

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA
CARDÍACA Y LA EXPOSICIÓN DIARIA PERSONAL AL MATERIAL
PARTICULADO PM_{2.5} EN UN ESTUDIANTE UNIVERSITARIO RESIDENTE EN
LA CIUDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA**

SERGIO ANDRÉS GUTIÉRREZ LOPERA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ, D.C.
2022**

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA
CARDÍACA Y LA EXPOSICIÓN DIARIA PERSONAL AL MATERIAL
PARTICULADO PM_{2.5} EN UN ESTUDIANTE UNIVERSITARIO RESIDENTE EN
LA CIUDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA**

SERGIO ANDRÉS GUTIÉRREZ LOPERA

Trabajo de grado para optar por el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Director

LUIS CAMILO BLANCO BECERRA
Ingeniero Ambiental y Sanitario
MSc. Salud Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ, D.C.
2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Ing. Luis Camilo Blanco Becerra
Director

Firma Jurado Calificador 1

Firma Jurado Calificador 2

Bogotá, D.C., noviembre de 2022.

DEDICATORIA

A mis padres, mis dos hermanas mayores y mi hermano mayor, quienes han sido la principal guía a lo largo de mis distintos procesos de formación y aprendizaje, siendo los primeros merecedores de todos los logros que he alcanzado hasta el día de hoy y que tengo por cumplir el día de mañana.

“No sólo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo, algunos siguen hasta hoy. Gracias totales”.

(Gustavo Cerati)

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Luis Camilo Blanco Becerra, docente de la Universidad Santo Tomás, quien fue un excelente director durante la realización del presente trabajo de grado, exaltando su inmensa paciencia conmigo, así como su dedicación en tiempo y esfuerzo para hacer posible el desarrollo de este proyecto.

A mis padres, quienes creyeron constantemente en mis capacidades resaltando a diario lo mejor de mí, brindándome continuamente su apoyo emocional y económico siendo ellos el pilar fundamental para seguir adelante con mis estudios.

A mis hermanos, que constantemente estuvieron pendientes de mi proceso, velando siempre por mi bienestar e impulsando mis expectativas de superación personal.

A mi gato y mejor amigo Cerati, por su cálida y permanente compañía durante las largas noches en las que desarrollé este proyecto.

A mis seres queridos, amigos y compañeros que de alguna u otra forma me aportaron su compañía, su tiempo, sus palabras y conocimientos ayudándome a continuar con mi formación y mis proyectos.

Al maestro Gustavo Adrián Cerati, por haber compuesto aquella música tan mágica que mantuvo mi inspiración, motivación y ánimo siempre en alto.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE GRÁFICAS	10
LISTA DE MAPAS	11
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	16
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
2.1. Hipótesis	18
2.1.1. Hipótesis nula	18
2.1.2. Hipótesis alterna.....	18
3. OBJETIVOS	18
3.1. Objetivo General	19
3.2. Objetivos Específicos	19
4. ANTECEDENTES	19
5. MARCO REFERENCIAL.....	21
5.1. Marco Conceptual	22
5.1.1. Aire	22
5.1.2. Contaminación ambiental	22
5.1.3. Contaminación atmosférica	22
5.1.4. Emisión.....	22
5.1.5. Exposición	23
5.1.6. Material particulado	23
5.1.7. PM _{2.5}	23
5.1.8. Frecuencia cardíaca	23
5.1.9. Intervalo RR.....	24
5.1.10. Desviación estándar de los intervalos R-R (SDNN)	24
5.2. Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC)	24

5.3.	Factores biológicos que influyen en la VFC	24
5.4.	PM _{2.5} como factor de riesgo de enfermedades cardiovasculares	24
5.5.	Efectos del PM _{2.5} sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca	25
5.6.	Marco Legal	25
6.	METODOLOGÍA.....	26
6.1.	Tipo de estudio.....	26
6.2.	Sujeto de estudio	27
6.3.	Criterios de selección del sujeto de estudio	27
6.3.1.	Criterios de inclusión	27
6.3.2.	Criterios de exclusión	27
6.4.	Variables de medición	27
6.4.1.	Variables del sujeto de estudio	27
6.4.2.	Variables ambientales	27
6.5.	Mediciones	27
6.5.1.	Tiempo de medición	27
6.5.2.	Lugar de medición	28
6.5.3.	Lugar de residencia	28
6.5.4.	Institución académica	30
6.5.5.	Equipos e insumos utilizados	31
6.6.	Posición anatómica de los equipos	32
6.7.	Proceso general de monitoreo	33
6.8.	Recolección de datos	34
6.8.1.	AirBeam II.....	34
6.8.2.	Polar Vantage M.....	34
6.8.3.	Bitácora de tiempo – actividad.....	35
6.9.	Tratamiento de los datos recopilados.....	35
6.9.1.	Organización de los datos	35
6.9.2.	Estadística aplicada.....	35
6.9.3.	Determinación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca	36
6.9.4.	Correlación de datos.....	36
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
7.1.	Análisis de la actividad semanal del sujeto de estudio.....	39

7.2.	Análisis de las concentraciones de PM _{2.5}	40
7.3.	Análisis de los valores de frecuencia cardíaca.....	50
7.4.	Análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca	57
7.5.	Análisis comparativo y correlacional entre el PM _{2.5} y la FC	65
7.6.	Análisis comparativo y correlacional entre el PM _{2.5} y la VFC	68
7.7.	Análisis comparativo del comportamiento de la FC y la VFC.....	71
8.	DISCUSIÓN.....	73
9.	CONCLUSIONES.....	76
10.	RECOMENDACIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA	79
	ANEXOS	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Normatividad de calidad del aire en Colombia.....	26
Tabla 2. Equipos e insumos empleados en las mediciones.....	31
Tabla 3. Distribución semanal del monitoreo.....	37
Tabla 4. Tiempo promedio de ejecución por actividad.....	37
Tabla 5. Valores de los estadísticos para el PM _{2.5}	40
Tabla 6. Normatividad contra exposición obtenida del monitoreo de PM _{2.5}	41
Tabla 7. Parámetros estadísticos del PM _{2.5} por día de la semana.....	41
Tabla 8. Valores promedio de PM _{2.5} y tiempo por actividad.....	43
Tabla 9. Valores promedio de PM _{2.5} por actividad en el mes de mayo.....	45
Tabla 10. Valores promedio de PM _{2.5} por actividad en el mes de junio.....	47
Tabla 11. Valores promedio de PM _{2.5} por actividad en el mes de julio.....	50
Tabla 12. Valores de los estadísticos para la FC.....	50
Tabla 13. Parámetros estadísticos de la FC por día de la semana.....	51
Tabla 14. Valores promedio de FC por actividad.....	52
Tabla 15. Valores promedio de FC por actividad en el mes de mayo.....	53
Tabla 16. Valores promedio de FC por actividad en el mes de junio.....	54
Tabla 17. Valores promedio de FC por actividad en el mes de julio.....	55
Tabla 18. Valores promedio de la VFC por día de la semana.....	58
Tabla 19. Valores promedio totales de la VFC por actividad.....	58
Tabla 20. Valores promedio de la VFC por actividad en el mes de mayo.....	61
Tabla 21. Valores promedio de la VFC por actividad en el mes de junio.....	62
Tabla 22. Valores promedio de la VFC por actividad en el mes de julio.....	63
Tabla 23. Comparación del comportamiento del PM _{2.5} y la FC por actividad.....	65
Tabla 24. Valores estadísticos de la correlación entre el PM _{2.5} y la FC.....	66
Tabla 25. Comparación del comportamiento del PM _{2.5} y la VFC por actividad...68	68
Tabla 26. Valores estadísticos de la correlación entre el PM _{2.5} y la VFC.....	70
Tabla 27. Comparación del comportamiento de la FC y la VFC por escenario....	71
Tabla 28. Valores estadísticos de la correlación entre la FC y la VFC.....	73

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Distribución por día de la semana de los niveles promedio de PM _{2.5} ..	43
Gráfica 2. Distribución por día de la semana de los valores promedio de FC....	52
Gráfica 3. Frecuencia cardíaca promedio mensual por escenario.....	57
Gráfica 4. Comparación del comportamiento del PM _{2.5} y la FC por actividad.....	66
Gráfica 5. Comparación del comportamiento del PM _{2.5} y la VFC por actividad..	69
Gráfica 6. Comparación del comportamiento de la FC y la VFC por actividad.....	72

LISTA DE MAPAS

	Pág.
Mapa 1. Ubicación geográfica de la vivienda del sujeto de estudio.....	29
Mapa 2. Ubicación geográfica de la institución académica del sujeto de estudio..	30

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Posición de los equipos de medición.....	33
Figura 2. Rosa de vientos Estación Móvil 7ma.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo / Abreviatura	Descripción
ACV	Accidente Cerebrovascular
CO	Monóxido de Carbono
DNP	Departamento Nacional de Planeación
ECV	Enfermedades Cardiovasculares
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
FC	Frecuencia Cardíaca
HF	Alta Frecuencia
HRV	Heart Rate Variability
IAM	Infarto Agudo al Miocardio
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IMC	Índice de Masa Corporal
km ²	Kilómetros Cuadrados
LF	Baja Frecuencia
bpm	Latidos por Minuto
m	Metros
m ³	Metros Cúbicos
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
mAh	Miliamperios
NOx	Óxidos de Nitrógeno
O ₃	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PM	Material Particulado
PM ₁₀	Material Particulado de tamaño menor o igual a 10 micras
PM _{2.5}	Material Particulado de tamaño menor o igual a 2.5 micras
RMCAB	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
s	Segundos
SDNN	Desviación estándar de los intervalos R-R
SNA	Sistema Nervioso Autónomo
SNP	Sistema Nervioso Parasimpático
SNS	Sistema Nervioso Simpático
SOx	Óxidos de Azufre
µg	Microgramos
UPZ	Unidad de Planeamiento Zonal
VFC	Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca

RESUMEN

Esta investigación analizó la relación entre la exposición al $PM_{2.5}$ y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) examinando el diario vivir de un estudiante universitario sin antecedentes de enfermedades cardiovasculares residente en la ciudad de Bogotá, Colombia. Se realizó la toma de datos durante 66 días entre los meses de mayo y julio del 2022 garantizando un tiempo mínimo de monitoreo de 18 horas. Para esto se emplearon los equipos AirBeam II y Polar Vantage M diligenciando a su vez una bitácora de tiempo – actividad.

Los resultados arrojaron concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ de $12.69 \mu g/m^3$ para un tiempo promedio de 20:02 horas indicando no ser un factor de riesgo a la salud. Se encontró una correlación positiva no lineal entre las variables de $PM_{2.5}$ y la frecuencia cardíaca (FC), y se determinó que el 13.33% de los escenarios evaluados presentaron una correlación negativa ligeramente lineal entre el $PM_{2.5}$ y la VFC.

Palabras clave: $PM_{2.5}$, frecuencia cardíaca, variabilidad de la frecuencia cardíaca, estudiante universitario, diario vivir.

ABSTRACT

This research analyzed the relationship between PM_{2.5} exposure and heart rate variability (HRV) by examining the daily life of a university student with no history of cardiovascular disease living in the city of Bogotá, Colombia. Data were collected during 66 days between May and July 2022, guaranteeing a minimum monitoring time of 18 hours. For this purpose, AirBeam II and Polar Vantage M equipment was used and a time-activity log was filled out.

The results showed average PM_{2.5} concentrations of 12.69 µg/m³ for an average time of 20:02 hours, indicating that it is not a health risk factor. A positive non-linear correlation was found between PM_{2.5} variables and heart rate (HR), and it was determined that 13.33% of the evaluated scenarios presented a slightly linear negative correlation between PM_{2.5} and HRV.

Key words: PM_{2.5}, heart rate, heart rate variability, college student, daily living.

INTRODUCCIÓN

El deterioro de la calidad atmosférica es, en la actualidad, uno de los fenómenos de estudio más importantes para el sector de la salud en el mundo, pues su incidencia en la salud humana ha cobrado un amplio número de vidas tornándose así en uno de los problemas emergentes más delicados de los últimos tiempos (Martín y Santamaría, 2000). Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la contaminación del aire resulta ser, en las Américas, el principal riesgo ambiental para la salud pública, indicando que dentro de los efectos adversos más reconocidos asociados a la exposición se encuentran las enfermedades cardíacas, las cuales afectan en su mayoría a niños, mujeres y adultos mayores (OPS, 2021).

Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que, para el año 2016, hubo un estimado de alrededor de 2.4 millones de muertes prematuras producidas por enfermedades y complicaciones de carácter cardiovascular, asociadas al deterioro de la calidad del aire en países de medios y bajos ingresos, dentro de los cuales se encuentra Colombia (OMS, 2021).

En el panorama colombiano, informes elaborados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), afirman que el contaminante atmosférico con mayor potencial de alteración al ambiente y a la salud pública es el material particulado fino (PM_{2.5}), siendo este uno de los actores causantes de más de diez mil muertes en el año 2015 en el país, relacionándose a un amplio número de morbilidades del grupo de las enfermedades cardiovasculares (IDEAM, 2021).

Puntualmente, en la ciudad de Bogotá, hechos como el amplio crecimiento del parque automotor en cerca de un 24% en los últimos 5 años, se asocian estrechamente a las constantes alertas ambientales emitidas por la Alcaldía de Bogotá en relación a la calidad del aire (Oróstegui, 2021). Lo anterior resulta ser un problema de salud pública bastante importante para los habitantes de la capital, pues según señala Greenpeace Colombia, datos del Centro de Investigación en Energía y Aire Limpio indican que la polución atmosférica ha cobrado un estimado de 3900 vidas en Bogotá entre los años 2019 e inicios del 2020, estimación que resulta del análisis de datos de años anteriores relacionados a la proporción de muertes asociadas a la contaminación atmosférica en las principales ciudades del mundo, siendo evaluados en un modelo de riesgo desarrollado por el proyecto Global Burden of Disease, destacando a las enfermedades cardiovasculares y respiratorias como aquellas cuya proporción de incidencia es la mayor (Greenpeace, 2020).

En Bogotá, cerca del 27% de los habitantes son jóvenes entre los 16 y los 29 años, los cuales por sus hábitos, suelen ser una población que se encuentra en constante

desplazamiento por los distintos escenarios de la capital (Salazar, 2021). Este comportamiento expone inevitablemente a la juventud a factores de riesgo tales como la mala calidad del aire que, en conjunto con hábitos como el sedentarismo, tabaquismo, entre otros, pueden producir contundentes alteraciones asociadas a enfermedades cardiovasculares en este grupo poblacional (Almonacid et al., 2016). A su vez, numerosos estudios sugieren que la exposición al material particulado produce múltiples alteraciones en el funcionamiento del sistema cardiovascular, particularmente en la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), siendo los jóvenes mayores de 20 años uno de los principales colectivos afectados por esta problemática (Wang et al., 2020).

Lo mencionado sugiere entonces que la contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá resulta ser una problemática ambiental con fuertes implicaciones sociales, manifestándose de manera directa sobre la salud de sus habitantes, denotando una relación previsible en torno a las enfermedades cardiovasculares en la juventud.

Con base en lo mencionado, el objeto de la presente investigación se centra en analizar la asociación entre la exposición a diferentes niveles de concentración de material particulado PM_{2.5}, y la alteración que este produce en la variabilidad de la frecuencia cardíaca de un sujeto de estudio sin antecedentes de enfermedades cardiovasculares, residente en la ciudad de Bogotá, Colombia.

1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El deterioro del medio ambiente y, en particular, de la calidad del aire, resulta ser una de las problemáticas sociales y económicas más importantes de las últimas décadas desde la segunda mitad del siglo XX, afectando en mayor medida a los países en vía de desarrollo, como en el caso de los países latinoamericanos (OPS, 2021).

La contaminación atmosférica es un fenómeno que afecta a todo aquel que se halle expuesto a la misma, provocando el desarrollo de alteraciones a la salud humana en relación a morbilidades de origen cardiovascular (Wang et al., 2020). Asimismo se asocia a una alta tasa de mortalidad relacionada al desarrollo o magnificación de enfermedades cardiovasculares, siendo los países en vía de desarrollo los mayores afectados (OMS, 2021).

En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) estimó que los efectos adversos de la mala calidad del aire en el país se asocian, para el año 2015, a un total de 10527 muertes y cerca de 67.8 millones de síntomas y enfermedades, dentro de los cuales se destaca un amplio porcentaje asociados a afecciones cerebrovasculares (IDEAM, 2021).

Los estudios elaborados en torno a la exposición a PM y sus efectos en la salud han sido efectuados en contextos relativos a países desarrollados como Estados Unidos o el Reino Unido, y se han planteado mayormente para la observación de enfermedades de carácter respiratorio en lugares puntuales como ambientes laborales o áreas residenciales, mas no en individuos únicos y en contextos globales de la rutina diaria de los mismos (Wang et al., 2020). Son pocas las investigaciones realizadas a nivel de exposición personas y casi inexistentes a nivel intradomiciliario basándose en población sana sin antecedentes de enfermedades cardiovasculares y relativas a estas (Rojas Sánchez, 2016).

Es por tanto que la investigación realizada es innovadora en cuanto al contexto geográfico y social en el cual se plantea, permitiendo establecer la relación entre un factor de riesgo por exposición y el desarrollo de un efecto adverso visto a través de un marcador biológico, situando el análisis en la totalidad de escenarios frecuentados por el sujeto de estudio en su diario vivir.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Existe relación entre la variabilidad de la frecuencia cardíaca de un estudiante universitario sin antecedentes de enfermedades cardiovasculares y la exposición diaria personal al material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras (PM_{2.5})?

2.1. Hipótesis

2.1.1. Hipótesis nula

No existe relación alguna entre la exposición al material particulado fino PM_{2.5} en la ciudad de Bogotá, y la alteración a la variabilidad de la frecuencia cardíaca de un estudiante universitario sin antecedentes de enfermedades cardiovasculares.

2.1.2. Hipótesis alterna

Sí existe relación entre la alteración a la variabilidad de la frecuencia cardíaca de un estudiante universitario sin antecedentes de enfermedades cardiovasculares, y la exposición unipersonal al material particulado fino PM_{2.5}.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Analizar la relación entre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y la exposición diaria personal al material particulado fino $PM_{2.5}$ en un estudiante universitario residente en la ciudad de Bogotá, Colombia, en un periodo de diez semanas comprendido entre los meses de mayo y julio del 2022.

3.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ a las que se halla expuesto un estudiante universitario en su cotidianidad en la ciudad de Bogotá, Colombia, durante el periodo de estudio.
- Determinar el valor de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) con base en los valores por minuto de la frecuencia cardíaca en un estudiante universitario en su cotidianidad en la ciudad de Bogotá, Colombia, durante el periodo de estudio.
- Establecer la correlación existente entre la variable de exposición ($PM_{2.5}$) y el marcador biológico de efecto del sujeto de estudio (VFC).

4. ANTECEDENTES

La calidad del aire y su influencia en la salud humana ha sido uno de los temas de mayor importancia en lo que se refiere a salud pública y salud ambiental en las últimas décadas, presentando un amplio avance investigativo en lo transcurrido del siglo XXI. Los trabajos realizados han comprendido, en su mayoría, la exposición de grupos poblacionales en entornos específicos como lugares de trabajo y hogares, siendo estos ambientes interiores. No obstante, investigadores de distintos países asiáticos han llevado a cabo estudios en relación a la exposición a distintos contaminantes atmosféricos en ambientes exteriores (Wang et al., 2020).

Tal es el caso del estudio realizado por Liu et al. en el año 2015 en la ciudad de Taipéi, Taiwán, en el cual analizaron la respuesta de variables tales como la desviación estándar de los intervalos RR normales (SDNN) y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) en relación a la exposición personal al material particulado fino ($PM_{2.5}$), tomando como base de estudio un grupo de 120 hombres y mujeres entre los 19 y los 24 años de edad, los cuales no sufrían de ninguna enfermedad y no presentaban historial de tabaquismo, realizando mediciones durante 1 hora en desplazamientos matutinos en distintos medios de transporte. El estudio concluyó que la exposición al material particulado fino tenía un efecto de reducción en la VFC, encontrando que los sujetos que caminaban tenían una mayor exposición a la contaminación (Liu et al., 2015). Cabe destacar que el estudio presentó limitaciones en cuanto a la falta de información sobre otros contaminantes del aire tales como el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno, de manera que se puede confundir asociaciones observadas entre los índices medidos.

En cuanto a investigaciones en ambientes interiores, en el año 2017, Lee et al., realizaron un estudio de panel en el que analizaron el efecto inmediato de la exposición aguda (minutos a horas) a $PM_{2.5}$ sobre la VFC nocturna en un grupo de 21 adultos sin enfermedad cardíaca manifiesta, reclutados en una clínica de Boston, Massachusetts, los cuales serían monitoreados durante su periodo de sueño entre las 00:00 horas y las 7:00 horas. El estudio encontró asociaciones rezagadas entre la exposición personal al $PM_{2.5}$ y cambios rápidos en la función autonómica cardíaca, produciéndose a su vez reducciones en la VFC nocturna, denotando respuestas muy rápidas frente a la exposición (Lee et al., 2017).

