a una mayor altura de la CLA se favorece la dispersión y dilución de contaminantes cerca de la superficie terrestre, lo que conlleva a una disminución en los niveles de PM. De forma similar, velocidades del viento intensas contribuyen a reducir las concentraciones de PM, debido a que facilitan la dispersión horizontal de los contaminantes (Cichowicz *et al.*, 2020).

En línea con lo anterior, Casallas *et al.* (2022) identificaron tres picos en la variación diurna de PM_{2.5} en la ciudad de Cali: un máximo en la mañana (8:00-9:00) y otros de menor intensidad al mediodía (12:00-16:00) y en la noche (21:00-22:00). Este comportamiento coincide con lo observado los días martes y miércoles, principalmente, cuando alrededor del mediodía se presentó un incremento en los niveles de PM. Los autores señalaron una correlación fuerte entre el tráfico vehicular y las concentraciones de PM_{2.5} antes del mediodía. Por el contrario, después del mediodía encontraron una correlación débil entre estas dos variables.

Con el fin de explicar el comportamiento del PM_{2.5} después del mediodía, los autores analizaron la velocidad del viento, sus componentes y la altura de la CLA (Figura 10). En sus resultados, encontraron que el pico del mediodía podría estar asociado con la presencia de vientos meridionales (de norte a sur) entre las 12:00 y las 16:00, que favorecerían la advección de contaminantes desde Yumbo, una de las ciudades industriales más contaminadas del país, ubicada al norte de Cali. Asimismo, indicaron que este pico fue de menor intensidad en comparación con el matutino debido a una CLA más elevada y mayores velocidades del viento. Finalmente, explicaron que, a partir de las 15:00, el cambio en la dirección del viento (de sur a norte), junto con su intensificación y una CLA más desarrollada, podría estar relacionado con la disminución de los niveles de PM_{2.5} hacia las últimas horas de la tarde.

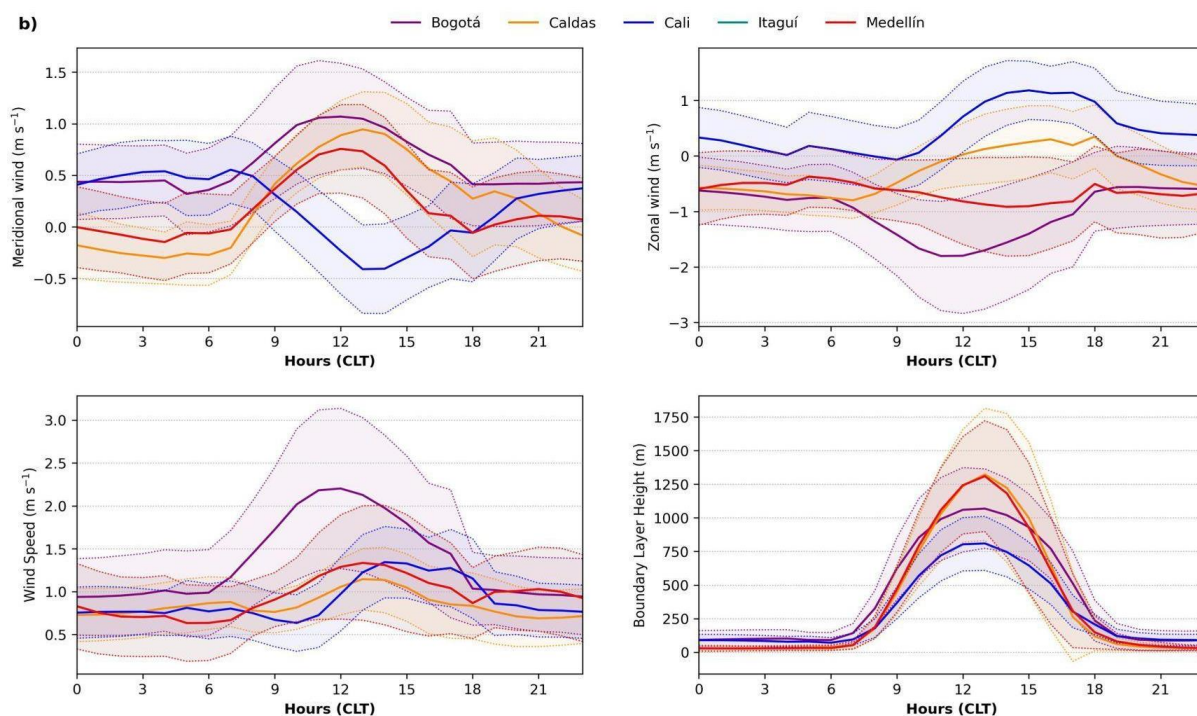


Figura 10. Variación horaria de las componentes meridional y zonal del viento, su velocidad y la altura de CLA

Fuente: Casallas *et al.* (2022)

En otro estudio, Echeverry *et al.* (2021) evidenciaron una disminución significativa en las concentraciones de material particulado en la ciudad de Cali entre las 16:00 y 19:00, asociada con un aumento notable en la velocidad del viento. El DAGMA, la CVC, la Universidad del Valle & el Clean Air Institute (2017) afirman lo anterior en el Programa Aire Limpio Cali, donde se señala que las velocidades del viento más intensas en la ciudad se presentan entre las 14:00 y 19:00, mientras que los valores más bajos se registran entre las 20:00 y las 7:00.

En la Figura 11 se presenta la variación diurna de la velocidad del viento promedio, a partir de datos registrados durante el primer trimestre del 2024 en la estación Univalle. Se observa que las velocidades más bajas se presentan a partir de las 20:00 hasta las primeras horas del día. En contraste, a partir de las 13:00, la velocidad del viento comienza a intensificarse progresivamente, alcanzando su punto máximo entre las 15:00 y 17:00, con valores promedio que superan los 2 m/s. Este comportamiento coincide con la disminución en los niveles de PM en las últimas horas de la tarde. En el periodo de 15:00-18:00, se registraron las concentraciones medias más bajas ($14,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $16,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}) en comparación con los demás periodos de monitoreo. Incluso, se registraron concentraciones inferiores a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, especialmente los días lunes y domingo. Estos resultados sugieren que el aumento en la velocidad del viento durante estas horas contribuye a la dispersión del material particulado, y por tanto, a la reducción de sus concentraciones.

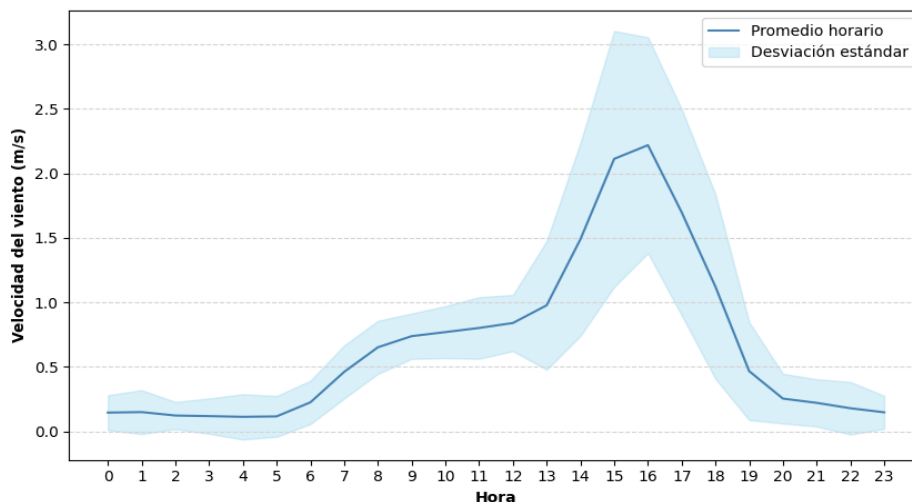


Figura 11. Variación diurna de la velocidad del viento, estación Univalle, primer trimestre 2024)

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire [SISAIRE] (2025)

Por otro lado, se identificaron patrones en el comportamiento semanal de material particulado, evidenciando una disminución en las concentraciones durante el domingo, cuando se registraron los valores más bajos, incluso inferiores a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto podría estar relacionado con una reducción del tránsito vehicular, como se observó durante las jornadas de monitoreo en el área de estudio. Silva & Canchala (2013) analizaron el comportamiento de PM_{10} en cuatro estaciones de monitoreo de la ciudad de Cali, reportando un incremento en los niveles de lunes a sábado y una disminución el domingo, atribuida a una reducción notable en la actividad vehicular. De manera similar, en el Área Metropolitana de Lima se evidenció una reducción en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} durante el día domingo, asociada también a una menor circulación de vehículos (Campos *et al.*, 2024). En el caso particular de Cali, este comportamiento podría estar relacionado con el programa Ciclovida, que restringe la circulación de vehículos motorizados en 38 km de vías durante los domingos, de 8:00 a 13:00, con el fin de adecuarlas como ciclovías y así promover hábitos y estilos de vida saludables (Alcaldía de Santiago de Cali, 2024-b, 2024-c, 2025).

Durante toda la jornada de monitoreo, Calle 5ta presentó concentraciones promedio altas de material particulado en la mayoría de los días de la semana (martes, miércoles, jueves y viernes), con valores aproximados de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Este comportamiento podría estar influenciado por diversos factores, entre ellos la presencia de una intersección controlada por semáforos en este punto de monitoreo, así como la cercanía de la estación de servicio Terpel Campestre Meléndez, ubicada a 38 m aproximadamente.

Estos resultados son consistentes a los reportados por Rua & López (2021), quienes evaluaron la variabilidad espacial de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} en las principales vías de Barranquilla, encontrando que los valores más altos se registraron en zonas con alta densidad de semáforos y cámaras de fotodetección. Estos elementos obligan a los vehículos a detenerse

o reducir la velocidad, generando cambios en los patrones de conducción, como ralenti, aceleración, desaceleración y conducción constante. Dichas variaciones en la dinámica vehicular resultan en una combustión incompleta dentro del motor, lo que provoca una mayor emisión de material particulado desde el tubo de escape (Gokhale & Raokhande, 2008; He & Gao, 2021; Mesa, 2024).

De manera similar, Franco (2020) encontró que las concentraciones de PM eran más elevadas en vías principales donde convergen rutas de transporte público, como buses, busetas y colectivos que utilizan diésel como combustible. Este tipo de vehículos no solo son fuentes significativas de PM y NOx, sino que también contribuyen con partículas derivadas del desgaste de llantas y frenos. Espitia & Porras (2017) confirmaron esta contribución, determinando que el desgaste de neumáticos y frenos puede representar el 9,2% y 9% de las emisiones totales de PM, respectivamente. Asimismo, encontraron que estas emisiones se intensifican en zonas con semáforos y resaltos, debido al aumento en el desgaste de los componentes vehiculares asociado a la reducción de velocidad obligada.

Teniendo en cuenta lo anterior, resulta importante destacar que el punto de monitoreo Calle 5ta se encuentra sobre una de las principales arterias viales de la ciudad, que la atraviesa de norte a sur. Además, la proximidad de la estación del MIO Meléndez, ubicada aproximadamente a 34 m, contribuye considerablemente a las emisiones de PM, debido al flujo constante de buses del sistema de transporte masivo, muchos de los cuales usan diésel como combustible (Alcaldía de Santiago de Cali, 2021). Šarkan *et al.* (2023) reportaron que las concentraciones más elevadas de material particulado en una ciudad del centro de Eslovaquia se registraron en una estación de buses, en comparación con un cruce ferroviario y una zona cercana a una escuela primaria, lo que subraya el impacto del transporte público sobre los niveles de PM.

Por otro lado, otros estudios han señalado que las estaciones de servicio pueden ser fuentes adicionales de material particulado, contribuyendo al deterioro de la calidad del aire (Okonkwo *et al.*, 2015). Avellaneda (2023), por ejemplo, identificó que una de las principales fuentes de contaminación para la unidad residencial San Cayetano, ubicada en la Avenida Circunvalar del municipio de Jamundí, era la estación de abastecimiento de combustibles de la compañía Terpel, localizada a 34,31 m, donde se observaron que las mayores concentraciones de PM se registraron los días martes, miércoles y jueves, durante la noche, coincidiendo con la franja horaria en la que se llevaba a cabo el descargue de combustible.

Por otro lado, si bien los puntos de monitoreo Tienda de Pedro, IPS Meléndez y Unicatólica registraron concentraciones promedio más bajas que Calle 5ta durante la mayoría de los días, se presentó una excepción el día jueves, cuando estos puntos alcanzaron concentraciones promedio más altas. Este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de intersecciones viales de doble sentido (Calle 4e, 4d y 4c, respectivamente), que generan cambios en la dinámica vehicular, pero también con otros factores, como los meteorológicos y topográficos, los cuales desempeñan un papel importante, ya que su interacción puede afectar la dispersión y concentración del material particulado en puntos específicos. En particular, la presencia de cambios en la pendiente, obstáculos naturales o artificiales, así como la dirección

y velocidad del viento, pueden contribuir a la acumulación de contaminantes en determinadas áreas (Huong *et al.*, 2024; Arrieta, 2016).

Adicionalmente, es importante considerar fuentes locales específicas. En el punto de monitoreo IPS Meléndez, se identificó la presencia de una panadería en la que se realizan procesos de fritura de alimentos, lo que podría influir en los altos niveles registrados de PM. Al respecto, autores como Tang *et al.* (2024) y Rong *et al.* (2024) identificaron que la fritura genera emisiones significativamente mayores en comparación con otros métodos de cocción, especialmente después de añadir alimentos al aceite caliente. De hecho, las concentraciones pueden duplicarse respecto al aceite calentado sin alimentos. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Tang & Pfrang (2023), quienes concluyeron que los métodos de cocción basados en aceite producen niveles de PM mucho más altos que los basados en agua.

Por su parte, el punto de monitoreo Unicatólica podría estar influenciado por la presencia de puestos informales de venta de comida ubicados en sus alrededores, donde se quema leña y carbón para la cocción de alimentos. Esta práctica, junto con factores meteorológicos como el viento, podría representar una fuente significativa de PM en la zona. Estudios como los de Díaz *et al.* (2021) y Mencarelli *et al.* (2023) han demostrado que la cocción con combustibles sólidos incrementa notablemente las concentraciones de PM, influida no solo por el tipo de combustible utilizado, sino también por variables como el método de cocción, las temperaturas alcanzadas, la cantidad de aceite empleado y el contenido graso de los alimentos (Alves *et al.*, 2022; Arar *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2015).

En contraste, los puntos de monitoreo Súper Inter y Control registraron las concentraciones más bajas de material particulado. En el caso de Súper Inter, aunque se encuentra ubicado sobre la Carrera 94, vía de alta afluencia vehicular, este punto presenta la particularidad de que predominan vehículos estacionados o en reposo, debido a la presencia del supermercado, lo que podría reducir las emisiones derivadas del tráfico vehicular.

Por su parte, el punto de monitoreo Control se caracteriza por su ubicación en la Carrera 93, encontrándose más alejado de la vía principal con respecto a los demás puntos, específicamente a 87 m aproximadamente, lo cual puede influir de manera directa en la reducción de las concentraciones de contaminantes. Estos resultados coinciden con lo reportado por Chun *et al.* (2020) y Conde (2021), quienes encontraron en sus estudios que los puntos más alejados de vías con alta circulación vehicular presentan las menores concentraciones de material particulado. Así mismo, estos hallazgos coinciden con lo reportado por Echeverry *et al.* (2023), quienes analizaron la variación temporal y espacial del tráfico en Cali y su relación con la concentración de PM. En su estudio, encontraron que las áreas con mayor circulación vehicular presentaban concentraciones significativamente elevadas de PM en comparación con zonas de menor flujo.

Cabe destacar el comportamiento de estos puntos durante el jueves (Súper Inter) y el viernes (Control), ya que en dichos días se registraron concentraciones promedio significativamente más altas en comparación con los demás días de la semana. Esto podría estar relacionado con

algún evento en particular, como la circulación de vehículos de carga pesada, considerando que estos contribuyen significativamente al deterioro de la calidad del aire, aportando más del 60% de las emisiones de $PM_{2.5}$ a nivel global (PNUMA, 2024), mientras que a nivel nacional este porcentaje es del 49% (Alfonso, 2023). Sumado a ello, es importante considerar que el equipo de monitoreo presenta una alta sensibilidad, lo que puede ocasionar sobreestimaciones en las mediciones (EPA, 2024; Giordano *et al.*, 2021).

Las concentraciones medias obtenidas en este estudio ($17,26 \pm 5,63$ para $PM_{2.5}$ y $20,39 \pm 9,10$ para PM_{10}) al ser comparadas con los límites recomendados por la OMS (2021) para un tiempo de exposición de 24 horas, no resultan alarmantes en términos de PM_{10} , considerando que la media obtenida para este contaminante corresponde casi a la mitad del límite de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No obstante, para $PM_{2.5}$ se observa un excedente del 15% respecto al límite diario sugerido ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Al comparar estos resultados con estudios previos realizados en entornos urbanos, se pueden evidenciar algunas diferencias según el contexto. Por ejemplo, la estación de monitoreo ECA Américas de la ciudad de Yumbo, Colombia reportó concentraciones promedio superiores, de $20,06 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 16,24$ para $PM_{2.5}$ y $105,96 \pm 82,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} (Bastidas & Marín, 2024). Aunque las diferencias en $PM_{2.5}$ no son significativas, para PM_{10} se presenta un incremento del 419% respecto al valor registrado en este estudio. De manera similar, en la ciudad de Huancayo, Valle del Mantaro, Perú, Álvarez & Suárez (2020) reportaron valores medios de $34 \pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $65 \pm 31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , es decir, casi el doble para $PM_{2.5}$ y más del triple para PM_{10} , en comparación con los obtenidos en el presente estudio. También cabe destacar que los datos registrados en este estudio presentan menor dispersión, lo cual se refleja en desviaciones estándar más bajas, indicando una mayor estabilidad en las condiciones de calidad del aire.

Sin embargo, en otros puntos de la ciudad de Yumbo, Bastidas & Marín (2024) reportaron concentraciones comparables a las obtenidas en este estudio, en la estación ECA Yumbo se presentaron concentraciones medias incluso inferiores para $PM_{2.5}$, con $14,92 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 9,70$, mientras que para PM_{10} fueron de $29,48 \pm 22,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así mismo, en la ciudad de Concepción, también ubicada en el Valle del Mantaro, se reportaron niveles inferiores de $PM_{2.5}$ a los obtenidos en este estudio, con $16 \pm 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $28 \pm 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} (Álvarez & Suárez, 2020).

En otro estudio llevado a cabo a nivel de vecindad, realizado en el barrio Trigal del Norte de la ciudad de Cúcuta, Eslava *et al.* (2021) reportaron concentraciones medias similares a las del presente estudio, de $19,95 \pm 17,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $21,61 \pm 18,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . No obstante, la variabilidad fue mayor en ese caso, reflejada en desviaciones estándar más elevadas. Por el contrario, en el interior de una cafetería universitaria en León, España se registraron concentraciones que superaron casi el doble a las reportadas en este estudio, con valores máximos que oscilaron entre 44 y $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, y entre 62 y $136 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Durante eventos específicos, como una fiesta estudiantil, se registraron incluso picos extremos de hasta $2.560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2.710 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y PM_{10} , respectivamente (Alves *et al.*, 2020).

Estos hallazgos permiten contextualizar la calidad del aire en el área de estudio, evidenciando que, en términos generales, las concentraciones de PM son inferiores a las reportadas en otras ciudades a nivel nacional e internacional. No obstante, se evidenciaron similitudes más notorias al comparar con otro estudio a nivel de vecindad (Eslava *et al.*, 2021). En particular, se observa una situación más alarmante en relación con PM_{2.5}, dado que algunos estudios reportan concentraciones más bajas que las observadas en este trabajo. En contraste, para PM₁₀, la situación es menos crítica, ya que todos los valores reportados en los estudios consultados superan la concentración media registrada en este estudio.

