

INFORME FINAL: CONCURSO 'CALI RESPIRA' - EQUIPO AIR QUALITY

ANGELLY ORTEGA MUÑOZ
CAROLINA SALCEDO PORTILLA
JOHAN HERNÁNDEZ VALENCIA
SANTIAGO RODAS ARIAS
VANESSA TOLEDO SERNA

Documento final del concurso 'Cali respira' del equipo Air Quality

Director: JUAN PABLO SILVA VINASCO



Diciembre 2019

RESUMEN

El presente proyecto se enmarca en el contexto del concurso Cali Respira. El grupo Air Quality de la Universidad del Valle, teniendo en cuenta que en el SVCASC solo se mide $PM_{2.5}$ en cuatro de las nueve estaciones de calidad del aire administradas por el DAGMA, diseñó una estrategia para conocer las concentraciones de este contaminante en las otras cinco zonas de influencia donde no hay mediciones de este parámetro: FLORA, ERA-OBREIRO, ERMITA y CAÑAVERALEJO.

Esto con el propósito de incrementar la cobertura y conocimiento de la calidad del aire en estas zonas y contribuir a la toma de decisiones respecto a la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Cali. Para poner en práctica la estrategia, cada una de las zonas fueron subdivididas en puntos de monitoreo representativos, ya sea por el número de habitantes y las fuentes de emisión que se encuentran en estos puntos. Entre los principales puntos seleccionados se tiene: Sameco, La Flora, Terminalito, La Tertulia, Ermita, Chipichape, ERA, San Pascual y Comfenalco, Cañaveralejo, Palmetto Plaza y La Nave. El monitoreo en estos puntos se realizó los días lunes, jueves y sábado, considerados representativos de la dinámica de la ciudad. Igualmente, cada día se subdividió en tres períodos mañana (M), tarde (T) y noche (N). El equipo utilizado para las mediciones fue el muestreador portátil Airbeam2 de Habitatmap y el monitoreo se realizó entre el 7 de octubre al 4 de noviembre de 2019.

Los datos obtenidos en el monitoreo fueron sometidos a un análisis exploratorio para conocer la variación entre mediciones y determinar así, la manera óptima de agrupar los datos que proporciona el medidor Airbeam2. Los datos agrupados fueron procesados a gráficos de series de tiempo y boxplots para determinar la variación diaria, temporal y espacial de los datos. Posteriormente, toda la información fue llevada a un Geovisorweb basado en una arquitectura de tres capas soportado en Javascript, para crear una aplicación web dinámica que permita a los ciudadanos consultar el estado de la calidad del aire en los puntos de monitoreo. Finalmente, se realizó un análisis de comparabilidad de las mediciones que provee el Airbeam2 frente a las que se obtienen del medidor de $PM_{2.5}$ localizado en la estación de monitoreo Univalle del DAGMA.

Los datos indicaron que en ningún punto se se superó la norma de calidad del aire diaria según la Resolución 2254 de 2017. Sin embargo, en algunos puntos de la ciudad tales como Cañaveralejo ($53\mu g/m^3$), Palmetto ($43\mu g/m^3$), San Pascual ($47\mu g/m^3$), Terminalito ($37\mu g/m^3$) y Tertulia ($42\mu g/m^3$) se presentaron valores pico puntuales de concentración que si superan el límite de dicha Resolución. Igualmente, se destaca que en los puntos

Cañaveralejo, San Pascual, Palmetto, La Tertulia y Comfenalco, los valores de media superan el valor establecidos en las guías de la [OMS, 2005]. En cuanto a la variación diaria se observó que los días jueves se presentaron las mayores concentraciones con valores tan altos como $43\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana $21\mu\text{g}/\text{m}^3$) mientras que el período donde se observaron las mayores concentraciones en la mañana ($23\mu\text{g}/\text{m}^3$) y tarde ($20\mu\text{g}/\text{m}^3$). En cuanto a la comparación de los datos del Airbeam2 y la estación Univalle se estimó que el coeficiente de Pearson fue 0.819 mostrando una fuerte asociación positiva entre ambas mediciones.

Palabras clave— PM_{10} , Calidad del aire, Cali, $\text{PM}_{2.5}$.

Siglas

DAGMA Departamento Administrativo para la Gestión del Medio Ambiente. 1, 5, 10, 12, 29, 32, 34, 39

EIC Enfermedades Infecciosas Cardiovasculares. 2

EPOC Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica. 2

ICA Índice de Calidad del Aire. 1, 3, 5, 13, 14

IDESC Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali. 14

OMS Organización Mundial de la Salud. 1–3, 19, 21, 24

PIB Producto Interno Bruto. 2

PM Material particulado. 1–3, 5, 6, 8, 10–14, 16–24, 26, 27, 29–35, 39, 54

SITM Sistema Integrado de Transporte Masivo.. 24, 26, 28

SVCA Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire. 2, 3, 12–14

SVCASC Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire Santiago de Cali. 3, 5, 6, 10–12, 32, 36

WMS Web Map Service. 14

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	I
SIGLAS	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	2
3. OBJETIVOS	5
3.1 Objetivo General	5
3.2 Objetivos Específicos	5
4. METODOLOGIA	6
4.1 Monitoreo calidad del aire	6
4.1.1 Ubicación de la zona de estudio	6
4.1.2 Medición concentraciones de PM _{2.5}	8
4.2 Análisis de datos	10
4.2.1 Análisis exploratorio de los datos del monitoreo	10
4.2.2 Correlación de las zonas de monitoreo	11
4.2.3 Construcción de modelos de regresión	11
4.2.4 Intercalibración de los datos reportados por Airbeam 2 y la estación Univalle	12
4.3 Fase 3. Creación GeoVisor	13
4.3.1 Arquitectura	15
4.3.1.1 Capa de presentación	15
4.3.1.2 Capa de negocio	15
4.3.1.3 Capa de datos	15
5. RESULTADOS	16

5.1	Análisis exploratorio de datos	16
5.1.1	Comportamiento de $PM_{2.5}$ en las zonas de estudio	18
5.2	Variación de $PM_{2.5}$ respecto a los días de medición.	19
5.3	Variación temporal diaria de $PM_{2.5}$	20
5.4	Estimación de $PM_{2.5}$ a partir de PM_{10} medidas con el sensor Airbeam2 en la zona 4 Cañaveralejo	30
5.5	Intercalibración Estación de Monitoreo Univalle y Airbeam2	32
5.6	Influencia de la temperatura y la humedad en el comportamiento de $PM_{2.5}$. 35	
5.7	Visor Web.	36
6.	CONCLUSIONES	39
	REFERENCIAS	41
	Anexo A. REGISTRO FOTOGRÁFICO	43
	Anexo B. ANÁLISIS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pag.
4.1 Zonas de monitoreo.	7
4.2 Arquitectura del sistema.	15
5.1 Coeficiente de variación de los datos de concentración de $PM_{2.5}$ agrupados por minuto registrado por los sensores Airbeam2 en los diferentes puntos de monitoreo.	17
5.2 Coeficiente de variación de $PM_{2.5}$ agrupados por minuto registrado por los sensores Airbeam2 en los diferentes períodos de tiempo (M,T y N).	18
5.3 Promedio $PM_{2.5}$ zonas de monitoreo por intervalo de 5 minutos.	19
5.4 Concentraciones de $PM_{2.5}$ respecto a su variación semanal considerando los días lunes, jueves y sábado.	20
5.5 Variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ respecto a su variación temporal mañana (M), tarde (T), noche (N).	21
5.6 Variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ respecto a su variación temporal mañana (M), tarde (T), noche (N) en cada punto monitoreado.	22
5.7 Zona 1 área de influencia estación La Flora.	23
5.8 Zona 2 área de influencia estación Ermita.	25
5.9 Zona 3 área de influencia estación ERA-Obrero.	27
5.10 Zona 4 área de influencia estación Cañaveralejo.	29
5.11 Zona 5 área de influencia estación Univalle.	30
5.12 Diagrama de Dispersión de PM_{10} con respecto a $PM_{2.5}$	31
5.13 Correlación entre el PM_{10} y el $PM_{2.5}$ en la zona 4 de Cañaveralejo	32
5.14 Comparación de las mediciones realizadas en la estación Univalle para el mes de octubre de 2019 y las obtenidas con el sensor Airbeam2 durante el mes de octubre.	33

5.15	Diagrama de Dispersión entre el dispositivo móvil Airbeam2 y la estación de monitoreo Univalle en el mes de octubre.....	34
5.16	Diagrama de Bland-Altman para determinar concordancia entre el dispositivo Airbeam y estación Univalle.....	35
5.17	Correlación entre PM2.5, Humedad y Temperatura (Airbeam2)	36
5.18	Geovisor con todas las capas seleccionadas.....	37
5.19	Visualización de popup con información del punto seleccionado.....	37
5.20	Gráfica de calidad del aire del punto de monitoreo seleccionado.	38
5.21	Íconos de representación de puntos sobre gráfica del geovisor.....	38
A.1	Estación paso del comercio tomada por Angelly Ortega.	43
A.2	Estadística descriptiva de las sesiones en Terminalito.	43
A.3	Estadística descriptiva de las sesiones en la Flora.	44
A.4	Estadística descriptiva de las sesiones en Sameco.	44
A.5	Museo La Tertulia, tomada por Carolina Salcedo.	45
A.6	Estadística descriptiva de las sesiones en Chipichape.	45
A.7	Estadística descriptiva de las sesiones en La Tertulia.....	46
A.8	Estadística descriptiva de las sesiones en La Ermita.....	46
A.9	Centro de eventos Comfenalco, tomada por Santiago Rodas.	47
A.10	Estadística descriptiva de las sesiones en San Pascual.....	47
A.11	Estadística descriptiva de las sesiones en Comfenalco.	48
A.12	Estadística descriptiva de las sesiones en ERA.	48
A.13	Centro comercial Palmetto Plaza, tomada por Sebastian Hernandez.	49
A.14	Estadística descriptiva de las sesiones en Palmetto.	50
A.15	Estadística descriptiva de las sesiones en Cañaveralejo.	50
A.16	Estadística descriptiva de las sesiones en La Nave.	51

A.17 Estación del SVCA Univalle, tomada por Vanessa Toledo.	51
A.18 Estadística descriptiva de las sesiones en Univalle.	52
A.19 Estadística descriptiva de las sesiones en Univalle.	52
A.20 Estadística descriptiva de las sesiones en Univalle.	53
B.1 Análisis de variación todos los contaminantes.....	54
B.2 Correlación PM_{10} Vs. $PM_{2.5}$	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Pag.
4.1 Características estaciones de monitoreo.....	6
4.2 Días y frecuencias de monitoreo	9
4.3 Periodos de tiempo para los datos de las mediciones del mes de octubre del Airbeam2.	13
4.4 Puntos de corte para el cálculo del ICA.	14
5.1 Categorización por grupos en la Zona 1.....	23
5.2 Categorización por grupos en la Zona 2.....	24
5.3 Categorización por grupos en la Zona 3.....	26
5.4 Categorización por grupos en la Zona 4.....	27

1. INTRODUCCIÓN

El PM es producido por diferentes fuentes y su composición es variada. El $PM_{2.5}$ se emite desde fuentes móviles y fijas. Los componentes principales de incluyen sulfato de amonio, nitrato de amonio, masa carbonosa orgánica, carbono elemental y material cortical. El problema más grave de altas concentraciones de $PM_{2.5}$ es que trae daños a la salud humana [Jiang et al., 2018]. El $PM_{2.5}$ puede ingresar fácilmente en las vías respiratorias de las personas y debilitar la inmunidad. Por lo tanto, se producen efectos a corto y largo plazo, relacionados con enfermedades como asma, cáncer de pulmón, enfermedades cardíacas y síntomas respiratorios [Bari and Kindzierski, 2016], siendo niños y ancianos la población más afectada o susceptible. Así, la medición y predicción de los niveles de contaminantes del aire es crucial para la protección del medio ambiente y la salud de las personas.

El constante monitoreo del material particulado, le permite a las autoridades estar alerta ante cualquier eventualidad en los niveles de dicho contaminante. En el caso particular de Santiago de Cali, el DAGMA, es el encargado de velar por el monitoreo de los diferentes contaminantes en la ciudad, dentro de estos se encuentra el PM con diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 micras denominado $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

La realización de este proyecto permitirá obtener información faltante en la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cali en cuanto a la presencia de $PM_{2.5}$. Esta nueva información permitirá determinar si en estas zonas se cumplen los estándares de calidad del aire fijados en el territorio nacional (Decreto 2254 de 2017) y lo establecido en las guías de calidad del aire de la OMS. Igualmente, a partir de estas determinaciones se puede elaborar una línea base para la toma de decisiones en cuanto a la optimización de la red de monitoreo de la ciudad en la medición de $PM_{2.5}$. Por otra parte, con el desarrollo de un Geovisor web abierto y de uso libre se espera generar un sistema de información que empodere a la comunidad de la ciudad de Cali en el conocimiento del ICA que respiran en cuanto a $PM_{2.5}$ se refiere. Finalmente, este proyecto también contribuirá a establecer si la utilización de medidores de bajo costo puede contribuir a tener datos a tiempo y confiables para determinar las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ en la ciudad.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La contaminación del aire ha sido reconocido como uno de los problemas ambientales más críticos que afectan los asentamientos urbanos de los diferentes países [Li et al., 2017]. Se estima que la contaminación del aire ocasiona anualmente 3 millones de muertes prematuras ocurriendo esto principalmente en los países en desarrollo donde más del 90 % de las personas respira aire con concentraciones mayores a las de las guías de la OMS [OMS, 2016]. Estas muertes son ocasionadas principalmente por la presencia de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$.

El material particulado es producido por diferentes fuentes y su composición es variada. El $PM_{2.5}$ se emite desde fuentes móviles y fijas. Los componentes principales de $PM_{2.5}$ incluyen sulfato de amonio, nitrato de amonio, masa carbonosa orgánica, carbono elemental y material cortical. El problema más grave de altas concentraciones de $PM_{2.5}$ es que trae daños a la salud humana [Jiang et al., 2018]. El $PM_{2.5}$ puede ingresar fácilmente en las vías respiratorias de las personas y debilitar la inmunidad. Por lo tanto, se producen efectos a corto y largo plazo, relacionados con enfermedades como asma, cáncer de pulmón, enfermedades cardíacas y síntomas respiratorios [Bari and Kindzierski, 2016], siendo niños y ancianos la población más afectada o susceptible. Así, la medición y predicción de los niveles de contaminantes del aire es crucial para la protección del medio ambiente y la salud de las personas.

Colombia no es ajena a esta problemática. Las muertes atribuibles a la contaminación del aire son 15681 con una carga atribuible en tasa de 619.78 por cada 100000 habitantes [Instituto Nacional de Salud - Observatorio Nacional de Salud, 2018]. Las causas principales de las muertes en Colombia son las EIC y EPOC que están relacionadas con el PM (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Adicionalmente, la contaminación del aire urbano generó el 75 % de los costos en salud, equivalentes a 1.93 % del PIB de ese año [Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2018]. De esta manera, tal como se describe en la Política Integral de Salud Ambiental y la Política de Calidad del Aire, urge adelantar intervenciones para mejorar la calidad del aire de las ciudades.

Una de estas intervenciones consiste en fortalecer los SVCA en las ciudades de Colombia, con ello se crea el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire en el 2010 [Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010]. En Colombia, a 2017 existían 26 SVCA conformados por 204 estaciones de monitoreo. Sin embargo, aún hay ciudades con poblaciones mayores a 110.000 habitantes donde no se mide la calidad del

aire. Por otra parte, en las principales de ciudades de Colombia que cuentan con estaciones de monitoreo no hay cobertura espacial ni temporal suficiente para medir concentraciones de $PM_{2.5}$. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ solo se miden en 89 de las 204 estaciones y solo 59 % de las estaciones cumplieron con los criterios de calidad respecto a su representatividad temporal [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2012].

En los últimos años, la ciudad de Cali ha presentado cambios en las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$. La ciudad de Cali es la tercera más poblada del país, sectorizada en 22 comunas, que se distribuyen por toda el área urbana de la ciudad. El aumento del parque automotor, los emergentes proyectos de vivienda y expansión los cuales se ven altamente relacionados entre sí y las construcciones de vías en diversas zonas de la ciudad han hecho notorio un incremento en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en diferentes puntos de la ciudad.