Por otra parte, un estudio de panel más reciente presentado por Xing et al. en el año 2021, innovó en cuanto a la búsqueda de la disminución de los efectos adversos sobre la VFC en relación a la exposición a $PM_{2.5}$, con base en el control y tratamiento de la presión arterial en 282 sujetos de estudio hipertensos de 35 a 74 años de edad, residentes en cuatro ciudades de China. En este se concluyó, de manera congruente con lo esperado según el estado del arte, que la exposición personal a $PM_{2.5}$ disminuye significativamente la VFC en periodos de tiempo tanto cortos (menores a una hora), como largos (24 horas o más); asimismo se encontró que los

impactos generados sobre la VFC lograron atenuarse en los sujetos con presión arterial controlada (Xing et al., 2021).

En el panorama investigativo colombiano se encuentra el trabajo llevado a cabo a inicios del 2020 por Fischer, F., en la Universidad El Bosque, ciudad de Bogotá, en el cual estudió la asociación entre la exposición al PM_{10} y $PM_{2.5}$ y el desarrollo de distintas enfermedades en la población de las localidades de Fontibón, Kennedy y Usaquén, arrojando hallazgos que indicarían afectaciones notorias de carácter respiratorio en las poblaciones estudiadas asociándolo a su vez a un número de condiciones propias del estilo de vida y el contexto socioeconómico de las mismas, realizando a su vez, una breve y no muy profundizada mención a que la exposición al material particulado produciría disminuciones en la VFC provocadas por estrés metabólico (Fischer, F., 2020).

Finalmente, otros estudios efectuados en el país remontan al desarrollado en la Universidad Industrial de Santander por Rojas Sánchez, O. en el año 2016, en el cual realizó una asociación entre la exposición extra e intra domiciliaria a $PM_{2.5}$ y la función autonómica cardiovascular en un grupo de 200 adultos mayores de 40 años de edad, los cuales no padecieran enfermedades cardiovasculares, renal, cerebrovascular o neurológicas, ni manifestaran tabaquismo actual. El diseño del estudio comprendió un monitoreo de siete (7) meses donde se midieron principalmente variables tales como la VFC, el índice de masa corporal (IMC), las concentraciones de $PM_{2.5}$ intra domiciliario y la temperatura ambiental del lugar de la toma de la VFC. Los hallazgos del estudio confirmaron la asociación tanto en corto como en largo plazo entre la exposición al $PM_{2.5}$ y la VFC, señalando que a mayores niveles de concentración de material particulado fino se presenta un desempeño de la función autonómica cardiovascular menos favorable (Rojas Sánchez, 2016).

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. Marco Conceptual

5.1.1. Aire

Mezcla de gases, principalmente oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, helio y neón, entre otros, los cuales conforman la atmósfera y por ende se encuentran en todo lugar, siendo así de gran importancia para los seres vivos en la realización de funciones vitales tales como la respiración y la fotosíntesis, y en general para la generación y el ciclo de distintos fenómenos atmosféricos tales como el viento, las nubes, eventos meteorológicos, etc. (CNANP, 2018).

5.1.2. Contaminación ambiental

La contaminación ambiental se define como la introducción de sustancias, materias o formas de energía, de manera directa o indirecta en la atmósfera, hidrósfera, geósfera o biósfera. Dichas sustancias se caracterizan por ser generalmente antropogénicas, y por no formar parte del ambiente o por encontrarse en niveles irregulares dentro del mismo, generando un efecto perjudicial sobre los factores ecosistémicos (Martín y Santamaría, 2000). Entre los distintos componentes ambientales, se destaca la contaminación atmosférica como una de las problemáticas actuales con mayor grado de importancia debido a la gravedad de sus efectos nocivos en la salud humana (Flores et al., 2012).

5.1.3. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica, también llamada contaminación del aire, se refiere al detrimento de la calidad del aire en función de la presencia de sólidos suspendidos y compuestos gaseosos. La contaminación del aire comprende una cantidad compleja de numerosos agentes agrupados y nombrados como “contaminantes primarios”. Dentro de los contaminantes primarios se hallan aquellos que, por su origen, composición y su proporción en la atmósfera, tienen un reconocido efecto adverso, estos son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x), el ozono (O₃) y el material particulado (PM) (Saavedra, 2020).

5.1.4. Emisión

Refiere a la descarga de sustancias, materia o formas de energía hacia la atmósfera de manera directa o indirecta, continua o discontinua, procedentes de fuentes naturales como antropogénicas, con potencial de incidir de manera perjudicial en la salud humana, de seres vivos y el funcionamiento de ecosistemas (MITECO, 2022).

5.1.5. Exposición

Contacto de un organismo con una sustancia, otro organismo o forma de energía. En el caso de los seres humanos, se refiere al contacto o ingreso de algún agente externo hacia el interior del organismo por una o varias vías de entrada al cuerpo: ingestión, respiración, contacto dérmico u ocular. La exposición puede ser de carácter agudo o corta duración, o crónica, de larga duración o largo plazo (GreenFacts, 2022).

5.1.6. Material particulado

El material particulado es una mezcla de diversos componentes sólidos de tamaños que van desde micras hasta nanómetros, y que poseen propiedades aerodinámicas que les permiten ser transportados, removidos y sedimentados a partir de la acción del aire. Este ha sido clasificado según el tamaño de su partícula, catalogándolo en dos grupos principales: material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micras (PM₁₀) y a 2.5 micras (PM_{2.5}) (OMS, 2021).

5.1.7. PM_{2.5}

Partículas inhalables finas que tienen diámetros de, por lo general, 2.5 micrómetros y menores. Son la causa principal de la visibilidad reducida (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2021).

Dentro del amplio grupo de contaminantes sólidos particulados presentes en el aire se encuentra el material particulado fino, como también se conoce al PM_{2.5}, el cual resulta ser uno de los contaminantes de mayor importancia ya que ingresa con facilidad al organismo siendo rápidamente absorbido vía inhalatoria (Song et al., 2021). La exposición a este contaminante, tanto en espacios exteriores como en espacios interiores, se encuentra asociada a un amplio número de enfermedades y muertes a nivel global, particularmente en niños menores de 5 años y adultos mayores de 70 años (Bu et al., 2021).

5.1.8. Frecuencia cardíaca

Conocida también como pulso, es el número de latidos o pulsaciones que efectúa el corazón durante un periodo determinado, generalmente de un minuto, oscilando normalmente en estado de reposo entre los 60 y 100 latidos por minuto en un adulto sano (INC, 2022).

5.1.9. Intervalo RR

Es el tiempo que transcurre entre dos ondas R consecutivas en el electrocardiograma, es decir, la cantidad de tiempo que le toma al corazón efectuar dos latidos consecutivos, latidos los cuales son representados por una onda a la cual se le denomina onda 'R' (Azor Montoya, 2013).

5.1.10. Desviación estándar de los intervalos R-R (SDNN)

Corresponde a la media más empleada para determinar la variabilidad de la frecuencia cardíaca. La SDNN refiere al promedio de la distancia que existe entre el valor de cada uno de los intervalos RR y el valor medio de estos intervalos en un periodo determinado, generalmente de 24 horas (Orrego et al., 2007).

5.2. Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC)

La variabilidad de la frecuencia cardíaca es un marcador biológico de efecto la cual se define como la variación de la distancia existente entre dos ondas R (intervalos RR), que depende de la fluctuación de estímulos en el Sistema Nervioso Autónomo (SNA) y puede presentar influencia de factores tales como la edad, la respiración, la temperatura, entre otros (Riojas Rodríguez et al., 2006). La variabilidad del ritmo cardíaco describe entonces las variaciones que se presentan entre latidos consecutivos (Azor Montoya, 2013).

5.3. Factores biológicos que influyen en la VFC

De acuerdo con numerosos estudios, el Sistema Nervioso Autónomo (SNA) actúa sobre la función cardíaca a través de sus dos ramas: Sistema Nervioso Parasimpático (SNP) y Sistema Nervioso Simpático (SNS). El primero de estos predomina en instancias de reposo disminuyendo la frecuencia cardíaca y elevando la VFC, mientras que el segundo predomina en situaciones de peligro así como de estrés físico y mental elevando la frecuencia cardíaca y acortando la VFC (Sarasa, 2020).

5.4. PM_{2.5} como factor de riesgo de enfermedades cardiovasculares

Existen dos grupos de enfermedades estrechamente relacionadas con la exposición al PM_{2.5}: el grupo de enfermedades respiratorias y el grupo de enfermedades cardiovasculares, siendo este último la principal causa de muerte a nivel global en lo transcurrido del siglo XXI, provocando cerca de 17.9 millones de muertes anualmente de las cuales 2.94 millones son atribuibles a la contaminación del aire ambiental, específicamente a causa del PM_{2.5} (Wang et al., 2020). Las

enfermedades cardiovasculares (ECV) se refieren al conjunto de trastornos del corazón y de los vasos sanguíneos, los cuales tienen influencia en los distintos órganos irrigados como el cerebro y el músculo cardíaco, incluyendo así enfermedades tales como la enfermedad cardíaca coronaria, enfermedad cerebrovascular, cardiopatías congénitas, entre otras. A su vez se comprenden los ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares (ACV), tipificados como eventos agudos causados por el impedimento del flujo sanguíneo (OMS, 2021).

La exposición al PM_{2.5} se ha asociado al crecimiento de la morbilidad y mortalidad en las enfermedades cardiovasculares, siendo el infarto agudo al miocardio (IAM) y la isquemia miocárdica las afectaciones más notables junto con el desarrollo de arritmias cardíacas (Brook, 2008). De esta manera es preciso decir que la exposición al PM_{2.5}, tanto a largo como a corto plazo, compromete el desenlace fatal de distintas comorbilidades en función del tipo de exposición, siendo posible asociarlo a través del estudio de mecanismos fisiopatológicos tales como los marcadores biológicos (Rojas Sánchez, 2016).

5.5. Efectos del PM_{2.5} sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca

Estudios elaborados en amplios grupos de personas a nivel extradomiciliario, en su mayoría, han sugerido que la exposición al material particulado fino se asocia a un cambio en las medidas de la VFC tanto en sus parámetros de tiempo como SDNN, así como los de frecuencias altas (HF) y bajas (LF), resaltando que un incremento en los niveles de PM_{2.5} produce una disminución perceptible en las medidas de VFC (Pieters et al., 2012).

5.6. Marco Legal

El marco legal asociado al control de la contaminación atmosférica en Colombia cuenta con un número amplio de normativas que regulan, a través de constantes actualizaciones, la calidad del aire atmosférico en el país. A continuación se presentan en la Tabla 1 algunas de las normas vigentes en materia de calidad del aire.

Tabla 1. Normatividad de calidad del aire en Colombia.

NORMA	EMISOR	OBJETO
Decreto 948 de 1995	El Presidente de la República de Colombia	Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23, el Decreto - Ley 2811 de 1974, 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.

Resolución 160 de 1996	Secretaría Distrital de Salud	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por las fuentes móviles con motor a gasolina y diésel.
Decreto 174 de 2006	Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.	Por medio del cual se adoptan medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del Aire en el Distrito Capital.
Decreto 417 de 2006	Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.	Por medio del cual se adoptan medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire en el Distrito Capital.
Decreto 979 de 2006	El Presidente de la República de Colombia	Por el cual se modifican varios artículos del Decreto 948 de 1995 en torno a la prevención y control de la contaminación atmosférica.
Resolución 910 de 2008	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 2154 de 2010	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 650 de 2010	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial	Por la cual se adopta el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.
Decreto 1076 de 2015	El Presidente de la República de Colombia	Por el cual se expide el Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
Resolución 2254 de 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.
Ley 1972 de 2019	Congreso de la República	Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles.

Fuente: IDEAM, 2022. Adaptado por el autor.

6. METODOLOGÍA

6.1. Tipo de estudio

Estudio observacional descriptivo, no causal, con propósito de analizar la relación entre dos factores.

6.2. Sujeto de estudio

El sujeto de estudio corresponde a un estudiante universitario de 22 años de edad perteneciente a la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, residente en el barrio Villas de Granada de la localidad de Engativá de la ciudad de Bogotá, Colombia.

6.3. Criterios de selección del sujeto de estudio

6.3.1. Criterios de inclusión

- Estudiante universitario activo mayor de 18 años de edad.
- Residencia actual en la ciudad de Bogotá, Colombia.
- Ausencia de antecedentes de enfermedades cardiovasculares

6.3.2. Criterios de exclusión

- Consumo actual de tabaco.
- Consumo actual de sustancias psicotrópicas y/o de acción directa en el sistema circulatorio y sistema nervioso central.

6.4. Variables de medición

Las variables de medición incluidas corresponden a una variable ambiental, relativa al factor de riesgo por exposición, y una variable biológica, relativa al ritmo cardíaco del individuo.

6.4.1. Variables del sujeto de estudio

- Biológica: Frecuencia cardíaca (FC) para determinación de VFC como marcador biológico.

6.4.2. Variables ambientales

- Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras (PM_{2.5}).

6.5. Mediciones

6.5.1. Tiempo de medición

Tanto la medición de los niveles de PM_{2.5}, así como el registro de los valores de la frecuencia cardíaca y el diligenciamiento de la bitácora de tiempo – actividad se realizaron de manera simultánea y continua durante un periodo de 66 días, con fines

de monitorear la mayor cantidad de tiempo posible dentro de los límites de la investigación y lograr una representatividad significativa de los datos.

El monitoreo tuvo inicio el día 16 de mayo del año 2022 a las 1:42 horas de la mañana en la vivienda del estudiante con fines de empezar la toma de datos a partir del primer momento de sueño de éste, permitiendo a su vez la adecuación y vinculación de los equipos necesarios, lo que tomó una parte del tiempo del inicio del día, finalizando las mediciones el día 20 de julio del mismo año a las 22:09 horas en la noche, para un total de 66 días de monitoreo.

Durante el periodo de mediciones se garantizó, para cada uno de los días, un tiempo de monitoreo mínimo mayor o igual a 18 horas basándose en la recomendación del Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, el cual establece que un registro de datos válidos deberá contar como mínimo con el 75% del tiempo de monitoreo. Este recurso fue retomado en el presente estudio con fines de emplear criterios de muestreo ambiental, ya que los límites y la naturaleza de la investigación comprenden el monitoreo de espacios tanto extra como intradomiciliarios en periodos de tiempo superiores a 8 horas, por tanto no se ahondó en muestreos de carácter ocupacional.

Asimismo, la idea de plantear el estudio como un monitoreo ambiental se refuerza empleando el concepto de exposoma, el cual es un término que ha tomado gran relevancia en el ámbito investigativo de la salud pública y medioambiental de los últimos años, acuñado para referirse al estudio del grupo de exposiciones ambientales variables en el tiempo a las cuales se encuentra sometido el ser humano de forma unipersonal, evaluando el microbioma próximo a éste (Vicente et al., 2016).

6.5.2. Lugar de medición

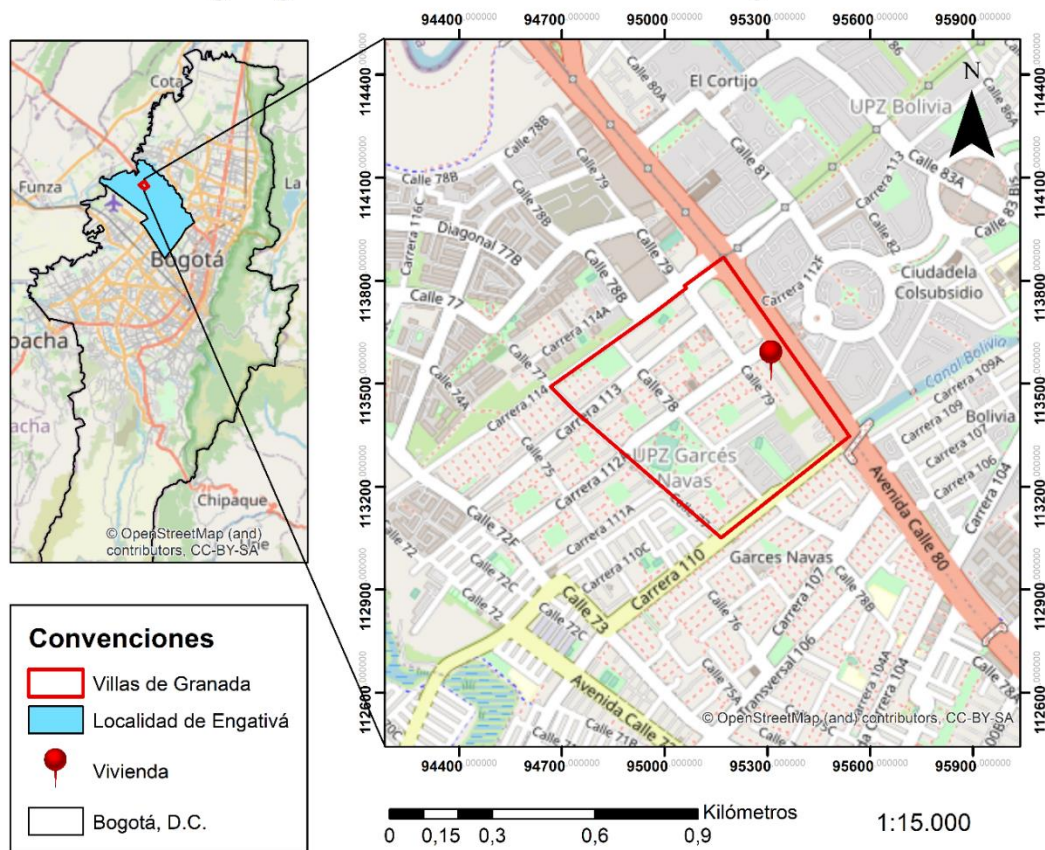
Las mediciones de las variables ambiental y biológica tuvieron lugar en la ciudad de Bogotá, Colombia, comprendiendo la totalidad de los escenarios que el sujeto de estudio acudió con base en su desplazamiento y la realización de las diferentes actividades diarias.

6.5.3. Lugar de residencia

Dentro de los espacios más frecuentados por el sujeto de estudio se destaca, en primer lugar, el área de residencia del estudiante, ubicado en el barrio Villas de Granada, localidad de Engativá, siendo este un conjunto residencial situado frente a la autopista calle 80 tal y como se presenta a continuación en el Mapa 1.

Mapa 1. Ubicación geográfica de la vivienda del sujeto de estudio.

Ubicación geográfica de la vivienda del sujeto de estudio



Fuente: autor.

El lugar de residencia del sujeto de estudio se localiza al noroccidente de la ciudad de Bogotá, D.C. en el barrio Villas de Granada y corresponde a un apartamento situado en un cuarto piso al interior del Conjunto Multifamiliar Villas de Granada ubicado a la altura de la calle 80 con carrera 111ª. El vecindario comprende un área de 0.357 km² y hace parte de la unidad de planeamiento zonal (UPZ) No. 73 Garcés Navas, cuyo uso del suelo es de tipo residencial consolidado y pertenece a la localidad de Engativá.

Debido a su cercanía a la Avenida Calle 80, el área de residencia del sujeto de estudio cuenta con un flujo vehicular de carácter alto y constante en el que predominan los vehículos particulares debido a ser una zona de tipo residencial; no obstante, también existe una alta circulación de vehículos de carga y de transporte urbano e intermunicipal como consecuencia de su proximidad a la salida noroccidental de la ciudad por la calle 80 con carrera 119 en el Puente de Guadua.

La zona descrita desempeña una amplia actividad comercial la cual favorece la circulación vehicular a lo largo de toda la semana desde horas tempranas de la mañana, alrededor de las 5:00 AM, hasta altas horas de la noche sobre las 10:00 PM.

El segundo espacio corresponde a la institución educativa a la que asiste el estudiante relativa a la sede principal de la Universidad Santo Tomás ubicada en el barrio Marly, localidad de Chapinero tal y como se presenta en el Mapa 2, a la cual acudió durante los meses de mayo y junio tanto para la toma de clases, como para la realización de trámites asociados a la institución.

Ubicación geográfica de la institución académica del sujeto de estudio



La universidad se halla en cercanía a tres vías principales: la Av. Alberto Lleras Camargo, también conocida como Carrera Séptima, la Cra. 13 y la Av. Caracas, las

cuales presentan un alto flujo vehicular en el que predomina el parque de buses de transporte público, siendo la Av. Caracas una de las principales troncales del sistema articulado de Transmilenio.

El área en la que se localiza la institución se caracteriza por contar diversos sitios de interés laboral, académico, social y residencial ya que allí se ubican numerosos edificios de oficinas, residencias estudiantiles e instituciones educativas así como múltiples lugares de ocio tales como bares y discotecas, entre otros, lo cual se traduce en un flujo constante de personas y vehículos en el barrio en cuestión.

6.5.5. Equipos e insumos utilizados

A continuación se presentan y describen en la Tabla 2 la totalidad de los equipos, instrumentos y/o insumos empleados durante el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 2. Equipos e insumos empleados en las mediciones.

<i>Equipo / Insumo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>
AirBeam II		Dispositivo portátil de bajo costo equipado con GPS, útil para el monitoreo continuo vía bluetooth de variables ambientales tales como niveles de PM ₁₀ y PM _{2.5} , temperatura y humedad relativa (HabitatMap, 2021).
Polar Vantage M		Reloj multideporte avanzado, equipado con sensores de alta tecnología para realizar lecturas precisas y continuas de la frecuencia cardíaca (Polar, 2021).
Batería portátil		Dispositivo portátil almacenador de carga de 5000 mAh que permite transferir energía a otros dispositivos a través de conexión USB.