7.2. Percepción de la calidad del aire

Con el propósito de conocer la percepción de la calidad del aire en la zona de estudio, se aplicaron 135 encuestas. En estas se investigó el nivel de sensibilidad y conocimiento de los encuestados respecto a la calidad del aire y las problemáticas ambientales más frecuentes en el área, destacando las posibles fuentes de contaminación relacionadas con el tipo de transporte y las actividades de comercio y servicios. Asimismo, se exploró la relación percibida entre la calidad del aire y la salud, preguntando a los encuestados si consideran que la contaminación atmosférica afecta su bienestar y si han padecido enfermedades respiratorias y/o cardiovasculares. Por último, se recopiló información sobre el tiempo de exposición de los encuestados, considerando tanto el número de horas diarias como la frecuencia semanal de permanencia en la zona. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

De las 135 personas encuestadas, 73 se identificaron de género masculino y 62 de género femenino. En relación con los rangos de edad, como se ilustra en la Figura 12, se encontró que la mayor representación de personas encuestadas tiene entre 21 a 30 años (31 personas) y de más de 60 años (30 personas). Seguidos por el grupo de 31 a 40 años (26 personas), 41 a 50 años (21 personas), 51 a 60 años (17 personas) y finalmente, 10 personas correspondientes al rango de edad de 15 a 20 años. La distribución de la participación en los distintos rangos de edad es bastante equilibrada, con la excepción del grupo de 15 a 20 años, que presenta una representación significativamente menor.

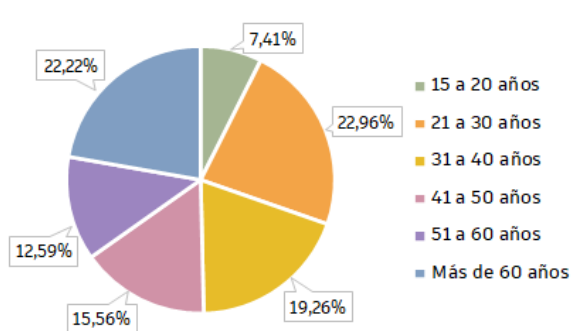


Figura 12. Rango de edad

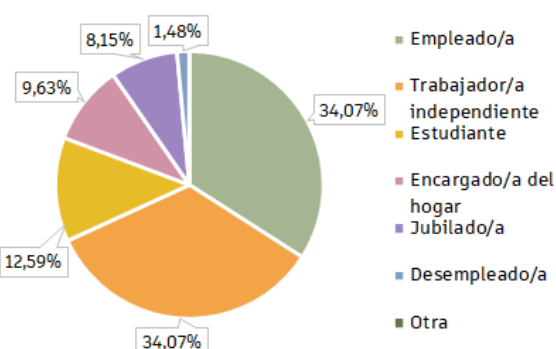


Figura 13. Ocupación

Al indagar sobre la ocupación de las personas encuestadas (Figura 13), se encontró que tanto la proporción de empleados como de trabajadores independientes corresponde al 34,07%, es decir, 46 personas. Por su parte, el 12,59% (17 personas) de la población encuestada corresponde a estudiantes, seguido por el 9,63% (13 personas) que se dedica a las labores del hogar, y el 8,15% (11 personas) que son jubilados. Tan solo el 1,48% (2 personas) corresponde a personas desempleadas. Estos resultados son consecuentes con el nivel educativo de la población encuestada, ya que la mayor parte, el 24,44%, ha culminado la educación básica secundaria, seguido por el 22,96% que ha realizado un estudio técnico o tecnológico. En contraste, solo el 1,48% no tiene ningún nivel educativo.

Al consultar sobre las principales problemáticas ambientales percibidas en la zona (Figura 14), se encontró que 47 personas señalaron los altos niveles de ruido como el problema más

relevante. Además, 38 personas destacaron la mala disposición de residuos sólidos, mientras que 30 personas mencionaron la contaminación del aire. Por otro lado, 14 personas consideran la contaminación del agua como un problema significativo, y 6 señalan otros problemas ambientales.

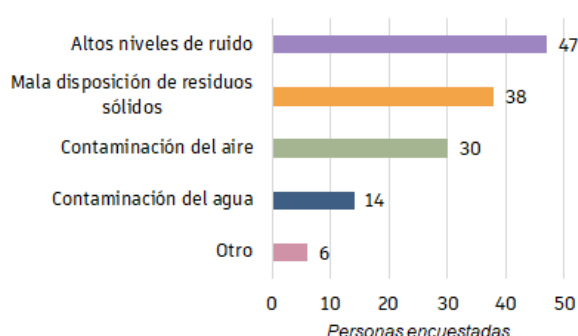


Figura 14. Problemáticas ambientales

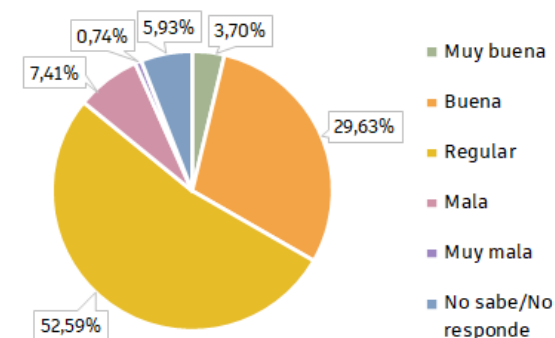


Figura 15. Percepción de la calidad del aire

Tras identificar las problemáticas ambientales, se profundizó en la percepción de los encuestados respecto a las principales causas de la contaminación atmosférica en el barrio, específicamente en relación con los tipos de transporte y los establecimientos de comercio y servicios. Se encontró que la población encuestada considera que el transporte público informal y los vehículos de carga pesada son los principales responsables del deterioro de la calidad del aire, con 44 y 30 personas señalándolos, respectivamente. Por otro lado, los puestos de comida ambulantes fueron señalados como los establecimientos que más contribuyen a la contaminación del aire, de acuerdo con 64 personas.

Con respecto a la percepción de la población encuestada sobre la calidad del aire en el barrio Meléndez (Figura 15), el 52,59% (71 personas) considera que es regular, seguido del 29,63% (40 personas) que la califica como buena. El 7,41% (10 personas) la considera mala, mientras que el 5,93% (8 personas) no tiene una opinión al respecto y el 3,70% (5 personas) opina que es muy buena. En menor proporción, el 0,74% (1 persona) la clasifica como muy mala.

En relación con los medios de comunicación con los cuales las personas se informan sobre la calidad del aire (Figura 16), la mayor parte (43 personas) señala que se informa por medio de noticieros o programas de televisión, 30 personas utilizan las redes sociales como medio informativo, 25 personas conocen sobre la calidad del aire como resultado de conservaciones con vecinos, amigos, familiares o conocidos, y 23 personas utilizan otro medio informativo. En menor proporción, 9 personas se informan a través de sitios web, 4 por medio de boletines de calidad del aire del DAGMA y solo 1 mediante el uso de periódicos o revistas.

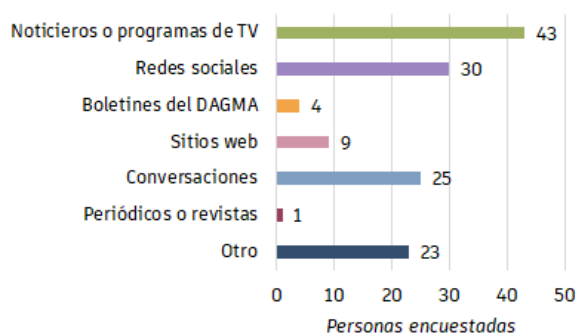


Figura 16. Medios de comunicación

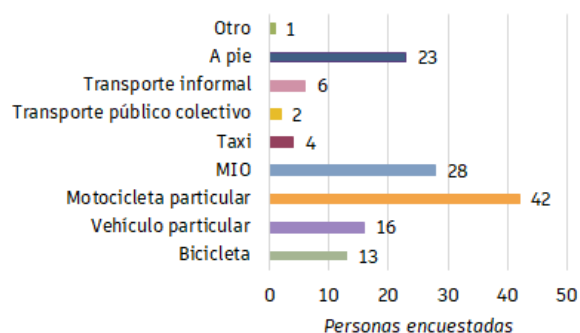


Figura 17. Sistema de movilidad preferido

En cuanto al sistema de movilidad preferido por los encuestados para realizar sus actividades cotidianas (Figura 17), se observó una distribución diversa entre las opciones disponibles. La motocicleta particular resultó ser el medio de transporte más utilizado, con 42 personas, le sigue el MIO, utilizado por 28 personas. Asimismo, 23 encuestados manifestaron que prefieren desplazarse a pie, mientras que 16 personas utilizan el vehículo particular y 13 personas optan por el uso de la bicicleta. En menor medida, se encontró que 6 personas mencionaron recurrir al transporte informal, 4 personas al taxi, 2 personas al transporte público colectivo, y 1 persona señaló utilizar otro medio de transporte. Cabe resaltar que se percibió cierta confusión con las opciones de respuesta, ya que algunos encuestados no relacionaban la motocicleta y el vehículo particular como posibles formas de transporte informal. Esto pudo haber generado un sesgo en las respuestas, reflejado en una baja representación del transporte informal, pese a que, se observó que este tipo de transporte es uno de los que tiene mayor presencia en el sector.

Además de explorar las preferencias de movilidad, se consultó a los encuestados sobre su percepción respecto a la cobertura del MIO. Los resultados reflejan que el 65,93% (89 personas) de los encuestados considera que la cobertura no es adecuada, mientras que el 34,07% (46 personas) opina que sí lo es. En ese sentido, se consultó a las personas encuestadas sobre el uso del transporte informal (Figura 18), obteniendo que el 59,26% afirma haberlo usado o suelen usarlo, y el 40,74% indica lo contrario. Entre los tipos de transporte informal (Figura 19), las motocicletas son las más utilizadas, con 42 personas señalándolas, seguidas por los vehículos piratas, mencionados por 26 personas, mientras que 13 personas señalaron usar otro tipo de transporte informal. De las 80 personas que afirmaron usar o haber usado transporte informal, la mayoría (57 personas) indicó que la comodidad y la rapidez son las principales razones de su preferencia por este medio.

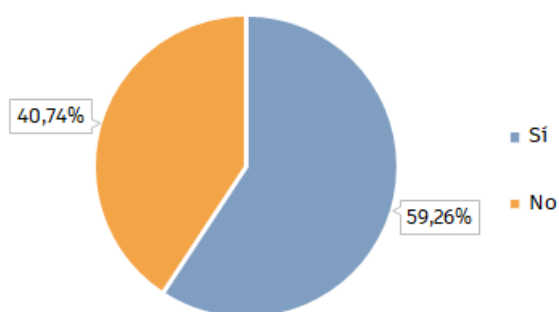


Figura 18. Uso del transporte informal

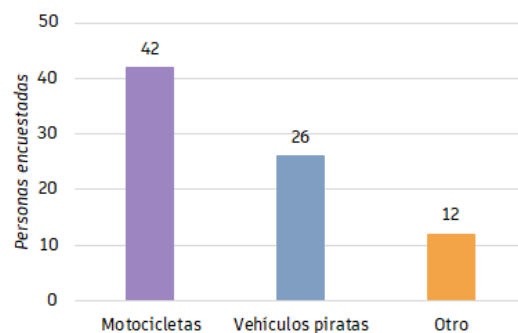


Figura 19. Transporte informal

Se consultó a los encuestados si consideraban que la mala calidad del aire podría tener un impacto en su salud (Figura 20). Los resultados reflejan una clara preocupación por los efectos de la contaminación atmosférica en su bienestar. El 97,04%, es decir, 131 personas coincidieron en que la contaminación del aire podría afectar negativamente su salud, mientras que solo el 2,96% (4 personas) consideró que la contaminación no representa ningún riesgo.

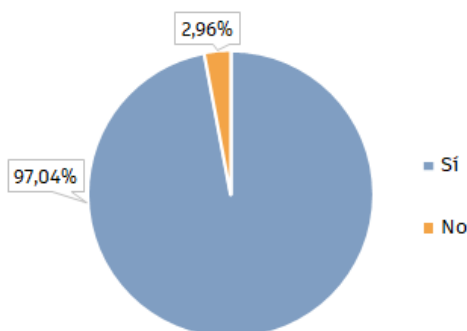


Figura 20. Impacto en la salud

Al analizar los resultados sobre la presencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares entre los encuestados (Figuras 21 y 22, respectivamente), se encontró que el 96,30% (130 personas) indicó no haber presentado ni estar padeciendo ninguna enfermedad respiratoria. No obstante, un pequeño porcentaje sí manifestó haber experimentado afecciones de este tipo, el 2,22% (3 personas) mencionó que presentan o padecieron de neumonía, mientras que 1,48% (2 personas) indicó tener o haber tenido asma. La ocurrencia de estas dos últimas enfermedades fue mencionada en su mayoría por personas mayores a 41 años, sin embargo, no se evidencia una relación clara entre la edad y la presencia de estas enfermedades, ya que 1 persona de entre 15 a 20 años manifestó haber presentado asma.

En cuanto a las enfermedades cardiovasculares, se encontró que el 82,22% (111 personas) afirmó no haber experimentado este tipo de enfermedades. Sin embargo, el 12,59% (17 personas) señaló haber presentado o padecer de hipertensión arterial, el 2,96% (4 personas) expresó tener o haber tenido arritmias cardíacas y el 2,22% (3 personas) reportó haber sufrido de accidente cardiovascular. En este caso, se observó una relación directa entre el aumento de la edad y la presencia de este tipo de enfermedades, las cuales fueron más frecuentes en personas mayores, especialmente en aquellas con más de 60 años. En contraste, en los grupos más jóvenes (15 a 40 años), la mayoría de los encuestados no presentaron enfermedades de

este tipo.

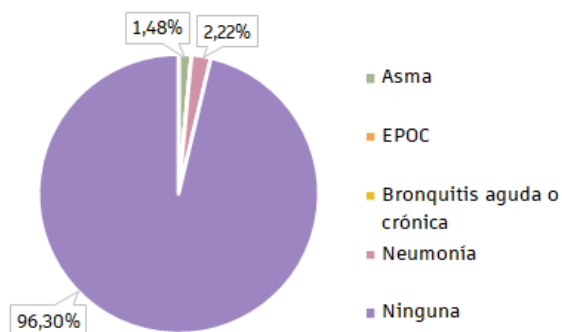


Figura 21. Enfermedades respiratorias

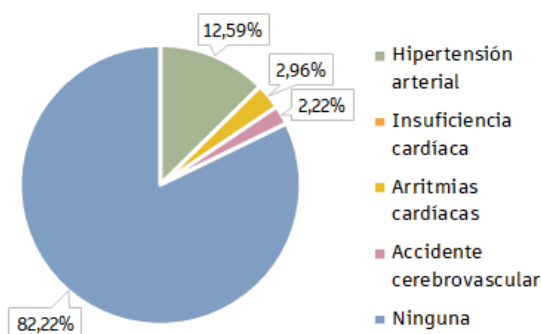


Figura 22. Enfermedades cardiovasculares

Además de indagar sobre la presencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, se preguntó a los encuestados si creían que alguna de esas condiciones podría estar vinculada a la calidad del aire en su entorno. Los resultados indicaron que el 80% (108 personas), considera que existe una relación entre las enfermedades mencionadas y la calidad del aire, mientras que el 20% (27 personas) no lo cree así.

Teniendo en cuenta que los menores de edad son uno de los grupos poblacionales más vulnerables a la contaminación atmosférica, se consultó a los encuestados sobre la presencia de enfermedades respiratorias en los menores con quienes conviven (Figura 23). En ese sentido, de las 64 personas que afirmaron residir con menores de edad, la mayor parte (57 personas) indicó que los menores de edad con quienes reside no han padecido de ninguna enfermedad de este tipo, mientras que la bronquitis aguda o crónica, el asma y la neumonía fueron mencionadas por 5, 3 y 1 persona, respectivamente.

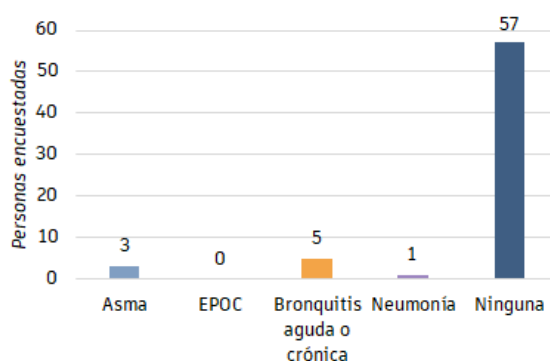


Figura 23. Enfermedades respiratorias en menores de edad

Con el fin de determinar el tiempo de exposición a PM de la población encuestada, se indagó sobre el tiempo de permanencia en el barrio (Figuras 24 y 25). Con respecto al promedio de horas de permanencia en un día, 65 personas señalaron que permanecen más de 12 horas, 42 personas permanecen entre 6 a 12 horas, 16 personas permanecen en promedio de 3 a 6 horas, y 12 personas permanecen de 0 a 3 horas en el barrio.

En cuanto a la frecuencia de permanencia semanal en la zona, se encontró que, de las 135 personas encuestadas, 106 permanecen entre cuatro y siete días a la semana, mientras que 21 lo hacen entre dos y cuatro días, y tan solo 8 personas indicaron que permanecen en el barrio al menos un día a la semana.

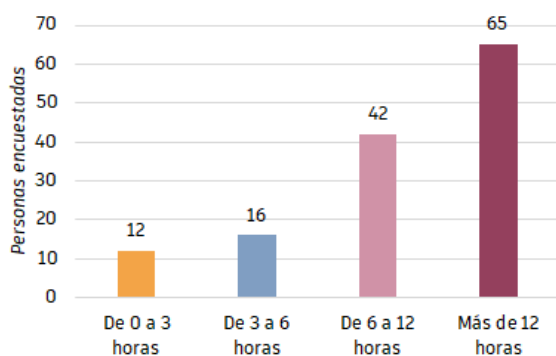


Figura 24. Horas de permanencia

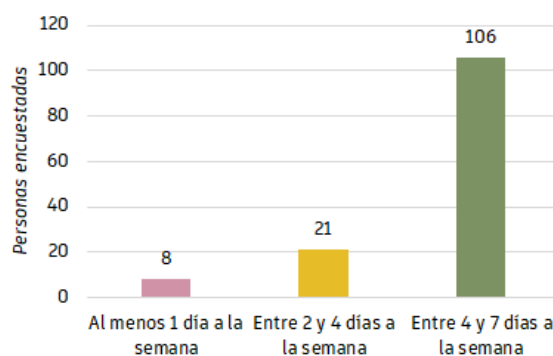


Figura 25. Permanencia semanal

7.2.1. Análisis y discusión de los resultados sobre la percepción de la calidad del aire

Con el propósito de contextualizar y contrastar los resultados obtenidos sobre la percepción de la calidad del aire en el área de estudio, se realizó una revisión de la literatura, tanto a nivel nacional e internacional, que también evaluaron la percepción de la calidad del aire en entornos urbanos. En el contexto nacional, Becerra *et al.* (2021) analizaron la percepción de la calidad del aire y su relación con las enfermedades respiratorias en San José de Cúcuta, mientras que Rincón & Vahos (2021) abordaron su impacto en la salud pública en la ciudad de Sabaneta. Asimismo, Fischer & Beltrán (2021) evaluaron la percepción de la calidad del aire en tres localidades de Bogotá (Fontibón, Kennedy y Usaquén) y Ossa & Londoño (2024) determinaron la exposición personal a PM de 45 operarios de barrido en la comuna 16, Belén, de la ciudad de Medellín.

A nivel internacional, en la ciudad de Hermosillo, México, se estudió la variabilidad intraurbana de percepciones y respuestas al riesgo por contaminación del aire en personas mayores de 18 años (Icedo *et al.*, 2022). Mientras que, en la ciudad de Bahía Richards y sus alrededores, uMhlatuze, Sudáfrica, se evaluó la percepción de la calidad del aire entre sus residentes (Okello *et al.*, 2020).

A partir de los resultados obtenidos en la encuesta, se evidencia que el 52,59% de la población encuestada considera que la calidad del aire en el barrio Meléndez es regular. Esta percepción es consecuente con los resultados obtenidos en el monitoreo de material particulado, en el que se registraron niveles críticos durante horas de la mañana, particularmente en los puntos de monitoreo Calle 5ta e IPS Meléndez. En estos puntos, se alcanzaron concentraciones máximas de 43,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 46,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5}, y de 68,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 92,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀, respectivamente. Esta percepción ciudadana también se refleja en estudios similares, como el realizado por Ossa & Londoño (2024) donde el 42,2% de los encuestados indicó que el estado de la calidad del aire era regular. De igual manera, el 40% de los encuestados en Bahía Richards

y sus alrededores calificó la calidad del aire como regular (Okello *et al.*, 2020).

