

**EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES INTERNAS Y
EXTERNAS DE MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5} EN DOS
INSTITUCIONES EDUCATIVAS DE LA CIUDAD DE
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO**

JULIO BAENA HAMBURGER

MELISSA CAMPO MORALES



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA, COLOMBIA**

2020

**EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES INTERNAS Y EXTERNAS DE
MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5} EN DOS INSTITUCIONES EDUCATIVAS DE LA
CIUDAD DE BARRANQUILLA, ATLÁNTICO**

Julio Baena Hamburger

Melissa Campo Morales

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Ambiental

Director

PhD Ismael Schneider

Universidad de la Costa
Departamento de Civil y Ambiental
Programa de Ingeniería ambiental
Barranquilla, Colombia

2020

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

A mis padres, a su amor incondicional y a su apoyo.

Julio José Baena Hamburger

Dedico esta tesis a mis padres y a toda familia. Espero que con este documento pueda corresponder a sus esfuerzos para convertirme en una profesional.

Dedico esta tesis a nuestro asesor, como un medio para conmemorar los conocimientos adquiridos durante todo este camino.

Melissa Marcela Campo Morales

Agradecimientos

A Dios,

Por darme vida, salud y sabiduría a lo largo de mi carrera.

A mis padres,

Que sin ellos no hubiera logrado esta meta de mi vida profesional, gracias por su amor incondicional para seguir adelante con mis propósitos.

A mis hermanos,

Gracias por su apoyo y cariño.

A mi asesor,

Por el tiempo y esfuerzo dedicado a compartir sus conocimientos e instrucciones.

A todo el personal de las escuelas,

Por su atención y amabilidad durante el desarrollo de este estudio.

Julio José Baena Hamburger

Agradecimientos

A mis padres, Antonio y Victoria,

Por apoyarme en mi sueño de convertirme en Ingeniera Ambiental, siempre velando por educarme como una persona integral.

A mi asesor, Ismael Schneider,

Por entregarnos su conocimiento y paciencia, y por forjarnos como unos profesionales en materia ambiental y moral

A todo el personal de la Universidad de la Costa y de las Instituciones Educativas,

Por facilitar nuestra labor para el desarrollo de este estudio por medio de su colaboración, entendimiento y cordialidad.

Melissa Marcela Campo Morales

Resumen

La exposición a ambientes contaminados trae repercusiones importantes a la salud, sobre todo a grupos vulnerables como los niños. El presente estudio tiene como finalidad evaluar las concentraciones de material particulado PM_{2.5} en dos instituciones educativas (IEA y IEB) en ambientes interiores y exteriores. Las concentraciones fueron evaluadas por medio de sensores de bajo costo PA-II-SD de la empresa PurpleAir, los cuales fueron validados y calibrados por mediciones paralelas con el equipo de referencia Teledyne modelo T640X. El periodo de muestreo comprendió entre junio y octubre de 2019. Las concentraciones promedio de PM_{2.5} para la IEA fueron de 14,46 y 17,26 µg/m³ y para la IEB de 19,18 y 18,95 µg/m³ en ambientes internos y externos, respectivamente. Los procesos de ventilación, la actividad de las aulas y el tráfico vehicular fueron los factores que más afectaron las variaciones en las concentraciones. Las relaciones Interior/Exterior en los niveles de PM_{2.5} demuestran que la IEA es menos afectada por las concentraciones externas (I/E = 0,83), mientras la IEB presenta concentraciones iguales para los dos ambientes (I/E = 1,01). Estas variaciones están relacionadas con la ubicación (siendo IEA en un área de fondo urbano e IEB un área cercana a la influencia del tráfico) y las condiciones arquitectónicas de las edificaciones evaluadas. Igualmente fueron observadas diferencias significativas entre los días hábiles y no hábiles y entre las condiciones de ocupación de las aulas. Los resultados indican la necesidad de evaluar cada IE individualmente, para garantizar una buena calidad de aire a los niños.

Palabras clave: escuela, exposición, material particulado, PM_{2.5}, sensor de bajo costo

Abstract

Exposure to contaminated environments has important health repercussions, especially for vulnerable groups such as children. The purpose of this study is to evaluate the concentrations of PM_{2.5} particulate matter in two educational institutions (EI) in both indoor and outdoor environments. During the period between June and October 2019, the concentrations were evaluated by means of low-cost PA-II-SD sensors from PurpleAir, which were validated and calibrated by parallel measurements with the Teledyne model T640X reference equipment. The PM_{2.5} average concentrations for the EIA were 14.46 and 17.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and for the EIB of 19.18 and 18.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in internal and external environments, respectively. Ventilation processes, classroom activity and vehicular traffic were the factors that most affected variations in concentrations. The Indoor/Outdoor relations at PM_{2.5} levels demonstrate that the EIA is less affected by external concentrations ($I/O = 0.83$), while the EIB has equal concentrations for both environments ($I/O = 1.01$). These variations are related to the location (being EIA in an urban background area and EIB an area close to the traffic influence) and the architectural conditions of the buildings evaluated. Likewise, significant differences were observed between working and non-working days and between the conditions of occupation of the classrooms. The results indicate the need to evaluate each EI individually, assuring a good air quality to children.

Keywords: school, exposure, particulate matter, PM_{2.5}, low cost sensor

Contenido

Lista de tablas, figuras y anexos	11
1. Introducción.....	15
2. Planteamiento del Problema	18
3. Justificación.....	21
4. Objetivos.....	24
4.1. Objetivo General.....	24
4.2. Objetivos Específicos	24
5. Antecedentes.....	25
5.1. Calidad de Aire a Nivel Nacional.....	30
5.2. Calidad de Aire a Nivel Local	32
5.3. Ambientes Escolares.....	33
5.3.1. Calidad de Aire en Escuelas.....	35
6. Marco Teórico	37
6.1. PM _{2.5}	38
6.1.1. Fuentes de Emisión	40
6.1.2. Concentración en Ambientes Interiores	42
6.1.3. Riesgos a la Salud	44
6.1.4. Riesgos a la Salud de los Niños	46
7. Materiales y Métodos	51
7.1. Área de Estudio	51
7.2. Comportamiento Meteorológico.....	54
7.3. Puntos de Muestreo	57
7.3.1. Ubicación Puntos de Muestreo.....	57
7.3.2. Descripción de Puntos de Muestreo	59
7.4. Equipos de Muestreo	67
7.5. Calibración del Equipo.....	69
7.6. Recolección de Datos	70
7.7. Validación de Datos.....	71
7.8. Relación Interior/Exterior.....	74
7.9. Correlación Meteorológica.....	75
8. Resultados.....	77

8.1.	Validación de Sensores.....	77
8.2.	Análisis Descriptivo	82
8.2.1.	Comportamiento Horario	89
8.2.2.	Comportamiento Diario.....	92
8.2.3.	Condición de Ocupación	93
8.2.4.	Prueba de Significancia.....	99
8.3.	Influencia de Parámetros Meteorológicos	102
8.3.1.	Temperatura	103
8.3.2.	Humedad Relativa	104
8.3.3.	Presión Atmosférica	105
8.3.4.	Precipitación.....	106
8.3.5.	Radiación Solar	107
8.3.6.	Velocidad del viento.....	107
8.3.7.	Dirección del Viento	108
8.4.	Comparación con Estudios	113
9.	Conclusiones.....	122
10.	Recomendaciones	125
	Referencias.....	128
	Anexos	143

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 7.1. Características generales de los puntos de muestreo internos en las instituciones educativas.....	59
Tabla 8.2. Ecuaciones de corrección para los sensores y error.....	80
Tabla 8.3. Rangos de estimación de concentraciones de sensores.	81
Tabla 8.4. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de PM _{2.5} (µg/m ³) internas y externas de las instituciones educativas.	82
Tabla 8.5. Relación entre las concentraciones de PM _{2.5} internas y externas del contaminante en las instituciones educativas.	84
Tabla 8.6. Horarios de la jornada escolar de las instituciones educativas.	89
Tabla 8.7. Comparación de concentraciones promedio de PM _{2.5} (µg/m ³) entre días hábiles y no hábiles.	92
Tabla 8.8. Comparación de las variaciones en las concentraciones de PM _{2.5} (µg/m ³) debido a la actividad en aula en las instituciones educativas.	93
Tabla 8.9. Comparación de las concentraciones de PM _{2.5} para los periodos de actividad en las aulas de las instituciones educativas.	97
Tabla 8.10. Resultados prueba U de Mann-Whitney para días hábiles y no hábiles.....	100
Tabla 8.11. Resultados prueba U de Mann-Whitney para condiciones de ocupación.....	101
Tabla 8.12. Matriz de correlación entre las variables meteorológicas y concentraciones de PM _{2.5} en instituciones educativas.....	102
Tabla 8.13. Comparación de estudios de concentraciones de material particulado PM _{2.5} interior y exterior en instituciones educativas.	114

Figuras

Figura 6.1. Categorías de tamaño de material particulado.....	38
Figura 6.2. Comparación de diámetro aerodinámico de partícula.	39
Figura 6.3. Capacidad de infiltración de fracciones de material particulado en el sistema respiratorio.	40
Figura 6.4. Distribución de tamaños de partículas suspendidas medidas a partir de fuentes de emisión comunes.....	41
Figura 6.5. Condiciones metabólicas que generan susceptibilidad de los niños.	47
Figura 6.6. Tasa de respiración de niños en diferentes etapas de desarrollo vs adultos.	49
Figura 7.7. Delimitación de Área de Estudio.....	51
Figura 7.8. Área de Estudio con indicación de Puntos de Muestreo.	58
Figura 7.9. Plano Isométrico Institución Educativa A.....	60
Figura 7.10. Plano en Planta Institución Educativa A.	61
Figura 7.11. Esquema Entradas de Aire Institución Educativa A.....	62
Figura 7.12. Plano Isométrico Institución Educativa B.	64
Figura 7.13. Plano en Planta Institución Educativa B.	65
Figura 7.14. Esquema Entradas de Aire Institución Educativa B.....	66
Figura 7.15. Equipo PA-II-SD AIR QUALITY SENSOR.....	69
Figura 7.16. Equipo Teledyne T640.	70
Figura 7.17. Proceso de Validación de Datos.....	74
Figura 8.18. Correlación concentraciones Sensor IEx – Teledyne 640X.....	78
Figura 8.19. Relación entre concentraciones internas y externas en la Institución Educativa A.	85

Figura 8.20. Relación entre concentraciones internas y externas en la Institución Educativa B..	86
Figura 8.21. Comparación horaria de las concentraciones internas y externas de la Institución Educativa A.....	90
Figura 8.22. Comparación horaria de las concentraciones internas y externas de la Institución Educativa B.....	91
Figura 8.23. Comparación horaria de las concentraciones de PM _{2.5} para las condiciones de actividad e inactividad en la Institución Educativa A Sensor Interno.	95
Figura 8.24. Comparación horaria de las concentraciones de PM _{2.5} para las condiciones de actividad e inactividad en la Institución Educativa B Sensor Interno.	96
Figura 8.25. Rosa de los vientos en punto de muestreo Institución Educativa A.....	109
Figura 8.26. Rosa de los vientos en punto de muestreo Institución Educativa B.....	110
Figura 8.27. Rosa de contaminantes en punto de muestreo Institución Educativa A.....	111
Figura 8.28. Rosa de contaminantes en punto de muestreo Institución Educativa B.....	112

Lista de Anexos

Anexo 1. Aula de clases Institución Educativa A.....	143
Anexo 2. Aula de clases Institución Educativa B.....	143
Anexo 3. Sensor Interno Institución Educativa A.....	144
Anexo 4. Sensor Interno Institución Educativa B.....	145
Anexo 5. Sensor Externo Institución Educativa A.....	146
Anexo 6. Sensor Externo Institución Educativa B.....	146
Anexo 7. Rosa de Vientos Estación Universidad de la Costa.....	147
Anexo 8. Gráfica Rosa de Vientos Estación Universidad de la Costa.....	147
Anexo 9. Rosa de Contaminantes Concentraciones de PM _{2.5} Sensor IEA Externa.....	148
Anexo 10. Gráfica Concentraciones de PM _{2.5} Sensor IEA Externa.....	148
Anexo 11. Rosa de Vientos Estación Escuela de Policía Antonio Nariño.....	149
Anexo 12. Gráfica Rosa de Vientos Estación Escuela de Policía Antonio Nariño.....	149
Anexo 13. Rosa de Contaminantes Concentraciones de PM _{2.5} Sensor IEB Externa.....	150
Anexo 14. Gráfica Concentraciones de PM _{2.5} Sensor IEB Externa.....	150

1. Introducción

La calidad del aire representa un aspecto de importancia a escala mundial, considerando que, tras emisiones procedentes de diferentes fuentes de origen natural y antropogénico, se generan partículas que permanecen suspendidas en la atmósfera durante períodos prolongados (Echeverri & Maya, 2008), las cuales pueden conllevar a consecuencias negativas para las personas y el ambiente. La exposición a estas partículas se relaciona con graves riesgos para la salud humana, permitiendo establecer una relación directa entre el nivel de contaminación presentado y parámetros como la mortalidad o la morbilidad (OMS, 2005).

A diferencia de otros contaminantes atmosféricos, el material particulado cuenta con una composición variable en un amplio espectro de tamaños de partículas (Martins & Carrilho da Graça, 2018). Dentro de estos diferentes rangos de tamaño, se tiene a aquellas partículas finas de diámetro aerodinámico inferior o igual a las fracciones de 2,5 μm (PM_{2.5}), como uno de los principales componentes de la contaminación del aire evidenciada actualmente. Este contaminante es uno de los más ampliamente monitoreados y reportados en la contaminación del aire urbano debido a su asociación con impactos negativos a la salud (Targino et al., 2016).

En este escenario, el monitoreo de la contaminación atmosférica se considera de carácter obligatorio en países desarrollados y algunos en desarrollo, con el propósito de establecer estrategias para mitigar los problemas de calidad del aire y resguardar la salud de la población. Esa necesidad es aún más relevante cuando se trata del caso de los niños, específicamente de edad escolar, los cuales constituyen una población particularmente vulnerable, presentando una elevada susceptibilidad a desarrollar afectaciones consecuentes a la exposición a contaminantes en el aire debido a características fisiológicas, patrones del comportamiento relacionados con la edad y la ausencia de control sobre circunstancias ambientales (Grineski & Collins, 2018).

Los niños experimentan un desarrollo respiratorio y cognitivo mientras presentan un sistema de defensa inmaduro, al tiempo que muestran patrones únicos de actividad de tiempo relacionados con la exposición en comparación con los adultos. Es así como se puede estimar que la vulnerabilidad de los niños radica, en general, a su índice de respiración más alto, a la proporción del tamaño corporal, las barreras naturales menos desarrolladas de sus pulmones y a su tendencia a pasar más tiempo en exteriores (Brockmeyer & D'Angiulli, 2016).

La exposición a ambientes contaminados, aún por cortos periodos de tiempo y con concentraciones bajas de partículas respirables, puede traer afecciones a diversas partes del organismo, en especial con una exposición en ambientes interiores (Li et al., 2017), llegando a demostrarse que los efectos pueden tener implicaciones para la salud, disminuyendo su resiliencia y afectando su desarrollo físico y cognitivo (UNICEF, 2016).

Debido a que el proceso de crecimiento y desarrollo temprano es importante para la salud del niño y, por lo tanto, representa un momento crítico cuando las exposiciones a la contaminación del aire pueden tener efectos duraderos en su salud futura, la implementación de mecanismos de protección puede favorecer a controlar y mitigar los impactos de la contaminación del aire (Reche et al., 2015). No obstante, primeramente, se considera necesario determinar si las concentraciones del contaminante suponen un potencial riesgo para su bienestar, para lo cual se aplican monitoreos que permitan evaluar la calidad del aire.

El monitoreo de las concentraciones de masa de partículas en el aire representa entonces, una fuente de datos fundamental para la evaluación de la calidad del aire, la modelación del comportamiento del contaminante y la estimación de los niveles de exposición. En particular, es importante destacar que una alta densidad de registros puede proporcionar una mejor comprensión del transporte del contaminante a escala regional y global, y colaborar a reducir la

clasificación errónea de la exposición, lo que lleva a una mejor evaluación de los impactos en la salud asociados con la exposición a material particulado (Li et al., 2020a)

La exposición de los niños a la contaminación del aire requiere un enfoque en la calidad del aire en los lugares donde pasan la mayor parte del tiempo, como en escuelas, donde pueden estar sujetos a mayores niveles de PM_{2.5} que en el exterior. Por ende, la evaluación de la exposición a nivel escolar y la identificación de sus fuentes junto con su importancia relativa puede contribuir con intervenciones específicas para la mejora de la salud y el bienestar de los niños (Carrion-Matta et al., 2019). Para su respectivo análisis, se precisa comprender cómo las concentraciones elementales en interiores se relacionan con las exteriores para crear un ambiente escolar interior saludable (Zwoździak, Sówka, Krupińska, Zwoździak, & Nych, 2013).

El presente estudio se encamina a la evaluación de las concentraciones del contaminante PM_{2.5} en ambientes interiores y exteriores en dos (2) instituciones educativas dentro de la jurisdicción de la ciudad de Barranquilla. Para esto fue desarrollado un muestreo durante un periodo de 5 meses en simultáneo, implementando sensores de bajo costo, con el propósito de estimar los niveles de exposición de la población objeto de estudio, conformada por niños de edades entre 8 a 14 años, y estudiar la relación existente entre las concentraciones de partículas atmosféricas interiores y exteriores.

2. Planteamiento del Problema

El aire libre de contaminación es un requisito básico para mantener una buena salud y bienestar humano; sin embargo, la calidad deficiente del aire es una problemática que se viene presentando y amenazando de manera casi permanente (OMS, 2018b), con un mayor impacto atribuido a las partículas finas suspendidas en el aire, al encontrarse relacionadas a diferentes alteraciones del estado de la salud humana (Li et al., 2017).

El material particulado fino PM_{2.5} es un contaminante que se encuentra en todos los entornos urbanos. Las concentraciones dentro de la capa límite urbana pueden verse controladas por una combinación de fuentes industriales y vehiculares y factores meteorológicos (Richmond-Bryant, Saganich, Bukiewicz, & Kalin, 2009). Por otra parte, las fuentes con la mayor contribución a niveles globales en el entorno exterior son el tráfico y la combustión doméstica, mientras que los principales responsables de la disminución de las concentraciones son la precipitación y el viento (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

La contaminación atmosférica por material particulado ha producido más de 4,2 millones de muertes prematuras en el mundo para el año 2016. Asimismo, basándose en los resultados de una modelación desarrollada por la OMS para calcular la exposición aproximada de la población, incluidas aquellas áreas que carecen de cobertura por redes de monitoreo, el 91% de la población mundial se encuentra expuesta a concentraciones de PM_{2.5} por encima de los niveles anuales de la guía de calidad del aire (OMS, 2018b).

En Colombia se evidencia un ambiente más favorable de acuerdo con el Informe del Estado de la Calidad del Aire presentado como resultado del seguimiento a 203 estaciones de monitoreo, distribuidas en 83 municipios y 22 departamentos del territorio nacional por el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Los resultados indicaron que el

93,8% de estaciones reporta el cumplimiento de la norma de calidad del aire nacional en el año 2018, frente al 86,5% en 2017 (MinAmbiente, 2020), lo que permite inferir un progreso en la implementación de políticas de gestión del recurso aire.

A pesar de esto, el material particulado PM_{2.5} adquiere relevancia principalmente por su impacto en ambientes interiores donde la población pasa la mayor parte de su tiempo, estando expuesta a concentraciones que provienen del exterior, donde se evidencia un alto índice de penetración mediante mecanismos de ventilación, tanto natural como mecánico, y de infiltración de partículas, incluso en el mismo orden de magnitud y concentración que en ambientes exteriores (Li et al., 2017; Rivas et al., 2015). Tanto así, que esta entrada de partículas finas, combinada con fuentes internas, puede conducir a que la calidad del aire en interiores sea inferior que en exteriores (Martins & Carrilho da Graça, 2018), llegando a incrementar el riesgo asociado a la exposición para poblaciones vulnerables.

Dentro de este ámbito, los niños se consideran especialmente vulnerables, debido a características fisiológicas y comportamentales. Entre las causas de carácter fisiológico, su sistema respiratorio en proceso de crecimiento, en comparación con los adultos, implica un área de superficie pulmonar superior en relación con su peso corporal, presentando una tasa de ventilación pulmonar más elevada (Moya, Bearer, & Etzel, 2004). Adicionalmente, la capa celular en el interior del tracto respiratorio es más permeable y las vías respiratorias son más pequeñas, conduciendo a una mayor probabilidad de obstrucciones, sumado a un sistema inmune débil y un cerebro en desarrollo (UNICEF, 2016). En cuanto a causas relacionadas con el comportamiento, se reconocen niveles más altos de actividad física, implicando una mayor exposición a contaminantes en el exterior (Rivas et al., 2014).

Por lo general, las fuentes y la composición elemental de la contaminación por material particulado PM_{2.5} presentan variaciones de acuerdo con los micro entornos en los que los niños viven, aprenden y juegan. Por lo cual, las escuelas representan ambientes particulares, donde los niños pasan una gran parte de su día, la mayoría de los cuales pasan en las aulas (Kalimeri, Bartzis, Sakellaris, & de Oliveira Fernandes, 2019), que pueden llegar a tratarse de espacios limitados y con condiciones de ventilación relativamente pobres (D. Bi et al., 2018; Canha et al., 2016).

Las escuelas se consideran micro entornos complejos con diferentes factores que pueden contribuir al transporte, la mezcla y la generación de partículas en interiores. Por esto, las investigaciones adicionales deben incorporar el comportamiento y las actividades de los niños en interiores para evaluar mejor su exposición y relevancia en ambientes interiores (Carrion-Matta et al., 2019). Como resultado, evaluar los niveles y fuentes de contaminación de partículas atmosféricas en las escuelas y contemplar su papel en la salud infantil es, por consiguiente, uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo (Amato et al., 2014).

Con base en lo destacado anteriormente y la posibilidad de afectaciones a la salud de los niños en sus instituciones educativas, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál es la relación existente entre las concentraciones internas y externas medidas mediante sensores de bajo costo en dos instituciones educativas de la ciudad de Barranquilla, Atlántico?

3. Justificación

La calidad del aire se encuentra directamente relacionada con la calidad de vida y con los parámetros de mortalidad y morbilidad, de manera que, en caso de presentarse una concentración masiva de partículas atmosféricas, se puede sobreentender que esto puede conllevar en una repercusión en la salud de la personas (Qu, Wang, Zhu, & Ji, 2017).

La conciencia sobre el impacto negativo de la contaminación por partículas en el aire aumenta continuamente, y debido a sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, el material particulado ha sido monitoreado y regulado de manera rutinaria, con un historial de estándares más estrictos a escala mundial (Li et al., 2020a).

Para una gestión ambiental se requiere mantener los contaminantes en niveles que no representen un riesgo para la salud de las personas, siendo el monitoreo de la contaminación atmosférica una parte integral de un sistema de gestión de calidad del aire, permitiendo recopilar la información necesaria para la evaluación del grado de contaminación y la efectividad de estrategias de control de emisiones (Barranquilla Verde, 2018).

El monitoreo rutinario convencional, sin embargo, puede implicar un elevado costo y complejidad operativa; por lo que, actualmente solo se implementa un número limitado de estaciones de monitoreo ubicadas de manera dispersa y heterogénea, concentradas alrededor de áreas contaminadas o pobladas. Como consecuencia, impide la captura de las variaciones espaciales y temporales en la exposición a la contaminación del aire que pueden ocurrir debido a fuentes de emisiones y meteorología locales, limitando la capacidad para identificar a poblaciones vulnerables, controlar emisiones relevantes que contribuyen a exposiciones críticas y proteger la salud pública (Gao, Cao, & Seto, 2015).

La concentración elemental obtenida en ubicaciones de monitoreo estacionarias al aire libre no representa adecuadamente la exposición personal para una población en una región geográfica determinada, sobre todo si se considera que las concentraciones ambientales pueden no simular los niveles de exposición puntuales debido a los patrones de actividad de las personas, incluido el tiempo que pasan en interiores (Brokamp, Rao, Fan, & Ryan, 2015).

En los últimos años, se ha concentrado una creciente preferencia en la evaluación de la contaminación de partículas en espacios interiores, llevándose a cabo una gran cantidad de investigaciones referentes a las características de transferencia de aire y la correlación entre partículas en interiores y exteriores (Lv, Wang, Wei, Zhang, & Zhao, 2017).

Tomando como premisa lo anteriormente mencionado, sumado a que los efectos de la contaminación del aire en interiores resultan ser, en gran medida, más perjudiciales para los niños que el aire exterior a nivel mundial, se fundamenta la necesidad de implementar mecanismos de protección a los niños por medio del control de la contaminación del aire en ambientes internos; sobre todo cuando se encuentran en entornos escolares, en los cuales pasan la mayor parte de su tiempo, siendo uno de los micro entornos más importantes donde puede ocurrir una exposición con repercusiones a la salud (Carrion-Matta et al., 2019).

Por lo tanto, evaluar la exposición de los niños a partículas atmosféricas y los riesgos a la salud asociados, requiere el conocimiento de la concentración de partículas tanto en interiores como exteriores (Almeida et al., 2011). En este punto, una red de sensores de bajo costo para el monitoreo de material particulado resulta un enfoque prometedor para aumentar la densidad de mediciones de un contaminante, permitiendo abarcar áreas específicas de la ciudad y apuntar al análisis de micro entornos, como puede ser una escuela, para una detección relativamente rápida

y completa de la calidad del aire en un espacio donde una población vulnerable como los niños, pasan la mayor parte del tiempo (Li et al., 2020a).

En este sentido, los sensores de bajo costo pueden resultar funcionales para estudios de material particulado PM_{2.5}, por tratarse de un contaminante con un tiempo de residencia en la atmosfera relativamente corta, con patrones espacio temporales variables y sujeto a procesos de generación y eliminación en la atmósfera (Targino et al., 2016). De esta manera, los sensores pueden complementar las redes existentes para el aumento de la densidad de registros (Gao et al., 2015) y la detección de heterogeneidad espacial y variaciones temporales (Li et al., 2020a).

Teniendo esto, el presente estudio surge como una iniciativa para evaluar la calidad del aire en dos (2) instituciones educativas de la ciudad de Barranquilla, tomando como referencia las concentraciones obtenidas mediante la implementación de sensores de bajo costo para el contaminante PM_{2.5}, representando una medida alternativa para el monitoreo de la contaminación presente en ambientes escolares y la determinación de la relación existente entre los niveles interiores y exteriores a los que se ven expuestos los niños de 8 a 14 años.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar las concentraciones de material particulado PM_{2.5} en dos (2) instituciones de educación básica en ambientes interiores y exteriores.

4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las concentraciones de material particulado PM_{2.5} en ambientes interiores y exteriores en las instituciones educativas.
- Validar sensores de bajo costo para el monitoreo del contaminante evaluado en las instituciones educativas.
- Establecer una relación entre las concentraciones interiores y exteriores en las instituciones educativas.

5. Antecedentes

La contaminación del aire se considera una problemática con gran repercusión, relacionándose con 1 de cada 8 muertes a nivel mundial y presentando un 8% de aumento en sus niveles entre 2008 y 2013 (OMS, 2018a). Entre los contaminantes del aire liberados a la atmósfera, las partículas suspendidas PM se consideran uno de los principales con impactos en la salud humana (Halek, Kianpour-Rad, & Kavousirahim, 2013).

Estudios epidemiológicos recientes, como el desarrollado por Mohammadyan & Shabankhani (2013), han documentado una asociación entre los cambios en las concentraciones de partículas ambientales y los cambios en la mortalidad y la morbilidad diarias. En este sentido, se estima que alrededor de 4,2 millones de muertes prematuras por año son causadas por la exposición a material particulado PM_{2.5}, provocando diversas enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer (OMS, 2018a).

En el ámbito mundial, se han llevado a cabo estudios alrededor del contaminante PM_{2.5}, donde se demuestra su presencia en la atmósfera por fuentes naturales y antropogénicas (Martins & Carrilho da Graça, 2018; Arciniégas, 2012). En estudios de ambientes exteriores enfocados en las fuentes y las variaciones espaciotemporales en áreas urbanas se concluye que el tráfico es responsable de aproximadamente una cuarta parte de los niveles urbanos de PM_{2.5}, aunque en el sur y suroeste de Asia, Sudamérica y el suroeste de Europa, la proporción de material particulado fino derivado del parque automotor alcanza del 30 al 37% (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

La situación general es preocupante debido a que parece que las partículas relacionadas con el tráfico son más tóxicas que otras (Mohammadyan & Shabankhani, 2013), teniendo una correlación significativa vivir cerca de carreteras transitadas y la salud respiratoria (Janssen, Van Vliet, Aarts, Harssema, & Brunekreef, 2001). Por lo tanto, incluso reducciones modestas en la

exposición relacionada con el tráfico puede tener un impacto significativo en la salud pública (Hatzopoulou et al., 2013).

En cambio, la industria y la generación de energía contribuyen solo al 15% de los niveles urbanos de PM_{2.5}, ya que se observa la tendencia a que estas fuentes no se encuentren ubicadas dentro de principales ciudades. Sin embargo, en el sur de Asia, sur de China, Japón y Medio Oriente estas actividades representan una fuente importante de contaminación. La emisión de material particulado debido a la quema de combustible doméstico también ha disminuido en la mayoría de los países desarrollados y actualmente representa el 20% del PM_{2.5} urbano global. Aun así, es la fuente más importante en Europa Central y Oriental y en África representando de un 32 a 34% (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Las fuentes naturales representan el 18% del total de los niveles urbanos de PM_{2.5} las cuales incluyen polvo de suelos no urbanos y no agrícolas, sal marina, emisiones de combustión de incendios forestales y partículas que resultan de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación. Japón y el Medio Oriente son las únicas regiones donde las fuentes naturales son la fuente más importante (Karagulian et al., 2015; Marlier et al., 2015).

Aunque el PM_{2.5} urbano tiene un origen principalmente local y antropogénico, existen varias relaciones importantes entre la exposición personal a la contaminación del aire y factores meteorológicos, como la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa; aspectos como topografía local que afectan los niveles de PM_{2.5} facilitando o impidiendo la dispersión de partículas; y elementos como la altitud, la vegetación local, la ausencia de obstáculos naturales o provocados por el hombre y las altas velocidades del viento que promueven la disminución de las concentraciones de material particulado, lo que resulta en un aire más limpio. No obstante, una combinación de obstáculos no naturales, altas velocidades del viento y otras condiciones

favorables de dispersión pueden permitir el transporte de PM_{2.5} a lo largo de cientos de kilómetros (Martins & Carrilho da Graça, 2018; Hatzopoulou et al., 2013), teniendo una influencia directa en la calidad del aire en escalas que van desde lo local a lo regional y hasta lo global (Baklanov, Molina, & Gauss, 2016).

De esta manera, es cada vez más importante comprender los factores que influyen en los contrastes de exposición, los patrones espaciales en las concentraciones, y los efectos sobre la salud específicos del componente, para tener en cuenta al planificar la infraestructura urbana y promover la salud pública (Hatzopoulou et al., 2013). Teniendo en cuenta que, las concentraciones externas deciden mayoritariamente las concentraciones internas en áreas urbanas demostrándose una fuerte asociación entre estos, sobre todo cuando se presentan focos de contaminación, como lo es la cercanía de las carreteras (Ji & Zhao, 2015).

Los procesos de infiltración de las partículas desde el ambiente exterior son llevadas al interior por medio de los flujos de aire, a través de una combinación de procesos de penetración, ventilación natural y mecánica (Martins & Carrilho da Graça, 2018). Por lo cual deben tomarse medidas efectivas para controlar la introducción de contaminantes a dichos ambientes, sobre todo luego de que varios estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición a partículas interiores de origen exterior es más perjudicial (Martins & Carrilho da Graça, 2018; Hasheminassab et al., 2014).

De igual manera, el material particulado PM_{2.5} se puede generar en un ambiente interior por medio de la presencia de fuentes interiores de generación como lo son las actividades de cocina, la quema de incienso en las casas y las actividades humanas, provocando en algunos casos concentraciones más altas que los niveles exteriores correspondientes (Hasheminassab et al., 2014).

Debido a que dichas concentraciones por medio de los procesos de infiltración pueden ser introducidas en ambientes internos, es importante distinguir las fuentes de material particulado de interiores y exteriores, ya que esta información es de vital importancia tanto para la evaluación de riesgos para la salud como para las pautas reglamentarias adecuadas para la gestión de los PM (Ji & Zhao, 2015; Hasheminassab et al., 2014).

La mayoría de estos estudios se han presentado en megaciudades como Beijing, Delhi, Ciudad de México y Los Ángeles, donde se ha evidenciado que regiones densamente pobladas emiten cantidades significativas de contaminación a la atmósfera y los efectos son evidentes dentro de sus límites (Baklanov et al., 2016). Como resultado, en la mayoría de las grandes ciudades los niveles medios anuales de partículas finas en el aire exceden las directrices estipuladas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la exposición anual y a corto plazo (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Por otro lado, la mayoría de los estudios de calidad del aire urbano se centran en las mega o grandes ciudades de América del Norte, Europa y recientemente Asia, indicando una deficiencia en investigación en regiones de América Latina, e incluso en las limitadas investigaciones se puede ver una tendencia a centrarse en las ciudades más pobladas como São Paulo, Ciudad de México, Buenos Aires, Rio de Janeiro y Santiago. Esto es un dato preocupante ya que aproximadamente el 42% de la población mundial, o el 78% de la población urbana, vive en ciudades más pequeñas con menos de 5 millones de personas (Zalakeviciute, Rybarczyk, López-Villada, & Diaz Suarez, 2018).