<i>Equipo / Insumo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>
Libreta de anotaciones		Libreta de apuntes equipada con bolígrafo para la toma de datos in situ.
Smartphone		Dispositivo celular que permite conectar con los equipos de monitoreo vía bluetooth para la lectura y almacenamiento de datos.
Computador de escritorio		Instrumento tecnológico empleado para el ordenamiento, tratamiento y análisis de datos.

Fuente: autor.

6.6. Posición anatómica de los equipos

De manera seguida se presenta la Figura 1 en la que se describe a nivel de anatomía la posición de los instrumentos de medición portados por el sujeto de estudio.

Figura 1. Posición de los equipos de medición.



Fuente: autor.

En la Figura 1 se representa el perfil frontal de sujeto de estudio con la posición a nivel de anatomía de los equipos de medición empleados, la cual se mantuvo de forma constante durante la totalidad del periodo de monitoreo. En esta se puede evidenciar que el Polar Vantage M se dispuso en la muñeca de la mano izquierda del individuo y el AirBeam II en la parte superior derecha del pecho del mismo, ajustándose a la correa derecha de una mochila con la que contó permanentemente.

6.7. Proceso general de monitoreo

La dinámica para llevar a cabo las mediciones se desarrolló de la misma manera durante cada uno de los 66 días de monitoreo. Esta consistió, en primer lugar, en brindar un espacio de alrededor de una hora y treinta minutos a partir de la media noche para realizar la carga eléctrica de los dispositivos AirBeam II, Polar Vantage M, el smartphone y la batería portátil.

Posteriormente se vinculaban el AirBeam II y el Polar Vantage M al smartphone a través del sistema de bluetooth de manera que se daba inicio al monitoreo tanto de los niveles de $PM_{2.5}$, como de la frecuencia cardíaca.

Durante el transcurso del día se realizaba seguimiento periódico al monitoreo con el fin de corroborar que los equipos estuviesen funcionando sin presentar algún detenimiento en sus funciones. En el caso fortuito de que alguno de los dos equipos presentara alguna pausa durante su desempeño, se reanudaba con la mayor prontitud la medición verificando la hora de interrupción y continuación para responder las 18 horas mínimas de monitoreo diario.

La carga eléctrica de los dispositivos se mantuvo constantemente alimentada para garantizar su funcionamiento continuo, esto se llevó a cabo conectando los equipos al computador de escritorio, haciendo uso de los cables USB, en los casos en los

que el monitoreo se realizaba al interior de la residencia del sujeto de estudio. En el caso de los ambientes extradomiciliarios se contó permanentemente con el uso de la batería portátil para cumplir con la función de alimentación energética.

De manera simultánea a las mediciones de PM_{2.5} y FC, se diligenciaba en la libreta de anotaciones el lugar en el que se encontraba el sujeto de estudio junto con la hora exacta, la actividad que se encontraba realizando en el momento y, a su vez, observaciones relevantes del entorno tales como emisiones, ausencia/presencia de ventilación, entre otros de carácter importante para el objeto del estudio.

Faltando aproximadamente una a dos horas para la finalización del día y, verificando que se había cumplido con la meta de tiempo monitoreado, se procedía a detener la medición en cada uno de los equipos y seguidamente se realizaba la descarga de los datos registrados para ese día dando por terminado el monitoreo hasta el día siguiente.

6.8. Recolección de datos

6.8.1. AirBeam II

Los datos de las mediciones de PM_{2.5} llevadas a cabo por el AirBeam II se registran y almacenan gráfica y numéricamente en el smartphone vinculado al equipo vía bluetooth a través de la aplicación AirCasting, la cual organiza cada una de las sesiones de monitoreo en orden de ejecución por fecha y hora.

El equipo cuenta con un sensor de partículas Plantower PMS7003 el cual cuenta con un láser cuya luz dispersa las corrientes de aire, realizando una medida estimada de la cantidad de partículas contenidas en estas (HabitatMap, 2018).

Para la descarga de estos datos el aplicativo permite compartir la sesión a un correo electrónico mediante un zip comprimido el cual contiene un documento de excel en formato CSV, obteniendo así el archivo en el que se encuentran los niveles de PM_{2.5} medidos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, arrojando un único valor promedio por minuto para cada uno de los minutos del periodo monitoreado.

6.8.2. Polar Vantage M

Para la recolección de los datos de la frecuencia cardíaca se daba inicio a la medición directamente desde el equipo, el cual mostraba en su pantalla digital los valores de la FC en tiempo real segundo a segundo, de manera que los datos arrojados correspondían al ritmo cardíaco registrado en los últimos 60 segundos siendo medido en latidos por minuto (bpm).

En cuanto a la obtención de los datos, el dispositivo se encontraba vinculado al smartphone vía bluetooth y se sincronizaba con éste al finalizar la sesión para subir y almacenar los datos en la nube, siendo posible descargarlos en un archivo excel en formato CVS a través de la página web de la marca Polar.

6.8.3. Bitácora de tiempo – actividad

Se diligenció de forma manual in situ especificando aspectos como el lugar de estadía, actividad realizada y observaciones pertinentes. Debido a que la bitácora de tiempo – actividad se desarrolló a través de una libreta de anotaciones, siendo esta una herramienta física, fue necesario registrar de manera manual en un Excel los apuntes y observaciones descritas en la misma para contrastar temporalmente con las mediciones obtenidas de $PM_{2.5}$ y FC.

6.9. Tratamiento de los datos recopilados

6.9.1. Organización de los datos

Los datos se situaron en archivos individuales de Excel para cada uno de los días de medición, el contenido de estos documentos se organizó cronológicamente asignando a cada uno de los minutos monitoreados a lo largo del día su respectivo valor de concentración de $PM_{2.5}$ y de FC.

Debido a que los valores de $PM_{2.5}$ se encontraban registrados por segundo y los de FC por minuto, y para manejar todo en un mismo estándar de unidades, fue necesario aplicar una media geométrica a los datos del $PM_{2.5}$ para obtener un valor único por minuto.

En cuanto a los registros elaborados en la bitácora, estos se situaron en cada uno de los excel manteniendo la temporalidad de los mismos en tablas específicas que distinguían la información recopilada por lapsos de tiempo.

6.9.2. Estadística aplicada

Se emplearon parámetros de estadística descriptiva con el fin de organizar, agrupar y distribuir los datos recopilados, aplicando en primer lugar medidas de tendencia central con el fin de conocer valores de interés tales como la media aritmética y la media geométrica obteniendo así los valores promedio de $PM_{2.5}$ y FC tanto para periodos de actividades específicas, como para la totalidad de las mediciones diarias y mensuales.

Seguidamente se utilizaron medidas de posición haciendo uso de percentiles 25, 50, 75 y 90 permitiendo segmentar los datos distinguiendo a su vez los valores máximos y mínimos para cada una de las variables de medición.

Finalmente se manejaron medidas de dispersión para calcular la desviación estándar de los valores de la frecuencia cardíaca que, en conjunto con la media geométrica, son una pieza fundamental para la determinación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

6.9.3. Determinación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

La determinación de la VFC se llevó a cabo relacionando los valores diarios y por actividad de la desviación estándar de la frecuencia cardíaca y los valores de la media geométrica para la misma cronología en la ecuación de coeficiente de variación.

Ecuación 1. Determinación de la VFC.

$$VFC = \frac{\text{Desviación estándar (FC)}}{\text{Media geométrica (FC)}}$$

6.9.4. Correlación de datos

El análisis estadístico de los datos se realizó haciendo uso del software Stata/IC 11.0. el cual permitió evaluar el comportamiento de los datos de PM_{2.5}, FC y VFC aplicando las pruebas de *Skewness/Kurtosis* y *Shapiro Wilk* con el fin de conocer si los datos cumplían con una distribución normal o no.

Cuando la distribución de ambas o alguna de las dos variables evaluadas no fue normal, se aplicó la prueba no paramétrica de correlación *Spearman Rank*, y cuando ambas evidenciaban un comportamiento normal se empleó la prueba de correlación de *Pearson*, haciendo uso de los criterios de P valor menor a 0.05 para corroborar la significancia estadística y observando el valor del Rho arrojado por el software para comprobar el porcentaje de correlación entre los datos.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Si bien en lo establecido para la metodología del anteproyecto se planteó el monitoreo de diez (10) semanas o setenta (70) días, un error instrumental en el equipo AirBeam II inhabilitó el dispositivo faltando cuatro días para la finalización del periodo de medición, de manera que se logró realizar el monitoreo del material particulado PM_{2.5} y de la frecuencia cardíaca durante sesenta y seis (66) días como se muestra a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución semanal del monitoreo.

	Frecuencia	Tiempo promedio
--	------------	-----------------

Día de la semana		(hrs:min)
Lunes	10	20:02
Martes	10	
Miércoles	10	
Jueves	9	
Viernes	9	
Sábado	9	
Domingo	9	
Total días	66	

Fuente: autor.

Como es de observar, en la Tabla 3 se denota que la frecuencia de monitoreo para cara uno de los días de la semana fue estrechamente similar contando únicamente con un día adicional para los días lunes, martes y miércoles dentro de los cuales se comprende el mayor tiempo de asistencia del sujeto de estudio en la institución educativa.

Asimismo se evidencia que el tiempo de monitoreo promedio fue de 20 horas y dos minutos superando satisfactoriamente el tiempo de medición propuesto de 18 horas mínimas diarias relativo al 75% de la duración de un día.

Debido al extenso número de datos recopilados tanto de PM_{2.5} como de FC, fue necesario organizar el registro completo estandarizándolo en 15 actividades según el lugar, frecuencia y/o acciones realizadas en cada uno de los espacios monitoreados (Tabla 4), esto con el fin de lograr un tratamiento sistemático para la totalidad de las mediciones y presentar de manera práctica los resultados obtenidos.

Tabla 4. Tiempo promedio de ejecución por actividad.

No.	Actividad	Tiempo (hrs:min)
1	Dormir	9:24
2	Casa en reposo	6:12
3	Labores domésticas	3:31
4	Otros lugares	2:29
5	Universidad	2:04
6	Caminar Marly	1:57
7	Alistándose en casa	1:57
8	Caminar Cl. 80	1:55
9	Actividad física	1:46
10	Caminar Cr. 13	1:39
11	Restaurantes	1:22
No.	Actividad	Tiempo (hrs:min)
12	Transmilenio	1:12
13	Caminar barrio	0:48

14	Caminar Cr. 7	0:36
15	Vehículos	0:31

Fuente: autor.

Como se puede evidenciar en la Tabla 4 se establecieron las 15 actividades con base en la frecuencia del espacio o la actividad desarrollada por el sujeto de estudio, proporcionando a su vez los valores del tiempo de ejecución promedio para cada escenario en los 66 días de monitoreo, agrupando así en conjuntos cierto número de eventos relacionados de tal manera que:

- *Actividad No. 1:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio se encontraba durmiendo.
- *Actividad No. 2:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio permaneció al interior de su vivienda realizando labores de baja actividad física consideradas también como reposo.
- *Actividad No. 3:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio permaneció en su casa realizando labores domésticas de media o alta actividad física asociadas a tareas para el cuidado del hogar.
- *Actividad No. 4:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio permaneció en lugares remotos cuya visita fue única.
- *Actividad No. 5:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio permaneció al interior de las instalaciones de la Universidad Santo Tomás sede Cl. 51.
- *Actividad No. 6:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio caminó al interior del barrio Marly, sector en el cual estudia.
- *Actividad No. 7:* comprende la totalidad de eventos relacionados con el cuidado personal en el hogar.
- *Actividad No. 8:* comprende la totalidad de los eventos en los que el sujeto de estudio caminó a lo largo de la autopista calle 80.
- *Actividad No. 9:* comprende la totalidad de eventos asociados a actividades de alto rendimiento físico tales como deportes.
- *Actividad No. 10:* comprende la totalidad de los eventos en los que el sujeto de estudio caminó a lo largo de la Carrera 13.

- *Actividad No. 11:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio permaneció al interior de establecimientos de comida.
- *Actividad No. 12:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio se encontraba movilizándose haciendo uso del sistema integrado de transporte de Transmilenio.
- *Actividad No. 13:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio caminó al interior del barrio Villas de Granada, sector en el cual reside.
- *Actividad No. 14:* comprende la totalidad de los eventos en los que el sujeto de estudio caminó a lo largo de la Carrera Séptima.
- *Actividad No. 15:* comprende la totalidad de eventos en los que el sujeto de estudio se encontraba movilizándose al interior de un vehículo particular.

Por otra parte, en la Tabla 4 se denota que dentro de las seis actividades más frecuentadas por el sujeto de estudio se encuentran tres desarrolladas al interior de la vivienda del mismo, y tres desempeñadas al interior y en cercanía de la institución educativa al que éste asiste.

7.1. Análisis de la actividad semanal del sujeto de estudio

Si bien la actividad desarrollada para cada uno de los 66 días de monitoreo no fue exactamente la misma basándose en los periodos estudiantiles y vacacionales, así como en los eventos ocurridos y su respectiva temporalidad, la bitácora de tiempo – actividad arrojó que el sujeto de estudio manifestó hábitos recurrentes en varios días de la semana los cuales si bien no responden a un modelo único de estudiante promedio, sí resultan congruentes con la actividad de los estudiantes tesistas de últimos semestres, cuyo número de espacios académicos en curso es significativamente menor, concluyendo que:

Los días lunes, miércoles y viernes el sujeto de estudio solía ir a dormir entre la 1:00 y las 2:00 horas de la madrugada en función de la realización de trabajos y la preparación de los equipos para el inicio del monitoreo, despertando normalmente entre las 9:30 y 11:15 horas. Seguidamente permanecía en su vivienda alistándose hasta las 11:00 o 13:00 horas, según requirió, para tomar eventualmente el sistema de transporte Transmilenio en el que tardaba alrededor de 45 minutos en dirección a la Universidad Santo Tomás, asistiendo a clases en ésta entre las 12:00 y las 16:00 horas habitualmente. Posteriormente el estudiante acostumbraba a permanecer en el barrio Marly y, entre distintas situaciones, realizaba caminatas de duraciones cercanas a una hora y frecuentaba establecimientos de comida aledaños al sector. Finalmente tomaba el transporte de vuelta a su hogar en el que

usualmente finalizaba la noche. Estas actividades se realizaron con normalidad durante un total de 29 días sin contar algún desplazamiento fortuito hacia la universidad en algún otro día distinto de la semana.

Los días martes y jueves eran de poca actividad física, pues al no tener asignadas clases para estos días, el sujeto de estudio permanecía la mayoría del tiempo en su hogar despertando sobre el mediodía para proceder a realizar labores domésticas tales como el barrido y la limpieza del hogar. Los eventos que ocurrían en estos días eran fortuitos y generalmente estaban asociados a salidas breves con duraciones de 30 a 50 minutos con amigos por el sector de Villas de Granada. En su mayoría, el estudiante permanecía en reposo en su hogar a partir de las 7:00 pm hasta finalizar el día. Cabe destacar que, como es normal en personas de su grupo etario, el sujeto de estudio salía ocasionalmente los días jueves por el sector de la Cl. 51, en cercanía a la institución educativa, con fines de ocio y socialización.

Por último, los días sábado y domingo registraba una mayor actividad despertando sobre las 10:00 am y realizando labores domésticas durante el resto de la mañana para posteriormente salir a zonas verdes por el sector de residencia, efectuando allí labores de acondicionamiento físico tales como deportes o, en otro número importante de casos, para tener salidas programadas con sus familiares a centros comerciales u otros lugares fortuitos durante la franja de la tarde, llegando así a su hogar alrededor de las 7:00 pm, ya sea para permanecer en el mismo hasta finalizar el día o para tener un rato de estancia en casa de algún amigo al interior del conjunto residencial, hasta finalizar el monitoreo del día en cuestión.

7.2. Análisis de las concentraciones de PM_{2.5}

Los valores obtenidos para las concentraciones de PM_{2.5} variaron en función del lugar, espacio, tiempo y eventos ocurridos para cada momento específico del monitoreo. En primer lugar se aplicó a la totalidad de los datos de los 66 días del monitoreo la estadística descriptiva mencionada con anterioridad, obteniendo así los parámetros estadísticos del contaminante como se registra en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de los estadísticos para el PM_{2.5}.

Parámetro	Tiempo promedio (hrs:min)	Media	Mín.	P25	P50	P75	P90	Máx.
PM _{2.5} (µg/m ³)	20:02	12.69	0.00	7.13	11.07	16.22	21.82	269.53

Fuente: autor.

En la Tabla 5 se observan los valores de los estadísticos calculados para la totalidad de datos de PM_{2.5} en donde el valor mínimo por minuto fue de 0.0 µg/m³ y el máximo por minuto fue de 269.53 µg/m³, indicando de esta forma un amplio rango en los registros del contaminante. A su vez, se evidencia en los percentiles que el 90% de los valores del parámetro son iguales o menores a 21.82 µg/m³ y, alrededor del 15%

de estos, se encuentran por encima de los $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este orden de ideas, cerca del 25% de los datos monitoreados exceden el límite diario recomendado por la OMS en temas de inmisión para material particulado fino, lo cual daría cabida a la hipótesis, no comprobable en este estudio, de que el estudiante pudo haber estado expuesto a un nivel de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ riesgoso para la salud con base en los criterios de la OMS.

Por otra parte el valor promedio diario de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ fue de $12.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo promedio de monitoreo de 20 horas y dos minutos, el cual no excede el valor de la norma vigente para calidad del aire en Colombia, ni el valor guía de las Directrices Globales de Calidad del Aire (Tabla 6).

Tabla 6. Normativa y exposición obtenida de $\text{PM}_{2.5}$.

Norma / Guía	Valor $\text{PM}_{2.5}$ (en 24 horas)	Monitoreo	Exposición
	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$		(%)
Resolución 2254 de 2017	50	12.69	25.4
OMS 2021	15		84.6

Fuente: MADS, 2017 & OMS, 2021. Adaptado por el autor.

De acuerdo con la Tabla 6 se obtuvo que, en promedio, la exposición diaria al contaminante correspondió al 25.4% del nivel máximo permisible en 24 horas establecido por la normativa vigente, y asimismo comprendió el 84.6% del nivel máximo de exposición sugerido por la OMS, de manera que bajo un vistazo general de la totalidad del monitoreo, la exposición no sugiere un riesgo aparente para el sujeto de estudio.

De manera seguida se segregaron los datos de material particulado en función del día de la semana calculando los valores promedio así como los parámetros estadísticos de percentiles, valores máximos y mínimos con el fin de estudiar el comportamiento semanal del $\text{PM}_{2.5}$ (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros estadísticos del $\text{PM}_{2.5}$ por día de la semana.

$\text{PM}_{2.5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$							
Día de la semana	Media	Mínimo	P25	P50	P75	P90	Máximo
Lunes	10.2	0.00	7.8	10.4	13.8	18.4	132.8
Martes	10.6	0.03	7.5	11.5	16.6	20.7	65.2
Miércoles	10.7	0.97	8.2	13.9	18.7	23.9	88.9
$\text{PM}_{2.5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$							
Día de la semana	Media	Mínimo	P25	P50	P75	P90	Máximo
Jueves	13.8	1.07	9.3	15.1	18.9	21.2	51.4
Viernes	13.2	1.38	10.42	14.3	19.7	24.7	269.5

Sábado	11.8	0.60	9.5	11.1	16.6	26.4	203.3
Domingo	8.3	0.85	6.6	8.4	11.4	16.5	61.1

Fuente: autor.

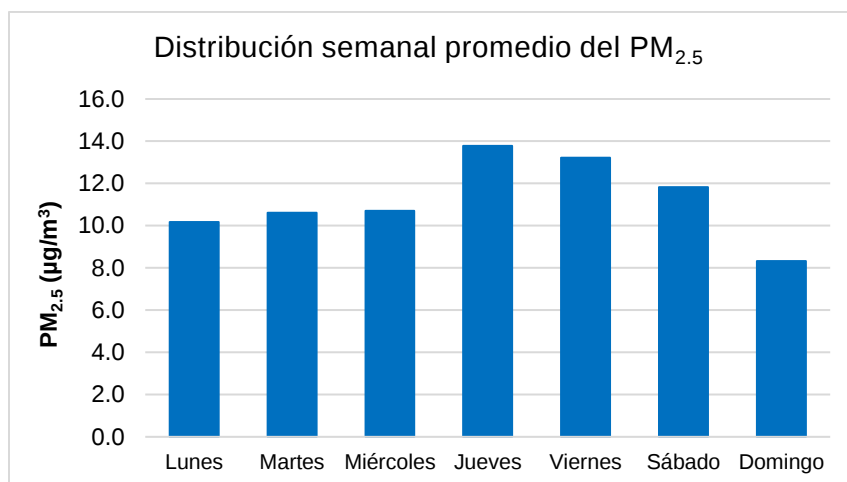
La Tabla 7 muestra cómo en su mayoría los valores mínimos y los percentiles se comportan de manera similar entre sí y en relación al nivel promedio del material particulado para cada uno de los días de la semana, a excepción del día domingo cuyos valores de $PM_{2.5}$ resultan ser, en todos los parámetros estadísticos, los más bajos del registro semanal (Gráfica 1).

Se observa a su vez que los días jueves y viernes resultan ser aquellos cuyos niveles de PM medios son los más altos lo cual se relaciona estrechamente con la actividad del sujeto de estudio que, durante la mayoría de estos dos días, realizaba un alto número de actividades sociales que incluían espacios de alta exposición tales como el uso de transporte público y permanencia en ambientes cerrados.

