UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de la distribución de tamaño de partícula del material particulado presente en aire ambiente en dos puntos de Bogotá

Karen Johanna Blanco Fajardo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

Caracterización de la distribución de tamaño de partícula del material particulado presente en aire ambiente en dos puntos de Bogotá

Karen Johanna Blanco Fajardo

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Ph.D. Néstor Yezid Rojas Roa

Codirector (a):

Dr.Ing. Lady Mateus Fontecha

Línea de Investigación:

Calidad del aire

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación de Calidad del Aire - GICA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2023

A mis padres y hermana

Declaración de obra original

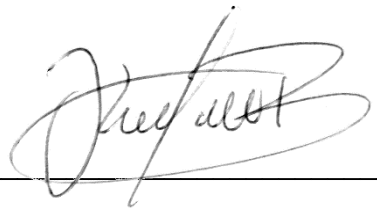
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: Karen Johanna Blanco Fajardo

Fecha 30/07/2023

Fecha

Agradecimientos

Agradecimiento a la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá por permitir la instalación del equipo de medición de este estudio en sus estaciones de monitoreo, en especial a Henry Ospino y Luz Dary González, miembros técnicos de grupo de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.

Resumen

Caracterización de la distribución de tamaño de partícula del material particulado presente en aire ambiente en dos puntos de Bogotá

La contaminación atmosférica representa uno de los retos en común de las grandes urbes debido a sus graves implicaciones sobre la salud de la población. Diferentes contaminantes son atribuidos a enfermedades crónicas y agudas, siendo el material particulado uno de mayor gravedad considerando su variabilidad en composición química y en tamaño, siendo las partículas de menor tamaño las que ingresan con mayor facilidad al sistema respiratorio. Solo en Bogotá se registraron entre 2019 y 2020 cinco alertas ambientales por altas concentraciones de $PM_{2.5}$. Es así, que mientras se busca alcanzar las directrices de la OMS y la normatividad nacional de calidad del aire, se enfocan los esfuerzos en reducción de emisiones de las fuentes contaminantes que se presumen son las causantes de la contaminación. Es así que estas acciones deben ir de la mano de la generación de conocimiento para el entendimiento de problemática de contaminación. Estudios como la caracterización del tamaño de partícula permiten conocer el nivel de riesgo de la población e identifica zonas de riesgo no identificadas al analizar mediciones de concentración másica, considerando que estas últimas representan en su mayoría las partículas de mayor tamaño.

Es por esta razón que este estudio buscó realizar un ejercicio pionero en el país en la medición en aire ambiente de la concentración de número de partículas (CNP) y la caracterización de la distribución de tamaño (PNSD) con el equipo contador de partículas ELPI+ en dos estaciones de monitoreo de calidad del aire del de Bogotá, correspondientes a San Cristóbal (estación de fondo urbano) y Las Ferias (estación de tráfico vehicular), con el fin de identificar las concentraciones y tamaños de las partículas a las que están expuestos los ciudadanos. Estas mediciones se realizaron en tres campañas en diferentes fechas entre junio y octubre de 2017. Los resultados obtenidos correspondieron a promedios horarios de concentración de partículas entre diámetros medios desde 0.016 µm hasta 5.3 µm. Estos resultados en conjunto con la medición de variables meteorológicas y concentraciones másica de contaminantes criterio de las estaciones de calidad del aire permitieron hacer análisis de proveniencia de contaminantes, correlaciones estadísticas y análisis de componentes principales (PCA).

Entre los hallazgos de este estudio se encuentra cómo la temporada de medición afecta significativa las mediciones de $PM_{2.5}$ y por lo tanto la concentración de número de partículas. Debido a que las mediciones se realizaron en fechas distintas, los resultados no se reportan como comparación entre estación de monitoreo sino entre campaña de

medición asignadas como Las Ferias (junio a julio), San Cristóbal 1 (septiembre) San Cristóbal 2 (septiembre-octubre). Para las campañas de las Ferias el análisis respalda la fuerte influencia de las emisiones de fuentes vehiculares. Es así, que los picos de CNP se presentaron en la mañana con valores cercanos a $5.5x10^3$ #/cm^3, provenientes principalmente en dirección de la Avenida calle 80 con PNSD unimodal centrada principalmente diámetros de partículas de modos Aitken. La campaña de San Cristóbal 1 presenta un comportamiento unimodal PNSD centrado entre los rangos de diámetros entre 60 a 108 nm, y que presenta las mayores concentraciones a las 6:00H (5.3 $x10^3$ #/cm^3). Aunque esta hora se asocia a picos por alto tráfico, también se identificaron concentraciones de fondo provenientes de los cerros orientales asociadas a fuentes biogénicas que persisten durante el día, y que se identifican con claridad en las horas de la noche y madrugada. San Cristóbal 2 es la campaña que presenta el valor promedio más alto de CNP ($5.1x10^3$#/m^3) debido a su alta participación de partículas en modo nucleación. Esto se evidencia PNSD que a diferencia de las otras campañas es bimodal, donde su primera moda sitúa entre 60 a 108 nm y su segunda moda en el diámetro de 0.016 µm. Este aumento de concentración de partículas no fue posible de explicar, a pesar de corroborar que no se presentan eventos como incendios forestales que pudieran afectar la concentración normal de partículas en esta estación. En cuento a los PCA tanto en la campaña de San Cristóbal 1 y San Cristóbal 2 se identificaron tres componentes principales, siendo el de mayor importancia en la variación de los datos aquel relacionado a las emisiones de fuentes vehiculares provenientes de vías como la carrera decima. Los dos factores restantes se asociaron con material particulado transportado, posiblemente biogénico, con una alta correlación con condiciones meteorológicas cambiantes durante el día y la noche.

Palabras clave: Distribución de tamaño de partícula; Concentración de número de partícula; Análisis de Componentes Principales.

Abstract

Characterization of the particle size distribution of particulate matter present in air at two sites in Bogotá

Air pollution represents one of the common challenges of large cities due to its implications on the health of population. Different pollutants are attributed to chronic and acute diseases, particulate matter being one of the most serious considering its wear in chemical composition and size, being the smaller particles entering more easily to respiratory system. Only in Bogotá, between 2019 and 2020, five environmental alerts were registered for high concentrations of $PM_{2.5}$. Thus, while seeking to achieve the WHO guidelines and national air quality regulations, efforts are focused on reducing emissions from polluting sources that are presumed to be the cause of contamination. Thus, these actions must be complemented with generation of knowledge for understanding pollution problem. Related research with characterization of the particle size makes it possible to know the risk level of the population and identify risk areas unidentified in mass concentration analysis, considering that the latter mostly represent the largest particles.

This is the reason why this study sought to carry out a pioneering exercise in the country about measurement of particle number concentration (PNC) and the characterization of the particle number size distribution (PNSD) with particle counter equipment ELPI+ in two stations of air quality monitoring of Bogotá, corresponding to San Cristóbal (urban background station) and Las Ferias (vehicular traffic station), in order to identify the concentrations and sizes of the particles to which citizens are exposed. These measurements were made in three campaigns on different dates between June and October 2017. The results obtained corresponded to hourly averages of particle concentration between average diameters from 0.016 µm to 5.3 µm. These results, combined with metrological variables measurement and criteria pollutants concentrations from the air quality stations, allowed analysis of the origin of pollutants, statistical correlations, and principal components analysis (PCA).