Si bien se han aplicado esfuerzos significativos por el monitoreo y estimación espaciotemporales de concentraciones de contaminantes, un creciente número de estudios han encontrado que la evaluación por medio de estaciones de monitoreo es insuficiente para

caracterizar los contaminantes del aire a escala local que presentan una alta variabilidad espacial (Feenstra et al., 2019).

Como respuesta a esta problemática se ha visto una fuerte tendencia a la aparición de sensores de bajo costo para la medición de gas y de partículas (Feenstra et al., 2019). Estos sensores son tecnologías que prometen un avance revolucionario en el monitoreo de la calidad del aire, a través de aumentos masivos en la resolución de datos espaciales y temporales (Morawska et al., 2018). Pese a esto, la calidad de datos es una preocupación clave para estos sensores, debido a que no son tan precisos como monitores de regulación, viéndose afectados por factores ambientales, como la humedad y temperatura (Sayahi et al., 2019).

Debido a que es importante para calibrar estos sensores antes de su implementación (Sayahi et al., 2019), varios investigadores u organizaciones gubernamentales han emprendido una evaluación del rendimiento del sensor para un modo de uso específico y un entorno de aplicación. Sin embargo, un problema es que existe una variabilidad en la forma en que se realizaron las diferentes evaluaciones y en qué medida sus resultados son comparables. La metodología utilizada se fundamenta en los criterios de rendimiento, los cuales son (1) linealidad; (2) exactitud; (3) precisión; (4) tiempo de respuesta; (5) límite de detección; (6) rango de detección; (7) impacto de la temperatura y la humedad relativa (HR); y (8) interferencia co-contaminante.

De acuerdo con lo previamente mencionado, es recomendable la evaluación de campo, debido a que se expone el sensor a la contaminación del aire real y las condiciones ambientales bajo las cuales se espera que opere, y generalmente implica la colocación del sensor con los instrumentos de referencia relevantes. La recomendación general para los usuarios de sensores

de bajo costo es que deben ser probados y calibrados bajo la condición en la que están destinados a ser utilizados (Morawska et al., 2018).

Las principales aplicaciones de los sensores de bajo costo han incluido la monitorización exterior, interior o ambos, y el monitoreo personal (Morawska et al., 2018). Diversos autores como Bi et al., (2020) establecen la red de monitoreo de PurpleAir como una buena estrategia para la estimación de concentraciones, por otro lado, un ejemplo de evaluación de concentraciones por medio de los sensores de bajo costo de dicha empresa lo encontramos en la investigación de Tryner et al., (2020).

Un ejemplo a nivel regional es Contreras, Gidhagen, & Moreno (2019) en el cual por medio del uso de sensores ópticos de bajo costo y fácil transporte se midieron las concentraciones de PM en el municipio de Vijes, en Colombia, utilizando la técnica láser con alta precisión, siendo una alternativa útil para estudiar la calidad del aire en cualquier región.

5.1. Calidad de Aire a Nivel Nacional

En Colombia se han adelantado estudios sobre este contaminante (PM_{2.5}), tomando mayor relevancia el monitoreo y el control de la contaminación atmosférica, sumado a la fuerte evidencia de estudios internacionales, de acuerdo a los cuales las partículas más finas tienen una mayor asociación con indicadores de mortalidad y morbilidad de la población, relacionándose con 1 de cada 8 muertes a nivel mundial (Arciniégas, 2012; IDEAM, n.d.; Rojas & Galvis, 2005).

El Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, los efectos de la contaminación estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y

enfermedades, siendo determinado como el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional. Adicionalmente, los costos ambientales asociados a la contaminación atmosférica en Colombia se incrementaron pasando de 1,1% del PIB en 2009 (\$5,7 billones de pesos) a 1,59% en 2014 (\$12 billones de pesos) y 1,93% del PIB en 2015 (\$15,4 billones de pesos), lo cual pone en evidencia la necesidad de seguir implementando estrategias para controlar, evaluar y monitorear estas sustancias (IDEAM, n.d.).

En Colombia, algunas de las estaciones de monitoreo han venido presentando concentraciones promedio anuales que superan los valores máximos permitidos y establecidos en la normatividad legal vigente. Es importante clarificar que las estaciones de monitoreo que han registrado estos datos se encuentran, en su mayoría, ubicadas en ciudades y municipios con alta densidad poblacional y con un índice de desarrollo industrial en alza, lo que ocasiona impacto ambiental negativo en la calidad del aire presente en dichas zonas y por consiguiente una situación adversa para la salud de las personas que las habitan (Domiguez, Alonso, Guarnizo, Carrillo, & Guativa, 2019).

Las zonas que presentan niveles alarmantes de contaminación atmosférica en el país son: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las localidades de Puente Aranda, Carvajal y Kennedy en Bogotá, el municipio de Ráquira en Boyacá y la zona industrial de ACOPI en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca (IDEAM, n.d.) llegando por encima de los máximos permisibles (Domiguez et al., 2019).

Debido a los efectos del PM_{2.5} sobre la salud humana, la reducción de las emisiones de este contaminante es esencial para el bienestar de la ciudad, siendo necesario mejorar la calidad del aire en las principales ciudades. Actualmente se han desarrollado diversos estudios para aclarar el panorama de calidad de aire en Colombia, debido a que los grandes limitantes en

materia de investigación no permiten determinar las víctimas reales de los contaminantes del aire, lo cual es necesario para las diferentes decisiones administrativas y evitar efectos no deseados en la ciudad (Ocampo-Giraldo, Gonzalez-Calderon, & Posada-Henao, 2019).

5.2. Calidad de Aire a Nivel Local

En Barranquilla son escasos los estudios relacionados con este contaminante, por tanto, fue tomado como referencia el Informe Anual de Calidad de Aire de Barranquilla, expedido por el Establecimiento Público Ambiental denominado Barranquilla Verde. De acuerdo con los resultados de la red de monitoreo de la ciudad para el año 2018, no se superaron los niveles máximos establecidos por la normativa nacional, observando un incremento de las concentraciones del contaminante en días puntuales, por eventos como quemas en el Parque Isla de Salamanca o de residuos cerca de las estaciones de monitoreo (Barranquilla Verde, 2018).

El promedio anual de PM_{2.5} en la ciudad no superaba los límites máximos anuales establecidos en 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, presentando los promedios más altos en la Estación Escuela de Policía Antonio Nariño y la Estación Móvil, con concentraciones medias de 16,68 y 17,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; mientras que, la Estación que presentaba la concentración más baja, fue Tres Ave Marías con 13,06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es importante destacar que por más que estos niveles indiquen el cumplimiento de la norma colombiana de calidad de aire, están por encima de los valores de referencia establecidos por la OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Finalmente, las tres estaciones mostraron un comportamiento horario similar, siendo el periodo de menor concentración correspondiente entre 10:00 y 15:00 horas (Barranquilla Verde, 2018).

Por otra parte, el periodo con mayores concentraciones observadas se determina dependiendo de cada estación de monitoreo. En la Estación Móvil, las concentraciones altas se

presentan mayoritariamente en el rango de 18:00 a 23:00 horas, en la Estación Escuela de Policía Antonio Nariño las horas de mayor concentración resultan a las 7:00 horas y, por último, la Estación Tres Ave Marías entre las 7:00 a 8:00 horas y de 17:00 a 22:00 horas (Barranquilla Verde, 2018).

Si bien se han logrado avances importantes, se necesitan nuevos estudios de investigación interdisciplinarios relacionados con efectos causados por la presencia de este contaminante para aumentar nuestra comprensión actual de las interacciones entre las emisiones, la calidad del aire y los climas regionales y globales, resaltando que la reducción de las emisiones de este contaminante es esencial para el bienestar de la ciudad (Ocampo-Giraldo et al., 2019), más aún cuando no se ha podido identificar un umbral por debajo del cual no se observen efectos para la salud (OMS, 2018b; Baklanov et al., 2016; Arciniégas, 2012).

5.3. Ambientes Escolares

Los ambientes escolares son identificados como uno de los microambientes importantes donde puede ocurrir exposición a PM_{2.5} (Carrion-Matta et al., 2019), siendo la calidad del aire en escuelas un parámetro de especial importancia por la susceptibilidad de los niños a problemas de salud como resultado de la exposición al aire contaminado (Halek et al., 2013).

Las personas pasan mucho tiempo en interiores, más aún poblaciones vulnerables como los niños (Mohammadyan & Shabankhani, 2013), para los cuales una gran parte de ese tiempo en interiores se da en aulas escolares, donde pasan una parte significativa de su día (Carrion-Matta et al., 2019).

La exposición de los niños durante las actividades educativas en las aulas es motivo de especial preocupación (Halek et al., 2013), especialmente debido a la dificultad para encontrar

asociaciones entre las exposiciones ambientales de la escuela a síntomas específicos de salud, ya que es difícil separar la contribución de las exposiciones basadas en la escuela y las no basadas en la escuela, como las debidas al hogar o las exposiciones exteriores (Chatzidiakou, Mumovic, & Summerfield, 2012).

Varios estudios han revelado que el aire de la escuela puede ser fuente de una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos del aire con posibles propiedades tóxicas, cancerígenas y alergénicas (Halek et al., 2013), enfatizando en la importancia de las partículas con un diámetro aerodinámico de menos de 10 μm (PM₁₀) y, principalmente, 2,5 μm (PM_{2.5}), medido en sitios de monitoreo fijos (Mohammadyan & Shabankhani, 2013). Las exposiciones a PM se pueden vincular a déficits cognitivos, estrés oxidativo y neurodegeneración (Amato et al., 2014), existiendo evidencias de un aumento significativo en los ingresos hospitalarios por asma en septiembre que coincide estrechamente con el regreso de los niños al entorno escolar (Chatzidiakou et al., 2012).

Las fuentes y componentes de PM_{2.5} varían conforme con el microambiente, donde procesos como el tipo de ventilación, la tasa de intercambio de aire, las características del edificio y la estacionalidad juegan un papel importante en la variabilidad de estos. Dentro de las características de los edificios que afectan el transporte y la mezcla de contaminantes se destacan la edad, materiales de construcción que pueden actuar como depósitos de irritantes que pueden contribuir a los procesos de gasto-partículas; factores como la densidad de ocupantes por volumen de aula e incluso las actividades que desarrollen pueden aumentar la concentración de contaminantes mediante la resuspensión de partículas depositadas previamente e introduciendo nuevas partículas a través de la ropa y los zapatos.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que las escuelas urbanas en los territorios en desarrollo generalmente tienen sistemas de ventilación natural y están ubicadas cerca de áreas residenciales y carreteras transitadas. Estas áreas tienen altas concentraciones de contaminantes al aire libre, y estos contaminantes se pueden transferir al ambiente interior a través de la entrada de ventilación, puertas y ventanas abiertas y fugas en el edificio (Carrion-Matta et al., 2019; Othman, Latif, & Matsumi, 2019). Por esto, es un desafío la evaluación de variaciones espaciales y temporales de contaminantes en edificios escolares, así como la mejoría de sistemas de limpieza y ventilación en aulas para una mejor protección de los niños durante las actividades en escuelas (Halek et al., 2013; Chatzidiakou et al., 2012).

5.3.1. Calidad de Aire en Escuelas

Los estudios que evalúan las concentraciones de PM_{2.5} en escuelas varían significativamente en sus resultados, encontrando diferencias significativas en las escuelas en España (29 µg/m³), Alemania (17 µg/m³), Bélgica (63 µg/m³), Suecia (9,7 µg/m³), Italia (77,9 µg/m³) y los Países Bajos (24,8 µg/m³), entre otras (Carrion-Matta et al., 2019).

Dichas concentraciones en su mayoría son definidas por los ambientes exteriores, demostrando la penetración de la contaminación en interiores, aunque según mencionan Carrion-Matta et al. (2019) pueden existir alrededor de seis factores fuentes identificados, los cuales son: partículas ricas en calcio, polvo del suelo, vehículos de motor, aerosoles marinos, contaminación secundaria y quema de biomasa.

Mohammadyan & Shabankhani (2013) señalan que las escuelas ubicadas en las carreteras principales cuentan con concentraciones medias internas más altas que las escuelas en las

carreteras pequeñas, variando de 49,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ frente a 44,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, siendo el tráfico un determinante importante en los niveles de exposición de los estudiantes.

Othman, Latif, & Matsumi (2019) establecen que las actividades en el aula pueden favorecer la resuspensión de partículas, demostrando aumentos de concentraciones en horas o puntos donde existe un movimiento significativo de los ocupantes y disminuciones cuando las actividades internas ameritaban estados estacionarios. Siendo importante incorporar el comportamiento y las actividades de los niños en interiores para evaluar mejor la exposición y la relevancia de PM_{2.5} en ambientes interiores de las escuelas (Carrion-Matta et al., 2019).

6. Marco Teórico

El término contaminación del aire se refiere a un grupo de contaminantes en el aire que contribuyen a disminuir la esperanza de vida, dentro de estos podemos encontrar monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x), ozono (O₃) y partículas en suspensión en el aire (PM). En las últimas décadas, los impactos de la contaminación del aire en la salud se establecieron en el ámbito del conocimiento común, debido a las grandes repercusiones que tienen (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

La “partícula” es un término que se emplea para describir cualquier material sólido o líquido dividido finamente, que es dispersado y arrastrado por el aire y que tiene un tamaño que varía entre 0,0002 y 500 µm. La presencia de partículas en la atmósfera, solas o combinadas con otros contaminantes, genera riesgos para la salud, afectando principalmente el sistema respiratorio y cardiovascular (Echeverri & Maya, 2008).

A diferencia de la mayoría de los otros contaminantes que consisten en una o dos sustancias, el PM incluye varias sustancias en un amplio espectro de tamaños de partículas (Martins & Carrilho da Graça, 2018). Convencionalmente, las partículas se clasifican por su diámetro aerodinámico (*Figura 1*), generalmente denominado tamaño de partícula, porque estas propiedades gobiernan el transporte y el tiempo de suspensión en el aire, su deposición en los pulmones, y generalmente están relacionadas con su composición química (Chatzidiakou et al., 2012).

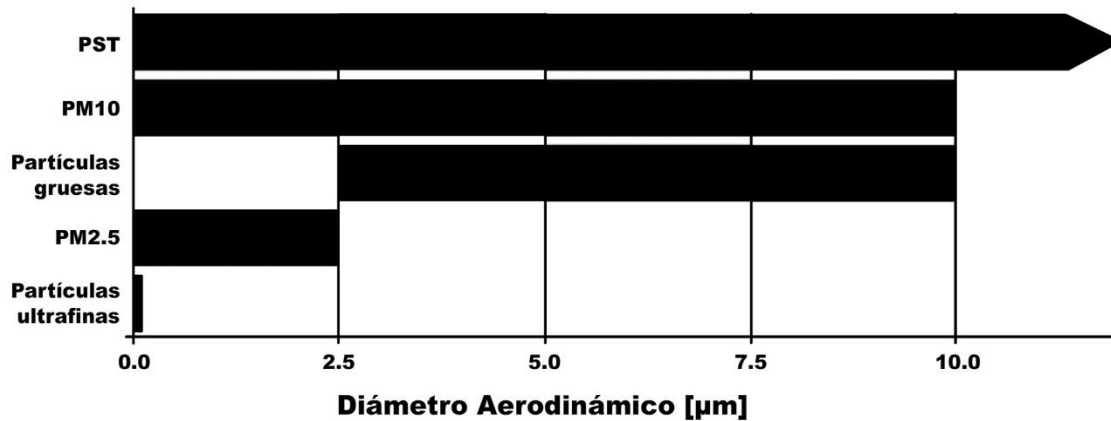


Figura 1. Categorías de tamaño de material particulado.

Fuente: Martins & Carrilho da Graça (2018)

Aunque la gravedad obliga a una deposición casi instantánea de partículas con diámetros superiores a 30 µm, las partículas más pequeñas permanecen suspendidas durante largos períodos de tiempo y, como resultado del transporte por el viento, pueden viajar lejos de sus fuentes, permaneciendo en el aire durante mucho tiempo, generando impactos en la salud humana (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

6.1. PM_{2.5}

El material particulado PM_{2.5} se define como una partícula atmosférica suspendida con un diámetro aerodinámico $\leq 2,5$ µm, compuesta de una variedad de diferentes componentes químicos. La composición de PM_{2.5} comprende iones solubles en agua, incluidos Sulfatos, Nitratos y compuestos de Amonio (SNA), compuestos a base de Carbono, incluido el Carbono Elemental (EC) y Orgánico (OC), elementos traza, compuestos orgánicos como Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) y Compuestos Orgánicos Volátiles Oxigenados (OVOC), Especies Reactivas de Oxígeno (ROS), agua y microorganismos inhalables (Liang, Duan, He, &

Ma, 2016). Entre estos componentes, SNA, OC, EC y agua forman la mayor parte de la masa de PM_{2.5} en ambientes exteriores urbanos (Martins & Carrilho da Graça, 2018) (*ver Figura 2*)

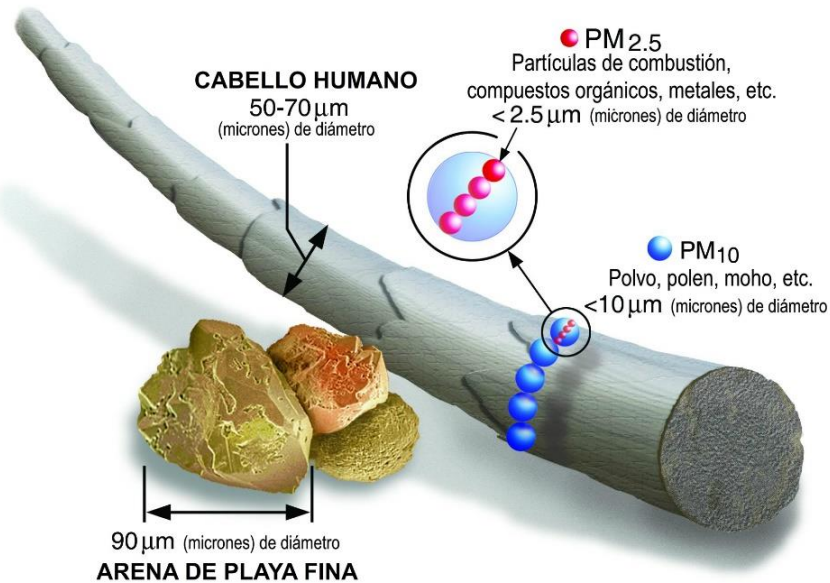


Figura 2. Comparación de diámetro aerodinámico de partícula.

Fuente: EPA (s.f)

El PM_{2.5} se considera como el principal contaminante del aire relacionado con los impactos a la salud de las personas (Li et al., 2017), pues esta fracción de material particulado es respirable en su totalidad, y por ello puede llegar a alojarse en bronquios, bronquiolos y en algunos caso incluso en alvéolos (*ver Figura 3*). Adicional a esto, puede ingresar al cuerpo humano a través de la sangre hasta el hígado, el cerebro, el riñón, representando una grave amenaza para la salud humana (Qu, Wang, Zhu, & Ji, 2017; Echeverri & Maya, 2008; Larsen, 2003).

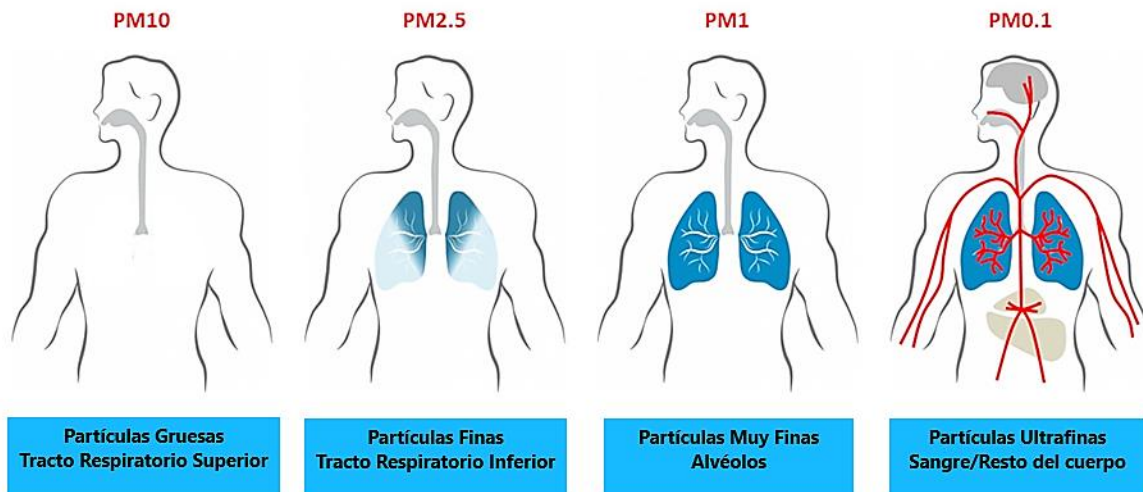


Figura 3. Capacidad de infiltración de fracciones de material particulado en el sistema respiratorio.

Fuente: Encyclopedia of the Environment (2009)

6.1.1. Fuentes de Emisión

Las partículas finas se pueden emitir directamente a la atmósfera, por medio de procesos de emisión primaria o por procesos de formación secundaria, como resultado de reacciones químicas que involucran gases precursores (Martins & Carrilho da Graça, 2018), y como producto de diferentes actividades, tanto naturales como antropogénicas (Arciniégas, 2012).

En la *Figura 4* se muestra la distribución de tamaños de partículas suspendidas medidas a partir de fuentes de emisión comunes. La fracción de tamaño de PM_{2.5} está dominada por las partículas de combustión; por otro lado los polvos de construcción, los polvos de carreteras y los polvos de tierra formados por la molienda de partículas más grandes generan emisiones menores o moderadas en la fracción PM_{2.5} (Watson & Chow, 1998).

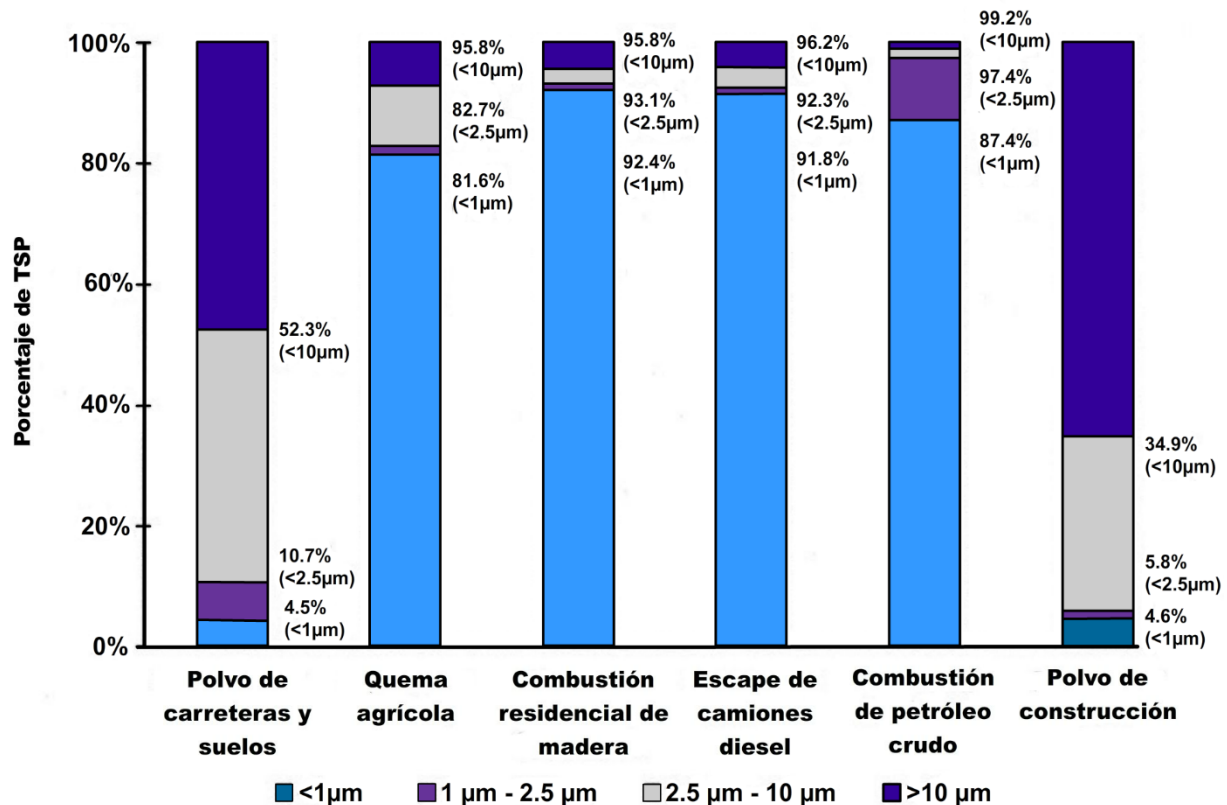


Figura 4. Distribución de tamaños de partículas suspendidas medidas a partir de fuentes de emisión comunes.

Fuente: Watson & Chow (1998).

Entre las fuentes naturales de partículas finas se encuentran emisiones volcánicas, incendios de bosques y las partículas arrastradas por el viento, como puede ser el aerosol marino y emanaciones de la flora (Arciniégas, 2012; Echeverri & Maya, 2008).

Dentro de las fuentes antropogénicas de material particulado fino se puede destacar principalmente las emisiones de los motores de vehículos (Hasheminassab et al., 2014) siendo una de las fuentes primarias más significativas que contribuye con las partículas de los gases de escape, las partículas que se originan por el desgaste de los frenos y neumáticos, y la

resuspensión de las partículas que previamente se asentaron en la superficie de la carretera (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Las concentraciones de PM_{2.5} relacionadas con el tráfico en las ciudades son altamente variables en el espacio y el tiempo debido a la gran heterogeneidad de las tasas de tráfico, los modos de conducción y los factores de emisión del contaminante. Debido a la contaminación provocada por fuentes antropogénicas, las emisiones de PM_{2.5} han conllevado a una creciente preocupación, sobre todo en entornos urbanos, donde la mayor densidad de población conduce a el aumento exponencial del parque automotor y a una mayor generación de contaminantes y por tanto, a una mayor exposición humana a contaminantes en el aire (Martins & Carrilho da Graça, 2018; Cheng et al., 2015).

6.1.2. Concentración en Ambientes Interiores

En el entorno urbano, las personas pasan la mayor parte del tiempo en interiores, representando aproximadamente 60–80% del mismo, ya sea en la casa, en el trabajo, y en el caso de los niños, al menos un tercio de su día se pasa en el aula, donde los niveles de PM pueden variar sustancialmente del exterior debido al aislamiento del edificio, las fuentes interiores y la resuspensión (Amato et al., 2014). Por lo tanto, entender la relación presentada entre los niveles de material particulado PM_{2.5} en ambientes interiores y exteriores puede representar la clave para evaluar la incidencia de la exposición a este contaminante (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Diversos estudios muestran que las partículas de origen ambiental penetran en espacios interiores donde las personas pasan la mayor parte de su tiempo (Adgate, Ramachandran, Pratt, Waller, & Sexton, 2003), esto debido a que, las concentraciones de material particulado en interiores se ven afectadas por el transporte de partículas al interior mediante la ventilación y los

flujos de aire de infiltración (Martins & Carrilho da Graça, 2018), a través de flujos convectivos, por medio de puertas y ventanas abiertas, o difusionales por medio de grietas, fisuras y otras pequeñas aberturas no intencionadas (Hasheminassab et al., 2014). Además de los valores absolutos de los parámetros físicos, procesos internos como el acabado en el aula, el mobiliario y los textiles, puede actuar como reservorios significativos, y tener un impacto en la calidad del aire en interiores (Chatzidiakou et al., 2012).

En escuelas y oficinas, las impresoras y dispositivos similares, como máquinas de fax o fotocopiadoras, tienen incidencia en los niveles de partículas finas. Aunque uno de los contribuyentes más comunes a los altos niveles en interiores es la suspensión de partículas por el movimiento de los ocupantes. Esta es más relevante en ambientes interiores donde el movimiento es frecuente, como en edificios residenciales y escuelas; y contra intuitivamente, las actividades de limpieza, como barrer, limpiar el polvo o aspirar, también pueden contribuir a resuspender las partículas sedimentadas (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Además, el ambiente del aula normalmente no contiene fuentes de combustión interna, pero muchos niños se encuentran en un espacio limitado durante un período de varias horas con condiciones de ventilación relativamente pobres. Este escenario puede conducir a patrones de PM_{2.5} interiores completamente diferentes de aquellos observados en ambientes exteriores y otros ambientes interiores, como las residencias (D. Bi et al., 2018).

Los procesos de infiltración de las partículas en el ambiente exterior implican su transporte al interior por medio de los flujos de aire, a través de una combinación de procesos de penetración, ventilación natural y mecánica (Martins & Carrilho da Graça, 2018). Por lo cual deben tomarse medidas efectivas para controlar la introducción de contaminantes a dichos ambientes, sobre todo luego de que varios estudios epidemiológicos han demostrado que la

exposición a partículas interiores de origen exterior es más perjudicial (Martins & Carrilho da Graça, 2018; Hasheminassab et al., 2014). En este contexto, la concentración de PM_{2.5} al aire libre y su respectiva tasa de deposición, representan los factores más importantes que afectan la concentración en interiores (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

6.1.3. Riesgos a la Salud

El PM inhalable incluye partículas finas y gruesas. Los efectos adversos para la salud se atribuyen principalmente a las fracciones de PM más finas (Halek et al., 2013). Estas pueden implicar mayores riesgos para la salud, ya que en general son productos de procesos de combustión (Fromme et al., 2008). Se sabe que la inhalación de PM conlleva un mayor riesgo para los niños que los adultos debido a la diferente eficiencia de deposición fraccional y a una ventilación mucho mayor en relación con el tamaño de sus pulmones (Chatzidiakou et al., 2012).

Debido a que el tamaño de las partículas es un factor importante en la determinación de los efectos sobre la salud (Echeverri & Maya, 2008), las partículas finas PM_{2.5} se consideran como un contaminante de preocupación emergente en la actualidad. En concordancia a lo expuesto por diferentes estudios, parece indicarse una mayor asociación de las partículas más finas con los indicadores de mortalidad y morbilidad de la población, relacionándose con enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y en general, con una mortalidad prematura a escala global (OMS, 2018a; Han et al., 2016).

La principal área de afectación de las partículas finas es el sistema respiratorio, teniendo una alta correlación con enfermedades respiratorias como bronquitis, asma, enfisema y pulmonía. Debido a su diámetro más pequeño, las partículas en el rango de PM_{2.5} pueden dañar las células de las vías respiratorias, desencadenando una respuesta inflamatoria que disminuye la

inmunidad pulmonar y facilita los ataques de patógenos infecciosos. La penetración más profunda en los pulmones permite que el PM_{2.5} ingrese al torrente sanguíneo, lo que lleva a la hipertensión y daña los vasos sanguíneos causando diferentes tipos de enfermedades cardíacas y otras complicaciones cardiovasculares. Una vez en el torrente sanguíneo, el PM_{2.5} puede diseminarse a otros órganos, como el corazón, dañando su estructura y función celular (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Adicional a esto, la exposición continua a altos niveles de PM_{2.5} se ha relacionado con enfermedades como la diabetes y los trastornos prenatales, que a su vez pueden provocar partos prematuros y problemas de salud posparto que en última instancia pueden resultar en muerte prematura (Barría, Calvo, & Pino, 2016). Muchos otros impactos potenciales en la salud se han relacionado con PM_{2.5}, incluidas sus propiedades mutagénicas y la conexión con trastornos de la inmunidad, lo que crea la necesidad de más investigación (Han et al., 2016).

En muchos casos las partículas exteriores se introducen en ambientes interiores, y como resultado los individuos reciben una fracción sustancial de su exposición a partículas generadas por el ambiente mientras se encuentran en el interior. Varios estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición a PM en interiores de origen externo, es más nociva en comparación con la exposición a partículas emitidas en interiores o la exposición a la concentración total interior (Hasheminassab et al., 2014; Koenig et al., 2005).

Finalmente, se establece que aunque la contaminación en interiores y su efecto sobre la salud ha sido poco investigada, enfatizándose únicamente en determinar sus contribuyentes, se puede estimar que existen diferencias significativas, incluida su concentración, composición, toxicidad y enfoques de gestión (Wilson & Brauer, 2006). Diferentes estudios que midieron la exposición a PM_{2.5} tanto de interior como de exterior, descubrieron que el PM_{2.5} generado al aire

libre mostraba relaciones más fuertes con la disminución de la función pulmonar, disminución de la presión arterial sistólica, aumento de la frecuencia cardíaca y aumento de latidos cardíacos ectópicos supraventriculares que el PM_{2.5} total o generado en el interior (Ji & Zhao, 2015; Allen et al., 2008; Koenig et al., 2005).

