

Incidencia de la altura para la medición de la calidad del aire de PM10 y PM2,5 como parte del cumplimiento del objetivo y características de los SVCA

Incidence of altitude for measuring the air quality of PM10 and PM2.5 as part of meeting the objective and characteristics of AQMS

José A Murad¹  Miguel Ángel Roa Martínez¹  Manuel Ricardo Roa Martínez¹ 

¹Universidad Benito Juárez, Puebla, México.

²Facultad de medio ambiente y recursos naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Resumen

Los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire buscan determinar el cumplimiento de las normas de calidad del aire, y a su vez evaluar los riesgos para la salud pública y el ambiente. La falta de conocimiento y de precisión al momento de aplicar algún criterio de diseño y validación de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire, puede generar incertidumbre en la veracidad de los datos. La presente investigación pretende establecer la concentración de PM10 y PM2.5 a 2 y 10 m de altura para la determinación de su incidencia en el resultado de las mediciones. Se llevaron a cabo las mediciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la facultad FAMARENA Bosa El Porvenir y en la facultad De Artes ASAB, durante un periodo de 7 meses, donde adicionalmente se desarrollaron análisis climatológicos, estadísticos, de correlación y comparación. Los niveles de concentración fueron mayores a 2 m de altura en los dos puntos de estudio, debido a que superan más del 60% del total de datos para cada parámetro. Adicionalmente, se evidenció que PM10 y PM2.5 en ambos puntos de medición, presentan a nivel general diferencias de concentración de 5 a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y concentraciones máximas de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La altura cuenta con una significativa incidencia en la medición independientemente de su origen, convirtiéndose en una variable a evaluar para diseñar un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire.

Abstract

Air Quality Monitoring Systems seek to determine compliance with air quality standards, and at the same time assess risks to public health and the environment. The lack of knowledge and accuracy at the time of applying some criteria for the design and validation of Air Quality Monitoring Systems can generate uncertainty in the veracity of the data. The present research aims to establish the concentration of PM10 and PM2.5 at 2 and 10 m of height to determine its incidence in the result of the measurements. Measurements were carried out at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the FAMARENA Bosa El Porvenir faculty and in the ASAB Arts faculty, during a period of 7 months, where additionally climatological, statistical, correlation and comparison analyses were developed. The concentration levels were higher than 2 m in the two study points, because they exceeded more than 60% of the total data for each parameter. In addition, it was found that PM10 and PM2.5 at both measurement points show general concentration differences of 5 to 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and maximum concentrations of 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The altitude has a significant impact on the measurement regardless of its origin, becoming an important variable to evaluate in order to design an Air Quality Monitoring System.

Keywords:

Monitoring, Parameter, Air Pollution, Correlation

Palabras clave:

Inmisión, calidad del aire, Contaminación Atmosférica, correlación.

Cómo citar:

Murad, J.A., Roa, M.A., Roa, M.R. Incidencia de la altura para la medición de la calidad del aire de PM10 y PM2,5 como parte del cumplimiento del objetivo y características de los SVCA. *Ingeniería y Competitividad*, 2023, 25(3); e-21812828. doi: 10.25100/iyv.v25i3.12828

Recibido: 02-26-23

Aceptado: 30-09-23

Correspondencia:

§jamuradp@udistrital.edu.co
miguelmartinezudtsa@hotmail.es
manuelmartinez.tsa@hotmail.com

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual 4.0.



Conflicto de intereses:
Ninguno declarado

OPEN  ACCESS

¿Por qué se realizó?

la finalidad del proyecto pretende establecer la concentración de PM10 y PM2.5 a 2 y 10 metros de altura para la determinación de su incidencia en el resultado de las mediciones. Aunque la EPA en su CFR40 parte 58 establece un rango de alturas y este está entre 2 y 10 metros, siempre la altura de la toma de muestra debe estar definida al objetivo del estudios de calidad del aire que se esté desarrollando y a que fuente específica se está evaluando, es por ello que buscar la altura apropiada en un producto que busca que los datos de calidad del aire tengan una rigurosidad técnica y no se esté midiendo por medir sin importar ningún criterio o base técnica de medición.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Se evidenció que para los contaminantes PM10 y PM2.5 en ambos puntos de medición se presentan a nivel general diferencias de concentración de 5 a 15 µg/m3 y concentraciones máximas de 40 µg/m3, siendo esto valores significativos e importantes, si se comparan con los límites máximos permisibles de la normatividad y las recomendaciones de la OMS. Esto quiere decir, que al no tener la altura de la toma de muestra como una variable de microlocalización y de justificación técnica basados en los objetivos de medición se podría presentar incertidumbre muy altas en la medición llegando a sub o sobre valorar los resultados.

¿Qué aportan estos resultados?

Al momento de diseñar e implementar un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire o en el desarrollo de estudios de calidad del aire para proyectos obras o actividades dentro de licenciamiento ambiental, es necesario que se realicen este tipo de mediciones para sistemas de tipo fijo o indicativos donde se verifique y justifique la altura de medición del toma de muestra, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en este estudio, demuestran que puede existir una incidencia alta en medir de manera arbitraria entre 2 y 10 metros de altura debido a que se puede encontrar diferencias de concentración que pueden ir desde los 5 a 15 µg/m3.

Graphical Abstract



Introducción

Debido al incremento de la contaminación atmosférica generada por la emisión de diferentes fuentes y agentes contaminantes a nivel mundial (principalmente en los países de ingresos bajos y medianos) [\(1\)](#), se han venido desarrollando e implementando Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), los cuales constituyen una herramienta fundamental para determinar los niveles de inmisión (calidad del aire ambiente) en un área determinada [\(2\)](#), y en consecuencia, establecer su relación con la salud humana y los efectos al medio ambiente [\(3\)](#), conformando así la línea base para la formulación de políticas encaminadas hacia el control y reducción de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos [\(4\)](#).

El diseño y la validación de los SVCA empiezan a ser de mayor relevancia a la hora de correlacionar diferentes criterios de localización, división, objetivo y su clasificación (tipo tráfico, industrial y/o ambiental). Un criterio importante es la altura de medición; es así como la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos establece que los equipos de monitoreo para un SVCA pueden ubicarse en un rango de 2 a 10 m (máximo 15 m) sobre el nivel del suelo [\(5\)](#), independientemente si el objetivo consiste en medir la influencia en la calidad del aire por tráfico vehicular, industrial o ambiental.

En el año 2015 Caramagna presentó un estudio en la ciudad de Catania (Antiguo puerto de la costa este de Sicilia-Italia) donde se llevó a cabo un análisis del perfil vertical de dispersión de partículas en función del diámetro aerodinámico en una carretera congestionada [\(6\)](#), allí se estudió experimentalmente la distribución de partículas de aerosol en función de la altura de muestreo y los diámetros aerodinámicos de las partículas. El monitoreo experimental se efectuó durante las horas pico a tres alturas diferentes. Mediante el análisis de varianza (ANOVA), fue posible verificar la interacción entre el diámetro aerodinámico de las partículas y las alturas de muestreo consideradas, donde fue oportuno deducir que las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} se ven afectadas de alguna manera por la altura del punto de muestreo. Por lo tanto, se analizaron los intervalos predominantes de diámetros aerodinámicos para cada altura donde se consideraron cinco rangos, los cuales se compararon en términos de sus porcentajes para un día laboral típico y un día no laboral. El análisis destacó una gran variabilidad en términos de concentración de partículas, donde tiende a reducirse con diámetros aerodinámicos mayores durante el período de muestreo. El análisis de varianza reveló que las concentraciones del perfil vertical no mostraron una correlación directa con las alturas para todos los casos, a excepción de las partículas más pequeñas (PM₁ y PM_{2,5}).