One findings of this study is how the measurement season significantly affects $PM_{2.5}$ measurements and therefore the particle number concentration. Because the measurements were made on different dates, the results are not reported as a comparison between monitoring stations, but rather between measurement campaigns named as Las Ferias (June to July), San Cristóbal 1 (September) and San Cristóbal 2 (September-October). For the campaigns of Las Ferias, the analysis supports the strong influence of emissions from vehicular sources, thus, the PNC peaks occurred in values close to $5.5x10^3$ $\#/cm^3$, coming mainly from the direction of Avenida Calle 80 with unimodal PNSD centered

mainly on particle diameters of Aitken modes. The San Cristobal 1 campaign presents a unimodal PNSD too, behavior centered between the diameter 60 and 108 nm, and which presents the highest concentrations at 6:00H (5.3 x10^3 #/cm^3). Although this hour is associated with peaks due to high traffic, background concentrations were also identified from the eastern hills associated with biogenic sources that persist during the day, and that are clearly identified at night and early morning. San Cristobal 2 is the campaign that presents the highest average value of PNC (5.1x10^3 #/m^3) due to its high participation of particles in nucleation mode. This is evidenced by PNSD, which, unlike the other campaigns, is bimodal, where its first mode is diameter between 60 to 108 nm and its second mode is 16 nm. This increase in PNC was not possible to explain, despite corroborating that there are no events such as forest fires that affect the normal concentration of particles in this season. Considering the PCAs in both San Cristóbal 1 and San Cristóbal 2 campaigns, three main components were identified, the most important being the contribution related to vehicular source emissions from roads such as the tenth race. The remaining two factors were associated with transported particulate matter, possibly biogenic, with a high correlation to changing weather conditions during the day and night.

Keywords: Particle number concentration; Particle number size distribution: Principal Components Analysis.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras **1**

Lista de tablas **3**

Lista de Símbolos y abreviaturas **4**

Introducción **5**

1. Marco teórico **7**
1.1 Generalidades de la calidad del aire en Bogotá 7
1.2 Generalidades de variables meteorológicos en Bogotá 11
1.3 Fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos en la ciudad 15
1.4 Clasificación de partículas por tamaños 18
1.5 Impacto en salud del material particulado por tamaño de partícula 21
1.5. Instrumentos para medición de número de partícula 23

2. Metodología **25**
2.1 Ubicación de puntos de monitoreo 25
2.2 Campañas de medición 27
2.3 Instrumentos utilizados 29
2.3.1 Medición de CNP y PNSD 29
2.3.2 Medición de concentración másica de contaminantes criterio 31
2.4 Análisis de datos 32
2.4.1 OpenAir 33
2.4.2 Prueba de normalidad de los datos 33
2.4.3 Análisis de varianza (ANOVA) 34
2.4.4 Pruebas de correlación 36
2.4.5 Análisis de Componentes Principales (PCA) 36

3. Resultados **39**
3.1 Condiciones meteorológicas en las campañas de medición 39
3.2 Condiciones de concentración de $PM_{2.5}$ 42
3.3 Concentración de número de partícula y variación temporal 44
3.4 Distribución de tamaño de partícula 50
3.5 Correlación de la concentración de número de partículas con variables meteorológicas 54
3.6 Componentes principales por campaña de medición 67
3.6.1 Campaña de Las Ferias 68

3.6.2 Campañas de San Cristóbal 1 y San Cristóbal 2 69

4. Conclusiones y recomendaciones 72
4.1 Conclusiones 72
4.2 Recomendaciones 74

A. Anexo: Resultados de correlación con prueba de Spearman 77

B. Anexo: Resultados del Análisis de Componentes Principales 81

Bibliografía 83

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Ubicación estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá. 8
Figura 2. Promedio anual de concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en µg/m^3 en Bogotá de 2006 hasta 2022. 9
Figura 3. Distribución espacial de la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá en el año 2020. 10
Figura 4. Distribución mensual de la precipitación 12
Figura 5. Comportamiento promedio mensual de la velocidad del viento por estación de la RMCAB entre los años 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2021 y 2022. 13
Figura 6. Rosa de vientos promedio mensual del año 2017 13
Figura 7. Promedio mensual multianual (2010-2020) de la humedad relativa..... 14
Figura 8. Contribución por sector en emisión de $PM_{2.5}$ para 2018, 2020 y 2021. 15
Figura 9. Contribución por sector en emisión de contaminantes criterio del año 2021. ... 16
Figura 10. Participación por localidad de las emisiones de PM2.5..... 16
Figura 11. Representación de la distribución de tamaño de partícula de los aerosoles atmosféricos, modificada a partir de (Guarieiro & Guarieiro, 2015)..... 20
Figura 12. Fracción de deposición del PM en el sistema respiratorio según diámetro de partícula. 22
Figura 13. a) Distribución espacial de emisiones de $PM_{2.5}$ en Bogotá año 2018, b) ubicación de las estaciones, c) fotográfica de alrededores de la estación de Las Ferias, d) fotográfica de alrededores de la estación de San Cristóbal. 26
Figura 14. a) Mapas de la estación de Las Ferias y b) fotografía de su ubicación 27
Figura 15. a) Mapas de la estación de San Cristóbal y b) fotografía de su ubicación 27
Figura 16. a) Pieza plástica en forma de U instalada en la salida del equipo ELPI+; b) vista final de instalación de la boquilla de muestreo para el ELPI+ ubicado en la parte superior de la estación de Las Ferias 28
Figura 17 . a) Esquema general de las partes del equipo ELPI+. b) Esquema de funcionamiento del impactador de cascada para separación y conteo de partículas. 29
Figura 18. Ejemplo de resultados de la prueba ANOVA para comparar dos fechas de medición de humedad relativa 36
Figura 19. Resultados de análisis de valores propios para la campaña de a) Las Ferias, b) San Cristóbal 1 y c) San Cristóbal 2 38
Figura 20. Precipitación en estaciones de Las Ferias y San Cristóbal reportada por la RMCAB 39

Figura 21. Eventos de precipitación durante los días de medición, reportados por la RMCAB 40
Figura 22. Rosas de viento durante los días elaborados con mediciones reportadas por la RMCAB 40
Figura 23. Comportamiento horario de la velocidad del viento en las 3 campañas en las correspondientes estaciones de medición 41
Figura 24. Comportamiento mensual desde junio a octubre por estación 41
Figura 25. Comportamiento horario de la humedad relativa por estación en la correspondiente campaña de medición 42
Figura 26. Promedio semanal de la concentración de $PM_{2.5}$ para las estaciones de San Cristóbal y Las Ferias reportadas por la RMCAB 43
Figura 27. Comportamiento horario de la concentración de $PM_{2.5}$ medidas en las estaciones de Las Ferias y San Cristóbal por la RMCAB durante los periodos de las campañas de medición 44
Figura 28. Concentración de número de partículas por tamaño y campaña de medición 46
Figura 29. Distribución horaria de la concentración de número de partículas del modo nucleación 47
Figura 30. Distribución horaria de la concentración de número de partículas del tamaño de nanopartículas 48
Figura 31. Distribución horaria de la concentración del total de número de partículas 48
Figura 32. Comportamiento semanal de las concentraciones de número de partículas para cada campaña de medición 49
Figura 33. Promedio día de la distribución tamaño de partícula por campaña de medición 51
Figura 34. Distribución de tamaño de partícula por hora en la estación de Las Ferias 52
Figura 35. Distribución de tamaño de partícula por hora en la estación de San Cristóbal 1 52
Figura 36. Distribución de tamaño de partícula por hora en la estación de San Cristóbal 2 53
Figura 37. PolarPlot de número de partículas para la campaña de Las Ferias 63
Figura 38. PolarPlot de la concentración promedio del número de partículas para la campaña de Las Ferias 64
Figura 39. PolarPlot de la concentración promedio día del número de partículas para la campaña San Cristóbal 1 65
Figura 40. PolarPlot de número de partículas para la campaña de San Cristóbal 1 por rangos de las horas del día 66
Figura 41. PolarPlot de la concentración promedio día del número de partículas para la campaña San Cristóbal 2 67
Figura 42. PolarPlot de número de partículas para la campaña de San Cristóbal 2 por rangos de las horas del día 67
Figura 43. Factores relevantes identificados para la campaña de Las Ferias 68
Figura 44. Factores relevantes identificados para la campaña de San Cristóbal 1 70
Figura 45. Factores relevantes identificados para la campaña de San Cristóbal 2 70