Por ejemplo, en la ciudadela COMPARTIR, BASE AÉREA y en UNIVALLE el ICA del presente año, se han mantenido de manera estable en la calificación de aceptable (amarilla) la cual se designa como la menos favorable [Sistema de Vigilancia Calidad del Aire Santiago de Cali (SVCASC), 2019]. Adicionalmente, el 20 de agosto del año en curso tres de las nueve estaciones de monitoreo de la ciudad reportaron valores históricos de mala calidad del aire para el $PM_{2.5}$ [Cali, 2019].

En la ciudad de Cali se cuenta con un SVCA constituido por nueve estaciones de monitoreo, pero solo en 4 de ellas se está midiendo $PM_{2.5}$. Así, otras partes estratégicas de la ciudad relacionadas con las otras 5 estaciones de monitoreo carecen de vigilancia de las concentraciones de $PM_{2.5}$, tales como la zona industrial de ACOPI Yumbo percibida por la estación de LA FLORA, el tránsito vehicular y poblacional constante del centro de la ciudad relacionada con la estación ERA-OBRERO y ERMITA, y la situación específica de zonas de ladera como Siloé que se relacionan con la estación de CAÑAVERALEJO. Por lo tanto, se hace necesario fortalecer el monitoreo en dichas zonas respecto al $PM_{2.5}$ para mejorar la toma de decisiones respecto a la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Cali.

Teniendo en cuenta esto, el presente proyecto tuvo como reto principal realizar un monitoreo en las zonas aledañas a las estaciones del SVCASC que no reportan información de este contaminante. Igualmente, a partir de esta información se pudo establecer los niveles de calidad del aire respecto al Decreto 2254 de 2017 y las guías de calidad del aire de la OMS. Dado que las comunidades tienen el derecho a estar informadas sobre la calidad del aire que respiran, en este proyecto, también fue considerada la realización de un geovisor tipo web que permite informar al público la calidad del aire en estas zonas acorde con el índice de calidad del aire. Finalmente, se analizó la concordancia entre las concentraciones

obtenidas con medidores de bajo costo respecto a las reportadas por la estaciones fijas automáticas como es la de la Universidad del Valle.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar la calidad del aire relacionada con la presencia de $PM_{2.5}$ en zonas aledañas a las estaciones de monitoreo del SVCASC que no miden este parámetro ambiental.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ en las zonas de La Flora Industrial, el noroeste, centro de la ciudad, y Cañaveralejo, identificadas como vulnerables ante la actual red de monitoreo de la ciudad.
- Correlacionar los datos de concentración de $PM_{2.5}$ reportados por la estación de Univalle con los datos de concentración obtenidos con el Sensor Airbeam de bajo costo desarrollado por Habitatmap.
- Analizar el comportamiento estadístico de los datos de $PM_{2.5}$ y su variación espacial en los sitios de monitoreo.
- Generar un visor web que permita comunicar la información de concentraciones de $PM_{2.5}$ en términos del ICA.
- Comparar el comportamiento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ con la información meteorológica de los sitios de monitoreo provista por el Sensor Airbeam.
- Estimar el comportamiento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ a partir de las concentraciones de PM_{10} reportadas por el DAGMA.

4. METODOLOGIA

El desarrollo del proyecto se realizó en 3 fases que consisten en: la fase 1, correspondió al trabajo de campo realizado para la obtención de los datos de calidad del aire a través del dispositivo móvil “AirCasting”; la fase 2 consistió en el análisis de los datos recolectados; finalmente, en la última fase se desarrolló el geovisor web. A continuación se describe en detalle cada una de las fases adelantadas.

4.1 Monitoreo calidad del aire

4.1.1 Ubicación de la zona de estudio

En la búsqueda de fortalecer el SVCASC, se generó una zonificación de la ciudad en cinco grandes áreas (Figura 4.1). Las zonas del 1 al 4 se caracterizan por la existencia de estaciones de monitoreo automáticas fijas en donde se miden contaminantes diferentes al $PM_{2.5}$ (Tabla 4.1). Por su parte la zona 5 comprende el área de influencia de la estación Univalle, que servirá como punto de calibración con el “Sensor Airbeam 2”.

Tabla 4.1: Características estaciones de monitoreo.

Estación de monitoreo	Zona	Parámetros de Medición	Variables meteorológicas
La Flora	1	PM_{10} , H_2S , O_3 , SO_2 , NO_2	Vel viento, dir viento, lluvia y radiación solar.
La Ermita	2	PM_{10} , SO_2	Temperatura y lluvia
ERA-Obrero	3	PM_{10} , H_2S , O_3	Vel Viento, dir viento, lluvia, radiación solar.
Cañaveralejo	4	PM_{10} , SO_2	Temperatura, vel viento, dirección del viento, lluvia, radiación solar y presión.
Univalle	5	$PM_{2.5}$, O_3 , NO_2	Temperatura, vel viento, dirección del viento, lluvia, radiación solar y presión.

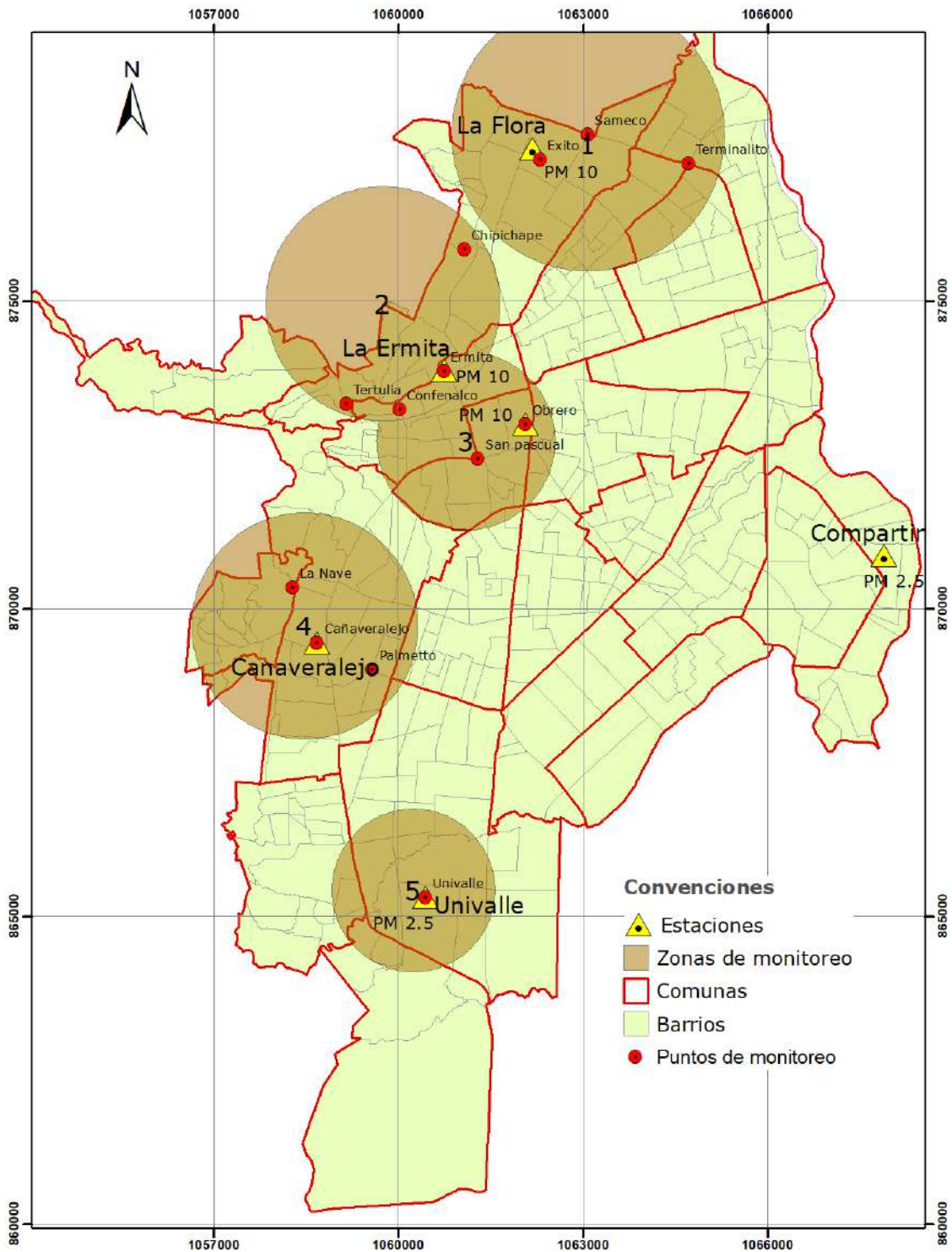


Figura 4.1: Zonas de monitoreo.

Con el propósito de realizar un diagnóstico que permitiera establecer un perfil más detallado de concentraciones de $PM_{2.5}$ en las zonas de La Flora Industrial, ERA, Ermita y Cañaveralejo, se realizó una subdivisión de éstas considerando diferentes puntos. Estos puntos, se escogieron teniendo en cuenta las vías con mayor afluencia vehicular, el número de habitantes, sitios de interés turístico e históricos y zonas comerciales. Acorde con lo anterior se establecieron tres puntos por cada zona (Figura 4.1) donde se midieron las concentraciones de $PM_{2.5}$.

4.1.2 Medición concentraciones de $PM_{2.5}$

En los puntos definidos se midieron las concentraciones de $PM_{2.5}$ utilizando el Sensor Airbeam de bajo costo desarrollado por Habitatmap. El monitoreo se hizo desde el 07 de octubre hasta 04 de noviembre, teniendo en total 12 días de mediciones. En la tabla 4.2 se pueden observar los días y las frecuencias en que se determinaron las mediciones. Los días lunes, jueves y sábado se seleccionaron teniendo en cuenta la dinámica de la ciudad en relación a la afluencia vehicular y sus potenciales cambios los fines de semana. Debe tenerse en cuenta que el día sábado no rige el pico y placa para la ciudad de Cali. Igualmente, en las mediciones fueron considerados algunos lunes festivos a manera de comparar los días regulares con un día atípico. Finalmente, para efectos del monitoreo el día fue dividido en tres períodos correspondiendo a: Mañana: 6 : 30 – 8 : 30, Tarde: 11 : 00 – 13 : 00, Noche: 15 : 00 – 17 : 00.

Tabla 4.2: Días y frecuencias de monitoreo

PUNTO	ZONA	Lunes			Jueves			Sábado		
		M	T	N	M	T	N	M	T	N
Terminalito Semana 1	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Terminalito Semana 2		N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Flora Semana 3		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Flora Semana 4		N.D.	SI	SI	N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI
Sameco Semana 5		SI	N.D.	SI	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Chipichape Semana 1	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Chipichape Semana 2		N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Tertulia Semana 3		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Tertulia Semana 4		N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Ermita Semana 5		SI	SI	SI	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
San Pascual Semana 1	3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
San Pascual Semana 2		N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Comfenalco Semana 3		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Comfenalco Semana 4		SI	SI	SI	N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI
ERA Semana 5		SI	SI	SI	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Palmetto Semana 1	4	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Palmetto Semana 2		N.D.	N.D.	N.D.	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Cosmocentro Semana 3		SI	SI	SI	SI	SI	SI	N.D.	SI	SI
Cosmocentro Semana 4		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
La Nave Semana 5		SI	SI	SI	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Univalle Semana 1	5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Univalle Semana 2		N.D.	N.D.	N.D.	SI	N.D.	SI	SI	SI	SI
Univalle Semana 3		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Univalle Semana 4		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Univalle Semana 5		SI	SI	SI	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

De la tabla 4.2 se hace la aclaración que las anotaciones por cada periodo de tiempo que se subrayan y se enuncian con “N.D.” son asociadas a fallas en la descarga de datos de la plataforma, ajenos al grupo de trabajo y a monitoreos no realizados por situaciones logísticas.

4.2 Análisis de datos

En este proyecto se dispuso de información referente a datos de contaminación como PM_{10} , $PM_{2.5}$, temperatura y humedad relativa de la ciudad Santiago de Cali obtenidos en los puntos descritos en la sección 4.1.1. Además, se cuenta con los datos proporcionados por el DAGMA del SVCASC para el mes de octubre del 2019. A continuación se describe cómo se procesó y analizó la información recolectada.

Debido al gran volumen de datos y la necesidad de reestructuración de los mismos, se decidió automatizar los procesos empleando lenguajes de programación, para este caso se usó [R Core Team, 2019] para estandarizar la estructura de los mismos, corrigiendo espacios en blanco que genera la aplicación al momento de descargar el archivo ".csv". Se cuenta con casi cuatro millones de datos teniendo en cuenta todas las zonas de monitoreo, para optimizar mejor el tiempo se debe realizar una sistematización en el software libre R para la lectura y análisis de estos archivos .csv. teniendo en cuenta que se toman datos de $PM_{2.5}$ cada 3 milisegundos, se debe encontrar la manera de organizar los datos en un periodo de tiempo más prolongado y más homogéneo, el cual debe tener sentido para el análisis. Para tomar esta decisión se empleo el coeficiente de variación y mirar el comportamiento que éste tiene cada minuto, de esta manera verificar cuál es el minuto menos variante, con ayuda de boxplot, teniendo como referencia un coeficiente de variación aceptable del 30 %.

Una vez encontrado el intervalo de tiempo con el que se hará el análisis, se debe realizar un promedio por tiempo para cada una de las variables que proporciona el dispositivo Airbeam2, de esta manera se estará hablando de un promedio de 5 minutos. Tomando en cuenta lo anterior descrito, se espera mirar el comportamiento del $PM_{2.5}$ por las zonas y días enunciados previamente y se toma como referencia los límites permisibles del valor máximo recomendado por la [OMS, 2005] y La Resolución 2254 del 2017.

Cabe resaltar que para realizar la sistematización en R, se previó una estandarización en la nomenclatura de las sesiones, facilitando así la descarga de datos y la organización de los mismos. Finalmente, para la visualización de resultados se realizarán gráficos boxplot utilizando el paquete ggplot2.

4.2.1 Análisis exploratorio de los datos del monitoreo

Con el propósito de realizar un análisis exploratorio de los datos de concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas en el monitoreo se hizo uso de la versión 3.6.0 del software R-project para Windows [R Core Team, 2019], software de libre distribución, el cual permite la elaboración de gráficas y análisis de regresión; así mismo se utilizó Microsoft Excel 2013, para realizar los filtros necesarios de clasificación como datos válidos.

A partir de este análisis se construyeron gráficos en series de tiempo representando las variaciones del contaminante estudiado en el tiempo, período del día y punto de monitoreo. Igualmente, haciendo una agrupación de los datos en períodos de 5 minutos permitió construir boxplots que permiten analizar la variación de los datos para diferentes puntos y períodos del día por cada una de las zonas estudiadas.

4.2.2 Correlación de las zonas de monitoreo

La correlación entre los puntos de monitoreo dentro de una zona de muestreo, se determinó utilizando la prueba Post anova-Tukey. Para ello, inicialmente a los datos se les realizó un análisis de varianza seguida de una prueba de comprobación de los supuestos del modelo para cada una de las zonas de estudio. La prueba Post anova-Tukey permite identificar las diferencias de medias que puedan presentar cada uno de los puntos, respecto a las mediciones del $PM_{2.5}$, a partir de la categorización por grupos que se asemejan entre sí, con un 95 % de confianza.

Debe tenerse en cuenta que para este análisis se utilizó solamente los datos recolectados los días lunes en cada uno de los puntos de cada zona de monitoreo, en todas sus secciones, exceptuando la zona 1, donde solo se utilizó las secciones mañana y noche, debido a la sección faltante de datos en la tarde del punto Sameco.

4.2.3 Construcción de modelos de regresión

Con el propósito de predecir estadísticamente el $PM_{2.5}$ presente en las zonas donde el actual SVCASC no mide las concentraciones del material se planteó un modelo de regresión lineal simple con intercepto y posteriormente sin intercepto para a partir de las concentraciones de PM_{10} .

$$PM_{2.5} = \beta_0 + PM_{10} * \beta_1 + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

$$PM_{2.5} = PM_{10} * \beta_1 + \varepsilon_i \quad (4.2)$$

Donde:

$PM_{2.5}$: Concentración de $PM_{2.5}$

PM_{10} : Concentración de PM_{10}

β_0 y β_1 : Parámetros del modelo

ε_i : Error aleatorio

Siendo los supuestos de los modelos los siguientes:

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (4.3)$$

$$E(\varepsilon_i) = 0 \quad \forall \quad i = 1, \dots, n \quad (4.4)$$

$$Var(\varepsilon_i) = \sigma^2 \quad \forall \quad i = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

$$Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad \forall \quad i \neq j, i = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

4.2.4 Intercalibración de los datos reportados por Airbeam 2 y la estación Univalle

Mediante un modelo de regresión lineal se realizó la concordancia de los datos de PM_{2.5} obtenidos con el sensor Airbeam2 y los valores reportados por la estación Univalle del SVCASC, para así analizar el comportamiento de las variaciones de concentración de PM_{2.5} del dispositivo y la estación permanente.