En la ciudad de Chicago, Estados Unidos, se realizó en el año 2018 un estudio piloto de las variaciones verticales en las concentraciones de contaminantes exteriores y condiciones ambientales a lo largo de la altura de un edificio alto, donde se realizaron mediciones simultáneas de partículas entre 0.3 - 10 µm y mediciones meteorológicas, donde se encontraron variaciones significativas conforme aumenta la altura del edificio [\(7\)](#).

Teniendo en cuenta el contexto anterior, la altura de medición en los SVCA se convierte en una variable de gran importancia, ya que, dependiendo de las condiciones del área de estudio, bien sean locativas, meteorológicas o topográficas, puede incidir en la veracidad del dato que se está obteniendo [\(8\)](#). Dicho criterio plantea las siguientes preguntas: ¿cuál es la altura adecuada en la que debe estar el punto de toma de muestra o inlet para la medición de calidad del aire? ¿hay alguna diferencia entre medir a 2 m o a 10

m de altura? Por consiguiente, el presente artículo pretende determinar la incidencia de la altura para la medición de PM_{10} y $PM_{2.5}$, teniendo en cuenta los diferentes criterios reglamentados para el diseño de los SVCA.

Esta investigación se llevó a cabo en tres fases, donde la fase inicial comprendió la definición de objetivos del SVCA y la definición de criterios macro localización y micro ubicación. Posteriormente, la segunda fase fue la encargada de la selección, caracterización de áreas y medición de parámetros a evaluar. Por último, la fase final abarcó el desarrollo de análisis climatológico, estadístico y cálculos de concentración de parámetros evaluados para un análisis de correlación y comparación de la medición a 2 y 10 m de altura.

Metodología

Fase 1

Para la ejecución de esta fase se estableció el siguiente diagrama de flujo ilustrado en la figura 1.

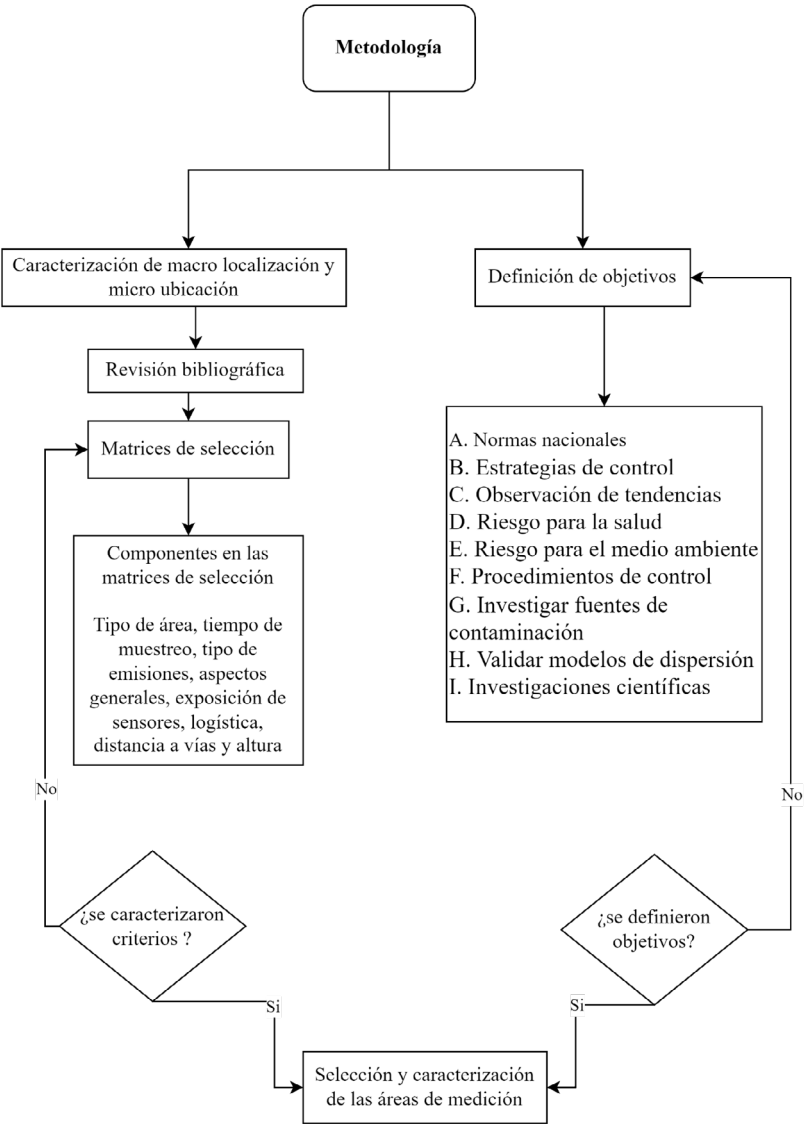


Figura 1. Caracterización de macro localización y micro ubicación y objetivos de SVCA.
Fuente: autores.

La definición de criterios (macro localización y micro ubicación) y objetivos, se basa en la normatividad vigente para el diseño e implementación de SVCA en Colombia (8). Para este estudio se seleccionaron los objetivos de normas nacionales (A), observación de tendencias (C) e investigaciones científicas (I).

Fase 2

Una vez culminada la fase anterior se realiza la selección y caracterización de áreas de puntos de medición, en la cual se define que los puntos estarán ubicados en el centro y sur occidente de la ciudad de Bogotá, Colombia, dentro de las instalaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UDFJC), en las Facultades de Artes ASAB (coordenadas 602179.83 E y 509039.98 N) y de Medio Ambiente y Recursos Naturales FAMARENA – Sede Porvenir (590296.76 m E 512530.26 m N).

A partir de un ejemplo propuesto por el protocolo de calidad del aire para el diseño de sistemas de vigilancia (8), se realizó en el sitio de cada punto de muestreo una caracterización de la distancia a vías requerida para la ubicación de entradas de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5}. Para la caracterización de vías en el punto de FAMARENA Sede el Porvenir, la distancia de la toma de muestras a la vía más cercana se presentó a 30 m, estableciendo así una ubicación de escala media. Teniendo en cuenta la caracterización anterior, se definió para este punto una estación de tipo urbana (área), indicativa (tiempo de muestreo) y de fondo (emisiones dominantes). Por otro lado, en el punto de la Facultad de Artes ASAB, la distancia desde la toma muestras a la vía más cercana, se presentó a 5 m, obteniendo así una ubicación en escala micro e implementando una estación de tipo urbana (área), indicativa (tiempo de muestreo) y de tráfico (emisiones dominantes) debido a su cercanía a la vía. La altura de medición en los dos puntos de muestreo está dada por dos equipos de medición a 2 y 10 m.