Lista de tablas

Pág.
Tabla 1. Características de las estaciones San Cristóbal y Las Ferias de la RMCAB..... 26
Tabla 2. Descripción de campañas de medición..... 28
Tabla 3. Diámetro promedio de partícula asociado a las etapas del equipo ELPI+..... 30
Tabla 4.Descripción de equipos de medición utilizados por la RMCAB 31
Tabla 5. Resumen de herramienta y métodos utilizados para el análisis de resultados.. 32
Tabla 6. Resultados de prueba Shapiro-Wilk por variable 34
Tabla 7. Promedio mensual de la concentración de PM2.5 en las estaciones de Las Ferias y San Cristóbal durante los periodos de las campañas de medición..... 44
Tabla 8. Promedio de concentración de número de partículas entre semana y fines de semana 49
Tabla 9. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de medición en Las Ferias 57
Tabla 10. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de Las Ferias. 58
Tabla 11. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 1..... 59
Tabla 12. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 1..... 60
Tabla 13. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2..... 61
Tabla 14. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2..... 62

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Término
ELPI+	Impactador Electrónico de Baja Presión
CNP	Concentraciones de Número de Partículas
ANOVA	Análisis de varianza
RMCAB	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
PCA	Análisis de componente principales
PNSD	Distribución de tamaño de partícula en número
BAM	Beta Attenuation Monitor
PM_{10}	Material Particulado con diámetro menor o igual a 10 micrómetros
$PM_{2.5}$	Material Particulado con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros
NO_X	Óxidos de nitrógeno
CO	Monóxido de carbono
EPA	Environmental Protection Agency
UV	Ultravioleta
IBOCA	Índice Bogotano de Calidad del Aire

Introducción

Las partículas suspendidas en el aire ambiente, también conocidas como material particulado (PM, por sus siglas en inglés) o aerosol atmosférico, representan uno de los contaminantes de mayor relevancia en las ciudades del mundo. Su generación y dispersión en el aire acarrea riesgos conocidos a la salud humana, efectos negativos sobre los ecosistemas, así como influencia sobre los procesos atmosféricos, los cuales incluyen reacciones heterogéneas, formación de nubes, influencia en la precipitación, e incluso contribución al efecto invernadero asociado al carbono negro (más conocido como *black carbon*, su término en inglés), contaminante climático de vida corta con alto potencial de calentamiento global. La medición de propiedades de estos aerosoles tales, como su tamaño, concentración másica, concentración de número de partículas, composición química, densidad, entre otras, representa un reto y es indispensable para conocer sus impactos sobre una zona de estudio.

Dependiendo de su tamaño, las partículas pueden penetrar más profundamente el sistema respiratorio humano y tener implicaciones más graves en la salud. Se consideran como partículas gruesas que se encuentran en el rango de 10-2.5 µm, las cuales se depositan en la zona traqueobronquial, donde son filtradas por las mucosidades nasales y expulsadas a partir de estornudos y tos. Las partículas finas, en el rango de 2.5-0.1 µm, se depositan en las vías respiratorias, pero muchas de estas pueden penetrar al sistema alveolar. Las partículas ultrafinas, con diámetro menor a 0.1 µm (OMS, 2021) llegan hasta el fondo de sistema respiratorio y pueden ser transportadas a través del torrente sanguíneo o sistema linfático hasta a los órganos vitales (Slezakova et al., 2013a).

Un número cada vez mayor de estudios se han enfocado en relacionar la concentración de partículas finas y ultrafinas en el ambiente, con las tasas de mortalidad y morbilidad de la población en las ciudades, demostrando que las partículas finas tienen efectos

inmediatos en la salud de la población expuesta y las partículas ultrafinas tienen efectos a largo plazo. Mientras los efectos inmediatos están relacionados con los decesos por enfermedades respiratorias, a largo plazo están relacionados con morbilidad por enfermedades cardiovasculares (Pekkanen & Kuopio University Printing Office), 2000).

La determinación de los impactos epidemiológicos de las a partículas se ha enfocado en su concentración másica, medida que se encuentra sesgada hacia las partículas con mayor tamaño. Utilizar otras métricas como el número de partículas y la distribución de tamaño de partícula, permite tener en cuenta las partículas más pequeñas que por su tamaño y área superficial, pueden tener una mayor capacidad de deposición en el sistema respiratorio (Colbeck & Lazaridis, 2014b).

En Colombia, un acercamiento a la medición continua de parámetros diferentes a la concentración másica del material particulado menor a 10 micras y menor a 2.5 micras se hace en Medellín y Bogotá, con la medición de la concentración másica de carbono negro en varias de las estaciones de monitoreo de calidad el aire. La medición de concentración del número de partículas y su distribución de tamaño ha sido prácticamente inexistente antes de este estudio, con excepción de algunas mediciones realizadas en tesis de maestría de la Universidad Nacional de Colombia (Avila Prada, 2016). Los equipos requeridos para este ejercicio son especializados y costosos, y al no ser de medición obligatoria, autoridades ambientales no ven soportable su compra. Por eso, es importante ejecutar estudios pioneros, que permitan aportar a la comprensión de la contaminación del aire en las zonas de estudio, con las métricas de concentración de número de partículas y distribución de tamaño de partículas.

De este modo, el objetivo del presente estudio es realizar la primera caracterización de distribución de partícula y mediciones de concentración en número de partícula en el aire ambiente de Bogotá, en una zona influenciada por fuentes vehiculares y una zona de fondo urbano, así como, complementar estas mediciones con análisis estadísticos multivariado con variables meteorológicas y concentraciones de contaminantes en el aire, que permita inferir fuentes de las partículas.

1. Marco teórico

1.1 Generalidades de la calidad del aire en Bogotá

Los contaminantes atmosféricos se definen como sustancias presentes en el aire, que no hacen parte de la composición natural de la atmósfera o se encuentran en condiciones mayores a las esperadas. Estas sustancias son emitidas por fuentes antropogénicas, biogénicas o geogénicas, las cuales tienen afectaciones negativas sobre el medio ambiente como aporte al efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono y enfermedades crónicas y agudas a la salud humana (OMS, 2021).

En relación a la calidad del aire, los contaminantes de interés se denominan contaminantes criterio los cuales tienen evidencia científica que respalda sus efectos contraproducentes sobre la humana (EPA, 2023). Estos contaminantes son el material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), ozonos troposféricos (O_3), óxidos de carbono (CO), dióxidos de sulfuro (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_X).

En Colombia los lineamientos normativos incentivan la protección de la salud y el bienestar de la población, en el marco del desarrollo sostenible. Es así como a partir de la Resolución 2254 de 2017, se adopta la norma Nacional de calidad del aire ambiente en donde se establecen los niveles permisibles de contaminantes criterio en el aire ambiente o inmisión y se dan disposiciones para el monitoreo de la calidad del aire por parte de las autoridades ambientales.

En la ciudad de Bogotá la Secretaría Distrital de Ambiente realiza el monitoreo de calidad del aire y variables meteorológicas a partir de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire - RMCAB, la cual está conformada por diecinueve (19) estaciones de monitoreo dispuestas en toda la ciudad como se presenta en la Figura 1. Estas estaciones se categorizan en

estación de fondo[1], de tráfico[2] e industrial[3], en las cuales se miden las concentraciones de los contaminantes criterio, además de variables meteorológicas como velocidad y dirección del viento, humedad, precipitación, presión atmosférica y radiación solar (Secretaría Distrital de Ambiente, Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2017).