Por otra parte, se identifican dos valores máximos los días viernes y sábado los cuales, al contrastar con la bitácora, corresponden a dos visitas puntuales a un establecimiento de comidas ubicado en el barrio Villas de Granada.

Si bien los fines de semana no cuentan con restricción de movilidad vehicular en la ciudad de Bogotá, el domingo es el día de la semana con las menores concentraciones del contaminante evidenciando un cambio notorio respecto a los otros días. Este fenómeno puede deberse a dos factores principales: el primero es la baja actividad, ya que popularmente se suele hacer uso de los domingos como día de descanso, y el segundo remite a que los días domingo son empleados recurrentemente para realizar actividades físicas recreativas como ejercicio y deportes al aire libre, generando que gran parte de la población prescinda del uso de vehículos motorizados.

Gráfica 1. Distribución por día de la semana de los niveles promedio de $PM_{2.5}$.



Fuente: autor.

Seguidamente se calcularon las concentraciones promedio totales de PM_{2.5} y el tiempo de ejecución promedio total para cada uno de las 15 actividades, organizándolas de mayor a menor nivel de concentración de PM_{2.5} (Tabla 8).

Tabla 8. Valores promedio de PM_{2.5} y tiempo por actividad.

No.	Actividad	PM _{2.5} (µg/m³)	Tiempo (hrs:min)
1	Restaurantes	23.77	1:22
2	Caminar Cr. 13	18.36	1:39
3	Transmilenio	16.63	1:12
4	Actividad física	16.42	1:46
5	Caminar Marly	16.01	1:57
6	Labores domésticas	14.72	3:31
7	Alistándose en casa	14.58	1:57
8	Caminar barrio	14.02	0:48
9	Caminar Cr. Séptima	12.89	0:36
10	Casa en reposo	12.71	6:12
11	Universidad	12.37	2:04
12	Caminar Cl. 80	11.48	1:55
13	Vehículos	11.10	0:31
14	Otros lugares	11.02	2:29
15	Dormir	10.39	9:24

Fuente: autor.

Una vez se calcularon los valores para cada una de las actividades, se observa que ninguno de estos superó el límite máximo permisible 24 horas de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017 de 37 µg/m³, es decir, que ninguna de las actividades realizadas en el día supera el valor máximo recomendado para 24 horas (Tabla 8).

En relación a las actividades cuyos niveles promedio de $PM_{2.5}$ son los más altos, se identifica primero la visita a restaurantes, registrando un promedio de $23.77 \mu g/m^3$ el cual puede tener su explicación en la alta emisión de material particulado que generan los distintos métodos de cocción de alimentos que, en conjunto con un ambiente cerrado, pueden aumentar fácilmente los niveles de $PM_{2.5}$ en el lugar.

Dentro de las primeras cinco actividades también se encuentran el caminar por la Cr. 13 y por el barrio Marly con concentraciones de $18.36 \mu g/m^3$ y $16.01 \mu g/m^3$ respectivamente, valores que se hayan estrechamente asociados al alto flujo vehicular que presentan estos sectores ubicados en cercanía a la institución educativa, destacando que estos dos eventos hacen parte de las actividades ejecutadas con mayor frecuencia por el sujeto de estudio durante la totalidad del periodo de monitoreo. Lo anterior sugiere de manera preliminar que éste podría experimentar un riesgo aparente por exposición si se contrasta con lo recomendado por la OMS, ya que en un menor tiempo de 24 horas, se cumple y excede el límite de inmisión sugerido de $15 \mu g/m^3$.

Por otra parte, la actividad de movilización en Transmilenio resulta ser uno de los tres espacios con mayores niveles de material particulado registrando una concentración promedio de $16.63 \mu g/m^3$ para un tiempo promedio de uso del servicio de una hora y doce minutos. Esta labor es de importancia ya que también constituye una de las principales actividades efectuadas por el sujeto de estudio durante el periodo de monitoreo. De acuerdo con las observaciones plasmadas en la bitácora de tiempo – actividad, los niveles de material particulado para este escenario se pueden asociar a las emisiones producidas por los buses del sistema de transporte, las cuales ingresan constantemente al interior de los articulados. Al mismo tiempo se establece que en una hora y doce minutos, se recibe el 100% de la concentración diaria de $PM_{2.5}$ recomendada por la OMS.

Lo anterior resulta congruente al contrastarse con la investigación realizada por Fredy Guevara, magíster en ingeniería ambiental de la Universidad Nacional, quien estudió el comportamiento de los contaminantes al interior de los buses de Transmilenio y concluyó que en desplazamientos cercanos a 2 horas y 20 minutos, se respira una dosis de material particulado fino 1.2 veces mayor a la recomendada por la OMS a lo largo de 24 horas, lo que podría ocasionar a los usuarios fuertes afecciones cardiorrespiratorias (Guevara et al., 2020).

A partir de este punto, las diez actividades restantes se encuentran por debajo de los niveles de inmisión establecidos por la normativa colombiana y los recomendados por la OMS para exposiciones de 24 horas; no obstante cabe resaltar que al tratarse de valores promedio de la totalidad del registro de datos, pueden desdibujarse episodios de exposición importantes en donde los valores de material particulado superaron inclusive el límite máximo permisible establecido en la normativa vigente de calidad del aire en Colombia.

De acuerdo con lo anterior, las actividades al interior de la vivienda del sujeto de estudio (labores domésticas, cuidado personal y reposo) lograrían registrar niveles considerables de material particulado que sitúen estos eventos por encima de actividades que intuitivamente podrían ser de alta exposición, tales como el caminar por el vecindario o por avenidas principales como la Cr. Séptima y la Cl. 80, caracterizadas por un constante flujo vehicular.

Finalmente la actividad con menores concentraciones de material particulado corresponde al momento en el que el sujeto de estudio duerme, registrando un promedio de $PM_{2.5}$ de $10.39 \mu g/m^3$, el cual puede obedecer a dos factores principales: en primer lugar a la baja actividad antrópica lo que anula considerablemente la dispersión de partículas de polvo u otros al interior del hogar, y en segundo lugar al bloqueo de ventanas y otros conductos de ventilación durante las horas de sueño impidiendo tanto el movimiento de partículas contenidas en la vivienda, como la entrada de estas provenientes de fuentes exteriores como los vehículos.

Con el objeto de estudiar al detalle el comportamiento de los datos, se distribuyeron mensualmente comprendiendo así tres momentos de monitoreo correspondientes al mes de mayo, junio y julio, los cuales representan respectivamente un periodo netamente estudiantil, un periodo híbrido de estudio y vacaciones y finalmente un periodo totalmente vacacional. Con base en lo mencionado se presentan en la Tabla 9 de mayor a menor, las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$, así como el tiempo promedio de ejecución para cada una de las actividades ejecutados durante el mes de mayo del 2022 correspondiente al periodo estudiantil.

Tabla 9. Valores promedio de $PM_{2.5}$ por actividad en el mes de mayo.

No.	Actividad	$PM_{2.5} (\mu g/m^3)$	Tiempo (hrs:min)
1	Restaurantes	24.74	3:06
2	Caminar Cr. 13	18.45	1:02
3	Otros lugares	17.14	1:35
4	Caminar Marly	15.92	3:14
5	Actividad física	14.52	3:00
6	Transmilenio	14.10	1:24
7	Caminar barrio	13.82	0:53
8	Universidad	12.24	2:25
9	Alistándose en casa	11.53	2:31
10	Caminar Cr. Séptima	11.02	0:45
11	Vehículos	10.83	0:51
12	Casa en reposo	10.43	4:28
13	Caminar Cl. 80	9.68	2:15
14	Dormir	9.60	8:48
15	Labores domésticas	3.57	4:24

Fuente: autor.

Como se puede evidenciar, la visita a restaurantes, el recorrido por la Cr. 13 y el recorrido por el sector de Marly son, al igual que para el promedio general (Tabla 8), tres de las actividades que registran los mayores niveles de material particulado con valores promedio de $PM_{2.5}$ de $24.74 \mu g/m^3$, $18.45 \mu g/m^3$ y $15.92 \mu g/m^3$ respectivamente. Esto resulta congruente con los niveles de inmisión registrados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) para las estaciones MinAmbiente y Móvil 7ma, las cuales comprenden el sector en cercanía a la Universidad Santo Tomás y cuyos valores promedio de $PM_{2.5}$ registrados se encuentran entre los $19.19 \mu g/m^3$ y $27.58 \mu g/m^3$. Estos valores pueden atribuirse tanto a la resuspensión de partículas en las vías como a la actividad de fuentes móviles en el sector, particularmente automóviles y buses, siendo estos factores los mayores contribuyentes a la generación de $PM_{2.5}$ en la localidad de Chapinero según el Inventario de Emisiones de Bogotá (Secretaría de Ambiente, 2020).

Seguido a estos se encuentra la visita a otros lugares con $17.14 \mu g/m^3$ en el cual, al contrastar con las observaciones de la bitácora, se evidencian actividades de exposición puntuales, tales como visitas a museos ubicados en el Centro de Bogotá que, por la actividad económica del lugar, presenta alto flujo vehicular por la gran densidad de vehículos que se movilizan hacia las localidades de Santa Fe y Candelaria como se corrobora en el mapa de estados del tráfico de la Secretaría de Movilidad.

A partir de la actividad No. 5, los niveles promedio de $PM_{2.5}$ disminuyen, identificando así la predominancia de actividades tales como el uso de Transmilenio y la caminata por en el barrio, en donde las concentraciones de $PM_{2.5}$ son superiores con respecto a la mayoría de las otras. Cabe destacar que la permanencia en la universidad toma mayor relevancia para este mes, tanto en tiempo como en las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas.

Basándose en el tiempo promedio por actividad, las actividades desarrolladas al interior de la vivienda son las de mayor frecuencia para este mes, de manera que si se estudian los niveles de $PM_{2.5}$ registrados en estos, se infiere que no existió un riesgo aparente asociado a la exposición por inmisión de $PM_{2.5}$ para el periodo en cuestión.

Finalmente se observa que las actividades relacionadas a labores domésticas presentaron los niveles más bajos de $PM_{2.5}$ debido a que, como se registró en la bitácora, durante el mes de mayo se realizaron labores domésticas en una única ocasión, la cual fue descrita como actividad leve y con bajas concentraciones de $PM_{2.5}$, debido a una favorable ventilación en la vivienda. Adicionalmente se observa cómo la actividad de dormir continúa evidenciando niveles de $PM_{2.5}$ bastante bajos respecto a los demás escenarios.

Para el mes de junio de 2022 (Tabla 10), que corresponde al periodo híbrido estudiantil – vacacional, la actividad con niveles de PM_{2.5} más altos corresponde a caminar por la Cl. 80 con un valor de 24.92 µg/m³ para un tiempo de dos horas con cuarenta y un minutos, el cual resulta ser un evento único que comprendió, durante el tiempo de ejecución, una caminata de 2 Km a lo largo de la Cl. 80 desde la vivienda del sujeto de estudio hasta el centro comercial Portal 80 y una permanencia de una hora y treinta minutos en el sector del mismo. Debido a que se trata de una actividad de una sola ejecución en un tiempo del 10% de la duración del día, la exposición no resulta en un riesgo aparente para el sujeto de estudio basándose en límite máximo permisible por la R. 2254 de 2017; no obstante, si se toma de referente lo sugerido por la OMS, existiría un riesgo significativo ya que se supera considerablemente el valor límite de inmisión lo que sugiere una importante exposición en función de la corta distancia entre el sensor y la vía de exposición.

Tabla 10. Valores promedio de PM_{2.5} por actividad en el mes de junio.

No.	Actividad	PM_{2.5} (µg/m³)	Tiempo (hrs:min)
1	Caminar Cl. 80	24.92	2:41
2	Restaurantes	24.67	1:35
3	Labores domésticas	20.52	3:18
4	Actividad física	20.41	1:25
5	Caminar Cr. 13	18.34	1:39
6	Transmilenio	18.10	1:14
7	Caminar barrio	16.80	1:10
8	Alistándose en casa	16.74	1:27
9	Caminar Marly	15.62	1:02
10	Casa en reposo	15.36	3:35
11	Universidad	12.05	1:34
12	Dormir	11.54	9:22
13	Vehículos	11.34	0:35
14	Otros lugares	11.30	2:34
15	Caminar Cr. Séptima	8.61	0:29

Fuente: autor.

A su vez se observa que la permanencia en restaurantes, realización de actividad física y caminatas por la Cr. 13 continúan siendo unos de los principales espacios de riesgo por las concentraciones de PM_{2.5} que se presentan. Para este mes de junio, es importante resaltar, que diez de las 15 actividades registraron valores promedio por encima del nivel de inmisión recomendado por la OMS.

En el caso particular de los restaurantes para este mes, el sujeto de estudio visitó en dos ocasiones un establecimiento de alimentos fritos, el cual registró concentraciones por encima de los 200 µg/m³ para una permanencia poco mayor a 15 minutos al interior del local. Al contrastar con los valores de TLV para PM_{2.5} en

periodos de exposición de corta duración, se encontró que en Rusia se emplea un TLV STEL de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición menor o igual a 20 minutos, lo que podría sugerir, basándose en este criterio, que existe un alto riesgo a la salud por exposición a material particulado fino al interior del local tanto para los empleados que normalmente trabajan en el establecimiento durante jornadas superiores a las 8 horas, como para los clientes que frecuentan el lugar con duraciones superiores a los 15 minutos (Fedor & Borovlev, 2019).

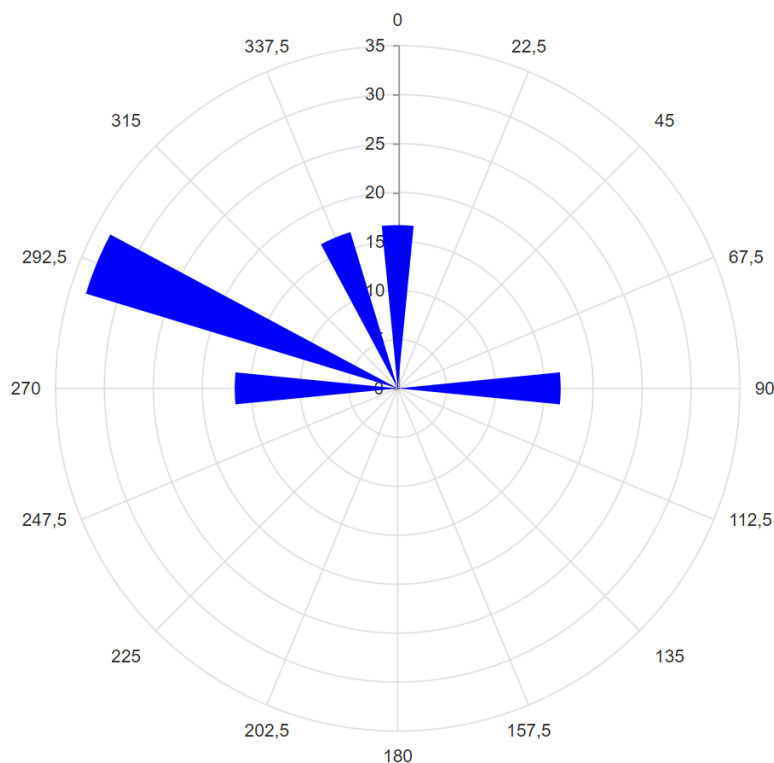
Dentro de las diez actividades mencionadas, cinco se desarrollan al interior o en cercanía a la vivienda del sujeto de estudio y tres se ubican en el sector en donde se localiza la Universidad Santo Tomás, sugiriendo que la mayor parte del tiempo del monitoreo el estudiante se encontró en espacios cuyos niveles de inmisión de $\text{PM}_{2.5}$ superaban constantemente los recomendados por la OMS.

Por otra parte, las observaciones efectuadas en la bitácora de tiempo – actividad para este mes establecen que a lo largo del mismo las distintas actividades presentaron niveles de $\text{PM}_{2.5}$ atípicamente superiores con respecto al mes de mayo, lo cual no solo se ve reflejado en el aumento del promedio de las concentraciones en la mayoría de las actividades realizadas de manera diurna, sino también en escenarios nocturnos de reposo en el hogar y durante las horas de sueño.

En cuanto a caminar por la Cr. Séptima, la cual registró los niveles más bajos, se explica que el valor de $\text{PM}_{2.5}$ encontrado correspondió a un único evento, cuya duración fue de apenas 29 minutos ocurrido a la altura de la Cl. 57 alrededor de las 14:00 horas un día lunes con bajo flujo vehicular y fuertes corrientes de viento las cuales se vieron favorecidas por un tiempo seco y soleado que, por acción de la temperatura, facilita el movimiento de las masas de aire apoyando así la dispersión de contaminantes.

Lo anterior se puede corroborar a partir de la Figura 2, correspondiente a la rosa de vientos generada para el mes de junio del 2020 por la estación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) Estación Móvil 7ma, la cual se ubica en la Cr. 7ma con Cl. 60, localidad de Chapinero, y abarca la zona correspondiente al evento en mención.

Figura 2. Rosa de vientos Estación Móvil 7ma.



Fuente: RMCAB, 2020.

En la Figura 2 se presenta la dirección de los vientos junto con la velocidad de los mismos en m/s. Como se puede observar, los vectores de viento manifiestan velocidades superiores a los 15 m/s, destacando al vector procedente de la dirección oeste – noroeste como aquel cuya velocidad es la máxima con 33.33 m/s seguido del vector oeste con 16.67 m/s, los cuales resultan ser vientos con una fuerza de barrido considerable que durante este periodo desplazaron las masas de aire hacia el este y sureste de la ciudad favoreciendo la dispersión del material particulado, lo que podría explicar los bajos niveles de PM_{2.5} registrados en la Cr. 7ma para este mes.

Finalmente durante el mes de julio de 2022, el cual corresponde al periodo vacacional del sujeto de estudio (Tabla 11), se observa un menor número de actividades debido al bajo nivel de actividad que realizó el estudiante. Continuando con la tendencia de los otros dos meses monitoreados, en este mes predominaron la visita a restaurantes y el uso del sistema de transporte de Transmilenio dentro del grupo de actividades con las mayores concentraciones de PM_{2.5} obteniendo valores de 16.51 µg/m³ y 16.57 µg/m³ respectivamente.

Si bien es notorio que las actividades de mayor y menor nivel de concentración fueron caminar por Marly con 18.69 µg/m³ y caminar por la Cl. 80 con 1.62 µg/m³, estos ocurrieron como episodios aislados de corta duración, los cuales pudieron registrar dichos valores en función de eventos puntuales y fortuitos siendo poco representativos en el tiempo.

Adicional a esto, se puede resaltar la presencia de un número reducido de actividades cuyo valor promedio de PM_{2.5} superó los 15 µg/m³ sugeridos por la OMS, siendo únicamente tres. Se destaca que el 46% de las actividades registraron concentraciones por debajo de los 10 µg/m³. Lo anterior sitúa a los 21 días monitoreados del mes de julio como el periodo de menor exposición y, por ende, de riesgo por inmisión para el sujeto de estudio.

Tabla 11. Valores promedio de PM_{2.5} por actividad en el mes de julio.

No.	Actividad	PM _{2.5} (µg/m ³)	Tiempo (hrs:min)
1	Caminar Marly	18.69	0:19
2	Transmilenio	16.75	0:52
3	Restaurantes	16.51	1:29
4	Alistándose en casa	14.54	2:13
5	Casa en reposo	11.31	5:24
6	Caminar barrio	10.57	0:20
7	Actividad física	10.33	0:33
8	Labores domésticas	9.93	3:05
9	Vehículos	9.51	0:17
10	Universidad	9.06	2:40
11	Dormir	9.05	9:16
12	Otros lugares	8.98	3:29
13	Caminar Cl. 80	1.62	0:30

Fuente: autor.

7.3. Análisis de los valores de frecuencia cardíaca

Al igual que ocurrió con las concentraciones de PM_{2.5}, los valores de la frecuencia cardíaca variaron según el espacio y la actividad desarrollada por el sujeto de estudio (Tabla 12). Se encontró que el valor promedio de la FC para el total del monitoreo fue de 74 bpm, lo cual se encuentra en el rango de normalidad para hombres adultos entre los 18 y los 25 años de edad (Lima, 2022). Adicionalmente se cuenta con un coeficiente de variación de 35.64% comprendido entre los límites máximo y mínimo de 185 bpm y 33 bpm, lo que resulta congruente con el estilo de vida de un estudiante universitario activo promedio (Lozada et al., 2020).

Tabla 12. Valores de los estadísticos para la FC.

Parámetro	Media	Coef. Var.	Mínimo	P25	P50	P75	P90	Máximo
FC (bpm)	74	35.64%	33	52	64	96	116	185

Fuente: autor.

En la Tabla 12 se logra visualizar que la distribución de percentiles indica que el 75% de los datos de FC medidos son iguales o menores a 96 bpm, lo cual denota un comportamiento cardíaco habitual en adultos jóvenes hallando a su vez la

mediana de los datos en 64 bpm, propio de una persona con las características del sujeto de estudio.

Por otra parte, se organizó la base de datos de los valores de la frecuencia cardíaca por día de la semana, calculando para cada uno de estos los parámetros estadísticos. Se encontró que los valores estadísticos de la FC se comportan de manera estrechamente similar en cada parámetro, denotando que la totalidad de los valores se encuentra dentro del rango habitual para hombres entre los 18 y los 25 años de edad (Tabla 13).