6.1.4. Riesgos a la Salud de los Niños

Fuera de la casa, los niños pasan la mayor parte del tiempo en ambientes interiores mientras están en la escuela (Chatzidiakou et al., 2012). Dichas aulas han sido identificadas como uno de los microambientes más importantes donde pueden ocurrir exposiciones a PM_{2.5} con relevancia para la salud, esto debido a que se propician diferentes factores que pueden contribuir al transporte, la mezcla y la generación de partículas en interiores. Sin embargo, se encuentran datos limitados disponibles sobre las fuentes o componentes de PM_{2.5} presentes en el entorno del aula que pueden explicar resultados de salud como la morbilidad del asma o la neurocognición (Carrion-Matta et al., 2019).

La exposición durante las actividades educativas en las aulas es motivo de especial preocupación debido a la etapa de desarrollo en la que se encuentran los niños (Halek et al., 2013) y a las diferentes condiciones metabólicas que poseen (*ver Figura 5*), representando la población con la mayor susceptibilidad a los efectos adversos de salud a causa de la contaminación atmosférica, con consecuencias que pueden afectarlos hasta la edad adulta (UNICEF, 2016).

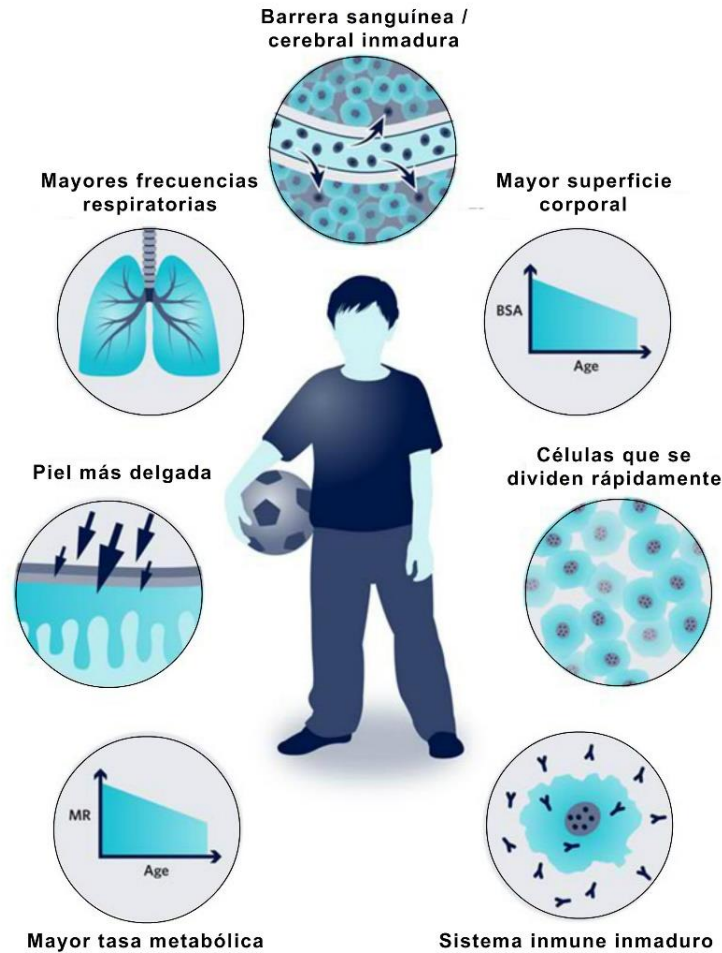


Figura 5. Condiciones metabólicas que generan susceptibilidad de los niños.

Fuente: The royal children's hospital Melbourne (s.f.)

Los niños son más vulnerables a las exposiciones en el aire que los adultos porque sus pulmones en desarrollo respiran más aire en comparación con sus cuerpos inhalando una dosis normalizada más alta de partículas en el aire en comparación con los adultos. Debido a su capacidad pulmonar y a mayores tasas de respiración para la actividad física, aparte de su capacidad subdesarrollada para dar respuesta a niveles de contaminantes, eso provoca que se tengan efectos sobre la salud como enfermedades respiratorias y bajo rendimiento cognitivo (Rivas et al., 2014; Chatzidiakou et al., 2012).

En diferentes estudios se han encontrado pruebas de que el aire puede representar una fuente de una amplia gama de contaminantes del aire orgánicos e inorgánicos con propiedades tóxicas, cancerígenas, alergénicas y propiedades adversas (Halek et al., 2013), identificando este tipo de ambientes como una amenaza potencial para la salud de estos (D. Bi et al., 2018) y su calidad de vida.

A temprana edad, los pulmones se encuentran en proceso de crecimiento y desarrollo y debido a esto, los contaminantes finos transportados por el aire pueden entrar a los pulmones con mayor facilidad, causando y exacerbando enfermedades que amenazan la vida. Se evidencia una capa celular más permeable, y vías respiratorias más pequeñas que las vías respiratorias adultas, con más probabilidad de obstrucciones, una mayor tasa de respiración, que llega a ser inclusive dos veces más rápido que la adulta (*Figura 6*), asimilando más aire por unidad de peso corporal.

Por último, un sistema inmunológico en desarrollo, favorece la susceptibilidad de afectaciones por aire contaminado. Además, durante la primera infancia, los niños son susceptibles a virus, bacterias y otras infecciones, lo que aumenta los riesgos de infección respiratoria y reduce su capacidad para combatirla (UNICEF, 2016).

TASA DE RESPIRACIÓN

La respiración de los niños es mucho más rápida porque tienen poco espacio para intercambiar el oxígeno y el dióxido de carbono en sus pulmones

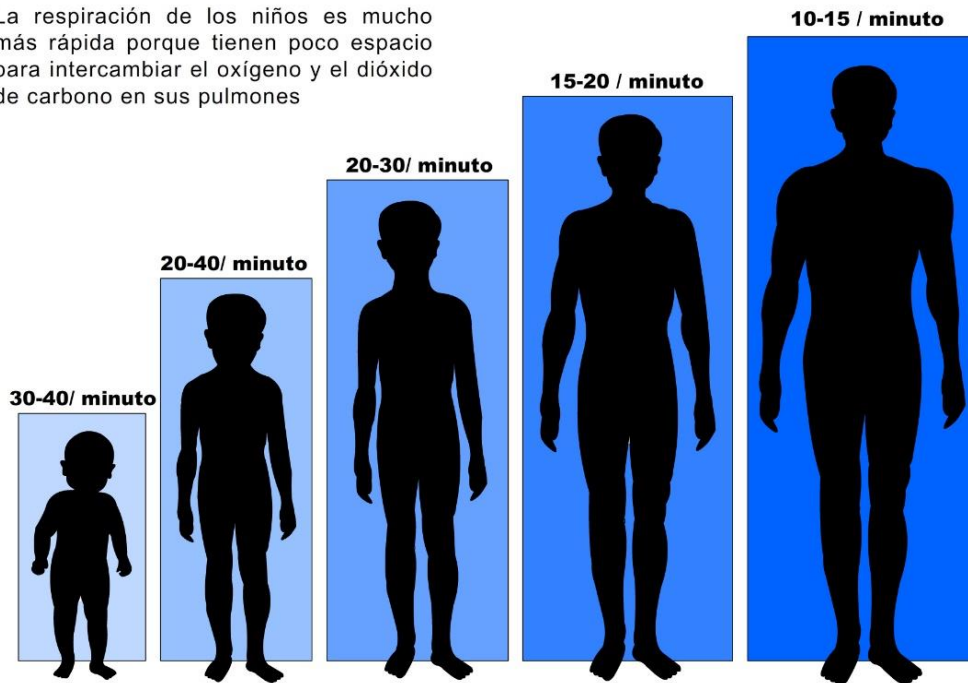


Figura 6. Tasa de respiración de niños en diferentes etapas de desarrollo vs adultos.

Fuente: Basado en Christopher & Dana Reeve Foundation (2019).

Los estudios han demostrado que la capacidad pulmonar de los niños que viven en ambientes contaminados puede reducirse en un 20%, similar al efecto de crecer en un hogar con el humo de cigarrillo, aparte que las partículas con un diámetro aerodinámico $<2,5 \mu\text{m}$ se han asociado con exacerbación del asma y deterioro cognitivo en niños (Carrion-Matta et al., 2019), provocando una deficiencia en las tasas de crecimiento y afectando el desarrollo de los pulmones de los niños. Algunas de las enfermedades desarrolladas pueden ser bronquitis y tos crónica, incluso provocando aumentos de la mortalidad infantil (UNICEF, 2016).

También se ha encontrado evidencia de que las partículas finas pueden atravesar la barrera hematoencefálica, que es menos resistente en los niños y causa inflamación, dañando el tejido cerebral y perjudicando permanentemente el desarrollo cognitivo, encontrándose

vinculado al estrés oxidativo, inflamación de neuroinflamaciones y neurodegeneración. Incluso llegando a cruzar la barrera placentaria y lesionar al feto en desarrollo cuando la madre está expuesta a contaminantes tóxicos (UNICEF, 2016; Barnett et al., 2005).

7. Materiales y Métodos

7.1. Área de Estudio

La ciudad de Barranquilla se encuentra ubicada al norte de Colombia, en el departamento del Atlántico, sobre la ribera occidental del río Magdalena, en cercanía de su desembocadura en el mar Caribe, siendo considerado un puerto aéreo, marítimo, fluvial y de comunicaciones (Figura 7).

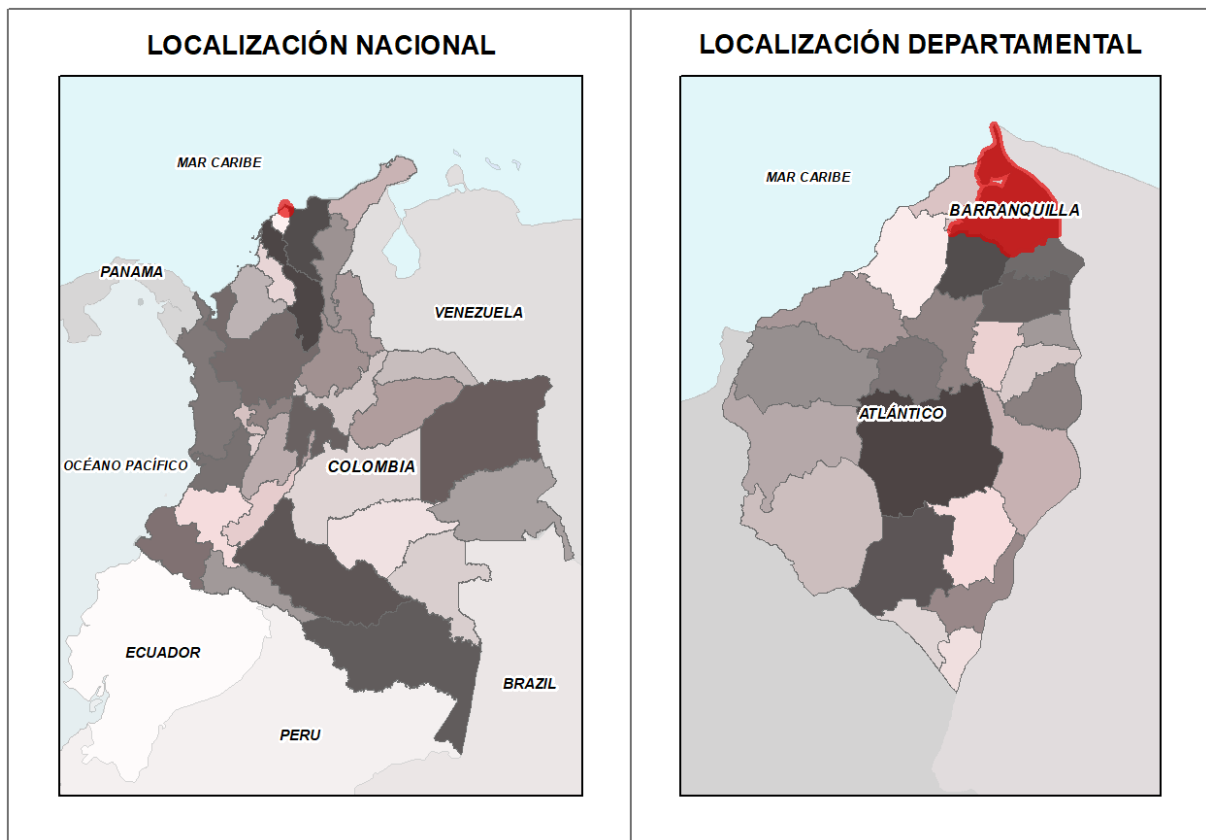


Figura 7. Delimitación de Área de Estudio.

Fuente: Autores.

La ciudad de Barranquilla cuenta con una población de 1,12 millones de habitantes, de acuerdo con los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2018, cifra que representa aproximadamente el 48% de la población para el departamento del Atlántico. Dentro de esta población, el porcentaje de individuos que se encuentran entre las edades de 0 a 14 años corresponde al 22,6%, representando un grupo dentro de la edad escolar y que encierra el intervalo de la población objeto de este estudio entre 8 a 14 años (DANE, 2019).

Los individuos en edad escolar se ven distribuidos en los 154 colegios públicos y una cifra desconocida de colegios privados, que prestan el servicio educativo desde preescolar hasta bachillerato (Alcaldía de Barranquilla, 2020), implicando un entorno donde pueden verse afectados por las problemáticas ambientales en la ciudad.

La ubicación geográfica de Barranquilla, sumado a su capacidad comercial, industrial y portuaria representan una puerta hacia el plano departamental, regional y mundial, constituyendo un territorio debidamente conectado con su infraestructura portuaria, terrestre y aérea, con fácil acceso y con áreas suficientes para procesos logísticos, de tal manera que pueda responder a los retos competitivos que la globalización plantea como el aprovechamiento de los diferentes acuerdos comerciales (Alcaldía de Barranquilla, 2012).

Sin embargo, a pesar del desarrollo y los ingresos tributarios que obtiene la ciudad por parte de las actividades comerciales, industriales y portuarias, estas generan contaminación atmosférica, como las emisiones de gases, material particulado y ruidos que producen los vehículos, los residuos sólidos y vertimientos domésticos, industriales, agropecuarios y mineros, que al mismo tiempo terminan en las aguas naturales de la estructura ecológica principal.

La contaminación ambiental en la ciudad es generada por la presencia de basureros a cielo abierto, mataderos clandestinos, quema de basuras y de capas vegetales para la preparación de terrenos para la siembra, la utilización de carbón y leña para la cocción de los alimentos y la explotación de canteras se encuentran dentro de sus aspectos más críticos, sin desconocer la gravedad de los vertimientos que sobre los cuerpos de agua ocasionan industrias y centros poblados sin alcantarillados sanitarios (Gobernación del Atlántico, 2016).

Además, la flota vehicular compuesta por un parque automotor de alrededor de 195.664 unidades (Alcaldía de Barranquilla, 2020), que aunque parece reducida en contraste con la población de la ciudad, puede contribuir significativamente con la emisión de diferentes contaminantes, requiriendo de su monitoreo continuo.

Para esto, la ciudad de Barranquilla dispone de 3 estaciones de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real, teniendo 2 estaciones fijas y 1 estación móvil. Las estaciones fijas se encuentran ubicadas en la Escuela de Policía Antonio Nariño y en el parque Tres Avemarías. Estos puntos fueron escogidos por encontrarse dentro del área de influencia directa de las fuentes de emisiones más representativas de la ciudad, es decir, el corredor de la Vía 40 y la Avenida Circunvalar. De igual manera, estos puntos permiten mostrar la tendencia de las trayectorias de los contaminantes durante el proceso de dispersión. Por su parte, la estación móvil, se encuentra ubicada en un tráiler sujetado a un vehículo (Alcaldía de Barranquilla, 2016), ubicándose en las instalaciones de la Universidad del Norte en el periodo que encierra el presente estudio (Barranquilla Verde, 2018).

7.2. Comportamiento Meteorológico

Para el reconocimiento del área de estudio y las variables de influencia en los resultados, se recopila información pertinente del comportamiento meteorológico histórico de la ciudad de Barranquilla, la cual se fundamenta en una dinámica atmosférica activa y cambiante, condicionada por su ubicación en una zona intermedia entre dos extremos climáticos, el árido del norte del Desierto de la Guajira y la región húmeda al sur que se inicia en el valle medio del Magdalena y recibe la influencia del mar Caribe (Alcaldía de Barranquilla, 2012).

7.2.1.1. Velocidad y Dirección del Viento

El comportamiento del viento en la ciudad de Barranquilla resulta de su ubicación estratégica, teniendo en cuenta que Colombia se encuentra en la Zona Ecuatorial y debido a esto, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) generalmente pasa dos veces al año por el territorio nacional. La velocidad del viento presenta variaciones dependiendo de la temporada, con una mayor intensidad de noviembre a abril, cuando la ZCIT se encuentra más hacia el sur, y una menor intensidad de mayo a octubre más al norte, con influencia del norte y noreste. Por su parte, la dirección del viento dominante suele variar en el transcurso del año, registrando una inclinación temporal hacia el sur en el periodo de diciembre a mayo, y dirigiéndose hacia el oeste entre junio y noviembre (Barranquilla Verde, 2018).

Durante la época seca, la ZCIT se encuentra en posición Sur y el Sistema de Alta Presión de las Azores, se encuentra al sur de su posición normal. Como consecuencia los vientos del Norte y Noreste soplan con una intensidad pronunciada y una naturaleza frecuentemente variada, alcanzando una velocidad de 8 m/s, y con frecuencia 10 m/s. Durante noviembre a mayo, el viento proveniente del mar elude las bajas serranías, arrastrando la humedad sin permitir la

formación de nubes, conllevando a escasa o nula lluvia en la faja litoral. A nivel local, el régimen de circulación del viento se manifiesta en brisas de mar a tierra, beneficiando la faja aledaña (Alcaldía de Barranquilla, 2012). Durante la época de lluvias la ZCIT se ubica en posición Norte, actuando moderadamente sobre la costa Caribe, y los vientos Alisios son sustituidos por vientos de poca fuerza y dirección variable. La velocidad promedio del viento es de 4 m/s, registrándose vientos fuertes desde 10 m/s a 12 m/s de escasa duración, que acompañan las lluvias torrenciales, cuando algún sistema importante transita por el área (Alcaldía de Barranquilla, 2012).

7.2.1.2. Radiación Solar y Temperatura

Por la ubicación del distrito de Barranquilla, la radiación solar se relaciona con los valores de precipitación, donde la menor radiación coincide con el periodo más lluvioso y la más alta con la época menos lluviosa y seca. La ciudad mantiene una gran incidencia de luz solar durante el día, entre las 10:00 a 15:00 horas, cuando experimenta el mayor brillo. Por lo general, con intensidades mayores a 800 W/m² entre diciembre y abril, y entre 600 W/m² y 800 W/m² entre agosto y noviembre. Los meses de mayor brillo solar corresponden a diciembre y enero, con 228,4 y 238,5 horas/mes respectivamente y los menores registros se presentan en septiembre y octubre con 130,9 y 127,0 horas/mes. Las implicaciones de un incremento de horas de brillo solar se reflejan en la tendencia a la aridez, erosión y degradación del suelo (Barranquilla Verde, 2018; Alcaldía de Barranquilla, 2012).

En cuanto a la temperatura, los niveles elevados se experimentan entre los meses de mayo y septiembre con valores mayores a 28 °C, cuando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se encuentra encaminada hacia el norte. Las temperaturas medias mensuales fluctúan

entre 25 °C y 30 °C, con las mínimas alrededor de 24 °C, mientras que las máximas alcanzan 34 °C. El comportamiento de la temperatura es de régimen isotérmico con un promedio de 27 °C. La temperatura suele variar durante el día, y es entre las 11:00 hasta las 16:00 horas cuando se presentan las más elevadas entre 29 °C a 35 °C. El régimen diario de la circulación del viento, que se manifiesta en las brisas de mar a tierra, modifica favorablemente la temperatura en la franja cercana del litoral (Barranquilla Verde, 2018; Alcaldía de Barranquilla, 2012).

7.2.1.3. Humedad Relativa y Precipitación

La humedad es poco variable ya que la cercanía al mar, la ubicación a orillas del río Magdalena, la zona del Parque Natural Nacional Isla Salamanca y los humedales del delta de la desembocadura del río Magdalena, hacen que la ciudad tenga bastante humedad, pero siendo modificada por los vientos secantes que la empujan hacia el interior para producir abundantes lluvias en las estribaciones de los Andes (Alcaldía de Barranquilla, 2012).

Las precipitaciones en Barranquilla suelen ser menores entre los meses de diciembre a abril con un promedio de 0 mm a 50 mm; mientras que en el periodo de mayo a octubre se dan las mayores, donde septiembre y octubre son los meses con mayor precipitación con 150 mm a 200 mm. El número de días con precipitación oscila a lo largo del año entre 0 y 14 días. La duración de los eventos es en general de 90 minutos, con eventos extraordinarios de duración superior a 120 minutos, siendo de corta duración, pero gran intensidad. Por lo general, las precipitaciones en el área se producen entre las 11:00 y 16:00 horas, en su mayoría a partir de las 13:00 horas, y en menor cantidad en la madrugada (Barranquilla Verde, 2018; Alcaldía de Barranquilla, 2012).

7.3. Puntos de Muestreo

Las concentraciones de material particulado PM_{2.5} fueran determinadas en dos (2) Instituciones de Educación Básica (IE), denominadas como A y B en el presente documento. En cada IE fue considerado un punto de muestreo en un ambiente exterior y otro punto dentro de un salón de clases.

7.3.1. Ubicación Puntos de Muestreo

La delimitación de los puntos de monitoreo del contaminante fue considerada bajo la premisa de evaluar y comparar la influencia de la ubicación estratégica de las instalaciones de cada escuela. Teniendo esto, se seleccionaron puntos que permitan evidenciar posibles diferencias en un área con características de fondo urbano y en un área cercana a la influencia del tráfico.

Conforme a lo anterior, la Institución Educativa A (IEA) se encontraba ubicada en la localidad Norte Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla, encerrando puntualmente el barrio Ciudad Jardín, en un sector residencial con predominancia de establecimientos comerciales en sus alrededores y un tráfico intermitente de automotores por vías principales cercanas.

Por su parte, la Institución Educativa B (IEB) se encontraba situada en la localidad Metropolitana de la ciudad, abarcando específicamente el barrio 7 de abril, en un sector predominantemente de carácter residencial, pero con cercanía de áreas industriales y un flujo constante de automotores, como resultado de circundar directamente con la Avenida Circunvalar.

En la *Figura 8* se puede observar la ubicación de los puntos de monitoreo así como las estaciones meteorológicas de la Universidad de la Costa y la Estación Escuela de Policía Antonio Nariño, perteneciente a la Red de Monitoreo de la ciudad.

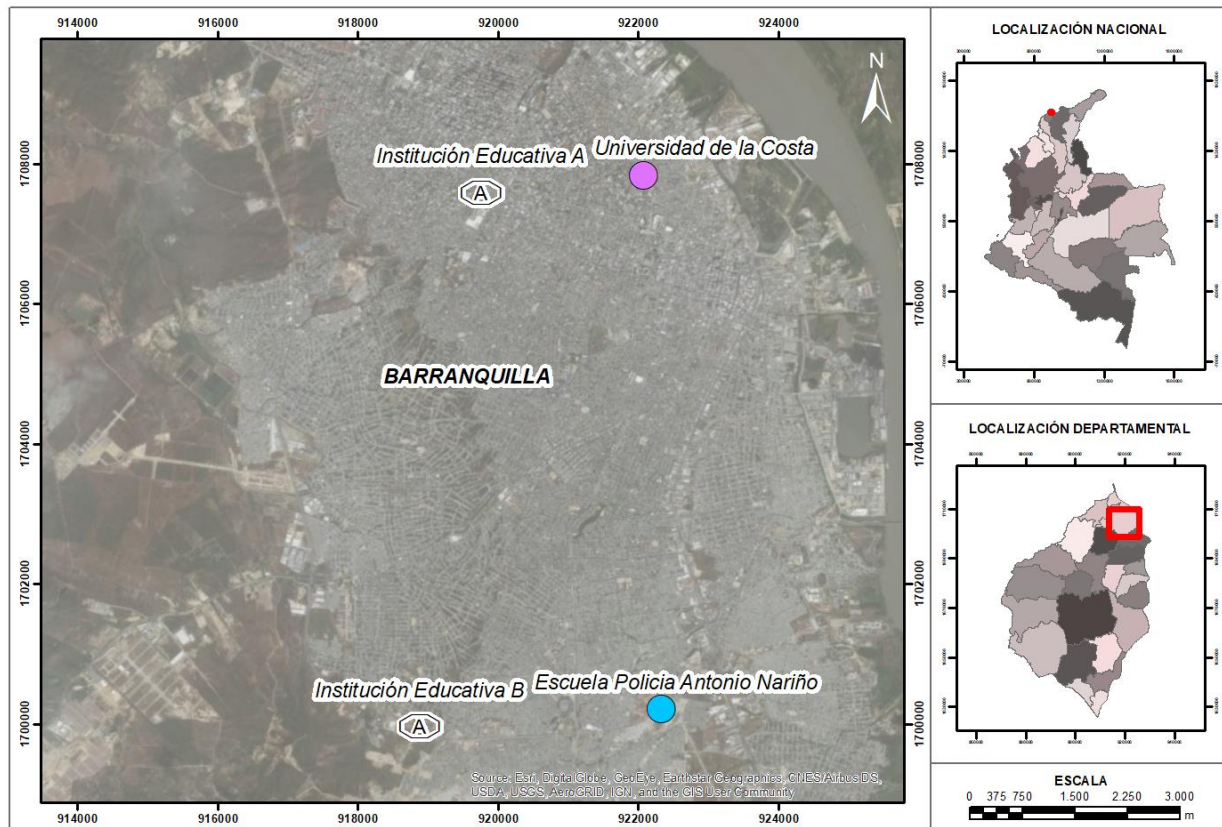


Figura 8. Área de Estudio con indicación de Puntos de Muestreo.

Fuente: Autores.

Por medio de la *Figura 8*, es posible determinar la ubicación de las estaciones de monitoreo instaladas en las instituciones educativas, al tiempo que se puede apreciar la estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la Universidad de la Costa, la cual demuestra una notable cercanía de esta última con la Institución Educativa A. De la misma manera, se observa la Estación Escuela de Policía Antonio Nariño y su estrecha ubicación con respecto a la Institución Educativa B.

7.3.2. Descripción de Puntos de Muestreo

Los puntos de muestreo internos en ambas IE consistieron en aulas de clase, las cuales presentaron variaciones en cuanto a sus dimensiones, su ubicación y su infraestructura (*Tabla 1*).

Tabla 1.

Características generales de los puntos de muestreo interiores en las instituciones educativas.

	IEA	IEB
Área (m²)	40,87	30,40
Estudiantes	20	24
Ventilación	Natural con Ventanas	Natural con Calados
Ubicación	Segundo Piso/Adyacente a Patio de Recreo	Segundo Piso/Adyacente a Patio de Recreo y Cafetería

Fuente: Propia

Como se observa en la *Tabla 1*, las IE diferían en el área, siendo IEA más grande, y en la cantidad de estudiantes, donde IEB contaba con un mayor número. A pesar de esto, la principal diferencia contempla su sistema de ventilación y su ubicación. Ambas IE se ubicaban en el segundo piso de las instalaciones, y contiguos al patio de recreo, pero IEB mantenía cercanía con la cafetería a diferencia de IEA, que se encontraba cercana solo a otras aulas de clase.

Debido a que la estructura escolar de cada Institución Educativa fue variable, se considera importante especificar las características de cada uno de los espacios internos de muestreo. En este apartado se dispone información respecto a la distribución espacial a partir del diseño de su respectivo plano isométrico y geométrico.

El plano isométrico de la Institución Educativa A se expone en la *Figura 9*.

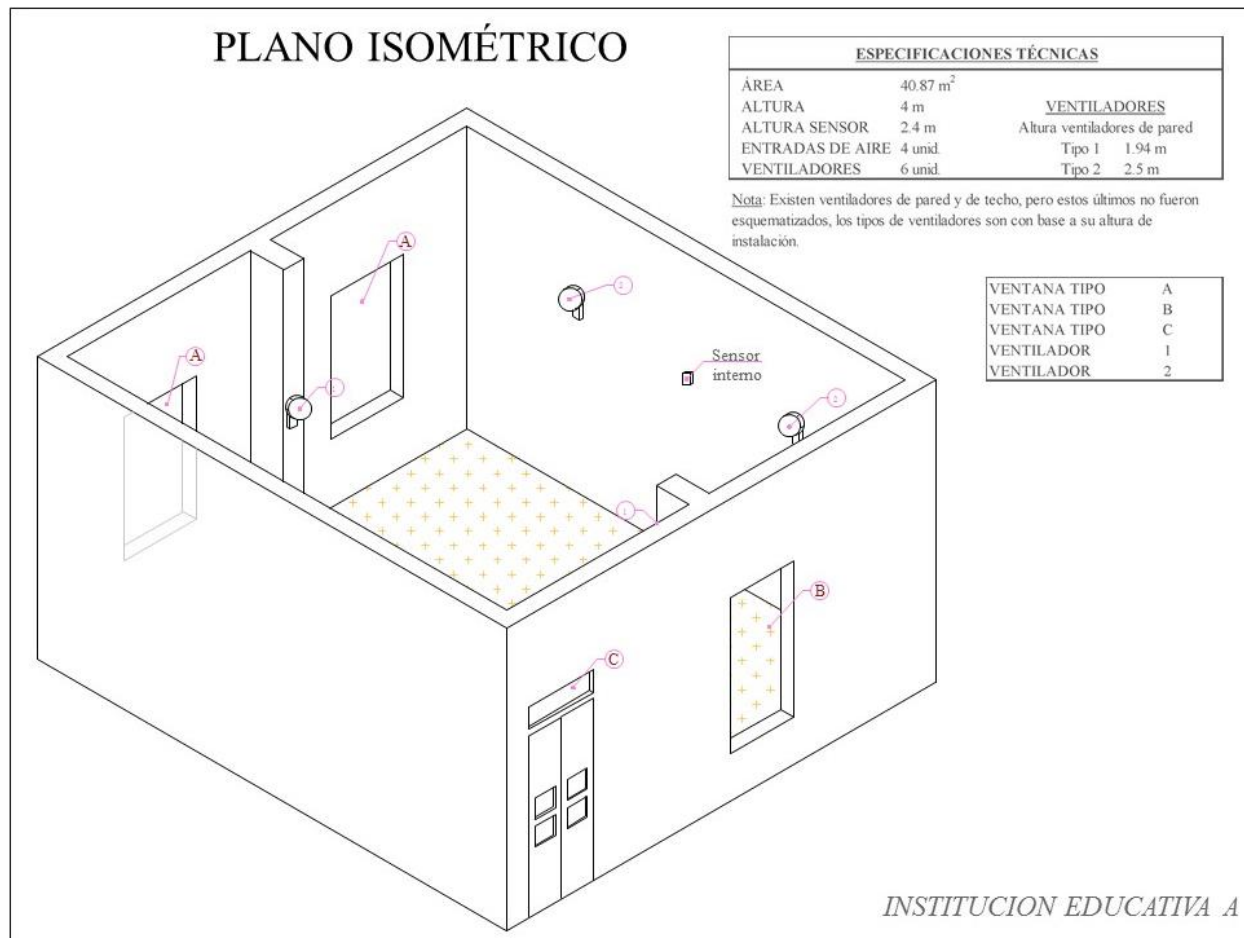


Figura 9. Plano Isométrico Institución Educativa A.

Fuente: Autores.

Para la Institución Educativa A fue seleccionada como espacio de muestreo interno, un aula de clases con un área de 40,87 m². De acuerdo con el plano isométrico se puede apreciar una visión general de la distribución del aula, determinando las entradas de aire presentes y la ubicación de los sensores de medición del contaminante (*Ver Anexo 1*). Un plano detallado de las características del aula de clases se encuentra en la *Figura 10*.