En las localidades de Fontibón y Kennedy también se reportó una percepción regular de la calidad del aire, considerando que la mayor proporción de encuestados la calificó con 5, en una escala del 1 al 10. En contraste, los habitantes de Usaquén percibieron un mejor estado de la calidad del aire, valorándola con un promedio de 6,4. Estos resultados permitieron correlacionar el estrato socioeconómico con la percepción de la calidad del aire, ya que las personas encuestadas en Usaquén pertenecen a los estratos más altos (del 3 al 6) (Fischer & Beltrán, 2021). Por su parte, la población de Hermosillo demuestra una alta conciencia del problema ambiental, ya que el 98% de los encuestados consideraron que el aire está contaminado (Icedo *et al.*, 2022).

Por otro lado, es importante destacar la deficiente difusión por parte de las autoridades ambientales acerca del estado de la calidad del aire, teniendo en cuenta que tan solo el 2,96% de los encuestados en este estudio se han informado a través de fuentes oficiales, como los boletines emitidos por el DAGMA, los cuales pueden ser consultados en su [página web oficial](#). Esta misma limitación fue reportada por Icedo *et al.* (2022), cuyos resultados reflejan una percepción de falta de información y comunicación de riesgos asociados a la contaminación del aire en la mayoría de las zonas urbanas analizadas, con un 80,3% de los encuestados manifestando esta preocupación. Esta situación pone de manifiesto la urgencia de fortalecer las estrategias de educación ambiental y comunicación pública, especialmente en aquellos sectores donde la totalidad o gran parte de los habitantes perciben una ausencia de información adecuada sobre estos fenómenos que afectan directamente su salud y bienestar.

Pese a lo anterior, la población encuestada de la zona baja de Meléndez muestra una alta sensibilización acerca de los riesgos asociados con la exposición a fuentes contaminantes, considerando que el 97,04% reconoce que la mala calidad del aire puede afectar su salud. Autores como Rincón & Vahos (2021) encontraron en su estudio que el 50% de la población encuestada considera que el deterioro de la calidad del aire puede afectar su salud respiratoria.

De manera similar, el estudio realizado por Becerra *et al.* (2021) a través de la encuesta de percepción ciudadana evidenció que el 73% de la población encuestada manifestó molestias causadas por la polución proveniente de fuentes de contaminación atmosférica. Además, se identificó una asociación entre estas condiciones y enfermedades respiratorias, con una proporción del 25% en personas fumadoras y del 34% en personas no fumadoras. Los resultados reportados por Becerra *et al.* (2021) refuerzan la existencia de una relación entre la deficiente calidad del aire y la prevalencia de enfermedades respiratorias en la población expuesta, y permitieron determinar que la percepción de incidencia de enfermedades respiratorias es significativamente mayor en personas que identifican la presencia de fuentes o molestias por contaminación atmosférica cerca de su lugar de residencia.

En línea con los resultados de este y otros estudios que evidencian los riesgos para la salud pública asociados con el deterioro de la calidad del aire, se reitera la importancia de abordar estas temáticas, tanto en términos de políticas públicas como en campañas de educación y sensibilización, que mitiguen los impactos de la contaminación atmosférica en el bienestar de

los residentes del barrio Meléndez. Dichas políticas deben considerar también aspectos de movilidad, teniendo en cuenta que las fuentes móviles son unas de las principales causantes de la contaminación atmosférica en los centros urbanos.

Esta situación es coherente con lo reportado por Becerra *et al.* (2021), Rincón & Vahos (2021) y Ossa & Londoño (2024), cuyos resultados indicaron que, en las poblaciones encuestadas de San José de Cúcuta, Sabaneta y Medellín, Antioquia, las fuentes móviles fueron señaladas como las principales responsables de la contaminación del aire, con un 40%, 71% y 65%, respectivamente. En contraste, en Bahía Richards y sus alrededores, más del 80% de la población encuestada señaló a la industria como la principal fuente de contaminación atmosférica, esto se relaciona con el acelerado proceso de industrialización que caracteriza a esta metrópolis (Okello *et al.*, 2020). En el caso particular del sector Meléndez, el transporte informal cobra especial atención, considerando que el 59,26% de los encuestados afirma usarlo y, además, el 32,59% lo señala como el tipo de transporte que más contribuye al deterioro de la calidad del aire. Esta postura podría explicarse por dos factores principales: las limitaciones del sistema MIO y la situación de informalidad característica del barrio.

En primer lugar, más de la mitad de la población encuestada (el 65,92%) considera que el sistema de transporte público no ofrece una cobertura adecuada, esta percepción negativa podría atribuirse a rutas insuficientes o baja frecuencia del servicio, lo que conlleva a que las personas opten por otros medios de transporte. Esto se refleja en el mayor uso de motocicletas, vehículos o transporte informal, e incluso realizar los desplazamientos a pie, opciones que parecen ofrecer mayor rapidez y accesibilidad en comparación con el transporte público. Estos resultados concuerdan con la postura de la población caleña respecto al MIO, ya que 47 de cada 100 personas usan, además del MIO, otro medio de transporte, principalmente taxis o plataformas digitales (26%) y transporte informal (22%) (Cali Cómo Vamos, 2023-a). Consecuentemente, quienes usan otros medios de transporte, solicitan mayor oferta y frecuencia de buses para convertir al MIO en su medio de transporte principal (Cali Cómo Vamos, 2023-b).

Por otro lado, la informalidad laboral también influye en la dinámica del transporte, por lo que es importante destacar que el 34,07% de la población encuestada trabaja de forma independiente. Sin embargo, en el contexto colombiano, la mayoría de trabajadores independientes son, en realidad, informales, considerando que según el Banco Interamericano de Desarrollo [BID] (2023), el 87,13% de trabajadores independientes no se encuentra cobijado por la seguridad social y, por lo tanto, se consideran trabajadores informales. Esta situación se refleja en la comuna 18, que presenta una alta tasa de informalidad, alcanzando el 82,9% según el DANE (2018). Esta realidad fomenta actividades económicas informales, principalmente relacionadas con el transporte, lo que agrava la problemática ambiental del barrio. En este sentido, las políticas públicas deben abordar tanto las necesidades de movilidad como la informalidad laboral, promoviendo soluciones integrales que mejoren la calidad de vida de los habitantes.

7.3. Exposición a las concentraciones ambientales de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀

La dosis de exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ se determinó a partir de las Ecuaciones 4 y 6, las cuales se encuentran normalizadas por tiempo ($\mu\text{g}/\text{min}$) con el fin de establecer comparaciones con otros estudios similares. Esta normalización permite que la dosis de exposición dependa únicamente de la concentración del contaminante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y de la tasa de inhalación (m^3/min).

En ese sentido, con base en las concentraciones promedio registradas durante cada día, periodo y punto de monitoreo (ver Anexo C), se determinaron las dosis potencialmente inhaladas de PM_{2.5} y PM₁₀ para cada periodo de monitoreo, así como las dosis promedio diarias, con el objetivo de analizar el comportamiento de la exposición entre diferentes días y periodos de tiempo.

Se optó por presentar y graficar las dosis inhaladas correspondientes a una intensidad de actividad moderada, teniendo en cuenta que representa el escenario de exposición más crítico. Esto se debe a que, en comparación con una intensidad de actividad ligera, la dosis inhalada para hombres es un 123,19% mayor, mientras que para mujeres este incremento corresponde al 105,31%. Las dosis de exposición para una intensidad de actividad ligera se encuentran consignadas en los Anexos D y E.

7.3.1. Dosis potencialmente inhalada de PM_{2.5} y PM₁₀ por día

En las Figuras 26 y 27 se presentan las dosis potencialmente inhaladas de PM_{2.5} y PM₁₀, respectivamente, representadas mediante diagramas de barras. Estas se encuentran diferenciadas por día de la semana y sexo, bajo una intensidad de actividad moderada. Para cada día, se estimaron las dosis en los seis puntos de monitoreo representando cada sexo con un color diferente.

Las dosis inhaladas de PM_{2.5} y PM₁₀ resultaron un 32,76% mayores para hombres en comparación con las estimadas para mujeres, debido a que la tasa de inhalación —única variable que presentó diferencias entre sexos en el cálculo de la dosis— es también un 32,76% más alta para hombres bajo una intensidad de actividad moderada. Según Talaminos *et al.* (2018), los hombres poseen pulmones más grandes, con un mayor número de bronquios, una superficie alveolar más extensa y vías respiratorias más amplias. Estas diferencias estructurales aumentan la capacidad pulmonar, el volumen corriente y la demanda de oxígeno, lo que se traduce en una mayor tasa de inhalación y, en consecuencia, en una mayor exposición a los contaminantes ambientales.

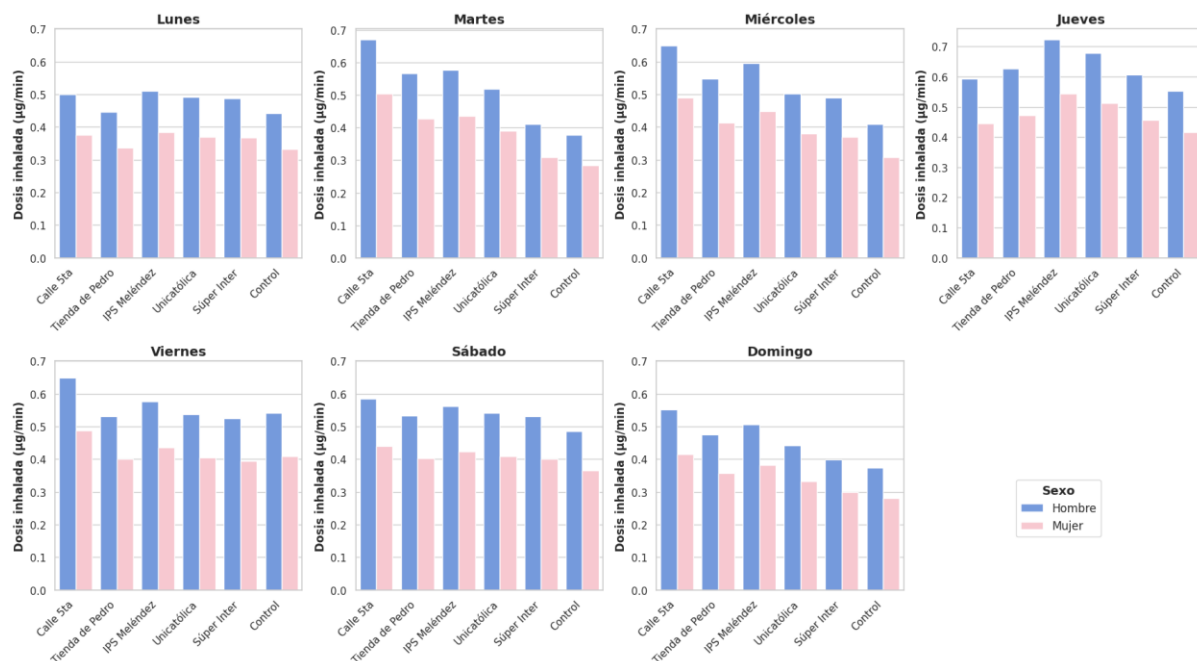


Figura 26. Dosis inhalada de $PM_{2.5}$ por día

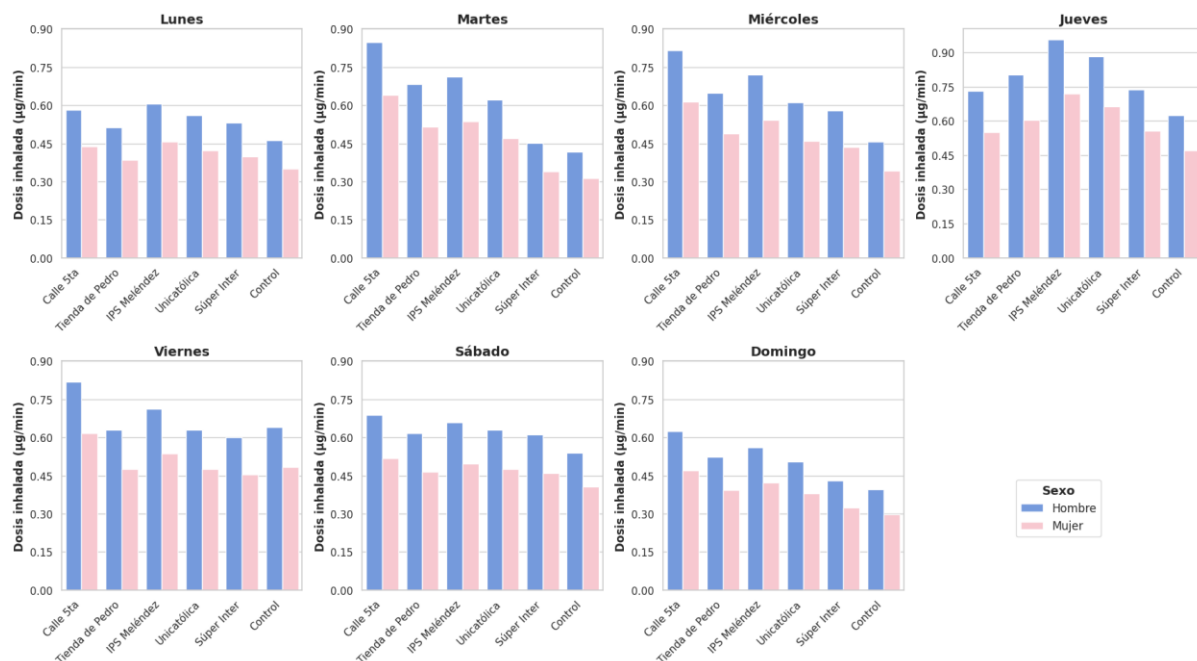


Figura 27. Dosis inhalada de PM_{10} por día

Además de las diferencias por sexo, se evidencia una marcada variabilidad entre días de la semana y puntos de monitoreo. De manera general, se observa un leve incremento de las dosis inhaladas hacia la mitad de la semana, con valores más bajos los días lunes y domingo, mientras que, el jueves fue el día con mayor exposición. En conformidad con este patrón, la dosis máxima de $PM_{2.5}$ se registró el jueves en IPS Meléndez, con 0,722 $\mu g/min$ para hombres y 0,544 $\mu g/min$ para mujeres. Para PM_{10} , los valores fueron de 0,955 $\mu g/min$ para hombres y 0,719 $\mu g/min$ para mujeres. En contraste, las dosis mínimas se presentaron el domingo en Control, con valores para $PM_{2.5}$ y PM_{10} de 0,373 $\mu g/min$ y 0,396 $\mu g/min$ para hombres, y 0,281

$\mu\text{g}/\text{min}$ y $0,298 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, respectivamente. Esta diferencia entre los valores extremos representa incrementos del 94% para $\text{PM}_{2.5}$ y del 141% para PM_{10} , tanto para hombres como mujeres, evidenciando el impacto significativo del entorno y las condiciones específicas de cada día sobre la exposición a PM.

Esta diferencia también es evidente al analizar las dosis medias diarias. El domingo registró las dosis promedio más bajas de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , con $0,458 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,506$ para hombres, y $0,345 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,381$ para mujeres, respectivamente. En contraste, las dosis medias más altas se presentaron el jueves, con $0,630 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,789$ para hombres, y $0,474 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,594$ para mujeres, respectivamente. Estas últimas cifras representan un incremento promedio para ambos sexos del 37% para $\text{PM}_{2.5}$ y del 56% para PM_{10} , en comparación con los valores registrados el domingo.

Por otro lado, se evidencia que Calle 5ta e IPS Meléndez fueron los puntos de monitoreo de mayor exposición, registrando las dosis más altas de manera consistente. Por el contrario, Súper Inter y Control registraron las dosis más bajas, aunque no de manera uniforme. En particular, el viernes se presentaron dosis elevadas tanto de $\text{PM}_{2.5}$ como de PM_{10} en Control, con $0,542 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,640 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y $0,408 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,482 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, respectivamente. Estos valores superaron incluso a los registrados ese mismo día en puntos de monitoreo de mayor tránsito vehicular y actividad comercial, como Tienda de Pedro y Unicatólica, lo que indica la posible influencia de eventos puntuales de emisión sobre la exposición a PM.

También resulta importante destacar la variabilidad espacial de las dosis inhaladas. El martes presentó la mayor dispersión entre puntos de monitoreo, con diferencias para hombres de $0,293 \mu\text{g}/\text{min}$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0,431 \mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{10} , entre las dosis más altas (Calle 5ta: $0,670$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0,848$ para PM_{10}) y las más bajas (Control: $0,377$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0,417$ para PM_{10}). En el caso de las mujeres, las diferencias corresponden a $0,221 \mu\text{g}/\text{min}$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0,209 \mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{10} . En contraste, el lunes presentó la menor variación espacial, con rangos para hombres de $0,069 \mu\text{g}/\text{min}$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0,142 \mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{10} , lo que refleja una distribución más homogénea de las condiciones ambientales durante este día.

Estos resultados son consistentes con las concentraciones obtenidas durante el monitoreo de PM, donde los lunes y domingo registraron los niveles más bajos, junto con los puntos de monitoreo Súper Inter y Control. Asimismo, las dosis máximas registradas el jueves reflejan la ocurrencia de un episodio de alta contaminación, mientras que las dosis altas en Calle 5ta evidencian la influencia directa del tráfico vehicular. En el caso de IPS Meléndez, las dosis de exposición elevadas podrían asociarse con múltiples factores, como el tráfico vehicular, la actividad comercial, las condiciones meteorológicas y la topografía local. Estos hallazgos indican que la exposición a PM puede variar considerablemente incluso dentro del mismo entorno urbano, dependiendo del punto de monitoreo y el día de la semana.

7.3.2. Dosis potencialmente inhalada de PM_{2.5} y PM₁₀ por periodo

En las Figuras 28 y 29 se muestran las dosis potencialmente inhaladas de PM_{2.5} y PM₁₀, respectivamente, para cada periodo de monitoreo, diferenciadas por sexo y considerando una intensidad de actividad moderada. Estas gráficas se presentan agrupadas por día y periodo, asignando un color diferente a cada sexo para facilitar su visualización y análisis.

Al igual que en el análisis de las dosis inhaladas por día, se observa que los hombres presentan un mayor riesgo de exposición a PM, con dosis más altas en comparación con las correspondientes para mujeres en todos los casos. Por otro lado, se evidencia que, en la mayoría de los días, el periodo de 6:00-9:00 presentó las dosis de inhalación más altas de PM_{2.5} y PM₁₀ en comparación con los demás periodos, con excepción del día sábado, que registró una única dosis máxima en este intervalo, específicamente en el punto Tienda de Pedro. En el 61,9% de los casos, las mayores dosis de inhalación coinciden con este periodo, lo que indica una mayor exposición a este contaminante durante las primeras horas de la mañana. En particular, durante los días lunes, martes, miércoles y jueves, las dosis inhaladas en este período superan en más del 100% a las registradas en otros intervalos del día.