La concordancia de los dos métodos de monitoreo se determinó aplicando el gráfico Bland-Altman que permite comparar dos técnicas diferentes de medición de una misma variable, a través de las diferencias de medias, representado por el sesgo (bias) de los datos. Adicionalmente se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, el cual permite conocer el grado de asociación entre el dispositivo móvil Airbeam2 y la estación de monitoreo Univalle.

Dado que los datos suministrados por el DAGMA, sobre las mediciones de la estación de monitoreo Univalle se presentan en una periodicidad de una hora en el mes de octubre, y el dispositivo móvil Airbeam2 realizó mediciones cada segundo, se procede a hacer un promedio ponderado de estas últimas mediciones para cada hora de las secciones realizadas. Teniendo al final seis periodos de una hora como se muestra en la Tabla 4.3, para tener un total de 52 mediciones en el mes de octubre, con las cuales se puede comparar con los datos de la estación del SVCA.

Tabla 4.3: Periodos de tiempo para los datos de las mediciones del mes de octubre del Airbeam2.

Dia	8:00	12:00	13:00	16:00	17:00	18:00
Lunes	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Martes						SI
Miércoles						SI
Jueves	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Viernes						SI
Sábado	SI	SI	SI	SI	SI	SI

4.3 Fase 3. Creación GeoVisor

Además de generar información de concentraciones de $PM_{2.5}$ en las zonas de monitoreo es de vital importancia que las personas puedan acceder a ellas de una manera fácil y sencilla que puedan conocer la realidad de su entorno. Para esto se creó un Geovisor Web que permite visualizar las concentraciones de $PM_{2.5}$ en términos del ICA, PM_{10} , algunos datos meteorológicos obtenidos con el sensor “Airbeam” como lo es la temperatura y la humedad relativa.

El comportamiento de las concentraciones del contaminante en términos del ICA tiene una correlación directa con los efectos de la salud, los puntos de corte del ICA son los límites correspondientes a efectos entre la salud y la calidad del aire. En este caso, se utiliza la información reportada por la US-EPA que presenta dichas relaciones [Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010]. Cada punto será agrupado por intervalos horarios y seguirán el modelo de la ecuación 4.3 sujeta a los puntos de corte preestablecidos para los contaminantes $PM_{2.5}$ y PM_{10} que se tienen en la tabla 4.4.

$$ICA_{Pjt} = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} * (C_{Pjt} - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (4.7)$$

Donde:

ICA_{Pjt} :Es el índice de calidad del aire para el contaminante p de un SVCA j durante el período de tiempo t , el cual corresponde al período de exposición previsto en la norma para cada uno de los contaminantes que se están midiendo.

BP_{Hi} : Es el punto de corte mayor o igual a la concentración del contaminante p medida.

BP_{Lo} : Es el punto de corte menor o igual a la concentración del contaminante p medida.

I_{Hi} : Es el valor del ICA correspondiente al punto de corte BP_{Hi} .

I_{Lo} : Es el valor del ICA correspondiente al punto de corte BP_{Lo} .

C_{Pjt} :Es la concentración del contaminante p medida en el SVCA j durante el período de tiempo t , el cual corresponde al período de exposición previsto en la norma para cada uno de los contaminantes que se está midiendo.

Tabla 4.4: Puntos de corte para el cálculo del ICA. **Fuente:** [Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010]

Rangos ICA	Clasificación	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}_3$) 24h	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}_3$) 24h
$0 \leq ICA \leq 50$	Verde	0 – 54	0.0 – 15.4
$51 \leq ICA \leq 100$	Amarillo	55 – 154	15.5 – 40.4
$101 \leq ICA \leq 150$	Naranja	155 – 254	40.5 – 65.4
$151 \leq ICA \leq 200$	Rojo	255 – 354	65.5 – 150.4
$201 \leq ICA \leq 300$	Morado	355 – 424	150.5 – 250.4
$301 \leq ICA \leq 400$	Marrón	425 – 504	250.5 – 350.4

Complementario a esto también se podrá visualizar capas bases pertenecientes al entorno como lo es el perímetro urbano de la ciudad, las comunas, barrios, la ubicación de las estaciones meteorológicas, todo esto apoyado en fuentes como Bing, OpenStreetMap, entre otras. El objetivo de este tipo de herramientas es permitir a la comunidad poder acceder a la información y conocer el estado en el que se encuentra la calidad del aire en la ciudad, cabe aclarar que esta calidad está basada en dispositivos portátiles “low cost”.

Para desarrollar esta fase comenzamos definiendo la plataforma en la que se implementó la aplicación. Se definió una plataforma web ya que se busca garantizar la accesibilidad a la información, contando solo con una conexión a internet. Al tener la plataforma definida, se comenzó a recopilar información sobre las funcionalidades que se tendrán incorporadas en este visor. En nuestro caso se decidió hacer uso de un stack tecnológico ampliamente conocido para el desarrollo de aplicaciones web de alto desempeño como lo son React.js, Node.js, Express y PostgreSQL. Escogimos OpenLayers como el servicio de mapas bases para representar los datos obtenidos de los monitoreos realizados. Como soporte para la adquisición de los datos geográficos de la ciudad hicimos uso de WMS implementados por la IDESC.

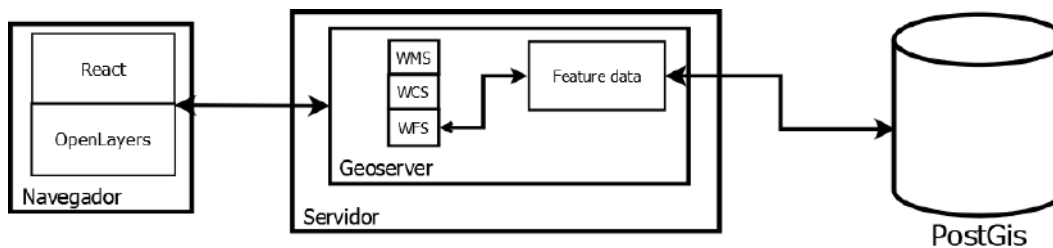


Figura 4.2: Arquitectura del sistema.

4.3.1 Arquitectura

Como se observa en la figura 4.2, el visor fue desarrollado utilizando una arquitectura de 3 capas, que consiste en la separación de las capas de la aplicación. De esta manera pudimos hacer que la aplicación esté desacoplada entre sus capas, lo que representa una mejor mantenibilidad y escalabilidad, además de permitir hacer un uso más eficiente de los recursos de hardware. Éste patrón arquitectónico se implementó de la siguiente manera: Se realizó la modularización y división de las tres capas del proceso de desarrollo de software de la siguiente manera:

4.3.1.1 *Capa de presentación*

Se implementó de manera independiente utilizando la librería de Javascript “React.js”. En esta capa se crea la interfaz del usuario. Cumple con la función de transmitir a la capa de negocios las acciones y datos que realice el usuario desde la interfaz gráfica.

4.3.1.2 *Capa de negocio*

Se implementó con un entorno Javascript del lado del servidor, basado en eventos llamado NodeJs. En esta capa se gestiona la lógica de la aplicación. Es donde se especifica lo que se debe hacer con los datos y acciones recibidas desde la interfaz de usuario. Estará conectada con la capa de persistencia (datos) para poder realizar sus funciones.

4.3.1.3 *Capa de datos*

Se implementó con el motor de bases de datos PostgreSQL, haciendo uso de módulo PostGIS, el cual agrega soporte para la manipulación, almacenamiento de datos y objetos espaciales a esta base de datos. Esta capa se encarga de guardar los datos. Será donde se gestione todo lo relativo a la base de datos y la creación, edición y borrado de datos de sobre la misma.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis exploratorio de datos

El sensor Airbeam2 provee valores de concentración de $PM_{2.5}$ cada segundo, así se obtuvo un gran número de datos para los puntos y períodos estudiados a procesar. Por lo anterior, se realizó un estudio exploratorio de los datos utilizando como criterio estadístico el coeficiente de variación, para determinar el intervalo de tiempo en que no se presentaba una diferencia significativa en la variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en cada uno de los puntos de medición y entre los períodos M, T y N.

Para ello, inicialmente, los valores de $PM_{2.5}$ se agruparon en intervalos de un minuto ya que un segundo es un intervalo de tiempo muy pequeño donde existe una alta probabilidad de que la variación entre un dato y otro no presente una diferencia significativa. Posteriormente, a los datos agrupados por minuto se les calculó de su coeficiente de variación, estableciéndose como criterio que la variación entre los datos de los diferentes minutos no era significativa si el coeficiente de variación era a 30 %, teniendo en cuenta que este valor indica una variación aceptable. Igual procedimiento fue realizado para los datos de M, T y N.

En la Figura 5.1 se observan los valores de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos con el sensor Airbeam2 y su variación en los primeros 15 minutos. Teniendo en cuenta el comportamiento de los datos se puede establecer que en todos los puntos monitoreados, las concentraciones medidas con el sensor Airbeam2 solo presentan una variación significativa a partir del minuto 5 (coeficiente de variación mayor a 30 %).

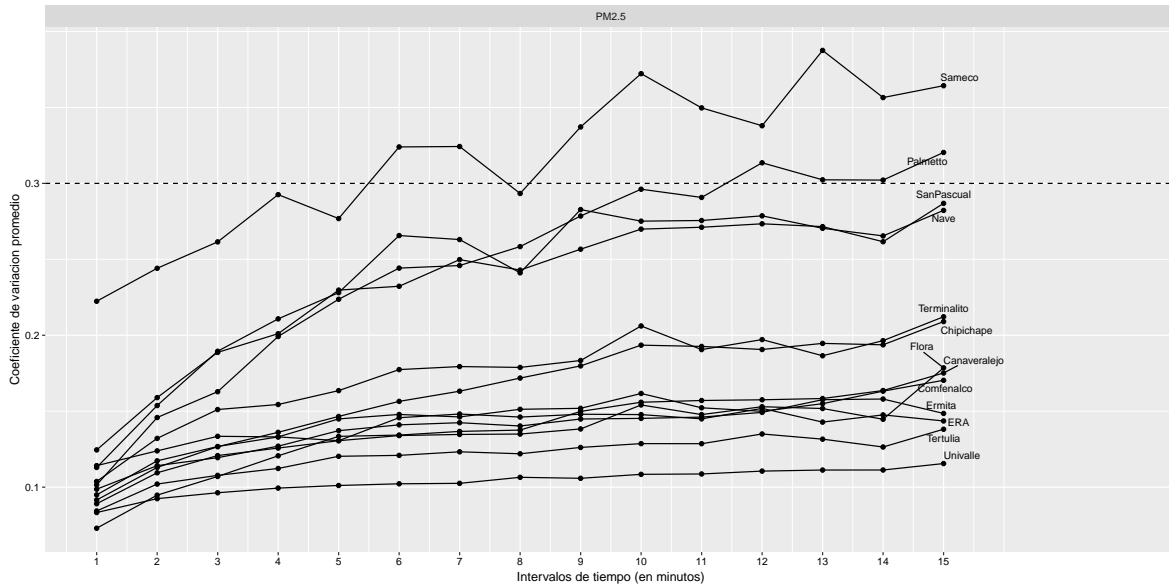


Figura 5.1: Coeficiente de variación de los datos de concentración de $PM_{2.5}$ agrupados por minuto registrado por los sensores Airbeam2 en los diferentes puntos de monitoreo.

En el caso de los períodos de medición M, T, y N en la Figura 5.2 se puede establecer que los datos de concentración tienen un comportamiento similar para la mañana y la tarde; mientras que para el período de noche se presenta una mayor variación para el $PM_{2.5}$. Las sesiones presentan una variación aceptable hasta el minuto 1, no sería favorable tomar como referencia las sesiones, debido al comportamiento de la sesión N y teniendo en cuenta que en el gráfico anterior, se observa una mejor representación de la variación y no presenta volatilidad, como en este caso lo presenta la sesión N.

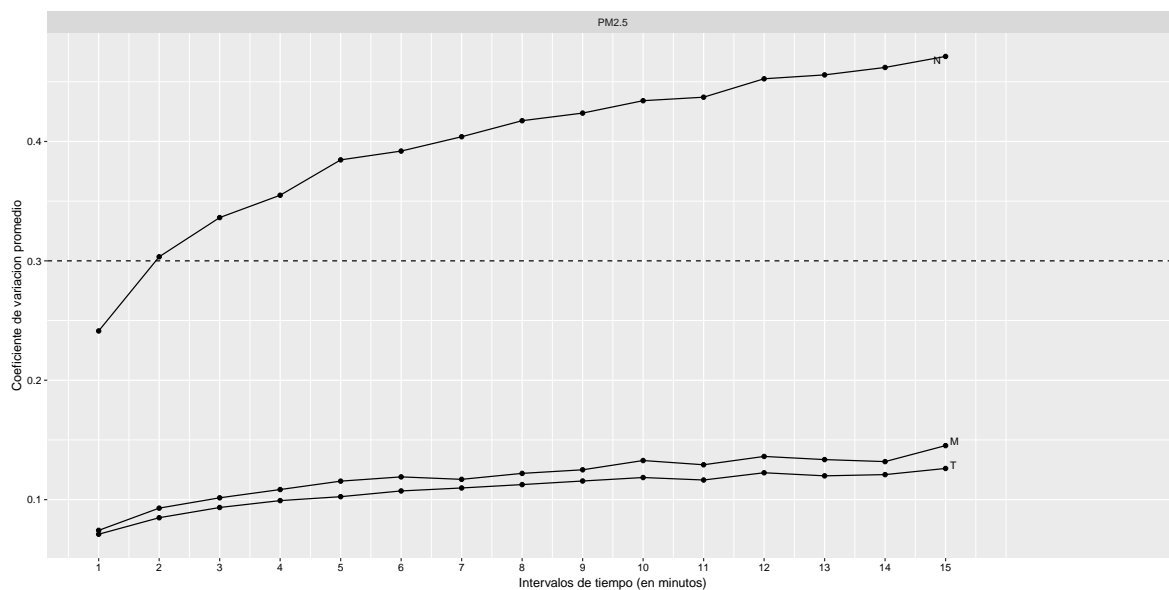


Figura 5.2: Coeficiente de variación de $PM_{2.5}$ agrupados por minuto registrado por los sensores Airbeam2 en los diferentes períodos de tiempo (M,T y N).

Acorde con el análisis exploratorio anterior se establece que el tiempo óptimo para agrupar los datos y realizar su análisis estadístico es de 5 minutos ya que a partir de allí los datos son diferentes. Por lo tanto, los datos que se presentan a continuación y su análisis se basan en los promedios de las mediciones de los datos en segundos del sensor Airbeam2 en intervalos de 5 minutos.

5.1.1 Comportamiento de $PM_{2.5}$ en las zonas de estudio

En la Figura 5.3 se representan las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidos en cada uno de los puntos definidos en el estudio. Estos datos representan los valores promedio del total de las mediciones considerando los tres días de la semana y los períodos de tiempo M, T y N. Como se puede observar en su mayor proporción los datos de $PM_{2.5}$ se encontraron por debajo de los límites diarios establecidos por la norma de calidad del aire, Resolución 2254 de 2017, para Colombia.

Las principales excedencias se produjeron principalmente en Cañaveralejo ($52g/m^3$), Palmetto ($37g/m^3$), San Pascual ($46g/m^3$), Tertulia ($42g/m^3$) y Terminalito ($37g/m^3$). Por su parte, cuando los datos se comparan respecto a las guías de calidad del aire de la [OMS, 2005] se encuentra que los valores medianos sobrepasan el valor diario de $25g/m^3$ en una proporción de los puntos Cañaveralejo, Comfenalco, Flora, Palmetto, San Pascual, Tertulia.