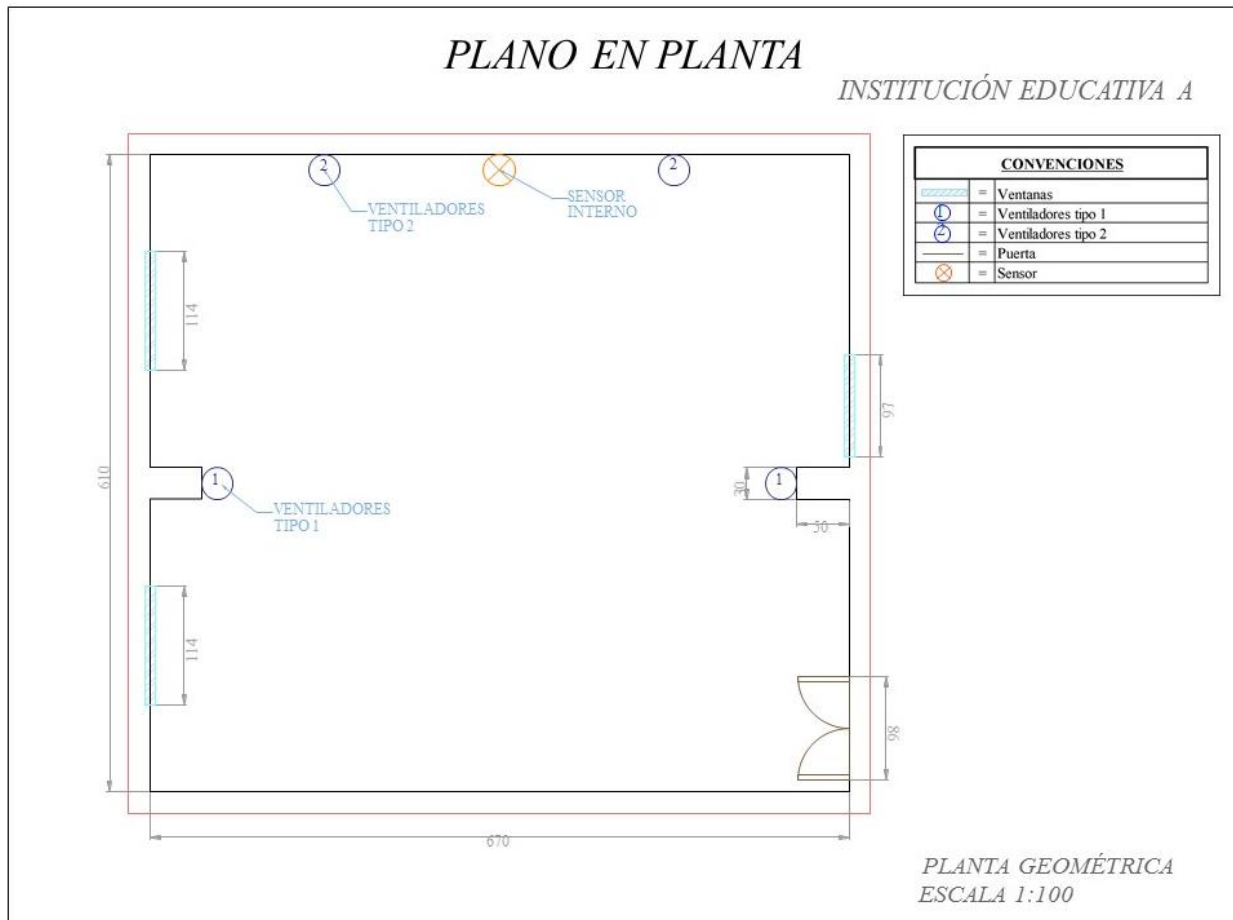


Figura 10. Plano en Planta Institución Educativa A.

Fuente: Autores.

Tomando como referencia el plano en planta, se establece una geometría rectangular, manteniendo una distribución de espacio uniforme en su interior. Dentro de este, la ubicación del sensor corresponde al fondo del aula de clases, a una altura cercana a los 2,4 metros, en medio de dos (2) ventiladores que hacen parte del sistema de entrada de aire (Ver Anexo 3).

El plano en planta de la Institución Educativa A evidencia un sistema de ventilación comprendido por una (1) puerta y cuatro (4) ventanas. Las ventanas se distribuían en dos (2) situadas en el extremo izquierdo del aula, una (1) en el extremo contrario, paralelo a la puerta, y una (1) ventana restante en la parte superior. Los conjuntos de ventanas fueron clasificados en

diferentes tipos conforme a sus dimensiones y geometría asociada. Por medio del esquema de entradas de aire se determinan características geométricas de una (1) puerta y tres (3) tipos de ventanas en el aula de la Institución Educativa A (*Figura 11*).

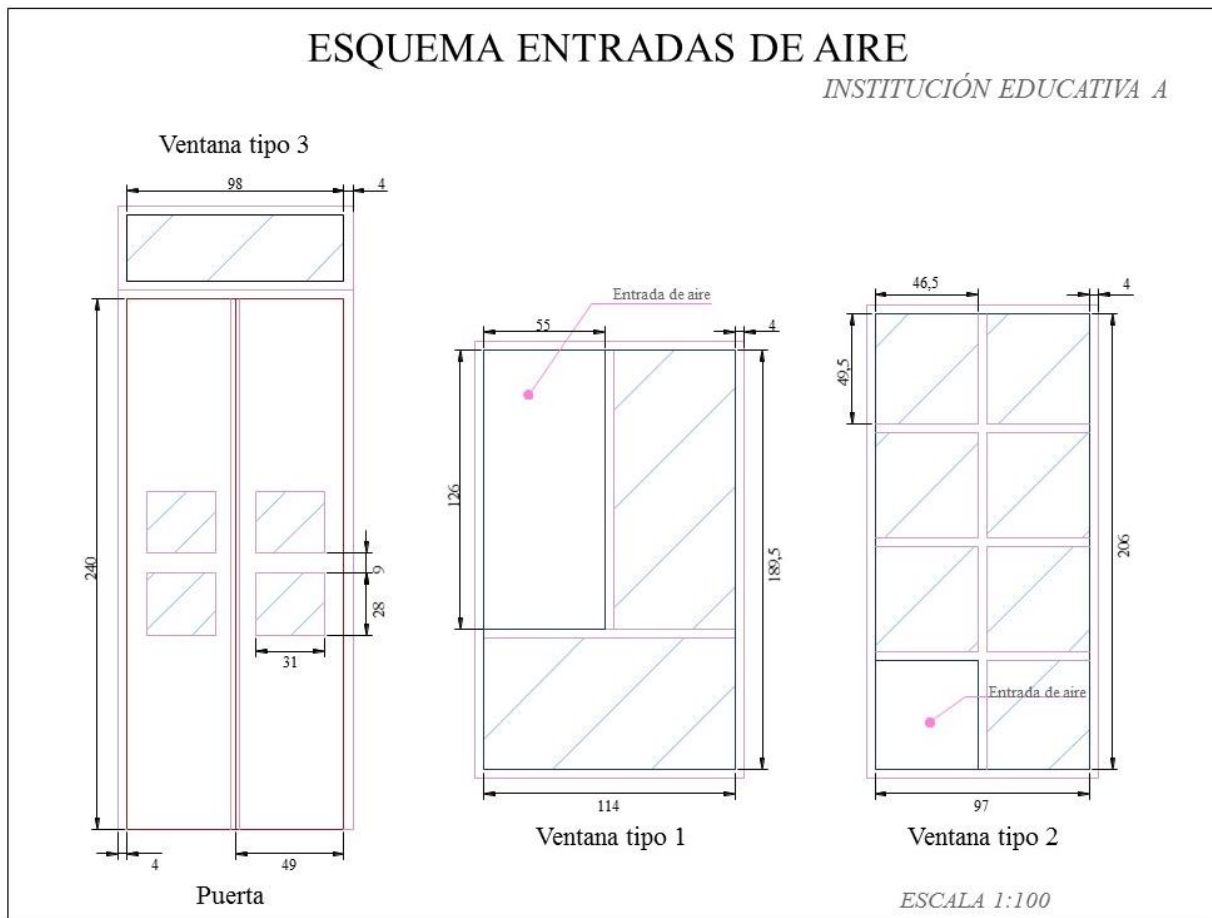


Figura 11. Esquema Entradas de Aire Institución Educativa A.

Fuente: Autores.

Primeramente, como primer sistema de entrada de aire, se dispone una puerta con dimensiones de 2,40 m, dividida en dos (2) compuertas de 49 cm cada una. Posteriormente, se observa la Ventana Tipo 1, con una geometría de carácter rectangular y dimensiones de 114 cm de ancho por 189,5 cm de alto, dividiéndose en un (1) bloque inferior y dos (2) bloques superiores. Puntualmente sobre uno de estos bloques superiores, se localiza la principal entrada

de aire directa en este tipo de ventana, detalle que se puede apreciar en la *Figura 11*, señalando aquellos bloques que se encuentran cubiertos por fibra de vidrio con líneas azules y, por lo tanto, no se consideran una entrada directa de aire, a menos que sea como resultado de procesos de infiltración de partículas.

En segundo lugar, la Ventana Tipo 2 presentaba una geometría similar a la Ventana Tipo 1, pero difiriendo en sus dimensiones con 97 cm de ancho por 206 cm de alto, divididos en 8 bloques. La entrada de aire se ubica en el bloque extremo izquierdo inferior. Nuevamente, los bloques con fibra de vidrio se representan con líneas azules en la *Figura 11*. Finalmente, la Ventana Tipo 3 consistía en una compuerta rectangular de 98 cm de ancho y aproximadamente 45 cm de alto, encima de la puerta de entrada del aula, pero se resalta que, como en casos anteriores, se encontraba cubierta en su totalidad por fibra de vidrio, resultando poco frecuente la utilización de esta entrada de aire.

Cabe aclarar que la Institución Educativa A contaba con un (1) sistema de aire acondicionado y seis (6) ventiladores, estimados como una variable importante para la circulación de aire. Los ventiladores en el aula se catalogaron con base a sus características de diseño, abarcando ventiladores para su instalación en el área del techo y área de pared. Con esto descrito, el aula de clases contaba con dos (2) unidades de tipo techo y cuatro unidades (4) de tipo pared. Dentro de este sistema de tipo pared, los ventiladores fueron clasificados con respecto a su altura de instalación, siendo el Tipo 1 correspondiente a una altura de 1,94 m y el Tipo 2 a unos 2,5 m de altura. En total, se contaba con dos (2) unidades de cada tipo. Por otro lado, se manifiesta la presencia de un sistema de aire acondicionado en el aula de clases, lo cual hace suponer que ventanas y puertas se mantuvieran cerradas la mayor parte de la jornada escolar,

pero debido a que este no se encontraba en funcionamiento durante el monitoreo, no parece representar un impedimento para la circulación de aire desde el exterior.

De esta manera, el sistema de ventilación del espacio interno en la Institución Educativa A se puede resumir en cuatro (4) tipos de entrada de aire, englobando una puerta y tres (3) ventanas de Tipo 1 y Tipo 2, sumado a seis (6) ventiladores entre Tipo Pared y Tipo Techo.

Para la Institución Educativa B, de igual manera, se presenta un plano isométrico y en planta del espacio de muestreo interno, mostrado en la *Figura 12* y *Figura 13* respectivamente.

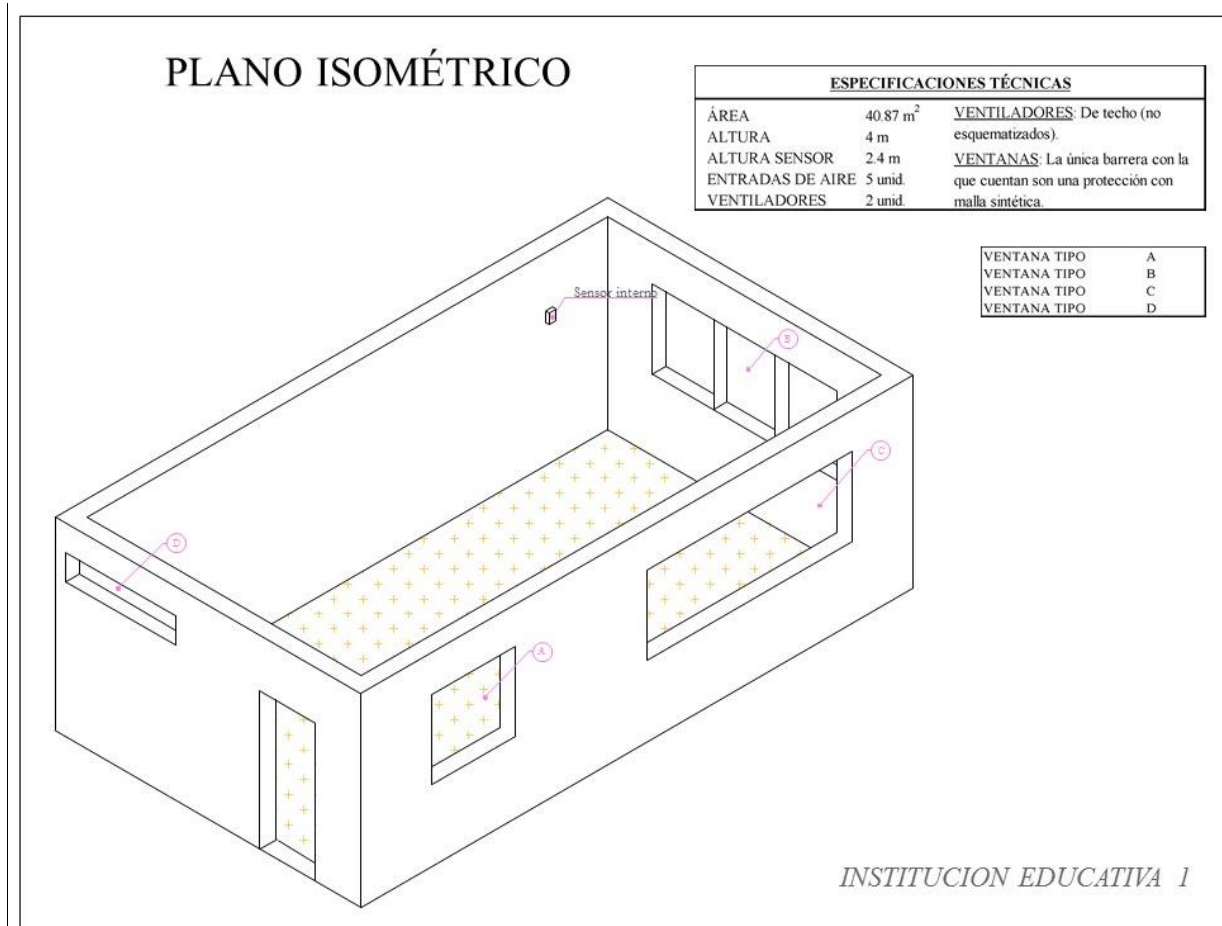


Figura 12. Plano Isométrico Institución Educativa B.

Fuente: Autores.

La Institución Educativa B contaba con un área de 30,4 m², la cual resulta menor en comparación con la Institución Educativa A, pero mantenía una distribución uniforme del espacio (Ver Anexo 2). En este caso, el sensor de medición se ubicaba nuevamente en el fondo del aula de clases, siendo una posición predilecta por no representar una fuente de distracción para los niños, y que permitiera realizar las mediciones sin variables que interfirieran con el proceso (Ver Anexo 4).

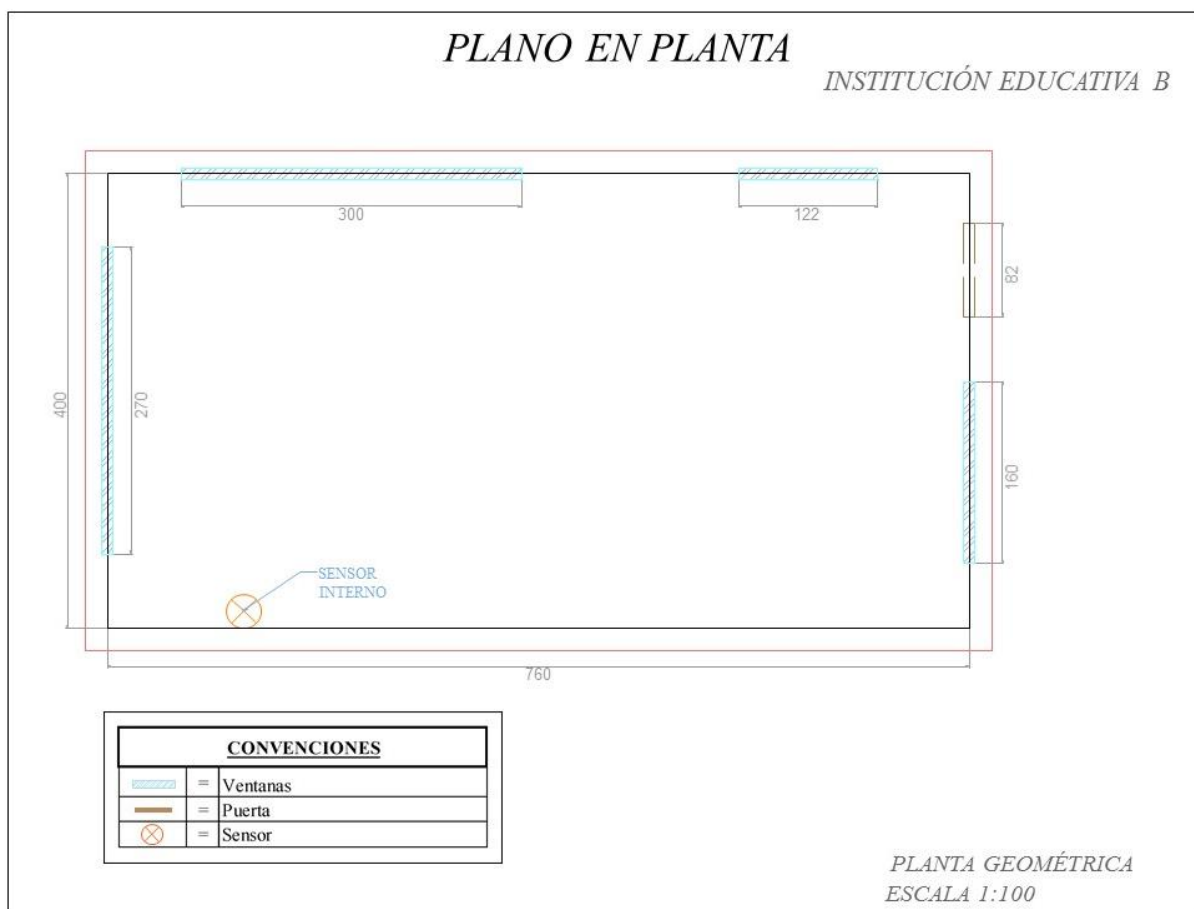


Figura 13. Plano en Planta Institución Educativa B.

Fuente: Autores.

En el plano en planta se facilita la observación de las entradas de aire del espacio interno. De acuerdo con esto, la Institución Educativa B contaba con un sistema de ventilación por medio

de una (1) puerta y un grupo de estructuras conocidas comúnmente como calados, los cuales se describen como pequeñas aberturas en forma ovalada que se suele construir en las paredes para la entrada de aire. En el espacio interno de la Institución Educativa B, los calados se encontraban concentrados en cada una de las paredes del aula, excepto en aquella que compartía con el aula vecina, manteniendo una entrada casi constante de viento desde el exterior, lo cual puede conllevar a un problema por la posible contaminación externa; aunque los calados al presentar una barrera de protección del exterior por medio de una malla sintética, brindaban un mejor panorama para el bienestar de la población vulnerable.

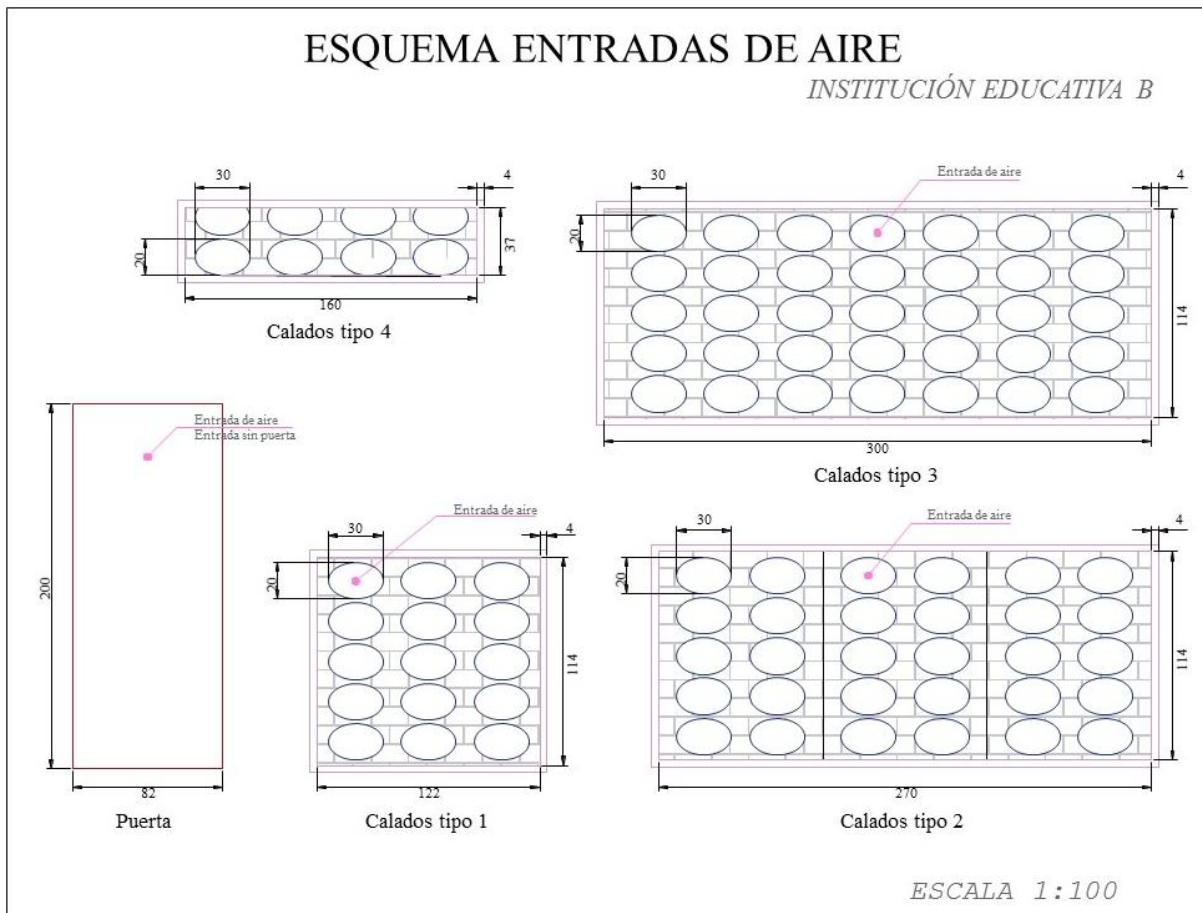


Figura 14. Esquema Entradas de Aire Institución Educativa B.

Fuente: Autores.

En el esquema de entradas de aire de la Institución Educativa B se identifican cuatro (4) tipos de sistemas de calados con geometría general ovalada y dimensiones de 20 cm de ancho por 20 cm de alto, variado solo en el número de columnas (*ver Figura 14*). Como parte del sistema de ventilación se reconoce la presencia de dos (2) unidades de ventiladores de techo, los cuales no fueron esquematizados en los planos.

El sistema de ventilación del espacio interno de la Institución Educativa B se simplifica entonces, en cinco (5) entradas de aire compuestas por una Puerta y cuatro (4) conjuntos de Calados y, por último, dos (2) unidades de ventiladores de tipo techo.

7.4. Equipos de Muestreo

Para determinar las concentraciones de material particulado PM_{2.5} fue utilizado el equipo portátil de bajo costo PA-II-SD *Air Quality Sensor* de la empresa PurpleAir, el cual se basa en un sistema Contador de Partículas Láser Plantower PMS5003, fundamentado en el principio de la detección de partículas que pasan por su reflectividad (PurpleAir, n.d.-a).

En términos generales, los sensores PurpleAir utilizan contadores láser para medir partículas en tiempo real. Un contador láser utiliza un ventilador para extraer una muestra de aire más allá de un rayo láser. Cualquier partícula en el aire reflejará algo de luz del rayo láser en una placa de detección, como el polvo que brilla en un rayo de sol. La placa de detección mide la reflexión como un pulso y la longitud del pulso determina el tamaño de la partícula y el número de pulsos determina el recuento de partículas. Las concentraciones en masa de PM_{1.0}, PM_{2.5} y PM₁₀ se calculan a partir de estos recuentos de partículas (PurpleAir, n.d.-a). Para este sensor, el conteo de partículas es procesado con un algoritmo complejo requerido para el cálculo de la

concentración máscica de material particulado en las fracciones PM_{1.0}, PM_{2.5} y PM₁₀ en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (South Coast AQMD, n.d.).

Este conteo se usa para calcular una concentración de masa, suponiendo una densidad de partículas promedio en un algoritmo desarrollado por el fabricante del contador láser Plantower. Deben usar una densidad promedio porque no todos los PM de un tamaño particular se componen de la misma materia. Esto significa que la concentración de masa informada por un sensor PurpleAir puede variar dependiendo de la composición específica de PM para un área determinada. Para material particulado PM_{2.5}, el equipo PA-II-SD AIR presenta un rango de efectividad de 0 a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un error de incertidumbre máxima de alrededor de $\pm 10\%$ (PurpleAir, n.d.-b).

El equipo PA-II-SD AIR cuenta con dimensiones de 85 mm de diámetro por 125 mm de altura y un peso aproximado de 352 g (*Figura 15*), siendo considerado un equipo portátil, ligero y de sencilla utilización, facilitando el proceso de las mediciones (PurpleAir, n.d.-b). Por lo general, la aplicación de sensores de bajo costo se ha demostrado como prometedora en la detección de heterogeneidad espacial y variaciones temporales, demostrando un rendimiento satisfactorio en comparación con instrumentos de referencia (Li et al., 2020).



Figura 15. Equipo PA-II-SD AIR QUALITY SENSOR.

Fuente: PurpleAir.

Para el conteo de partículas en tiempo real, los datos podían descargarse directamente desde la página oficial de la empresa PurpleAir, aunque esto solo era posible si el equipo contaba con acceso continuo a una red, o en caso contrario, el equipo brindaba la posibilidad de la descarga de información de su almacenamiento interno de datos por medio de un lector interno de tarjetas micro USD con una capacidad de 16 GB y un reloj en tiempo real que registraba los datos y rastreaba el tiempo con o sin conexión WiFi (PurpleAir, n.d.-b).

Los equipos fueron ubicados en el segundo piso de las instalaciones, para evitar barreras como pueden serlo los muros y los árboles, y a una altura superior de dos (2) metros tanto para fuentes externas como internas. Para la ubicación de los equipos se tuvieron en cuenta los accesos de ventilación como puertas, ventanas y aires acondicionados (Barría, Calvo & Pino, 2016) para evitar la influencia directa de niveles exteriores y perturbaciones resultantes de las corrientes de aire. Los dispositivos de interior se colocaron donde fue posible al lado de la pared opuesta a la pizarra para evitar la exposición directa a emisiones de tiza o marcadores (*ver Figura 9 y Figura 12*) (Rivas et al., 2014a).

7.5. Calibración del Equipo

Previo al muestreo en la Institución Educativa A y B, fue requerida una prueba basada en mediciones paralelas de los sensores PA-II-SD *Air Quality* y el equipo Teledyne T640 con la opción 640X, monitor de masa de partículas en las fracciones PM_{2.5}, PM₁₀ y PM grueso en tiempo real por medio del método de espectrometría de luz dispersa (*Figura 16*).



Figura 16. Equipo Teledyne T640.

Fuente: Teledyne API.

Las mediciones en simultáneo se desarrollaron por un periodo de alrededor de tres (3) meses dentro de las instalaciones de la Universidad de la Costa, con el propósito de determinar posibles variaciones entre los resultados y calcular su respectiva corrección. De esta manera, fue factible corroborar que las mediciones fueran concordantes y se pudo establecer una aproximación válida de la incertidumbre de los sensores.

Los resultados obtenidos para cada sensor durante el muestreo en las instituciones educativas, fueron corregidos por medio de la multiplicación de cada valor monitoreado por los factores de calibración calculados, tras haber sido validados, para que cada instrumento obtuviera las concentraciones de partículas reales (Mohammadyan & Shabankhani, 2013b).

7.6. Recolección de Datos

Las mediciones de PM_{2.5} se desarrollaron en simultáneo en el periodo comprendido entre los meses de junio y octubre del año 2019, abarcando mayoritariamente el periodo húmedo de la ciudad de Barranquilla, como posible variable de incidencia en los resultados.

Las mediciones fueron automáticas en tiempo real, con un intervalo de recuento cada 60 minutos de manera ininterrumpida durante todo el periodo de muestreo. Los datos de sensores con acceso a WiFi fueron descargados semanalmente para su respectivo procesamiento, mientras que, en caso de aquellos sensores sin conexión, se recolectaron los datos una vez al mes en promedio. En caso de encontrarse anomalías en los resultados se agendaron visitas periódicas para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos.

Cabe aclarar que al finalizar el periodo de muestreo se recopilaron la totalidad de datos guardados en la memoria de los sensores para complementar las jornadas sin información generadas por posibles problemas de conexión de la red.

7.7. Validación de Datos

Los resultados obtenidos durante el muestreo debieron validarse para asegurar la autenticidad de la información recopilada. Para esto, fue implementada la metodología propuesta por el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire en el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, adoptado por la Resolución 650 de 2010, expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, actualmente reconocido como Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008).

Dentro de la metodología de validación de datos se propone una validación manual diaria a través de las concentraciones diarias obtenidas, los horarios y parámetros como la desviación de los datos, máximos, mínimos y la representación gráfica del comportamiento de las concentraciones obtenidas para el contaminante evaluado, con el propósito de identificar los

valores que se desvinculen del comportamiento esperado o histórico de las variables monitoreadas.

Teniendo esto, se enmarcarán como no válidos aquellos datos que presenten períodos constantes, datos con poca variación, datos imposibles físicamente, datos que muestren alteraciones súbitas, o lapsos de ascenso y caída inusuales en el comportamiento observado cotidianamente, que son cuestionables. Sin embargo, se debe tener en cuenta que ciertas condiciones atmosféricas, o la presencia de algunas fuentes cercanas pueden resultar en fluctuaciones extremas en las concentraciones del contaminante (MinAmbiente, 2010).

A partir de los criterios anteriores, se debe tener en cuenta el concepto de *Outliers*, o valores atípicos que, para propósitos de este estudio, correspondieron principalmente a aquellos que superaban 2 veces la desviación estándar del conjunto diario de datos.

Cabe resaltar que, durante el proceso de validación de datos, fue utilizado el programa *Statistical Package for Social Science* (SPSS) en su versión 25, para la evaluación de cada dato identificado que sobrepasaba el 95% del coeficiente de confianza, determinando si su comportamiento era parte de la medición o resultaba de un error del equipo.

Conforme a esto, en un primer paso, los datos brutos fueron representados por medio de graficas de línea en el programa Microsoft Excel, calculando el promedio y desviación estándar con el propósito de evidenciar la variación diaria del conjunto de datos. Por medio de este procedimiento, fue posible reconocer aquellos datos que se encontraban por fuera de la tendencia general, es decir, los valores atípicos o no validos de acuerdo a los criterios mencionados. Para estos valores, se presentan dos posibles opciones, siendo la primera la eliminación del dato; sin

embargo, esto puede ser objeto de incertidumbre; mientras que, por otro lado, la segunda opción corresponde a la sustitución del dato.

En este punto, se selecciona la sustitución del dato como opción óptima, por lo que los valores atípicos en los resultados fueron cambiados por medio del método de interpolación para mantener la integridad del conjunto de datos, resultando en una relación entre la diferencia del dato posterior y el dato anterior, teniendo en cuenta la proporcionalidad de cada uno de los valores, como se muestra en la Ecuación 1. De tal manera que:

$$Dato\ interpolado = \frac{Dato_{posterior} - Dato_{anterior}}{2} + Dato_{anterior}$$

Ecuación 1.

En el caso de presentarse 2 valores que se deben sustituir de manera consecutiva, la interpolación requerida se observa en la Ecuación 2. Donde X y Y corresponden al primer y segundo dato interpolado respectivamente.

$$X = \frac{Dato_{posterior} - Dato_{anterior}}{3} + Dato_{anterior}$$

$$Y = \frac{Dato_{posterior} - Dato_{anterior}}{3} + X$$

Ecuación 2.

En términos generales se buscaba mantener el mayor número de datos originales, sustituyendo solo aquellos datos que se consideraron realmente atípicos dentro de la muestra. Para cada dato sustituido, resultaba necesario señalar el valor que se había cambiado, manteniendo la cifra significativa previa (ver Figura 17).

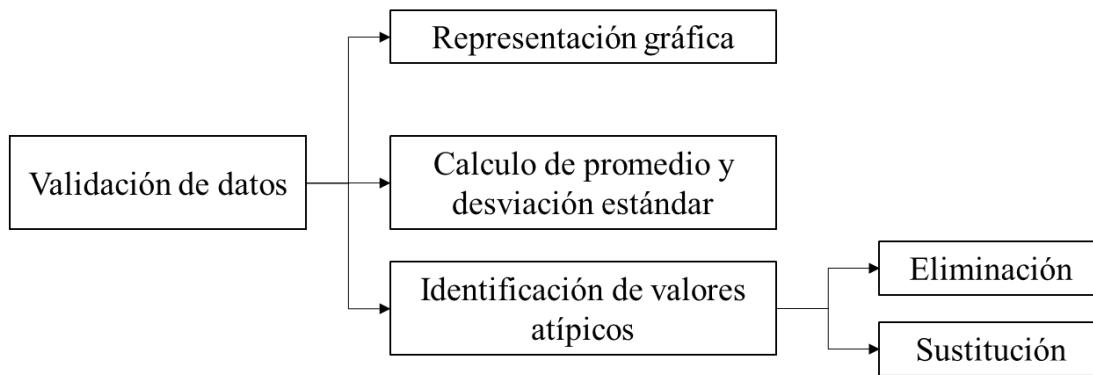


Figura 17. *Proceso de Validación de Datos*

Fuente: *Autores*

Tras la elaboración de las pruebas estadísticas y su representación gráfica, se seleccionaron los valores atípicos que, tras ser validados, debieron ser corregidos de acuerdo con los resultados de calibración de los equipos, descritos en el apartado Calibración del Equipo.

7.8. Relación Interior/Exterior

Para el análisis de la variación de las concentraciones del contaminante en espacios interiores y exteriores, se calcula la relación Interior/Exterior (I/E), permitiendo estimar cuantitativamente la incidencia de las concentraciones externas en los resultados en espacios internos, la cual representa la base fundamental del presente estudio.