Muestreo de material particulado y meteorología

Los equipos de monitoreo usados para la investigación fueron equipos de medición *Dust Sentry* de la casa matriz *Aeroqual* (9), diseñados para proporcionar mediciones de partículas en tiempo real de TSP (*Total Suspended Particles*), PM₁₀, PM_{2,5} o PM₁, bajo el principio de la nefelometría en un rango de 0-2,000 µg/m³.

Para poder iniciar el muestreo y garantizar la representatividad de los datos fue necesario realizar previamente la verificación de flujos y prueba de fugas, las cuales se desarrollaron de la siguiente manera: prueba de chequeo de flujo, chequeo de flujo de purga, chequeo de flujo exhaustivo, verificar cero manual, chequeo láser y cambio de filtro, limpieza de ciclón, desmontaje del ciclón, calibración óptica, y montaje de equipos.

Una vez definidos los puntos de medición, se realizan los monitoreos de los parámetros PM₁₀, PM_{2,5} y de las variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad del viento) (10). Para ambos puntos de muestreo (FAMARENA Sede el Porvenir y la Facultad de Artes ASAB), se midieron de manera independiente los contaminantes establecidos. La simultaneidad del estudio consiste en la medición de los parámetros a 2 y 10 m de altura. Las mediciones se realizaron en tiempo real, con el fin de analizar las variaciones y correlaciones en cuanto a los comportamientos de la concentración del material particulado y de las variables meteorológicas medidas. Los registros de concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} para FAMARENA Sede el Porvenir se realizaron desde el mes de febrero hasta abril de 2019, y para la Facultad de Artes ASAB desde junio hasta agosto del mismo año; se obtuvieron un total de 159322 datos.

La validación de la información se realizó bajo los criterios de las especificaciones del equipo en cuanto a concentración y flujo, procesando datos cada veinticuatro 24 h (durante este periodo se obtenía un dato cada 5 minutos, es decir, un total de 288 datos), estableciendo que para cada día medido debía existir un mínimo de datos del 75% que permitieran un análisis óptimo en la tendencia del comportamiento de la calidad del aire en cada punto, por lo cual se llevaron a cabo los promedios y se inició la correlación con las variables meteorológicas [\(11\)](#) y entre concentraciones para el desarrollo del análisis de la información.

Fase 3

A través de un análisis estadístico, un análisis de correlación y un análisis de comparación, fue posible realizar el estudio de la información. El análisis estadístico se desarrolló por medio de un análisis descriptivo y uno exploratorio, donde el primero se realizó según los valores obtenidos en: mínimos y máximos, media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, curtosis, varianzas y percentiles (10, 50, 90 y 99). Mientras que el análisis exploratorio, se llevó a cabo según los resultados de la prueba de normalidad, gráficos pp, cajas Boxplot, modelo probabilístico y función gamma, correlación de datos y gráficos de dispersión.

En cuanto al análisis de correlación se fijaron diferencias de concentración con respecto a las alturas de medición a 2 y 10 m. Adicionalmente, se analizó la conducta de los parámetros medidos y se buscaron correlaciones entre ellos con el fin de verificar posibles tendencias en los datos obtenidos (se utilizó el programa IBM SPSS Statistics 26.0). Con respecto al análisis de comparación, se establecieron rosas de concentración [\(12\)](#) según los datos obtenidos, donde se comprobaron posibles incidencias del comportamiento de los datos meteorológicos con respecto al comportamiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (se utilizaron los programas OPEN AIR y WRPLOT).

Resultados y discusión

Distribución de las concentraciones

De toda la información recolectada con las dos estaciones instaladas en simultaneidad se evidenció que más del 60% de datos presentaron concentraciones mayores a 2 m de altura, esto se puede observar en la tabla 1 donde se presenta el número total de registros, los datos relacionados con las concentraciones mayores a 2 m y su respectivo porcentaje. Es pertinente indicar que estos porcentajes fueron distribuidos en dos rangos (0-15 y 20-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a condiciones estándar.) de acuerdo con la diferencia de concentración entre alturas en un periodo de cada cinco (5) minutos y según el agrupamiento de los registros. Dicho lo anterior, los dos sitios de medición presentaron un comportamiento similar en cuanto a la distribución de la concentración con respecto a la altura. Sin embargo, el parámetro $PM_{2.5}$ en ASAB presentó un menor porcentaje (48.03%) en las concentraciones mayores a 2 m que en las de 10 m de altura, esto a causa de un fenómeno de resuspensión de material particulado.

Tabla 1. Registros simultáneos de concentración en FAMARENA y ASAB

Sitio de medición	Parámetro	# Total de registros simultáneos	# Total de registros simultáneos de mayores concentraciones a 2m	% de mayores concentraciones a 2m	Distribución de porcentajes de mayores concentraciones a 2m en diferencias de concentración			
					0-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	20-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
FAMARENA	PM ₁₀	37,013	25,646	69.28	22,524	88	3,122	12
	PM _{2,5}	34,694	22,816	65.76	19,363	85	3,453	15
ASAB	PM ₁₀	47,326	28,997	61.27	24,806	86	4,191	14
	PM _{2,5}	40,748	19,575	48.03	18,025	92	1,550	8

Fuente: autores.

Debido a que existe una tendencia principal de mayores concentraciones a 2 m de altura es imprescindible realizar el análisis de la información minuto a minuto, pues de esta manera es posible identificar grandes diferencias de concentración en periodos de tiempo corto, los cuales son omitidos cuando se realiza un análisis de los promedios horarios y diarios. Por lo cual, en la tabla 2 se presenta el número total de datos correspondientes a la tendencia principal distribuidos en los rangos de concentración establecidos para este estudio, los cuales se agrupan en eventos de diferencia de concentración recurrente, eventos extremos y a la vez inmersos en los rangos del Índice de Calidad del Aire (ICA) [\(13\)](#), no con el ánimo de realizar una comparación debido a que el tiempo de exposición no sería el mismo, así como la manera de tratar los datos sino como rangos de referencia lo cual permite inferir en el comportamiento real de las concentraciones entre alturas y el estado de la calidad del aire en su respectiva sede y parámetro.

En la tabla 2 se observa que en ambos parámetros (PM₁₀ y PM_{2,5}) de FAMARENA y ASAB, el evento recurrente de 0 - 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tuvo la mayor predominancia con más del 80% del total de los datos. En FAMARENA, el contaminante PM₁₀ tuvo la mayor cantidad de datos en un rango entre 0 y 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con un total de 24,938 registros. Con respecto al contaminante PM_{2,5}, se llegaron a obtener 10,365 datos con un rango entre 15.5 a 40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo estos los de mayor repetitividad. En ASAB se presentó un caso similar al de FAMARENA, donde el contaminante PM₁₀ tuvo la mayor cantidad de datos en un rango que va de 0 a 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con un total de 28,548. En cuanto al contaminante PM_{2,5}, se obtuvieron 15,228 datos cuya concentración está entre 0 y 15,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo estos los de mayor predominancia.