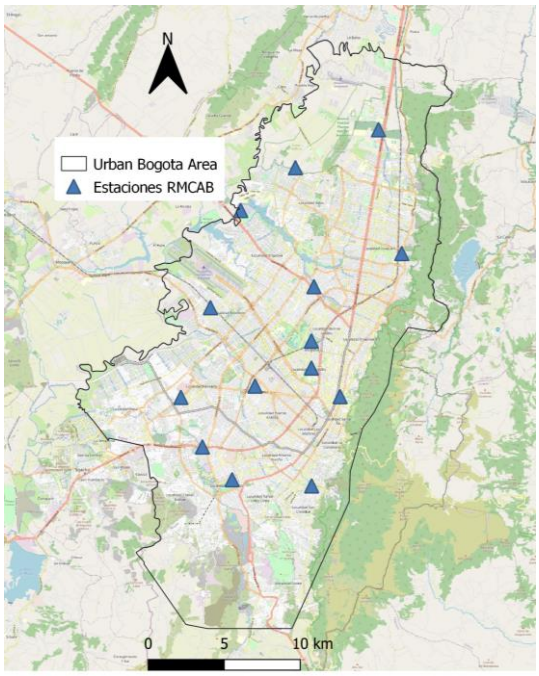


Figura 1. Ubicación estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.
Fuente: Elaboración propia basada en información (Secretaría Distrial de Ambiente, Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá, 2021)

En relación con concentraciones de contaminantes criterio, Bogotá tiene una concentración promedio anual de 37.5 µg/m^3 de PM_{10} y 19.1 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ (Observarorio Ambiental de Bogotá, 2022), que han ido reduciendo desde hace varios años (Figura 2). Según el informe de calidad del aire para Colombia (IDEAM, 2021), en Bogotá se encuentran una de las estaciones de menor concentración de material particulado, que corresponde a la estación de Guaymaral; y la estación con mayor

[1] No tiene influencia de fuentes de emisión especifica
[2] Influencia de fuentes de emisión de contaminantes móviles vehiculares
[3] Influencia de fuentes de emisión del sector industrial.

concentración promedio anual de material particulado $PM_{2.5}$ en el país, correspondiente a la estación Carvajal – Sevillana. Esta última, tuvo un promedio anual de 34 µg/m^3, para el año 2021, valor que excede siete (7) veces las recomendaciones de la OMS.

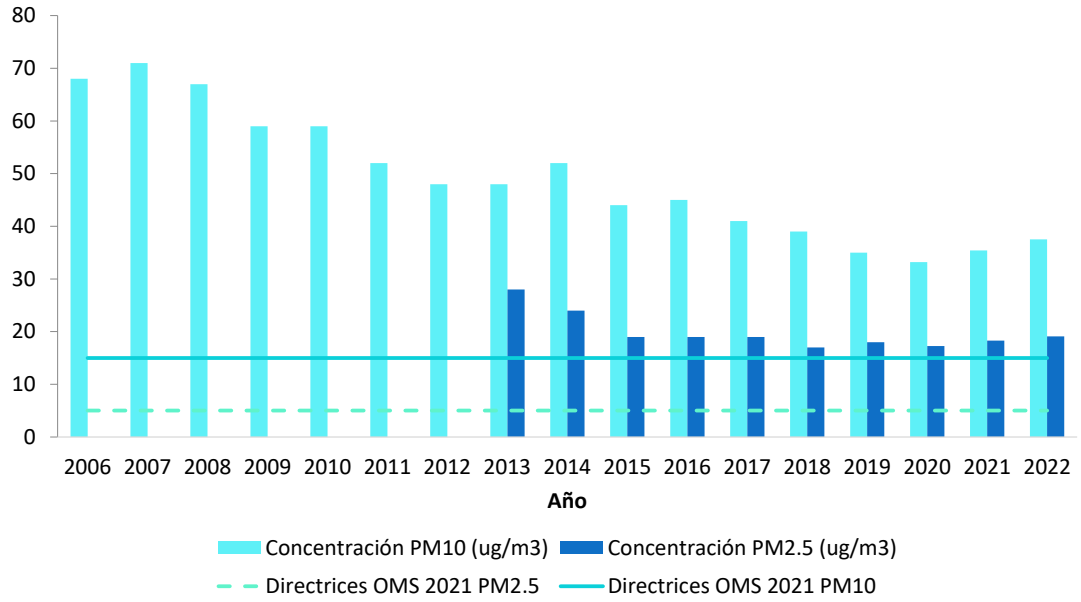


Figura 2. Promedio anual de concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en µg/m^3 en Bogotá de 2006 hasta 2022.
Elaboración propia. Fuente de información:(Secretaría Disirtral de Ambiente, 2016).

Según los mapas de interpolación de concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (Figura 3), existe una problemática de contaminación en la zona sur occidente de la ciudad y en especial en localidades como Kennedy, Fontibón, Bosa, Ciudad Bolívar y Tunjuelito; allí se pueden presentar concentraciones de hasta 90 µg/m^3 de PM_{10} y de 35 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

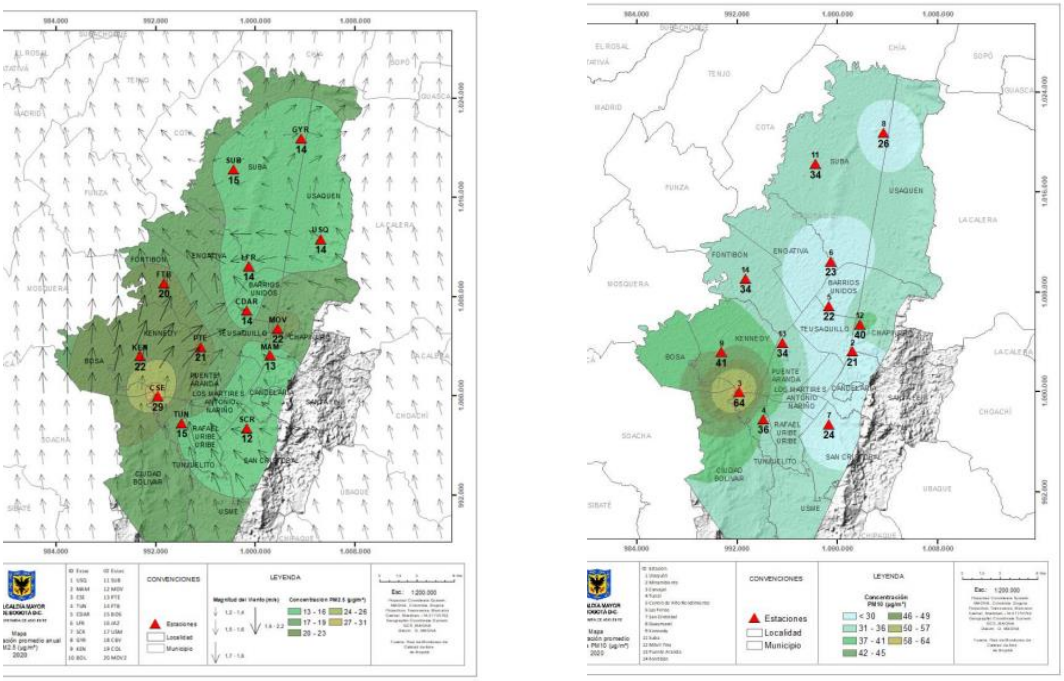


Figura 3. Distribución espacial de la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá en el año 2020.
Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2020, 2020)

En cuanto a los demás contaminantes criterio que pueden ser precursores de material particulado secundario (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017), el SO_2 presenta en el 2021 un promedio de concentración de 5.3 µg/m^3, muy similar a años anteriores. Las excedencias a la norma nacional de este contaminante de exposición diaria y de 8 horas únicamente se registra en la estación de Carvajal- Sevillana. Por su parte el NO_2 tiene un promedio de concentración anual en la ciudad de 27.9 µg/m^3, la estación con mayor concentración de este contaminante para el año 2021 fue Kennedy. En general el NO_2 no presenta excedencias de la norma nacional diaria ni horaria en ninguna estación, durante los últimos cuatro años.

Como indicador de calidad del aire en Bogotá se cuenta con el IBOCA, que fue adoptado mediante la Resolución 868 de 2021. Este indicador es un valor multipropósito adimensional, que oscila entre 0 y 500, que permite establecer el estado de la calidad del aire en categorías como buena, regular y mala. Su cálculo se realiza a partir de las

concentraciones de contaminantes atmosféricos criterio registradas en las estaciones de la RMCAB. Un IBOCA en constante estado en regular y mala calidad, puede justificar la declaración de alertas ambientales por contaminación del aire en la ciudad. Solo en el primer trimestre de 2019, se registraron cuatro alertas ambientales y el primer trimestre de 2020 dos, a pesar de la reducción de las emisiones dentro de la ciudad por las cuarentenas como medida ante el COVID-19.