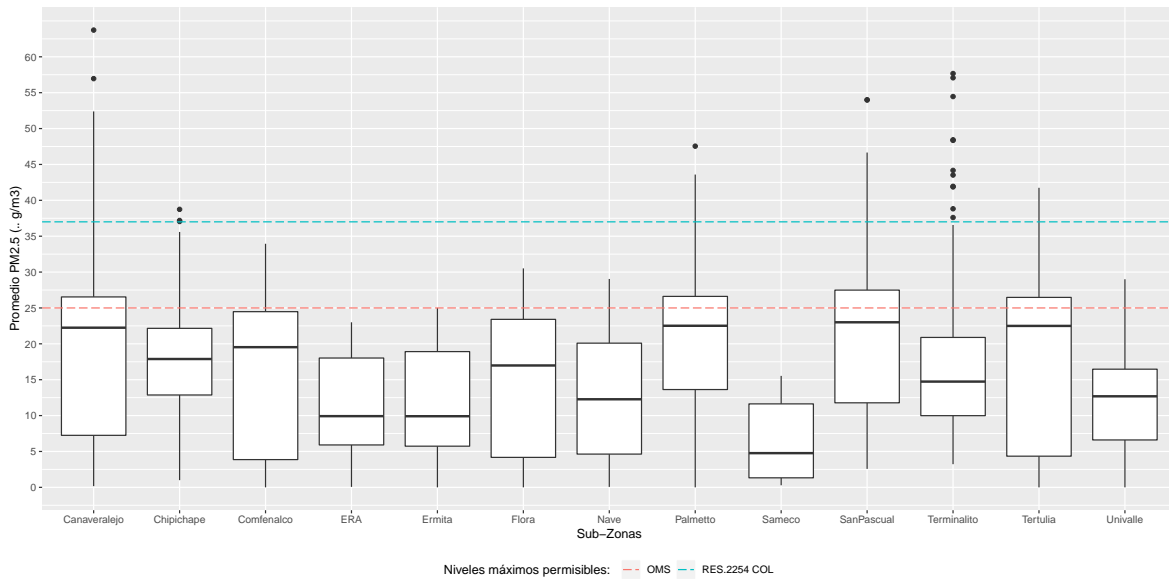


Figura 5.3: Promedio PM_{2.5} zonas de monitoreo por intervalo de 5 minutos.

Teniendo en cuenta que los valores guía de la OMS se basan en criterios de salud y que las normas de calidad del aire para Colombia según la Resolución 2254 de 2017 se harán más estrictas hacia el 2030, se puede establecer que las tendencias encontradas sugieren la necesidad de una intervención en pro de la mejora de la calidad del aire en las zonas estudiadas.

5.2 Variación de PM_{2.5} respecto a los días de medición.

Las ciudades ejercen diversas dinámicas especialmente en cuanto a movilidad vehicular. En ese sentido, las mediciones realizadas de PM_{2.5}, se agruparon en términos de los días seleccionados para el monitoreo: lunes, jueves y sábado. La Figura 5.4 esquematiza el comportamiento del PM_{2.5} en esos días. Acorde con los datos, las concentraciones observadas el lunes (mediana 13g/m³) son menores respecto a los días jueves (mediana 21g/m³) y sábado (17.5g/m³), por lo tanto, se presenta una diferencia significativa respecto a la variación de los días para las zonas estudiadas. De lo anterior, se establece que durante los días de estudio no se sobrepasa los límites permisibles de la Resolución 2254 para Colombia, pero la media del jueves se aproxima a los límites de la [OMS, 2005].

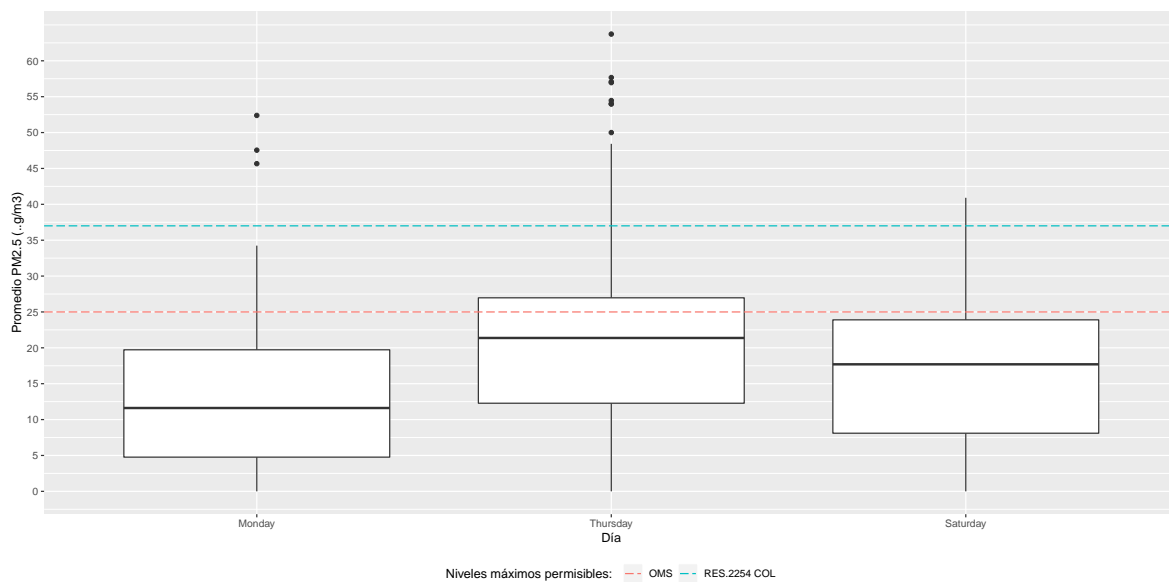


Figura 5.4: Concentraciones de PM_{2.5} respecto a su variación semanal considerando los días lunes, jueves y sábado.

Cuando los datos de las concentraciones de PM_{2.5} respecto a su variación en semana se representan en un conjunto de todos los puntos se observa que la mayor repercusión está para el jueves, donde se determina una mayor dinámica de la ciudad en relación a la afluencia vehicular. Por otro lado los valores del día sábado son más elevados que los lunes, tomando en cuenta que ese día no hay pico y placa y pueden circular tantos carros como el día jueves. Respecto a los datos del lunes, estos pueden estar influenciados por datos atípicos ya que en estos se incluye la medición de días festivos.

5.3 Variación temporal diaria de PM_{2.5}

Los datos de concentración de PM_{2.5} respecto a su variación temporal mañana (M), tarde (T) y noche (N) se presentan en la Figura 5.5. En general las concentraciones observadas en la mañana y la tarde (mediana $20\mu g/m^3$) son mayores que las observadas en la noche (mediana $5\mu g/m^3$), así que se presenta una diferencia significativa durante entre M y T, respecto a N. Por otra parte cuando los datos se comparan con la norma estos no exceden la Resolución 2254 para Colombia, pero los valores medianos de M y T si se aproximan a los valores guía de la [OMS, 2005].

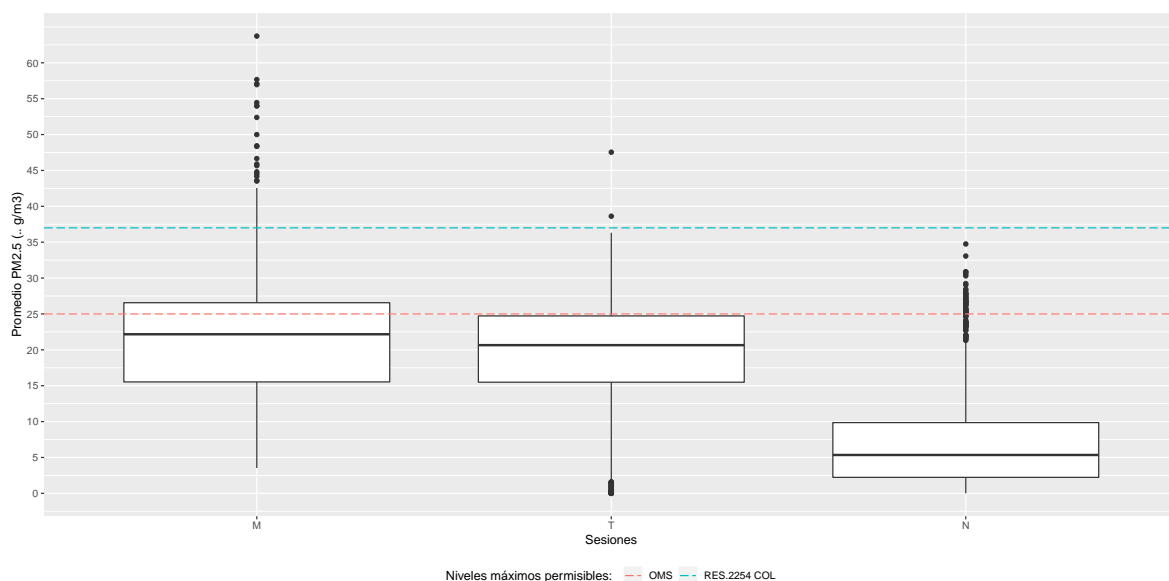


Figura 5.5: Variación de las concentraciones de PM_{2.5} respecto a su variación temporal mañana (M), tarde (T), noche (N).

Cuando los datos de las concentraciones de PM_{2.5} respecto a su variación temporal mañana (M), tarde (T) y noche (N) se representan para cada punto donde se realizó el monitoreo (Figura 5.6), se encontró que la variación temporal por cada uno de los puntos tiene mayores concentraciones para el periodo de la mañana y de la tarde, excediendo los límites de referencia de la OMS en las concentraciones de las medianas en los puntos de Cañaveralejo, Chipichape, San Pascual, Tertulia. Las excedencias a la resolución 2254 de 2017 se presentan únicamente en el periodo de la mañana. Igualmente en estas estaciones se tuvo que el 75 % de los datos se encontró con concentraciones menores a $30\mu g/m^3$. Por otro lado, en horas de la tarde y de la noche no se excede dicho límite de $35\mu g/m^3$, siendo más bajos los valores medianos en la noche que están alrededor de $6\mu g/m^3$.

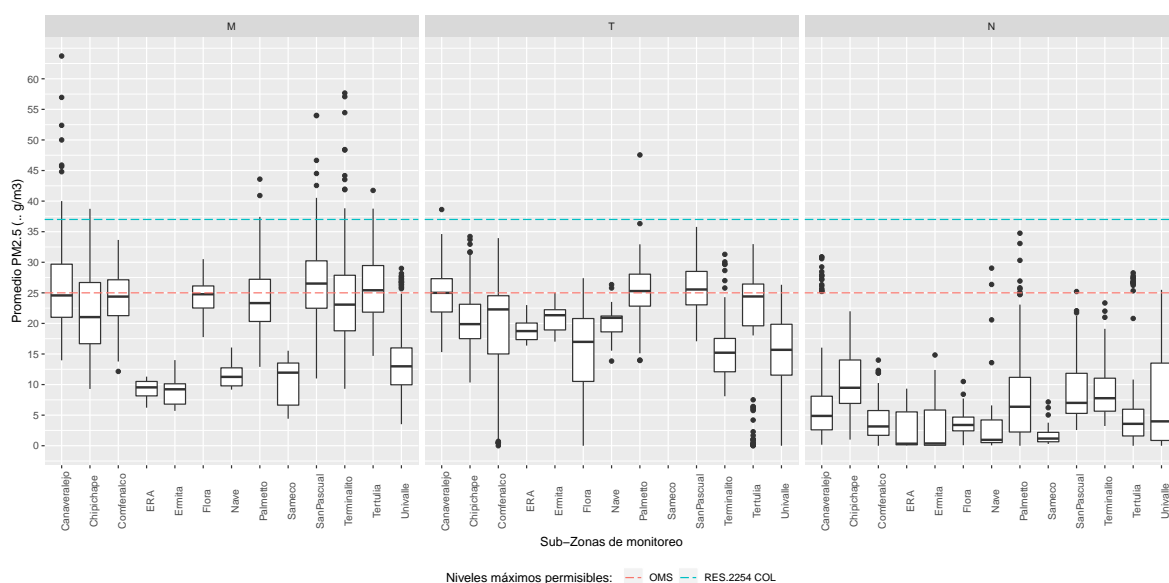


Figura 5.6: Variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ respecto a su variación temporal mañana (M), tarde (T), noche (N) en cada punto monitoreado.

En las Figuras 5.7 a la 5.11 se observan las variaciones en las concentraciones de $PM_{2.5}$ para cada uno de los puntos en las diferentes zonas en distintos períodos del día; mañana, tarde y noche.

Para la zona 1 (Figura 5.7), la tendencia observada para las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los puntos evaluados, se observa que son mayores en la mañana, disminuyendo hacia la tarde y luego haciéndose mínimas en la noche. Usando la prueba Post anova-Tukey se identificó las diferencias y similitudes en la media de los tres puntos establecidos en la zona 1, donde el punto Sameco con respecto a los otros dos puntos presenta mayores variaciones y poca semejanza en el comportamiento del contaminante $PM_{2.5}$. De la Tabla 5.1 se observa que los puntos de Flora y Terminalito se agrupan con la denotación “a” donde se infiere que ambos poseen valores similares en las concentraciones de $PM_{2.5}$. Lo que se interpreta como una relación directa en los ambientes de ambos puntos.

Comparando las mediciones de $PM_{2.5}$ (Figura 5.7) las mayores concentraciones se observaron en la mañana (M) en el punto denominado Terminalito alcanzando valores tan altos como $37\mu g/m^3$, sin embargo la concentración mediana de este punto fue de $23\mu g/m^3$, que es ligeramente menor a la observada en La Flora de $25\mu g/m^3$. Estos dos últimos valores no superan la norma nacional, pero si están muy próximos al valor límite de la guía de la [OMS, 2005].

Tabla 5.1: Categorización por grupos en la Zona 1.

Punto	Promedio $PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$	Grupo
Flora	23.6334	a
Sameco	8.2596	b
Terminalito	17.6052	a

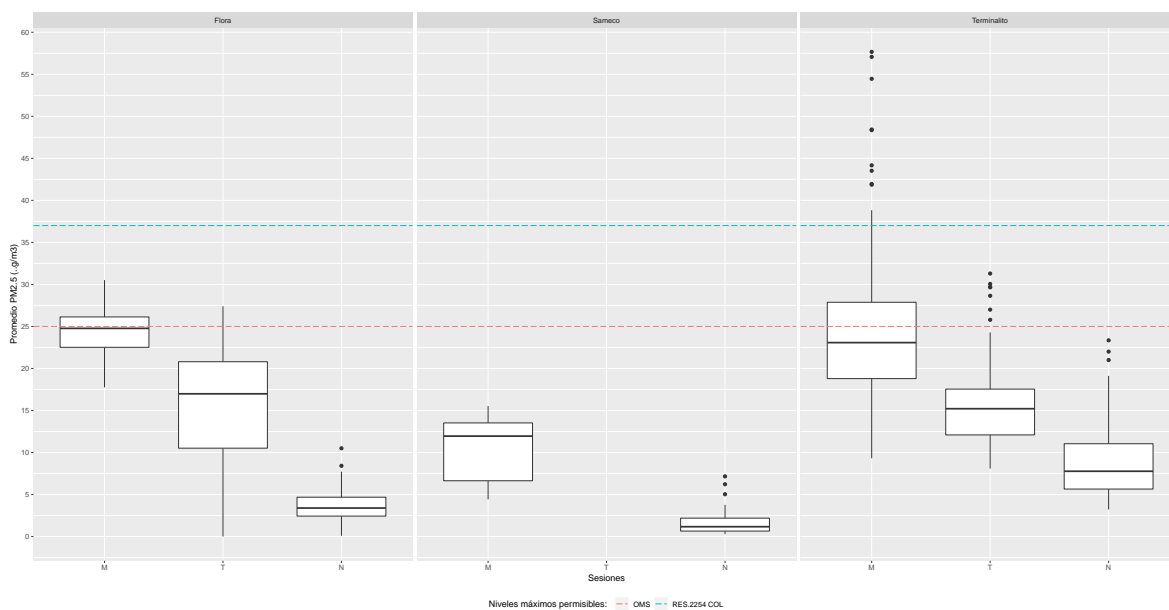


Figura 5.7: Zona 1 área de influencia estación La Flora.

Por lo tanto, y corroborando con la experiencia en campo se percibió que el flujo vehicular en la carrera primera con calle 70 (punto del Terminalito) es alto y se cuenta con afluencia de vehículo de carga pesada y buses con destinos intermunicipales, además de tener cercanía de una SITM. En dicha zona se percibió gran afluencia de personas y locales comerciales, donde dichas poblaciones permanecen por tiempos largos en sus labores diarias y a la espera de la ruta y/o transporte a abordar.