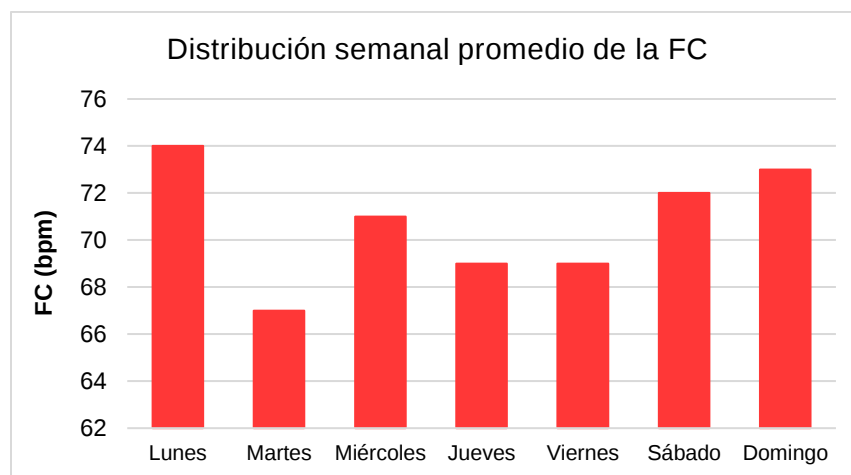
Tabla 13. Parámetros estadísticos de la FC por día de la semana.

FC (bpm)							
Día de la semana	Media	Mínimo	P25	P50	P75	P90	Máximo
Lunes	74	34	89	97	106	114	159
Martes	67	33	61	82	92	107	168
Miércoles	71	33	60	90	107	115	185
Jueves	69	36	60	83	100	109	167
Viernes	69	35	75	88	103	114	169
Sábado	72	36	66	87	98	108	157
Domingo	73	37	74	92	104	110	153

Fuente: autor.

Si bien no se observa una diferencia extremadamente marcada en el comportamiento de los días, se halla que la tendencia de los valores más altos se ubica en los días lunes y domingo (Gráfica 2), días que conforme a la bitácora de tiempo – actividad corresponden a momentos de alta actividad por parte del sujeto de estudio, realizando en estos un gran número de labores que comprenden cierto grado de actividad física.

Gráfica 2. Distribución por día de la semana de los valores promedio de FC.



Fuente: autor.

Como se puede apreciar en la Gráfica 2 y al igual que se mencionó, los días lunes y domingo resultan ser aquellos cuyos valores de FC son los más altos sin generar una brecha marcada respecto al desarrollo de la semana. Asimismo se resalta que el promedio de la frecuencia cardíaca los días martes es el menor para la semana, siendo congruente con la bitácora, dado que este es uno de los días de menor actividad física realizada por el sujeto de estudio.

Posteriormente, se calcularon los valores promedios de la frecuencia cardíaca en cada una de las 15 actividades, organizándolos de mayor a menor valor por actividad. Se estableció que las FC más altas corresponden a la actividad física en donde el sujeto de estudio registró el mayor número de latidos por minuto con 117 bpm, seguido de las actividades de a caminar en espacios tales como la Cr. 13, el barrio Marly, la Cl. 80 y la Cr. Séptima (Tabla 14).

Tabla 14. Valores promedio de FC por actividad.

No.	Actividad	FC (bpm)
1	Actividad física	117
2	Caminar Cr. 13	110
3	Caminar Marly	109
4	Caminar Cl. 80	109
5	Caminar Cr. Séptima	107
6	Transmilenio	107
7	Caminar barrio	102
8	Vehículos	102
9	Universidad	100
10	Alistándose en casa	100
11	Otros lugares	98
No.	Actividad	FC (bpm)
12	Restaurantes	94

13	Labores domésticas	85
14	Casa en reposo	85
15	Dormir	54

Fuente: autor.

Se observa de manera atípica un valor promedio de 107 bpm en la actividad de transporte público, lo cual iría en contrariedad con el estado de reposo que adquiere el estudiante al interior de los buses de Transmilenio. En este sentido, la razón del evento podría estar asociado al uso del transporte en las horas pico, lo cual se traduce en el aumento del flujo de usuarios al interior del sistema, dificultando el espacio y el acceso a los buses, generando eventualidades que podrían detonar un aumento en el ritmo cardíaco.

En cuanto a los ritmos cardíacos más bajos se desarrollan en actividades al interior de la vivienda del sujeto de estudio, tales como el estar en reposo, realizar labores domésticas y dormir, asociándose todas a labores de bajo rendimiento físico.

Una vez establecidos los valores promedio totales, se procedió a organizar el registro de datos de manera mensual. Durante el mes de mayo (Tabla 15), se encontró de manera congruente con el promedio total, que la actividad física es la que mayor frecuencia cardíaca manifiesta con 125 bpm, seguido a su vez de los eventos de recorrido a pie en las carreras Séptima y 13 y en la Cl. 80, lo cual muestra un comportamiento similar al visto en la Tabla 14.

Tabla 15. Valores promedio de FC por actividad en el mes de mayo.

No.	Actividad	FC (bpm)
1	Actividad física	125
2	Caminar Cr. Séptima	118
3	Caminar Cr. 13	115
4	Caminar Cl. 80	114
5	Restaurantes	114
6	Caminar Marly	110
7	Caminar barrio	108
8	Transmilenio	108
9	Alistándose en casa	103
10	Otros lugares	102
11	Vehículos	98
12	Labores domésticas	97
13	Universidad	95
14	Casa en reposo	85
15	Dormir	53

Fuente: autor.

Para esta ocasión, la permanencia en restaurantes registró un valor alto en la FC siendo este de 114 bpm, el cual, al constatar en la bitácora de tiempo – actividad,

se explica a medida que la mayoría de los eventos se realizaron en compañía de amistades en una atmósfera de recreación social al interior de establecimientos de comidas que servían a su vez como locales de ocio, dentro de los cuales hubo exposición al humo de tabaco tanto al interior como al exterior de los recintos.

Seguido de este, las actividades siguientes son congruentes con el valor de la FC en relación con la actividad ejecutada, hallándose entre los 95 y los 108 bpm para acciones tales como caminar, alistarse en casa, socializar, entre otros. Es de destacar que nuevamente el uso del transporte público vuelve a aparecer con un ritmo cardíaco superior a varias otras ocupaciones.

Finalmente y como se evidenció en el promedio general, para el mes de mayo las dos actividades con menor ritmo cardíaco fueron el estar en casa en reposo y el dormir teniendo sentido desde el punto de vista práctico de las labores.

Continuando con el análisis mensual, en el mes de junio, correspondiente al periodo híbrido estudiantil – vacacional, la actividad física, continúa siendo el escenario con mayor valor promedio de FC con 114 bpm, menor en contraste con el mes de mayo. De igual manera, caminar Cr. 13 y caminar Marly hacen nuevamente parte de los espacios en los que el estudiante manifestó un alto ritmo cardíaco, indicando que los estímulos de convivencia social pueden influir en cierto grado en el aumento de la FC debido a que el sujeto se encontró permanentemente en compañía durante la totalidad de los eventos asociados a estas actividades (Tabla 16).

Tabla 16. Valores promedio de FC por actividad en el mes de junio.

No.	Actividad	FC (bpm)
1	Actividad física	114
2	Caminar Cr. 13	108
3	Caminar Marly	107
4	Otros lugares	107
5	Transmilenio	106
6	Universidad	104
7	Vehículos	103
8	Caminar barrio	100
9	Alistándose en casa	99
10	Caminar Cl. 80	98
11	Caminar Cr. Séptima	91
12	Restaurantes	90
13	Casa en reposo	85
14	Labores domésticas	84
15	Dormir	52

Fuente: autor.

Por otra parte, la visita a otros lugares se sitúa como la cuarta actividad en valor del ritmo cardíaco y se relaciona, en su mayoría, a recorridos por centros comerciales

y permanencia en el interior de otros hogares, llevando a cabo así acciones de convivencia y ocio que serían responsables del aumento en la frecuencia cardíaca. De igual forma, el uso del transporte público experimenta de nuevo un alto valor de FC haciendo parte de las cinco actividades más destacadas.

Para este mes en particular, la poca realización de actividades como el caminar por la Cl. 80 o por la Cr. Séptima sitúan a estos dos espacios, anteriormente destacados, por debajo de los 100 bpm con observaciones en la bitácora relativas a caminatas lentas y puntuales en dichos sectores.

De igual forma, y como es tendencia, los escenarios en los que el estudiante registró la menor frecuencia cardíaca se desarrollan en la vivienda de éste, apreciando que las actividades que realizó durante las labores domésticas no distanciaron mucho en esfuerzo de cualquier otra actividad realizada en reposo.

Por último en el mes de julio, correspondiente al periodo vacacional, las actividades más destacadas en valores del ritmo cardíaco son las relacionadas con acondicionamiento físico, caminar por sectores de alta concurrencia vehicular y el uso del sistema de transporte Transmilenio. A su vez a estas se le suma la permanencia al interior de la universidad del sujeto de estudio, el cual fue un episodio puntual marcado por un momento de ansiedad y alta expectativa en torno a una situación específica ocurrida para ese día en cuestión (Tabla 17).

Tabla 17. Valores promedio de FC por actividad en el mes de julio.

No.	Actividad	FC (bpm)
1	Actividad física	116
2	Caminar Marly	113
3	Caminar Cl. 80	107
4	Universidad	107
5	Transmilenio	106
6	Vehículos	104
7	Restaurantes	100
8	Alistándose en casa	97
9	Caminar barrio	94
10	Otros lugares	93
11	Casa en reposo	90
12	Labores domésticas	87
13	Dormir	59

Fuente: autor.

Seguidamente, las actividades tienen congruencia con el ritmo cardíaco que registran y las actividades desarrolladas en cada una de estas. Se observa que en general, los valores de la frecuencia cardíaca se hallan en su mayoría por encima

de los 90 bpm, lo que indicaría de manera preliminar una rutina compuesta por un rendimiento físico considerablemente alto, no obstante al tratarse de un universitario joven menor de 25 años, los registros resultan hallarse dentro de la normalidad.

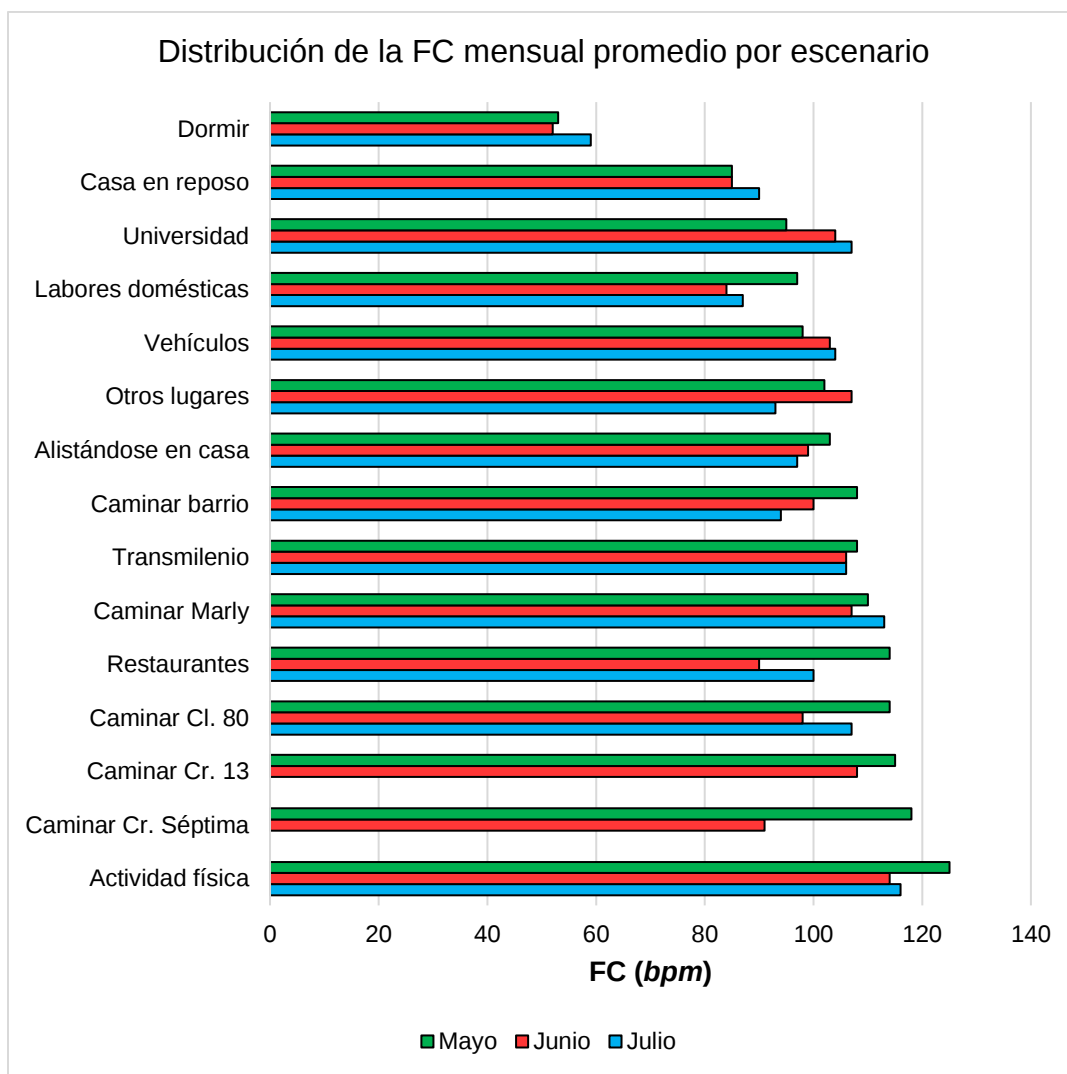
Además de ello, hay que tener en cuenta que existen espacios que manifiestan mayores o menores ritmos cardíacos según su naturaleza, los cuales al ser promediados pueden aumentar o disminuir el valor que se presenta en cada una de las tablas.

Para finalizar, en el mes de julio se comparte la tendencia vista en los otros dos meses monitoreados en torno a los escenarios de reposo en casa, labores domésticas y dormir, de manera que estos registran los menores niveles de ritmo cardíaco, encontrándose todos estos al interior de la vivienda del estudiante.

Al realizar una comparación del comportamiento mensual de cada una de las actividades (Gráfica 3), se evidencia que las actividades asociadas a los menores valores de frecuencia cardíaca se realizan al interior de espacios tales como la vivienda del estudiante y la institución educativa, lo que adquiere sentido en función del bajo desempeño físico que se realizó durante la permanencia en estos.

De igual manera se resalta la tendencia mencionada con anterioridad en cuanto a que los mayores valores de la FC para la totalidad del monitoreo se registraron durante las actividades de actividades físicas, lo cual es congruente con el nivel de acondicionamiento físico que se realiza durante las mismas.

Gráfica 3. Frecuencia cardíaca promedio mensual por escenario.



Fuente: autor.

Por otra parte, se puede observar que en general, los valores obtenidos para el mes de mayo sobrepasan a los registrados en los otros dos meses para nueve de las 15 actividades planteadas. Esto se sustenta en que al ser el mes correspondiente al periodo netamente estudiantil, la rutina del sujeto de estudio se ampliaba adquiriendo nuevos hábitos y ejecutando acciones de mayor actividad, ya que durante la época vacacional su desempeño físico se reducía al hallarse la mayor parte del tiempo al interior de su hogar.

7.4. Análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

La variabilidad de la frecuencia cardíaca se calculó a partir del cociente de la media geométrica y la desviación estándar de los datos de frecuencia cardíaca, obteniendo así el llamado coeficiente de variación que explica, en porcentaje, qué tanto cambiaron los valores de a FC durante un periodo de tiempo determinado. De

acuerdo con lo anterior, se calculó la VFC total para cada uno de los días de la semana (Tabla 18). Se encontraron valores entre el 33.6% y el 37.76%, donde el día cuya variabilidad promedio total es mayor corresponde al jueves, seguido de los días miércoles y lunes. Asimismo, los días cuya variabilidad fue la menor son el domingo y sábado con 33.6% y 34.36% respectivamente.

Tabla 18. Valores promedio de la VFC por día de la semana.

Día de la semana	VFC (%)
Lunes	36.74
Martes	35.29
Miércoles	37.73
Jueves	37.76
Viernes	36.65
Sábado	34.36
Domingo	33.60

Fuente: autor.

Debido a que el comportamiento descrito en la Tabla 18 es demasiado general y comprende la totalidad de los datos, es poco representativo para la conducta interna de cada uno de los días, es por esto que se determinó la variabilidad del ritmo cardíaco que presentó el sujeto de estudio para cada una de las actividades, organizándolas de mayor a menor porcentaje de VFC (Tabla 19).

Tabla 19. Valores promedio totales de la VFC por actividad.

No.	Actividad	VFC (%)	Tiempo (hrs:min)
1	Labores domésticas	25.15	3:31
2	Casa en reposo	23.50	6:12
3	Alistándose en casa	23.02	1:57
4	Vehículos	19.63	0:31
5	Otros lugares	19.30	2:29
6	Restaurantes	18.81	1:22
7	Caminar barrio	16.97	0:48
8	Universidad	16.95	2:04
9	Transmilenio	15.14	1:12
10	Caminar Marly	14.94	1:57
11	Actividad física	14.75	1:46
12	Caminar Cl. 80	13.92	1:55
13	Dormir	13.16	9:24
14	Caminar Cr. 13	13.15	1:39
15	Caminar Séptima	9.28	0:36

Fuente: autor.

Se encontró que los valores de la VFC por actividad distan en gran magnitud respecto a los evidenciados para la totalidad de cada uno de los días como se apreció en la Tabla 18, señalando que el ritmo cardíaco varía en las distintas horas del día, según la actividad desarrollada. Debido a que la variación de la frecuencia cardíaca nace a partir de un grupo de datos de interés seleccionados, según la actividad a la cual responden, esta depende en gran medida de la variable tiempo, de manera que los valores obtenidos deben ser contrastados con la extensión del periodo en el que se registran.

Según se encuentra en la literatura, la variabilidad de la frecuencia cardíaca se relaciona con la respuesta del sistema simpático y parasimpático, de manera que cuando el sujeto se encuentra en estado de reposo, se presenta una influencia parasimpática que desemboca en una distensibilidad aórtica apropiada que reduce la resistencia vascular (Veloza et al., 2019). Dicho de otra manera, la actividad del sistema nervioso autónomo reduce la tensión sobre la función cardíaca y permite que el actuar de esta se ejecute sin mayor inconveniente, elevando de esta manera la variabilidad de la frecuencia cardíaca en función de una mecánica adecuada en el sistema cardiovascular.

A primera vista, se puede evidenciar cómo el comportamiento de la VFC del sujeto de estudio va acorde con la conducta planteada en la literatura, la cual resalta que la variabilidad del ritmo cardíaco aumenta en estados de reposo y calma como ocurre en el hogar y en espacios amenos para el estudiante, mientras que disminuye en momentos de estrés como en el transporte público o durante actividades con cierto grado de exigencia física (Sarasa, 2020).

El análisis muestra que los primeros tres escenarios con mayor VFC se desempeñan al interior de la vivienda del sujeto de estudio y se desarrollan en lapsos de tiempo promedio de dos a seis horas, siendo estos relativos a labores domésticas, permanecer en casa en reposo y alistándose para salir, encontrándose todos por encima del 23% de variación, lo que sugiere una actividad cardíaca favorable concerniente a altibajos notablemente marcados. De igual forma se aprecia que estos eventos no se asocian a una actividad física exigente lo que resulta congruente con lo registrado en la literatura.

Seguido de estos se encuentran actividades tales como permanencia en vehículos con una VFC del 19.63%, la cual se realizó en nueve ocasiones puntuales en las que el estudiante permaneció como pasajero; luego la asistencia a otros lugares con 19.3% representado en su mayoría por labores de socialización, y finalmente la visita a restaurantes con 18.81% realizando actividades en reposo y leve esfuerzo físico. Lo anterior evidencia nuevamente que la VFC aumenta de manera favorable durante los estados de reposo, reduciendo riesgos de carácter cardiovascular, por tanto se denota un comportamiento normal y adecuado en la función cardíaca del estudiante universitario.

A partir de este punto, las demás actividades presentan una variabilidad un tanto reducida pero aún apreciable en contraste con las primeras seis exhibiendo valores por debajo del 17% de VFC. En estos, se encuentran espacios tanto de calma y poca actividad tales como estancia en la universidad y permanencia en el sistema de transporte Transmilenio, así como de actividad física moderada y alta correspondiente a caminatas y acondicionamiento físico deportivo.

Lo primero que se puede evidenciar en los escenarios remanentes es que actividades como caminar por el barrio y permanencia en la universidad registran una variabilidad similar cercana al 16.90%, y se alejan de los espacios de uso del transporte público, caminatas por distintos sectores y realización de actividad física. Esta última podría explicarse a medida que, al llevar a cabo deportes y ejercicios físicos, el cuerpo entra en un estado de exigencia en el que aumenta su frecuencia cardíaca para responder de manera adecuada a los estímulos generados, manteniendo dicha frecuencia en un nivel alto de manera constante durante la duración del ejercicio sin presentar cambios que perjudiquen la ejecución del mismo, traduciéndose en una variabilidad relativamente más estrecha de lo habitual.