En las siguientes secciones se profundizará en las causas de los niveles de contaminación en la ciudad que pueden atribuirse a las emisiones de fuentes contaminantes dentro y fuera de la ciudad, así como de factores meteorológicos que impiden una dispersión de los contaminantes en la atmosfera.

1.2 Generalidades de variables meteorológicas en Bogotá

Diferentes condiciones meteorológicas pueden tener gran influencia sobre la dispersión de los contaminantes en una zona o pueden generar condiciones favorables para el arrastre de contaminantes hasta largas distancias. Entre los parámetros de relevancia se encuentra la temperatura y precipitación. La lluvia ejerce una labor muy importante en la limpieza de la atmósfera, toda vez que al tener las gotas un diámetro mayor que el tamaño de las partículas contaminantes, puede producir arrastre de muchas partículas presentes en la atmósfera, generando un lavado atmosférico y contribuyendo con la descontaminación de la ciudad, mayormente cuando se presentan lluvias intensas (Secretaría Distrial de Ambiente, 2021).

Por ubicarse en la zona andina, la ciudad de Bogotá presenta dos períodos con lluvias abundantes durante el año (invierno) y dos períodos menos abundantes (verano). El primero periodo de lluvia se inicia en marzo y culmina en mayo; el segundo, empieza en octubre y continua en noviembre (Figura 4). Así mismo, existen meses de transición entre los diferentes períodos como son: marzo, junio, septiembre y diciembre, los cuales se presentan con días alternados de lluvias y tiempo seco (Secretaría Distrial de Ambiente, 2021).

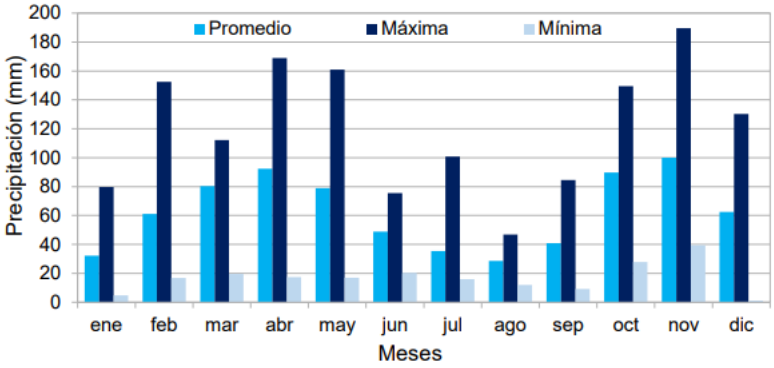


Figura 4. Distribución mensual de la precipitación
Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2020, 2020)

En el caso de Bogotá, el primer trimestre del año es el periodo más crítico con relación al aumento de las concentraciones de material particulado, debido al inicio de la temporada seca. Así mismo, a causa de la disminución de la precipitación, se incrementan los incendios forestales registrados en diferentes regiones, lo cual incide en el material particulado que puede ser transportado desde diferentes lugares del país hacia la ciudad.

En cuanto a la circulación predominante de vientos y dirección, de acuerdo con los registros de la RMCAB, el promedio anual de los vientos varía entre 1.3 m/s y 2.7 m/s. La zona o sector de la ciudad donde en promedio dominan los vientos más fuertes son Kennedy, Fontibón y Puente Aranda. Su comportamiento mensual como se presenta en Figura 5, consiste en un aumento de las velocidades entre junio, julio y agosto y una posterior disminución hasta alcanzar el valor mínimo en noviembre. Este comportamiento es común para todas las estaciones, con excepción de San Cristóbal, la cual presenta las mayores velocidades del viento durante septiembre y octubre.

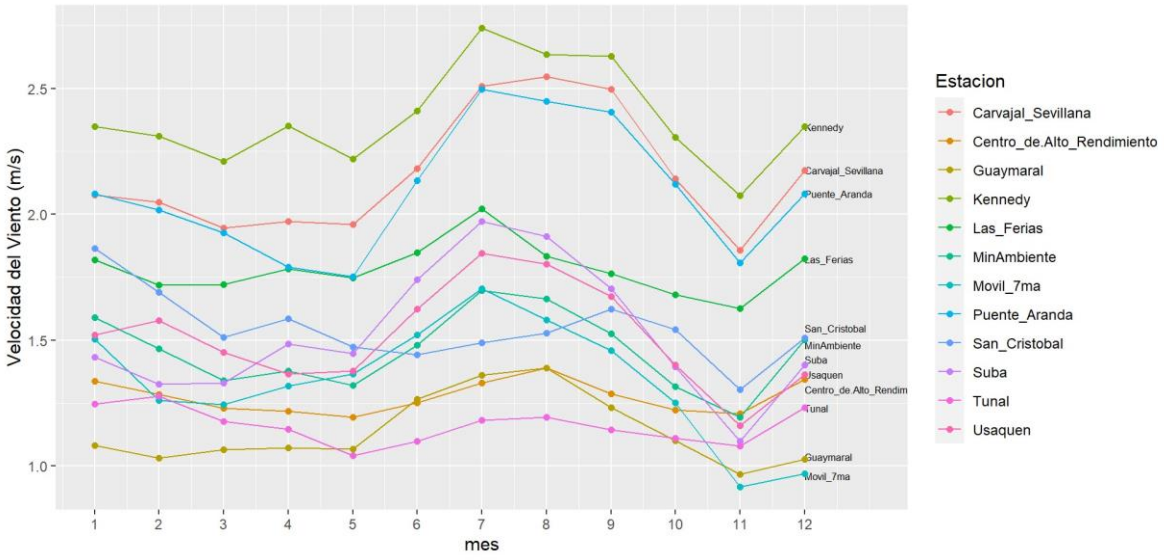


Figura 5. Comportamiento promedio mensual de la velocidad del viento por estación de la RMCAB entre los años 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2021 y 2022.
Fuente: Elaboración propia basada en información de (Secretaría Distrial de Ambiente, RMCAB, 2023)

En general la dirección del viento proviene del oriente y se dirige al occidente o sur occidente de la ciudad, como se presenta en la Figura 6. Solo en el mes de febrero y noviembre esta tendencia no se conserva.

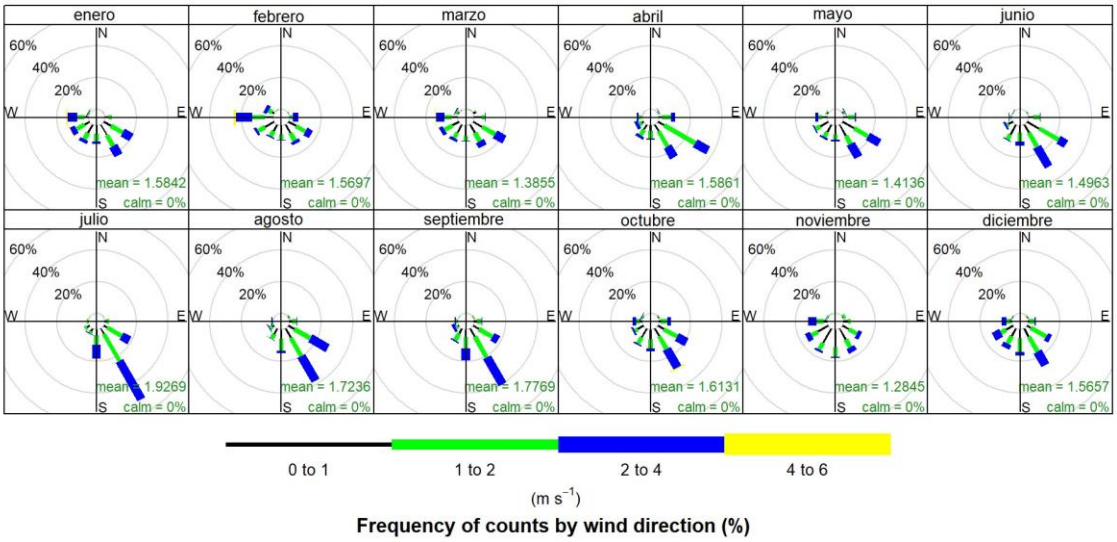


Figura 6. Rosa de vientos promedio mensual del año 2017
Fuente: Elaboración propia con información del (Secretaría Distrial de Ambiente, 2021)

El viento juega un papel muy importante en los procesos de dispersión de contaminantes, debido a que las partículas se encuentran en suspensión y dependiendo de las condiciones sinópticas y la circulación local de las masas de aire, éstas pueden ayudar en mayor o menor medida con los procesos de mezcla y transporte de los contaminantes. Sin embargo, también pueden contribuir de manera desfavorable cuando transportan contaminantes provenientes de fuentes externas, ya sea a nivel local o regional y los introducen a la ciudad cuando su trayectoria está así determinada.