En la zona 2, no se presentó una diferencia significativa entre las mediciones de la mañana y tarde para los puntos Tertulia y Chipichape, lo que sí se observó en el punto Ermita, donde las mayores concentraciones ocurrieron en horas de la tarde (Figura 5.8). En general las concentraciones en los tres puntos son más bajas en horas de la noche. Sin embargo, cuando se aplicó la prueba Post anova-Tukey a todos los datos, incluyendo los períodos M, T, N, se encontró que no existe diferencia en las mediciones promedio de $PM_{2.5}$ determinadas para los puntos de la zona 2, es decir que en los tres puntos presenta comportamientos similares en las concentraciones de $PM_{2.5}$ (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Categorización por grupos en la Zona 2.

Punto	Promedio $PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$	Grupo
Chipichape	20.7	a
Ermita	15.9	a
Tertulia	15.4	a

Las mayores concentraciones en la zona 2 se observaron en los punto denominados Tertulia y Chipichape. Donde el punto de Tertulia excede los límites de la resolución 2254 del 2017 con concentraciones de $38\mu g/m^3$, al analizar los valores de la mediana para en las jornadas se determina que la mañana excede el límite de la guía de la [OMS, 2005] y la tarde presenta valores muy cercanos a la misma. Por otro lado, en el punto de Chipichape se tiene excedencia de la resolución para el periodo de la mañana y valores por encima de la guía de la OMS en la tarde. Los valores de la tarde para el punto de Ermita (mediana $22\mu g/m^3$) se encuentran por debajo de las referencias y no tiene un comportamiento regular con respecto a los otros dos puntos de la zona.

El punto del centro comercial Chipichape sobre la avenida 6ta norte posee gran afluencia vehicular, puesto que la zona es comercial y residencial, y propician que el flujo sea

constante, además las actividades del centro comercial reside autos de carga pesada en horas de la mañana y con mayor incidencia en días de semana. Para el punto de Tertulia, el cual es un centro cultural y punto de encuentro de muchos habitantes de Cali, además de ser catalogado como punto de turismo para las personas visitantes de la ciudad, por lo tanto posee gran concurrencia de personas, pero una baja afluencia vehicular, cabe resaltar que sobre la vía de este lugar pasan transportes intermunicipales y autos denominados “gualas” que movilizan a las personas hacia los corregimientos de Villa Carmelo, Pichindé, Siloé y Terrón Colorado. El centro comercial Chipichape

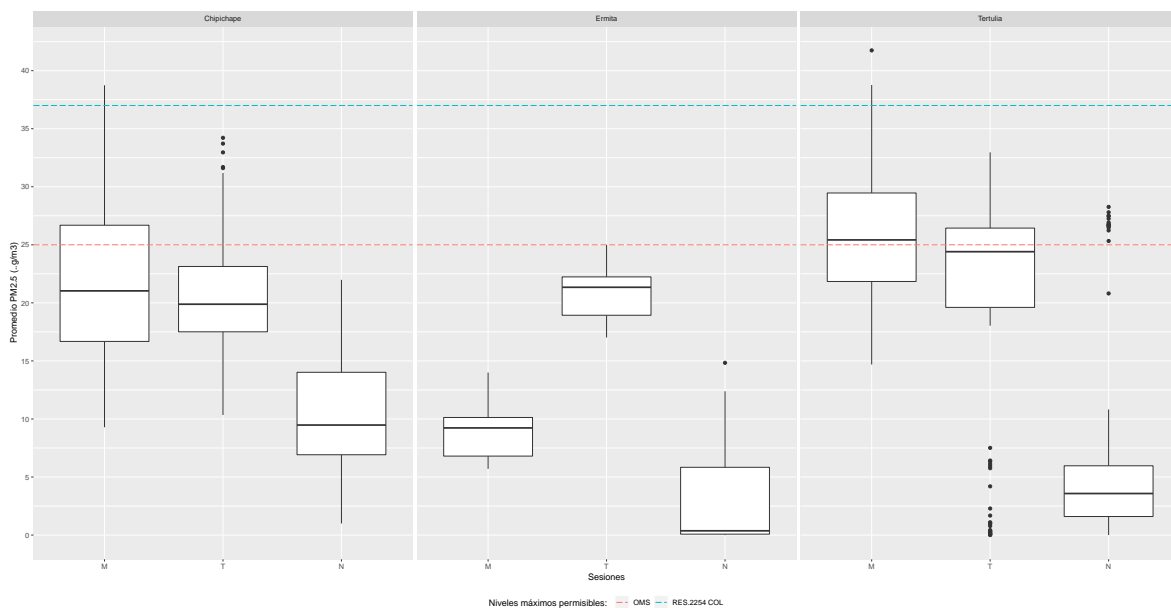


Figura 5.8: Zona 2 área de influencia estación Ermita.

En la zona 3, la prueba Post anova-Tukey identificó la diferencia de medias en el punto San Pascual respecto a los puntos ERA y Comfenalco, pero estos dos últimos puntos en sus mediciones si se correlacionan (Tabla 5.3). Aunque los valores de mediana de los puntos San pascual y Comfenalco están alrededor de $25\mu g/m^3$, se observa una mayor variación en los datos de la tarde para Comfenalco.

Tabla 5.3: Categorización por grupos en la Zona 3.

Punto	Promedio PM_{2.5} $\mu g/m^3$	Grupo
San Pascual	25.58707	a
Comfenalco	20.16261	b
ERA	15.21781	b

Las mayores concentraciones de PM_{2.5} se observaron en el punto denominado San Pascual alcanzando valores tan altos como $40\mu g/m^3$ en algunas horas de los días evaluados excediendo así los límites de la resolución 2254 del 2017; sin embargo las concentraciones medianas para los tres puntos de esta zona nunca superaron la norma colombiana, pero en las horas de la mañana y tarde en San Pascual y Comfenalco, se está por encima de la guía de la [OMS, 2005]. Esta zona tiene incidencia directa del centro de la ciudad, abarcando en sí misma sectores comerciales, administrativos y residenciales. La afluencia vehicular es diversa, abarcando vehículos de carga pesada, transportes intermunicipales hacia los corregimientos de Cali (en su mayoría gualas) y un alto flujo vehicular de la ciudad. Además de lo anterior en esta zona se presentan nueve estaciones del SITM y las troncales principales, durante los monitoreos en todos los puntos se observó cómo algunos buses de dicho sistema y de las empresas urbanas de transporte como la “COOMOEPAL”, expulsan gases de un color negro intenso y en gran cantidad, se infiere que esto contribuye enormemente a la contaminación de la ciudad y pone en juego la salud de los habitantes.

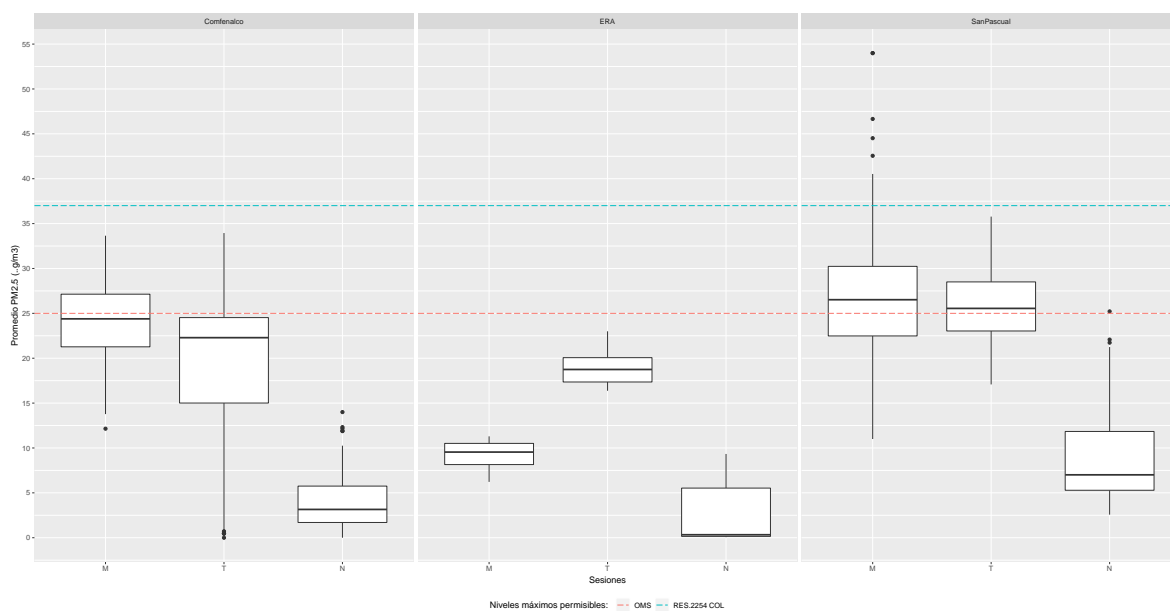


Figura 5.9: Zona 3 área de influencia estación ERA-Obrero.

En la zona 4, la prueba Post anova-Tukey identificó la diferencia de media entre el punto denominado Nave con respecto a los otros dos puntos de medición en Cañaveralejo y Palmetto (Tabla 5.4). Dicha diferencia radica en el flujo vehicular e importancia de cada una de las vías donde se encuentran ubicados estos puntos. Por un lado Palmetto se encuentra sobre la calle 9, vía de gran importancia en la ciudad ya que está compuesta por una doble calzada en sentido sur - norte que conecta la zona sur de la ciudad con sitios de gran interés y alta afluencia de personas como lo son el centro comercial en sí mismo, el estadio Pascual Guerrero, la unidad deportiva panamericana Jaime Aparicio (mejor conocido como Canchas Panamericanas), entre otros. Este punto también cuenta con la presencia de centros médicos como la clínica Farallones, la clínica Colombia, EPS Sura, etc.

Tabla 5.4: Categorización por grupos en la Zona 4.

Punto	Promedio PM _{2.5} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Grupo
Palmetto	25.85493	a
Cañaveralejo	22.74911	a
Nave	17.04822	b

Las mayores concentraciones se observaron en los puntos de Palmetto y Cañaveralejo alcanzando valores tan altos como $40\mu g/m^3$, $37\mu g/m^3$, respectivamente, sin embargo las concentraciones medianas estuvieron alrededor de los $25\mu g/m^3$, recomendados por la [OMS, 2005]. Las vías de incidencia en el punto de Palmetto tiene gran repercusión del transporte público, por lo que en este punto circulan buses del SITM y busetas de las empresas Ermita, Cañaveralejo y Montebello. Gran cantidad de estos buses y busetas dejaban en su paso una considerable y notoria cantidad de humo en el ambiente.

Por otro lado, el punto Cañaveralejo se encuentra situado sobre la calle 5, una de las vías más importantes de la ciudad por su longitud, ya que conecta las zonas sur, occidente, centro y parte del norte donde se une con la carrera 1 y avenida 4 oeste. En este punto se encuentra la estación del MIO Unidad Deportiva, una de las estaciones principales y más concurridas del sistema de transporte ya que ésta converge con la estación de teleférico Miocable; junto a esta estación se encuentra también la plaza de toros de Cañaveralejo, otro lugar icónico de la ciudad. A diferencia de Palmetto, en Cañaveralejo no circulan busetas de otras empresas de transporte público, pero el flujo vehicular particular, articulados del MIO y transporte de carga es considerablemente alto, especialmente en horas de la mañana.

El punto Nave, a pesar de estar ubicado sobre otra importante vía como lo es la avenida de los cerros, no cuenta con gran presencia de tráfico vehicular, específicamente de transporte público, sea masivo o convencional. Se evidenció que, en su mayoría, el tráfico correspondía a vehículos particulares, motocicletas y gualas. La avenida de los cerros se suele utilizar como vía rápida para comunicar el sur de la ciudad con el noroccidente y viceversa, pasando por lugares como la loma de San Antonio, la estatua de Sebastián de Belalcázar, el teatro los cristales, entre otros.

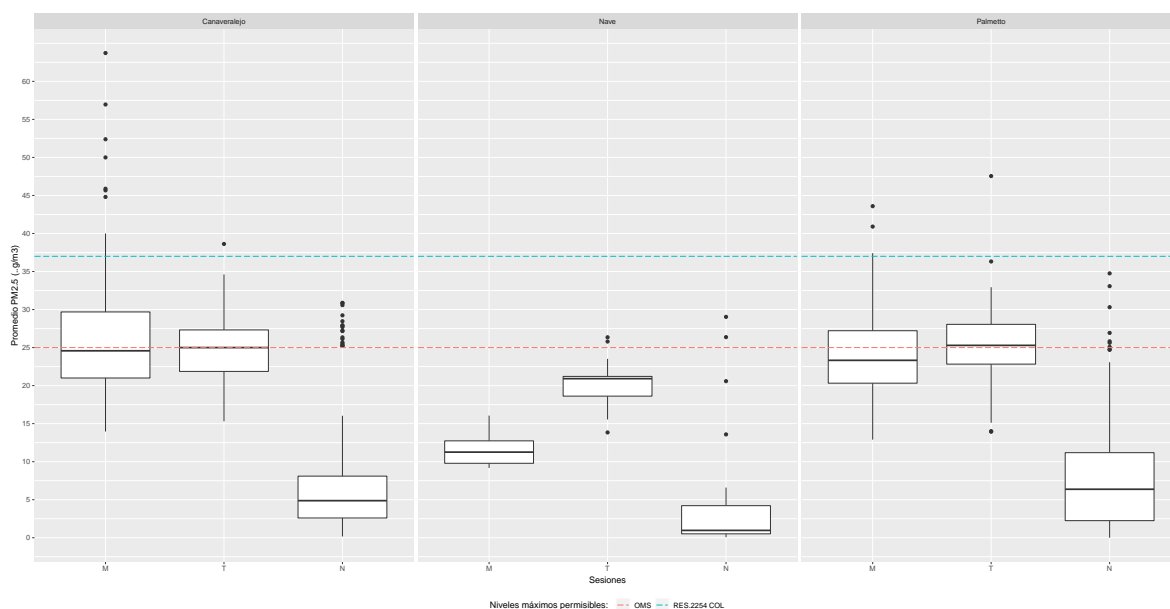


Figura 5.10: Zona 4 área de influencia estación Cañaveralejo.

En la zona 5, no se aplica la prueba Post anova-Tukey debido a que esta zona se manejó de forma especial. El objetivo del punto Univalle se basaba en la calibración de las mediciones por parte del Airbeam2 y la estación de monitoreo, pero además se incluyó en el esquema de monitoreo de calidad del aire como punto de afección en la zona sur de la ciudad.

Con esto, no se sectoriza por sub-zonas y se hace el monitoreo con un solo punto y en concordancia con las demás semanas. Así pues, se infiere de la Figura 5.11 las concentraciones de la mañana y la tarde tiene comportamientos similares (mediana de $13\mu g/m^3$ y $16\mu g/m^3$ respectivamente) estando por debajo de los límites permisibles de la [OMS, 2005] y de la resolución colombiana 2254 del 2017.

Este primer bosquejo de información sirven como planteamiento para la intercalibración de la estación y el sensor, puesto que por medio de los diferentes boletines expedidos por el DAGMA en los últimos años, se ha evidenciado que la estación Univalle presenta las concentraciones más altas y la mayor influencia del $PM_{2.5}$ y por ende ser catalogado como una zona de “mala calidad de aire”, pero si bien, los resultados descritos con anterioridad muestran una cara de Univalle con una muy buena calidad del aire, lo cual se percibió durante los días de monitoreo en el área de la estación. Haciendo mención que el punto siempre fue fijo y fue dentro de la Universidad del Valle, la cual no tiene repercusiones directas de tráfico vehicular y una posible fuente emisora de concentración aledaña al punto de muestra.