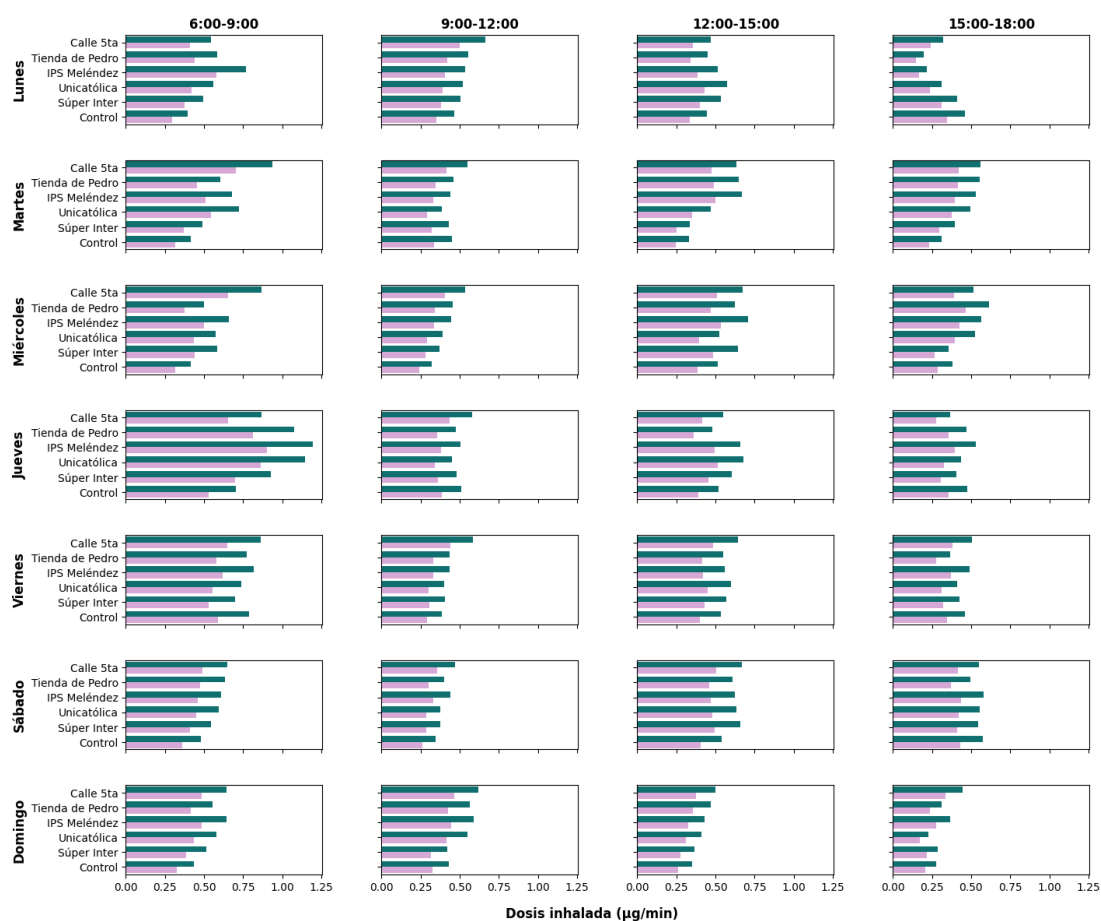


Figura 28. Dosis inhalada de PM_{2.5} por periodo

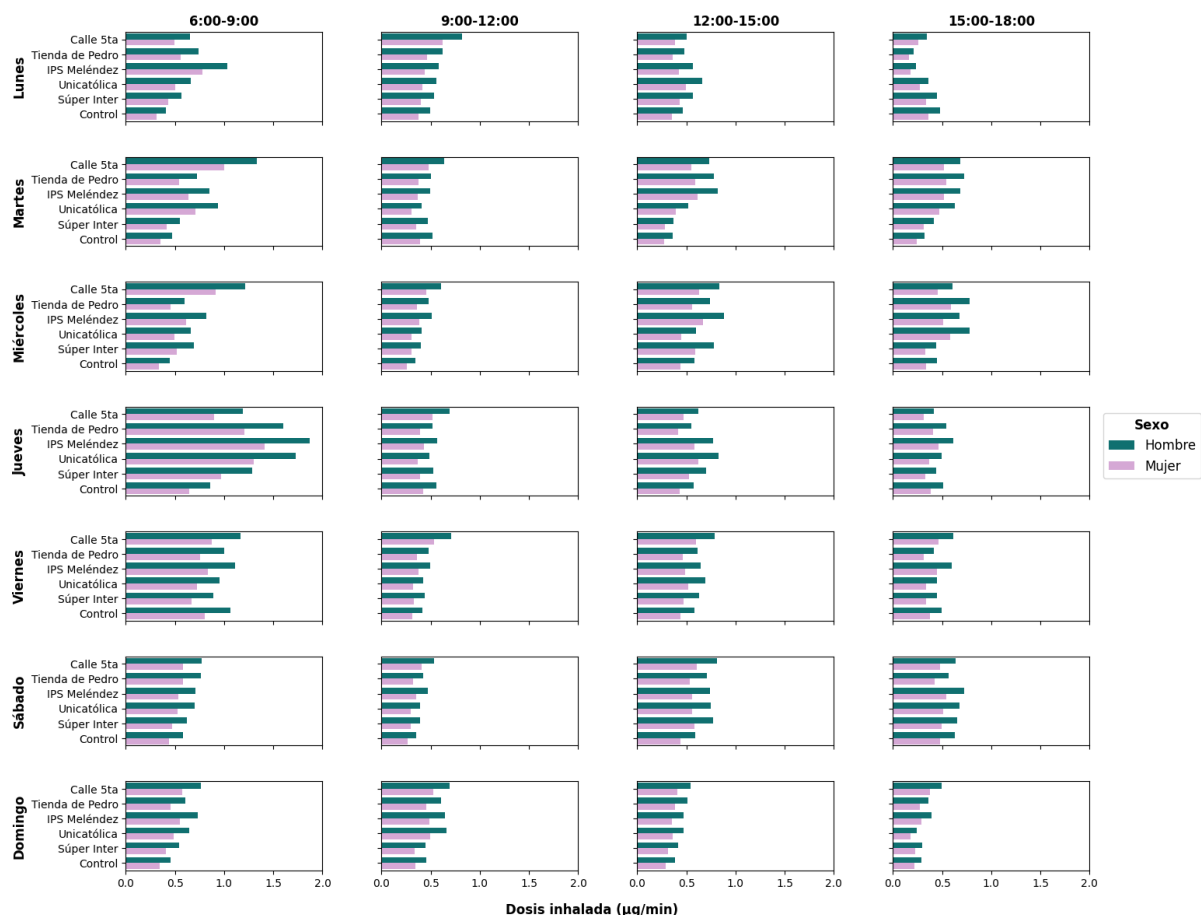


Figura 29. Dosis inhalada de PM₁₀ por periodo

En efecto, el día jueves en IPS Meléndez durante el período de 6:00-9:00 se registró la dosis más alta tanto para hombres como para mujeres, con valores de 1,198 µg/min y 0,902 µg/min para PM_{2.5} y 1,869 µg/min y 1,408 µg/min para PM₁₀, respectivamente. Cabe destacar que en el período de 6:00-9:00, el punto de monitoreo Control alcanzó dosis para hombres de 0,703 µg/min y 0,786 µg/min para PM_{2.5}, y 0,857 µg/min y 1,064 µg/min para PM₁₀, durante los días jueves y viernes, respectivamente, mientras que en el resto de los días no se superaron los 0,482 µg/min para PM_{2.5} y 0,582 µg/min para PM₁₀ en este punto. Estas dosis superan incluso a las obtenidas en otros períodos y puntos de monitoreo, que en la mayoría de los casos se ubican en zonas de mayor exposición a este contaminante.

En el periodo de 9:00-12:00, se observa una disminución general en las dosis inhaladas respecto al periodo anterior, específicamente los días martes, miércoles, viernes y sábado, considerando que en más del 50% de los puntos de monitoreo se registraron las dosis mínimas. Las menores dosis inhaladas de PM_{2.5} y PM₁₀ se presentaron el día miércoles en Control con 0,321 µg/min y 0,342 µg/min para hombres, y 0,242 µg/min y 0,258 µg/min para mujeres, respectivamente. Por el contrario, las mayores dosis inhaladas en este periodo se registraron el día lunes en Calle 5ta, alcanzando 0,663 µg/min y 0,821 µg/min para hombres, y 0,500 µg/min y 0,619 µg/min para mujeres.

Con respecto al período de 12:00-15:00, se evidencia que las dosis inhaladas tienden a ser mayores que las registradas en el periodo anterior, exceptuando los días lunes y domingo. Este incremento es especialmente notable los días miércoles y sábado, cuando la mayoría de puntos de monitoreo presentaron dosis máximas, destacándose el punto de monitoreo IPS Meléndez con valores de 0,710 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,535 $\mu\text{g}/\text{min}$ para $\text{PM}_{2.5}$, y 0,883 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,665 $\mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{10} , en hombres y mujeres, respectivamente. Por su parte, las dosis más bajas se presentaron el día martes en Control, con 0,330 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,248 $\mu\text{g}/\text{min}$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 0,361 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,272 $\mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{10} , en hombres y mujeres, respectivamente. Estos resultados sugieren que 12:00-15:00 representa el segundo periodo con mayor exposición a PM durante la jornada de monitoreo.

Finalmente, durante el periodo de 15:00-18:00 se observa nuevamente una disminución en las dosis en comparación con los periodos de 6:00-9:00 y 12:00-15:00, registrando valores parcialmente comparables con los del período de 9:00-12:00. Esta semejanza es más notable el día viernes, dado que la variación relativa entre ambas dosis no supera el 17,74% para $\text{PM}_{2.5}$ y el 18,06% para PM_{10} . Por otro lado, cabe resaltar los días lunes y domingo, que registran las menores dosis durante este periodo en la mayoría de los puntos de monitoreo, lo que indica que este periodo, junto con el de 9:00-12:00, corresponden a los de menor exposición a PM. En cuanto a los valores extremos, las dosis más bajas de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} se presentaron el lunes en Tienda de Pedro, con valores de 0,195 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,213 $\mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y 0,147 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,160 $\mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres. Por otro lado, las dosis más altas se registraron el miércoles en el mismo punto de monitoreo, con 0,616 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,780 $\mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y 0,464 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,587 $\mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el periodo de 6:00-9:00 representa el escenario más crítico de exposición a $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , alcanzando dosis máximas de 1,198 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 1,869 $\mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y 0,902 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 1,408 para mujeres, respectivamente. Estas dosis coinciden con la mayor concentración promedio registrada durante toda la jornada de monitoreo (38,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 60,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} en el período de 6:00-9:00). Además, como se evidenció previamente en el análisis de concentraciones, en el 61,9% de los casos, los niveles registrados en este intervalo superaron a los de los demás períodos.

Por su parte, el segundo periodo con mayor exposición a estos contaminantes es el de 12:00-15:00, con dosis máximas de 0,701 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,883 $\mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y 0,535 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,665 $\mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, lo cual se relaciona con el hecho de que, durante este período, se alcanzaron concentraciones promedio máximas en el 26,19% de los casos para $\text{PM}_{2.5}$ y el 21,43% para PM_{10} . En contraste, los periodos de 9:00-12:00 y 15:00-18:00 registran en general las dosis más bajas, lo que sugiere una menor exposición. Consecuentemente, estos períodos también presentaron los niveles más bajos de concentración, con valores promedios máximos registrados en solo el 9,52% y 2,38% de los casos para $\text{PM}_{2.5}$, y en el 9,52% y 7,14% para PM_{10} , respectivamente.

7.3.3. Análisis y discusión de los resultados sobre las dosis de exposición a PM

En la Tabla 6 se presentan las principales características y resultados de diversos estudios que evalúan la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ en diferentes contextos urbanos. En esta se detallan la tasa de inhalación (m³/min) según la intensidad de la actividad y la edad, el periodo de monitoreo, así como las concentraciones de material particulado (µg/m³) y las dosis inhaladas (µg/min).

Tabla 6. Resultados de diferentes estudios sobre exposición a material particulado

Autor	Descripción	Concentración (µg/m ³)		Dosis inhaladas (µg/min)	
		PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀
Aix <i>et al.</i> , (2024)	IR: 0,0294 ± 0,011 m ³ /min (adultos) Período: 8:00-9:00 (mañana), 12:00-13:00 (mediodía) y 16:00-17:00 (tarde) Grenoble, Francia	8,43	-	0,247	-
Cipoli <i>et al.</i> (2023)	IR: 0,0109 m ³ /min (adultos) Intensidad: ligera Periodo: 8:30-18:00 Bragança, Portugal	4,78-46,9	13,6-92,3	0,11 ± 0,08	0,37 ± 0,20
Imery (2022)	IR: 0,031 m ³ /min Edad: 16-61 años Intensidad: moderada Período: 6:00-8:00 Santiago de Cali, Colombia	Día de semana 19,2 ± 7,8 Día de control 13,7 ± 4,4	Día de semana 29,5 ± 15,1 Día de control 19,7 ± 8,8	Día de semana 0,587	Día de semana 0,903
Kumar <i>et al.</i> (2018)	IR: 0,015 m ³ /min (hombres), 0,014 m ³ /min (mujeres) Intensidad: ligera Periodo: 8:30-11:00 (mañana), 13:00-15:00 (tarde) y 17:00-19:00 (noche) Guildford, Reino Unido	Mañana 25 Mediodía 24 Noche 20	Mañana 72 Mediodía 73 Noche 50	Hombres 0,08-0,10 (dosis medias)	Hombres 0,67-1,10 (dosis medias)
Rodríguez & Núñez (2016)	IR: 0,011 m ³ /min (hombres), 0,0078 m ³ /min (mujeres) Edad: 19-65+ años Periodo: 8:00-17:00 Barranquilla, Colombia	Día hábil 178,58 ± 48,60 Día no hábil 119,05 ±48,61	-	Día hábil (hombre) 1,34 ± 0,36 Día hábil (mujer) 0,99 ± 0,27 Día no hábil (hombre) 0,35 ± 0,14 Día no hábil (mujer) 0,26 ± 0,11	-

Continuación Tabla 6. Resultados de diferentes estudios sobre exposición a material particulado

Autor	Descripción	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Dosis inhaladas ($\mu\text{g}/\text{min}$)	
		PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀
Quispe (2022)	Periodo: 7:30-9:30 Huancayo, Perú	15,14-36,28	17,12-54,30	0,14-0,33	0,16-0,50
Velasco <i>et al.</i> (2019)	IR: 0,022 $\pm$ 0,0014 m ³ /min (adultos)				
	Período: 11:30-13:30 Ciudad de México, México	34 $\pm$ 9	-	0,72 $\pm$ 0,23	-

Al comparar los resultados de exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ de este trabajo de grado con los reportados por diferentes autores, se evidencian similitudes y diferencias según el contexto. Por ejemplo, Quispe (2022) llevó a cabo un monitoreo móvil utilizando sensores de bajo costo (PurpleAir) en las calles de los principales distritos de Huancayo, Perú (Huancayo, El Tambo y Chilca), realizando cinco repeticiones en el horario de 7:30-9:30, de manera simultánea en cada distrito. Las concentraciones medias registradas en el distrito de Huancayo oscilaron en un rango de 15,14-36,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y 17,12-54,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀, siendo estas las más cercanas a los resultados obtenidos en el presente estudio.

La comparación se realizó considerando las concentraciones promedio registradas en el período de 6:00-9:00 en cada punto de monitoreo (12,8-38,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y 13,31-60,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀). Quispe (2022) reportó dosis medias inhaladas de 0,14-0,33 $\mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{2.5} y 0,16-0,50 $\mu\text{g}/\text{min}$ para PM₁₀, las cuales se asemejan a las obtenidas en este estudio para una intensidad de actividad ligera (0,145-0,537 $\mu\text{g}/\text{min}$ para PM_{2.5} y 0,150-0,837 $\mu\text{g}/\text{min}$ para PM₁₀, para hombres y mujeres) (Anexo E). Cabe destacar que, en el estudio de Quispe (2022), los resultados de las dosis potencialmente inhaladas no fueron diferenciados por sexo. Asimismo, no se especificaron el nivel de actividad física ni la tasa de inhalación empleada para el cálculo de dichas dosis, lo cual limita la posibilidad de realizar una comparación directa con los resultados del presente trabajo, en el cual sí se especificaron dichas variables.

En un contexto más local, Imery (2022) evaluó la exposición a partículas en vías concurridas por biciusuarios en la ciudad de Santiago de Cali, mediante el monitoreo de material particulado con el sensor de bajo costo AirBeam2, durante el horario de 6:00 a 8:00. Se realizaron 19 jornadas de monitoreo, de las cuales 18 se llevaron a cabo en días hábiles y una en día no hábil (día de control). Las concentraciones medias registradas fueron de 19,2 $\pm$ 7,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y 29,5 $\pm$ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀ en días hábiles, mientras que en el día de control fueron de 13,7 $\pm$ 4,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y 19,7 $\pm$ 8,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀. Teniendo en cuenta el periodo de medición considerado por Imery (2022), y con el propósito de realizar una comparación más precisa, se tomaron las concentraciones promedio registradas en el periodo de 6:00-9:00, diferenciando entre días hábiles y no hábiles. Durante los días hábiles, los valores obtenidos en este estudio oscilaron entre 12,8-38,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5}, y entre 13,31-60,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀. En contraste, en los días no hábiles, las concentraciones variaron entre 14,12-21,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5}, y entre 14,86-24,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀. En términos generales, las

concentraciones de ambos contaminantes fueron comparables con las reportadas por Imery (2022). Sin embargo, en el presente estudio se registraron valores más altos, con la excepción de las concentraciones de PM₁₀ durante los días no hábiles.

Respecto a las dosis inhaladas de PM_{2.5} y PM₁₀, se identificaron valores cercanos al promedio reportado en el estudio (Día de semana: 0,587 para PM_{2.5} y 0,903 para PM₁₀), con 0,586 µg/min para PM_{2.5} y 0,937 µg/min para PM₁₀ registrados específicamente en los puntos de monitoreo Súper Inter y Unicatólica, respectivamente. Ambas dosis corresponden a la categoría de hombres, lo que sugiere que la similitud en los resultados podría estar relacionada con la proximidad entre la tasa de inhalación para hombres utilizada en este trabajo de grado (0,0308 µg/min) y la considerada en el estudio (0,031 µg/min) para una actividad de intensidad moderada. Este estudio se consideró en el análisis comparativo porque también se llevó a cabo en el sur de la ciudad de Cali, lo que implica que sus resultados son más relevantes para contrastarlos con los de este trabajo.

Por otro lado, Cipoli *et al.* (2023) determinaron las dosis de deposición respiratoria de PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bragança, Portugal. El muestreo se realizó en el tejado de la Escuela Superior de Agricultura, Universidad Politécnica de Bragança, durante 55 días en la temporada de frío del 2021, abarcando tanto días laborables como fines de semana, en dos franjas horarias de 8:00-18:00 y 18:30-7:30. Las concentraciones promedio registradas durante el día oscilaron entre 4,78-46,9 µg/m³ para PM_{2.5} y entre 13,6-92,3 µg/m³ para PM₁₀, valores que se asemejan con el rango de las concentraciones promedio obtenidas en este trabajo durante todos los períodos de monitoreo (6,33-38,88 µg/m³ para PM_{2.5} y 6,9-60,67 µg/m³ para PM₁₀).

En cuanto a las dosis de inhalación, Cipoli *et al.* (2023) estimaron valores correspondientes a una intensidad de actividad ligera, utilizando una tasa de inhalación de 0,0109 m³/min para adultos. Los resultados obtenidos fueron de 0,11 ± 0,08 µg/min para PM_{2.5} y 0,37 ± 0,20 µg/min para PM₁₀. Por su parte, las dosis de inhalación para PM_{2.5} y PM₁₀ registradas en el presente estudio resultaron superiores: 0,137–0,265 µg/min para mujeres y 0,167–0,324 µg/min para hombres en el caso de PM_{2.5}, y 0,145–0,350 µg/min para mujeres y 0,177–0,428 µg/min para hombres para PM₁₀. Esta diferencia puede atribuirse, al hecho de que las tasas de inhalación utilizadas en este estudio (0,0113 m³/min para mujeres y 0,0138 m³/min para hombres, para una intensidad de actividad ligera) son aproximadamente un 3,7% y un 26,6% mayores, respectivamente, en comparación con la empleada por Cipoli *et al.* (2023).

En el estudio de Aix *et al.* (2024) se evaluó la exposición a material particulado PM_{2.5} durante diferentes tipos de desplazamientos (caminar, bicicleta, autobús y tranvía) en la ciudad de Grenoble, Francia, durante los días laborables comprendidos entre el 25 de abril y el 12 de mayo de 2022. Las mediciones se realizaron en tres sesiones: por la mañana (8:00–9:00), al mediodía (12:00–13:00) y por la tarde (16:00–17:00). La concentración promedio reportada para caminar por Aix *et al.* (2024) fue de 8,43 µg/m³, resultando más baja en comparación a las del presente estudio (6,33-38,88 µg/m³ para PM_{2.5}). No obstante, se observó que dicho valor medio se asemeja a las concentraciones obtenidas en el período de 15:00-18:00, especialmente los días lunes y domingo (lunes: 7,12 µg/m³ en IPS Meléndez; domingo: 7,33 µg/m³ en

Unicatólica y $8,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Control). Las dosis inhaladas correspondientes para estas concentraciones fueron $0,219 \mu\text{g}/\text{min}$, $0,227 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,276 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y $0,165 \mu\text{g}/\text{min}$, $0,171 \mu\text{g}/\text{min}$ y $0,208 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, respectivamente. Estos resultados son comparables con la dosis promedio reportada en el estudio de Aix *et al.* (2024), principalmente en la categoría de hombres ($0,247 \mu\text{g}/\text{min}$).

En contraste, los estudios de Velasco *et al.* (2019), Rodríguez & Núñez (2016) y Kumar *et al.* (2018) mostraron menor similitud con los resultados obtenidos en este trabajo de grado, ya que las concentraciones de material particulado reportadas por estos autores fueron significativamente más altas. Esto se traduce en una dosis de exposición considerablemente mayor, lo cual implica una exposición más elevada para las personas evaluadas en dichos estudios. Esta discrepancia puede atribuirse a diferencias en las características del entorno urbano, las fuentes emisoras predominantes, o los períodos y métodos de monitoreo utilizados.