Tabla 2. Diferencias de concentración en FAMARENA y ASAB

Parámetro / Sitio de medición	Descripción	Rango (µg/m³)	Segmentación de diferencia de concentraciones propuesta para el estudio entre 2 y 10 m								Total
			Eventos recurrentes 0 – 15 (µg/m³)					Eventos extremos 20-40 (µg/m³)			
			5	10	15	20	25	30	35	40	
PM ₁₀ / FAMARENA	Número de datos obtenidos según rango de concentración µg/m³	0-54	12,117	6,930	3,176	941	656	495	260	363	24,938
		55-154	95	109	97	43	44	85	89	146	708
	Sumatoria de intervalos de concentración - %	12,212	7,039	3,273	984	700	580	349	509	25,646	
		22,524					3,122			25,646	
		88%					12%			100	
PM _{2.5} / FAMARENA	Número de datos según rango de concentración µg/m³	0-15.4	7,856*	730	153	1					8,740
		15.5-40.4	4,493	2,800	1,122	1,301	287	291	71		10,365
		40.5-65.4	868	366	406	298	346	310	82	13	2,689
		65.5-150.4	365	180	24	32	112	15	9	285	1,022
	Sumatoria de intervalos de concentración - %	13,582	4,076	1,705	1,632	745	616	162	298	22,816	
		19,363					3,453			22,816	
PM ₁₀ / ASAB	Número de datos según rango de concentración µg/m³	0-54	15,313	6,331	3,138	1,527	879	572	341	447	28,548
		55-154	2	9	13	12	13	19	21	360	449
	Sumatoria de intervalos de concentración - %	15,315	6,340	3,151	1,539	892	591	362	807	28,997	
		24,806**					4,191			28,997	
		86%					14%			100	
PM _{2.5} / ASAB	Número de datos según rango de concentración µg/m³	0-15.4	11,697	3,067	464						15,228
		15.5-40.4	734	821	1,053	698	305	175	80	23	3,889
		40.5-65.4	81	50	30	15	13	18	36	104	347
		65.5-150.4	12	11	5	7	9	8	4	55	111
	Sumatoria de intervalos de concentración - %	12,524	3,949	1,552	720	327	201	120	182	19,575	
		18,025					1,550			19,575	
			92%					8%***			100

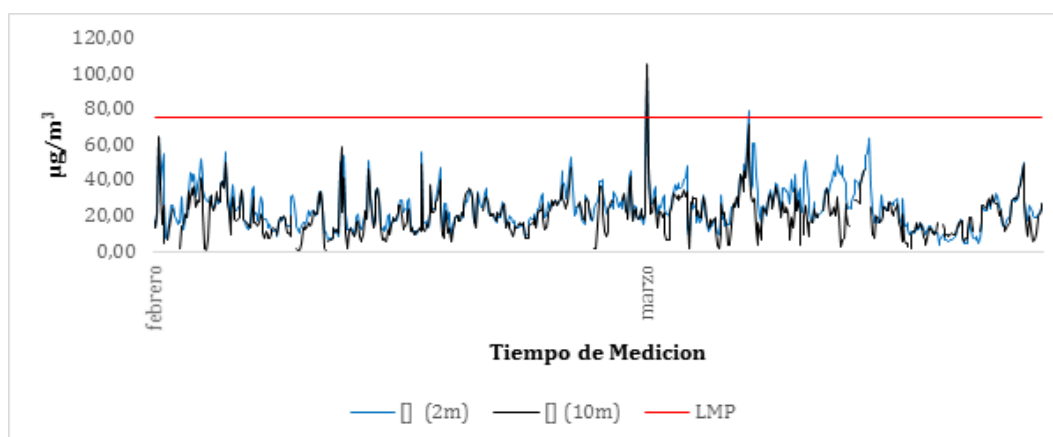
* Este valor corresponde al número total de datos obtenido de los 19,363 tomados en el monitoreo, dentro de un rango de 0-15,4 µg/m³, donde su diferencia entre los 2 y 10 m de altura es de aproximadamente 5 µg/m³ como evento recurrente en la medición.

** Este valor es el total de datos obtenidos para el contaminante PM₁₀ en la sede ASAB, cuyos rangos de concentración están entre 0 y 154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, así como las diferencias de la concentración en los 2 y 10 de alturas no superan los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como evento recurrente en la medición.

***El 8% es el porcentaje del total de datos tomados para la sede ASAB y su contaminante PM_{2,5}, que corresponde a 19,575 datos para el segmento comprendido entre 20 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como evento extremo en la diferencia de concentración entre los 2 y 10 m de altura. **Fuente:** autores.

Concentraciones promedio horario

La figura 2 muestra el promedio horario de las concentraciones para PM₁₀ para cada altura de trabajo, siendo esta de 2 y 10 m durante los meses de febrero y marzo de 2019. Allí se evidencia un comportamiento o fluctuaciones similares del contaminante entre las dos alturas, es decir, la tendencia indica cuando se eleva o disminuye la concentración a 2 m lo mismo sucede a 10 m, sin importar las condiciones que pueden afectar el reporte como son la presencia de emisiones y la variabilidad meteorológica, situación que permite establecer que en el 60% del tiempo, la data recopilada presenta mayores concentraciones a una altura de 2 m.



*LMP: Límite máximo permisible 24 h según la OMS.

Figura 2. Concentración promedio horario PM₁₀ a diferentes alturas FAMARENA. Fuente: autores.

El comportamiento de los datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos a 2 y 10 m de altura ilustrado en la figura 3 refleja que la concentración obtenida es mayor a 2 m de altura en el 65% de los casos, mientras que solo se presenta un 35% de eventos donde la concentración es mayor a 10 m, para un total 579 datos. Con respecto a la comparación con el límite máximo permisible de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición de 24 h (14), se evidenció que un 15 % de la información se encuentra por encima de este valor, mientras que un 9% adicional supera el límite de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 h recomendado por la organización mundial de la salud (15). Una de las condiciones que presenta la información de calidad del aire corresponde a que para el mes de abril se reducen sus concentraciones, esto se debió en un principio al inicio de una temporada de lluvias, llevando a un cambio en las condiciones de estabilidad atmosférica del sector de medición y por ende a la dispersión de los contaminantes, sin embargo, las diferencias de las concentraciones se mantienen en cuanto a que la medición a 2 m es mayor que la de 10 m.

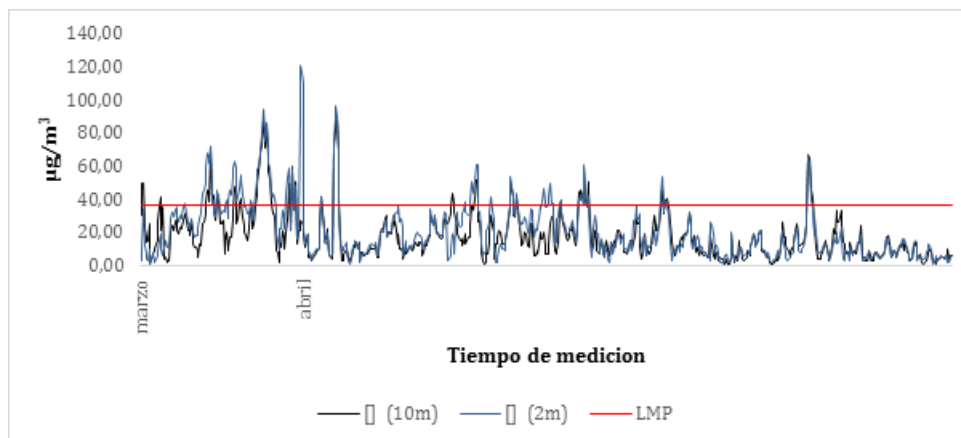


Figura 3. Concentración promedio horario $PM_{2.5}$ a diferentes alturas FAMARENA. Fuente: autores.