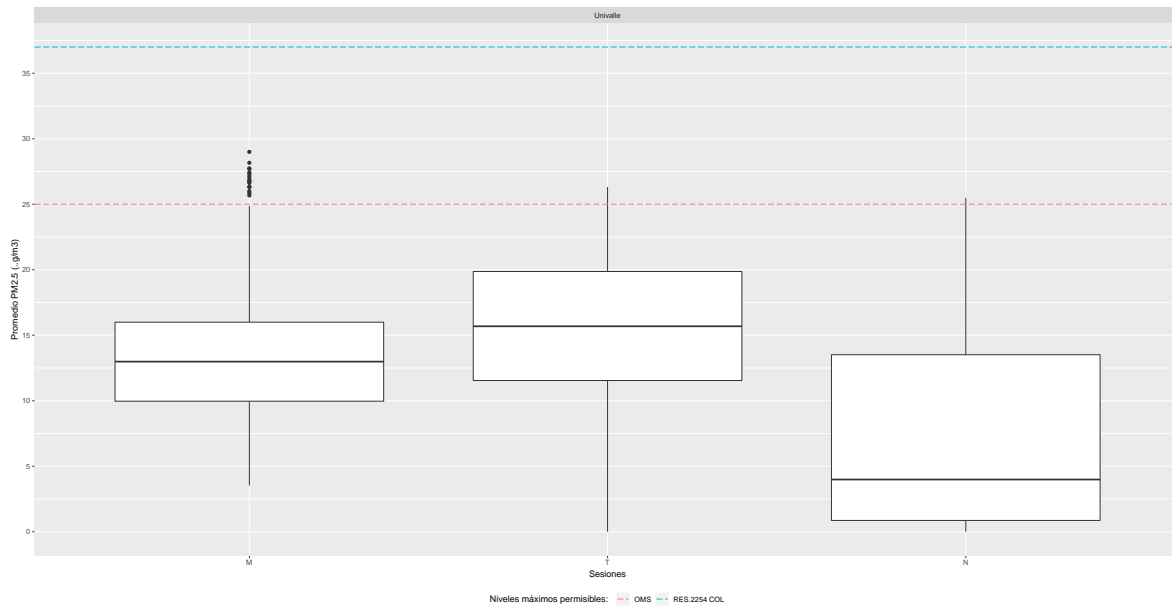


Figura 5.11: Zona 5 área de influencia estación Univalle.

5.4 Estimación de $PM_{2.5}$ a partir de PM_{10} medidas con el sensor Airbeam2 en la zona 4 Cañaveralejo

Acorde con lo expuesto en la metodología, se obtuvieron los siguientes modelos de regresión lineal para predecir la concentración de $PM_{2.5}$ a partir de datos de PM_{10} . Los datos de contaminantes PM_{10} , y $PM_{2.5}$ del dispositivo Airbeam2 en la zona 4 de monitoreo, con influencia en el sector de Cañaveralejo en un intervalo de tiempo de 5 minutos nos representan los siguientes modelos.

Modelo de regresión con intercepto representado en la ecuación 5.4 con un $R^2 = 0.9825$, es decir que la variación total del $PM_{2.5}$ es explicada en un 98 % por el modelo, y un p-valor de $2.2e - 16$ muy menor que 0.05 del nivel de confianza del 95 %. Cumpliendo los supuestos del modelo, en el test Anderson-Darling con un $p - valor = 2.2e - 16$ y en la prueba Barlett con $p - valor = 0.001496$.

$$PM_{2.5} = 2.505284 + 0.578218 * PM_{10} \quad (5.1)$$

Este modelo de regresión con intercepto nos indica que a la no presentarse concentraciones del contaminante PM_{10} en el aire, se espera concentraciones de 2.5

unidades del material particulado $PM_{2.5}$ con un 95 % de confianza. Y por cada unidad de PM_{10} que se encuentre en el aire, aumentará 0.58 unidades el material particulado $PM_{2.5}$.

Modelo de regresión sin intercepto representado en la ecuación 5.4 con $R^2 = 0.9921$ y un $p - valor = 2.2e - 16$ muy menor que 0.05 del nivel de confianza del 95 %. Cumpliendo los supuestos del modelo, en el test Anderson-Darling con un $p - valor = 2.2e - 16$ y en la prueba Barlett con $p - valor = 0.001496$ por lo tanto se considera homogeneidad en los residuales del modelo.

$$PM_{2.5} = 0.64157 * PM_{10} \quad (5.2)$$

Explicando en un 99 % la varianza del $PM_{2.5}$, el modelo de regresión sin intercepto indica que a una unidad de PM_{10} se presentan 0.64 unidades de concentraciones del contaminante $PM_{2.5}$.

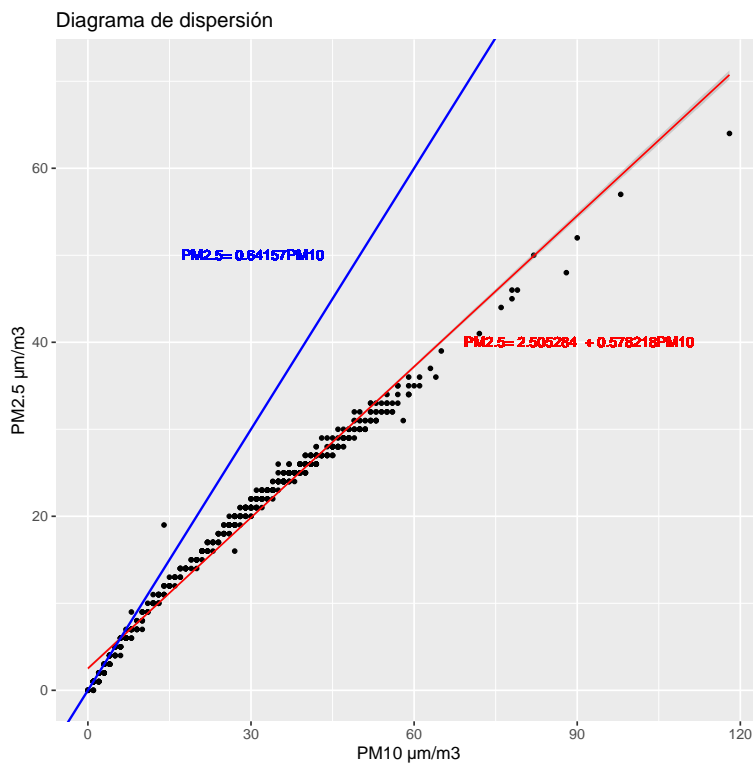


Figura 5.12: Diagrama de Dispersión de PM_{10} con respecto a $PM_{2.5}$

En la Figura 5.12 se observa como el modelo de regresión lineal con intercepto de color

rojo se ajusta mejor a la relación entre las concentraciones de los dos materiales particulados en la zona 4 de Cañaveralejo, presentando una correlación casi positiva perfecta entre los dos contaminantes tal y como lo muestra la Figura 5.13, en comparación con el modelo de regresión lineal sin intercepto representado por la línea azul de la Figura 5.12.

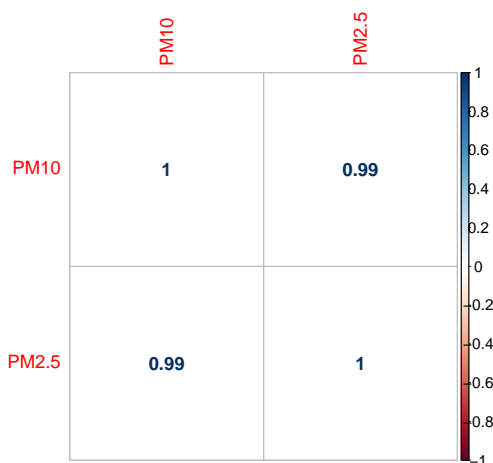


Figura 5.13: Correlación entre el PM₁₀ y el PM_{2.5} en la zona 4 de Cañaveralejo

5.5 Intercalibración Estación de Monitoreo Univalle y Airbeam2

Los datos de concentraciones de PM_{2.5} medidos en la estación Univalle del SVCASC y los obtenidos con el dispositivo Airbeam2 se indican en la Figura 5.14. Como se puede observar, las concentraciones de PM_{2.5} en el mes de octubre 2019 reportadas por el DAGMA fueron (mediana $22\mu g/m^3$) y del sensor AirBeam2 fueron (mediana $11\mu g/m^3$) lo que se muestra como una variación del doble respecto a las concentraciones de PM_{2.5} en cada caso.

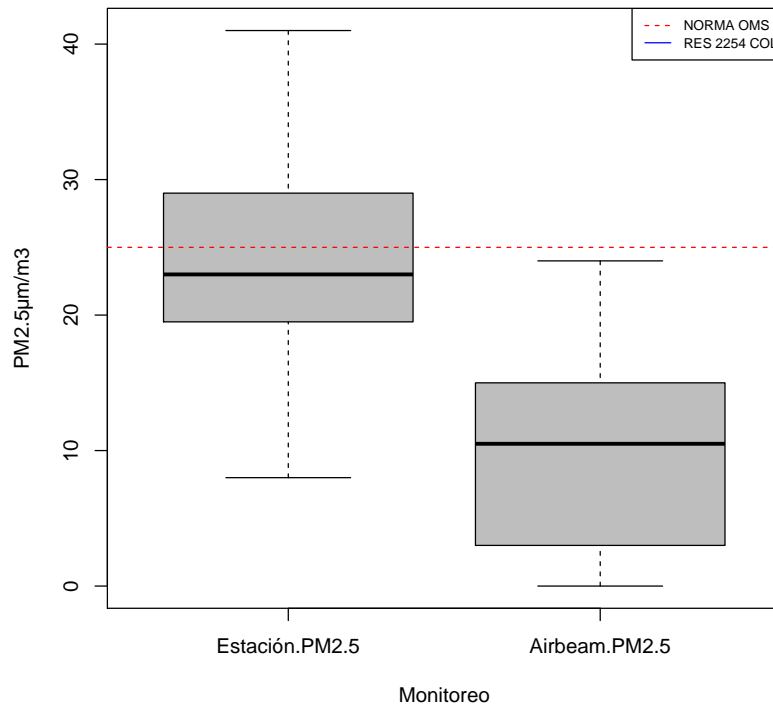


Figura 5.14: Comparación de las mediciones realizadas en la estación Univalle para el mes de octubre de 2019 y las obtenidas con el sensor Airbeam2 durante el mes de octubre.

A partir de los datos de $PM_{2.5}$ se construyó el diagrama de dispersión que se observa en la Figura 5.15. La recta de regresión lineal en color rojo, expresada en la ecuación 5.5, el modelo posee una pendiente igual a 0.827, representando una varianza del 68 %, lo cual podría evaluarse como una buena concordancia entre métodos. En este caso la pendiente indica que las mediciones de la estación Univalle sobreestima a las mediciones del Airbeam2.

$$Estacion = 15.84 + 0.827 * X \quad (5.3)$$

El coeficiente de correlación de Pearson, el cual muestra una fuerte asociación positiva entre los valores obtenidos por el dispositivo Airbeam2 y la estación de monitoreo DAGMA-Univalle al ser igual a 0.819, con una confianza del 95 %. Sin embargo, una alta correlación no necesariamente es sinónimo de concordancia entre métodos, puesto que evalúa la relación

y no la diferencia.

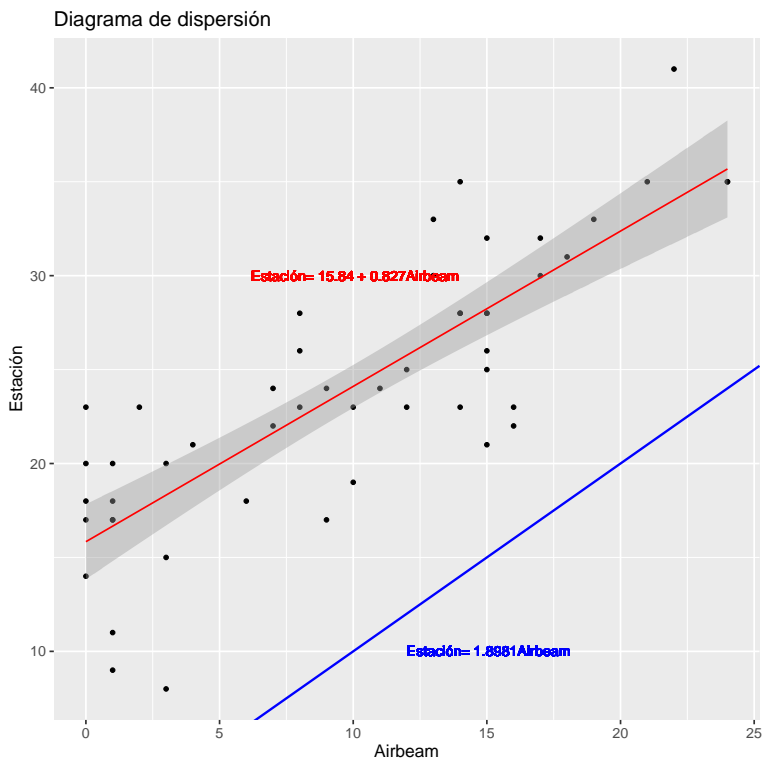


Figura 5.15: Diagrama de Dispersión entre el dispositivo móvil Airbeam2 y la estación de monitoreo Univalle en el mes de octubre.

En la Figura 5.16 se muestra un diagrama de Bland-Altman. En el cual se observa, la desviación entre las mediciones que proveen los dos métodos es de $-14.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del material particulado $\text{PM}_{2.5}$, así en promedio el dispositivo portátil Airbeam2 mide $14.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ menos que la estación de monitoreo del DAGMA-Univalle. Esto implica que el sensor podría subestimar las concentraciones medidas en los puntos, por lo cual estas últimas podrían ser más altas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la duración de este estudio es muy corto así que se requiere un mayor período de observación para lograr una mejor comparabilidad de los datos. A pesar de lo anterior el sensor Airbeam2 puede ser un elemento de diagnóstico preliminar y puede ser un indicativo sobre nuevas zonas de la ciudad que requieren ampliación de cobertura en mediciones de material $\text{PM}_{2.5}$.

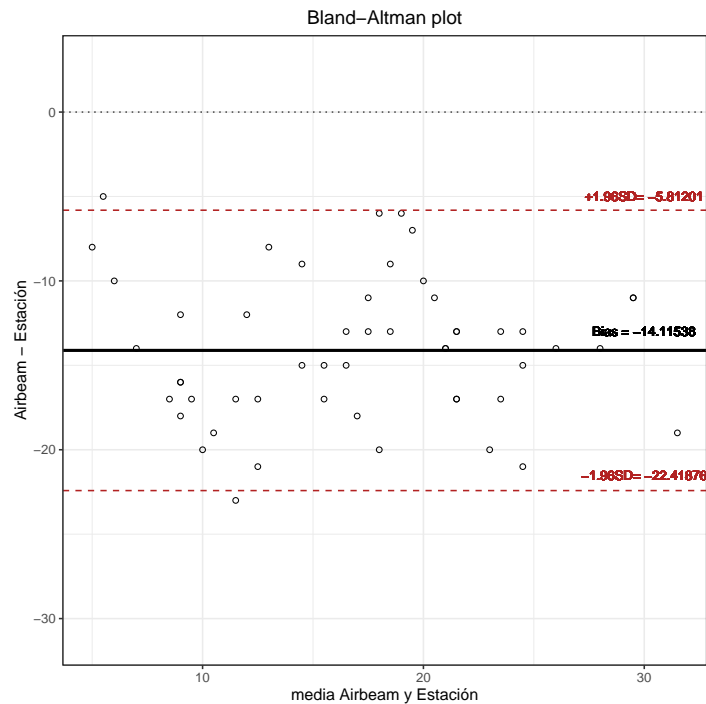


Figura 5.16: Diagrama de Bland-Altman para determinar concordancia entre el dispositivo Airbeam y estación Univalle

5.6 Influencia de la temperatura y la humedad en el comportamiento de $PM_{2.5}$.

Durante el monitoreo, se logra captar que a medida que aumenta la humedad, ya sea que esté lloviendo o lloviznando, aumenta las concentraciones de $PM_{2.5}$. Debido a esto, se procede a realizar un análisis de correlación, para verificar qué tan relacionado está la temperatura y la humedad con el $PM_{2.5}$. Encontrando con los datos arrojados por el Airbeam2, se observa en la (Figura 5.17), que existe una correlación positiva entre el $PM_{2.5}$ y la humedad, es decir, a medida que aumenta la humedad, también aumenta de cierta manera el contaminante $PM_{2.5}$, aunque esta no es una correlación fuerte (0.44). La correlación entre el $PM_{2.5}$ y la temperatura en grados centígrados, es una correlación negativa débil, es decir que a medida que aumenta la temperatura, el contaminante $PM_{2.5}$ disminuye (-0.27). Realizando correlación entre la humedad y la temperatura, se encuentra una correlación negativa fuerte, en la cual se puede decir que, a medida que aumenta la humedad, la temperatura disminuye, algo que tiene bastante sentido en el clima de nuestra ciudad. Cabe resaltar que durante el estudio de estas variables meteorológicas, se presentaron valores de temperatura extremadamente altos, lo cual conlleva a una falla del

dispositivo al momento del monitoreo, estos valores fueron omitidos para realizar un buen análisis y obtener resultados coherentes. Se define una correlación débil si es menor a (+/-)0.5, una correlación fuerte si es mayor a (+/-)0.5. Estos resultados dan certeza a nuestras observaciones durante el monitoreo, donde se evidenciaba de cierta manera una relación entre estas dos variables.