En particular, el estudio de Rodríguez & Núñez (2016) que evaluó los niveles de exposición personal a material particulado inhalable $\text{PM}_{2.5}$ proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla, Colombia, presentó la mayor diferencia en comparación con los valores obtenidos en este trabajo. Las concentraciones reportadas por estos autores fueron de $178,58 \pm 48,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el día hábil y $119,05 \pm 48,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el día no hábil superando ampliamente las concentraciones registradas en el presente estudio, cuya media más alta fue de $38,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta diferencia se atribuye principalmente al intenso tráfico vehicular característico de la zona evaluada por Rodríguez & Núñez (2016).

En cuanto a las dosis inhaladas, se reportaron valores de $1,34 \pm 0,36 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres y $0,99 \pm 0,27 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres durante el día hábil, mientras que, en el día no hábil, los valores fueron de $0,35 \pm 0,14 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres y $0,26 \pm 0,11 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres. Estas dosis resultan considerablemente más elevadas a las obtenidas en el presente estudio para los días hábiles, en el cual no se superaron los $0,722 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres y $0,544 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres. En contraste, las dosis obtenidas en este estudio superaron a las reportadas por Rodríguez & Núñez (2016) para el día no hábil, con valores máximos de $0,585 \mu\text{g}/\text{min}$ para hombres y $0,440 \mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres.

Por otro lado, Velasco *et al.* (2019) determinaron la exposición a partículas ($\text{PM}_{2.5}$) y dosis inhaladas durante el traslado en transporte público en la Ciudad de México (taxi, metro, metrobús, servicio de viaje compartido, bicicleta y caminar), en el horario de 11:30-13:30. La concentración media reportada para el modo caminata fue $34 \pm 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superior a la reportada en el presente estudio para el periodo de 12:00-15:00 donde no se superaron los $23,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así mismo, las dosis inhaladas reportadas por Velasco *et al.* (2019) alcanzaron los $0,72 \pm 0,23 \mu\text{g}/\text{min}$, valores que superan a los obtenidos en este trabajo, donde las dosis no superaron los $0,616$ para hombres y $0,464$ para mujeres.

Finalmente, Kumar *et al.* (2018) realizaron un monitoreo móvil sistemático a lo largo de una ruta predefinida en la ciudad de Guildford, Reino Unido, con el objetivo de evaluar los niveles de exposición personal a material particulado en distintos microambientes de transporte (autobús, coche, bicicleta y caminata). Para el modo caminata, se reportaron concentraciones

de $PM_{2.5}$ de $25 \mu g/m^3$ por la mañana (8:30-11:00), $24 \mu g/m^3$ al mediodía (13:00-15:00) y $20 \mu g/m^3$ por la noche (17:00-19:00); mientras que para PM_{10} , los valores fueron de $72 \mu g/m^3$, $73 \mu g/m^3$ y $50 \mu g/m^3$, respectivamente. Estos valores fueron más elevados en comparación a los obtenidos en este estudio, teniendo en cuenta que al promediar los valores registrados en los periodos de 6:00-9:00 y 9:00-12:00 (mañana), da como resultado $18,56 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $22,33 \mu g/m^3$ para PM_{10} . Mientras que, los promedios obtenidos en los periodos de 12:00-15:00 (mediodía) y 15:00-18:00 (noche) fueron de $17,78 \mu g/m^3$ y $14,13 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$, y $20,40 \mu g/m^3$ y $16,44 \mu g/m^3$ para PM_{10} .

En cuanto a las dosis medias reportadas por Kumar *et al.* (2018) para una intensidad de actividad ligera en hombres, estas oscilaron entre $0,08$ - $0,10 \mu g/min$ para $PM_{2.5}$, y entre $0,67$ - $1,10 \mu g/min$ para PM_{10} . En el caso de $PM_{2.5}$, los valores fueron inferiores a los obtenidos en el presente trabajo ($0,087$ - $0,537 \mu g/min$), sin embargo, para PM_{10} ($0,095$ - $0,837$), las dosis reportadas por Kumar *et al.* (2018) fueron mayores, lo cual es coherente con las concentraciones registradas en su estudio. Estas diferencias podrían estar relacionadas con diferencias metodológicas en el cálculo de las dosis, ya que dichos autores consideraron variables adicionales como el diámetro medio de masa y el diámetro óptico de las partículas.

Comparar los resultados de este estudio con los reportados en investigaciones previas permitió contextualizar los niveles de exposición a material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) en la zona baja de Meléndez dentro de un marco más amplio, tanto a nivel local como internacional. Este contraste no solo evidenció la variabilidad en las concentraciones y dosis según las condiciones urbanas, geográficas y socioeconómicas de cada entorno, sino que también permitió validar y dimensionar los hallazgos del presente trabajo, identificando similitudes con estudios como los de Quispe (2022) e Imery (2022), y reconociendo diferencias cuando las condiciones eran distintas como en el caso del estudio de Rodríguez & Núñez (2016), donde se presentaba un mayor flujo vehicular en comparación al de la zona de estudio.

Además, dicha comparación permitió evidenciar la influencia que ejercen diferentes factores sobre los niveles de exposición, tales como la intensidad de actividad física, la tasa de inhalación, la franja horaria de monitoreo y la caracterización del entorno. En este sentido, se resalta la importancia de considerar variables diferenciadas por sexo e intensidad de actividad física para obtener estimaciones más precisas de las dosis inhaladas, aspecto que no siempre fue abordado en los estudios consultados.

8. CONCLUSIONES

Los puntos de monitoreo Calle 5ta e IPS Meléndez registraron las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Durante el periodo de 6:00-9:00, ambos puntos presentaron concentraciones promedio iguales, mientras que en el periodo de 9:00-12:00, Calle 5ta registró las concentraciones promedio máximas. Por su parte, IPS Meléndez presentó las concentraciones promedio más elevadas en los periodos de 12:00-15:00 y 15:00-18:00. Cabe destacar que las diferencias entre ambos puntos fueron mínimas en la mayoría de los periodos, excepto en el de 9:00-12:00, donde Calle 5ta superó significativamente a IPS Meléndez. Por lo tanto, aunque IPS Meléndez registró las concentraciones medias más altas en la mayoría de los periodos de monitoreo, Calle 5ta presentó las concentraciones promedio máximas al considerar toda la jornada de monitoreo, con $19,5 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $23,7 \mu g/m^3$ para PM_{10} , indicando una mayor carga de contaminación acumulada en dicho punto.

Al comparar el comportamiento de material particulado en función de los períodos de medición, se identificó que las concentraciones más altas se registraron en el período de 6:00-9:00 y mostraron una tendencia decreciente en las horas posteriores. Esto se refleja con concentraciones promedio máximas en el primer periodo de monitoreo, de $21,9 \mu g/m^3$ $PM_{2.5}$ y $27,9 \mu g/m^3$ para PM_{10} . Este comportamiento se asocia con la alta densidad vehicular característica de las horas pico, cuando se intensifican los desplazamientos hacia las actividades laborales, académicas y cotidianas. Por su parte, las condiciones meteorológicas, como la velocidad del viento y la altura de la CLA, parecieron influir significativamente en la reducción de las concentraciones en horas de la tarde, cuando se intensifica la velocidad del viento y se alcanza una mayor altura de CLA en la ciudad, favoreciendo la dispersión y dilución de los contaminantes atmosféricos.

Asimismo, al evaluar la variabilidad de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en función de los días de la semana, se evidenció una reducción de las concentraciones durante el día domingo, cuando las concentraciones promedio fueron las más bajas con 14,87 para $PM_{2.5}$ y 16,43 para PM_{10} . Esta disminución de material particulado coincide con la reducción del tráfico vehicular observada durante este día, lo que sugiere una fuerte relación entre la actividad vehicular y la concentración de PM. Este comportamiento también se observó en el punto de monitoreo Control, donde se registraron las concentraciones promedio más bajas en la mayoría de los días y periodos analizados, con medias de 14,8 para $PM_{2.5}$ y $16,4 \mu g/m^3$ para PM_{10} para toda la jornada de monitoreo.

Al contrastar las concentraciones promedio de PM durante toda la jornada de monitoreo ($17,3 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y $20,4 \mu g/m^3$ para PM_{10}) con la Norma Colombiana de Calidad del Aire (Resolución 2254 de 2017), se observa que, tanto para $PM_{2.5}$ como para PM_{10} se cumple con los límites máximos de $37 \mu g/m^3$ y $75 \mu g/m^3$ para un tiempo de exposición de 24 horas. En cuanto a las guías de calidad del aire de la OMS, se evidencia que para $PM_{2.5}$ se excede el límite recomendado de $15 \mu g/m^3$ en un 15,3%, mientras que para PM_{10} se cumple con el umbral de $45 \mu g/m^3$. Estos resultados sugieren un comportamiento más crítico para $PM_{2.5}$, lo que resulta preocupante desde el punto de vista de salud pública, considerando que este contaminante tiene

mayor capacidad de penetración en el tracto respiratorio.

Los puntos de monitoreo con mayor exposición a material particulado corresponden a IPS Meléndez y Calle 5ta en el periodo de 6:00-9:00, con dosis máximas de $PM_{2.5}$ de 1,198 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,937 $\mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y 0,902 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 0,706 $\mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, mientras que para PM_{10} fueron de 1,869 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 1,333 $\mu\text{g}/\text{min}$ para hombres, y 1,408 $\mu\text{g}/\text{min}$ y 1,004 $\mu\text{g}/\text{min}$ para mujeres, respectivamente. Por otro lado, al comparar las dosis inhaladas entre los diferentes periodos de monitoreo, se observó que el período de 6:00-9:00 registró los valores más elevados, lo que es consecuente con los resultados obtenidos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

Con estos resultados se evidencia que la dosis potencialmente inhalada por hombres es un 32,76% mayor en comparación con la de las mujeres. Esta diferencia se atribuye a que la tasa de inhalación fue la única variable que presentó diferencias entre sexos, siendo un 32,76% más alta en hombres (0,0308 m^3/min) respecto a mujeres (0,0232 m^3/min) para una intensidad de actividad moderada. En consecuencia, la exposición a material particulado representa un mayor riesgo para hombres, debido a sus características estructurales y anatómicas que les confieren una mayor capacidad respiratoria.

En ese sentido, se resalta la importancia de la tasa de inhalación como un factor determinante en la exposición a material particulado, dado que esta depende de diferentes factores, entre ellos la edad, el peso corporal, el nivel de actividad física y el sexo. Estos condicionan los niveles de exposición a PM, generando variaciones significativas según las características individuales de cada persona. Esta influencia quedó evidenciada al comparar las dosis inhaladas para dos niveles de actividad: en hombres, la exposición para una intensidad moderada fue un 123,19% mayor en comparación con una intensidad ligera, mientras que en mujeres este incremento fue del 105,31%.

Los resultados de la encuesta para determinar la percepción de la calidad del aire revelaron que más del 50% de la población percibe la calidad del aire en el barrio Meléndez como regular, y que tan solo el 2,96% se informa a través de fuentes oficiales. A pesar de ello, se observó una alta sensibilización sobre los riesgos para la salud asociados a la contaminación atmosférica, ya que el 97,04% de los encuestados reconoce sus efectos adversos. Estos hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer la difusión de información oficial y la formulación de políticas públicas que aborden no solo la calidad del aire, sino también la movilidad, teniendo en cuenta que, en este sector, las fuentes móviles emergen como un factor clave de contaminación, destacando el transporte informal como el principal contribuyente según el 32,59% de los encuestados. Este fenómeno podría estar influenciado por la insuficiencia del sistema MIO y la prevalencia de la informalidad en el sector, lo que resalta la urgencia de estrategias integrales para mitigar su impacto ambiental.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda que para futuros estudios se analice la relación entre el comportamiento de material particulado y los factores meteorológicos, ya que estos pueden influir significativamente en su dispersión, difusión y concentración. Factores como la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad relativa y la estabilidad atmosférica pueden alterar sustancialmente los niveles de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en una zona determinada. Además, estas variables están estrechamente ligadas a las características geográficas y urbanísticas del área de estudio, por lo que su inclusión en el análisis permitiría obtener una evaluación más completa de la dinámica local de material particulado.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, en los que se evidenció que el $PM_{2.5}$ presenta un comportamiento más crítico que el PM_{10} en relación con los límites de la OMS, se recomienda incluir el análisis de partículas finas y ultrafinas en futuros estudios. Debido a su reducido tamaño, estas pueden penetrar con mayor facilidad en el tracto respiratorio, permanecer mayor tiempo en la atmósfera y dispersarse en un rango geográfico más amplio, lo que representa un riesgo significativo para la salud pública tanto a nivel local como regional.

Se enfatiza la necesidad de que las autoridades competentes implementen estrategias efectivas de divulgación sobre la calidad del aire en la ciudad de Cali, mediante el uso de plataformas digitales, aplicaciones móviles o boletines informativos. A pesar de que el deterioro de la calidad del aire es una problemática de gran relevancia a nivel mundial, los resultados de este estudio evidenciaron un bajo nivel de conocimiento por parte de la población respecto a la magnitud del problema, así como una limitada accesibilidad a canales de información oficiales.

Por ello, es fundamental desarrollar mecanismos de información accesibles, claros y actualizados que permitan a la comunidad conocer en tiempo real los niveles de contaminación atmosférica. Asimismo, es crucial que estas problemáticas, se aborden tanto en términos de políticas públicas como en campañas de educación y sensibilización, promoviendo una mayor conciencia ambiental en la población, con el fin de mitigar los efectos adversos en la salud derivados de la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos.

Se recomienda a las autoridades competentes implementar estrategias para atender el tránsito vehicular y los puestos informales de venta de comida, dado que se identificaron como las principales fuentes de emisión de material particulado en la zona de estudio. No obstante, esta problemática debe analizarse desde una perspectiva más amplia considerando que el transporte informal surge como una alternativa ante las deficiencias del sistema de transporte público, el cual no logra cubrir de manera eficiente las necesidades de movilidad de la población. De manera similar, la informalidad responde a la falta de oportunidades laborales, lo que obliga a muchas personas a recurrir a actividades económicas alternativas para su sustento. Por lo tanto, la solución no debe centrarse exclusivamente en la regulación de estas actividades, sino en fortalecer el sistema de transporte público, así como promover políticas que fomenten la formalización del empleo y brinden oportunidades económicas sostenibles. De esta manera, se

podrá reducir el impacto ambiental de estas actividades sin afectar el derecho de las personas a una vida digna.

Considerando que la tasa de inhalación influye significativamente en la estimación de la dosis potencialmente inhalada de material particulado, se recomienda realizar estudios específicos para determinar esta variable en las condiciones locales. Las tasas de inhalación reportadas en el Manual de Factores de Exposición de la EPA se basan en estudios realizados en otros países con diferentes características poblacionales y climáticas a las de esta región. Por lo tanto, es fundamental actualizar esta información mediante investigaciones que consideren factores como la edad, el nivel de actividad física, las condiciones climáticas y los hábitos de la población local, lo que permitiría obtener estimaciones más precisas de la exposición real a material particulado.

10. REFERENCIAS

- Acevedo, J. (2006). *Evaluación del riesgo para la salud humana asociado a la exposición a BTEX en las gasolineras de Quito* [Tesis de maestría, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio Universidad San Francisco de Quito. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/885>
- Aix, M., Claitte., M. & Bicout, D. (2024). Exposure to particulate matter when commuting in the urban area of Grenoble, France. *Atmospheric Environment*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120887>
- Alcaldía de Santiago de Cali (2014). *A partir del martes 1 de julio cambia el pico y placa en Cali*. Secretaría de Movilidad. <https://www.cali.gov.co/movilidad/publicaciones/103691/a-partir-del-martes-de-julio-cambia-el-pico-y-placa-en-cali/>
- Alcaldía de Santiago de Cali (2020). *A partir del martes 1 de julio cambia el pico y placa en Cali*. Secretaría de Movilidad. <https://www.cali.gov.co/movilidad/publicaciones/154643/a-partir-del-1-de-julio-cambia-el-pico-y-placa-en-cali/#:~:text=Desde%20las%2012%20a.m.%20y,0%2C%20viernes%201%20y%202.>
- Alcaldía de Santiago de Cali (2021). *DAGMA resalta los beneficios ambientales del MIO*. DAGMA. <https://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/162273/dagma-resalta-los-beneficios-ambientales-del-mio/>
- Alcaldía de Santiago de Cali (2024-a). *Medida de pico y placa en Cali: horarios y cómo funcionará*. Secretaría de Movilidad. <https://www.cali.gov.co/movilidad/publicaciones/180276/medida-de-pico-y-placa-en-cali-horarios-y-como-funcionara/>
- Alcaldía de Santiago de Cali (2024-b). *El domingo 10 de marzo regresa la Ciclovida*. Secretaría del Deporte. <https://www.cali.gov.co/deportes/publicaciones/180752/el-domingo-10-de-marzo-regresa-la-ciclovida/#:~:text=Cada%20domingo%2C%20la%20Ciclovida%20re%C3%BAne,a%20las%20calles%20del%20Distrito.&text=Las%20jornadas%20contar%C3%A1n%20con%20clases,en%20ocho%20de%20las%20estaciones>
- Alcaldía de Santiago de Cali (2024-c). *En la Ciclovida: ¡Cali se activa y se cuida!* Secretaría del Deporte. <https://www.cali.gov.co/deportes/publicaciones/181904/en-la-ciclovida-cali-se-activa-y-se-cuida/#:~:text=Mejorar%20la%20salud%20f%C3%ADsica%20y%20mental%2C%20fortalecer,crear%20espacios%20activos%20y%20saludables%20para%20toda>

- Alcaldía de Santiago de Cali (2025). *Con ruta comunitaria en la Comuna 20, el domingo 2 de marzo vuelve la Ciclovida de Cali*. Secretaría del Deporte. <https://www.cali.gov.co/deportes/publicaciones/184772/con-ruta-comunitaria-en-la-comuna-20-el-domingo-2-de-marzo-vuelve-la-ciclovida-de-cali/>
- Alfonso, J. (2023). *Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/83873/1049642142.2023.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Álvarez, D. & Suárez, L. (2020). Aporte cuantitativo de las fuentes de PM₁₀ y PM_{2.5} en sitios urbanos del Valle del Mantaro, Perú. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(4). <https://doi.org/10.20937/rica.53473>
- Alves, C., Evtyugina, M., Vicente, E., Vicente, A., Goncalves, C., Neto, A., Nunes, T. & Kovats, N (2022). Outdoor charcoal grilling: Particulate and gas-phase emissions, organic speciation and ecotoxicological assessment. *Atmospheric Environment*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119240>
- Alves, C., Vicente, E., Evtyugina, M., Vicente, A., Nunes, T., Lucarelli, F., Calzolari, G., Nava, S., Calvo, A., del Blanco, A., Oduber, F., Castro, A. & Fraile, R. (2020). Indoor and outdoor air quality: A university cafeteria as a case study. *Atmospheric Pollution Research*, 11(3), 531-544. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.12.002>
- Arar, S., Ikbarieh, S., Kailani, M. & Alawi., M. (2022). Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in smoke of charcoal grilled meat-restaurants in Amman, Jordan. *Toxin Reviews*, 41(1). <https://doi.org/10.1080/15569543.2020.1870498>
- Aristizábal, L., López, L., Rodríguez, M., Rodríguez, G. & Sarria, K. (2011). *Visión social hacia el futuro: comuna 18 barrio Meléndez*. <https://visionsocialhaciaelfuturo.blogspot.com/>
- Arregocés, H., Rojano, R. & Restrepo, G. (2021). Impact of lockdown on particulate matter concentrations in Colombia during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142874>
- Arrieta, A. (2016). Dispersión de material particulado (PM₁₀), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 43-54. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5445/4515
- Avellaneda, L. (2023). *Análisis de la exposición a material particulado en una zona residencial del municipio de Jamundí, Valle del Cauca* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Educativo Digital Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/entities/publication/f27008e3-201a-4d15-89af-98c1099b6bef>