La relación I/E es un indicador de las variaciones de concentraciones interiores con respecto a los niveles exteriores, considerando que los contaminantes pueden migrar desde el exterior hacia el interior y las fuentes de aire interior pueden exacerbar la contaminación del aire interior (Elbayoumi, Ramli, Md Yusof, & Al Madhoun, 2013).

Las relaciones de Interior/Exterior se calcularon y se analizaron estadísticamente para poder estudiar la influencia del ambiente interior contra los contaminantes procedentes del exterior. El análisis de esta relación permite evaluar tres (3) diferentes escenarios de probabilidad en los resultados:

- i) Valores <1 indican que las concentraciones en espacios interiores se encuentran por debajo de las concentraciones en espacios exteriores.
- ii) Valores >1 demuestran una mayor concentración del contaminante en el interior, lo que puede producirse por una posible fuente específica de emisión interna que parece generar partículas adicionales.
- iii) Valores iguales a 1 equivalen a una proporción equivalente de concentraciones interiores y exteriores, implicando una infiltración total.

7.9. Correlación Meteorológica

La correlación entre las concentraciones de PM_{2.5} y los registros meteorológicos fue calculada por medio de los datos recolectados por las estaciones meteorológicas de la Universidad de la Costa para la Institución Educativa A y la Estación Escuela de Policía Antonio Nariño para la Institución Educativa B. Para este análisis solo se consideraron los sensores externos, ya que las condiciones en interiores pueden variar por efecto de los sistemas de ventilación, y principalmente, por no tener acción directa de la meteorología.

Para establecer el grado de relación entre las condiciones meteorológicas y las concentraciones del contaminante fue empleado el programa *Statistical Package for Social Science* (SPSS) con la herramienta Correlaciones Bivariadas seleccionando el Coeficiente de

Correlación de Pearson (r_{xy}). Los valores de este coeficiente de correlación van de -1 a 1, donde el signo del coeficiente indica la dirección de la relación y su valor absoluto indica la fuerza. Una correlación es efectiva si puede afirmarse que es distinta de cero.

Complementario al cálculo del coeficiente de correlación, fue determinada una prueba de significación con un nivel crítico bilateral para indicar si existe o no relación entre dos variables, marcando con un asterisco los coeficientes de correlación significativos al nivel 0,05 y, con dos asteriscos, los significativos al nivel 0,01. En este caso, cuando la significación es menor de 0,05 indica que existe una correlación significativa, permitiendo inferir que niveles menores de 0,01 presentan una mayor significación en contraste.

8. Resultados

Diferentes investigaciones proponen una evaluación de las concentraciones internas y externas de material particulado en instituciones educativas con el propósito de llevar a cabo una caracterización de las condiciones presentes en los entornos escolares; sin embargo, los estudios con esta temática son poco frecuentes en Colombia, especialmente en la ciudad de Barranquilla, que aunque en la actualidad se viene produciendo un diagnóstico de los ambientes urbanos, no presentan información respecto a ambientes internos.

En este apartado se presentan los resultados referentes al estudio de calidad de aire desarrollado en dos (2) Instituciones Educativas de la ciudad de Barranquilla, Colombia, en el periodo comprendido entre los meses de junio a octubre del año 2019.

8.1. Validación de Sensores

La representación gráfica de la relación obtenida entre cada sensor utilizado y el equipo Teledyne T640X como referencia se aprecia en la *Figura 18*, donde igualmente se presentan las ecuaciones para corregir las concentraciones de PM_{2.5} registradas. Estas correcciones fueron aplicadas de manera a asegurar la calidad de los resultados obtenidos, ya que los sensores PurpleAir, de bajo costo, presentan errores en promedio de 10% en las concentraciones que registran. Conforme se puede observar en la *Figura 18*, para los 4 sensores utilizados en este estudio, se pudo aplicar la corrección por medio de una regresión lineal cuando se hace la validación con el equipo de referencia. Este resultado es bastante significativo, pues por más que las concentraciones registradas por los sensores estén sobreestimando o subestimando las concentraciones reales de PM_{2.5}, ellas pueden ser corregidas y aplicadas con confianza.

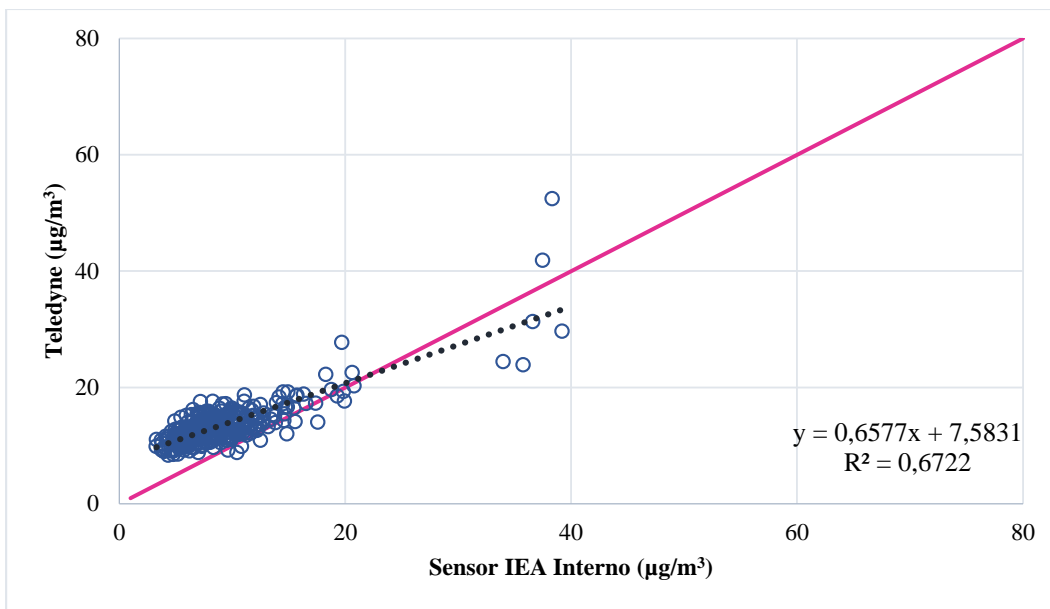


Figura 18a. Correlación concentraciones Sensor IEA interno – Teledyne 640X.

Fuente: Autores.

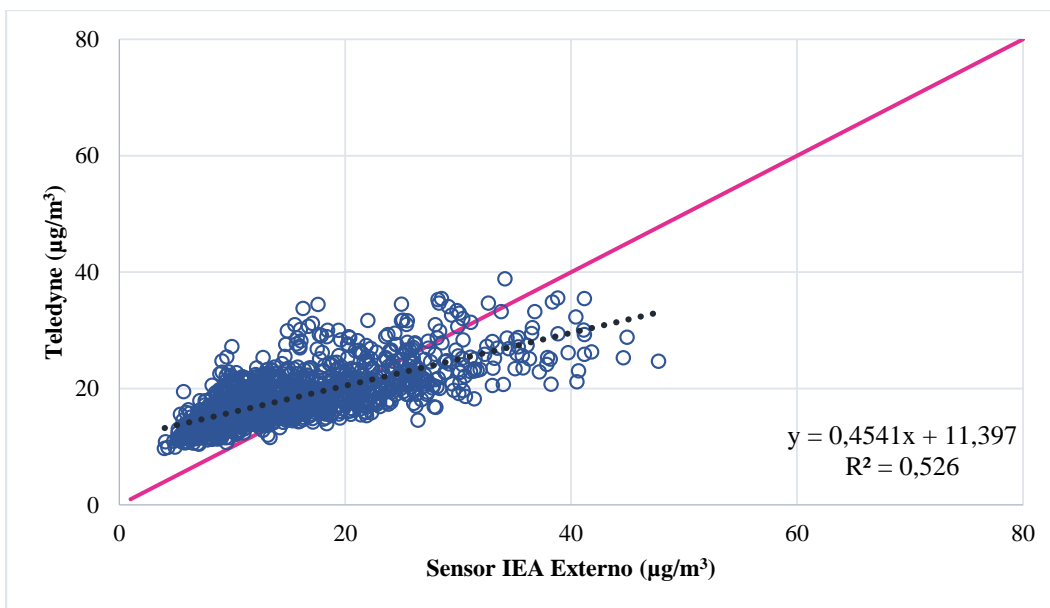


Figura 18b. Correlación concentraciones Sensor IEA externo – Teledyne 640X.

Fuente: Autores.

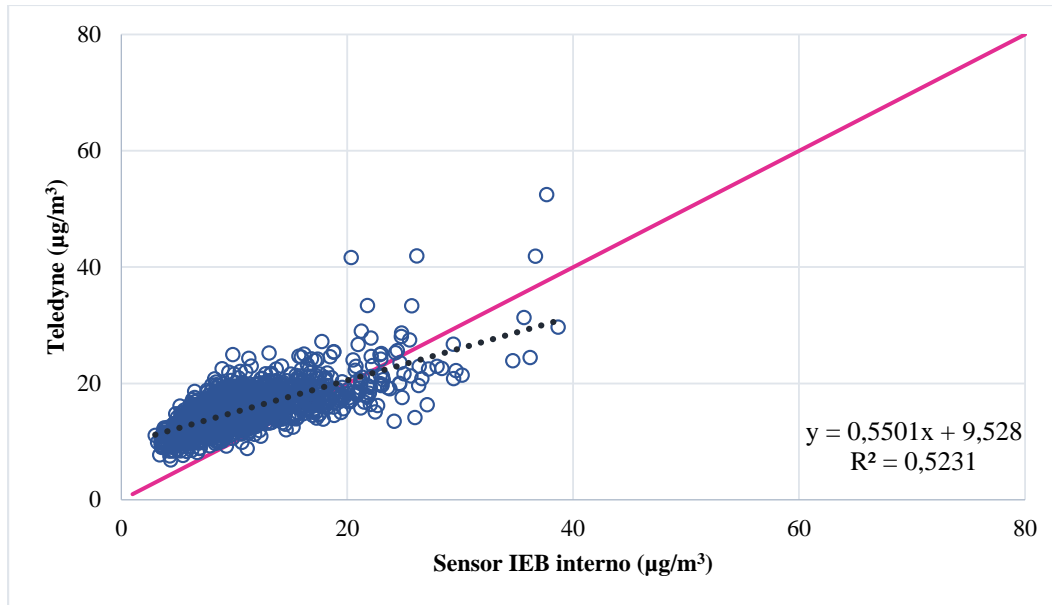


Figura 18c. Correlación concentraciones Sensor IEB interno – Teledyne 640X.

Fuente: Autores.

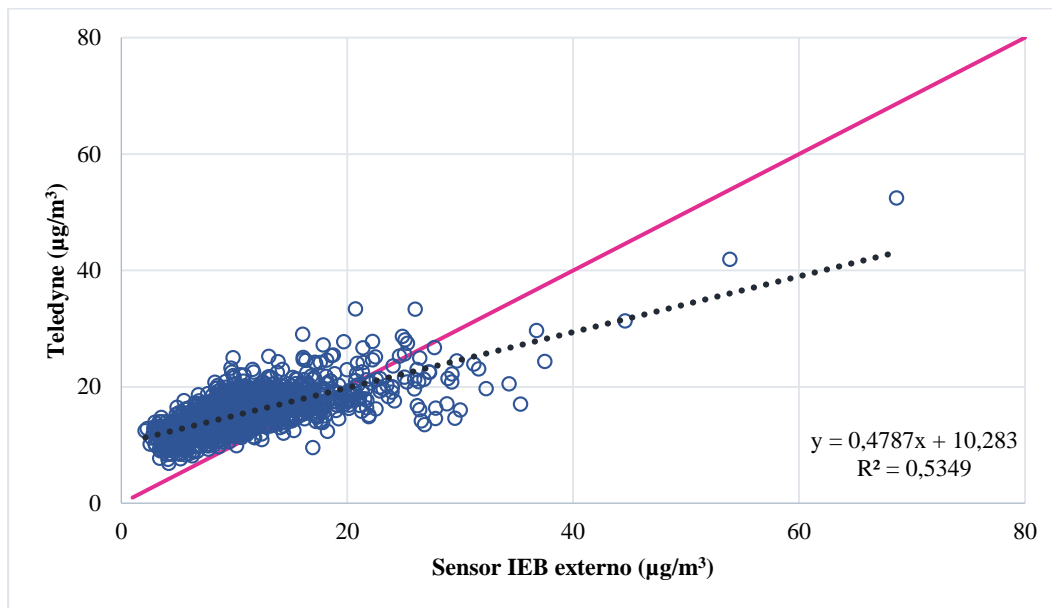


Figura 18d. Correlación concentraciones Sensor IEB externo – Teledyne 640X.

Fuente: Autores.

Las ecuaciones de regresión obtenidas por medio de la representación gráfica de los datos se encuentran recopiladas en la *Tabla 2*. En esta expresión, el valor de x corresponde a la concentración másica de PM_{2.5} en tiempo real de una hora para el sensor PA-II-SD Air Quality, y el valor de y para el equipo Teledyne T640X (Han et al., 2016).

Considerando que el equipo Teledyne se considera como referencia, es posible afirmar que y corresponde a la concentración de PM_{2.5} corregido.

El error para las mediciones de cada sensor fue calculado por medio de la Ecuación 3, empleando los respectivos promedios de cada equipo.

$$Error = \frac{Concentración_{Teledyne} - Concentración_{Sensor}}{Concentración_{Teledyne}} \times 100$$

Ecuación 3.

Los equipos avalados por la EPA de medición de material particulado mantienen un 10% de error, al compararse con el sensor PA-II-SD representa un margen de error mayor, sin embargo, al ser un equipo de bajo costo y portátil este margen de error no implica ninguna dificultad al momento de realizar el monitoreo.

Tabla 2.

Ecuaciones de corrección para los sensores y error.

Sensor	Ecuación de Regresión	Error
IEA Interno	$PM_{2.5 \text{ corregido}} = 0,6577(PM_{2.5 \text{ sensor}}) + 7,5931$	32%
IEA Externo	$PM_{2.5 \text{ corregido}} = 0,4541(PM_{2.5 \text{ sensor}}) + 11,397$	20%
IEB Interno	$PM_{2.5 \text{ corregido}} = 0,5501(PM_{2.5 \text{ sensor}}) + 9,528$	31%
IEB Externo	$PM_{2.5 \text{ corregido}} = 0,4787(PM_{2.5 \text{ sensor}}) + 10,283$	31%

Fuente: Propia

Dentro de las mediciones de concentraciones de los sensores PA-II-SD se puede apreciar una sobrestimación y una subestimación de estas. A través de la ecuación de regresión y el método de igualación, donde las concentraciones de los sensores y del equipo deberían presentar la misma concentración ($PM_{2.5\ Teledyne} = PM_{2.5\ sensor}$) se determinó el punto de corte y los rangos de estimación (ver *Tabla 3*).

Todavía, es importante destacar que por más que el error en las concentraciones reportadas por los sensores no es constante para los diferentes rangos de mediciones (PM_{2.5} subestimado para los niveles bajos, o sobrestimado para los mayores niveles), los errores promedio son los indicados en la *Tabla 2*.

Tabla 3.

Rangos de estimación de concentraciones de sensores.

Sensor	Subestimación	Sobrestimación
IEA Interno	>22,15	<22,15
IEA Externo	>20,88	<20,88
IEB Interno	>21,18	<21,18
IEB Externo	>19,72	<19,72

Fuente: Propia

Los resultados obtenidos para cada sensor durante el muestreo en las instituciones educativas, fueron corregidos por medio de la sustitución en la regresión lineal, tras haber sido validados, para que cada instrumento obtuviera las concentraciones de partículas corregidas (Mohammadyan & Shabankhani, 2013b).

8.2. Análisis Descriptivo

Teniendo los resultados validados, se procede con un análisis descriptivo que permita determinar el comportamiento del contaminante PM_{2.5} en términos estadísticos, cuantificado a partir de su (i) concentración media, su (ii) desviación estándar (σ) y sus (iii) niveles mínimos y máximos, los cuales se recopilan en la *Tabla 4*.

Tabla 4.

Estadísticos descriptivos de las concentraciones de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) internas y externas de las instituciones educativas.

Sensor	Media \pm Desv. Est.	Mínimo	Máximo
IEA Interno	14,46 \pm 3,31	8,24	37,22
IEA Externo	17,26 \pm 2,63	11,60	32,47
IEB Interno	19,18 \pm 5,25	9,91	62,43
IEB Externo	18,95 \pm 4,77	10,84	57,85

Fuente: Propia

La Institución Educativa A reporta una concentración promedio en interiores de 14,46 \pm 3,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y exteriores de 17,26 \pm 2,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que, la Institución Educativa B revela una concentración media en el interior de 19,18 \pm 5,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el exterior de 18,95 \pm 4,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De esta manera, se observa que la Institución Educativa B (IEB) registró mayores concentraciones, tanto para las mediciones en el exterior como en el interior. Para el interior del salón de clase, IEB presentó concentraciones 33% mayores, mientras para el exterior esta diferencia fue de 10%.

Estas diferencias entre los resultados pueden responder a la ubicación estratégica de cada punto de muestreo, correspondiendo IEA al punto con las menores concentraciones, al estar ubicada en un sector con menos fuentes de emisión locales, y una menor incidencia de la concentración exterior en el aula de clases por su sistema de ventilación compuesto por ventanas. A diferencia de esta, se establece que IEB contaba con cercanía a la vía principal Circunvalar implicando una mayor contribución de fuentes móviles y un sistema de ventilación por calados que permite el intercambio de aire y la penetración de partículas.

Los resultados muestran concordancia con lo esperado para el área de estudio, siendo la ciudad de Barranquilla una zona costera que facilita la dispersión de los contaminantes, y, por tanto, la disminución de las concentraciones. En específico, las concentraciones en la Institución Educativa A se encuentran similares con un estudio desarrollado en Polonia en la temporada de verano, con niveles interiores de 13,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y exteriores de 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Zwoździak et al., 2013), siendo probable que la similitud en los niveles se deba a la afinidad en las condiciones de muestreo y en los patrones meteorológicos presentados. Por otro lado, en la Institución Educativa B se encontraron niveles comparables con Portugal, en concentraciones interiores (17,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y exteriores (19,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), las cuales se determinaron como menores por el periodo de muestreo tomado, el cual concierne al mismo de este estudio, es decir, 24 horas (Oliveira et al., 2016).

Los resultados superan los límites anuales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para PM_{2.5} en ambientes exteriores (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), y las concentraciones al aire libre para estudios en Estados Unidos (6,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Carrion-Matta et al., 2019) y Suecia (9,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Wichmann et al., 2010), los cuales cumplen con las directrices de la OMS y cuentan con niveles exteriores de 5,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 8,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. No obstante, los niveles se muestran por debajo de un estudio en España, tanto en interiores (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como exteriores (29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

(Rivas et al., 2014), los cuales fueron casi el doble con respecto a nuestro estudio por la presencia de fuentes móviles en el área de estudio, y sobre todo, en China con 141,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en interiores y 167,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en exteriores, por ser un área con una evidente contaminación atmosférica (Xu et al., 2015).

Los resultados de las relaciones Interior/Exterior se presentan en la *Tabla 5*, en la cual al analizar las variaciones de las concentraciones en ambientes interiores y exteriores se puede observar que, en promedio, se establecen dos de las tres condiciones mencionadas.

Tabla 5.

Relación entre las concentraciones de PM_{2.5} internas y externas del contaminante en las instituciones educativas.

Sensor	Relación Interior/Exterior		
	Media	Mínimo	Máximo
IEA	0,83 ± 0,09	0,54	1,90
IEB	1,01 ± 0,13	0,48	1,84

Fuente: Propia

Para la Institución Educativa A (IEA) se observan concentraciones internas menores que las externas, resultando en una relación menor a 1 (0,83). El comportamiento entre las concentraciones mostraba una tendencia lineal, que se puede apreciar en la *Figura 19*, demostrando que gran parte de las concentraciones externas se encuentran por encima de la línea de intersección, fundamentando las relaciones predominantes menores a 1.

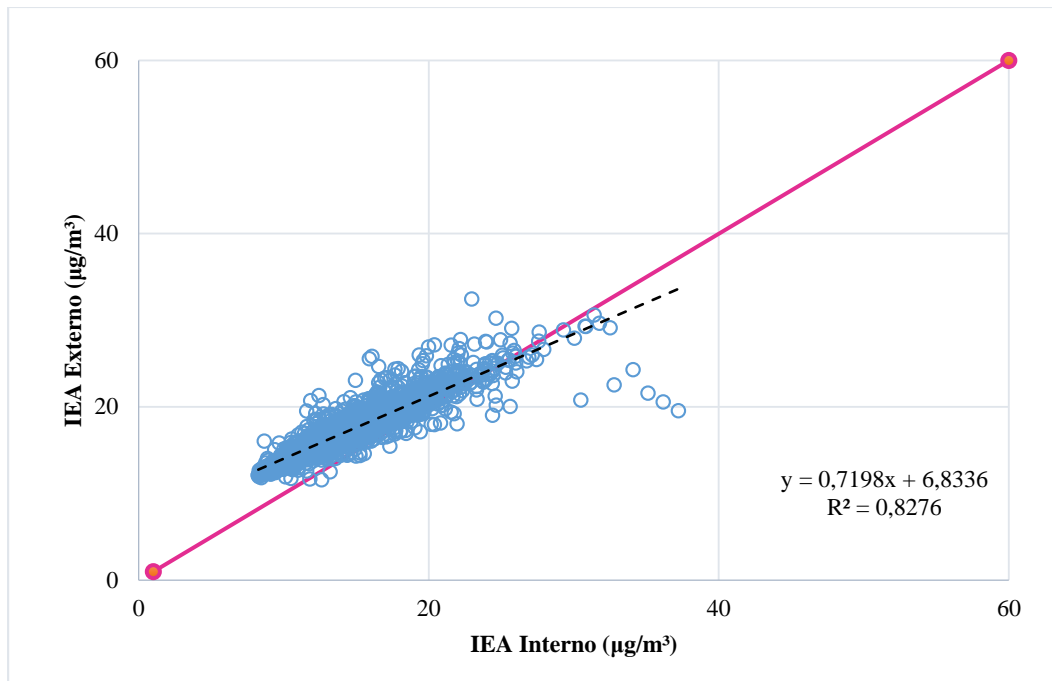


Figura 19. Relación entre concentraciones internas y externas en la Institución Educativa A.

Fuente: Autores.

Las condiciones en la Institución Educativa B (EIB) son cercanas a 1 (1,01), por lo cual se determina que las concentraciones internas y externas fueron proporcionales durante el periodo de muestreo. No obstante, se evidencia un comportamiento diferente en la *Figura 20*, permitiendo deducir que la relación aproximada a 1 en EIB resulta de que el caso donde se presentan concentraciones externas que superan las concentraciones en el aula de clases, supone la misma probabilidad del caso contrario, es decir, concentraciones internas mayores que en el aire exterior. Como resultado de este balance, que parece inclinarse hacia el segundo caso, se obtiene este valor ligeramente mayor a 1.

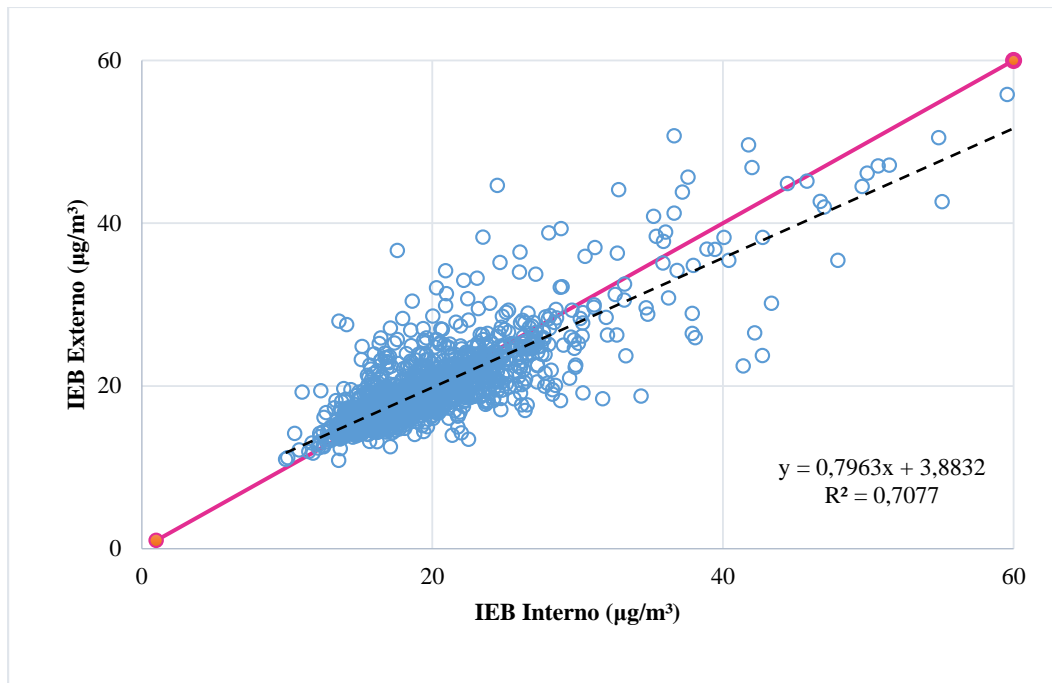


Figura 20. Relación entre concentraciones internas y externas en la Institución Educativa B.

Fuente: Autores.

Para comprender las variaciones entre ambientes internos y externos se deben tener en cuenta diferentes factores. La principal variable corresponde a la penetración interior de partículas desde el exterior, por medio del intercambio constante de aire y la entrada de contaminación externa (Carrion-Matta et al., 2019). Por esto, la relación menor a 1 en IEA es un escenario predecible, principalmente debido a como las diferentes barreras físicas afectan los procesos de ventilación que se llevan a cabo en el aula escolar, donde el sistema de ventanas y puertas se encuentran cubiertas, evitando la entrada de partículas del exterior. Aunque este proceso depende no solo de las barreras físicas del edificio y de la ventilación natural o mecánica, sino también de las propiedades fisicoquímicas y tamaño de las partículas. En este sentido, las partículas finas tienen una mayor tasa de infiltración en comparación con las

partículas gruesas, y la concentración interior de las partículas finas se ve menos afectada por las actividades y movimientos de los ocupantes (Elbayoumi et al., 2014).

Para IEB las variables involucradas para una relación ligeramente mayor a 1 pudieron tratarse de la arquitectura del aula, basada en una ventilación por medio de flujos de aire natural a través de los calados encontrados en la mayoría de las paredes que no actuaban como barreras físicas y permitían la entrada de partículas del exterior. Aparte de esto, la ubicación espacial y orientación hacia una vía principal, sumado a ciertas fuentes internas como lo son la resuspensión debido a la actividad en el aula y las condiciones del edificio.

Los factores ambientales y de comportamiento clave como la ocupación, las tasas de ventilación, y la estacionalidad pudieron influir en la concentración y composición de PM_{2.5} en el interior de la escuela, incluida la cantidad de tráfico que puede entrar en el interior (Carrion-Matta et al., 2019). El aporte del tráfico suele ser mayor en ambientes exteriores, a menos que la orientación del aula se encuentre direccionado directamente a la calle y la posición de la muestra al aire libre frente al interior del bloque, la ubicación de la muestra interior en un piso inferior con respecto a la muestra exterior o, en su efecto, una combinación de los dos, junto con la resuspensión en interiores de partículas relacionadas con el tráfico y la precipitación que elimina la contaminación exterior (Amato et al., 2014). Para la IEB, no se cumplía con ninguna de estas condiciones, pues el aula de clases se encontraba situada en un segundo piso y por fuera de la influencia directa de la vía principal.

Las características de las escuelas tales como edad, mantenimiento, materiales de construcción, y factores como la densidad ocupacional por volumen de clase suponen una influencia en la capacidad de infiltración. En este punto, la edad del edificio puede tener un efecto en la infiltración y, en consecuencia, en las concentraciones de contaminantes en

interiores, ya que los edificios más antiguos podrían tener más grietas en la cubierta debido al deterioro o al aislamiento de materiales y técnicas de construcción (Rivas et al., 2015).

En el mismo orden de ideas, la densidad ocupacional en IEB era mayor, pues se presentaba un total de 24 estudiantes en un área de 30.40 m², con una densidad de casi 1 estudiante /m², que no se considera necesariamente alta, pero es superior comparado con los 20 estudiantes en un área de 40.87 m² del aula de clases de IEA.

Finalmente, las contribuciones en interiores también se pudieron ver afectadas por la orientación del aula en relación con el patio sin pavimentar, con máximas contribuciones diarias que se suelen asociar en las aulas adyacentes a un patio interior (Amato et al., 2014), tal como es el caso de IEB, donde el aula de clases se hallaba contigua al patio de recreo y la calle de entrada a la escuela se encontraba sin pavimentar; y a pesar de que IEA también se ubicaba adyacente al patio, este se presentaba embaldosado.

Las relación Interior/Exterior en la Institución Educativa A (0,8) se muestra equivalente a Carrion-Matta et al. (2019) en EE.UU y Xu et al. (2015) en China, en escuelas con ventilación natural, Guo et al. (2010) en Australia cuando el aula de clases estaba ocupada y Zwoździak et al. (2013) en Polonia durante la noche en la temporada de invierno. Para la Institución Educativa B la relación (1,01) se asemejaba principalmente con Othman et al. (2019) en Malasia con valores de 1,01 y 1,02 en el periodo escolar durante los días de semana y fines de semana respectivamente, por posibles contribuciones de fuentes externas asociadas a la ubicación del punto con atracciones turísticas y autopistas principales.

8.2.1. Comportamiento Horario

La relación horaria de las concentraciones internas y externas se presenta en la

Figura 21 y *Figura 22*, permitiendo observar que las variaciones horarias mantienen un comportamiento similar para la Institución Educativa A (IEA), exponiendo una tendencia comparable entre los sensores aunque, teniendo el sensor externo los valores más altos.

Para analizar el comportamiento horario, se deben informar en primer lugar, ciertos datos importantes de la jornada escolar en cada IE. Ver *Tabla 6*.

Tabla 6.

Horarios de la jornada escolar de las instituciones educativas.

	IEA	IEB
Inicio Jornada	6:30	6:45
Receso	9:20 - 9:50 11:30 - 11:50	10:00 - 10:30
Final Jornada	14:20	14:45

Fuente: Propia

Teniendo claro estos horarios clave en la jornada escolar, se puede proceder con el análisis de las variaciones horarias en cada IE en la

Figura 21 y *Figura 22*.

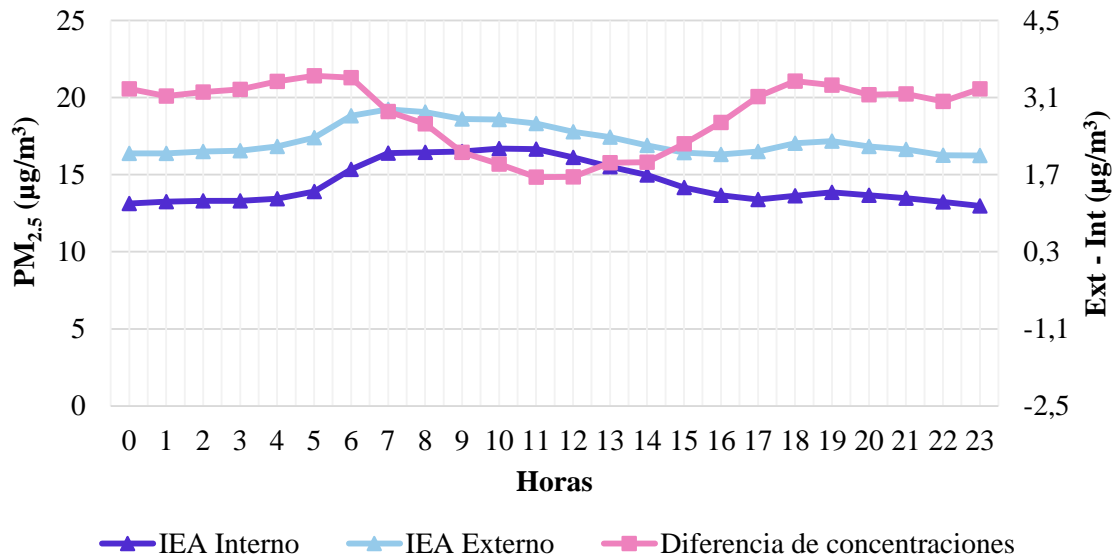


Figura 21. Comparación horaria de las concentraciones internas y externas de la Institución Educativa A.

Fuente: Autores.

De acuerdo con la

Figura 21 se revela la incidencia de la condición de ocupación en los espacios de muestreo, que dan como resultado el aumento en las concentraciones internas y su acercamiento a los niveles externos. En esta se expone que la diferencia entre las concentraciones se registra a partir del inicio de la jornada de clases hasta su finalización.

Para IEA las concentraciones internas y externas no exponen variaciones notables a lo largo del día, registrando un pico máximo alrededor de las 07:00 horas, con 19,24 µg/m³ en el sensor externo y 16,39 µg/m³ en el sensor interno, procedente del tráfico diurno cotidiano. A partir de esta hora (07:00), hasta la culminación de las actividades en la escuela (16:00), se resaltan disminuciones en la diferencia entre las concentraciones, iniciando con 3,46 µg/m³ hasta

obtener una diferencia más reducida a las 11:00 horas con 1,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalizando con 2,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00 horas.