Figura 5.17: Correlación entre PM2.5, Humedad y Temperatura (Airbeam2)

5.7 Visor Web.

El geovisor web diseñado permite seleccionar entre distintas capas, cada una de estas con información georeferenciada como el perímetro urbano de la ciudad de Cali, distribución de barrios, comunas y manzanas, ubicación de estaciones de monitoreo del SVCASC y las zonas y puntos de monitoreo seleccionados para la toma de datos.

Este geovisor está conformado por dos secciones: en la primera sección se encuentra ubicado el mapa dinámico con sus respectivos controles de visualización, incluyendo el botón con las opciones de selección de capas anteriormente mencionadas (Figura 5.18). La segunda sección está compuesta por un gráfico representando el índice de calidad del aire para el punto seleccionado en las horas de monitoreo establecidas (06 : 30 – 08 : 30, 11 : 00 – 13 : 00, 15 : 00 – 17 : 00). Además, se agregó la funcionalidad de seleccionar una fecha para conocer la calidad del aire de ese punto en la fecha elegida.

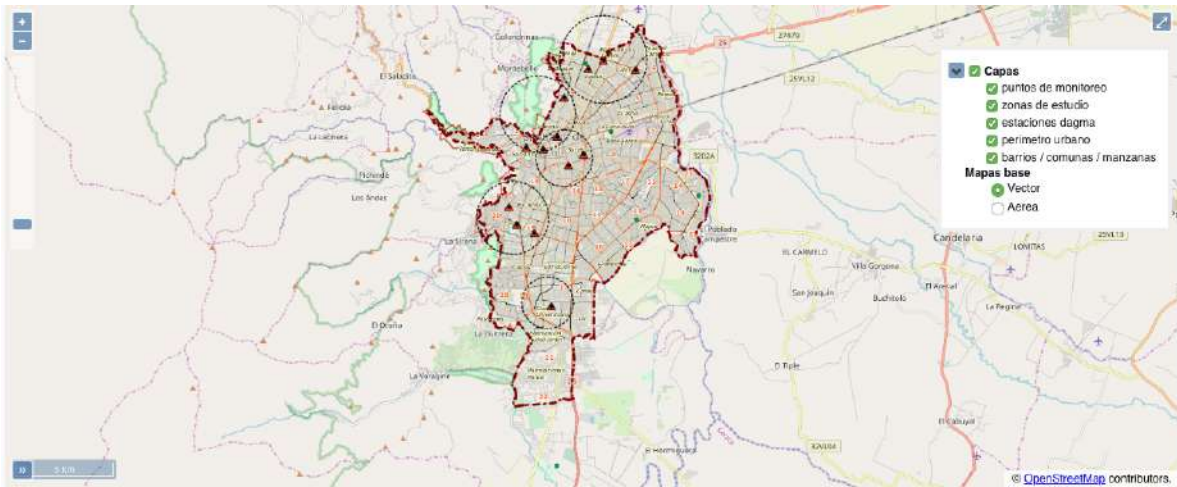


Figura 5.18: Geovisor con todas las capas seleccionadas.

Cuando el usuario hace clic en cualquiera de los puntos de monitoreo (triángulos rojos), el geovisor mostrará un fragmento informativo a manera de “popup”, el cual contiene un corto mensaje con el estado de la calidad del aire según el valor actual del ICA (Figura 5.19), un círculo del color correspondiente conforme a las convenciones de colores establecidas por [Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010].



Calidad del aire para el punto **Univalle**

Figura 5.19: Visualización de popup con información del punto seleccionado.

Al seleccionar un punto de monitoreo, automáticamente se despliega la segunda sección con el gráfico mostrando los niveles de calidad del aire para ese día (Figura 5.20). Para representar los puntos sobre la gráfica se utilizaron gráficos vectoriales (svg) en forma de expresiones de caras felices, serias y tristes aplicando también la convención de colores citada anteriormente (Figura 5.21).



Figura 5.20: Gráfica de calidad del aire del punto de monitoreo seleccionado.

Se aclara que no se suministra un enlace para acceder a la plataforma debido a la cláusula de confidencialidad del concurso, ya que en ésta establecen que no se podrá disponer de los datos ni resultados en la web sino solo hasta el momento de la publicación de los mismos por parte del ente organizador del concurso.



Figura 5.21: Íconos de representación de puntos sobre gráfica del geovisor.

6. CONCLUSIONES

- La presente investigación ha provisto una serie de datos inéditos de concentración de $PM_{2.5}$, utilizando el medidor de bajo costo Airbeam2, en diferentes puntos de la ciudad de Cali donde las estaciones de monitoreo del DAGMA no incluyen este parámetro. Los resultados indican que en ninguno de los puntos evaluados se superaron los valores límite diarios establecidos por la Resolución 2254 que establece las normas de calidad del aire para Colombia. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el tiempo de estudio solo fue de cinco semanas y no cubrió todas las 24 horas de un día, así que quizás en un estudio que tenga mediciones más continuas se pueden presentar variaciones. De todas maneras los datos obtenidos son una muy buena primera aproximación para notar la dinámica de este contaminante en las zonas estudiadas.
- El hecho de que los valores de las medianas obtenidas en algunos puntos monitoreados llegan a superar ligeramente o a concordar con los valores límites establecidos por las guías de la [OMS, 2005], reafirman el supuesto de que puede haber cierto riesgo a la salud debida a esas concentraciones en esos puntos. Así, aunque los datos cumplan con el estándar nacional deben tomarse precauciones necesarias para trabajar en pro de obtener concentraciones más bajas que protejan la salud pública como lo indica la [OMS, 2005].
- La dinámica temporal de la concentración de $PM_{2.5}$ de alguna manera corrobora el comportamiento de la contaminación en la ciudad de Cali. Durante los períodos de la mañana y tarde se observaron las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ en los diferentes puntos monitoreados. La disminución en horas de la tarde-noche se relacionan con el fenómeno de dispersión de contaminantes dominado por la meteorología de la ciudad, particularmente la velocidad del viento y su dirección genera que haya un “lavado” del PM con la consecuente disminución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la noche.
- El parámetro de correlación de Pearson para el $PM_{2.5}$ medido con el dispositivo Airbeam2 frente a lo reportado por la estación de monitoreo DAGMA-Univalle fue 0.819. Aunque esto indica una alta correlación se estableció que el sensor del Airbeam2 predice una concentración de $14.11\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ menos que la medida en la estación de monitoreo del DAGMA-Univalle. Esto significa que el medidor podría subestimar los valores reales de concentración. Claro está que para comprobar

este supuesto se requiere realizar un estudio a más largo plazo.

- Tener un sistema de información en tiempo real es una necesidad para la ciudad de Cali y sus ciudadanos ya que ello provee equidad y justicia ambiental a las comunidades. En este proyecto se ha realizado el diseño de un Geovisor web que permite que los ciudadanos consulten el estado de la calidad del aire en diferentes puntos de la ciudad en términos del índice de calidad del aire. Este es un instrumento para mejorar la gobernanza e impulsar la participación ciudadana en la protección del recurso aire.

REFERENCIAS

- [Bari and Kindzierski, 2016] Bari, M. A. and Kindzierski, W. B. (2016). Fine particulate matter (pm_{2.5}) in edmonton, canada: Source apportionment and potential risk for human health. *Environmental pollution*, 218:219–229.
- [Cali, 2019] Cali, A. (2019). *Calidad del aire con índice dañino*. ADN, Cali, Colombia.
- [Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2018] Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2018). *Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia*. Colombia.
- [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2012] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2012). *Índice de calidad del aire (ICA)*. Colombia.
- [Instituto Nacional de Salud - Observatorio Nacional de Salud, 2018] Instituto Nacional de Salud - Observatorio Nacional de Salud (2018). *Carga de enfermedad ambiental en Colombia - Informe técnico especial 10*. Colombia.
- [Jiang et al., 2018] Jiang, P., Yang, J., Huang, C., and Liu, H. (2018). The contribution of socioeconomic factors to pm_{2.5} pollution in urban china. *Environmental Pollution*, 233:977–985.
- [Li et al., 2017] Li, S., Feng, K., and Li, M. (2017). Identifying the main contributors of air pollution in beijing. *Journal of Cleaner Production*, 163:S359 – S365. Urban ecological infrastructure for healthier cities: governance, management and engineering.
- [Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Colombia.
- [OMS, 2005] 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: actualización mundial 2005*. Technical report, Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- [OMS, 2016] OMS (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*.

[R Core Team, 2019] R Core Team (2019). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

[Sistema de Vigilancia Calidad del Aire Santiago de Cali (SVCASC), 2019] Sistema de Vigilancia Calidad del Aire Santiago de Cali (SVCASC) (Julio - 2019). *Boletín mensual de la calidad del aire y ruido ambiental de Santiago de Cali*. Colombia.

Anexo A

REGISTRO FOTOGRÁFICO

Zona 1 Área con influencia de la estación La Flora.



Figura A.1: Estación paso del comercio tomada por Angelly Ortega.

1. PUNTO TERMINALITO - SEMANA 1 Y 2

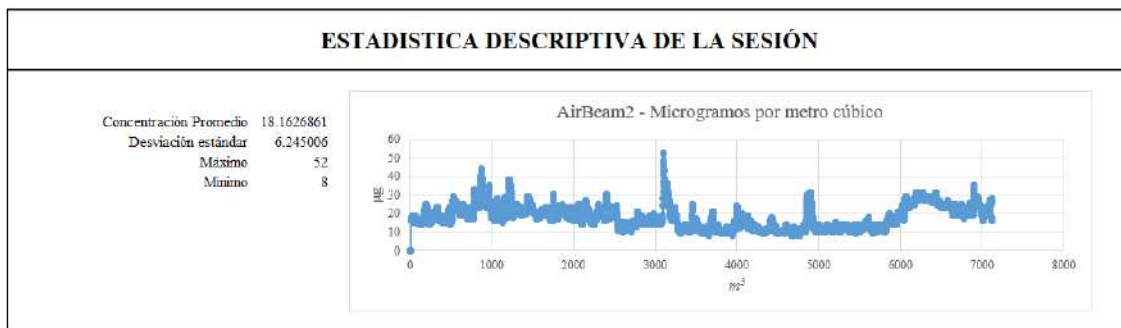


Figura A.2: Estadística descriptiva de las sesiones en Terminalito.

2. PUNTO LA FLORA - SEMANA 3 Y 4

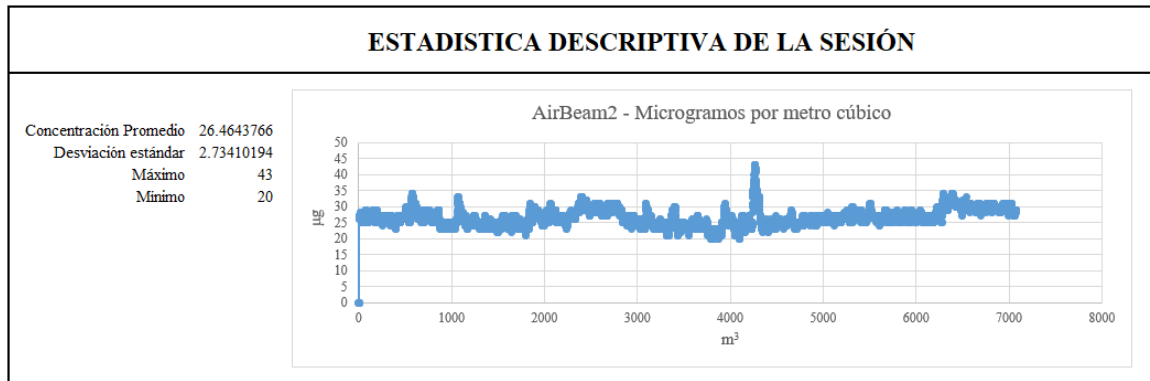


Figura A.3: Estadística descriptiva de las sesiones en la Flora.

3. PUNTO SAMECO - SEMANA 5

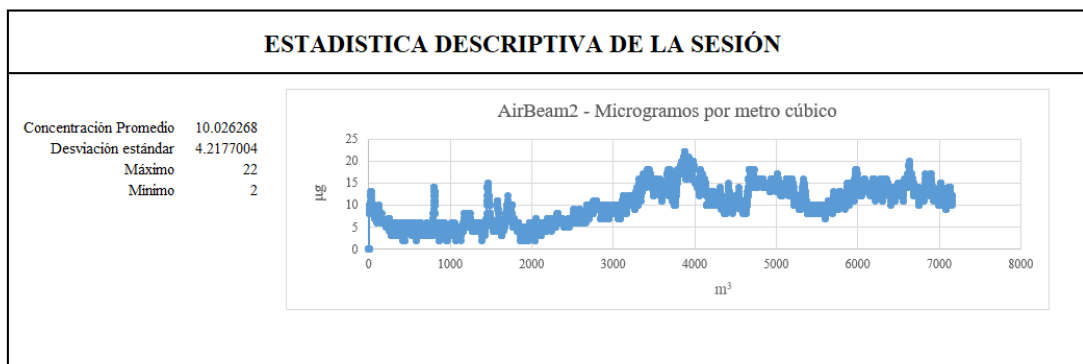


Figura A.4: Estadística descriptiva de las sesiones en Sameco.

Zona 2 Área con influencia de la estación La Ermita.



Figura A.5: Museo La Tertulia, tomada por Carolina Salcedo.

1. PUNTO CHIPICHAPE - SEMANA 1 Y 2

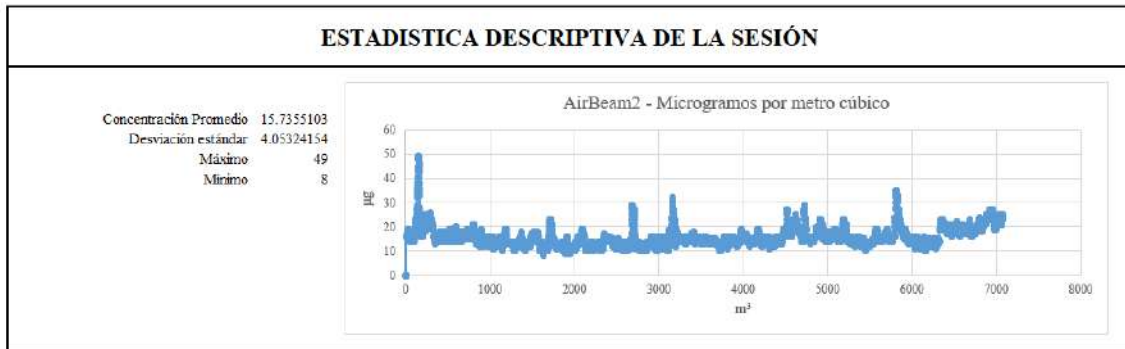


Figura A.6: Estadística descriptiva de las sesiones en Chipichape.

2. PUNTO MUSEO LA TERTULIA - SEMANA 3 Y 4

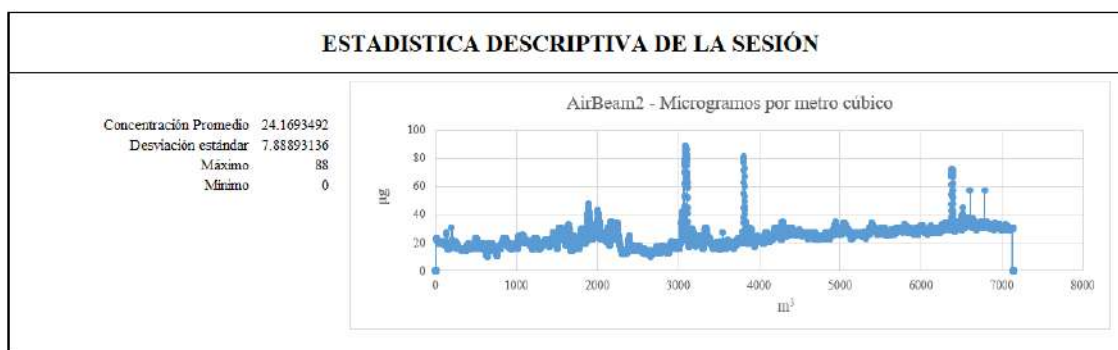


Figura A.7: Estadística descriptiva de las sesiones en La Tertulia.