- Badura, M., Batog, P., Osiadacz, A. & Modzel, P. (2019). Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements. *SN Applied Sciences*, 1(622). <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-0630-1>
- Bamola, S., Goswami, G., Dewan, S., Goyal, I., Agarwal, M., Dhir, A. & Lakhani, A. (2024). Characterising temporal variability of PM_{2.5}/PM₁₀ ratio and its correlation with meteorological variables at a sub-urban site in the Taj City. *Urban Climate*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101763>
- Bastidas, N. & Marín, M. (2024). *Caracterización de zonas con exposición a posibles fuentes de contaminación del aire en el municipio de Yumbo* [Tesis para optar al título de Magister en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Educativo Digital Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/cca1016c-17a1-41e7-9bb1-6054e81202ff/content>
- Becerra, D., Ramirez, L., Niño, M., Oviedo, C. & Plaza, L. (2021). Relación entre la Calidad del Aire y la Incidencia de Enfermedades Respiratorias en el Municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander. *Ingeniería y competitividad*, 23(2). <https://doi.org/10.25100/iyv.v23i2.9698>
- Belachsen, I. & Broday, D. (2024). Decomposing PM_{2.5} concentrations in urban environments into meaningful factors 2. Extracting the contribution of traffic-related exhaust emissions. *Science of The Total Environment*, 940. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173715>
- BID (2023). *Mejorar la vida de los trabajadores independientes: El camino hacia su aseguramiento efectivo*. <http://dx.doi.org/10.18235/0005030>
- Boldo, E. (2016). *La contaminación del aire*. Instituto de Salud Carlos III; Los Libros de la Catarata. <http://gesdoc.isciii.es/gesdoccontroller?action=download&id=22/01/2019-4c9d67e7e3>
- BreatheSafeAir. (2024). *AirBeam 3 Review – Portable & Standalone Air Quality Monitor*. <https://breathesafeair.com/airbeam-3-review/>
- Brusseau, L., Mathias, D., Comrie, C. & Musil, A. (2019). Atmospheric Pollution. En Brusseau, L. M., Pepper, L. I., & Gerba, P. C. *Environmental and Pollution Science* (3ra ed., pp. 293-309). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128147191000173>

- Bulot, F., Johnston, S., Basford, P., Easton, N., Cristea, M., Foster, G., Morris, A., Cox, S. & Loxham, M. (2019). Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. *Scientific Reports*, 9(7497). <https://www.nature.com/articles/s41598-019-43716-3#Sec22>
- Buya, S., Gokon, H., Chi, H., Usanavasin, S. & Karnjana, J. (2024). Estimating Ground-Level Hourly PM_{2.5} Concentrations in Thailand Using Satellite Data: A Log-Linear Model With Sum Contrast Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3384964>
- Cali Cómo Vamos. (2023-a). *El MIO y su impacto sobre la calidad de vida de los caleños: Utilización del MIO*. https://www.calicomovamos.org.co/_files/ugd/ba6905_4071163c6aa04baf899098e3d41c0cb5.pdf
- Cali Cómo Vamos. (2023-b). *El MIO y su impacto sobre la calidad de vida de los caleños: Propuestas ciudadanas para mejorar el MIO*. https://www.calicomovamos.org.co/_files/ugd/ba6905_05158aacc31f47b9addcfe11802bf689.pdf
- Campos, A., Muñoz, A., Alvarez, D., Huamán de la Cruz, A., Unchipaico, I., Camargo, A., Mariños, J. & Unchipaico, J. (2024). A Spatio-Temporal Behavior of PM_{2.5} and PM₁₀ on Changes of Their Concentration Levels in the Metropolitan Area of Lima. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(10), 4083-4092. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.191036>
- Casallas, A., Castillo, M., Guevara, M., González, Y., Sanchez, E. & Belalcazar, L. (2022). Spatio-temporal analysis of PM_{2.5} and policies in Northwestern South America. *Science of The Total Environment*, 852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158504>
- CeMCAQ (2020). *Dióxido de nitrógeno*. <http://aire.cemcaq.mx/dioxido-de-nitrogeno/>
- Chun, B., Choi, K. & Pan, Q. (2020). The nexus between PM 2.5 and urban characteristics in the Texas triangle region. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102187. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.016>
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G. & Fetter, W. (2020). Effect of wind speed on the level of particulate matter PM₁₀ concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 77, 35-48. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10874-020-09401-w>
- Cipoli, Y., Furst, L., Feliciano, M. & Alves, C. (2023). Respiratory deposition dose of PM_{2.5} and PM₁₀ during night and day periods at an urban environment. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16, 2269-2283. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01405-1>

- Conde, M. (2021). *Estudio exploratorio de la variación espacial de las concentraciones de material particulado asociadas a una vía de alto flujo vehicular en el sur de Cali* [Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Educativo Digital Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/entities/publication/975a0856-70dc-4986-aa48-5a6c72ba74f5>
- DAGMA (2013). Resolución N° 4133.0.21. 984. *Por medio de la cual se expide el reglamento del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Santiago de Cali*. <http://web1.cali.gov.co/descargar.php?idFile=8857&plantilla=admin>
- DAGMA (2019). *Informe Anual de la Calidad del Aire y Ruido Ambiental de Santiago de Cali, período de análisis: Año 2018*. <https://www.cali.gov.co/dagma/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=35530>
- DAGMA (2020). *Boletín Anual de la Calidad del Aire de Santiago de Cali, período de análisis: Año 2019*. <https://www.cali.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=51716>
- DAGMA, CVC, Universidad del Valle & Clean Air Institute (2017). *Programa Aire Limpio Cali*. <https://www.cali.gov.co/dagma/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=30772>
- DANE (2018). Medida de pobreza multidimensional municipal de fuente censal - Indicadores. <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=54595086fdd74b6c9effd2fb8a9500dc>
- DANE (2019). Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 [Diapositivas de PowerPoint]. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190711-CNPV-presentacion-valle.pdf>
- DAPM (2014). *Áreas de actividad del Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali* [Mapa]. https://idesc.cali.gov.co/download/pot_2014/mapa_42_areas_de_actividad.pdf
- DAPM (2017). *Unidad de Planificación Urbana 13 - Meléndez. Documento técnico de soporte - Acuerdo 0433 de 2017*. <https://www.cali.gov.co/info/viewpdf/pdf1545157640.pdf>
- DAPM (2020). *Reporte Anual de Movilidad 2019* (3ra ed.). <https://www.cali.gov.co/observatorios/publicaciones/158731/observatorio-movis-reporte-anual-2019/>

- DAPM & Universidad del Valle (2015). *Análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Santiago de Cali* (tomo II). https://idesc.cali.gov.co/download/movilidad/documento_tecnico_comportamiento_vial.pdf
- Díaz, E., Vázquez, W., Venegas, A., Morales, H. & Hernández, S. (2021). Emisiones generadas por el consumo de leña y carbón en la preparación de comida rápida. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(2). <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2962>
- DNP (2017). *Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones*. [https://2022.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://2022.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- DNP (2018). *Documento CONPES 3943: Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire*. Bogotá, D.C. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/conpes-3943-de-2018.pdf>
- Echeverry, G., Rojas, N. & Mosquera, J. (2021). *Impacto de la variabilidad del tráfico sobre la concentración de material particulado en el Distrito de Santiago de Cali*. Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASAP), Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.1109/CASAP54985.2021.9703409>
- Echeverry, G., Rojas, N. & Mosquera, J. (2023). Cambios en la calidad del aire asociados al tráfico automotor durante el aislamiento por COVID-19 en Santiago de Cali, Colombia. *Ingeniería y competitividad*, 25(1). <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.11891>
- EPA. (2011). Chapter 6: Inhalation rates. *Exposure factors handbook (EPA/600/R-09/052F)*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-chapter06.pdf>
- EPA (2023). *Particulate Matter (PM) Basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- EPA (2024). *Preguntas frecuentes acerca de los sensores de aire*. <https://espanol.epa.gov/espanol/preguntas-frecuentes-acerca-de-los-sensores-de-aire>
- Eslava, J., Martínez, F., Soto, A., Vera, E. & Guevara, D. (2021). Generación de mapas de contaminación por material particulado mediante sistemas embebidos: caso de estudio en Cúcuta (Colombia). *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 13(3). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2422-42002021000300086#f8

- Espitia, S. & Porras, S. (2017). *Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de resuspensión en vías de Bogotá* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle, Bogotá]. Ciencia Unisalle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/87afde02-6e19-45e3-995f-cf010ec7a299>
- Fischer, F. & Beltrán, D. (2021). Análisis del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá - Colombia. *Gestión y Ambiente*, 24(2). <https://pdfs.semanticscholar.org/866c/1bc72f575674b9f31214bbf4568aafcfa3c2.pdf>
- Franco, D. (2020). *Análisis y caracterización del material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en la ciudad de Manizales* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79214>
- Frías, V. (2021). *La contaminación atmosférica como factor determinante en la salud humana* [Tesis de pregrado, Universidad de Alcalá]. Biblioteca Digital Universidad de Alcalá. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/49527>
- Giordano, M., Malings, C., Pandis, S., Presto, A., McNeill, V., Westervelt, D., Beekmann, M & Subramanian, R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal of Aerosol Science*, 158. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850221005644>
- Gokhale, S. & Raokhande, N. (2008). Performance evaluation of air quality models for predicting PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations at urban traffic intersection during winter period. *Science of The Total Environment*, 394, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.020>
- Grange, S., Fischer, A., Zellweger, C., Alastuey, A., Querol, X., Jaffrezo, J., Weber, S., Uzu, G. & Hueglin, C. (2021). Switzerland's PM₁₀ and PM_{2.5} environmental increments show the importance of non-exhaust emissions. *Atmospheric Environment: X*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100145>
- Hay, N., Onwuzurike, O., Roy, S., McNamara, P., McNamara, M. & McDonald, W. (2023). Impact of traffic on air pollution in a mid-sized urban city during COVID-19 lockdowns. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16, 1141-1152. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-023-01330-3>
- He, H. & Gao, O. (2021). Particulate matter exposure at a densely populated urban traffic intersection and crosswalk. *Environmental Pollution*, 268, parte B. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115931>

- Heimbinder, M. & Lim, C. (2021). *AirBeam3 Technical Specifications, Operation & Performance*. HabitatMap. <https://www.habitatmap.org/blog/airbeam3-technical-specifications-operation-performance>
- Heintzelman, A., Filippelli, G., Moreno, M., Wilson, J., Li, X., Druschel, G. & Lulla, V. (2023). Efficacy of Low-Cost Sensor Networks at Detecting Fine-Scale Variations in Particulate Matter in Urban Environments. *International Journal of Environmental Research and public health*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph20031934>
- Heydari, S., Tainio, M., Woodcock, J. & Nazelle, A. (2020). Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas using a multilevel Bayesian meta-regression approach. *Environment International*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105800>
- Huong, G., La, L., Cong, H & Le, A. (2024). An exploration of meteorological effects on PM2.5 air quality in several provinces and cities in Vietnam. *Journal of Environmental Sciences*, 145, 139-151. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.07.020>
- Icedo, J., Robles, A. & Lutz, A. (2022). Variabilidad intraurbana de percepciones y respuestas al riesgo por contaminación del aire y olas de calor en una ciudad del noroeste de México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 32(59). <https://doi.org/10.24836/es.v32i59.1180>
- IDEAM (2016). *Segundo boletín sobre contaminación atmosférica*. Bogotá, D.C. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023669/Segundo_boletin_contaminacion_atmosferica.pdf
- IDEAM (2020). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2019*. Bogotá, D.C. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/023898.pdf>
- Imery, S. (2022). *Evaluación de la exposición a material particulado en vías concurridas por bicicuarios en la ciudad de Santiago de Cali* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Educativo Digital Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/c78ba8f9-2266-454b-87c0-57e34132ea6d/content>
- Kim, K., Kabir, E. & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Klinger, R. (2011). *Muestreo estadístico: métodos básicos* (1a ed.). Programa editorial Universidad del Valle.
- Kumar, P., Rivas, I., Pratap A., Julius, V., Ananya, M & Frey., C. (2018). Dynamics of coarse and fine particle exposure in transport microenvironments. *Climate and Atmospheric Science*, 1(11). <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0023-y>

- Kumar, P., Adnan, M., Singh, A. & Singh, R. (2021). Biological contaminants in the indoor air environment and their impacts on human health. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 14(11), 1723-1736. <https://doi.org/10.1007%2Fs11869-021-00978-z>
- Li, Y., Shu, M., Ho, S., Wang, C., Cao, J., Wang, G., Wang, X., Wang, K. & Shao, X. (2015). Characteristics of PM_{2.5} emitted from different cooking activities in China. *Atmospheric Research*, 166, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.010>
- Mencarelli, A., Greco, R., Balzan, S., Grigolato, S. & Cavalli, R. (2023). Charcoal-based products combustion: Emission profiles, health exposure, and mitigation strategies. *Environmental Advances*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100420>
- Mesa, A. (2024). *Efecto de los eventos dinámicos de conducción en el consumo de combustible y emisiones contaminantes de vehículos en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/4169ca80-5899-4075-8cc5-a0a48032434b/download>
- MinAmbiente (1995). Decreto 948 de 1995. *Por la cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire*. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527621/Decreto+948+de+1995.pdf/670a0603-4d1f-454f-941e-08e6ba70666d>
- MinAmbiente (2010). Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire. Bogotá, D.C. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Operacion.pdf
- MinAmbiente (2017). Resolución 2254 de 2017. *Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones*. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- MinAmbiente (2018). *Transporte público masivo libre de hollín y más eficiente*. Bogotá, D.C. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/TRANSPORTE_PUBLICO_MASIVO.pdf
- Morales, R., Galvis, B., Balachandran, S., Ramoa, J., Sarmiento, O., Gallo, S. & Contreras, Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, 157, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.006>
- Moreno, G. & Dolores, M. (2003). *Toxicología ambiental: evaluación de riesgo para la salud humana*. McGraw-Hill.

- Nuvolone, D., Petri, D. & Voller, F. (2018). The effects of ozone on human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 8074-8088. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>
- Okello, N., Okello, T. & Zunckel, M. (2020). Public perceptions of air quality status and suggestions for improvement: The case of Richards Bay and its surroundings, uMhlathuze Local Municipality, South Africa. *Clean Air Journal*, 30(1). https://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2410-972X2020000100006&script=sci_arttext
- Okonkwo, U., Ijioma, I. & Onwuamaezea, I. (2015). Pollutants Emissions of Filling Stations and Their Impact on the Air Quality. *International Journal of Engineering*, 28(6), 949-955. 10.5829/idosi.ije.2015.28.06c.16
- OMS (2006). *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Alemania. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OMS (2018). *Informe sobre los resultados de la OMS: presupuesto por programas 2016 - 2017*. Francia. https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA71/A71_28-sp.pdf
- OMS (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} y PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Ginebra. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OMS (2022). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health?gclid=CjwKCAjwscGjBhAXEiwAswQqNDea_fmD8aMZ6ok6bBeTXhIcw9NuaEK8DYsbDVs5aeG5wXxb57mTkBoC6vQQA_vD_BwE](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health?gclid=CjwKCAjwscGjBhAXEiwAswQqNDea_fmD8aMZ6ok6bBeTXhIcw9NuaEK8DYsbDVs5aeG5wXxb57mTkBoC6vQQA_vD_BwE)
- OMS (2023). *Air quality and health*. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Ossa, A. & Londoño, C. (2024). *Análisis de exposición individual a material particulado respirable de operarios de barrido de la comuna de Belén, 2023* [Trabajo de Grado para optar al título de Administrador Ambiental y Sanitario, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/8086b16b-9f87-4307-b964-90ed42c5bfd5/content>
- Patiño, S. & Patiño, S. (2021). Impacto de la combustión del transporte terrestre en la calidad del aire y la salud pública en áreas urbanas. Una revisión. *Revista Nodo*, 15(30), 61-73. <https://doi.org/10.54104/nodo.v15n30.825>

- Pénard, M. & Annesi, M. (2004). Air pollution: from sources of emissions to health effects. *Breathe*, 1(2), 108-119. doi: 10.1183/18106838.0102.108
- Peng, W., Liu, X. & Taghizadeh, H. (2022). Carbon Monoxide Emission and Air Quality Analysis Based on an Improved Double-Weight Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Frontiers in Public Health*, 9, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.790383>
- Peña, C., Carter, D. & Fierro, F. (2001). *Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental*. Southwest Hazardous Waste Program. <https://superfund.arizona.edu/sites/superfund.cals.arizona.edu/files/toxamb.pdf>
- PNUMA (2020). *Cinco líderes en la lucha contra las emisiones del transporte*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/cinco-lideres-en-la-lucha-contra-las-emisiones-del-transporte>
- PNUMA (2024). *Vehículos pesados usados y medio ambiente: una visión global de los vehículos pesados usados: flujo, escala y regulación*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44826>
- Popescu, F. & Ionel, I. (2010). Anthropogenic Air Pollution Sources. En Kumar, A. (Ed.). *Air Quality*. Sciyo. doi: 10.5772/259
- Quispe, G. (2022). *Variación espacial del riesgo en la salud por material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en los distritos de Huancayo Metropolitano* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro de Perú]. Repositorio Institucional Digital Universidad Nacional del Centro de Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8548/T010_74730784_T_removed.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rincón, J. & Vahos, D. (2021). Percepciones de los habitantes del municipio de Sabaneta frente a los cambios en la calidad del aire y su influencia en la salud pública entre los años 2015-2020. *Salud y sociedad uptc*, 5(1). https://revistas.uptc.edu.co/index.php/salud_sociedad/article/view/15629/12637
- Rodríguez, R. & Núñez, Y. (2016). *Nivel de exposición personal a material particulado inhalable PM_{2.5} proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla* [Tesis de pregrado, Corporación Universidad de la Costa]. Repositorio Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/525b3d07-62a3-4aed-a9cb-b47de79cb03b>
- Rong, J., Huang, Y., Li, Z., Zhang, J., Liu, Y., Zhao, Z. & Yu, M. (2024). Experimental study on the airflow dynamics and particulate matter emission characteristics of cooking fumes during frying, roasting, and deep-frying. *Journal of Building Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108524>

- Rua, J. & López, Z. (2021). *Variación espacial de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} en las principales vías de la ciudad de barranquilla* [Tesis de pregrado, Corporación Universidad de la Costa]. Repositorio Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/6418d87b-dc17-4bf1-a0ec-e9e5ff1e298d/content>
- Šarkan, B., Gnap, J., Loman, M. & Harantová, V. (2023). Examining the Amount of Particulate Matter (PM) Emissions in Urban Areas. *Applied Sciences*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/app13031845>
- Silva, J. & Canchala, T. (2013). Variación espacial y temporal de concentraciones de PM₁₀ en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 12, 129-141. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231130851011.pdf>
- Singh, V., Singh, S. & Biswal, A. (2021). Exceedances and trends of particulate matter (PM_{2.5}) in five Indian megacities. *Science of The Total Environment*, 750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141461>
- SISAIRE (2025). Sistema de Información sobre la Calidad del Aire. IDEAM. Recuperado el 11 de abril de 2025. <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/consultas.xhtml>
- South Coast Air Quality Management District (2023). *Sensor Detail*. <https://www.aqmd.gov/aq-spec/sensordetail/habitatmap---airbeam3>
- Southerland, V., Braear, M., Mohegh, A., Hammer, M., Donkelaar, A. & Martin, R. (2022). Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*, 6, 139-146. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00350-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00350-8)
- Talaminos, A., Márquez, E., Roa, L. & Ortega, F. (2018). Factores que afectan a la función pulmonar: una revisión bibliográfica. *Archivos de Bronconeumología*, 54(6), 327-332. <https://www.archbronconeumol.org/es-factores-que-afectan-funcion-pulmonar-articulo-S0300289618300450>
- Tang, R., Sahu, R., Su, Y., Milsom, A., Mishra, A., Berkemeier, T. & Pfrankg, C. (2024). Impact of Cooking Methods on Indoor Air Quality: A Comparative Study of Particulate Matter (PM) and Volatile Organic Compound (VOC) Emissions. *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1155/2024/6355613>
- Tang, R. & Pfrang, C. (2023). Indoor particulate matter (PM) from cooking in UK students' studio flats and associated intervention strategies: evaluation of cooking methods, PM concentrations and personal exposures using low-cost sensors. *Environmental Science: Atmospheres*, 3, 537-551. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ea/d2ea00171c>

- Ubilla, C. & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica: efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118. doi: 10.1016/j.rmclc.2016.12.003
- Van, Y., Perry, S., Klemes, J. & Lee, C. (2018). A review on air emissions assessment: Transportation. *Journal of Cleaner Production*, 194, 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.151>
- Vang, V., Tung, T., Ölçer, A., Tuan, A., Le, A., Kumar, S. & Viet, V. (2020). A remarkable review of the effect of lockdowns during COVID-19 pandemic on global PM emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1853854>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117044>
- Wu, C., Wang, H., Cai, W., He, H., Ni, A. & Peng, Z. (2021). Impact of the COVID-19 lockdown on roadside traffic-related air pollution in Shanghai, China. *Building and Environment*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107718>
- Zhong, T., Zhang, N., Wang, B., Ma, X., Wang, Y. & Chen, Y. (2023). Observed neighborhood-scale meteorology and air quality characteristics in downtown area of Nanjing. *Urban Climate*, 51, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101604>
- Zoran, M., Savastru, R., Savastru, D. & Tautan, M. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of The Total Environment*, 738. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>

11. ANEXOS

Anexo A. Plantilla de la encuesta sobre la percepción de la calidad del aire

El propósito de la siguiente encuesta es indagar sobre su percepción de la calidad del aire en el barrio Meléndez, como parte del trabajo de grado titulado “Evaluación de la exposición a la contaminación atmosférica por material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en los habitantes de la zona baja de Meléndez en la ciudad de Santiago de Cali” realizado en la Universidad del Valle. Toda la información suministrada será tratada de manera confidencial y no se vinculará a su identidad; únicamente será utilizada con fines académicos.