Por su parte, la humedad relativa, al influir en los procesos de formación de partículas por procesos de condensación, también puede propiciar reacciones con gases SO_2 y NO_X, los cuales se condensan y pueden precipitar en forma de rocío, llovizna o lluvia acida. El comportamiento de esta variable en Bogotá es muy similar al comportamiento de la precipitación por su relación directa. En general, los meses de mayo y marzo presentan un incremento de la humedad, que se reduce hasta meses como agosto o septiembre, en donde se inicia su incrementa hasta el mes de noviembre donde se registran los mayores valores en el año (Figura 7).

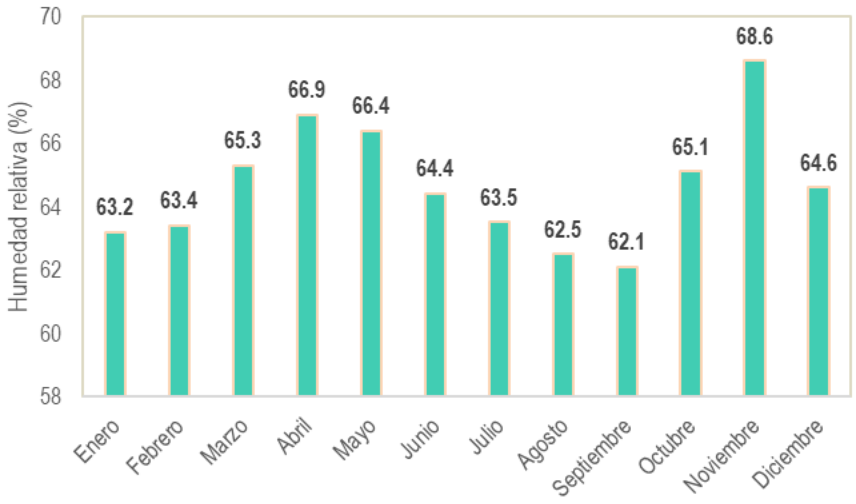


Figura 7. Promedio mensual multianual (2010-2020) de la humedad relativa
Fuente: Elaboración propia basada en información de (Secretaría Distrial de Ambiente, RMCAB, 2023)

1.3 Fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos en la ciudad

Una de las herramientas de identificación de fuentes de mayor aporte contaminante son los inventarios de emisiones, que registran la cantidad de emisiones aproximadas que generan las fuentes. El inventario de emisiones de Bogotá se encuentra actualizado año 2021, el cual presenta el aporte histórico desde el año 2018 del aporte de las fuentes contaminantes en la generación de las emisiones de $PM_{2.5}$ (Figura 8). En él se identifica como la principal fuente de emisión el material particulado resuspendido proveniente de las vías pavimentadas y no pavimentadas (aporta entre 68% y 74%) que se genera por el tránsito vehicular sobre estas vías. La segunda fuente con un aporte entre 18% y 22% son las fuentes móviles en carretera, principalmente vehículos de trasporte de carga.

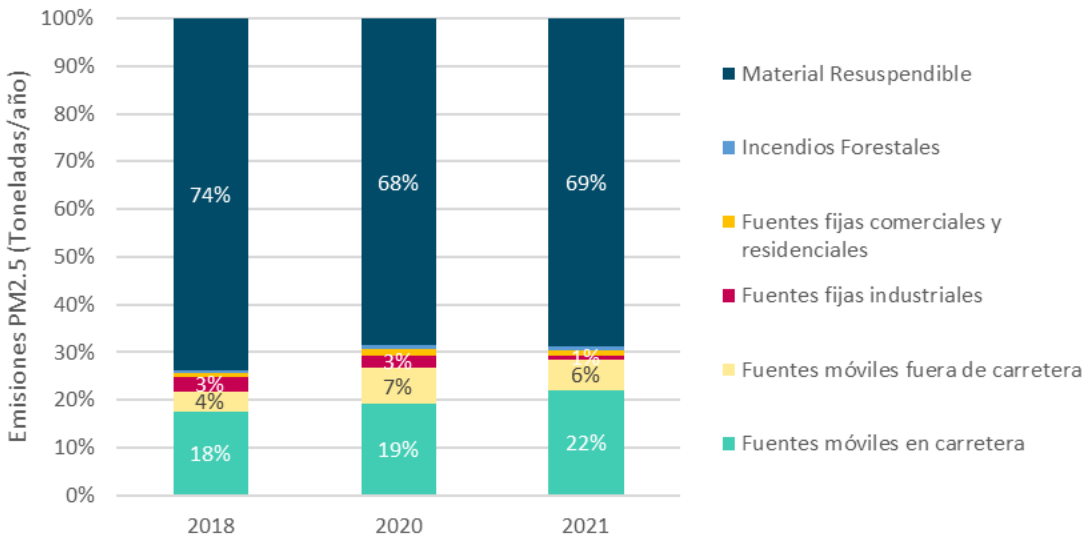


Figura 8. Contribución por sector en emisión de $PM_{2.5}$ para 2018, 2020 y 2021.
Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022)

En cuanto a los demás contaminantes criterio y el black carbon (BC), las fuentes móviles también son las mayores aportantes, con excepción de SO_2, principalmente emitido por las industrias, con una participación de emisión del 35%. Otras fuentes de emisión destacables son las estaciones de servicio y las fuentes biogénicas que aportan el 26% y 2%, respectivamente de los COV.

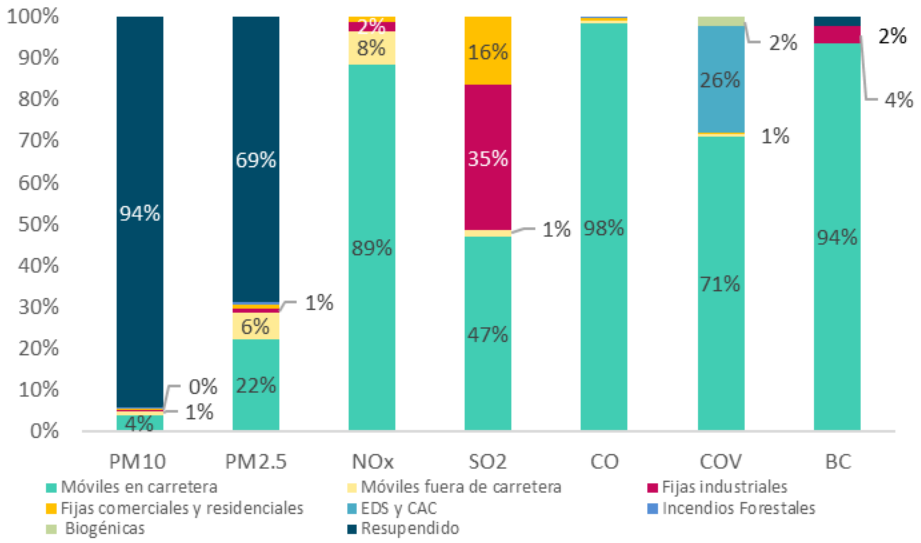


Figura 9. Contribución por sector en emisión de contaminantes criterio del año 2021.
Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022)

En cuanto a la distribución espacial de las emisiones de $PM_{2.5}$ en la ciudad, las localidades de la zona sur occidente como Ciudad Bolívar, Kennedy y Bosa, se encuentran entre las mayores aportantes de emisiones principalmente provenientes de vías sin pavimentar y emisiones del escape vehicular como se observa en la Figura 10.