3. PUNTO LA ERMITA SEMANA 5

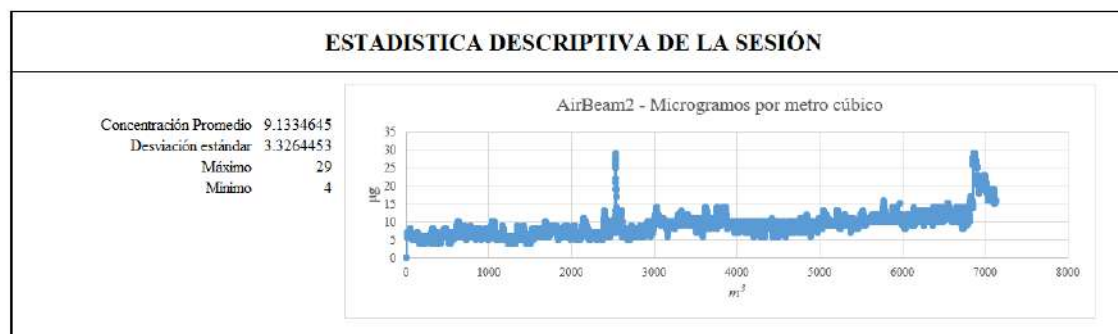


Figura A.8: Estadística descriptiva de las sesiones en La Ermita.

Zona 3 Área con influencia de la estación ERA-Obrero.



Figura A.9: Centro de eventos Comfenalco, tomada por Santiago Rodas.

1. PUNTO SAN PASCUAL - SEMANA 1 Y 2

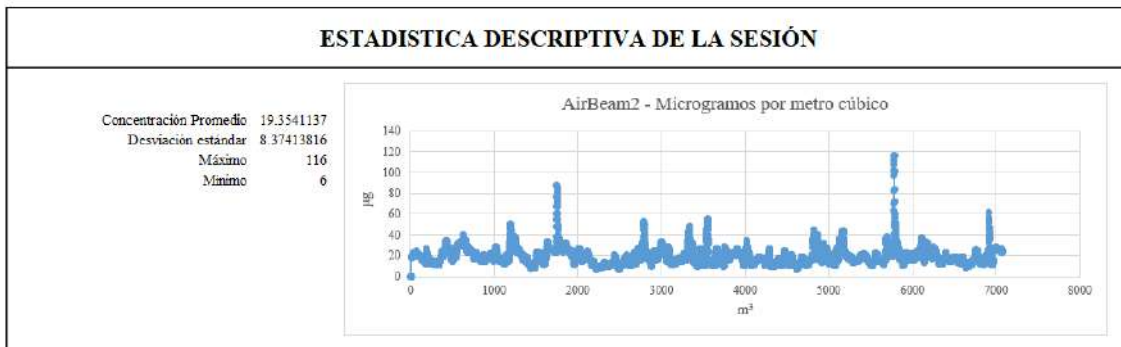


Figura A.10: Estadística descriptiva de las sesiones en San Pascual.

2. PUNTO COMFENALCO - SEMANA 3 Y 4

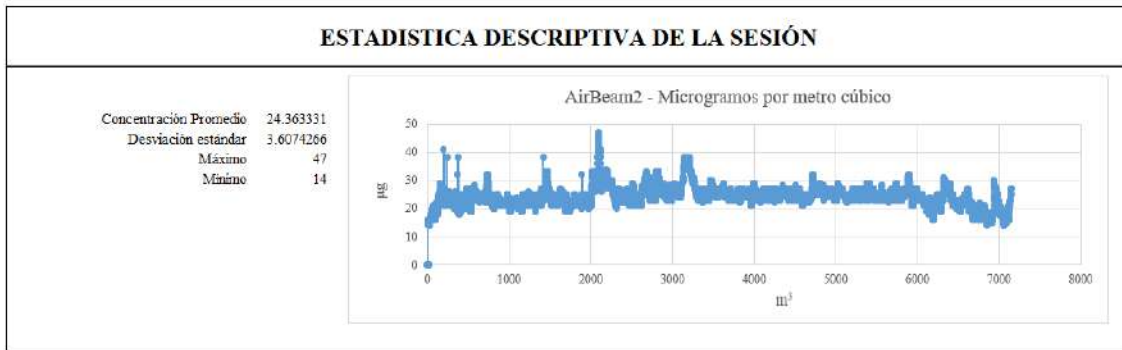


Figura A.11: Estadística descriptiva de las sesiones en Comfenalco.

3. PUNTO ERA-OBrero - SEMANA 5

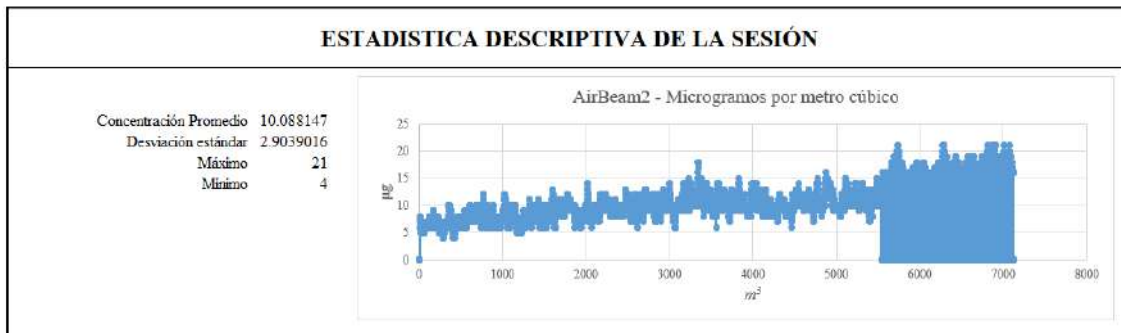


Figura A.12: Estadística descriptiva de las sesiones en ERA.

Zona 4 Área con influencia de la estación Cañaveralejo.



Figura A.13: Centro comercial Palmetto Plaza, tomada por Sebastian Hernandez.

1. PUNTO PALMETTO - SEMANA 1 Y 2

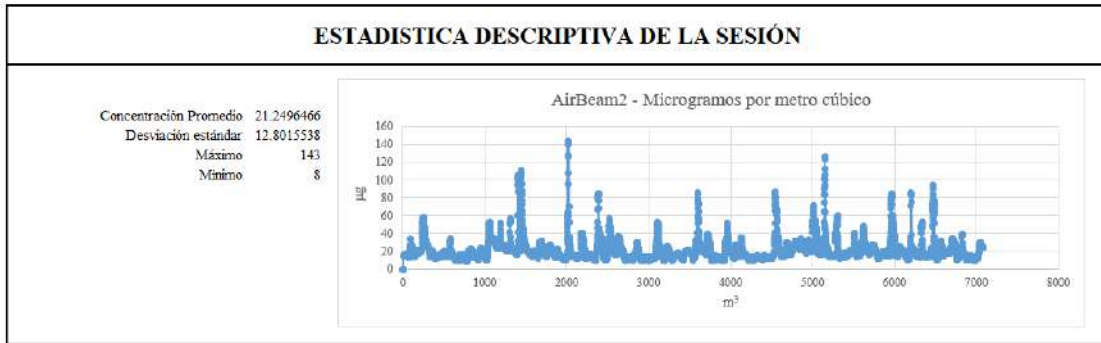


Figura A.14: Estadística descriptiva de las sesiones en Palmetto.

2. PUNTO CAÑAVERALEJO - SEMANA 3 Y 4

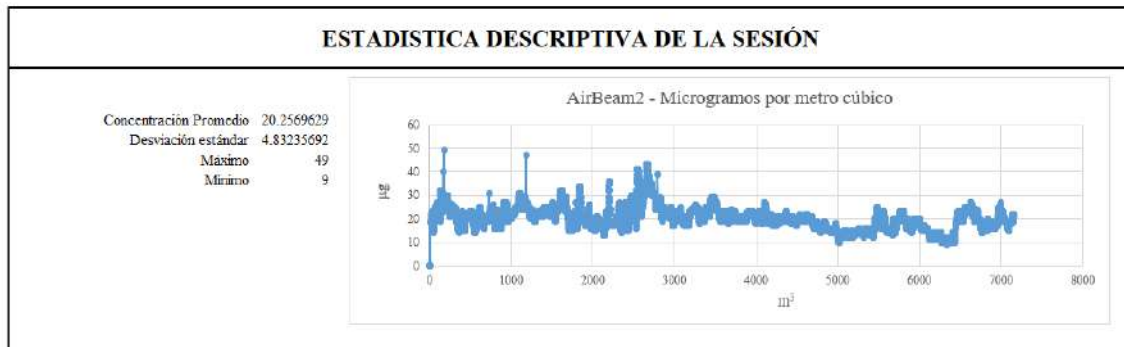


Figura A.15: Estadística descriptiva de las sesiones en Cañaveralejo.

3. PUNTO LA NAVE - SEMANA 5

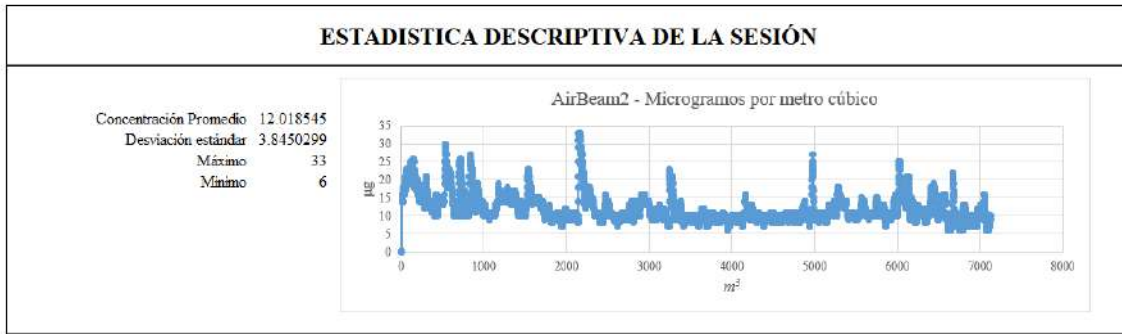


Figura A.16: Estadística descriptiva de las sesiones en La Nave.

Zona 5 Área con influencia de la estación Univalle.



Figura A.17: Estación del SVCA Univalle, tomada por Vanessa Toledo.

1. PUNTO UNIVALLE - SEMANA 1 Y 2

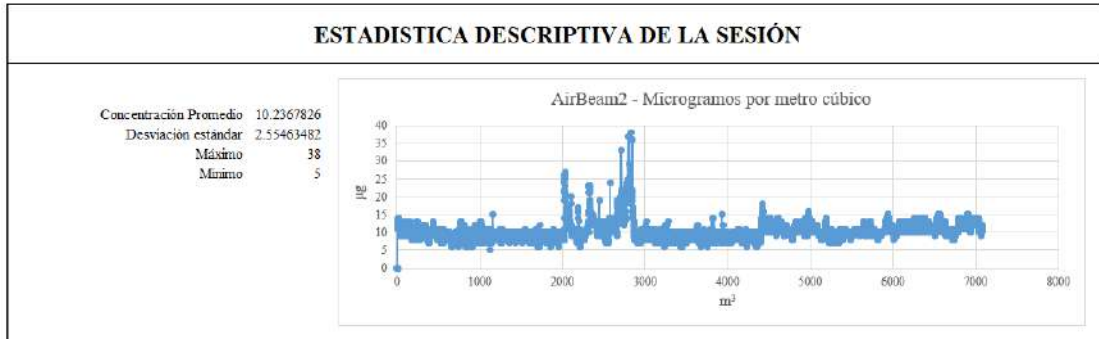


Figura A.18: Estadística descriptiva de las sesiones en Univalle.

2. PUNTO UNIVALLE - SEMANA 3 Y 4

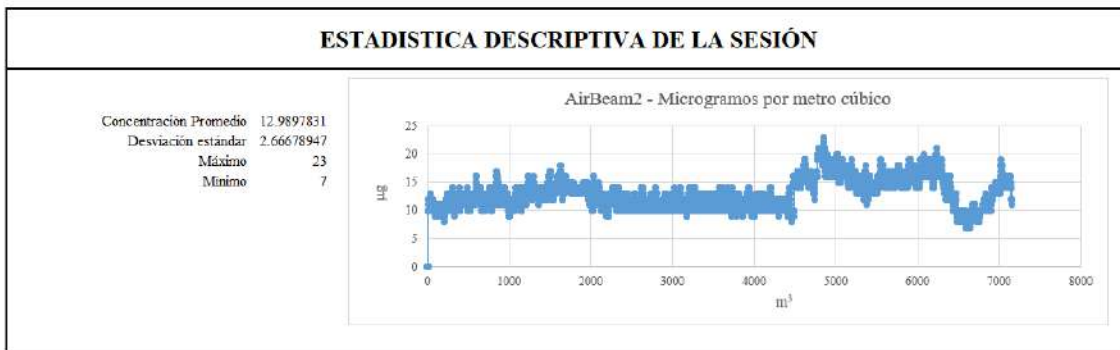


Figura A.19: Estadística descriptiva de las sesiones en Univalle.

3. PUNTO UNIVALLE - SEMANA 5

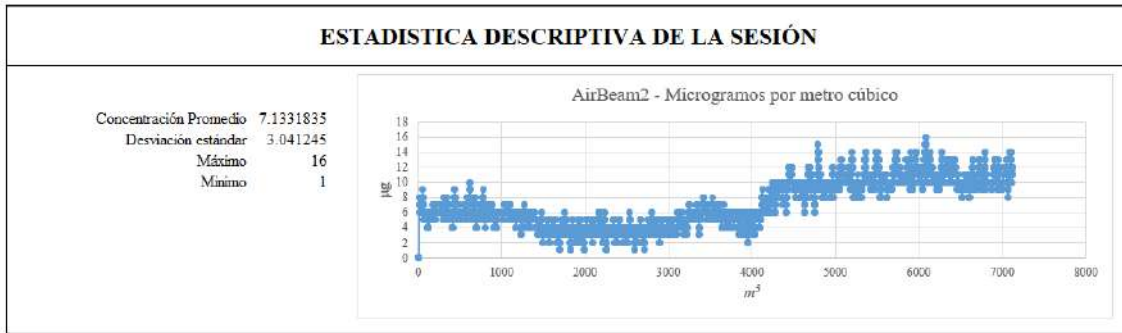


Figura A.20: Estadística descriptiva de las sesiones en Univalle.

Anexo B
ANÁLISIS

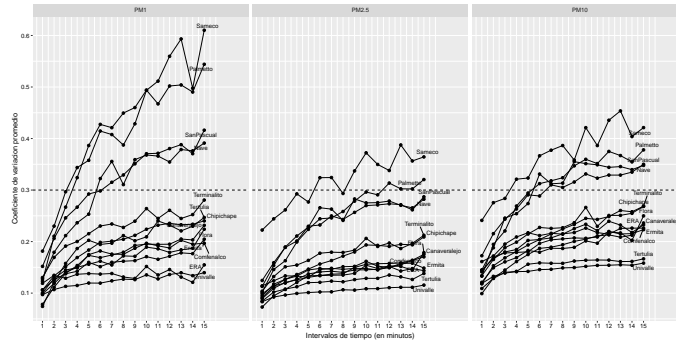


Figura B.1: Análisis de variación todos los contaminantes

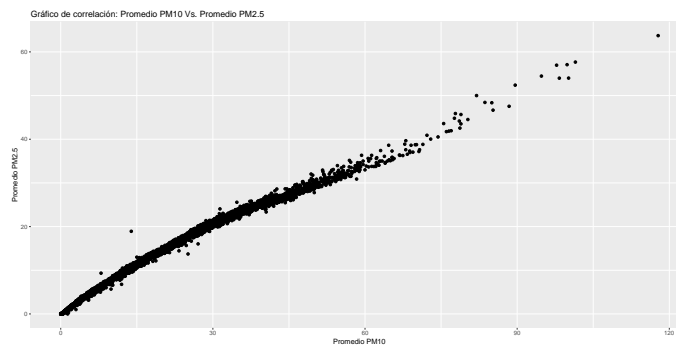


Figura B.2: Correlación PM_{10} Vs. $PM_{2.5}$