Las diferencias promedio horario de concentración que se presentan en la figura 4 para el parámetro PM_{10} en la sede ASAB muestra que de un total de 792 promedios horarios analizados, en el 64% de estos la concentración a 2 m de altura es mayor que lo reportado a 10 m. Adicionalmente, se presentaron datos atípicos o súbitos donde las diferencias aumentan y disminuyen de manera abrupta, resultando que no siempre indica que el comportamiento de los niveles de concentración por altura sea igual, lo que conlleva a realizar una verificación estadística por medio de un análisis de correlación. En este caso, no se registraron datos que superaran los niveles máximos permisibles de la normatividad vigente. Al realizar un análisis comparativo entre las tendencias presentadas en los dos sitios de medición, se observó que en FAMARENA, las diferencias de concentración por alturas son más extremas que en la sede ASAB a nivel promedio horario.

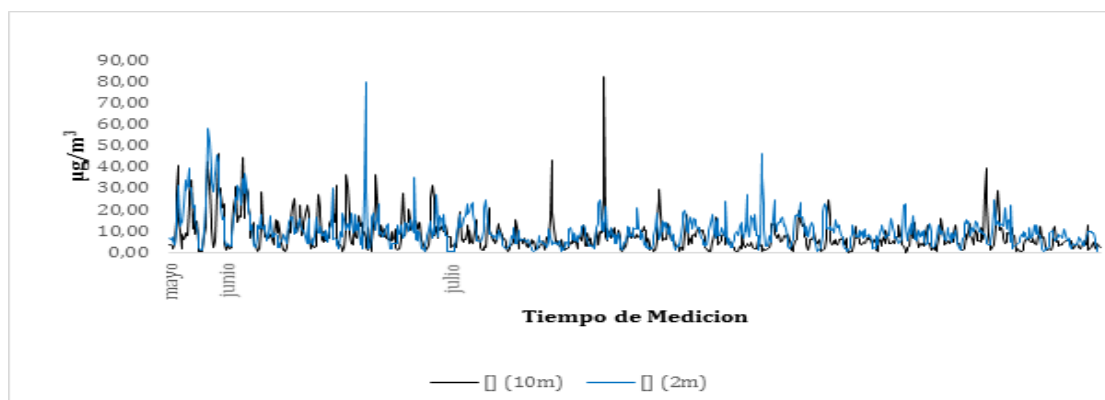


Figura 4. Concentración promedio horario PM_{10} a diferentes alturas ASAB. Fuente: autores.

En la figura 5 el parámetro $PM_{2.5}$ en la sede ASAB presentó un comportamiento similar en las mediciones realizadas a 2 y 10 m de altura. Sin embargo, se tienen algunas excedencias hacia la mitad del mes de agosto, donde las concentraciones presentaron un ascenso que llego a tener $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ adicionales al límite máximo permisible de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, la mayoría del tiempo se está cumpliendo con este límite, pero no el referente como directriz de la OMS de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, se presenta un pico hacia finales de la tercera semana del mismo mes para la altura de 10m de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo este valor atípico y puntual y no analizado. Por otro lado, la concentración



entre alturas no superó los 10 µg/m³, aunque puede considerarse como baja, si es una concentración considerable e importante, debido a que una diferencia de esta magnitud por estar midiendo en una altura no relacionada con el objetivo del estudio hará que los resultados se distorsionen y no muestren la realidad de la inmisión y al proponer medidas de prevención, control y mitigación, estas no estarán acordes a la situación evaluada.

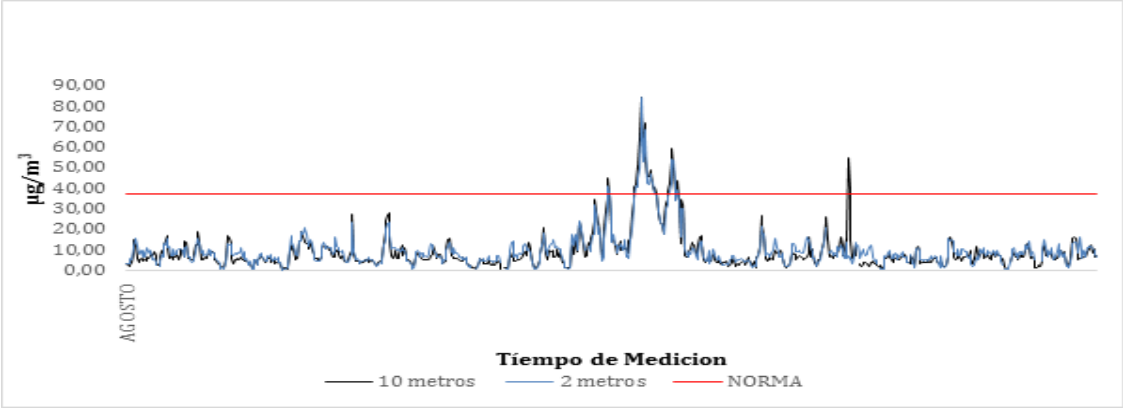


Figura 5. Concentración promedio horario PM_{2,5} a diferentes alturas ASAB. Fuente: autores.

Análisis estadístico

Para este análisis se definió como primer eje pruebas de normalidad a la variable x, para determinar si existía un comportamiento simétrico. En el segundo eje se realizó una estadística descriptiva que permitiera describir el fenómeno de estudio, y finalizando se realizó una estadística exploratoria.

Prueba de normalidad

La prueba de normalidad para las concentraciones reportadas en FAMARENA y ASAB con respecto a los parámetros de estudio (PM₁₀ y PM_{2,5}), como se ilustra en la tabla 3, arrojó en ambos casos un resultado de significancia menor a 0.05, lo cual indica que las variables no tienen una distribución normal o en forma de campana. Por ende, los datos no se comportan de una manera simétrica alrededor de la media.

Tablo 3. Pruebas de normalidad

PM ₁₀ FAMARENA				PM _{2,5} FAMARENA			
kolmogorov-smirnov				kolmogorov-smirnov			
Altura (m)	Estadístico	gl	Sig	Altura (m)	Estadístico	gl	Sig
2	.078	37,013	.000	2	.124	34,694	.000
10	.054	37,013	.000	10	.112	34,694	.000
PM ₁₀ ASAB				PM _{2,5} ASAB			
kolmogorov-smirnov				kolmogorov-smirnov			
Altura (m)	Estadístico	gl	Sig	Altura (m)	Estadístico	gl	Sig
2	.211	47,321	.000	2	.184	40,747	.000
10	.251	47,321	.000	10	.195	40,747	.000

Fuente: autores.