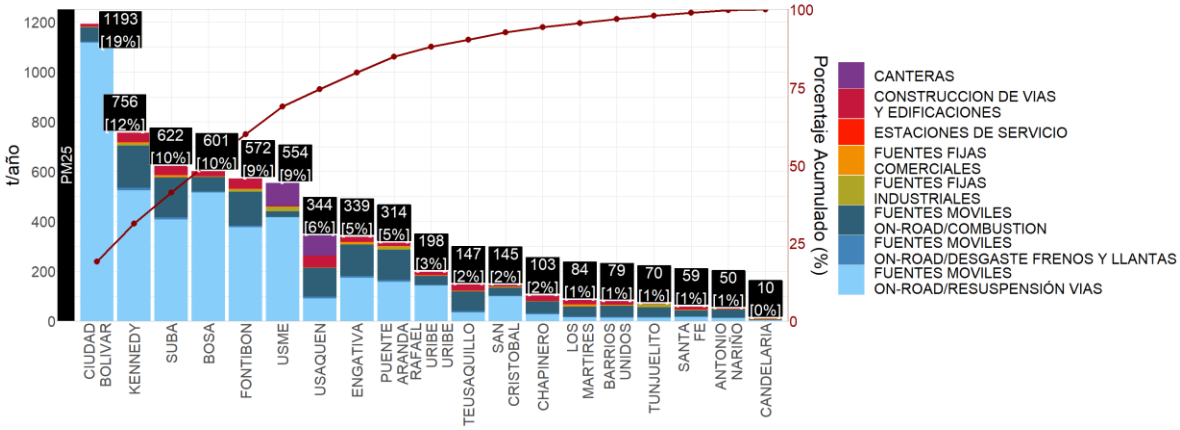


Figura 10. Participación por localidad de las emisiones de $PM_{2.5}$.
Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022)

Aunque los inventarios de emisiones permiten dar una visión general de cuales podrían ser los aportantes a las concentraciones de material particulado presente en el aire, esta herramienta no contempla la dinámica física y química en la atmósfera, por lo que no tienen

en cuenta la formación material particulado secundario. Por lo tanto, la identificación de la contribución de estas fuentes de emisión en la concentración en la atmósfera no es directa (Na et al., 2004).

En la literatura se puede encontrar gran variedad de estudios que tienen como objetivo realizar el análisis de contribución en material particulado presente en el aire de diferentes fuentes de emisión (Beddows et al., 2015; Villalobos et al., 2015) y específicamente para Bogotá y sus alrededores se encuentran estudios como (Ramírez et al., 2018; Rojas et al., 2020; Vargas et al., 2012). En estos estudios, la principal metodología utilizada comprende utilizar información de caracterización química y/o física del material particulado emitido por una fuente específica y el presente en el aire ambiente, que junto con un modelo de receptores permiten identificar la fracción de material particulado que proviene de cada fuente (Beddows et al., 2015).

Los Modelos de Receptores son técnicas estadísticas y matemáticas ampliamente utilizadas por la comunidad científica y los gestores de calidad del aire (Pindado Ma Pérez S García, 2013). Estos modelos comprenden técnicas de diversos tipos que se utilizan para determinar la identidad de las fuentes de emisión que contribuyen a las concentraciones de determinados contaminantes en lugares específicos. Estas técnicas incluyen métodos microscópicos, físicos y químicos (Hopke, 2003)

En la actualidad estos modelos se ejecutan bajo diferentes tipos de técnicas, tales como: *Chemical Mass Balance* (CMB), Unimix y *Positive Matrix Factorization* (PMF). Las primeras tres técnicas utilizan información de caracterización química y física, mientras que PMF puede sólo requerir de información de distribución de tamaño de partícula del PM como se realizó en el estudio (Rivas et al., 2020; Tan et al., 2014).

En China (Tan et al., 2016) utilizaron la distribución de tamaño de las partículas atmosféricas en tres locaciones próximas a Beijing para identificar las fuentes que emitían partículas finas y ultrafinas, es decir, aquellas que se encuentran en los modos de acumulación, Aitken y nucleación. Midieron la distribución de tamaño de partícula con un equipo ELPI+ en una autopista, en un campus universitario a 20 km del centro de la ciudad y un municipio rural a 60 km, permitiéndoles diferenciar el aporte de las emisiones vehiculares frescas y envejecidas, los aerosoles secundarios y las emisiones producto de la combustión de carbón. De este estudio se identificaron cuatro factores, dos de ellos

asociados a material particulado transportado desde largas distancias y los dos restantes se asociaron a procesos de combustión de carbón y emisiones de locomotoras cercanas.

Otras herramientas de análisis estadístico multivariado que, aunque no se consideran modelo de receptores, pueden ser útiles para hacer ejercicios preliminares de agrupación de variables según su varianza que dan una visión inicial de posibles fuentes contaminantes en una zona de estudio. Una de estas herramientas comúnmente usadas es el Análisis Componentes Principales o PCA que se puede aplicar con información de caracterización química (Jain et al., 2017) o tamaños de partículas como en el estudio (Chan & Mozurkewich, 2006), donde se utilizó un DMA-CPC para medir la distribución de tamaño de partícula, resultados que se combinaron con medición de concentración de contaminantes y variables meteorológicas, para usar PCA en la identificación preliminar de fuentes en los tres sitios de estudio. Se encontraron diferentes factores en común en las diferentes observaciones que incluyeron material particulado secundario, transporte regional variación de gases asociados a la capa límite.

1.4 Clasificación de partículas por tamaños

Las partículas en la atmósfera consisten en una mezcla de partículas sólidas, gotas y componentes líquidos contenidos dentro de las partículas sólidas. Las partículas son variables en relación con su concentración y sus características fisicoquímicas y morfológicas (Colbeck & Lazaridis, 2014b). Los aerosoles en la atmósfera son de naturaleza primaria o secundaria. Los aerosoles primarios son partículas atmosféricas que se emiten o inyectan directamente a la atmósfera, mientras que los aerosoles secundarios son partículas atmosféricas formadas por agregación o nucleación in situ de moléculas en fase gaseosa (conversión de gas a partículas).

El material no es un solo contaminante, y su masa incluye una mezcla de numerosos contaminantes distribuidos de manera diferente en diferentes tamaños. El tamaño de partícula es un parámetro esencial que esta relacionado con la composición química, las propiedades ópticas, la deposición de partículas y la inhalación en el tracto respiratorio humano (TR) (Colbeck & Lazaridis, 2014a, 2014b; Friedlander, 2000; William C. Hinds, 2022).

Sin embargo, dado que la mayoría de las partículas no son esféricas, se deben usar otros parámetros para caracterizar su tamaño. A menudo se utiliza el diámetro aerodinámico, que se define como el diámetro de una partícula esférica con la misma velocidad de sedimentación que la partícula en cuestión, pero con una densidad del material de 1 g/cm3 (William C. Hinds, 2022). Esto significa que las partículas de cualquier forma o densidad tendrán el mismo diámetro aerodinámico si su velocidad de sedimentación es la misma.

De acuerdo con este tamaño, el material particulado es clasificado en tres rangos: partículas ultrafinas (menores a 0.1 µm), finas (menores a 2.5 µm) y gruesas (menores a 10 µm), como se representa en la Figura 11. A su vez, se pueden subclasificar en categorías basadas en la distribución modal, como se describe a continuación:

- Modo de nucleación: Partículas con diámetro <0.017 µm (17 nm), que se forman por procesos de nucleación. El límite de tamaño inferior de esta categoría no está muy bien definido, pero se acerca a los 3 nm.
- Modo Aitken: Partículas con diámetro entre 0.017 µm y 100 nm. Se originan de la nucleación de vapor o del crecimiento de partículas preexistentes como resultado de la condensación. En este rango de partículas se encuentran las nanopartículas que para este estudio se consideraran aquellas partículas menores a 104 nm.
- Modo de acumulación: Partículas con diámetro entre 0.1 µm y 3 µm. El límite superior coincide con un mínimo relativo de la distribución del volumen total de partículas. Las partículas de este modo se forman por coagulación de partículas más pequeñas o por condensación de los constituyentes del vapor. Además, los mecanismos de eliminación de partículas de esta categoría son muy lentos y, como resultado, se produce una acumulación de partículas (Seinfeld & Pandis, 2006; Taiwo et al., 2014).