Tras el primer pico, la concentración en el interior aumenta levemente a las 10:00 horas (16,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) cuando los niños regresan al aula después del receso, como posible consecuencia de material resuspendido en el patio de recreo por los movimientos de los estudiantes. En este punto, se aclara que los niños no poseían acceso a las aulas durante el receso y por esto, se infiere que el resultado se puede atribuir a su entrada tras finalizado el recreo. Posteriormente, la concentración disminuye lentamente hasta las 16:00 horas (13,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), que se trataba del horario de salida del personal administrativo. Finalmente, se registra un último pico de emisión a las 19:00 horas, en el interior (13,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y más en el exterior (17,18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como resultado del crecimiento del tráfico vehicular nocturno.

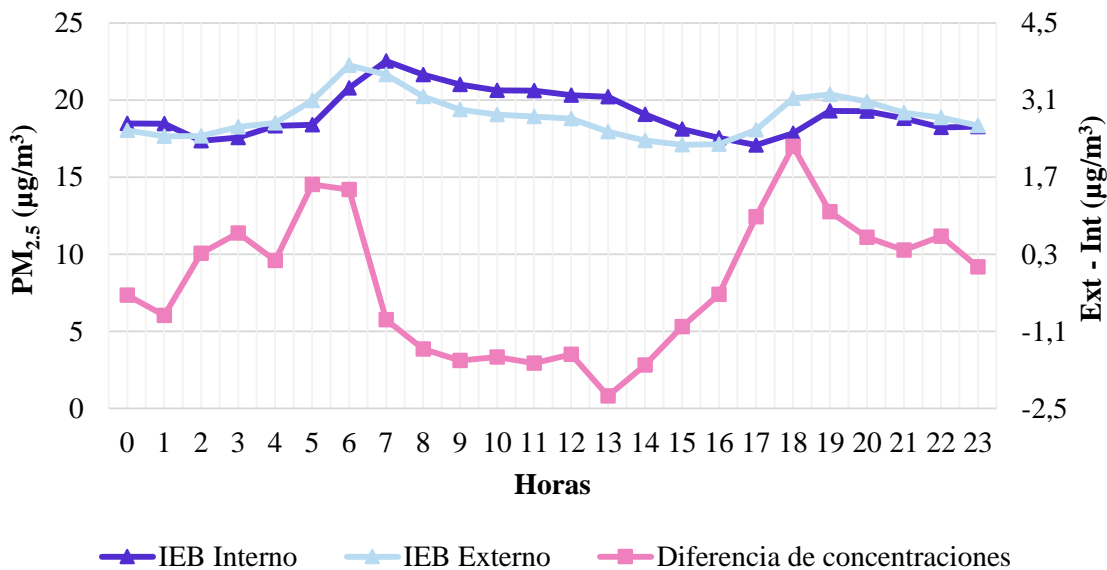


Figura 22. Comparación horaria de las concentraciones internas y externas de la Institución Educativa B.

Fuente: Autores.

Para la Institución Educativa B se mantiene un comportamiento similar a IEA, pero con variaciones mucho más pronunciadas, que se exhiben prominentemente en las concentraciones internas del contaminante.

Estas concentraciones pueden incluso superar las externas, sobre todo a partir de las 7:00 horas y durante todo el transcurso de la jornada escolar hasta las 16:00 horas, donde las concentraciones externas se incrementan hasta el final del día. Lo anterior demuestra no solo la capacidad de infiltración en el aula de clases, sino también la influencia de las fuentes internas para este punto de muestreo, que implica que la condición de ocupación del aula de clases representa un factor importante en los resultados.

8.2.2. Comportamiento Diario

La comparación entre las concentraciones de PM_{2.5} para los días hábiles y no hábiles se muestra en la *Tabla 7*, los cuales se presentaron leves variaciones, tanto para sensores internos como externos, indicando que las fuentes de emisión del contaminante parecen mantenerse de manera constante durante toda la semana. Por su parte, la relación Interior/Exterior mostraba que no se dieron variaciones algunas en los valores.

Tabla 7.

Comparación de concentraciones promedio de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre días hábiles y no hábiles.

Sensores	Concentración PM _{2.5}		Relación Interior/Exterior	
	Día hábil	Día no hábil	Día hábil	Día no hábil
IEA Interno	14,70	14,20	0,84	0,83
IEA Externo	17,43	17,07		
IEB Interno	19,03	19,47	1,00	1,01

IEB Externo	19,06	18,81
-------------	-------	-------

Fuente: Propia

8.2.3. Condición de Ocupación

La comparación entre las concentraciones internas y los periodos de actividad de las aulas de clase se muestra a través de la *Tabla 8*. Los resultados indican que existe una variabilidad al momento de evaluar concentraciones internas en condiciones de ocupación.

Tabla 8.

Comparación de las variaciones en las concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) debido a la actividad en aula en las instituciones educativas.

Ocupación	Parámetro	IEA	IEB
		Interno	Interno
Inactividad	Media	13,93 ±2,99	18,69 ±5,67
	Mínimo	8,24	9,91
	Máximo	37,22	62,43
Actividad	Media	16,36 ±3,66	20,44 ±3,66
	Mínimo	8,33	11,72
	Máximo	32,51	42,20

Fuente: Propia

Los resultados para IEA evidencian variaciones en los periodos de actividad (16,36 µg/m³) e inactividad (13,93 µg/m³), al igual que sucede con IEB (20,44 µg/m³ y 18,69 µg/m³).

Para comprender este resultado se presenta una comparación horaria de las concentraciones internas respecto a las condiciones de actividad o inactividad en las escuelas, la cual se muestra en la *Figura 23* y *Figura 24*.

En este análisis se contemplan las diferentes variables de influencia determinadas por los horarios de entrada y salida de la jornada escolar, receso de clases y picos por tráfico vehicular.

Primeramente, durante los periodos de actividad se aprecia una tendencia al aumento de los niveles reportados en los sensores después del inicio de la jornada escolar a partir de las 6:00 horas, lo cual sucede para ambas escuelas por contar con un horario de entrada cercano.

El incremento de los niveles del contaminante es normal en las primeras horas del día, por tratarse de un periodo de crecimiento de la circulación de vehículos, en especial, para ambas escuelas donde existe una influencia directa del tráfico vehicular, el cual se ha definido previamente como un factor determinante en las concentraciones.

Teniendo esto, el primer pico de tráfico vehicular en ambos periodos de actividad e inactividad se presentaba a las 07:00 horas, con un segundo pico alrededor de las 12:00 horas y un último a las 19:00 horas, siguiendo con el mismo comportamiento horario. Aunque, si bien, para la IEB se observan picos de concentraciones mucho más marcados que en IEA, lo que concuerda con la ubicación y la cercanía a una autopista principal.

Dentro de un entorno interior, se puede generar PM_{2.5} mediante el uso de combustible para cocinar y calentar, o la resuspensión inducida por el movimiento del ocupante de partículas que previamente se han depositado en las superficies (Martins & Carrilho da Graça, 2018).

Siguiendo esto, los periodos de receso en IEA reportan un leve incremento posterior a las 10:00 horas, siendo explicado por la resuspensión de material particulado en el exterior por el movimiento, que luego es transportado por los estudiantes al interior del aula de clases.

Aparte, en el caso de la IEB se destinaba un horario para el almuerzo, donde se realizaban actividades de cocción de alimentos, pero pese a esto, no fue observado un incremento de las concentraciones y, por el contrario, siguieron disminuyendo hasta terminar la jornada.

Aunque tras el periodo de finalización de la jornada escolar se efectuaban otras actividades como limpieza del aula y clases adicionales, estas no parecen haber representado una fuente significativa, teniendo en cuenta que las concentraciones disminuyeron progresivamente.

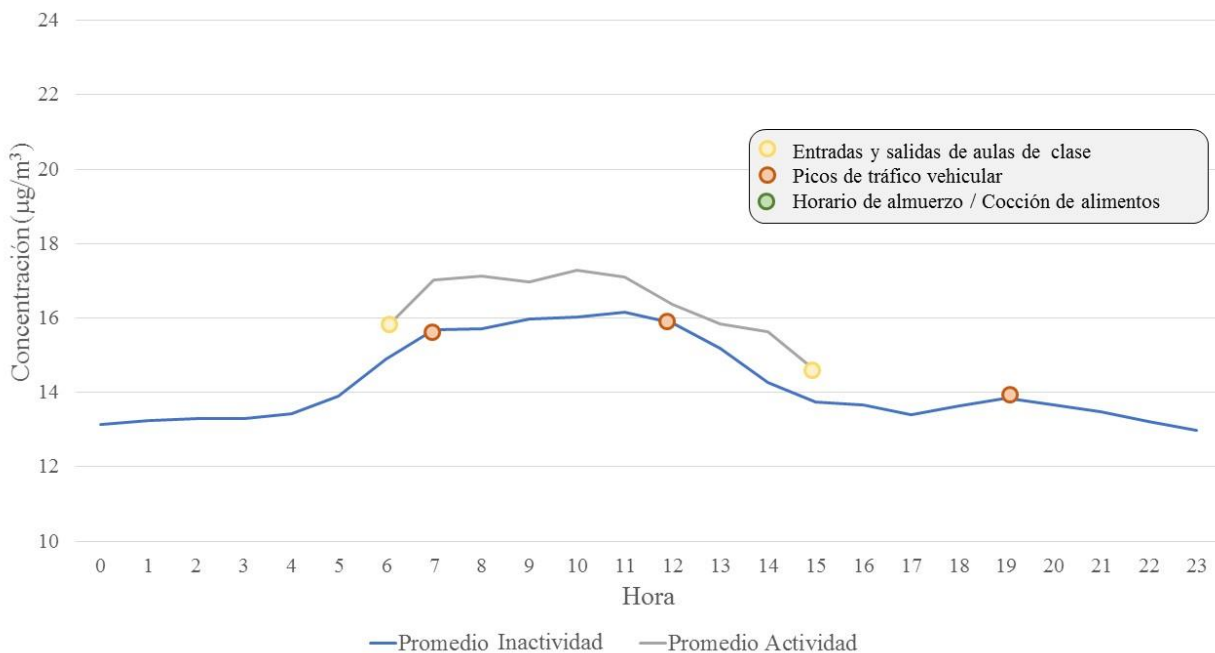


Figura 23. Comparación horaria de las concentraciones de PM_{2.5} para las condiciones de actividad e inactividad en la Institución Educativa A Sensor Interno.

Fuente: Autores.

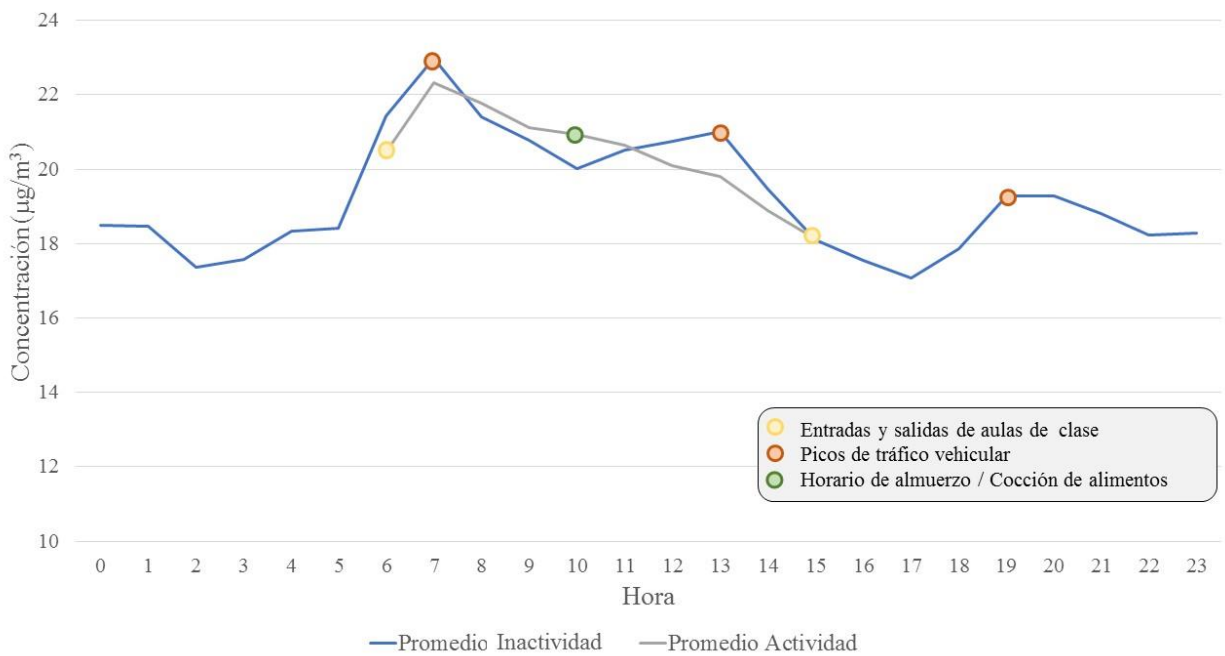


Figura 24. Comparación horaria de las concentraciones de PM_{2.5} para las condiciones de actividad e inactividad en la Institución Educativa B Sensor Interno.

Fuente: Autores.

Asimismo, se observa una tendencia al aumento de la relación Interna/Externa con respecto a los periodos de actividad en las aulas de clase (ver Tabla 9).

Tabla 9.

Comparación de las concentraciones de PM_{2.5} para los periodos de actividad en las aulas de las instituciones educativas.

Ocupación	Parámetro	Relación Interior/Exterior	
		IEA	IEB
Inactividad	Media	0,82 ±0,08	0,99 ±0,13
	Mínimo	0,54	0,48
	Máximo	1,90	1,84
Actividad	Media	0,88 ±0,08	1,04 ±0,11
	Mínimo	0,64	0,55
	Máximo	1,15	1,59

Fuente: Propia

Los resultados pueden explicarse, considerando que, en periodos de actividad, las aulas se encontraban ocupadas, lo que generalmente se asociaba con la apertura de ventanas para la IEA, quien contaba con este tipo de ventilación, causando una tasa de intercambio de aire relativamente alta, lo que generaba a su vez, relaciones más altas (0.88).

En estos casos, la elevada concentración de PM_{2.5} en interiores puede deberse principalmente a la infiltración de exteriores y, en menor medida, a la resuspensión de partículas (Guo et al., 2010). Teniendo en cuenta que la masa de partículas en el exterior es mucho mayor que la emitida por las fuentes en interiores, la concentración de PM_{2.5} en interiores proviene principalmente de partículas que se originan en el exterior (Ji & Zhao, 2015).

El estado de la ventana puede afectar significativamente las contribuciones de las diferentes fuentes. Cuando las ventanas están abiertas, la concentración de PM_{2.5} en interiores es casi la misma que la concentración que se origina en el exterior, lo que significa que las

partículas en el exterior contribuyen con casi todos los niveles en interiores. Debido a esto, se asume que los factores que afectaron mayoritariamente la relación fueron las tasas de ventilación, donde las relaciones más altas se debieron a la apertura de ventanas y el funcionamiento de los ventiladores (Othman et al., 2019).

En periodos de inactividad, cuando las aulas estaban desocupadas por temporadas de vacaciones o días no hábiles, o en su efecto, se trataba de un horario nocturno, las ventanas mayoritariamente estaban cerradas y, por tanto, la tasa de intercambio de aire era baja. En estas condiciones, la infiltración del aire exterior representaba un proceso menos importante para el PM_{2.5} en interiores y la deposición probablemente fue la razón principal de la lenta disminución de las concentraciones de PM_{2.5} en interiores. Al mismo tiempo, los niveles exteriores de PM_{2.5} pueden disminuir notablemente durante la noche y temprano en la mañana, debido a la menor cantidad de tráfico y actividades humanas, en comparación con las horas diurnas y picos de tráfico, lo que resulta en altas relaciones (Guo et al., 2010).

En cuanto a la IEB, el tipo de ventilación involucraba la entrada constante de aire del exterior que no obedecía a los periodos de actividad e inactividad lo que se constata en las relaciones promedio calculadas. Sin embargo, en periodos de actividad, la relación se encontraba ligeramente mayor a 1 (1,04) y sobre todo mayor a la relación obtenida en periodos de inactividad (0,99). Lo anterior implica que, en el aula de clases, aparte de la infiltración de partículas del exterior, se tienen fuentes interiores derivadas de la presencia de los estudiantes, como lo es la resuspensión de material, la introducción de partículas en ropa o zapatos, y la influencia de las actividades metabólicas de los niños.

8.2.4. Prueba de Significancia

Para evaluar si las condiciones variables dentro de las aulas de clases generaron un cambio significativo en las concentraciones internas, fue realizada una prueba de significancia a partir de sus valores medios.

Para este estudio, al corresponder a una evaluación transversal de dos muestras independientes de tipo numéricas fue aplicada la prueba U de Mann-Whitney por medio del programa *Statistical Package for Social Science* (SPSS) con la herramienta de Pruebas no paramétricas, específicamente la prueba para 2 muestras independientes.

Esto debido a que, como no se presentaba un comportamiento normal en las muestras, no era posible aplicar la prueba T para muestras independientes.

8.2.4.1. Condiciones Día Hábil y No Hábil

La hipótesis planteada para determinar la significancia entre los días hábiles y no hábiles en los sensores internos fue:

- **H₁**: Existe una diferencia significativa entre los días hábiles y no hábiles en las aulas de clase.
- **H₀**: NO existe una diferencia significativa entre los días hábiles y no hábiles en las aulas de clase.

Para la prueba se planteó un nivel alfa del 5% = 0,05, para lo cual se obtienen los resultados encerrados en la *Tabla 10*.

Tabla 10.

Resultados prueba U de Mann-Whitney para días hábiles y no hábiles.

Estadísticos de prueba^a	IEA Interno	IEA Externo	IEB Interno	IEB Externo
U de Mann-Whitney	1295374	1259528	381529	1291049
W de Wilcoxon	2531752	2432274	1115395	2415299
Z	-2,849	-2,3870	-0,161	-1,7295
Sig. Asintótica (bilateral)	0,004	0,017	0,872	0.0837

a. Variable de agrupación: Día hábil y no hábil

Fuente: Propia

Debido a que los niveles de la significancia asintótica determinados para la Institución Educativa A (IEA) son menores que el nivel alfa la hipótesis **H₁** es aceptada, de manera que existe una diferencia significativa para las concentraciones de PM_{2.5} presentadas en los días hábiles y no hábiles. Los resultados concuerdan con las condiciones que se aprecian en las aulas de clase, en las cuales cuando no existen días hábiles, los procesos de ventilación son restringidos por medio del cierre de puertas y ventanas. Por otro lado, para los ambientes externos se puede apreciar una diferencia significativa, posiblemente debido a los cambios en la flota vehicular alrededor del área de muestreo.

Para la Institución Educativa B (IEB), los niveles de significancia fueron mayores que el nivel alfa, por lo cual se anula la hipótesis **H₁** y se acepta **H₀**, no existiendo una diferencia significativa para los días hábiles y no hábiles. Concordando con los análisis y en las diferentes condiciones de las aulas, en donde los procesos de intercambio de aire se dan de manera permanente, existan procesos internos o no. Igualmente, en los ambientes externos no se observa una diferencia significativa entre días hábiles y no hábiles a pesar de su cercanía con una vía

principal bastante concurrida, por lo cual se puede estimar que las fuentes se encuentran se manera constante durante toda la semana.

8.2.4.2. Condiciones de Ocupación

La hipótesis planteada para determinar la significancia entre los periodos de ocupación para los sensores internos fue:

- **H₁**: Existe una diferencia significativa entre los periodos de actividad e inactividad en las aulas de clase.
- **H₀**: NO existe una diferencia significativa entre los periodos de actividad e inactividad en las aulas de clase.

Para la prueba se planteó un nivel alfa del 5% = 0,05, para lo cual se obtienen los resultados encerrados en la *Tabla 11*.

Tabla 11.

Resultados prueba U de Mann-Whitney para condiciones de ocupación.

Estadísticos de prueba^a	IEA Interno	IEB Interno
U de Mann-Whitney	535455,500	205221,000
W de Wilcoxon	3895983,500	1091667,000
Z	-17,855	-13,291
Sig. Asintótica (bilateral)	0,000	0,000

a. Variable de agrupación: Inactividad y Actividad

Fuente: Propia

Los resultados de la diferencia asintótica para las dos instituciones educativas nos muestran valores inferiores al nivel alfa, para lo cual la hipótesis **H₁** sería verdadera,

comprobando estadísticamente que existe una diferencia significativa en las concentraciones entre los periodos de actividad e inactividad en las aulas de clase para los ambientes internos.

Para las dos Instituciones Educativas, los resultados concuerdan con los análisis planteados con anterioridad, dentro de los cuales se observa un aumento en las concentraciones por los mismos procesos de ventilación antes mencionados, además de procesos de introducción de partículas y de generación interna por diferentes actividades desarrolladas en el aula.

8.3. Influencia de Parámetros Meteorológicos

La correlación entre las concentraciones de PM_{2.5} registradas por los sensores externos de cada institución educativa y los parámetros meteorológicos se presenta en la *Tabla 12*.

Tabla 12.

Matriz de correlación entre las variables meteorológicas y concentraciones de PM_{2.5} en instituciones educativas.

		IEA	IEB
		Sensor Externo	Sensor Externo
Temperatura	Correlación Pearson	0,165**	-0,063**
	Significación Bilateral	0,000	0,001
Humedad Relativa	Correlación Pearson	0,022	0,168**
	Significación Bilateral	0,212	0,000
Velocidad del Viento	Correlación Pearson	-0,152**	-0,359**
	Significación Bilateral	0,000	0,000
Presión Atmosférica	Correlación Pearson	0,169**	0,202**
	Significación Bilateral	0,000	0,000
Precipitación	Correlación Pearson	-0,040*	-0,017
	Significación Bilateral	0,023	0,350

		IEA	IEB
		Sensor Externo	Sensor Externo
Radiación Solar	Correlación Pearson	0,177**	-0,046*
	Significación Bilateral	0,000	0,012

***. La correlación es significativa en el nivel 0,01.*

**. La correlación es significativa en el nivel 0,05.*

Fuente: Propia

8.3.1. Temperatura

El parámetro de temperatura evidencia una correlación positiva significativa en la Institución Educativa A, lo cual mantiene concordancia con las asociaciones obtenidas en diferentes estudios (Lv et al., 2017; Majd et al., 2019). El material particulado PM_{2.5} puede detectarse con frecuencia durante periodos de altas temperaturas debido a su naturaleza secundaria, asociando fuertemente la generación de partículas finas con las fluctuaciones de temperatura (Pateraki, Asimakopoulos, Flocas, Maggos, & Vasilakos, 2012).

La temperatura puede afectar la formación de partículas, considerando que las altas temperaturas favorecen reacciones fotoquímicas entre precursores (Wang & Ogawa, 2015). Para comprender esto, se determina que las correlaciones con la temperatura pueden diferir para los componentes individuales de PM_{2.5}, dependiendo de la abundancia relativa de cada uno (Tai, Mickley, & Jacob, 2010). Por lo tanto, es posible que en los puntos de muestreo se generen predominantemente precursores de PM_{2.5} dependientes de la temperatura para su reacción.

Asimismo, con un aumento en la temperatura, se estimulan los procesos de evaporación, derivando en un suelo de carácter seco propenso a la resuspensión de partículas, y con un

incremento elevado, se pueden incluso acelerar los procesos de quema en coberturas vegetales que conllevan a la emisión de partículas por combustión de biomasa.

Para la Institución Educativa B se reporta una correlación negativa, demostrando la relación estándar entre la temperatura y un contaminante. De acuerdo a esta, con el aumento de la temperatura de la superficie, los contaminantes se dispersan a medida que se profundiza la capa límite, lo que disminuye las concentraciones (Tiwari et al., 2013). Cuando la temperatura aumenta, la convección del aire se vuelve frecuente, lo que conduce a la difusión y dilución de partículas, reduciendo la concentración (Zhang, Ni, & Ni, 2015). Si bien la relación obtenida no es significativa, se puede adoptar esta explicación como certera.

8.3.2. Humedad Relativa

Para el parámetro de humedad relativa se demuestra una correlación positiva en ambos sensores, pero solo siendo significativa para el Sensor Externo de la IEB. La humedad atmosférica puede mostrar una correlación positiva con las concentraciones de PM_{2.5}, que se le ve atribuida a una formación acelerada de partículas por procesos físicos y químicos durante condiciones de alta humedad (Li et al., 2020b), permitiendo establecer que el aumento de este parámetro parece promover los procesos de conversión de gas a partículas de gases precursores (Ryu, Kim, Byeon, Go, & Lee, 2019).

Por medio de esta premisa se puede fundamentar la correlación positiva significativa para el sensor externo. En un ambiente exterior, diferentes fuentes pueden emitir gases precursores de PM_{2.5}, como es el caso de sulfatos y nitratos, compuestos que suelen ser correlacionados positivamente con la humedad (Tai et al., 2010), incurriendo en un incremento en la

concentración del contaminante como respuesta a la creciente presencia de precursores dependientes de la humedad para su conversión a partículas.

8.3.3. Presión Atmosférica

El parámetro de presión atmosférica presenta una correlación positiva para cada uno de los sensores evaluados, representando una alta relación directa con el contaminante. La presión atmosférica influye indirectamente en las concentraciones de contaminantes al afectar las condiciones de estabilidad atmosférica (Akyüz & Çabuk, 2009).

En un centro de altas presiones, el aire desciende desde las capas altas de la atmósfera, generando inversiones térmicas de subsidencia, por las cuales las temperaturas aumentan antes que disminuir con la altura debido a la compresión del aire. Las capas de inversión térmica impiden la elevación de las masas de aire contaminadas, que quedan atrapadas entre la superficie y los primeros niveles de altura (Romero, Irarrázaval, Opazo, Salgado, & Smith, 2010).

En este escenario, se produce una inversión térmica causada por eventos meteorológicos a gran escala usualmente asociados con una alta presión atmosférica. Dentro de una placa de inversión, los movimientos atmosféricos verticales, que normalmente podrían dispersar los contaminantes, se encuentran minimizados. Adicional a esto, si los vientos en superficie son lentos, debido a una situación de poca diferencia de presión en la superficie, tampoco los contaminantes se pueden dispersar horizontalmente (Lillibridge, 2000).

8.3.4. Precipitación

El parámetro de precipitación mantuvo una correlación constante hacia una dirección negativa para cada uno de los sensores, presentando una significación al nivel de 0,05 solo para la Institución Educativa A.

La precipitación puede disminuir las concentraciones en masa de partículas a través de la deposición húmeda, eliminando la materia particulada atmosférica, especialmente de pequeño tamaño (Wang & Ogawa, 2015). En este punto, la precipitación se correlaciona negativamente con las concentraciones de PM_{2.5} por medio del barrido de contaminantes, como mecanismo de remoción de la atmósfera (Tai et al., 2010; Akyüz & Çabuk, 2009).

Pese a esto, los resultados demuestran una menor significancia que la que se tenía de expectativa, puesto que, al corresponder el periodo de muestreo a los meses con los mayores niveles de precipitación en el área de estudio, se esperaba una mayor correlación de esta variable. Aunque una correlación significativa no implica necesariamente una correlación fuerte, para estos sensores una correlación con valores de significación al nivel de 0,05 puede ser significativa por encerrar una muestra con un número de datos considerable.

La precipitación es un parámetro que presenta variaciones espaciales, por lo que, puede que los datos de precipitación recolectadas por la estación meteorológica no sean representativos del área de influencia de cada punto de muestreo. Por esto, se puede asumir que la distancia entre la estación meteorológica y los puntos de muestreo pudo haber influido en los resultados, considera que las relaciones significativas se encontraron en la escuela más cerca de la estación meteorológica donde se obtuvieron los datos.

8.3.5. Radiación Solar

El parámetro de radiación solar expresa una relación equivalente a la asociación para el parámetro de temperatura, con un coeficiente de correlación positivo para la Institución A, y una significación menor a 0,01, indicando una alta relación entre las variables.

La radiación solar contribuye a la ocurrencia de reacciones fotoquímicas en la atmósfera y, por ende, a la formación de altos niveles de contaminantes secundarios (Kouyoumdjian & Saliba, 2006), y se puede plantear que, la radiación solar incidente es un valor de influencia en el material particulado, por su comportamiento relacionado directamente con la temperatura ambiente, es decir, a medida que aumenta la intensidad de la radiación solar, puede incrementarse el material particulado presente en el aire (Domiguez et al., 2019).

Para el Sensor Externo de la Institución Educativa B manifiesta una correlación negativa, tal como fue evidenciado en el mismo sensor para la temperatura, comprobando la relación identificada para ambos parámetros. La radiación solar muestra una significación alta pero el coeficiente de correlación se encuentra menor en comparación con el resto de los sensores.

8.3.6. Velocidad del viento

El parámetro de la velocidad del viento fue una de las pocas variables explicativas con un comportamiento continuo, siguiendo una asociación inversa y altamente significativa. Para el análisis de este resultado se considera que una alta velocidad del viento facilita la dispersión de contaminantes en el exterior; mientras que, las bajas velocidades del viento favorecen la acumulación (Elbayoumi et al., 2013). Cuando la velocidad del viento es baja, puede expulsar los contaminantes dentro de un cierto rango geográfico pero, cuando la velocidad del viento es lo

suficientemente alta, puede transportar grandes cantidades de contaminantes desde muy lejos (Wang & Ogawa, 2015).

Para un ambiente interior se cumple este mismo comportamiento, con asociaciones inversas entre la velocidad del viento y la exposición interior debidas a la dispersión y, por tanto, a la disminución de la contribución al aire interior (Majd et al., 2019). Sin embargo, una alta velocidad del viento, puede aumentar la velocidad de penetración, y en consecuencia, la concentración interior (Elbayoumi et al., 2013). La velocidad del viento se considera una variable positivamente relacionada con la infiltración de partículas, presumiblemente resultante de la diferencia de presión a través del casco de la escuela (MacNeill et al., 2012).

8.3.7. Dirección del Viento

Para comprender la relación entre el parámetro de dirección del viento y las concentraciones del contaminante, se opta por representar gráficamente a través de una rosa de vientos y una rosa de contaminantes en el programa WRPlot View, que permita analizar el comportamiento de esta variable en el área de estudio.

8.3.7.1. Rosa de los Vientos

Para el periodo comprendido por el muestreo en la Institución Educativa A se observa que los regímenes de viento vienen predominantemente desde el Este, y con dirección hacia el Oeste. Por otro lado, las velocidades del viento sobre este tiempo fueron menores a 5,70 m/s mayoritariamente, también se aprecian vientos con velocidades entre 5,70 a 8,80 m/s pero en mucha menor medida, con una frecuencia del 4,3%.

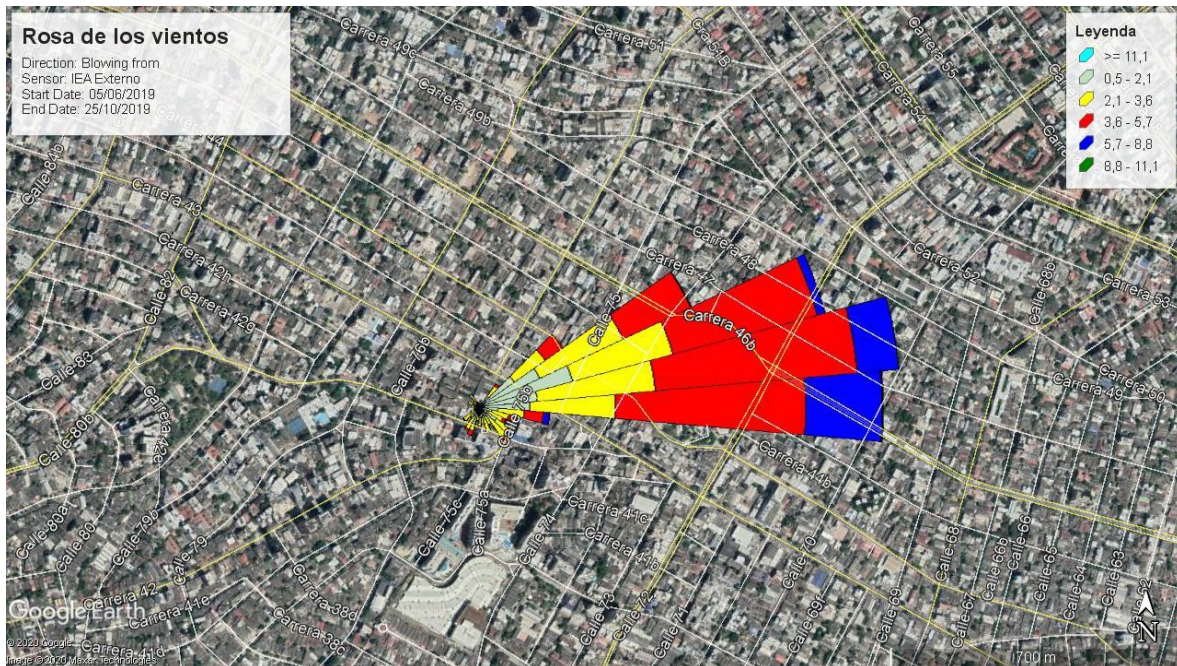


Figura 25. Rosa de los vientos en punto de muestreo Institución Educativa A Sensor Externo.