Correlaciones

La relación de variables numéricas aleatorias se hace por medio de la correlación, cuando los datos presentan valores extremos se usa el coeficiente de Spearman, debido a que dichos valores afectan considerablemente el coeficiente de correlación de Pearson, o ante distribuciones no normal. En la tabla 4 están las correlaciones para los parámetros de PM₁₀ y PM_{2.5} a diferentes alturas, en las cuales se realizó el monitoreo en FAMARENA. Es de resaltar que el grado de significancia que usualmente se trabaja es del 5%, pero en este caso el grado de significancia fue del 1% haciendo más exigente la prueba. Adicionalmente, se identificó que la correlación para el parámetro de PM₁₀ y PM_{2.5} es de 0.762, y de 0.81respectivamente, esto indica que la correlación es buena, lo cual representa que para cualquiera de los dos parámetros de medición se presentó el mismo comportamiento de incremento o disminución de la concentración a 2 y a 10 m de altura.

Tabla 4. Correlaciones entre concentraciones FAMARENA

PM ₁₀ - PM _{2.5} - FAMARENA								
Correlación PM ₁₀				Correlación PM _{2.5}				
		10 m	2 m			10 m	2 m	
Rho de Spearman		Coef de correlación	1			Coef de correlación	1	0.810**
	10 m	Sig. (bilateral)	0.000	Spearman	10 m	Sig. (bilateral)		0.000
		N	37,275			N	36,478	34,755
		Coef de correlación	0.762**			Coef de correlación	0.810**	1
	2 m	Sig. (bilateral)	0.000		2 m	Sig. (bilateral)	.000	
		N	37,013			N	34,755	35,590

La correlación es significativa 0,01 bilateral. **Fuente: autores.

En cuanto la tabla 5 se identificó que la correlación para el parámetro de PM₁₀ y PM_{2.5} es de 0.341, y 0.55 respectivamente, esto indica que las correlaciones son bajas e intermedias, lo cual demuestra que al existir aumentos o disminuciones de la concentración a cualquiera de las dos alturas, no garantiza que suceda lo mismo para la otra, abriendo paso al estudio de factores externos que inciden en la variación de concentración a 2 y 10 m de altura. Uno de estos factores puede ser la temperatura, la variación de esta a 2 y 10 m incidió en la resuspensión del contaminante invirtiendo las tendencias en el análisis de la información minuto a minuto.

Tabla 5. Correlaciones entre concentraciones ASAB

PM ₁₀ - PM _{2.5} - ASAB								
Correlación PM ₁₀				Correlación PM _{2.5}				
		10 m	2 m			10 m	2 m	
Rho de Spearman		Coef de correlación	1			Coef de correlación	1	0.555**
	10 m	Sig. (bilateral)	0.000	Spearman	10 m	Sig. (bilateral)		0.000
		N	46,994			N	43,689	40,747
		Coef de correlación	0.341**			Coef de correlación	0.555**	1
	2 m	Sig. (bilateral)	0.000		2 m	Sig. (bilateral)	.000	
		N	46,868			N	40,747	41,585

La correlación es significativa 0,01 bilateral. **Fuente: autores.

Gráficos de dispersión

En la figura 6 en FAMARENA el coeficiente de determinación que está dado en el gráfico por R^2 nos expresa la parte proporcional que indica la varianza de factores comunes, al no ser una correlación perfectamente positiva (1), es importante poder determinar en qué porcentaje incide lo que pasa a 2 m de altura con respecto a los aumentos o descensos de concentraciones que se registran a 10 m. Según los valores que toma R^2 , para PM₁₀ en un 51% de los casos lo que ocurre a 2 m de altura incide en el comportamiento que se presenta a 10 m de altura, mientras que para PM_{2,5} dicho evento ocurre en un 63% de los casos, resaltando que estos valores se alteran de forma importante ante la presencia de un valor extremo, los cuales no fueron omitidos al ser concentraciones reportadas y que se encuentran en el rango de medición de los equipos *Dust sentry*. Para la ASAB en la figura 7, se observa la dispersión para los parámetros PM₁₀ y PM_{2,5}, donde el coeficiente de determinación que está dado en el gráfico por R^2 , indica que en el parámetro PM₁₀ tan solo el 7,4% de las concentraciones que se registran a 2 m, tienen un comportamiento similar a las reportadas a 10 m de altura, y para el parámetro PM_{2,5} un 39% de las veces. De lo cual se infiere que entre alturas puede existir algún fenómeno externo que incidió en la diferencia de concentraciones.

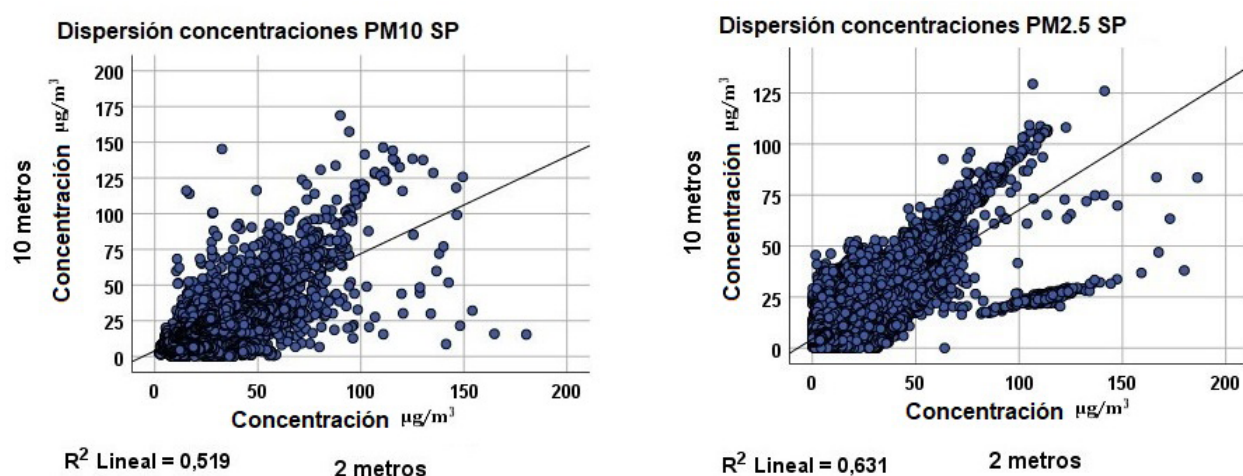


Figura 6. Gráficos de dispersión FAMARENA. Fuente: autores.

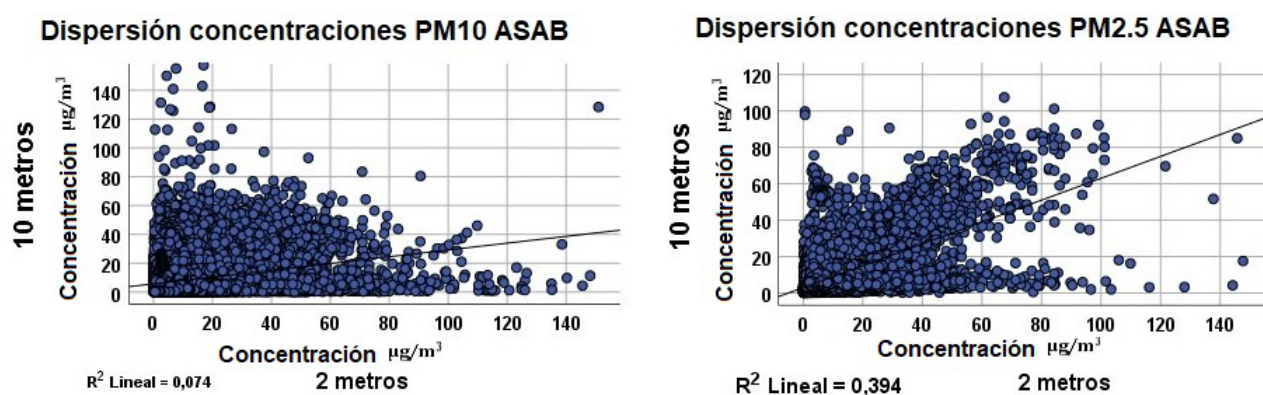


Figura 7. Gráficos de dispersión ASAB. Fuente: autores.