Información sociodemográfica

1. ¿Género?

- Femenino
- Masculino
- Otro

2. ¿En qué rango de edad se encuentra usted?

- 15 a 20 años
- 21 a 30 años
- 31 a 40 años
- 41 a 50 años
- 51 a 60 años
- Más de 60 años

3. ¿Cuál es el nivel educativo más alto que ha alcanzado?

- Básica primaria
- Básica secundaria
- Media
- Técnica/tecnológica
- Universitaria
- Postgrado
- Ninguno

4. ¿Cuál es su ocupación actual?

- Empleado/a
- Desempleado/a
- Trabajador/a independiente
- Jubilado/a
- Encargado/a del hogar
- Estudiante
- Otra

5. ¿Reside en el barrio Meléndez?

- Sí
- No

Aspectos ambientales

6. De los siguientes problemas ambientales, ¿cuál considera que es el más crítico en el barrio?

- Altos niveles de ruido
- Mala disposición de residuos sólidos
- Contaminación del agua
- Contaminación del aire
- Otro

7. ¿De los siguientes tipos de transporte, cuál considera que es la principal causa del deterioro de la calidad del aire en el barrio?

- Motocicletas particulares
- Vehículos particulares
- Vehículos de carga pesada
- Transporte público informal (motocicletas/vehículos piratas)
- Transporte público colectivo (buses/busetas/microbus/camperos)
- Sistema integrado de transporte masivo MIO

8. ¿De los siguientes establecimientos de comercio y servicios, cuál considera que es la principal causa del deterioro de la calidad del aire en el barrio?

- Locales comerciales
- Puestos de comida ambulante
- Estaciones de gasolina

9. ¿Considera que la calidad del aire en el barrio Meléndez es?

- Muy buena
- Buena
- Regular
- Mala
- Muy mala

10. ¿A través de qué medio se ha informado sobre la calidad del aire?

- Noticieros o programas de televisión
- Redes sociales
- Boletines de calidad del aire del DAGMA
- Sitios web
- Conversaciones con vecinos/amigos/familiares/conocidos
- Periódicos o revistas
- Otro

Movilidad

11. ¿Cuál es su sistema de movilidad preferido para realizar sus actividades cotidianas?

- Bicicleta
- Vehículo particular
- Motocicleta particular
- Sistema integrado de transporte masivo MIO
- Taxi
- Transporte público colectivo
- Transporte informal
- A pie
- Otro

12. ¿Considera que el transporte público tiene una cobertura adecuada?

- Sí
- No

13. ¿Ha usado o suele usar el transporte informal?

- Sí
- No

14. Si su respuesta a la pregunta anterior fue “sí”, ¿Qué tipo de transporte informal es el que más utiliza?

- Motocicletas
- Vehículos piratas
- Otro

15. Si respondió la pregunta anterior, ¿Cuál es la razón principal por la que utiliza el transporte informal?

- Economía
- Comodidad y rapidez
- Flexibilidad
- Seguridad
- Cobertura
- Otro

Salud

16. ¿Considera que la mala calidad del aire puede tener un impacto en su salud?

- Sí
- No

17. ¿Ha presentado o presenta actualmente alguna de las siguientes enfermedades respiratorias?

- Asma
- Enfermedad pulmonar obstructiva crónica EPOC.
- Bronquitis aguda o crónica
- Neumonía

18. ¿Ha presentado o presenta actualmente alguna de las siguientes enfermedades cardiovasculares?

- Hipertensión arterial
- Insuficiencia cardíaca
- Arritmias cardíacas
- Accidente cerebrovascular

19. ¿Cree usted que alguna de estas enfermedades podría estar vinculada con la calidad del aire en su entorno?

- Sí
- No

20. ¿Hay menores de edad que residan en su hogar?

- Sí
- No

21. Si su respuesta a la pregunta anterior fue “sí”, ¿Han presentado o presentan actualmente alguna de las siguientes enfermedades respiratorias?

- Asma
- Enfermedad pulmonar obstructiva crónica EPOC.
- Bronquitis aguda o crónica
- Neumonía

Tiempo de exposición

22. ¿En promedio, cuántas horas al día permanece en el barrio?

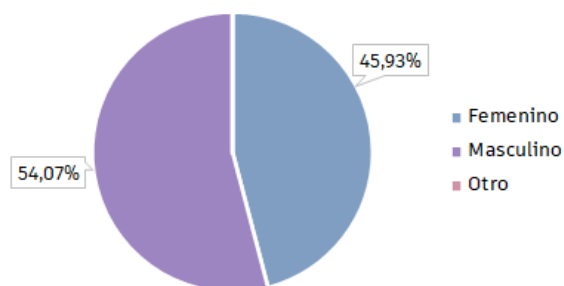
- De 0 a 3 horas
- De 3 a 6 horas
- De 6 a 12 horas
- Más de 12 horas

23. ¿Con qué frecuencia semanal permanece en el barrio?

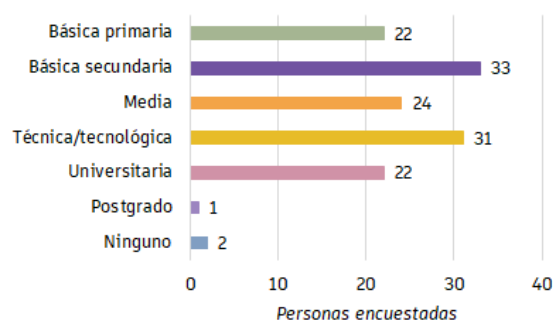
- Al menos 1 día a la semana
- Entre 2 y 4 días a la semana
- Entre 4 y 7 días a la semana

Anexo B. Resultados de la encuesta sobre la percepción de la calidad del aire

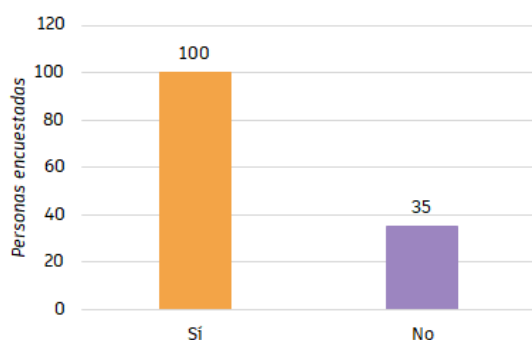
Anexo B1. Género



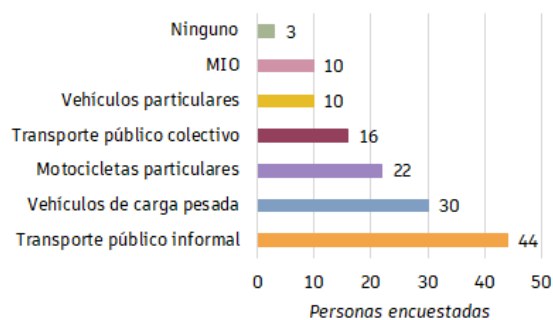
Anexo B2. Nivel educativo



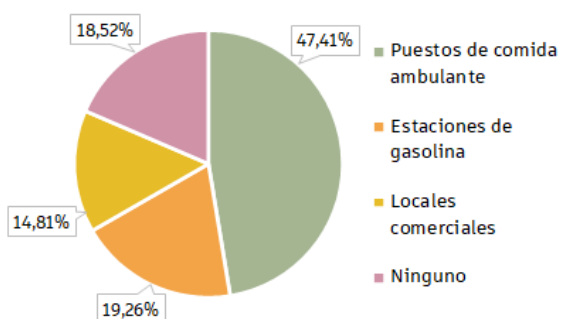
Anexo B3. Residencia en el barrio Meléndez



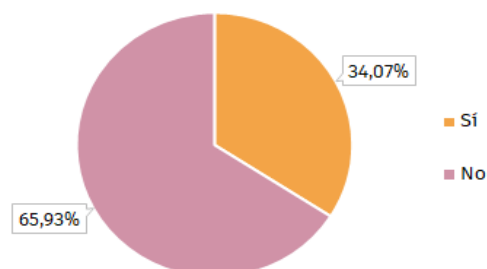
Anexo B4. Fuentes de contaminación atmosférica (transporte)



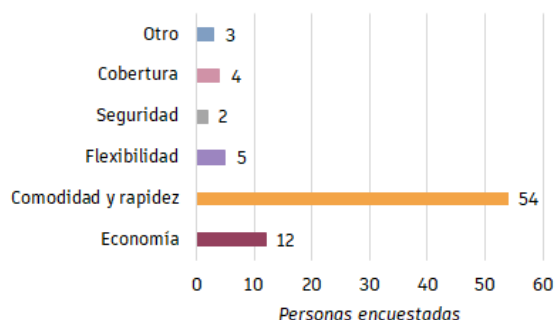
Anexo B5. Fuentes de contaminación atmosférica (establecimientos)



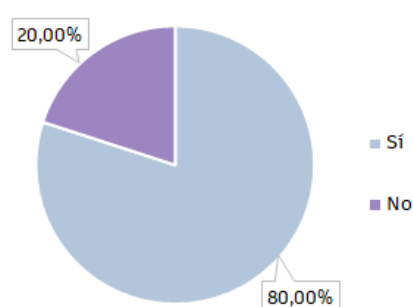
Anexo B6. Cobertura adecuada del transporte público



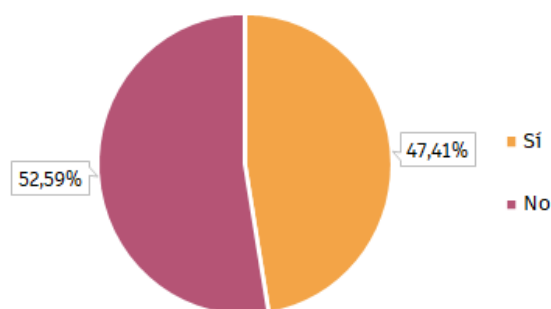
Anexo B7. Razones de uso del transporte informal



Anexo B8. Calidad del aire y enfermedades



Anexo B9. Residencia con menores de edad



Anexo C. Concentraciones promedio de material particulado por día, periodo y punto

Anexo C1. Concentraciones promedio de PM_{2.5} por día, periodo y punto

Día	Punto de monitoreo	Periodos de medición				Promedio
		6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	
Lunes	Calle 5ta	17,64	21,54	15,34	10,39	15,57
	Tienda de Pedro	18,99	18,09	14,67	6,33	
	IPS Meléndez	24,99	17,42	16,73	7,12	
	Unicatólica	18,13	16,88	18,66	10,12	
	Súper Inter	16,1	16,43	17,37	13,42	
	Control	12,8	15,11	14,50	14,93	
Martes	Calle 5ta	30,41	17,83	20,55	18,20	16,90
	Tienda de Pedro	19,63	14,92	21,09	18,01	
	IPS Meléndez	22,01	14,29	21,64	17,17	
	Unicatólica	23,54	12,54	15,22	16,14	
	Súper Inter	15,93	13,92	10,84	12,78	
	Control	13,57	14,55	10,71	10,09	

Anexo C1. Continuación

Día	Punto de monitoreo	Periodos de medición				Promedio
		6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	
Miércoles	Calle 5ta	28,26	17,4	21,91	16,76	17,28
	Tienda de Pedro	16,27	14,71	20,24	19,99	
	IPS Meléndez	21,46	14,49	23,05	18,28	
	Unicatólica	18,66	12,62	17,08	16,98	
	Súper Inter	19,04	12,04	20,88	11,6	
	Control	13,52	10,43	16,74	12,37	
Jueves	Calle 5ta	28,20	18,87	17,89	11,86	20,44
	Tienda de Pedro	35,00	15,41	15,64	15,37	
	IPS Meléndez	38,88	16,42	21,39	17,14	
	Unicatólica	37,28	14,66	22,11	14,14	
	Súper Inter	30,19	15,59	19,71	13,17	
	Control	22,81	16,56	16,93	15,43	
Viernes	Calle 5ta	27,94	18,94	20,99	16,33	18,19
	Tienda de Pedro	25,02	14,18	17,92	11,87	
	IPS Meléndez	26,6	14,19	18,22	15,97	
	Unicatólica	23,97	12,96	19,52	13,35	
	Súper Inter	22,75	13,15	18,49	13,79	
	Control	25,53	12,57	17,31	14,95	
Sábado	Calle 5ta	21,05	15,25	21,73	17,89	17,54
	Tienda de Pedro	20,55	13,05	19,74	16,05	
	IPS Meléndez	19,76	14,27	20,33	18,82	
	Unicatólica	19,36	12,22	20,63	18,10	
	Súper Inter	17,73	12,24	21,37	17,76	
	Control	15,65	11,19	17,54	18,60	
Domingo	Calle 5ta	20,96	20,03	16,18	14,4	14,87
	Tienda de Pedro	18,02	18,34	15,27	10,17	
	IPS Meléndez	20,91	19,09	14,00	11,85	
	Unicatólica	18,80	17,91	13,36	7,37	
	Súper Inter	16,71	13,64	11,95	9,34	
	Control	14,12	14,05	11,33	8,96	

Anexo C2. Concentraciones promedio de PM₁₀ por día, periodo y punto

Día	Punto de monitoreo	Periodos de medición				Promedio
		6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	
Lunes	Calle 5ta	21,19	26,67	16,41	11,22	17,60
	Tienda de Pedro	24,05	20,15	15,53	6,90	
	IPS Meléndez	33,57	18,94	18,42	7,63	
	Unicatólica	21,50	18,07	21,37	11,76	
	Súper Inter	18,44	17,35	18,51	14,54	
	Control	13,31	16,09	15,11	15,58	

Anexo C2. Continuación

Día	Punto de monitoreo	Periodos de medición				Promedio
		6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	
Martes	Calle 5ta	43,27	20,75	23,80	22,28	20,20
	Tienda de Pedro	23,53	16,37	25,24	23,46	
	IPS Meléndez	27,57	15,97	26,58	22,27	
	Unicatólica	30,41	13,33	16,76	20,32	
	Súper Inter	17,91	15,29	12,05	13,44	
	Control	15,22	16,82	11,71	10,40	
Miércoles	Calle 5ta	39,45	19,71	27,01	19,77	20,73
	Tienda de Pedro	19,49	15,57	23,97	25,31	
	IPS Meléndez	26,60	16,50	28,66	21,88	
	Unicatólica	21,44	13,31	19,39	25,23	
	Súper Inter	22,42	13,01	25,42	14,21	
	Control	14,59	11,10	18,87	14,61	
Jueves	Calle 5ta	38,66	22,48	20,3	13,57	25,61
	Tienda de Pedro	52,00	16,79	17,91	17,49	
	IPS Meléndez	60,67	18,43	24,98	19,97	
	Unicatólica	55,96	15,74	26,77	15,96	
	Súper Inter	41,73	17,04	22,85	14,26	
	Control	27,81	18,09	18,54	16,60	
Viernes	Calle 5ta	37,85	23,09	25,61	19,86	21,81
	Tienda de Pedro	32,61	15,67	19,99	13,43	
	IPS Meléndez	36,14	16,18	20,88	19,34	
	Unicatólica	31,08	13,79	22,40	14,46	
	Súper Inter	28,85	14,24	20,46	14,47	
	Control	34,53	13,50	18,92	16,18	
Sábado	Calle 5ta	24,94	17,44	26,22	20,82	20,26
	Tienda de Pedro	24,91	13,8	23,02	18,44	
	IPS Meléndez	23,05	15,23	23,96	23,47	
	Unicatólica	22,7	12,71	24,24	22,09	
	Súper Inter	20,17	12,7	25,15	21,25	
	Control	18,88	11,47	19,03	20,54	
Domingo	Calle 5ta	24,81	22,61	17,60	16,09	16,43
	Tienda de Pedro	19,78	19,75	16,60	11,76	
	IPS Meléndez	23,82	21,01	15,31	12,62	
	Unicatólica	20,84	21,40	15,42	7,78	
	Súper Inter	17,73	14,65	13,60	9,72	
	Control	14,86	14,7	12,43	9,38	

Anexo D. Dosis inhaladas de material particulado por día

Anexo D1. Dosis inhaladas de PM_{2.5} por día

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)		Intensidad física moderada (IRh: 0,0308 m ³ /min, IRm: 0,0232 m ³ /min)	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Lunes	Calle 5ta	0,224	0,183	0,500	0,376
	Tienda de Pedro	0,200	0,164	0,447	0,337
	IPS Meléndez	0,229	0,187	0,510	0,384
	Unicatólica	0,220	0,180	0,491	0,370
	Súper Inter	0,218	0,179	0,488	0,367
	Control	0,198	0,162	0,442	0,333
Martes	Calle 5ta	0,300	0,246	0,670	0,505
	Tienda de Pedro	0,254	0,208	0,567	0,427
	IPS Meléndez	0,259	0,212	0,578	0,436
	Unicatólica	0,233	0,191	0,519	0,391
	Súper Inter	0,184	0,151	0,412	0,310
	Control	0,169	0,138	0,377	0,284
Miércoles	Calle 5ta	0,291	0,238	0,649	0,489
	Tienda de Pedro	0,246	0,201	0,548	0,413
	IPS Meléndez	0,267	0,218	0,595	0,448
	Unicatólica	0,225	0,185	0,503	0,379
	Súper Inter	0,219	0,180	0,489	0,369
	Control	0,183	0,150	0,409	0,308
Jueves	Calle 5ta	0,265	0,217	0,592	0,446
	Tienda de Pedro	0,281	0,230	0,627	0,472
	IPS Meléndez	0,324	0,265	0,722	0,544
	Unicatólica	0,304	0,249	0,679	0,512
	Súper Inter	0,271	0,222	0,606	0,456
	Control	0,247	0,203	0,552	0,416
Viernes	Calle 5ta	0,290	0,238	0,648	0,488
	Tienda de Pedro	0,238	0,195	0,531	0,400
	IPS Meléndez	0,259	0,212	0,577	0,435
	Unicatólica	0,241	0,197	0,537	0,405
	Súper Inter	0,235	0,193	0,525	0,395
	Control	0,243	0,199	0,542	0,408
Sábado	Calle 5ta	0,262	0,214	0,585	0,440
	Tienda de Pedro	0,239	0,196	0,534	0,402
	IPS Meléndez	0,252	0,207	0,563	0,424
	Unicatólica	0,243	0,199	0,541	0,408
	Súper Inter	0,238	0,195	0,532	0,401
	Control	0,217	0,178	0,485	0,365

Anexo D1. Continuación

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)		Intensidad física moderada (IRh: 0,0308 m ³ /min, IRm: 0,0232 m ³ /min)	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Domingo	Calle 5ta	0,247	0,202	0,551	0,415
	Tienda de Pedro	0,213	0,175	0,476	0,358
	IPS Meléndez	0,227	0,186	0,507	0,382
	Unicatólica	0,198	0,162	0,442	0,333
	Súper Inter	0,178	0,146	0,398	0,300
	Control	0,167	0,137	0,373	0,281