Conforme a estudios realizados en deportistas, estos experimentan una alta variabilidad en su ritmo cardíaco al realizar actividad física, lo cual es resultado de un proceso adaptativo generado a partir de una serie de hábitos de entrenamiento que acondicionan los distintos sistemas del cuerpo que influyen en la función cardíaca (Torres, 2021). Sin embargo, esto no ocurre de manera similar en sujetos corrientes que en su mayoría no adaptan ni habilitan su cuerpo a tales niveles de exigencia deportiva, de manera que la VFC de estos se reduce considerablemente durante la ejecución de deportes y otras actividades que requieren cierto esfuerzo físico tal y como es el caso del sujeto de estudio, el cual no practica de manera profesional ni sistemática ningún deporte en particular (Polar, 2021).

En ese orden de ideas, lo anteriormente mencionado puede aplicar también para los escenarios de caminata en los cuales el sujeto de estudio realiza cierto grado de actividad física requiriendo una respuesta estable y constante en su actividad cardíaca, no obstante la VFC para este conjunto de espacios resulta tan baja que se parece a lo registrado para el momento en el que el estudiante duerme, siendo esta la que menor requerimiento físico podría experimentar.

Finalmente el caminar por la Cr. Séptima resulta ser la actividad con la menor variabilidad de ritmo cardíaco siendo de apenas 9.28%, destacando que este es el segundo espacio con menor duración siendo de tan solo 36 minutos en promedio.

Al igual que lo realizado para las concentraciones de PM_{2.5} y los valores de la FC, se segmentaron los valores promedios de la VFC de cada escenario en los tres meses monitoreados, presentando así en la Tabla 20 los valores promedio de la variabilidad del ritmo cardíaco para cada actividad realizada en el mes de mayo.

Tabla 20. Valores promedio de la VFC por actividad en el mes de mayo.

No.	Actividad	VFC (%)	Tiempo (hrs:min)
1	Vehículos	31.82	0:51
2	Labores domésticas	25.52	4:24
3	Casa en reposo	24.24	4:28
4	Universidad	23.19	2:25
5	Alistándose en casa	20.98	2:31
6	Transmilenio	16.89	1:24
7	Caminar barrio	14.92	0:53
8	Otros lugares	14.68	1:35
9	Caminar Marly	13.88	3:14
10	Dormir	12.95	8:48
11	Actividad física	12.67	3:00
12	Caminar Cl. 80	11.53	2:15
13	Caminar Cr. 13	10.16	1:02
14	Restaurantes	9.90	3:06
15	Caminar Cr. Séptima	9.40	0:45

Fuente: autor.

Se observa que el rango de valores de la VFC se amplía abarcando porcentajes en el rango del 9% al 32%. Se encuentra que la permanencia en vehículos reporta el valor más elevado con 31.82% de VFC, siendo cercano al descrito en la Tabla 18 que corresponde a los promedios totales diarios de la VFC, expresando un comportamiento cambiante de la frecuencia cardíaca; no obstante, cabe aclarar que la realización de esta actividad fue de una única ocasión lo cual puede favorecer el alto valor de variabilidad debido a que el dato no se encuentra promediado con ningún otro.

Seguidamente se encuentran eventos de baja actividad física y larga duración ejercidos en el entorno de la vivienda del estudiante alusivos a labores domésticas, permanencia en reposo y alistarse en casa con una VFC de 25.52%, 24.24% y 20.98% respectivamente, estableciendo un cambio relevante en los valores de la FC. Aquí se ubican también los espacios de permanencia en las instalaciones de la universidad con una variabilidad promedio del 23.19%, la cual se acompaña de un bajo rendimiento físico experimentado en tiempos superiores a dos horas, siendo así un espacio de marcadas variaciones en la FC.

Posterior a esto se hace evidente una reducción importante en la variabilidad de los demás escenarios de los cuales tan solo el uso de transporte público dista lo suficiente de actividades tales como el dormir. Si bien durante esta actividad la exigencia física es poca, se observa una reducción importante en la VFC la cual puede explicarse a partir del estrés metabólico que genera la exposición a los altos niveles de PM_{2.5} al interior de los articulados, lo que produce estímulos desfavorables en el SNA y por ende reduce la variabilidad del ritmo cardíaco (Polar, 2021).

Por su parte, las caminatas por los distintos sectores, así como la actividad física, vuelven a registrar valores bajos e inclusive menores al del promedio total, expresando a su vez VFCs menores a la actividad de dormir, lo que sugiere que la respuesta del sistema cardiovascular resulta más estática, que cuando el sujeto de estudio se encuentra totalmente en calma.

Adicionalmente aparece dentro de las menores variabilidades el escenario de estadía en restaurantes con una VFC de 9.90%, lo cual es atípicamente bajo para un tiempo de tres horas y seis minutos, recalcando por supuesto que esta actividad es de una única ocurrencia.

Para el mes de junio, periodo estudiantil – vacacional, nuevamente los mayores valores de variabilidad se presentan en actividades dentro de la vivienda del sujeto de estudio, registrando los tiempos más altos de estancia durante el monitoreo, mostrando porcentajes por encima del 23%, identificando una vez más que al interior de su hogar, el estudiante experimenta una alta desviación estándar de los valores de su ritmo cardíaco, lo que se interpreta como una alta actividad cardiovascular, aun cuando el desempeño físico realizado es poco (Tabla 21).

Tabla 21. Valores promedio de la VFC por actividad en el mes de junio.

No.	Actividad	VFC (%)	Tiempo (hrs:min)
1	Labores domésticas	26.20	3:18
2	Casa en reposo	24.00	3:35
3	Alistándose en casa	23.24	1:27
4	Restaurantes	20.58	1:35
5	Caminar Cl. 80	20.27	2:41
6	Actividad física	18.10	1:25
7	Otros lugares	17.98	2:34
8	Caminar barrio	17.51	1:10
9	Caminar Marly	17.06	1:02
10	Vehículos	16.70	0:35
11	Transmilenio	14.28	1:14
12	Universidad	13.92	1:34
13	Caminar Cr. 13	13.90	1:39
14	Dormir	13.76	9:22
15	Caminar Cr. Séptima	11.24	0:29

Fuente: autor.

Se evidencia de igual forma que la permanencia en restaurantes adquirió una relevancia en el valor de la VFC, aumentando respecto al mes anterior, registrando una variabilidad de 20.58%, que puede relacionarse a una baja actividad física desempeñada al interior de los espacios frecuentados.

Para este mes, los resultados de las variabilidades de la frecuencia cardíaca son ligeramente superiores en la mayoría de escenarios, encontrando diez de ellos por encima del 16.50% de variabilidad. Con base en estudios realizados, este aumento en la actividad de la variabilidad de la frecuencia cardíaca es considerado como un factor de protección frente a enfermedades de carácter cardiovascular, indicando así que la función cardíaca del estudiante para el mes de junio presentó, en su mayoría, un comportamiento favorable para la mitigación de accidentes cerebrovasculares, eventos coronarios, entre otros (Veloza et al., 2019).

En contraste con lo visto hasta este punto y lo mencionado por la literatura, durante el mes de junio la actividad física registró una variabilidad del ritmo cardíaco medianamente alta por encima del 18%, esto se debe a que durante este mes la actividad realizada no correspondió a eventos de acondicionamiento deportivo, sino otros actos de exigencia física que se realizaron en espacios cerrados, por tanto no se manifiesta un estrés físico elevado.

También se resalta que el caminar por la Cr. Séptima y Cr. 13, así como el uso del sistema de transporte Transmilenio se encuentran en el grupo de escenarios con menores valores de variabilidad, estando inclusive por debajo del 14.30% y hallándose al nivel de actividades como el dormir. Lo anterior sugiere que durante estos momentos la función cardíaca del sujeto de estudio puede no ser la más óptima en contraste con las demás actividades, lo que podría brindar un riesgo aparente a desarrollar dolencias o padecimientos de índole cardiovascular en función de un aumento en la frecuencia de ejecución de estos espacios.

Finalmente, durante el mes vacacional de julio, se observó nuevamente que dentro del conjunto de actividades con los mayores valores de variabilidad se encuentran tres espacios desempeñados dentro de la vivienda del estudiante con una duración promedio de ejecución de entre dos y cinco horas y media. Estas actividades, caracterizadas por una baja actividad física, responden consecuentemente a lo evidenciado en la literatura que señala un aumento en la VFC en estados de reposo, de manera que se puede afirmar que durante la totalidad del monitoreo el sujeto evidenció favorables niveles de variabilidad durante la mayor parte del mismo, indicando un comportamiento propicio de la función cardíaca como se esperaría en un joven adulto con las características del examinado (Tabla 22).

Tabla 22. Valores promedio de la VFC por actividad en el mes de julio.

No.	Actividad	VFC (%)	Tiempo (hrs:min)
1	Alistándose en casa	26.03	2:13
2	Otros lugares	25.23	3:29
No.	Actividad	VFC (%)	Tiempo (hrs:min)
3	Labores domésticas	23.60	3:04
4	Caminar barrio	20.95	0:20
5	Casa en reposo	19.81	5:24

6	Vehículos	17.31	0:17
7	Restaurantes	15.34	1:29
8	Universidad	14.92	2:40
9	Dormir	14.81	9:16
10	Transmilenio	14.65	0:52
11	Caminar Cl. 80	12.35	0:30
12	Actividad física	10.12	0:33
13	Caminar Marly	6.48	0:19

Fuente: autor.

Se evidencia que existen más actividades que exhiben valores de VFC medianamente favorables por encima del 17%, tal como la permanencia en otros lugares, caminar por el barrio y traslado al interior de vehículos particulares. En cuanto a la primera de estas, el individuo se encontró en su mayoría al interior de viviendas conviviendo con amistades en estados de reposo sin realizar mayor actividad física. En el segundo escenario, se registra en la bitácora de tiempo – actividad que su frecuencia fue de cuatro eventos puntuales los cuales responden a salidas esporádicas por los alrededores del barrio Villas de Granada con duraciones promedio de 20 minutos durante los cuales no se efectuó una actividad física considerable. Finalmente el escenario de permanencia en vehículos registra una ocurrencia de dos eventos únicos con duraciones promedio de 17 minutos en los cuales la persona de estudio permaneció como pasajero al interior de los motorizados.

Para las siete actividades restantes, se evidencia que sus valores de variabilidad del ritmo cardíaco se hallan entre el 6% y 16%, empezando a manifestar una conducta desfavorable en la actividad cardíaca del sujeto de estudio. Dentro de este conjunto de espacios se encuentran visitas a restaurantes y un evento único de estadía en las instalaciones de la universidad, los cuales se caracterizaron por estancias superiores a una hora y treinta minutos en su mayoría, durante las cuales se consignó poca actividad física, niveles medianamente elevados de FC y concentraciones considerables de PM_{2.5} en el caso de los restaurantes.

Por otra parte, espacios tales como el uso de transporte público, acondicionamiento físico, caminar por la Cl. 80 y por el barrio Marly presentan variabilidades en la frecuencia cardíaca por debajo del 14.81%, similares a aquellas registradas durante las horas de sueño, mostrando un comportamiento poco propicio en la función cardíaca que podría resultar en riesgos de padecimiento de afecciones coronarias y cardiovasculares. Estos, como se explicó con anterioridad, pueden llegar a registrar tales valores en función de la predominancia del SNS que eleva los niveles de cortisol por estrés mental y físico reduciendo notablemente la VFC.

7.5. Análisis comparativo y correlacional entre el PM_{2.5} y la FC

Para evidenciar patrones de correlación entre las variables PM_{2.5} y FC, se elaboró una tabla con los datos promedio totales de ambos parámetros para cada uno de los escenarios, organizándolos de mayor a menor con base en las concentraciones de PM_{2.5}, adicionando a su vez los tiempos promedios de ejecución (Tabla 23).

Tabla 23. Comparación del comportamiento del PM_{2.5} y la FC por actividad.

No.	Actividad	Tiempo (hrs:min)	PM _{2.5} (µg/m ³)	FC (bpm)
1	Restaurantes	1:22	23.77	94
2	Caminar Cr. 13	1:39	18.36	110
3	Transmilenio	1:12	16.63	107
4	Actividad física	1:46	16.42	117
5	Caminar Marly	1:57	16.01	109
6	Labores domésticas	3:31	14.72	85
7	Alistándose en casa	1:57	14.58	100
8	Caminar barrio	0:48	14.02	102
9	Caminar Cr. Séptima	0:36	12.89	107
10	Casa en reposo	6:12	12.71	85
11	Universidad	2:04	12.37	100
12	Caminar Cl. 80	1:55	11.48	109
13	Vehículos	0:31	11.1	102
14	Otros lugares	2:29	11.02	98
15	Dormir	9:24	10.39	54

Fuente: autor.

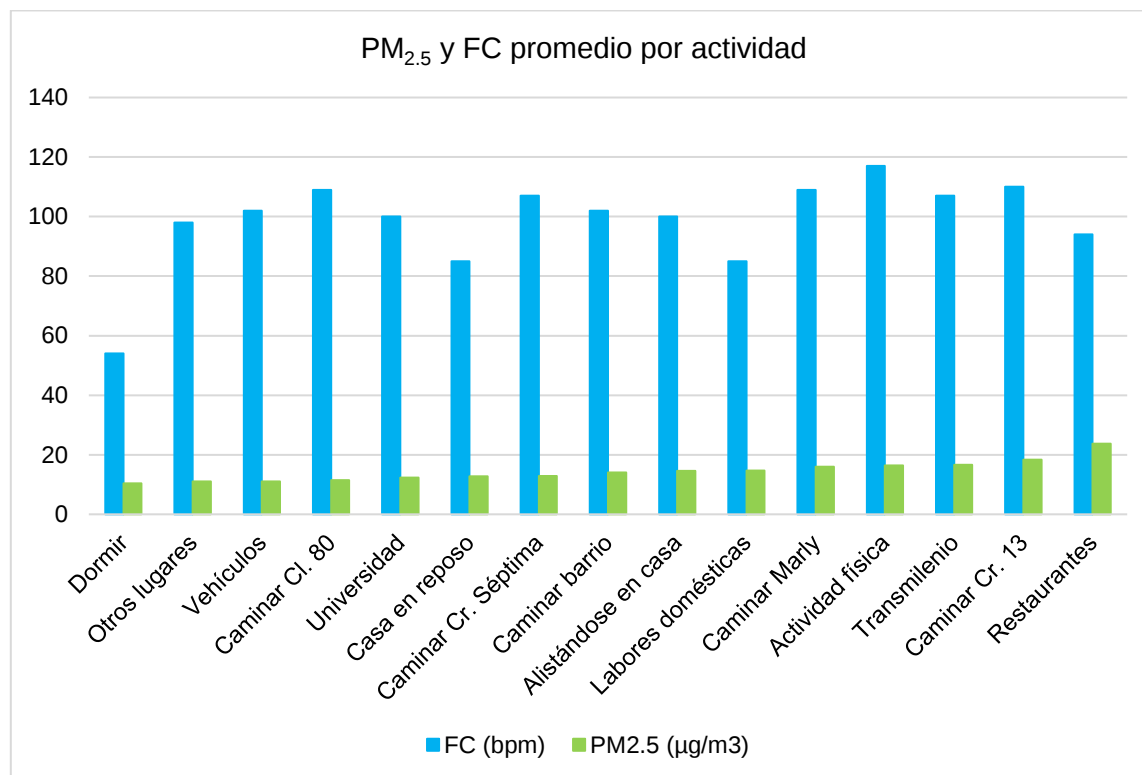
De acuerdo con la Tabla 23, no se observa de manera preliminar una tendencia particular en el comportamiento asociado de los datos exceptuando en la actividad en el que el sujeto de estudio se encuentra durmiendo, la cual registra los valores mínimos del monitoreo tanto para PM_{2.5} como para FC.

Realizando una observación minuciosa, se identifica que algunas actividades presentan aumentos sutiles en el ritmo cardíaco a medida que los niveles de PM_{2.5} son mayores, lo cual si bien podría indicar algún grado de relación entre las variables, puede también deberse a que los niveles más altos de material particulado se registran justo en varios de los escenarios en los que el individuo presenta un estrés mental y/o físico significativos, lo cual influye en gran medida en el alza de la FC.

Para estudiar desde una perspectiva más visual la posible relación existente entre la exposición al material particulado fino y la frecuencia cardíaca del sujeto de estudio, se elaboró la Gráfica 4, que ratifica lo enunciado con anterioridad en torno a que no se evidencia un comportamiento asociativo entre las variables más allá de escenarios puntuales como el de dormir o el de permanecer en reposo en casa,

identificando en ambos concentraciones bajas de PM_{2.5} junto a valores inferiores del ritmo cardíaco. En cuanto al resto de actividades, no se aprecia un comportamiento funcional entre las variables.

Gráfica 4. Comparación del comportamiento del PM_{2.5} y la FC por actividad.



Fuente: autor.

Para establecer con certeza si la frecuencia cardíaca del sujeto de estudio se encuentra relacionada con el grado de exposición que éste presenta al PM_{2.5}, se evaluó en primera instancia la normalidad de los datos, para seguidamente emplear las pruebas de correlación según la distribución de los datos (Anexos A y B), obteniendo así los valores presentados en la Tabla 24.

Tabla 24. Valores estadísticos de la correlación entre el PM_{2.5} y la FC.

No.	Actividad	P valor	Rho (r)	# Obs.
1	Caminar Cl. 80	0.0000	-0.2394	4
2	Actividad física	0.0001	-0.1985	3
3	Caminar barrio	0.0001	-0.1576	17
4	Restaurantes	0.0031	-0.1404	9
5	Labores domésticas	0.0000	-0.1096	32
6	Universidad	0.0002	-0.0989	9
7	Vehículos	0.3525	-0.0565	9
8	Dormir	0.0000	-0.0535	68

No.	Actividad	P valor	Rho (r)	# Obs.
9	Caminar Cr. 13	0.5084	-0.0379	5
10	Caminar Cr. Séptima	0.7906	-0.0195	3
11	Casa en reposo	0.0000	0.0341	108
12	Transmilenio	0.0315	0.0534	30
13	Alistándose en casa	0.0024	0.0678	21
14	Otros lugares	0.0295	0.0699	6
15	Caminar Marly	0.0000	0.2118	11
Registro total		0.0000	0.1186	335

Fuente: autor.

Como se puede observar algunos de los datos estimados presentan coeficientes negativos, lo cual sugiere relaciones inversas que son estadísticamente significativas, es decir, que al aumentar el valor de la concentración de $PM_{2.5}$, la FC disminuye. Se establece que el registro total de los datos obtuvo un $P < 0.05$, evidenciando que los resultados obtenidos son significativos; además, el valor r toma un coeficiente positivo y cercano al 12%, señalando una correlación positiva entre los datos, de manera que se puede afirmar que un aumento en la concentración de $PM_{2.5}$, elevara la FC. A pesar que la correlación general de los datos sugiere una covariación positiva no lineal, actividades como caminar a través de la Cl. 80 y Villas de Granada, realizar actividad física, permanecer en restaurantes, hallarse realizando labores domésticas y dormir, obtuvieron valores negativos de correlación con coeficientes entre -5.35% y -23.94% estableciendo una correlación inversamente proporcional; no obstante, los escenarios de Caminar Cl. 80 y actividad física evidencian valores de correlación que sugieren respuestas importantes de la FC en función de un cambio en las concentraciones de $PM_{2.5}$.

En cuanto a las 5 actividades restantes, su coeficiente rho es positivo de manera que presentan correlaciones directamente proporcionales que oscilan entre el 3.41% y el 7%, evidenciando un comportamiento no lineal entre los datos, excluyendo el escenario de caminar por el barrio Marly cuyo r fue del 21.18% sugiriendo una respuesta en cierto grado más rápida y directa a una variación en los niveles del contaminante.

De acuerdo con lo observado para esta correlación, se tiene que si bien gran parte de los escenarios y el registro total describen covariaciones positivas entre los parámetros, estas muestran valores del coeficiente rho inferiores a los presentados por los espacios con correlaciones negativas; sin embargo, el grupo de actividades con covariaciones positivas cuenta con un número de observaciones superior que se traduce en un mayor tiempo de monitoreo y por tanto más cantidad de datos, lo que podría influir en que la correlación total resulte positiva.

7.6. Análisis comparativo y correlacional entre el PM_{2.5} y la VFC

Con el fin estudiar patrones en el comportamiento de los valores del PM_{2.5} y de la VFC, se elaboró la Tabla 25, en la cual se registran los valores promedio totales por actividad para cada una de las variables de interés junto con el tiempo promedio de ejecución de cada actividad. Se evidencia un patrón en el cual varias de las actividades con los mayores niveles de PM_{2.5} experimentan valores de la VFC menores a la mayoría del registro. Tal es el caso de la actividad física, el uso del sistema de Transmilenio, caminar por la Cr. 13 y el sector de Marly, los cuales registraron en menores periodos de tiempo concentraciones de PM_{2.5} que sobrepasan el valor de 15 µg/m³ sugerido por la OMS para 24 horas; al mismo tiempo estas actividades presentaron variabilidades entre el 9.28% y 15.14%, que son relevantemente riesgosas para la salud del individuo con base en lo descrito anteriormente en torno a los cambios en la función cardíaca.

Tabla 25. Comparación del comportamiento del PM_{2.5} y la VFC por actividad.