Fuente: Autores.

Para la Institución Educativa B se aprecian vientos provenientes de Noreste, con dirección hacia el Suroeste; mientras que las velocidades se encuentran en el mismo orden de magnitud de la Institución Educativa A.

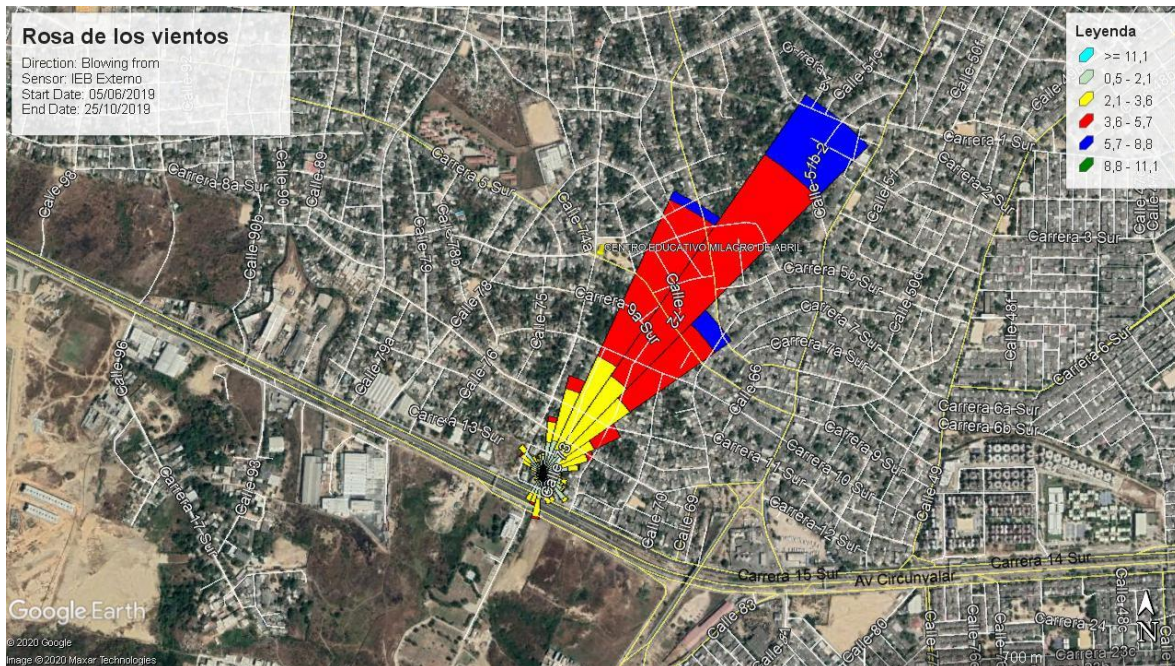


Figura 26. Rosa de los vientos en punto de muestreo Institución Educativa B Sensor Externo.

Fuente: Autores.

8.3.7.2. Rosa de Contaminantes

La rosa de contaminantes para la Institución Educativa A demuestra concentraciones provenientes de la dirección Este (Ver Anexo 9), en la cual podemos encontrar parte de la ciudad de Barranquilla y del viento proveniente del río Magdalena; sin embargo, se presentan bajos regímenes de viento debido a las diferentes barreras tanto naturales como antrópicas presentes en la zona, la cual está caracterizada por ser un área predominantemente residencial, con grandes conjuntos de estructuras, aunque también se pueden encontrar diferentes establecimientos comerciales y un hospital.

Las concentraciones presentes en la zona son predominantemente entre 15 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (59,7%), aunque también se pueden encontrar rangos de concentración entre 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (12,8%) y 20-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8,9%) (Ver Anexo 10).

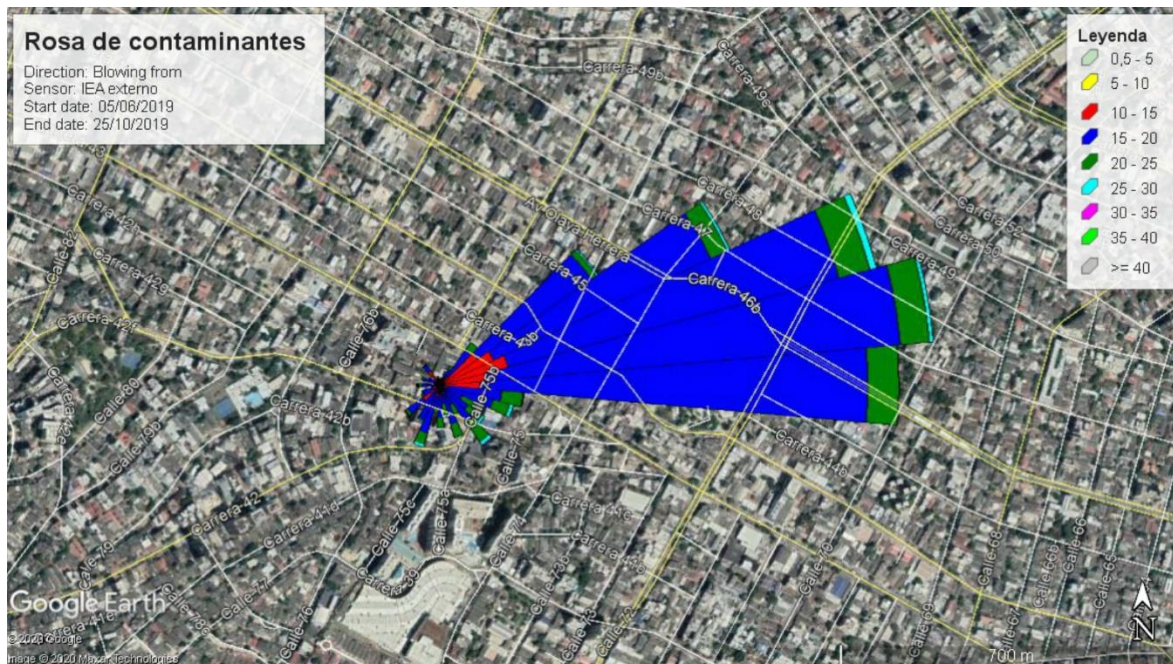


Figura 27. Rosa de contaminantes en punto de muestreo Institución Educativa A Sensor Externo.

Fuente: Autores.

Observando la rosa de contaminantes para la Institución Educativa B podemos observar que las concentraciones de contaminantes se ven regidas por las emisiones que se dan alrededor de toda la ciudad, provenientes de la dirección Noreste (*Ver Anexo 13*), lo que propiciaría las concentraciones más elevadas dentro de esta institución en comparación con la primera.

Adicional a eso, se cuenta con una influencia directa de las concentraciones provenientes de la Carrera 15 Sur, vía principal de la ciudad. Una característica de este punto es la carencia de obstáculos como edificios y grandes estructuras, lo que facilita los fenómenos de dispersión y ocasiona mayores velocidades en el viento.

Los rangos de concentraciones en comparación con la IEA son mucho más variables y encontrando incluso concentraciones superiores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque también las mayores tendencias de concentraciones se dan en torno a los rangos de 15-20 (52,6%), 20-25 (10,4) y 10-15 (9,8) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (*Ver Anexo 14*).

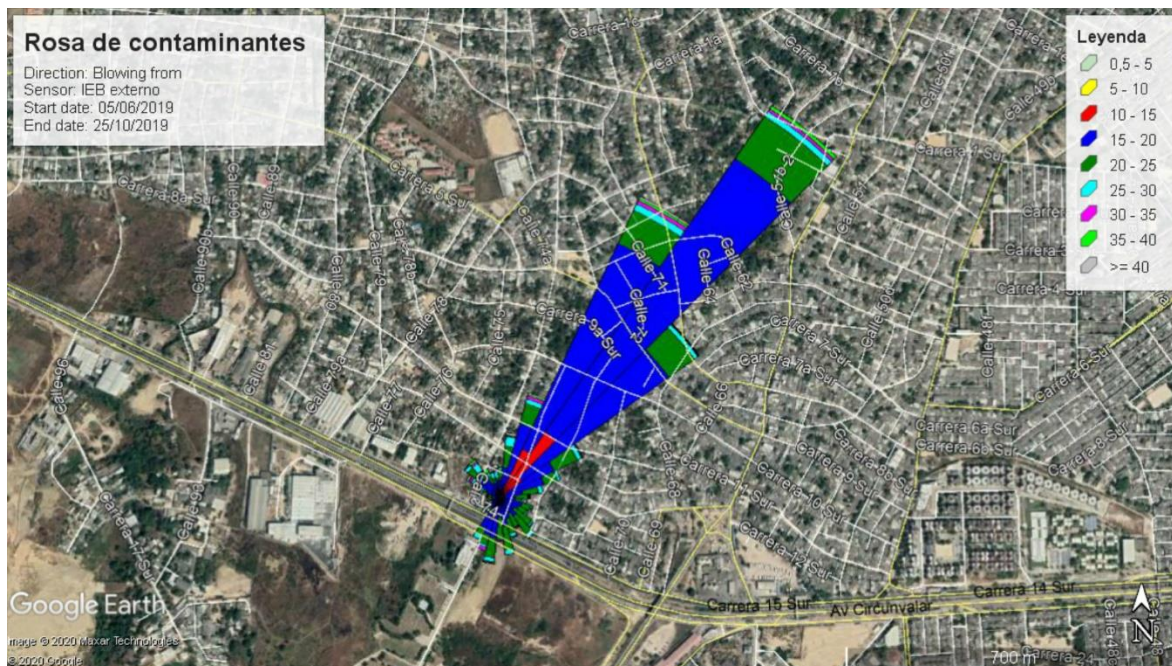


Figura 28. Rosa de contaminantes en punto de muestreo Institución Educativa B Sensor Externo.

Fuente: Autores.

8.4. Comparación con Estudios

Por medio de la comparación con estudios se espera contrastar los resultados obtenidos y reconocer ciertos comportamientos frecuentes para el contaminante PM_{2.5}. Para esto se reunieron estudios que compartieran las siguientes condiciones:

- i) Estudios desarrollados en ambientes escolares, preferiblemente en instituciones de educación básica primaria.
- ii) Estudios con mediciones simultaneas en ambientes interiores y externos.
- iii) Estudios con valores de relación Interior/Exterior, o en caso contrario, con resultados permitan calcularla.

La recopilación de estudios evaluados y sus resultados se muestran en la *Tabla 13*.

Tabla 13.

Comparación de estudios de concentraciones de material particulado PM_{2.5} interior y exterior en instituciones educativas.

Ubicación	Escuelas	Concentración (µg/m ³)		Relación I/E	Referencia
		Interior	Exterior		
Barranquilla, Colombia	2	^A 14,46 ±3,3	^A 17,26 ±2,6	0,83	Este estudio
		^B 19,18 ±5,2	^B 18,95 ±4,8	1,01	
Noreste, EE.UU	32	5,2 ±2,3	6,5 ±2,7	0,8	Carrion-Matta et al. (2019)
Franja de Gaza, Palestina	12	103,96 ±84,96	60,49 ±50,72	2,2	Elbayoumi et al. (2013)
Múnich, Alemania	1	37,4	17,0	2,2*	Fromme et al. (2008)
Brisbane, Australia	1	6,7 ±0,2	11,6 ±0,8	^{Oc} 0,80 ^{Dc} 0,77	Guo et al. (2010)
Baltimore, EE.UU	16	^O 6,9 ±5,5	^O 10 ±6,9	0,6	Majd et al. (2019)
		^I 7,4 ±5,9	^I 16 ±2,5		
		^P 7,3 ±5,0	^P 8,8 ±2,7		
Sari, Irán	6	46,6	36,9	1,26*	Mohammadyan & Shabankhani (2013)
Oporto, Portugal	1	17,6	19,3	0,91*	Oliveira et al. (2016)
Kuala Lumpur, Malasia	1	^{ES} 11,2 ±0,45	^{ES} 11,4 ±0,44	1,01	Othman et al. (2019)
		^{EF} 13,4 ±1,05	^{EF} 13,3 ±1,08	1,02	
		^{VS} 10,6 ±0,73	^{VS} 9,98 ±0,95	1,20	
		^{VF} 10,9 ±1,30	^{VF} 9,50 ±1,11	1,20	
Barcelona, España	39	37 ±13	29 ±20	1,3	Rivas et al. (2014)
Estocolmo, Suecia	6	8,1 ±2,9	9,7 ±4,5	0,94	Wichmann et al. (2010)
Xi'an, China	1	141,8 ±42,5	167,8 ±58,6	0,8	Xu et al. (2015)
Beijing, China	1	^V 81,1 ±35,8	^V 89,5 ±36,7	0,91*	Zhang et al. (2019)
		^I 71,4 ±34,0	^I 80,2 ±23,4	0,89*	
Breslavia, Polonia	1	^I 59,8 ±21,6	^I 49,1 ±15,6	^N 0,8 ^D 2,0	Zwoździak et al. (2013)

^V 13,5 ±4,1	^V 16 ±9,1	$\frac{^N 0,7}{^D 4,1}$
------------------------	----------------------	-------------------------

**Valor calculado con promedio de concentraciones*
^A *Institución Educativa A*, ^B *Institución Educativa B*
^D *Día*, ^N *Noche*
^{Oc} *Ocupado*, ^{Dc} *Desocupado*
^P *Primavera*, ^V *Verano*, ^O *Otoño*, ^I *Invierno*.
^{ES} *Periodo Escolar Semana*, ^{EF} *Periodo Escolar Fin de Semana*
^{VS} *Periodo Vacaciones Semana*, ^{VF} *Periodo Vacaciones Fin de Semana*

Fuente: Propia

El estudio por Rivas et al. (2014) fue desarrollado en la ciudad de Barcelona y en el municipio adyacente de Sant Cugat del Vallès, en España, al Noroeste de la Península Ibérica. Barcelona cuenta una de las mayores densidades de vehículos en Europa y uno de los puertos más importantes del Mediterráneo, manteniendo una similitud con la ciudad de Barranquilla. Para este estudio, los niveles en interiores (37 µg/m³) superaron los niveles reportados al aire libre (29 µg/m³), y se encontraron por encima de los niveles registrados en nuestro estudio, con puntos críticos identificados cerca del centro de la ciudad por el predominio de calles estrechas y la escasez de áreas verdes, y principalmente debido a la alta contribución de fuentes locales interiores y la materia mineral. La relación Interior/Exterior > 1 (1,3) indica una penetración de contaminantes externos en ambientes interiores, y que una fracción considerable de la concentración en masa surgía de actividades en interiores, posiblemente por Carbono Orgánico (OC), generado por fibras orgánicas textiles y actividades de cocción, que presentaba la mayor contribución a la concentración de masa en interiores.

Un estudio similar en la Península Ibérica corresponde a Oliveira et al. (2016), en un preescolar ubicado en la zona de Paranhos, en la ciudad de Oporto, la segunda área metropolitana más grande situada en el norte de Portugal. Los niveles en este trabajo fueron menores que en otros estudios, lo que podría deberse a la diferente duración de la muestra de 24

horas, es decir, también cuando las aulas estaban vacías lo que, en consecuencia, conduce a concentraciones más bajas, condiciones que se asemejan a nuestro estudio y que pudieron influir en los resultados parecidos, sobre todo en la Institución Educativa B.

El estudio por Wichmann et al. (2010) recopilaba un total de 34 edificios distribuidos en 6 escuelas, 10 preescolares y 18 hogares en Norrmalm, en el centro de la ciudad de Estocolmo, Suecia, y en los municipios de Solna, Sundbyberg y Järfälla, para un análisis de un centro urbano y de puntos de carácter suburbano y de fondo, aun cuando solo se consideraron los resultados para el micro entorno escolar en esta comparación. De acuerdo a los resultados, los niveles de PM_{2.5} interiores (8,1 µg/m³) variaron menos con los niveles exteriores (9,7 µg/m³), y a pesar de que, los niveles más altos en interiores se presentaron hacia el centro de la ciudad, la tendencia no fue fuerte y estadísticamente insignificante. La relación Interior/Exterior en escuelas (0,94) parece aumentar con la tasa de cambio de aire, enfatizando la presencia de fuentes interiores o el uso de filtros ineficientes en los sistemas de ventilación. Aunque los niveles de PM_{2.5} interiores y exteriores contaban con una asociación débil, sumada a que la infiltración de concentraciones exteriores fue casi nula en las escuelas (0%), se estima que las fuentes interiores lo compensaron.

Por su parte, Zwoździak et al. (2013) procede con mediciones simultáneas en una escuela secundaria en el centro de Breslavia, al suroeste de Polonia. En este estudio, la alta relación de Interior/Exterior en el periodo diurno (2,0 - 4,1) sugiere que una fracción sustancial de partículas finas y gruesas fue generada por fuentes interiores como resuspensión del polvo debido a actividades infantiles, lo que se confirma por la relación más baja de concentraciones en la noche. Las fuentes de polvo dentro de la escuela influyeron en las concentraciones en interiores, tanto en invierno como en verano, siendo particularmente evidente durante las horas de enseñanza cuando los niños se quedan en la escuela.

El estudio por Fromme et al. (2008) en una escuela en Múnich, Alemania, ubicada en una zona residencial densamente poblada donde no se conocían fuentes industriales específicas de emisiones en cercanía con una calle transitada. Las concentraciones exteriores promedio (17,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) presentan similitud con los niveles externos encontrados para nuestro estudio en la Institución Educativa A, lo cual no se comparte con las concentraciones interiores, que incluso duplican la contaminación exterior, resultando en una relación de 2,2. Para comprender la relación entre la fracción de exposición en interiores y su origen, fue considerado que, en ausencia de fuentes interiores específicas, que pueden presumirse para las aulas, los sulfatos representan un indicador de los procesos de combustión en el aire exterior y, por tanto, del PM_{2.5} de origen exterior. Por medio de la relación de las concentraciones de sulfato en interiores y exteriores fue posible calcular aproximadamente el factor de infiltración, encontrando que casi el 57% del PM_{2.5} fue generado en interiores, en lugar de transportarse al interior desde el exterior, lo que explicaba el resultado obtenido.

Una relación Interior/Exterior de esta proporción fue encontrada por Elbayoumi et al. (2013) en un estudio en la Franja de Gaza, un área en la costa oriental del mar Mediterráneo, formada como una zona de transición entre la zona costera de Israel en el norte, las llanuras semiáridas del norte del desierto de Negev en el este y el árido desierto de Sinaí de Egipto en el sur.

En este caso, la elevada concentración de PM_{2.5} en el interior (103,96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y, por consiguiente, la relación Interior/Exterior (2.2), fue atribuida principalmente a una alta concentración de fuente exterior derivada de una tormenta de polvo durante el invierno, y con mayor frecuencia, debido a fuentes internas como la resuspensión de partículas del suelo de las aulas debido a actividades de los alumnos y el uso de tiza en el pizarrón.

Para un análisis de un área más cercana a la ciudad de Barranquilla, se muestran a Carrion-Matta et al. (2019) y Majd et al. (2019), con investigaciones conducidas en el noreste de los Estados Unidos en el año 2019, para 32 y 16 escuelas respectivamente.

Para Carrion-Matta et al. (2019), las concentraciones exteriores de PM_{2.5} (6,5 µg/m³) fueron más altas que en el interior (5,2 µg/m³), con una media de relación I/E de 0,8, equivalente al resultado en la Institución Educativa A. Para este estudio, partículas ricas en Calcio, vehículos de motor, contaminación secundaria, polvo del suelo, quema de biomasa y aerosoles marinos se identificaron como fuentes en aulas escolares, pero que no llegan a infiltrarse en su totalidad aun con ventilación natural.

Para Majd et al. (2019), el comportamiento de concentraciones de PM_{2.5} interiores y exteriores fue igual, pero la relación I/E indicó una media de 0,6, por debajo de ambos casos de estudio, sugiriendo que las bajas relaciones pueden responder a la falta de fuentes principales de interior de PM_{2.5} en las escuelas monitoreadas.

Dentro de la revisión bibliográfica se evidencian numerosos estudios entorno a la calidad del aire en China, al tratarse de un país afectado por la creciente contaminación atmosférica.

Primeramente, se muestra un estudio por Zhang et al. (2019) en una escuela primaria dentro de los distritos educativos y residenciales en la ciudad de Pekín, capital de China, abarcando periodos con presencia y ausencia de calefacción.

Para este, los valores interiores para PM_{2.5} (71,4 - 81,1 µg/m³) se mostraron menores que los valores exteriores (89,5 – 80,2 µg/m³) durante ambos períodos y sin diferencias significativas.

Las variaciones de PM_{2.5} en exteriores se desviaron de las tendencias generales en el área de Beijing, que versen puede relacionadas con la distribución de fuentes específicas cercanas.

La contaminación del aire exterior se vio afectada principalmente por el escape de los vehículos y la combustión de carbón durante el período de calentamiento y se caracterizó por la formación secundaria y la emisión del tráfico durante el período sin calefacción. En cambio, la calidad del aire interior dependía esencialmente de la entrada de contaminantes del aire exterior durante ambos períodos, y como resultado, las relaciones I/E calculadas (0,91 – 0,89) demostraron valores cercanos a 1.

Con la falta de fuentes en el aula, el PM_{2.5} en interiores se originó principalmente del aire exterior a través de ventilación o infiltración.

En ese mismo escenario, se presenta el estudio por Xu et al. (2015) en una escuela ubicada en una zona comercial y residencial cercana al centro de la ciudad de Xi'an, considerada la zona urbana más grande del noroeste de China, lo que deriva en problemas de contaminación atmosférica local y regional por el rápido desarrollo económico en las últimas dos décadas.

Aunque el ambiente escolar no se encontraba bajo la influencia directa de ninguna emisión industrial, ni tráfico, ya que la carretera principal más cercana estaba a más de 300 metros, las concentraciones de PM_{2.5} reportadas en interiores (141,8 µg/m³) y sobre todo en exteriores (167,8 µg/m³) superan los valores encontrados por Zhang et al. (2019) en la ciudad de Pekín, y exceden considerablemente el promedio e inclusive el valor máximo de nuestro estudio. Asimismo, la ventilación natural en la escuela se reconoce como variable de influencia en la relación I/E calculada (0,8), debido a que con la constante entrada de aire es de esperarse que las concentraciones internas mantengan similitud con la contaminación exterior.

Dentro del continente asiático, el estudio de Othman et al. (2019) comprendía una escuela en el área de Kuala Lumpur en el centro de Malasia peninsular y capital nacional de Malasia,

ciudad que se ha visto afectado por el rápido desarrollo de industrias, infraestructura y áreas residenciales que han contribuido a la aceleración de la economía.

Las concentraciones máximas en el aula interior durante el periodo escolar (ocupado) sugieren que las actividades de los niños contribuyen a las concentraciones de PM_{2.5} en comparación con los periodos de vacaciones.

Durante el fin de semana, se registraron concentraciones más altas en comparación con días de semana, las cuales pueden originarse a partir de un gran número de vehículos, por la ubicación cercana a un área de atracción turística, una carretera principal y un cruce concurrido.

El valor de la relación Interior/Exterior fue ligeramente superior a 1 durante el período escolar (ocupado) y los períodos de vacaciones escolares (desocupado), este resultado indicaba contribuciones de fuentes externas al aula, que se infiltraron en el interior a través de aberturas, grietas y ventanas. Además de todo lo mencionado, como el edificio de la escuela no era nuevo, el riesgo de infiltración de partículas finas era alto.

El estudio por Mohammadyan & Shabankhani (2013) fue efectuado en Sari, capital de la provincia de Mazandarán, en Irán, incluyendo escuelas primarias ubicadas en el centro de la ciudad con cuatro carreteras principales de densidad de tráfico variable.

En el estudio se establece una correlación significativa entre las concentraciones de PM_{2.5} en el aula interior (46,6 µg/m³) y las concentraciones de PM_{2.5} en el exterior (36,9 µg/m³) para escuelas ubicadas cerca de las carreteras principales y pequeñas, concordando con la relación I/E asumida de 1,26, siendo probable que el aire exterior ingrese a las aulas a través de puertas y ventanas, que generalmente se dejan abiertas debido a un clima moderado en el área; sin

embargo, al ser una relación superior a 1, indica la presencia de fuentes específicas de emisión en el interior de las aulas en cada escuela que no se mencionan.

Finalmente, se observa el estudio por Guo et al. (2010) en una escuela situada en la periferia de la zona de reurbanización urbana, al sur del Distrito Comercial Central de Brisbane, Queensland, en el este de Australia subtropical.

Para este, se presentaron resultados de acuerdo con condiciones de Ocupado y Desocupado, sin observar una diferencia significativa en la relación I/E para PM_{2.5} entre las condiciones ocupadas (0,80) y desocupadas (0,77). Esto puede explicarse teniendo en cuenta que, periodos ocupados se asocian con la apertura de ventanas derivando en el intercambio de aire; mientras que; periodos desocupados se relacionan con ventanas cerradas y una menor emisión de contaminantes por la disminución del tráfico y actividades humanas en horarios de noche y madrugada.

9. Conclusiones

Por medio del presente estudio fue posible determinar cómo las concentraciones de material particulado PM_{2.5} en ambientes interiores difieren con respecto a las concentraciones exteriores en dos (2) instituciones educativas de la ciudad de Barranquilla. En este punto, se especifica el propósito de evaluar las variaciones en los resultados obtenidos para un área con características de fondo urbano y un área cercana a la influencia del tráfico.

Con esta premisa, se puede reconocer que, dentro de lo aceptable, los resultados siguieron un comportamiento distinto, relacionado a cada área delimitada. Además, en términos generales, se generaron resultados satisfactorios, asegurando la veracidad de la muestra a partir de la calibración del equipo utilizado y la validación de datos representativos del área de estudio, permitiendo cumplir con los objetivos propuestos.

De acuerdo con los resultados, se establece que la Institución Educativa B presentaba concentraciones mayores del contaminante que en la Institución Educativa A, tanto en niveles externos como internos, un resultado que puede deberse a su ubicación y en una segunda instancia, al sistema de ventilación presente.

La Institución Educativa B se encerraba en un área de influencia por fuentes móviles, adicional a la influencia por interacciones internas que resultaban en la generación del contaminante evaluado y sus precursores, al tiempo que contaba con un sistema de calados que facilitaba la entrada constante de aire. Por su parte, la Institución Educativa A se encontraba en un sector con un menor flujo vehicular y presencia de fuentes fijas, sumado a un sistema compuesto por puertas y ventanas.

El comportamiento horario del contaminante indicaba variaciones que respaldaban los periodos de mayor circulación de vehículos, con picos de concentración más pronunciados para la Institución Educativa B, permitiendo reconocer la alta influencia de esta variable en la contaminación actual, o al menos eso se infiere por los resultados de este estudio. Por otro lado, fue evaluado el comportamiento del PM_{2.5} en referencia a las categorías de tipo de día y existencia de actividad.

Los resultados mostraron diferencias significativas conforme a día hábil o no hábil solamente para IEA, en cambio, si se pudo apreciar un aumento de las concentraciones en periodos de actividad en contraste con periodos de inactividad para los dos sensores. Sin embargo, para IEB las variaciones no se observan en el resto de los análisis estadísticos realizados. Lo anterior permite inferir la influencia de la presencia de estudiantes en los niveles de contaminación a los que se ven expuestos en ambientes interiores que, a su vez, se pueden ver determinados por variables como los horarios de entrada y salida de la jornada escolar, los recesos de clases y los picos de tráfico vehicular.

En cuanto a la relación Interior/Exterior, que representa el principal fundamento de este estudio se dispone que, en promedio, se observó una relación menor a 1 para la Institución Educativa A y una relación igual a 1 para la Institución Educativa B, indicando que los niveles del contaminante en el aula de clases se encontraban por debajo y en la misma proporción que al aire libre respectivamente.

Teniendo esto, se establece que la Institución Educativa A presentaba una menor penetración de partículas en los ambientes internos, en contraste con la Institución Educativa B. La diferencia en los resultados resulta de factores asociados, principalmente, a la arquitectura de cada punto de muestreo, reiterando que el tipo sistema de ventilación por calados conllevaba al

intercambio ininterrumpido de aire en este punto, contrario del sistema de ventanas en la Institución Educativa A.

Igualmente, otros factores que pueden intervenir en este resultado pueden ser la ubicación cercana a una vía principal como la Avenida Circunvalar, las condiciones de estructura de la escuela, sumado a fuentes internas específicas del contaminante en el aula de clases.

La relación de las condiciones meteorológicas en los resultados del contaminante se mostró variable, identificando una valoración de coeficiente hacia una dirección constante solo para los parámetros de velocidad del viento, presión atmosférica y precipitación; mientras que, para los parámetros de temperatura, humedad relativa y radiación solar difirieron de un sensor a otro.

A pesar de que el material particulado en la fracción PM_{2.5} se considera como un contaminante de preocupación emergente, los estudios al respecto de esta temática son reducidos y sobre todo, cuando encierran entornos escolares, siendo mucho más raro si se adiciona el muestreo en interiores y exteriores implementando sensores de bajo costo; por lo que a nuestro conocimiento, este se trataría del primer estudio que reúne todas estas condiciones en Colombia y específicamente en la ciudad de Barranquilla.

Por esto, se espera que, a futuro, sea posible desarrollar más estudios de este tipo y profundizar en el comportamiento del contaminante, con el objetivo de establecer medidas que permitan mitigar los impactos que puede tener para las personas y el ambiente.

10. Recomendaciones

Como se ha reiterado con anterioridad, las aulas escolares han sido identificadas como uno de los microambientes más importantes donde puede ocurrir una exposición a PM_{2.5} con relevancia para la salud (Carrion-Matta et al., 2019), debido a esto es importante plantear estrategias que favorezcan la calidad de aire en dichos ambientes. Si bien es necesario plantear políticas públicas que favorezcan los procesos de planificación de áreas escolares, en donde el tráfico vehicular no tenga incidencia, los materiales de construcción no sean sumideros de partículas y no existan procesos que favorezcan la generación de material particulado interno como la cocción de alimentos, impresoras, máquinas de fax o similares.

Las principales medidas planteadas para la reducción de las concentraciones del contaminante en las escuelas son:

- Generar nuevos procesos de ventilación no enfocados en la ventilación natural, recomendando implementar sistemas de ventilación mecánica que permitan la filtración de partículas provenientes del exterior, así como su respectivo mantenimiento en las instalaciones de las escuelas.
- Promover procesos de limpieza en las aulas con sustancias que impidan el aumento de las concentraciones internas de material particulado.
- El acabado interior en el aula, como el mobiliario y los textiles en el aula, pueden actuar como reservorios significativos (Chatzidiakou et al., 2012); por lo cual es recomendable el mantenimiento a las instalaciones arquitectónicas y la eliminación de textiles que favorezcan el almacenamiento de material particulado.

Tras la evaluación de las concentraciones de material particulado PM_{2.5} en dos (2) instituciones de educación básica en ambientes interiores y exteriores, desarrollada por medio de sensores de bajo costo, se considera importante destacar:

- El proceso de validación de los sensores de bajo costo y el factor de corrección es primordial para que la evaluación de las condiciones sea efectiva, por tanto, es recomendable implementar un método de validación específico para cada investigación y que exista un factor de corrección delimitado. Algunos autores establecen incluso no solo realizar pruebas en campo, sino aplicar pruebas en condiciones de laboratorio para establecer relaciones más significativas.
- Las mediciones se desarrollaron durante un periodo del año, posiblemente si el estudio se extiende a todo el año variarían muchas condiciones y resultados. Por esto, se recomienda el muestreo durante diferentes temporadas que permita una comparación entre los datos obtenidos para cada caso, y de esta manera, evaluar si la estacionalidad del área incide significativamente en los resultados.
- La medición ambiental en el sitio de monitoreo puede que no represente significativamente los niveles exteriores en el área geográfica de este estudio, teniendo en cuenta que el comportamiento de este contaminante puede tener variaciones espaciales dependiendo de numerosas variables de influencia, como pudo ser demostrado por medio de los resultados presentados.
- Para evaluar correctamente los niveles de exposición del contaminante en la población objeto de estudio, resulta importante comprender el comportamiento y las actividades cotidianas de los niños en las escuelas, a partir del reconocimiento de sus patrones de ocupación en ambientes interiores y exteriores.

- Debido a que no fue medida la tasa de intercambio de aire en cada una de las aulas, y dada la variabilidad de la ventilación, tanto dentro del aula como entre las escuelas, la distribución de la fuente por aula o por tipo de ventilación de la escuela resultaba complicada para su análisis, aspecto que se debe evitar en futuros estudios.
- Para futuros estudios de este tipo, se recomienda incorporar la medición de las condiciones meteorológicas que se presentaban puntualmente dentro de las aulas de clase, teniendo en cuenta representan una de las principales variables de influencia en los resultados, y los reportes obtenidos de estaciones cercanas pueden no obedecer a la meteorología asociada al punto de muestreo.
- Debido a que el tráfico vehicular es la fuente más significativa de PM_{2.5} es importante evaluar las condiciones en las áreas de estudio. Para este propósito, se recomienda complementar el muestreo del contaminante con un aforo vehicular que permita disponer de un inventario del promedio de circulación de vehículos y su impacto en la calidad del aire en el punto de muestreo.