Anexo D2. Dosis inhaladas de PM₁₀ por día

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)		Intensidad física moderada (IRh: 0,0308 m ³ /min, IRm: 0,0232 m ³ /min)	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Lunes	Calle 5ta	0,260	0,213	0,581	0,438
	Tienda de Pedro	0,230	0,188	0,513	0,386
	IPS Meléndez	0,271	0,222	0,605	0,456
	Unicatólica	0,251	0,205	0,560	0,422
	Súper Inter	0,237	0,194	0,530	0,399
	Control	0,207	0,170	0,463	0,349
Martes	Calle 5ta	0,380	0,311	0,848	0,639
	Tienda de Pedro	0,306	0,250	0,682	0,514
	IPS Meléndez	0,319	0,261	0,711	0,536
	Unicatólica	0,279	0,228	0,622	0,469
	Súper Inter	0,202	0,166	0,452	0,340
	Control	0,187	0,153	0,417	0,314
Miércoles	Calle 5ta	0,365	0,299	0,816	0,614
	Tienda de Pedro	0,291	0,238	0,649	0,489
	IPS Meléndez	0,323	0,265	0,721	0,543
	Unicatólica	0,274	0,224	0,611	0,460
	Súper Inter	0,259	0,212	0,578	0,435
	Control	0,204	0,167	0,456	0,343
Jueves	Calle 5ta	0,328	0,268	0,732	0,551
	Tienda de Pedro	0,359	0,294	0,802	0,604
	IPS Meléndez	0,428	0,350	0,955	0,719
	Unicatólica	0,395	0,323	0,881	0,664
	Súper Inter	0,331	0,271	0,738	0,556
	Control	0,280	0,229	0,624	0,470

Anexo D2. Continuación

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)		Intensidad física moderada (IRh: 0,0308 m ³ /min, IRm: m ³ /min)	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Viernes	Calle 5ta	0,367	0,301	0,819	0,617
	Tienda de Pedro	0,282	0,231	0,629	0,474
	IPS Meléndez	0,319	0,261	0,713	0,537
	Unicatólica	0,282	0,231	0,629	0,474
	Súper Inter	0,269	0,220	0,601	0,453
	Control	0,287	0,235	0,640	0,482
Sábado	Calle 5ta	0,308	0,253	0,689	0,519
	Tienda de Pedro	0,277	0,226	0,617	0,465
	IPS Meléndez	0,296	0,242	0,660	0,497
	Unicatólica	0,282	0,231	0,629	0,474
	Súper Inter	0,273	0,224	0,610	0,460
	Control	0,241	0,198	0,538	0,406
Domingo	Calle 5ta	0,280	0,229	0,625	0,470
	Tienda de Pedro	0,234	0,192	0,523	0,394
	IPS Meléndez	0,251	0,206	0,560	0,422
	Unicatólica	0,226	0,185	0,504	0,380
	Súper Inter	0,192	0,157	0,429	0,323
	Control	0,177	0,145	0,396	0,298

Anexo E. Dosis inhaladas de material particulado por periodo

Anexo E1. Dosis inhaladas de PM_{2.5} por periodo, intensidad leve

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)							
		6:00-9:00		9:00-12:00		12:00-15:00		15:00-18:00	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Lunes	Calle 5ta	0,243	0,199	0,297	0,243	0,212	0,173	0,143	0,117
	Tienda de Pedro	0,262	0,215	0,250	0,204	0,202	0,166	0,087	0,072
	IPS Meléndez	0,345	0,282	0,240	0,197	0,231	0,189	0,098	0,080
	Unicatólica	0,250	0,205	0,233	0,191	0,258	0,211	0,140	0,114
	Súper Inter	0,222	0,182	0,227	0,186	0,240	0,196	0,185	0,152
	Control	0,177	0,145	0,209	0,171	0,200	0,164	0,206	0,169
Martes	Calle 5ta	0,420	0,344	0,246	0,201	0,284	0,232	0,251	0,206
	Tienda de Pedro	0,271	0,222	0,206	0,169	0,291	0,238	0,249	0,204
	IPS Meléndez	0,304	0,249	0,197	0,161	0,299	0,245	0,237	0,194
	Unicatólica	0,325	0,266	0,173	0,142	0,210	0,172	0,223	0,182
	Súper Inter	0,220	0,180	0,192	0,157	0,150	0,122	0,176	0,144
	Control	0,187	0,153	0,201	0,164	0,148	0,121	0,139	0,114

Anexo E1. Continuación

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)							
		6:00-9:00		9:00-12:00		12:00-15:00		15:00-18:00	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Miércoles	Calle 5ta	0,390	0,319	0,240	0,197	0,302	0,248	0,231	0,189
	Tienda de Pedro	0,225	0,184	0,203	0,166	0,279	0,229	0,276	0,226
	IPS Meléndez	0,296	0,242	0,200	0,164	0,318	0,260	0,252	0,207
	Unicatólica	0,258	0,211	0,174	0,143	0,236	0,193	0,234	0,192
	Súper Inter	0,263	0,215	0,166	0,136	0,288	0,236	0,160	0,131
	Control	0,187	0,153	0,144	0,118	0,231	0,189	0,171	0,140
Jueves	Calle 5ta	0,389	0,319	0,260	0,213	0,247	0,202	0,164	0,134
	Tienda de Pedro	0,483	0,396	0,213	0,174	0,216	0,177	0,212	0,174
	IPS Meléndez	0,537	0,439	0,227	0,186	0,295	0,242	0,237	0,194
	Unicatólica	0,514	0,421	0,202	0,166	0,305	0,250	0,195	0,160
	Súper Inter	0,417	0,341	0,215	0,176	0,272	0,223	0,182	0,149
	Control	0,315	0,258	0,229	0,187	0,234	0,191	0,213	0,174
Viernes	Calle 5ta	0,386	0,316	0,261	0,214	0,290	0,237	0,225	0,185
	Tienda de Pedro	0,345	0,283	0,196	0,160	0,247	0,202	0,164	0,134
	IPS Meléndez	0,367	0,301	0,196	0,160	0,251	0,206	0,220	0,180
	Unicatólica	0,331	0,271	0,179	0,146	0,269	0,221	0,184	0,151
	Súper Inter	0,314	0,257	0,181	0,149	0,255	0,209	0,190	0,156
	Control	0,352	0,288	0,173	0,142	0,239	0,196	0,206	0,169
Sábado	Calle 5ta	0,290	0,238	0,210	0,172	0,300	0,246	0,247	0,202
	Tienda de Pedro	0,284	0,232	0,180	0,147	0,272	0,223	0,221	0,181
	IPS Meléndez	0,273	0,223	0,197	0,161	0,281	0,230	0,260	0,213
	Unicatólica	0,267	0,219	0,169	0,138	0,285	0,233	0,250	0,205
	Súper Inter	0,245	0,200	0,169	0,138	0,295	0,241	0,245	0,201
	Control	0,216	0,177	0,154	0,126	0,242	0,198	0,257	0,210
Domingo	Calle 5ta	0,289	0,237	0,276	0,226	0,223	0,183	0,199	0,163
	Tienda de Pedro	0,249	0,204	0,253	0,207	0,211	0,173	0,140	0,115
	IPS Meléndez	0,289	0,236	0,263	0,216	0,193	0,158	0,164	0,134
	Unicatólica	0,259	0,212	0,247	0,202	0,184	0,151	0,102	0,083
	Súper Inter	0,231	0,189	0,188	0,154	0,165	0,135	0,129	0,106
	Control	0,195	0,160	0,194	0,159	0,156	0,128	0,124	0,101

Anexo E2. Dosis inhaladas de PM_{2.5} por periodo, intensidad moderada

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física moderada (IRh:0,0308 m ³ /min, IRm: 0,0232 m ³ /min)							
		6:00-9:00		9:00-12:00		12:00-15:00		15:00-18:00	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Lunes	Calle 5ta	0,543	0,409	0,663	0,500	0,472	0,356	0,320	0,241
	Tienda de Pedro	0,585	0,441	0,557	0,420	0,452	0,340	0,195	0,147
	IPS Meléndez	0,770	0,580	0,537	0,404	0,515	0,388	0,219	0,165
	Unicatólica	0,558	0,421	0,520	0,392	0,575	0,433	0,312	0,235
	Súper Inter	0,496	0,374	0,506	0,381	0,535	0,403	0,413	0,311
	Control	0,394	0,297	0,465	0,351	0,447	0,336	0,460	0,346

Anexo E2. Continuación

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física moderada (IRh:0,0308 m ³ /min, IRm: 0,0232 m ³ /min)							
		6:00-9:00		9:00-12:00		12:00-15:00		15:00-18:00	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Martes	Calle 5ta	0,937	0,706	0,549	0,414	0,633	0,477	0,561	0,422
	Tienda de Pedro	0,605	0,455	0,460	0,346	0,650	0,489	0,555	0,418
	IPS Meléndez	0,678	0,511	0,440	0,332	0,667	0,502	0,529	0,398
	Unicatónica	0,725	0,546	0,386	0,291	0,469	0,353	0,497	0,374
	Súper Inter	0,491	0,370	0,429	0,323	0,334	0,251	0,394	0,296
	Control	0,418	0,315	0,448	0,338	0,330	0,248	0,311	0,234
Miércoles	Calle 5ta	0,870	0,656	0,536	0,404	0,675	0,508	0,516	0,389
	Tienda de Pedro	0,501	0,377	0,453	0,341	0,623	0,470	0,616	0,464
	IPS Meléndez	0,661	0,498	0,446	0,336	0,710	0,535	0,563	0,424
	Unicatónica	0,575	0,433	0,389	0,293	0,526	0,396	0,523	0,394
	Súper Inter	0,586	0,442	0,371	0,279	0,643	0,484	0,357	0,269
	Control	0,416	0,314	0,321	0,242	0,516	0,388	0,381	0,287
Jueves	Calle 5ta	0,869	0,654	0,581	0,438	0,551	0,415	0,365	0,275
	Tienda de Pedro	1,078	0,812	0,475	0,358	0,482	0,363	0,473	0,357
	IPS Meléndez	1,198	0,902	0,506	0,381	0,659	0,496	0,528	0,398
	Unicatónica	1,148	0,865	0,452	0,340	0,681	0,513	0,436	0,328
	Súper Inter	0,930	0,700	0,480	0,362	0,607	0,457	0,406	0,306
	Control	0,703	0,529	0,510	0,384	0,521	0,393	0,475	0,358
Viernes	Calle 5ta	0,861	0,648	0,583	0,439	0,646	0,487	0,503	0,379
	Tienda de Pedro	0,771	0,580	0,437	0,329	0,552	0,416	0,366	0,275
	IPS Meléndez	0,819	0,617	0,437	0,329	0,561	0,423	0,492	0,371
	Unicatónica	0,738	0,556	0,399	0,301	0,601	0,453	0,411	0,310
	Súper Inter	0,701	0,528	0,405	0,305	0,569	0,429	0,425	0,320
	Control	0,786	0,592	0,387	0,292	0,533	0,402	0,460	0,347
Sábado	Calle 5ta	0,648	0,488	0,470	0,354	0,669	0,504	0,551	0,415
	Tienda de Pedro	0,633	0,477	0,402	0,303	0,608	0,458	0,494	0,372
	IPS Meléndez	0,609	0,458	0,440	0,331	0,626	0,472	0,580	0,437
	Unicatónica	0,596	0,449	0,376	0,284	0,635	0,479	0,557	0,420
	Súper Inter	0,546	0,411	0,377	0,284	0,658	0,496	0,547	0,412
	Control	0,482	0,363	0,345	0,260	0,540	0,407	0,573	0,432
Domingo	Calle 5ta	0,646	0,486	0,617	0,465	0,498	0,375	0,444	0,334
	Tienda de Pedro	0,555	0,418	0,565	0,425	0,470	0,354	0,313	0,236
	IPS Meléndez	0,644	0,485	0,588	0,443	0,431	0,325	0,365	0,275
	Unicatónica	0,579	0,436	0,552	0,416	0,411	0,310	0,227	0,171
	Súper Inter	0,515	0,388	0,420	0,316	0,368	0,277	0,288	0,217
	Control	0,435	0,328	0,433	0,326	0,349	0,263	0,276	0,208

Anexo E3. Dosis inhaladas de PM₁₀ por periodo, intensidad leve

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física leve (IRh: 0,0138 m ³ /min, IRm: 0,0113 m ³ /min)							
		6:00-9:00		9:00-12:00		12:00-15:00		15:00-18:00	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Lunes	Calle 5ta	0,292	0,239	0,368	0,301	0,226	0,185	0,155	0,127
	Tienda de Pedro	0,332	0,272	0,278	0,228	0,214	0,175	0,095	0,078
	IPS Meléndez	0,463	0,379	0,261	0,214	0,254	0,208	0,105	0,086
	Unicatónica	0,297	0,243	0,249	0,204	0,295	0,241	0,162	0,133
	Súper Inter	0,254	0,208	0,239	0,196	0,255	0,209	0,201	0,164
	Control	0,184	0,150	0,222	0,182	0,209	0,171	0,215	0,176
Martes	Calle 5ta	0,597	0,489	0,286	0,234	0,328	0,269	0,307	0,252
	Tienda de Pedro	0,325	0,266	0,226	0,185	0,348	0,285	0,324	0,265
	IPS Meléndez	0,380	0,312	0,220	0,180	0,367	0,300	0,307	0,252
	Unicatónica	0,420	0,344	0,184	0,151	0,231	0,189	0,280	0,230
	Súper Inter	0,247	0,202	0,211	0,173	0,166	0,136	0,185	0,152
	Control	0,210	0,172	0,232	0,190	0,162	0,132	0,144	0,118
Miércoles	Calle 5ta	0,544	0,446	0,272	0,223	0,373	0,305	0,273	0,223
	Tienda de Pedro	0,269	0,220	0,215	0,176	0,331	0,271	0,349	0,286
	IPS Meléndez	0,367	0,301	0,228	0,186	0,396	0,324	0,302	0,247
	Unicatónica	0,296	0,242	0,184	0,150	0,268	0,219	0,348	0,285
	Súper Inter	0,309	0,253	0,180	0,147	0,351	0,287	0,196	0,161
	Control	0,201	0,165	0,153	0,125	0,260	0,213	0,202	0,165
Jueves	Calle 5ta	0,534	0,437	0,310	0,254	0,280	0,229	0,187	0,153
	Tienda de Pedro	0,718	0,588	0,232	0,190	0,247	0,202	0,241	0,198
	IPS Meléndez	0,837	0,686	0,254	0,208	0,345	0,282	0,276	0,226
	Unicatónica	0,772	0,632	0,217	0,178	0,369	0,303	0,220	0,180
	Súper Inter	0,576	0,472	0,235	0,193	0,315	0,258	0,197	0,161
	Control	0,384	0,314	0,250	0,204	0,256	0,210	0,229	0,188
Viernes	Calle 5ta	0,522	0,428	0,319	0,261	0,353	0,289	0,274	0,224
	Tienda de Pedro	0,450	0,368	0,216	0,177	0,276	0,226	0,185	0,152
	IPS Meléndez	0,499	0,408	0,223	0,183	0,288	0,236	0,267	0,219
	Unicatónica	0,429	0,351	0,190	0,156	0,309	0,253	0,200	0,163
	Súper Inter	0,398	0,326	0,197	0,161	0,282	0,231	0,200	0,164
	Control	0,477	0,390	0,186	0,153	0,261	0,214	0,223	0,183
Sábado	Calle 5ta	0,344	0,282	0,241	0,197	0,362	0,296	0,287	0,235
	Tienda de Pedro	0,344	0,281	0,190	0,156	0,318	0,260	0,254	0,208
	IPS Meléndez	0,318	0,260	0,210	0,172	0,331	0,271	0,324	0,265
	Unicatónica	0,313	0,257	0,175	0,144	0,335	0,274	0,305	0,250
	Súper Inter	0,278	0,228	0,175	0,144	0,347	0,284	0,293	0,240
	Control	0,261	0,213	0,158	0,130	0,263	0,215	0,283	0,232
Domingo	Calle 5ta	0,342	0,280	0,312	0,255	0,243	0,199	0,222	0,182
	Tienda de Pedro	0,273	0,224	0,273	0,223	0,229	0,188	0,162	0,133
	IPS Meléndez	0,329	0,269	0,290	0,237	0,211	0,173	0,174	0,143
	Unicatónica	0,288	0,235	0,295	0,242	0,213	0,174	0,107	0,088
	Súper Inter	0,245	0,200	0,202	0,166	0,188	0,154	0,134	0,110
	Control	0,205	0,168	0,203	0,166	0,172	0,140	0,129	0,106

Anexo E4. Dosis inhaladas de PM₁₀ por periodo, intensidad moderada

Día	Punto de monitoreo	Intensidad física moderada (IRh: 0,0308 m ³ /min, IRm: 0,0232 m ³ /min)							
		6:00-9:00		9:00-12:00		12:00-15:00		15:00-18:00	
		Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Lunes	Calle 5ta	0,653	0,492	0,821	0,619	0,505	0,381	0,346	0,260
	Tienda de Pedro	0,741	0,558	0,621	0,467	0,478	0,360	0,213	0,160
	IPS Meléndez	1,034	0,779	0,583	0,439	0,567	0,427	0,235	0,177
	Unicatónica	0,662	0,499	0,557	0,419	0,658	0,496	0,362	0,273
	Súper Inter	0,568	0,428	0,534	0,403	0,570	0,429	0,448	0,337
	Control	0,410	0,309	0,496	0,373	0,465	0,351	0,480	0,361
Martes	Calle 5ta	1,333	1,004	0,639	0,481	0,733	0,552	0,686	0,517
	Tienda de Pedro	0,725	0,546	0,504	0,380	0,777	0,586	0,723	0,544
	IPS Meléndez	0,849	0,640	0,492	0,371	0,819	0,617	0,686	0,517
	Unicatónica	0,937	0,706	0,411	0,309	0,516	0,389	0,626	0,471
	Súper Inter	0,552	0,416	0,471	0,355	0,371	0,280	0,414	0,312
	Control	0,469	0,353	0,518	0,390	0,361	0,272	0,320	0,241
Miércoles	Calle 5ta	1,215	0,915	0,607	0,457	0,832	0,627	0,609	0,459
	Tienda de Pedro	0,600	0,452	0,480	0,361	0,738	0,556	0,780	0,587
	IPS Meléndez	0,819	0,617	0,508	0,383	0,883	0,665	0,674	0,508
	Unicatónica	0,660	0,497	0,410	0,309	0,597	0,450	0,777	0,585
	Súper Inter	0,691	0,520	0,401	0,302	0,783	0,590	0,438	0,330
	Control	0,449	0,338	0,342	0,258	0,581	0,438	0,450	0,339
Jueves	Calle 5ta	1,191	0,897	0,692	0,522	0,625	0,471	0,418	0,315
	Tienda de Pedro	1,602	1,206	0,517	0,390	0,552	0,416	0,539	0,406
	IPS Meléndez	1,869	1,408	0,568	0,428	0,769	0,580	0,615	0,463
	Unicatónica	1,724	1,298	0,485	0,365	0,825	0,621	0,492	0,370
	Súper Inter	1,285	0,968	0,525	0,395	0,704	0,530	0,439	0,331
	Control	0,857	0,645	0,557	0,420	0,571	0,430	0,511	0,385
Viernes	Calle 5ta	1,166	0,878	0,711	0,536	0,789	0,594	0,612	0,461
	Tienda de Pedro	1,004	0,757	0,483	0,364	0,616	0,464	0,414	0,312
	IPS Meléndez	1,113	0,838	0,498	0,375	0,643	0,484	0,596	0,449
	Unicatónica	0,957	0,721	0,425	0,320	0,690	0,520	0,445	0,335
	Súper Inter	0,889	0,669	0,439	0,330	0,630	0,475	0,446	0,336
	Control	1,064	0,801	0,416	0,313	0,583	0,439	0,498	0,375
Sábado	Calle 5ta	0,768	0,579	0,537	0,405	0,808	0,608	0,641	0,483
	Tienda de Pedro	0,767	0,578	0,425	0,320	0,709	0,534	0,568	0,428
	IPS Meléndez	0,710	0,535	0,469	0,353	0,738	0,556	0,723	0,545
	Unicatónica	0,699	0,527	0,391	0,295	0,747	0,562	0,680	0,512
	Súper Inter	0,621	0,468	0,391	0,295	0,775	0,583	0,655	0,493
	Control	0,582	0,438	0,353	0,266	0,586	0,441	0,633	0,477
Domingo	Calle 5ta	0,764	0,576	0,696	0,525	0,542	0,408	0,496	0,373
	Tienda de Pedro	0,609	0,459	0,608	0,458	0,511	0,385	0,362	0,273
	IPS Meléndez	0,734	0,553	0,647	0,487	0,472	0,355	0,389	0,293
	Unicatónica	0,642	0,483	0,659	0,496	0,475	0,358	0,240	0,180
	Súper Inter	0,546	0,411	0,451	0,340	0,419	0,316	0,299	0,226
	Control	0,458	0,345	0,453	0,341	0,383	0,288	0,289	0,218