Diagrama Boxplot

En la figura 8 y 9 se ilustra el comportamiento del total de datos de manera minatural, horaria y diaria. En el caso de PM_{10} en FAMARENA, se realizó el análisis de información minuto a minuto con 41,423 datos. Ante la presencia de atípicos extremos, se determinó establecer el porcentaje de información que se encuentra entre los límites superior e inferior en el cual se hallan los datos comunes del estudio, reflejando que el 98% del total de la información se encuentra dentro de este rango de datos, lo cual corrobora el resultado de la curtosis y asimetría, siendo datos agrupados con un pequeño número de valores extremos. Además, en las mismas figuras también se muestran dos líneas rojas, la primera representa el valor límite permisible según la norma nacional (VLP) 24 h y la segunda la recomendación de la concentración de la organización mundial de la salud (OMS) 24 h. En la altura de medición a 2 m, se evidenciaron las mayores concentraciones y la mayor cantidad de datos mediante el manejo de la información minuto a minuto. Por ende, se realizó la comparación con las dos líneas de referencia, el porcentaje de información que supera VLP es del 1% y del 4% la recomendación de la OMS, de lo cual resulta que los datos atípicos extremos no se retiran del *Boxplot*, debido a que son concentraciones reportadas por los equipos de monitoreo con un rango de 0 a 2,000 $\mu g/m^3$ y en los cuales se presentó una exposición de algún receptor sensible.

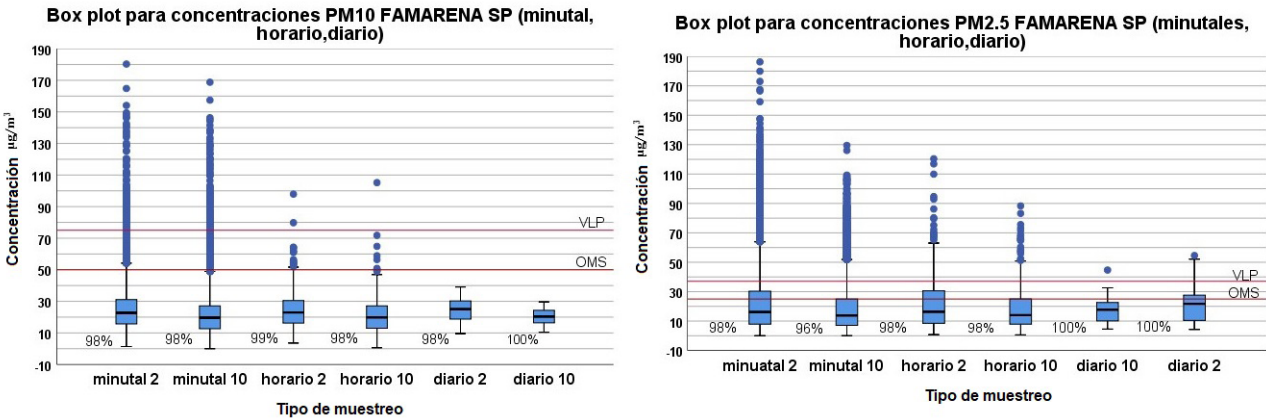


Figura 8. Boxplot para concentraciones FAMARENA. Fuente: autores.

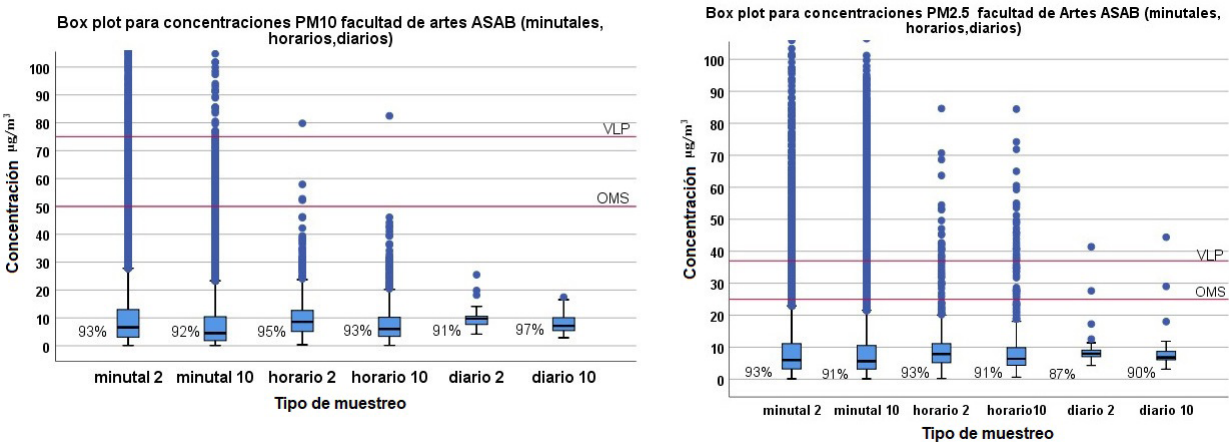


Figura 9. Boxplot para concentraciones ASAB. Fuente: autores.

En cuanto a las mediciones $PM_{2.5}$ en FAMARENA con un total de datos registrados de 35,590 a 2 m de altura, se delimitó el porcentaje de información que se encontraba entre los límites superior e inferior de manera minatural, horaria, y diaria. Para la información minatural existe un mayor porcentaje de atípicos extremos en la altura correspondiente a

10 m, dejando un 96% para datos pertenecientes al rango de datos comunes y un 4 % para atípicos extremos. De manera horaria y diaria existe una disminución de atípicos extremos. Se evidenció que para valores atípicos hacia la izquierda "límite inferior" del *Boxplot* no se registra información, siendo los valores cercanos a cero datos ubicados dentro del rango de datos comunes. Al realizar el análisis con respecto a las dos líneas de referencia se encuentra que para el VLP 24 h existe un 15% de la información por encima, y para la referencia de la OMS un 34% de información por encima de esta. Teniendo en cuenta que las mayores concentraciones se presentaron a 2 m de altura, se realizó un análisis de la información a 10 m evidenciando la disminución del porcentaje de datos que superan el límite máximo permisible, en la cual se encontró que para el VLP existe un 10% de información por encima de la norma, y para el valor de referencia de la OMS un 25%. En ambos casos existe una disminución en su comportamiento.