Referencias

- Adgate, J. L., Ramachandran, G., Pratt, G. C., Waller, L. A., & Sexton, K. (2003). Longitudinal variability in outdoor, indoor, and personal PM_{2.5} exposure in healthy non-smoking adults. *Atmospheric Environment*, *37*(7), 993–1002. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00978-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00978-0)
- Akyüz, M., & Çabuk, H. (2009). Meteorological variations of PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey. *Journal of Hazardous Materials*, *170*(1), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.029>
- Alcaldía de Barranquilla. (2020). *Informe general oficina de registro de tránsito*. Barranquilla.
- Alcaldía de Barranquilla. (2012). DTS. Libro I: Componente General Plan de Ordenamiento Territorial Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla, 1–407.
- Alcaldía de Barranquilla. (2016). Barranquilla dispone de 3 estaciones de monitoreo de calidad de aire. Retrieved from <https://www.barranquilla.gov.co/mi-barranquilla/barranquilla-dispone-de-3-estaciones-de-monitoreo-de-calidad-de-aire>
- Allen, R. W., Mar, T., Koenig, J., Liu, L.-J. S., Gould, T., Simpson, C., & Larson, T. (2008). Changes in Lung Function and Airway Inflammation Among Asthmatic Children Residing in a Woodsmoke-Impacted Urban Area. *Inhalation Toxicology*, *20*(4), 423–433. <https://doi.org/10.1080/08958370801903826>
- Almeida, S. M., Canha, N., Silva, A., Do Carmo Freitas, M., Pegas, P., Alves, C., ... Pio, C. A. (2011). Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*, *45*(40), 7594–7599.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.052>

Amato, F., Rivas, I., Viana, M., Moreno, T., Bouso, L., Reche, C., ... Querol, X. (2014). Sources of indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations in primary schools. *Science of the Total Environment*, 490, 757–765. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.051>

Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Luna Azul*, (34), 195–213. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012

Baklanov, A., Molina, L. T., & Gauss, M. (2016). Megacities, air quality and climate. *Atmospheric Environment*, 126, 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>

Barnett, A. G., Williams, G. M., Schwartz, J., Neller, A. H., Best, T. L., Petroeschevsky, A. L., & Simpson, R. W. (2005). Air Pollution and Child Respiratory Health. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 171(11), 1272–1278. <https://doi.org/10.1164/rccm.200411-1586OC>

Barranquilla Verde. (2018). *Informe anual de calidad de aire de barranquilla*.

Barría, R. M., Calvo, M., & Pino, P. (2016). Contaminación intradomiciliaria por material particulado fino (MP_{2,5}) en hogares de recién nacidos. *Revista Chilena de Pediatría*, 87(5), 343–350. <https://doi.org/10.1016/J.RCHIPE.2016.04.007>

Bi, D., Qiu, Y., Cheng, H., Zhou, Q., Liu, X., Chen, J., ... Zhu, Z. (2018). Seasonal characteristics of indoor and outdoor fine particles and their metallic compositions in Nanjing, China. *Building and Environment*, 137, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.008>

- Bi, J., Stowell, J., Seto, E. Y. W., English, P. B., Al-Hamdan, M. Z., Kinney, P. L., ... Liu, Y. (2020). Contribution of low-cost sensor measurements to the prediction of PM_{2.5} levels: A case study in Imperial County, California, USA. *Environmental Research*, 180(August 2019), 108810. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108810>
- Brockmeyer, S., & D'Angiulli, A. (2016). How air pollution alters brain development: The role of neuroinflammation. *Translational Neuroscience*, 7(1), 24–30. <https://doi.org/10.1515/tnsci-2016-0005>
- Brokamp, C., Rao, M. B., Fan, Z., & Ryan, P. H. (2015). Does the elemental composition of indoor and outdoor PM_{2.5} accurately represent the elemental composition of personal PM_{2.5}? *Atmospheric Environment*, 101, 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.022>
- Canha, N., Mandin, C., Ramalho, O., Wyart, G., Ribéron, J., Dassonville, C., ... Derbez, M. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*, 26(3), 350–365. <https://doi.org/10.1111/ina.12222>
- Carrion-Matta, A., Kang, C. M., Gaffin, J. M., Hauptman, M., Phipatanakul, W., Koutrakis, P., & Gold, D. R. (2019). Classroom indoor PM_{2.5} sources and exposures in inner-city schools. *Environment International*, 131(July), 104968. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104968>
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228–259. <https://doi.org/10.1080/17508975.2012.725530>
- Cheng, Y., Lee, S., Gu, Z., Ho, K., Zhang, Y., Huang, Y., ... Zhang, R. (2015). PM_{2.5} and PM_{10-2.5} chemical composition and source apportionment near a Hong Kong roadway.

Particuology. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.10.003>

Contreras, R., Gidhagen, L., & Moreno, J. J. V. (2019). New monitoring methods of particulate material for the study of air quality. *Conference Proceedings - Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Publica, CASAP 2019*, 50(6), 3–6. <https://doi.org/10.1109/CASAP.2019.8916757>

DANE. (2019). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Barranquilla.

Domiguez, L. G. I., Alonso, E. J. H., Guarnizo, J. A. C., Carrillo, J. A., & Guativa, J. A. V. (2019). Monitoreo de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en la ciudad de Villavicencio. In *Conference Proceedings - Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Publica, CASAP 2019* (pp. 8–12). <https://doi.org/10.1109/CASAP.2019.8916702>

Echeverri Londoño, C., & Maya Vasco, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM 2.5) y respirables PM 10) en la ciudad de Medellín. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 7(12), 23–42.

Elbayoumi, M., Ramli, N. A., Md Yusof, N. F. F., & Al Madhoun, W. (2013). Spatial and seasonal variation of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Middle Eastern classrooms. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.067>

Elbayoumi, M., Ramli, N. A., Md Yusof, N. F. F., Yahaya, A. S. Bin, Al Madhoun, W., & Ul-Saufie, A. Z. (2014). Multivariate methods for indoor PM₁₀ and PM_{2.5} modelling in naturally ventilated schools buildings. *Atmospheric Environment*, 94, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.007>

- Feenstra, B., Papapostolou, V., Hasheminassab, S., Zhang, H., Boghossian, B. Der, Cocker, D., & Polidori, A. (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM_{2.5} sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric Environment*, 216(February), 116946. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116946>
- Fromme, H., Diemer, J., Dietrich, S., Cyrus, J., Heinrich, J., Lang, W., ... Twardella, D. (2008). Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Atmospheric Environment*, 42(27), 6597–6605. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.047>
- Gao, M., Cao, J., & Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Xi'an, China. *Environmental Pollution*, 199, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.013>
- Gobernación del Atlántico. (2016). Plan de Desarrollo 2016 - 2019 de la gobernación del Atlántico “Atlántico Líder.” *Gobernación Del Atlántico*, 132.
- Grineski, S. E., & Collins, T. W. (2018). Geographic and social disparities in exposure to air neurotoxicants at U.S. public schools. *Environmental Research*, 161(September 2017), 580–587. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.047>
- Guo, H., Morawska, L., He, C., Zhang, Y. L., Ayoko, G., & Cao, M. (2010). *Characterization of particle number concentrations and PM_{2.5} in a school: Influence of outdoor air pollution on indoor air. Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 17). <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0306-2>
- Halek, F., Kianpour-Rad, M., & Kavousirahim, A. (2013). Parametric evaluation of indoor particulate matters in elementary schools in the central parts of Tehran. *Indoor and Built*

Environment, 22(3), 580–585. <https://doi.org/10.1177/1420326X11433224>

Han, Y., Li, X., Zhu, T., Lv, D., Chen, Y., Hou, an, ... Ren, M. (2016). Characteristics and Relationships between Indoor and Outdoor PM 2.5 in Beijing: A Residential Apartment Case Study. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 2386–2395. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0682>

Hasheminassab, S., Daher, N., Shafer, M. M., Schauer, J. J., Delfino, R. J., & Sioutas, C. (2014). Chemical characterization and source apportionment of indoor and outdoor fine particulate matter (PM_{2.5}) in retirement communities of the Los Angeles Basin. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.044>

Hatzopoulou, M., Weichenthal, S., Dugum, H., Pickett, G., Miranda-Moreno, L., Kulka, R., ... Goldberg, M. (2013). The impact of traffic volume, composition, and road geometry on personal air pollution exposures among cyclists in Montreal, Canada. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 23(1), 46–51. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.85>

IDEAM. (n.d.). Calidad del aire. Retrieved May 6, 2019, from

<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>

Janssen, N. A. H., Van Vliet, P. H. N., Aarts, F., Harssema, H., & Brunekreef, B. (2001). Assessment of exposure to traffic related air pollution of children attending schools near motorways. *Atmospheric Environment*, 35(22), 3875–3884. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00144-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00144-3)

Ji, W., & Zhao, B. (2015). Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor PM_{2.5} concentration: A

model-based estimation. *Building and Environment*, 90, 196–205.

<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.04.006>

Kalimeri, K. K., Bartzis, J. G., Sakellaris, I. A., & de Oliveira Fernandes, E. (2019).

Investigation of the PM_{2.5}, NO₂ and O₃ I/O ratios for office and school microenvironments. *Environmental Research*, 179(2), 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108791>

Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H.,

& Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*.

Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>

Koenig, J. Q., Mar, T. F., Allen, R. W., Jansen, K., Lumley, T., Sullivan, J. H., ... Liu, L.-J. S.

(2005). Pulmonary effects of indoor- and outdoor-generated particles in children with asthma. *Environmental Health Perspectives*, 113(4), 499–503.

<https://doi.org/10.1289/EHP.7511>

Kouyoumdjian, H., & Saliba, N. A. (2006). Mass concentration and ion composition of coarse

and fine particles in an urban area in Beirut: Effect of calcium carbonate on the absorption of nitric and sulfuric acids and the depletion of chloride. *Atmospheric Chemistry and*

Physics, 6(7), 1865–1877. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1865-2006>

Larsen, B. (2003). *Hygiene and Health in Developing Countries: Defining Priorities through Cost-Benefit Assessments*. *International journal of environmental health research* (Vol. 13).

Carfax publishing company. Retrieved from

<https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLSE%3ARN132305857/Hygiene-and-health-in->

developing-countries-defining/

- Li, H., Qin, Y., & Feng, G. (2017). The analysis of PM_{2.5} Outdoor Fine Particulate Matter Impact on Air Quality in the University Libraries Reading Room in Winter of North China. *Procedia Engineering*, 205, 3346–3352. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.09.836>
- Li, J., Zhang, H., Chao, C., Chien, C., Wu, C., Heng, C., ... Biswas, P. (2020a). Integrating low-cost air quality sensor networks with fixed and satellite monitoring systems to study ground-level PM_{2.5}. *Atmospheric Environment*, 223(December 2019), 117293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117293>
- Li, M., Wang, L., Liu, J., Gao, W., Song, T., Sun, Y., ... Wang, Y. (2020b). Exploring the regional pollution characteristics and meteorological formation mechanism of PM_{2.5} in North China during 2013–2017. *Environment International*, 134(November 2019), 105283. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105283>
- Liang, C. S., Duan, F. K., He, K. Bin, & Ma, Y. L. (2016). Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM 2.5. *Environment International*, 86, 150–170. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.016>
- Lillibridge, S. (2000). *Manejo de los aspectos de salud ambiental en los desastres: agua, excretas humanas y albergues. Impacto De Los Desastres en la Salud Publica*
- Lv, Y., Wang, H., Wei, S., Zhang, L., & Zhao, Q. (2017). The Correlation between Indoor and Outdoor Particulate Matter of Different Building Types in Daqing, China. *Procedia Engineering*, 205, 360–367. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.002>
- MacNeill, M., Wallace, L., Kearney, J., Allen, R. W., Van Ryswyk, K., Judek, S., ... Wheeler,

- A. (2012). Factors influencing variability in the infiltration of PM 2.5 mass and its components. *Atmospheric Environment*, *61*, 518–532.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.005>
- Majd, E., McCormack, M., Davis, M., Curriero, F., Berman, J., Connolly, F., ... Koehler, K. (2019). Indoor air quality in inner-city schools and its associations with building characteristics and environmental factors. *Environmental Research*, *170*(November 2018), 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.012>
- Marlier, M. E., Defries, R. S., Kim, P. S., Gaveau, D. L. A., Koplitz, S. N., Jacob, D. J., ... Myers, S. S. (2015). Regional air quality impacts of future fire emissions in Sumatra and Kalimantan. *Environ. Res. Lett*, *10*, 54010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054010>
- Martins, N. R., & Carrilho da Graça, G. (2018). Impact of PM_{2.5} in indoor urban environments: A review. *Sustainable Cities and Society*, *42*(July), 259–275.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.011>
- MinAmbiente. (2020). Gobierno Nacional presenta el estado de la calidad del aire en Colombia y la primera Estrategia Nacional de Calidad del Aire del país. Medellín, Colombia.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire, 287.
- Mohammadyan, M., & Shabankhani, B. (2013). Indoor PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and outdoor PM_{2.5} concentrations in primary schools in Sari, Iran. *Arhiv Za Higijenu Rada i Toksikologiju*, *64*(3), 371–377. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-64-2013-2346>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., ... Williams,

- R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, *116*(April), 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Moya, J., Bearer, C. F., & Etzel, R. a. (2004). Children's Behavior and Physiology and How It Affects Exposure to Environmental Contaminants. *Pediatrics*, *113*(4), 996–1006. <https://doi.org/10.1542/peds.113.4.S1.996>
- Ocampo-Giraldo, D. M., Gonzalez-Calderon, C. A., & Posada-Henao, J. J. (2019). Assessment of trucking bans in urban areas as a strategy to reduce air pollution. *Journal of Transport and Health*, *14*. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100589>
- Oliveira, M., Slezakova, K., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2016). Assessment of air quality in preschool environments (3-5 years old children) with emphasis on elemental composition of PM₁₀ and PM_{2.5}. *Environmental Pollution*, *214*, 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.046>
- OMS. (2018a). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Retrieved May 6, 2019, from [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- OMS. (2018b). Exposure to ambient air pollution from particulate matter for 2016, (April), 6.
- OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Retrieved from http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=B55CAE781E549453492E4D7D1EDAA4DA?sequence=1

- Othman, M., Latif, M. T., & Matsumi, Y. (2019). The exposure of children to PM_{2.5} and dust in indoor and outdoor school classrooms in Kuala Lumpur City Centre. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *170*(December 2018), 739–749.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.042>
- Pateraki, S., Asimakopoulou, D. N., Flocas, H. A., Maggos, T., & Vasilakos, C. (2012). The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}). *Science of the Total Environment*, *419*, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.064>
- PurpleAir. (n.d.-a). How do PurpleAir sensors work?
- PurpleAir. (n.d.-b). PurpleAir PA-II-SD.
- Qu, Y., Wang, H., Zhu, L., & Ji, J. (2017). Concentration Distribution and Control strategy of Indoor PM_{2.5}. *Procedia Engineering*, *205*, 1606–1611.
<https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.10.288>
- Reche, C., Rivas, I., Pandolfi, M., Viana, M., Bouso, L., Álvarez-Pedrerol, M., ... Querol, X. (2015). Real-time indoor and outdoor measurements of black carbon at primary schools. *Atmospheric Environment*, *120*, 417–426. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.044>
- Richmond-Bryant, J., Saganich, C., Bukiewicz, L., & Kalin, R. (2009). Associations of PM_{2.5} and black carbon concentrations with traffic, idling, background pollution, and meteorology during school dismissals. *Science of the Total Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.046>
- Rivas, I., Viana, M., Moreno, T., Bouso, L., Pandolfi, M., Alvarez-Pedrerol, M., ... Querol, X. (2015). Outdoor infiltration and indoor contribution of UFP and BC, OC, secondary

inorganic ions and metals in PM_{2.5} in schools. *Atmospheric Environment*, 106, 129–138.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.055>

Rivas, I., Viana, M., Moreno, T., Pandolfi, M., Amato, F., Reche, C., ... Querol, X. (2014).

Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain.

Environment International, 69, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.009>

Rojas, N., & Galvis, B. (2005). Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, (22), 54–60. Retrieved from

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200006

Romero, H., Irrarázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Climas Urbanos y Contaminación Atmosférica en Santiago de Chile. *Eure*, 36(109), 35–62.

<https://doi.org/10.4067/s0250-71612010000300002>

Ryu, J., Kim, J. J., Byeon, H., Go, T., & Lee, S. J. (2019). Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. *Environmental Pollution*,

245, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.004>

Sayahi, T., Kaufman, D., Becnel, T., Kaur, K., Butterfield, A. E., Collingwood, S., ... Kelly, K.

E. (2019). Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, 255.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113131>

South Coast AQMD. (n.d.). PurpleAir PA-II. Retrieved June 10, 2019, from

<https://www.aqmd.gov/aq-spec/product/purpleair-pa-ii>

Tai, A. P. K., Mickley, L. J., & Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter

(PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3976–3984.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>

Targino, A. C., Gibson, M. D., Krecl, P., Rodrigues, M. V. C., dos Santos, M. M., & de Paula Corrêa, M. (2016). Hotspots of black carbon and PM_{2.5} in an urban area and relationships to traffic characteristics. *Environmental Pollution*, 218, 475–486.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.027>

Tiwari, S., Srivastava, A. K., Bisht, D. S., Parmita, P., Srivastava, M. K., & Attri, S. D. (2013). Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: Influence of meteorology. *Atmospheric Research*, 125–126, 50–62.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.011>

Tryner, J., L'Orange, C., Mehaffy, J., Miller-Lionberg, D., Hofstetter, J. C., Wilson, A., & Volckens, J. (2020). Laboratory evaluation of low-cost PurpleAir PM monitors and in-field correction using co-located portable filter samplers. *Atmospheric Environment*, 220(October 2019), 117067. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117067> UNICEF. (2016). Clear the air for children: The impact of air pollution on children. Retrieved from www.unicef.org/environment

Wang, J., & Ogawa, S. (2015). Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9089–9101. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>

Watson, J. G., & Chow, J. (1998). *Guideline on speciated particulate monitoring*. U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/235341487_Guideline_On_Speciaded_Particiulate_Monitoring

Wichmann, J., Lind, T., Nilsson, M. A. M., & Bellander, T. (2010). PM_{2.5}, soot and NO₂ indoor-outdoor relationships at homes, pre-schools and schools in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment*, *44*(36), 4536–4544.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.08.023>

Wilson, W. E., & Brauer, M. (2006). Estimation of ambient and non-ambient components of particulate matter exposure from a personal monitoring panel study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, *16*(3), 264–274.

<https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500483>

Xu, H., Guinot, B., Shen, Z., Ho, K. F., Niu, X., Xiao, S., ... Cao, J. (2015). Characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} and PM_{0.25} in indoor and outdoor environments of a middle school: Secondary formation of organic carbon and sources identification.

Atmosphere, *6*(3), 361–379. <https://doi.org/10.3390/atmos6030361>

Zalakeviciute, R., Rybarczyk, Y., López-Villada, J., & Diaz Suarez, M. V. (2018). Quantifying decade-long effects of fuel and traffic regulations on urban ambient PM_{2.5} pollution in a mid-size South American city. *Atmospheric Pollution Research*, *9*(1), 66–75.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.07.001>

Zhang, C., Ni, Z., & Ni, L. (2015). Multifractal detrended cross-correlation analysis between PM_{2.5} and meteorological factors. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *438*, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.06.039>

Zhang, L., Morisaki, H., Wei, Y., Li, Z., Yang, L., Zhou, Q., ... Tang, N. (2019). Characteristics

of air pollutants inside and outside a primary school classroom in Beijing and respiratory health impact on children. *Environmental Pollution*, 255, 113147.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113147>

Zwoździak, A., Sówka, I., Krupińska, B., Zwoździak, J., & Nych, A. (2013). Infiltration or indoor sources as determinants of the elemental composition of particulate matter inside a school in Wrocław, Poland? *Building and Environment*, 66, 173–180.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.023>

Anexos



Anexo 1. Aula de clases Institución Educativa A.

Fuente: Autores



Anexo 2. Aula de clases Institución Educativa B.

Fuente: Autores



Anexo 3. Sensor Interno Institución Educativa A.

Fuente: Autores



Anexo 4. Sensor Interno Institución Educativa B.

Fuente: Autores



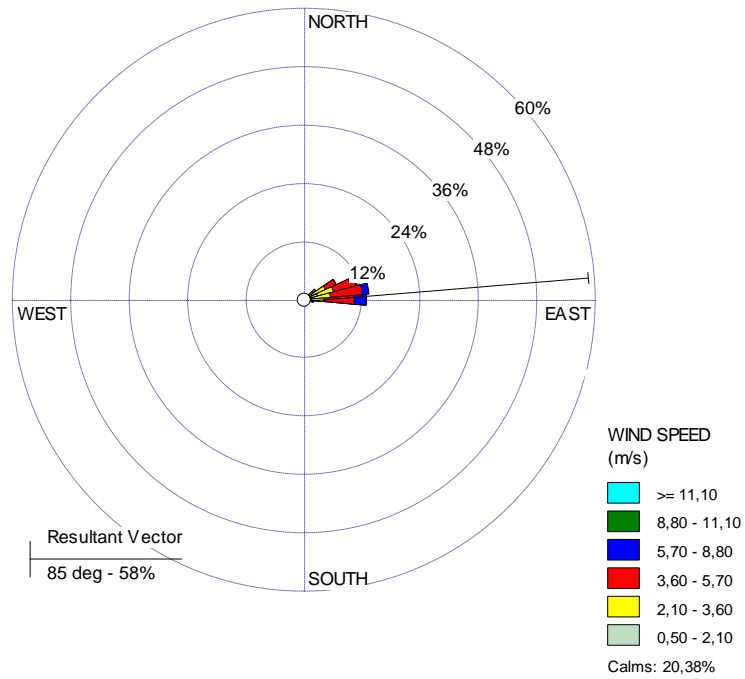
Anexo 5. Sensor Externo Institución Educativa A.

Fuente: Autores



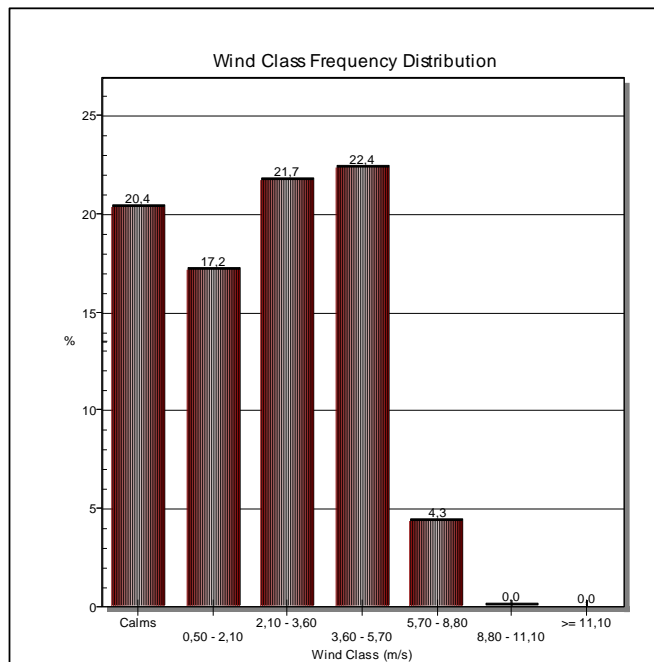
Anexo 6. Sensor Externo Institución Educativa B.

Fuente: Autores



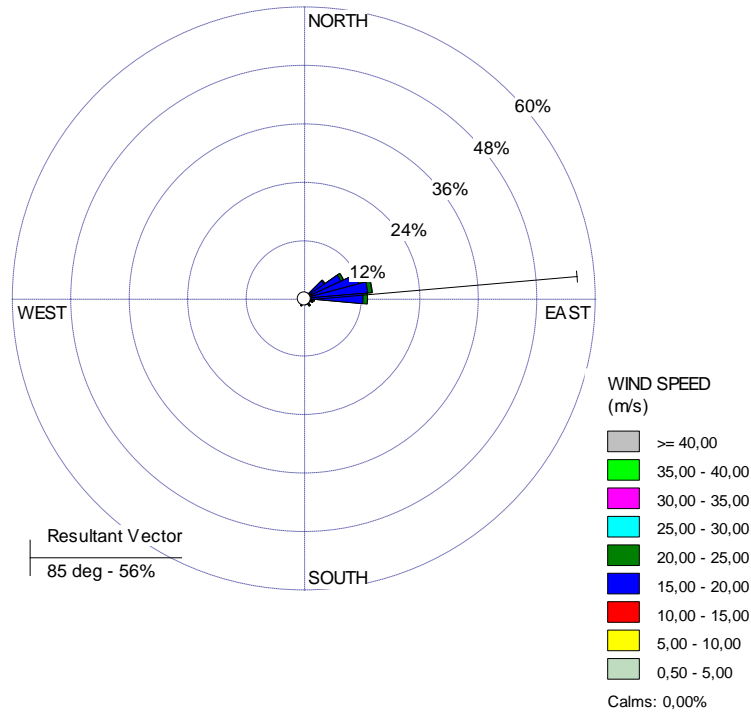
Anexo 7. Rosa de Vientos Estación Universidad de la Costa.

Fuente: Autores



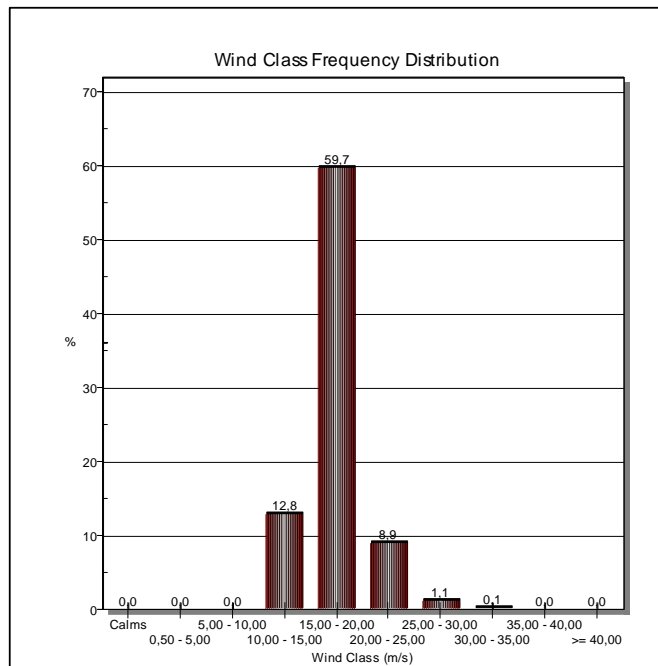
Anexo 8. Gráfica Rosa de Vientos Estación Universidad de la Costa.

Fuente: Autores



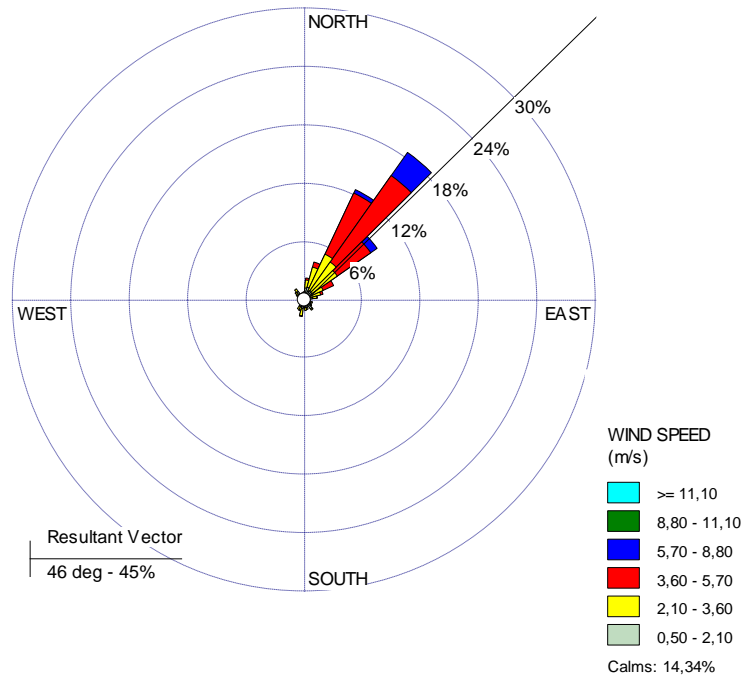
Anexo 9. Rosa de Contaminantes Concentraciones de PM_{2.5} Sensor IEA Externa.

Fuente: Autores



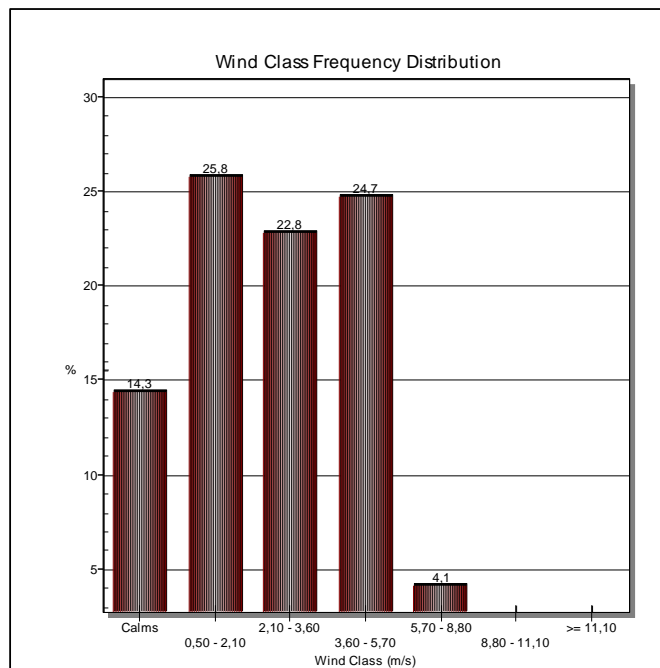
Anexo 10. Gráfica Concentraciones de PM_{2.5} Sensor IEA Externa.

Fuente: Autores



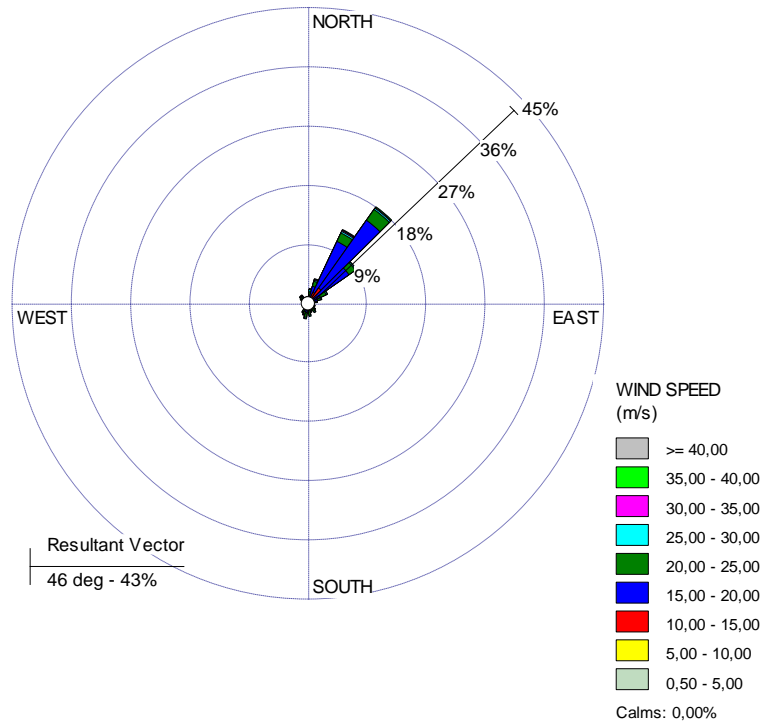
Anexo 11. Rosa de Vientos Estación Escuela de Policía Antonio Nariño.

Fuente: Autores



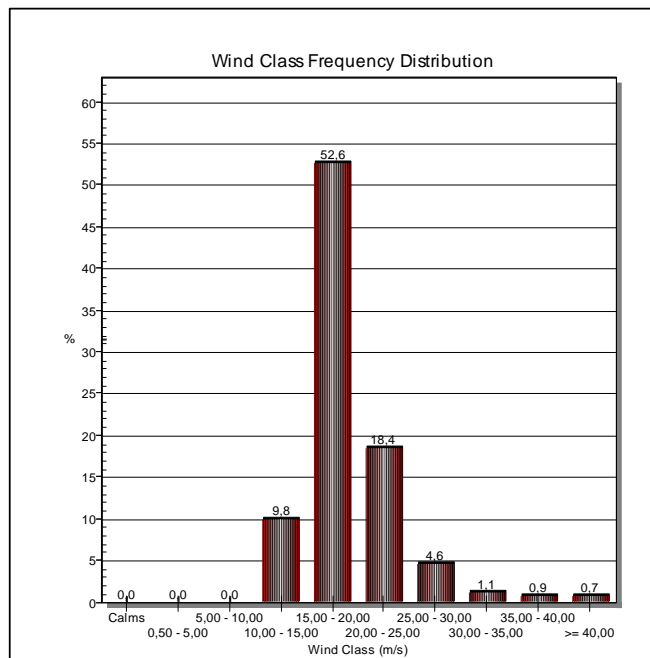
Anexo 12. Gráfica Rosa de Vientos Estación Escuela de Policía Antonio Nariño.

Fuente: Autores



Anexo 13. Rosa de Contaminantes Concentraciones de PM_{2.5} Sensor IEB Externa.

Fuente: Autores



Anexo 14. Gráfica Concentraciones de PM_{2.5} Sensor IEB Externa.

Fuente: Autores