No.	Actividad	Tiempo (hrs:min)	PM _{2.5} (µg/m ³)	VFC (%)
1	Restaurantes	1:22	23.77	18.81
2	Caminar Cr. 13	1:39	18.36	13.15
3	Transmilenio	1:12	16.63	15.14
4	Actividad física	1:46	16.42	14.75
5	Caminar Marly	1:57	16.01	9.28
6	Labores domésticas	3:31	14.72	25.15
7	Alistándose en casa	1:57	14.58	23.02
8	Caminar barrio	0:48	14.02	16.97
9	Caminar Cr. Séptima	0:36	12.89	14.94
10	Casa en reposo	6:12	12.71	23.50
11	Universidad	2:04	12.37	16.95
12	Caminar Cl. 80	1:55	11.48	13.92
13	Vehículos	0:31	11.1	19.63
14	Otros lugares	2:29	11.02	19.30
15	Dormir	9:24	10.39	13.16

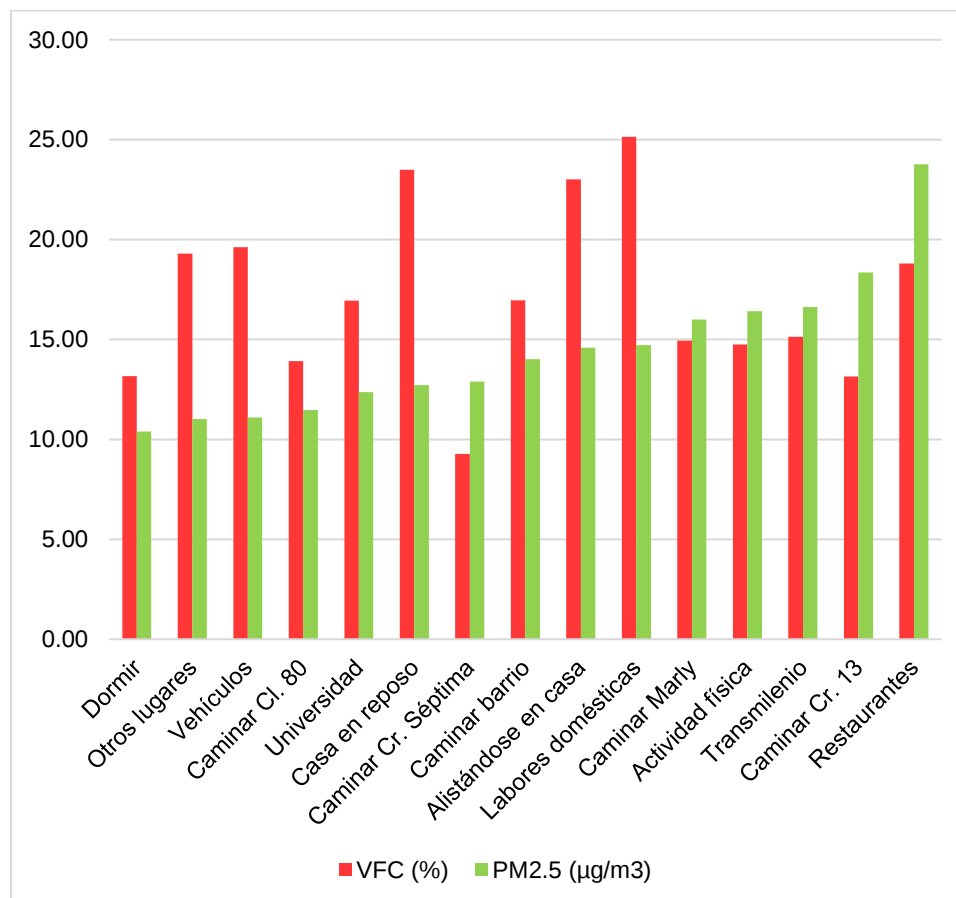
Fuente: autor.

Por otra parte, se obtuvo que en varias de las actividades con los menores niveles de material particulado, generalmente desempeñadas en ambientes interiores (viviendas, vehículos y en la universidad), se presentaron valores de VFC superiores al 17% lo que sugiere una actividad favorable en la función cardíaca durante estos espacios.

La Gráfica 5 corrobora lo señalado en torno al aumento en la variabilidad de la frecuencia para ciertas actividades cuyas concentraciones de PM_{2.5} empiezan a reducir, tales como la realización de labores domésticas, alistarse en casa, permanecer en casa en reposo, encontrarse en las instalaciones de la universidad,

caminar por el barrio, hacer uso de vehículos y realizar visitas remotas a otros lugares, obteniendo así un total de 7 actividades que evidencian una mayor variabilidad en contraste con aquellas que superan el límite de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$.

Gráfica 5. Comparación del comportamiento del $\text{PM}_{2.5}$ y la VFC por actividad.



Fuente: autor.

Lo anterior sugiere preliminarmente que el comportamiento entre las variables descritas es de carácter inversamente proporcional, basándose en que varias actividades presentan un aumento en la VFC a medida que el $\text{PM}_{2.5}$ disminuye y viceversa. En el caso de espacios como restaurantes y eventos de sueño, los cuales no siguieron esta regla de proporcionalidad inversa mencionada, se puede considerar que el comportamiento de los datos estar bajo la influencia de otras variables y/o incentivos específicos del entorno que dictaminan nuevos comportamientos en el funcionamiento cardíaco del individuo de estudio provocados por estímulos en el sistema nervioso autónomo.

Posteriormente, se estimó si los datos presentaban una distribución normal, para luego establecer la posible correlación, encontrando que el registro total de los datos arrojó un coeficiente rho negativo, indicando una relación inversamente

proporcional, siendo no estadísticamente significativa. Este comportamiento se ve a su vez en 11 de las 15 actividades (Tabla 26).

Tabla 26. Valores estadísticos de la correlación entre el PM_{2.5} y la VFC.

No.	Actividad	P valor	Rho (r)	# Obs.
1	Caminar Cr. Séptima	0.1915	-0.9551	3
2	Otros lugares	0.2054	-0.6027	6
3	Caminar Marly	0.0694	-0.5662	11
4	Caminar Cr. 13	0.3336	-0.5530	5
5	Transmilenio	0.0223	-0.4159	30
6	Casa en reposo	0.0086	-0.2518	108
7	Labores domésticas	0.7798	-0.0514	32
8	Caminar barrio	0.9252	-0.0246	17
9	Vehículos	0.8579	0.0700	9
10	Alistándose en casa	0.4837	0.1617	21
11	Dormir	0.0219	0.2775	68
12	Restaurantes	0.4043	0.3180	9
13	Universidad	0.3825	0.3321	9
14	Caminar Cl. 80	0.1265	0.8735	4
15	Actividad física	0.0053	1.0000	3
Registro total		0.4794	-0.0384	335

Fuente: autor.

En las 4 actividades remanentes que son estadísticamente significativas, dos muestran un comportamiento inversamente proporcional, siendo estas el uso del sistema de transporte Transmilenio y la permanencia en casa con labores de baja actividad física, que obtuvieron valores del coeficiente rho de -41.59% y -25.18% respectivamente, los cuales podrían dar paso a un tipo de comportamiento lineal entre los datos, al menos para el caso del uso de transporte público, evidenciando así una influencia directa del PM_{2.5} en la varianza del ritmo cardíaco.

Las dos actividades restantes, con significancia estadística, que fueron los momentos de descanso y de alta actividad física, presentaron coeficientes de covarianza notablemente altos siendo del 27.75% para los eventos de sueño del individuo, y del 100% para las actividades de alto requerimiento físico obteniendo una correlación positiva perfecta.

Si bien lo anterior resulta ser bastante diciente, hay que tener en cuenta que para el escenario de acondicionamiento físico se estudiaron únicamente tres observaciones como se muestra en la Tabla 26, siendo no suficientemente representativas. Asimismo, se debe considerar que el escenario en el que el sujeto de estudio se encontraba durmiendo, pudo haberse producido un comportamiento positivo de los datos en función de que la actividad cardíaca que se experimenta durante las horas de sueño cambia en función del requerimiento del organismo, reduciéndose

considerablemente, permitiendo considerar que el comportamiento visto obedecería más a aspectos de carácter biológico que a la exposición misma al PM_{2.5}.

7.7. Análisis comparativo del comportamiento de la FC y la VFC

Bajo una visión general se evidencia que las primeras siete actividades con los valores de frecuencia cardíaca más altos, son en su mayoría los mismos cuyas variabilidades obedecieron a ser las más bajas, tal y como se observó en el análisis mensual del monitoreo, donde se identificó el realizar actividades físicas, recorridos por la Cr. 13, Cr. Séptima, Marly y Cl. 80 y el uso de Transmilenio (Tabla 27); estas actividades están relacionadas con esfuerzo físico o estrés, en el caso específico del transporte público, lo cual desencadena una serie de procesos en el SNA producto de estos estímulos que influyen consecuentemente en la reducción de la VFC.

Tabla 27. Comparación del comportamiento de la FC y la VFC por actividad.

No.	Actividad	Tiempo (hrs:min)	FC (bpm)	VFC (%)
1	Restaurantes	1:46	117	14.75
2	Caminar Cr. 13	1:39	110	13.15
3	Transmilenio	1:55	109	13.92
4	Actividad física	1:57	109	14.94
5	Caminar Marly	0:36	107	9.28
6	Labores domésticas	1:12	107	15.14
7	Alistándose en casa	0:31	102	16.97
8	Caminar barrio	0:48	102	19.63
9	Caminar Cr. Séptima	2:04	100	23.02
10	Casa en reposo	1:57	100	16.95
11	Universidad	2:29	98	19.3
12	Caminar Cl. 80	1:22	94	18.81
13	Vehículos	6:12	85	25.15
14	Otros lugares	3:31	85	23.5
15	Dormir	9:24	54	13.16

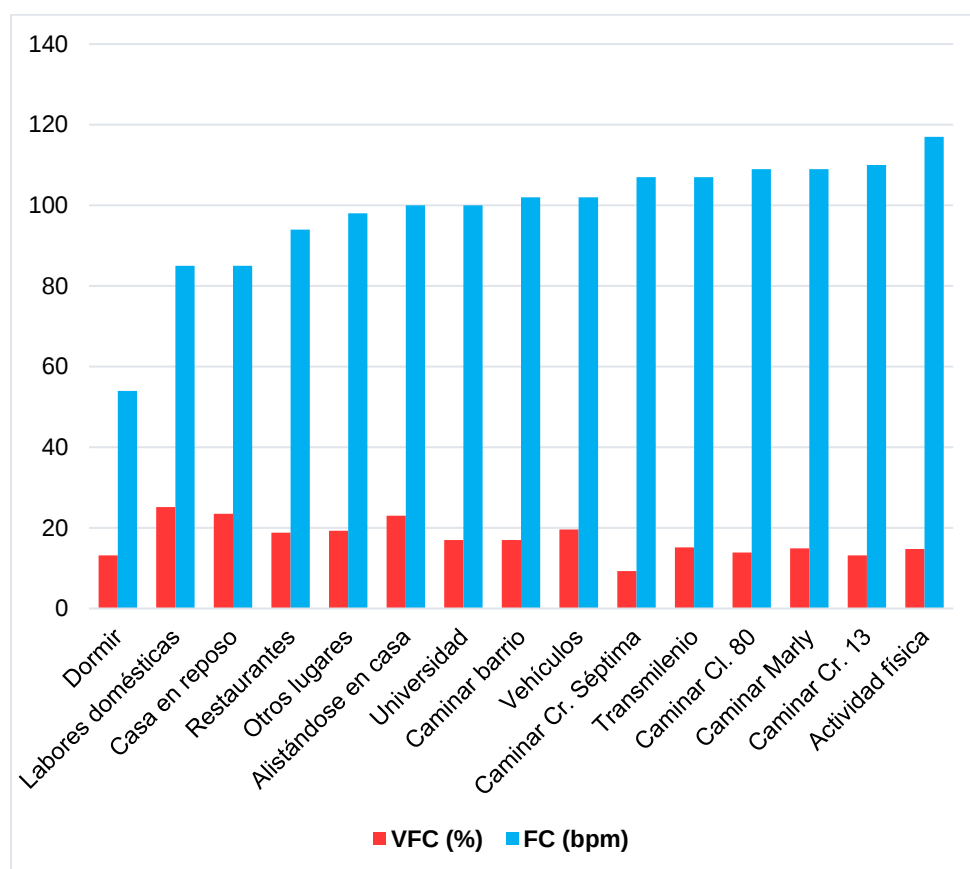
Fuente: autor.

Lo anterior concuerda con lo ocurrido para las actividades remanentes, pues estas evidencian variabilidades en la actividad cardíaca superiores a medida que los valores de la FC disminuyen, siendo congruente con lo evidenciado a lo largo del presente inciso, puesto que las actividades comprendidas en este grupo cuentan con un desempeño físico bajo que propicia la acción del SNP elevando la VFC. De acuerdo con esto se puede inferir un comportamiento inversamente proporcional entre la FC y VFC.

En general, las actividades cuyos valores de ritmo cardíaco son los más altos, se relacionan con actividades con cierto grado de estrés mental y/o físico de manera que experimentan valores más bajos en la VFC, manteniendo unos niveles de FC elevados y poco cambiantes durante la realización del evento. Asimismo espacios con menor desgaste físico y mental, en su mayoría desarrollados al interior de la vivienda, exhiben las frecuencias cardíacas más bajas, propias del estado en reposo y muestran variabilidades más altas en la actividad cardíaca.

Para facilitar la apreciación de lo expuesto, se presenta la Gráfica 6 que contrasta los valores obtenidos para cada una de las variables mencionadas ordenándolas al igual que para la Tabla 25 de mayor a menor ritmo cardíaco promedio.

Gráfica 6. Comparación del comportamiento de la FC y la VFC por actividad.



Fuente: autor.

La Gráfica 6 demuestra congruencia con lo señalado cuando se menciona que los escenarios cuyos valores de ritmo cardíaco son los más altos, se asocian a actividades con cierto grado de estrés mental y/o físico de manera que experimentan valores más bajos en la VFC.

Finalmente se realizó la correlación entre los valores totales de frecuencia cardíaca y variabilidad del ritmo cardíaco obteniendo los estadísticos expuestos en la Tabla 28.

Tabla 28. Valores estadísticos de la correlación entre la FC y la VFC.

Variables	P valor	Rho (<i>r</i>)	# Obs.
FC	0.0119	-0.1356	343
VFC			

Fuente: autor.

Se tiene que el coeficiente rho para la correlación entre la FC y la VFC resulta ser negativo no lineal y según su p valor dicha covarianza es estadísticamente significativa, por tanto podría corroborarse en cierto grado lo sugerido por la literatura cuando menciona que el estrés mental y/o físico en los individuos eleva los valores del ritmo cardíaco reduciendo considerablemente su varianza.

8. DISCUSIÓN

Los hallazgos de la presente investigación señalan, en primer lugar, que si bien los niveles de material particulado fino evidenciados durante la totalidad del monitoreo

alcanzaron valores de exposiciones agudas considerables, no existió riesgo apreciable por exposición en 24 horas para los escenarios desarrollados por el sujeto de estudio en la ciudad de Bogotá, de manera que se descarta la existencia de un riesgo a la salud por inmisión de $PM_{2.5}$ dentro de los límites evaluados.

Por otra parte, se pudo determinar que existe una relación entre la exposición al $PM_{2.5}$ y el cambio en el comportamiento de la frecuencia cardíaca del estudiante universitario observado, exhibiendo una covariación estadísticamente significativa de carácter positiva entre las variables, lo cual consolida favorablemente los resultados obtenidos frente a los registrados en estudios tales como el desarrollado en Riojas, H., en el que se comprueba el desarrollo agudo de arritmia cardíaca en función de la exposición al material particulado fino, identificando un estrés producido en el SNA que podría producir un aumento del ritmo cardíaco. A su vez, se denotó que los valores de la FC del sujeto de estudio se hallan dentro del rango de normalidad para individuos con sus características.

En cuanto a la variabilidad de la frecuencia cardíaca se obtuvieron resultados estrechamente similares a los expuestos por Sarasa Oliván, F., de manera que durante los espacios de mayor reposo y menor actividad física la VFC experimentó los mayores valores superando constantemente el 20% de variabilidad, denotando ser un factor protector frente a afecciones de origen cardiovascular. Asimismo se halló que de manera congruente la variabilidad del ritmo cardíaco disminuyó notablemente en escenarios de estrés físico y mental.

De acuerdo con el objetivo principal del estudio, se encontró que sí existe un grado de asociación entre la exposición al $PM_{2.5}$ y la variabilidad de la frecuencia cardíaca, evidenciando una tendencia en el comportamiento de las variables de carácter inversa y significativamente lineal, esto quiere decir que algunas de las actividades estudiadas experimentaron una reducción notable en la VFC a medida que los niveles de material particulado fino superaban el umbral de concentración de $15 \mu g/m^3$. Lo anterior se corroboró a partir del estudio comparativo de la conducta de ambos parámetros arrojando en gran medida el resultado esperado según el estado del arte tal y como se evidenció en Rojas Sánchez, O., de manera que el análisis exhibido por Rojas describió una conducta negativa (inversa) entre la VFC y el $PM_{2.5}$ al igual que como se observó en la presente investigación.

Si bien se encontró, como se esperaba, que gran parte de las actividades arrojaron coeficientes de covariación negativos entre los valores de $PM_{2.5}$ y VFC, la mayoría de estos fueron no estadísticamente significativos hecho que puede estar dado en función de tres factores: el primero es que la cantidad de datos recopilados no fue suficiente para determinar con mayor grado de certeza una covariación estadísticamente significativa, por tanto el tiempo resulta ser un limitante en la caracterización de resultados; el segundo es que existió una influencia significativa de otros factores y estímulos externos que modificaron las dinámicas del comportamiento de la VFC del sujeto de estudio, entendiendo que el cuerpo humano

funciona a partir de la interacción de distintos sistemas y pueden existir múltiples causas para la aparición o el comportamiento de un fenómeno en particular; y el tercero es que la expresión de los resultados se vio condicionada en función de los equipos de medición empleados en el monitoreo, ya que estos cuentan con sensores de bajo costo cuya precisión en la medición es susceptible a errores instrumentales.

Este tercer factor también abre una nueva discusión en función de la manera en la que se monitoreó y evaluó la variabilidad de la frecuencia cardíaca, puesto que el equipo empleado (Polar Vantage M) arroja números discretos del ritmo cardíaco del individuo de estudio los cuales podían ser tratados y estudiados a partir del cálculo de los coeficientes de variación, limitando así el análisis de la FC en contraste con lo elaborado por otros autores en sus investigaciones. Tal es el caso del estudio llevado a cabo por Cabrera Rojo, I. et al., en el cual analizaron la VFC normal jóvenes a partir de la observación de las ondas R-R y la identificación de sus picos, así como de las bandas de frecuencias lo cual es posible gracias al uso de equipos como el PASEK, COPEXTEL CUBA 1986, cuyos resultados se ven representados mediante electrocardiogramas brindando así una mayor precisión en el estudio de la conducta temporal del ritmo cardíaco y sus posibles factores de estímulo e influencia.

Es en este punto que entra a colación el interrogante: ¿Qué factor o factores influyen en mayor medida sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca? De alguna manera se corroboró en este trabajo que el PM sí tiene un grado de influencia apreciable sobre la VFC a medida que genera un estrés metabólico que estimula el SNS y reduce por ende la variabilidad. Ahora bien, investigaciones en el ámbito deportivo tales como la realizada por Lozano, K. et al., señalan que la VFC se comporta distinto según la actividad desarrollada por el sujeto de estudio, indicando que durante los espacios de reposo se amplía el rango de valores del ritmo cardíaco y por ende aumenta la variabilidad y, en caso contrario, la VFC de individuos corrientes disminuiría cuando la actividad física aumenta siendo esta una respuesta natural del organismo frente a estímulos que producen estrés.

Visto de este modo, para el estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca debe realizarse un análisis holístico de las múltiples variables que pueden influir en la función cardíaca tales como eventos externos que interaccionan con el sujeto y la presencia de otros contaminantes en el aire, evaluando dentro de lo posible el comportamiento de otros marcadores biológicos como los niveles de cortisol segregados en el organismo durante episodios de estrés mental.

Ahora bien, este estudio presenta grandes fortalezas en función de la labor de seguimiento que se llevó a cabo, pues se midió la exposición unipersonal de un individuo así como un marcador biológico en éste durante un periodo de tiempo considerable que comprendió en promedio más de 20 horas continuas de monitoreo durante cerca de tres meses, de manera que se realizó el mayor acercamiento

posible a las condiciones diarias del entorno de un individuo, lo cual no se ha llevado a cabo con tal grado de magnitud en otros grupos muestreados.

Es pertinente mencionar que al tratarse del monitoreo prolongado de la actividad de un individuo, se realizó la medición de variables en múltiples escenarios extra e intradomiciliarios, lo cual resulta ser una característica de gran relevancia para el presente estudio debido a que no se encontró con ningún antecedente de investigaciones que hallan profundizado en el monitoreo de los parámetros analizados en este trabajo.

9. CONCLUSIONES

Ninguno de los días monitoreados superó el límite máximo permitido por la Resolución 2754 de 2017 para concentraciones de $PM_{2.5}$ en 24 horas, ni en tiempos

de monitoreo inferiores, de manera que el nivel de inmisión obtenido no resulta ser un factor de riesgo por exposición bajo este parámetro para el sujeto de estudio. Por otra parte, se identifica que alrededor del 42% de las actividades realizadas por el sujeto de estudio durante la totalidad del monitoreo sí excedieron el límite máximo sugerido por la OMS; no obstante, esta condición no se presentó durante periodos de exposición mayores a 2 horas.