Al realizar un análisis de comparación entre el *Boxplot* en FAMARENA y ASAB, se tiene que la cantidad de datos empleados en el análisis superan el 90% del total de la información tanto para los contaminantes PM₁₀ como PM_{2,5}. Así mismo, se registró un aumento en la recurrencia de valores atípicos extremos para ASAB posiblemente por encontrarse cerca a una fuente lineal obteniendo menores rangos de concentración, pero con mayor volumen de datos, lo que lleva a interpretar que se presentó una concentración de la información en un rango de datos menor. Como se ilustra en la figura 8 y 9, para los datos promedio horario y promedio diario se presenta un incremento en el registro de atípicos extremos, lo cual nos indica que a pesar de que exista un porcentaje pequeño de atípicos, estos representan altas concentraciones con respecto a las líneas de referencia. Para ambas alturas existe una disminución considerable de información por encima de la norma VLP y de la recomendación de la OMS. Se concluye una disminución en la concentración comparada con FAMARENA, pero con la persistencia de la diferencia de concentración entre alturas como se evidencia en las medianas y los análisis anteriores.

Así mismo evidenciamos el *Boxplot* para las mediciones PM_{2,5} en ASAB con un total de 41,585 datos registrados a 2 m de altura, si lo comparamos con el parámetro PM₁₀ existe un leve incremento en la recurrencia de atípicos extremos en los tres ejes de análisis minutar, horario, y diario, siendo más notorio en la información horaria. Con respecto a las líneas de referencia, existe un incremento en el porcentaje de datos por encima de la norma y de la recomendación de la OMS, si lo comparamos con el parámetro PM₁₀ en la misma sede.

Conclusiones

Se determinó que más del 60% de la información registrada en las sedes FAMARENA y ASAB, indica mayores concentraciones cuando el inlet o punto de toma de muestra se encuentra ubicado a 2 m de altura, donde las diferencias de concentración llegan hasta los 15 µg/m³ con respecto a lo que se registra a 10 m de altura. Es por esto que a pesar de que el CFR40 parte 50 apéndice 58 de la EPA indica que es posible medir entre 2 a 7 m de altura cuando se tiene escala micro o de tipo media o entre 2 a 15 m para otro tipo de escala. La definición de los objetivos de medición de las estaciones de calidad del aire debe determinar la altura a la cual se debe ubicar el inlet. Siendo así, esta diferencia puede incidir en la aplicación de las declaratorias de las alertas y la definición de las posibles áreas que tienen riesgo por contaminación atmosférica, como en la afectación en la salud pública de los posibles receptores sensibles.

Se estableció que la caracterización de criterios de macro localización y micro ubicación, así como la definición de sus objetivos, es de gran importancia para el diseño e implementación de los SVCA. Estos factores permiten realizar una identificación previa de las posibles problemáticas que podrían presentarse para la ubicación y características de los equipos de medición, y cómo en el presente caso para evitar posibles microambientes que alteren las mediciones y el objetivo estudio.

Se concluyó que la mayor diferencia de concentración por altura se presentó en FAMARENA en ambos parámetros de seguimiento, esto por ser un sitio de muestreo donde no se cuenta con fuentes de emisión cercanas, pero sí se encuentra en la dirección predominante del viento de Bogotá, llegando allí gran parte de la dispersión de los contaminantes emitidos por sus diferentes fuentes lo que permite determinar que el parámetro $PM_{2.5}$ tiene un porcentaje significativo de concentraciones por encima de la norma y de la recomendación de concentración dada por la OMS.

Se determinó que, al correlacionar la información de ambos parámetros de medición las concentraciones a 2 y 10 m de altura en FAMARENA, están correlacionadas de manera robusta, indicando que, al momento de existir un aumento en la concentración registrada en la primera altura, ocurrirá exactamente lo mismo en la segunda, manteniendo las diferencias ya mencionadas. Sin embargo, en la sede ASAB las correlaciones se mantienen pasando de moderadas a bajas, debido a la condición del sitio de muestreo, siendo un área urbana con presencia de edificios y fuentes móviles cercanas.

Referencias

- (1). OMS. "Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen [WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary]," Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- (2). MAVDT. (2008). *Manual para la elaboración de planes de gestión de la calidad del aire*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527540/ara+la+Elaboraci%C3%B3n+de+Planes+de+Gesti%C3%B3n+de+la+Calidad+del+Aire.pdf/27cbbAAF-0ecf-4d86-b0dc-18a2402d694e>, Consultado en: Abril 29, 2022.
- (3). Raherison C. "Contaminación atmosférica y medioambiental y patología respiratoria," *EMC - Tratado de Medicina*, vol. 21, no. 3, pp. 1-9, agt, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1636-5410\(20\)44024-3](https://doi.org/10.1016/S1636-5410(20)44024-3)
- (4). IDEAM. "Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010," Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D. C., Colombia, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/5.+Informe+del+estado+de+la+calidad+del+aire+2007-2010.pdf/52d841b0-afd0-4b8e-83e5-444c3d17ed29?version=1.0>
- (5). EPA. 40 CFR Apéndice E de la Parte 58 - Criterios de ubicación de la ruta de monitoreo y la sonda para el monitoreo de la calidad del aire ambiental, 2018. Disponible en: https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-E_to_part_58
- (6). Caramagna A, Famoso F, Lanzafame R y Monforte P. "Analysis of Vertical Profile of Particulates Dispersion in Function of the Aerodynamic Diameter at a Congested Road

in Catania," *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 702-707, dic, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.795>

(7). Azimi P, Zhao H, Fazli T, Zhao D, Faramarzi A, Leung L y Stephens B. "Pilot study of the vertical variations in outdoor pollutant concentrations and environmental conditions along the height of a tall building," *Building and Environment*, vol. 138, pp. 124-134, jun, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.031>

(8). MAVDT, (2010). *Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Diseño.pdf, Consultado en: Abril 29, 2022.

(9). Aeroqual. "Dust sentry," Aeroqual limited, Auckland, Nueva Zelanda, abr, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.ayt.cl/files/catalogo-Dust-Sentry-2015-abril.pdf>

(10). Buitrago A y Tejeiro J. "Influencia de las condiciones meteorológicas en la concentración de PST y PM₁₀ en inmediaciones de la universidad santo tomás sede loma linda," Proyecto de grado, Facultad Ingeniería Ambiental., Universidad Santo Tomás., Villavicencio, Colombia, 2019. p. 76. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/15598>

(11). Arrieta A. "Dispersión de material particulado (PM₁₀), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos," *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 16, no. 2, pp. 43-54, 2016. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6096112.pdf>

(12). Reiminger N, Jurado X, Vazquez J, Wemmert C, Blond N, Wertel J y Dufresne M. "Methodologies to assess mean annual air pollution concentration combining numerical results and wind roses," *Sustainable Cities and Society*, vol. 59, pp. 102221, agt, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102221>

(13). Hernández A. "Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Aire - ICA (Versión 1,00)". Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/641368/2.01+HM+Indice+calidad+aire.pdf/>

(14). MADS. (2017, Nov. 01). Resolución 2254, Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f#:~:text=Art%C3%ADculo%2018,.por%20parte%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.>

(15). OMS. "OMS Guías de Calidad del Aire Actualización Mundial 2005," Organización Mundial de la Salud, Bonn, Alemania, 2005. [En línea]. Disponible en: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/52697/OMSGuia2005_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y