El comportamiento del ritmo cardíaco del individuo de estudio presenta respuestas acordes frente la demanda física y la exigencia generada por cada una de las actividades ejecutadas. Adicionalmente, si bien se observó de manera preliminar que la respuesta más congruente a las concentraciones de $PM_{2.5}$ correspondía a los periodos de sueño, el análisis estadístico de covariaciones arrojó que el registro entero de datos manifiesta una correlación positiva estadísticamente significativa, señalando una respuesta directamente proporcional entre la FC y el $PM_{2.5}$ lo que evidencia una concordancia con lo señalado por la literatura para un sujeto con las características del estudiado.

Los valores de la VFC obtenidos son congruentes con lo planteado por la literatura a medida que su comportamiento responde coherentemente a la exposición al $PM_{2.5}$, de manera que la variabilidad del ritmo cardíaco aumenta notablemente en varias de las actividades cuando las concentraciones del contaminante disminuyen. Asimismo, se esclarece que la alta VFC presentada por el sujeto de estudio durante la mayor parte del tiempo del monitoreo resulta ser un factor protector frente al desarrollo de afecciones cardiovasculares para éste.

La magnitud de los coeficientes de correlación entre los niveles de $PM_{2.5}$ y VFC de las actividades que fueron estadísticamente significativas, muestran una relación inversamente proporcional entre las variables de estudio.

Pueden existir elementos externos en los ambientes visitados por el sujeto de estudio tales como agentes o situaciones que generarían estímulos de estrés mental y físico, normales en individuos sanos, pudiendo ser condicionantes en la función del SNA del estudiante en función de cambios como el aumento de cortisol en el organismo, alterando en cierto grado la actividad cardíaca y por ende subordinando el comportamiento de la VFC durante dichos espacios.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar ahondando en investigaciones en torno al material particulado y su influencia en la salud humana, empleando equipos cada vez

más precisos en la toma de datos con el fin de reducir el grado de incertidumbre en los registros de los parámetros medidos.

- Se sugiere que para realizar futuras investigaciones, se evalúe la respuesta del sistema cardiovascular frente a factores de riesgo y exposición, se contemplen un mayor número de variables ambientales tales como otros agentes contaminantes y variables biológicas como los niveles de cortisol del individuo, producto del estrés mental que puede modificar la acción del sistema nervioso autónomo e influir en la función cardíaca.
- Para estudiar y evidenciar con mayor grado de certeza la covariación entre el PM_{2.5} y la VFC se aconseja realizar la medición de las variables en un mayor número de sujetos de diferentes características que permitan generar nuevos análisis. Asimismo, se recomienda ampliar el tiempo de monitoreo lo máximo posible para lograr una representatividad cada vez más fiel de la actividad de cada individuo de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2022). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. Recuperado de: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- Almonacid, C., Camarillo, M., Gil, Z., Medina, C., Rebellón, J. & Mendieta, H. (2016). Evaluación de factores de riesgo asociados a enfermedad cardiovascular en jóvenes universitarios de la Localidad Santafé en Bogotá, Colombia. *Nova, Vol. 15 No. 25*.
- Azor Montoya, Rubén Jesús. (2013). Determinación de Intervalos RR a partir de datos crudos del ECG. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICYT).
- Brook, Robert D. (2008). Cardiovascular effects of air pollution. *Clinical Science, 115(6), 175 – 187*.
- Bu, X., Xie, Z., Liu, J., Wei, L., Wang, X., Chen, M. & Ren, H. (2021). Global PM_{2.5}-attributable health burden from 1990 to 2017: Estimates from the Global Burden of disease study 2017. *Environmental Research, Vol. 197*.
- Cabrera Rojo, I., Cabrera Santos, A. & Montes de Oca, G. (1997). Variabilidad de la frecuencia cardíaca en el joven normal. Hospital Universitario “General Calixto García”. Instituto de Cardiología y Cirugía Cardiovasculares. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, Vol. 16, No. 2*.
- Calixto Flores, R., Herrera Reyes, L. & Hernández Guzmán, V. (2012). *Ecología y medio ambiente*. México D.F. Cengage Learning Editores S.C.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2018). *El aire: elemento de vida en la tierra*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conanp/articulos/el-aire-elemento-de-vida-en-la-tierra>
- Fedor, L. & Borovlev, A. (2019). Monitoring of Emission of Particulate Matters and Air Pollution using Lidar, Belgorod, Russia. Belgorod State University. *Aerosol and Air Quality Research, Vol. 19, No. 3*.
- Fischer, F. (2020). Análisis especial del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá – Colombia. Universidad El Bosque. Bogotá, D.C., Colombia.

- GreenFacts. (2022). *Exposición*. Recuperado de: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/def/exposicion-expuesto-exponer.htm>
- Greenpeace. (23 de septiembre de 2020). *La contaminación del aire en Bogotá provocó 3900 muertes en lo que va del año*. Recuperado de: <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/uncategorized/la-contaminacion-del-aire-en-bogota-provoco-3900-muertes-en-lo-que-va-del-ano/>.
- Guevara, F., Guevara, M. & Belalcázar, L. (2020). Passengers Exposure to PM_{2.5} in Self-polluted BRT-Diesel Operated Transport System Microenvironments. Universidad Nacional de Colombia. *Revista AJAE*, Vol. 14, No. 2, pp. 105-118.
- HabitatMap. (2018). *AirBeam2 Technical Specifications, Operation & Performance*. Recuperado de: <https://www.habitatmap.org/blog/airbeam2-technical-specifications-operation-performance>
- HabitatMap. (2021). *Taking Matter into Your Own Hands: About AirBeam*. Recuperado de: <https://www.habitatmap.org/airbeam>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2021). *Calidad del aire*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.
- Instituto Nacional del Cáncer. (2022). *Frecuencia cardíaca*. Recuperado de: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/frecuencia-cardiaca>
- Lee, M., Eum, K., Rodrigues, E., Magari, S., Fang, S., Modest, G. & Christiani D. (2017). Effects of Personal Exposure to Ambient Fine Particulate Matter on Acute Change in Nocturnal Heart Rate Variability in Subjects without Overt Heart Disease. *Am J Cardiol*. 117(1), 151 – 156.
- Lima, A. (2022). Tua Saúde. *Frecuencia cardíaca: pulsaciones normales por edad*. Recuperado de: <https://www.tuasaude.com/es/frecuencia-cardiaca/>
- Liu, W., Ma, C., Liu, I., Han, B., Chuang, H. & Chuang K. (2015). Effects of commuting mode on air pollution exposure and cardiovascular health among young adults in Taipei, Taiwan. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 218, 319 – 323.

- Lozada, K., Mocha, J. & Castro, W. (2020). Análisis de la frecuencia cardíaca: un estudio con estudiantes universitarios que practican actividad física regular. *Ciencia Digital*, Vol. 4, No. 1.1., p. 21 – 31.
- Martín, A. & Santamaría, J. M. (2000). Diccionario terminológico de contaminación ambiental. Pamplona. Ediciones Universidad de Navarra S.A. (EUNSA).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). *Emisiones*. Vicepresidencia Tercera del Gobierno Español. Recuperado de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/default.aspx>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (22 de septiembre de 2021). *Calidad del aire y salud*. Recuperado de: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (11 de junio de 2021). *Cardiovascular diseases (CVDs)*. Recuperado de: [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)).
- Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2021). *Calidad del Aire*. Recuperado de: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>.
- Oróstegui, O. (2021). Bogotá Cómo Vamos. *Preocupa crecimiento de parque automotor en Bogotá*. Recuperado de: <https://bogotacomovamos.org/preocupa-crecimiento-de-parque-automotor/>
- Orrego, C., Astudillo, B., Senior, J., Cuéllar, F., Velázquez, O. & Velázquez M. (2007). Variabilidad de la frecuencia cardíaca y alteraciones del ritmo cardíaco asociados a la terapia con células progenitoras en enfermedad cardiovascular. *Revista Colombiana de Cardiología*, Vol. 14 No. 6.
- Pieters N., Plusquin M., Cox B., Kicinski M., Vangronsveld J. & Nawrot T. (2012). An epidemiological appraisal of the association between heart rate variability and particulate air pollution: a meta – analysis. *Heart*, 98(15):1127 – 35.
- Polar (2021). *Polar Vantage M. Reloj multideporte avanzado con GPS y registro de frecuencia cardíaca en la muñeca*. Recuperado de: <https://www.polar.com/co-es/vantage/m>.
- Polar (2021). *Variabilidad de la frecuencia cardíaca y orthostatic test*. Recuperado de: <https://www.polar.com/blog/es/variabilidad-de-la-frecuencia-cardiaca-y-orthostatic-test/>

- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá [RMCAB]. (2022). Mapas interactivos. Secretaría de Ambiente. Recuperado de: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/home/map>
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá [RMCAB]. (2022). Rosa de Viento/Polución. Secretaría de Ambiente. Recuperado de: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Report/PollutantRose>
- Riojas, H., Holguin, F., Gonzáles, A. & Romieu I. (2006). Uso de la variabilidad de la frecuencia cardiaca como marcador de los efectos cardiovasculares asociados con la contaminación del aire. *Salud Pública Mex*, Vol. 48.
- Rojas Sánchez, O. A. (2016). Asociación entre exposición extra e intra – domiciliar a material particulado PM_{2.5} y función autonómica cardiovascular en población adulta, sin antecedente de enfermedad cardiovascular sintomática, residente en Bucaramanga Colombia. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander.
- Saavedra, S. (22 de enero de 2020). *Contaminación del aire y enfermedades cardiovasculares*. Sociedad Interamericana de Cardiología. Recuperado de: <http://www.siacardio.com/editoriales/prevencion-cardiovascular/contaminacion-del-aire-y-enfermedades-cardiovasculares/>.
- Salazar, C. (2021). La República. *En Colombia se reportan más de 12,53 millones de jóvenes entre los 15 y 29 años*. Recuperado de: <https://www.larepublica.co/especiales/las-1000-empresas-mas-grandes-de-2020/en-colombia-se-reportan-mas-de-1253-millones-de-jovenes-entre-los-15-y-29-anos-3187633#:~:text=En%20Bogotá%20el%20porcentaje%20de,2%20millones%20de%20personas%2C%20respectivamente.>
- Sarasa Oliván, F. (2020). Top Doctors España. *La Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) para mejorar el rendimiento físico y la salud*. Recuperado de: <https://www.topdoctors.es/articulos-medicos/la-variabilidad-de-la-frecuencia-cardiaca-vfc-para-mejorar-el-rendimiento-fisico-y-la-salud#>
- Secretaría de Ambiente. (2020). Inventario de emisiones de Bogotá, contaminantes atmosféricos. Bogotá, D.C.
- Secretaría de Movilidad. (2022). Estado del tráfico. Recuperado de: <https://www.movilidadbogota.gov.co/web/estado-del-trafico>
- Song, J., Zhou, S., Xu, J. & Su, L. (2021). From PM_{2.5} exposure to PM_{2.5} risks of inhaled dose in daily activities: Empirical evidence during workdays from guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, Vol. 249.

- Torres Ortiz, J. (2021). La variabilidad de la frecuencia cardíaca y su evaluación en deportes de resistencia, una mirada bibliográfica. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. *Actividad Física y Deporte*, Vol. 7 (1).
- Veloza, L., Jiménez, C., Quiñones, F., Polanía, F., Pachón, L. & Rodríguez, C. (2019). Variabilidad de la frecuencia cardíaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares. *Revista Colombiana de Cardiología*, Vol. 26 (4): 205 – 210.
- Vicente, T., Ramírez, V., Capdevila, L., Terradillos, J., López, A., Aguilar, E. & Reinoso, L. (2016). Exposoma. Un nuevo concepto en Salud Laboral y Salud Pública. *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*, Vol. 25 No. 3.
- Wang, F., Liang, Q., Sun, M., Ma, Y., Lin, L., Li, T., Duan, J. & Sun, Z. (2020). The relationship between exposure to PM_{2.5} and heart rate variability in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Chemosphere*, Vol. 261.
- World Health Organization [WHO]. (2021). *WHO global air quality guidelines*.
- Xing, X., Liu, F., Yang, X., Liu, Q., Wang, X., Lin, Z., Huang, K., Cao, J., Li, J., Fan, M., Chen, X., Zhang, C., Chen, S., Lu, X., Gu, D. & Huang J. (2021). Declines in heart rate variability associated with short-term PM_{2.5} exposure were modified by blood pressure control and treatment: A multi-city panel study in China. *Environmental Pollution*, Vol. 287.

ANEXOS

Anexo A. Valores obtenidos durante las pruebas de normalidad de *Skewness/Kurtosis* y *Shapiro Wilk* para las variables de PM_{2.5} y FC.

• Skweness/Kurtosis

Variable	Skewness/Kurtosis tests for Normality				
	obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
pmtotal	7.9e+04	0.0000	0.0000	.	.
fctotal	7.5e+04	0.0000	0.0000	.	.
pmd	3.7e+04	0.0000	0.0000	.	.
fcd	3.6e+04	0.0000	0.0000	.	.
pmcl	5.9e+03	0.0000	0.0000	.	.
fcc1	5.5e+03	0.0000	0.0000	.	0.0000
pmcr	2.6e+04	0.0000	0.0000	.	.
fccr	2.4e+04	0.0000	0.0000	.	.
pmca	2.1e+03	0.0000	0.0000	.	0.0000
fcca	2.0e+03	0.0000	0.0000	.	0.0000
pmtm	1.8e+03	0.0000	0.0000	.	0.0000
fctm	1.6e+03	0.0000	0.0013	62.26	0.0000
pmv	294	0.0000	0.0000	61.74	0.0000
fcv	273	0.0004	0.6001	11.48	0.0032
pmu	1.6e+03	0.0000	0.9115	.	0.0000
fcu	1.5e+03	0.7436	0.0000	24.18	0.0000
pmcb	786	0.0000	0.0000	.	0.0000
fccb	648	0.0000	0.1422	38.42	0.0000
pmcm	1.2e+03	0.0000	0.0000	.	0.0000
fccm	1.1e+03	0.0000	0.2501	23.99	0.0000
pmc13	369	0.0624	0.0023	11.41	0.0033
fcc13	306	0.0000	0.0118	28.73	0.0000
pmc80	420	0.0000	0.0000	.	0.0000
fcc80	367	0.0005	0.7459	11.00	0.0041
pmc7	209	0.0000	0.0000	42.07	0.0000
fcc7	187	0.0697	0.9711	3.33	0.1890
pmr	511	0.0000	0.0000	.	0.0000
fcr	441	0.0005	0.0007	19.95	0.0000
pmaf	383	0.0000	0.0000	.	0.0000
fcaf	368	0.2865	0.1061	3.76	0.1526
pmol	1.0e+03	0.0000	0.0000	.	.
fcoll	969	0.7130	0.0000	.	0.0000

• Shapiro Wilk

shapiro-wilk w test for normal data					
Variable	obs	w	V	z	Prob>z
pmtotal	78749	0.75823	6242.639	24.412	0.00000
fctotal	75091	0.87975	3000.870	22.350	0.00000
pmd	36656	0.97558	355.395	16.198	0.00000
fcd	36252	0.75373	3553.397	22.543	0.00000
pmcl	5863	0.77135	713.624	17.324	0.00000
fcc1	5549	0.97171	84.092	11.666	0.00000
pmcr	25557	0.67724	3526.257	22.365	0.00000
fccr	23581	0.97808	224.318	14.796	0.00000
pmca	2082	0.90654	114.964	12.087	0.00000
fcca	1993	0.96256	44.264	9.640	0.00000
pmtm	1754	0.87848	127.896	12.281	0.00000
fctm	1624	0.97956	20.057	7.569	0.00000
pmv	294	0.88609	23.839	7.437	0.00000
fcv	273	0.96707	6.455	4.357	0.00001
pmu	1631	0.93023	68.728	10.679	0.00000
fcu	1456	0.99337	5.888	4.457	0.00000
pmcb	786	0.81609	93.169	11.117	0.00000
fccb	648	0.93430	27.934	8.097	0.00000
pmcm	1175	0.91619	61.228	10.256	0.00000
fccm	1059	0.96847	20.952	7.551	0.00000
pmc13	369	0.96004	10.235	5.514	0.00000
fcc13	306	0.95575	9.594	5.313	0.00000
pmc80	420	0.59225	117.268	11.362	0.00000
fcc80	367	0.96577	8.725	5.134	0.00000
pmc7	209	0.91653	12.939	5.904	0.00000
fcc7	187	0.97482	3.543	2.900	0.00186
pmr	511	0.83253	57.450	9.747	0.00000
fcr	441	0.96948	9.170	5.297	0.00000
pmaf	383	0.91478	22.565	7.400	0.00000
fcaf	368	0.99326	1.723	1.290	0.09851
pmo1	1038	0.45092	358.268	14.587	0.00000
fc01	969	0.97408	15.886	6.840	0.00000

Anexo B. Valores obtenidos durante las pruebas de normalidad de *Skewness/Kurtosis* y *Shapiro Wilk* para las variables de PM_{2.5} y VFC.

• **Skweness/Kurtosis**

variable	skewness/kurtosis tests for Normality				
	obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
pmtotal	342	0.0000	0.0000	.	0.0000
vartotal	342	0.0000	0.8120	19.30	0.0001
pmd	68	0.1576	0.7130	2.22	0.3301
vard	68	0.0000	0.0012	25.87	0.0000
pmcl	32	0.0000	0.0001	23.85	0.0000
varcl	32	0.3542	0.9778	0.91	0.6356
pmcr	108	0.0000	0.0000	.	0.0000
varcr	108	0.0003	0.1833	12.41	0.0020
pmca	21	0.5422	0.2965	1.61	0.4463
varca	21	0.7236	0.0997	3.21	0.0712
pmtm	30	0.7062	0.1562	2.34	0.3098
vartm	30	0.0239	0.2503	5.98	0.0502
pmv	9	0.0257	0.0712	6.86	0.0324
varv	9	0.2472	0.6488	1.81	0.4051
pmu	9	0.2597	0.9057	1.47	0.4791
varu	9	0.5625	0.4123	1.12	0.5706
pmcb	17	0.5490	0.4145	1.13	0.5693
varcb	17	0.2692	0.7499	1.48	0.4782
pmcm	11	0.5699	0.6455	0.56	0.7573
varcm	11	0.0010	0.0022	13.93	0.0009
pmc13	5	.	.	.	.
varc13	5	.	.	.	.
pmc80	4	.	.	.	.
varc80	4	.	.	.	.
pmc7	3	.	.	.	.
varc7	3	.	.	.	.
pmr	9	0.0286	0.1856	5.85	0.0536
varr	9	0.0672	0.3188	4.46	0.1075
pmaf	3	.	.	.	.
varaf	3	.	.	.	.
pmo1	6	.	.	.	.
varo1	6	.	.	.	.

• Shapiro Wilk

shapiro-wilk w test for normal data

Variable	Obs	w	V	z	Prob>z
pmtotal	342	0.79169	49.859	9.234	0.00000
vartotal	342	0.96091	9.355	5.281	0.00000
pmd	68	0.97312	1.616	1.042	0.14863
vard	68	0.80364	11.806	5.359	0.00000
pmc1	32	0.79038	6.992	4.037	0.00003
varc1	32	0.97330	0.891	-0.240	0.59490
pmcr	108	0.73670	23.185	7.003	0.00000
varcr	108	0.94113	5.184	3.666	0.00012
pmca	21	0.94378	1.378	0.648	0.25855
varca	21	0.94932	1.242	0.438	0.33074
pmtm	30	0.96853	1.000	0.000	0.49990
var tm	30	0.93366	2.109	1.543	0.06145
pmv	9	0.85111	2.187	1.428	0.07665
varv	9	0.88712	1.658	0.892	0.18633
pmu	9	0.90087	1.456	0.652	0.25710
varu	9	0.97288	0.398	-1.393	0.91819
pmcb	17	0.94063	1.254	0.452	0.32570
varcb	17	0.94824	1.094	0.178	0.42921
pmcm	11	0.98415	0.257	-2.165	0.98482
varcm	11	0.72891	4.389	3.060	0.00111
pmc13	5	0.93066	0.819	-0.256	0.60087
varc13	5	0.95171	0.570	-0.673	0.74938
pmc80	4	0.92153	0.905	-0.114	0.54555
varc80	4	0.87308	1.464	0.496	0.30992
pmc7	3	0.91218	1.311	0.188	0.42539
varc7	3	1.00000	0.000	-4.741	1.00000
pmr	9	0.80163	2.915	2.027	0.02131
varr	9	0.87477	1.840	1.088	0.13823
pmaf	3	0.96112	0.580	-0.308	0.62094
varaf	3	0.96429	0.533	-0.350	0.63689
pmo1	6	0.93271	0.833	-0.256	0.60119
varo1	6	0.98572	0.177	-1.981	0.97622

Anexo C. Valores obtenidos durante las pruebas de normalidad de *Skewness/Kurtosis* y *Shapiro Wilk* para las variables de FC y VFC.

- **Skweness/Kurtosis**

skewness/kurtosis tests for Normality					
variable	obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
fc	343	0.0279	0.0000	67.12	0.0000
vfc	343	0.0000	0.7966	19.50	0.0001

- **Shapiro Wilk**

shapiro-wilk w test for normal data					
variable	obs	w	v	z	Prob>z
fc	343	0.94367	13.517	6.152	0.00000
vfc	343	0.95762	10.171	5.480	0.00000