Los diversos modos de aerosol están asociados con diferentes fuentes y mecanismos de formación y con diferentes características químicas, como se muestra en la Figura 11 para las distribuciones de número de partículas. Por ejemplo, los aerosoles en el modo Aitken incluyen hollín, ácido sulfúrico y partículas biogénicas cristalinas; en el modo de acumulación, sulfato de amonio, orgánicos marinos y humo de biomasa; y en el modo grueso, polvo, sal marina y polen (Colbeck & Lazaridis, 2014a).

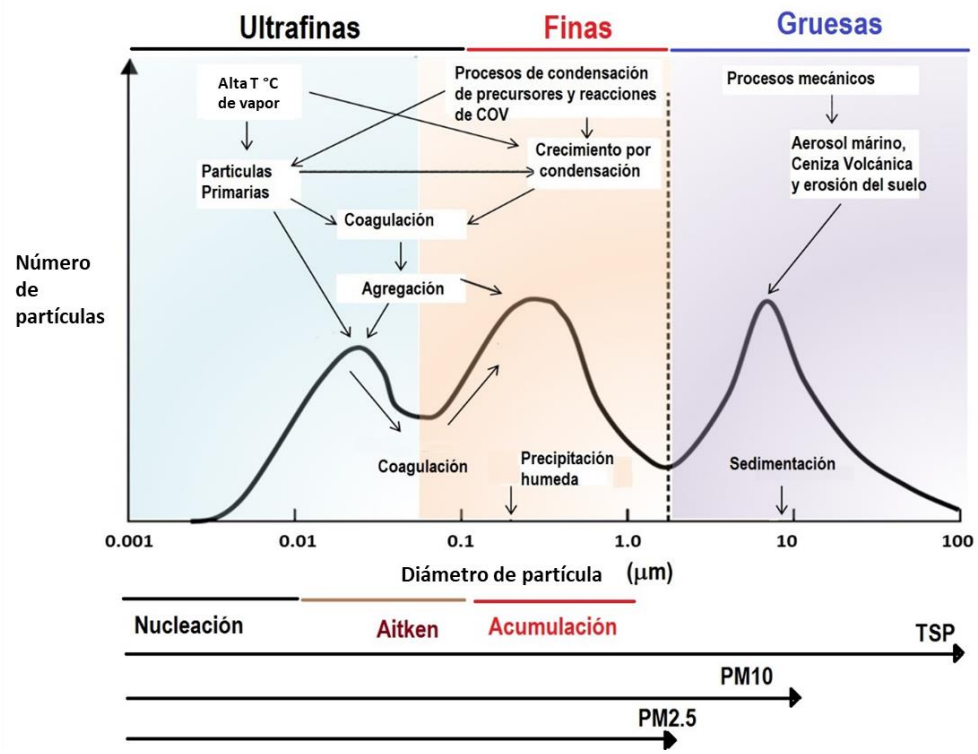


Figura 11. Representación de la distribución de tamaño de partícula de los aerosoles atmosféricos, modificada a partir de (Guarieiro & Guarieiro, 2015)

Con relación a las posibles fuentes de partículas de acuerdo con su tamaño, las partículas gruesas, con diámetros entre 2.5 y 10 µm o PM_{10} y $PM_{2.5}$) pueden proceder de fuentes biogénicas como las cenizas volcánicas, los aerosoles marinos y de procesos mecánicos de erosión del suelo natural y de fuentes antropogénicas como la abrasión mecánica de llantas, el desgaste de los frenos durante el rodamiento de los vehículos y el polvo resuspendido en las carreteras. Entretanto, las partículas finas, provienen típicamente de fuentes antropogénicas y son menos susceptibles a depositarse por acción de la gravedad, teniendo un mayor tiempo de residencia en la atmósfera, transportándose por días o semanas con las masas de aire (Slezakova et al., 2013b).

Las partículas en el rango de acumulación proceden directamente de fuentes antropogénicas o de formación en la atmósfera a través de procesos de coagulación de partículas ultrafinas y por condensación de gases o vapores sobre la superficie de las partículas preexistentes. La condensación de gases se realiza mayoritariamente sobre las

partículas más pequeñas, por lo que se ve favorecida cuando hay un gran número de partículas ultrafinas, mientras que la velocidad de coagulación se reduce cuando las partículas aumentan su tamaño. El modo acumulación es comparable con las longitudes de onda de luz visibles, pues representan gran parte del problema del deterioro de la visibilidad en las áreas urbanas debido a pueden ser transportadas miles de kilómetros y permanecer en la atmósfera por días (Seinfeld & Pandis, 2006).

Las partículas ultrafinas provienen de la condensación de vapores de baja presión de saturación liberados en procesos de combustión a alta temperatura, su velocidad de formación es afectada por las condiciones de humedad relativa, temperatura atmosférica y la presencia de otras partículas ultrafinas que absorben los vapores (Slezakova et al., 2013a).

Finalmente, la presencia de altas concentraciones de número de partículas del modo de nucleación indica que las fuentes de emisión están cerca, porque estas partículas tienen tiempos de vida cortos, debido a que crecen muy rápidamente al modo acumulación (Slezakova et al., 2013a). Estas partículas se pueden formar a través de los llamados eventos de nucleación y posterior crecimiento de las partículas por condensación. Estos eventos tienen lugar vía homogénea, que consiste en la oxidación de compuestos de la fase gaseosa, como los óxidos de azufre, amoníaco y compuestos orgánicos, formando productos con bajas presiones de vapor que posteriormente condensan formando nuevas partículas o por vía heterogénea, que consiste en la reacción entre compuestos en fase gaseosa y los que se encuentran en la superficie de partículas preexistentes, formando productos que condensan sobre la misma (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Kulmala et al., 2004). Evidenciar estos eventos solo fue posible con el desarrollo de instrumentos que midieran el número de partículas, el área superficial y el volumen en rangos de tamaño del orden de nanómetros (Colbeck & Lazaridis, 2014b).

1.5 Impacto en la salud del material particulado de acuerdo a su tamaño de partícula

Las propiedades físicas de las partículas se refieren a la masa, número, aérea superficial, distribución de tamaño y morfología, algunas de ellas se pueden medir en tiempo real, como la distribución de número de partículas por tamaño, mientras que la masa y la

morfología requiere que las muestras sean recolectadas y posteriormente llevadas a condiciones de laboratorio para ser analizadas con la instrumentación adecuada.

Como se mencionó anteriormente, el PM se encuentra presente en rangos de tamaño desde unos pocos nanómetros hasta alrededor de cientos de micrómetros (Jones & Harrison, 2004). Por lo que la deposición dentro del sistema respiratorio varía de acuerdo con el tamaño de la partícula como se explica a continuación (Figura 12).

Las partículas más gruesas se depositan en la zona traqueobronquial, donde son filtradas por las mucosidades nasales y expulsadas a partir de estornudos y tos. Las partículas finas que se encuentran entre el rango de 2.5. a 0.1 µm se depositan en las vías respiratorias, pero muchas de estas pueden penetrar al sistema alveolar. Las partículas ultrafinas que tienen un diámetro menor a 0.1 µm llegan hasta el fondo de sistema respiratorio e inclusive pueden ser transportadas a través del torrente sanguíneo o sistema linfático hasta a los órganos vitales (Colbeck & Lazaridis, 2014b; Slezakova et al., 2013a). Por esta razón se le atribuyen al PM enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OMS, 2021).

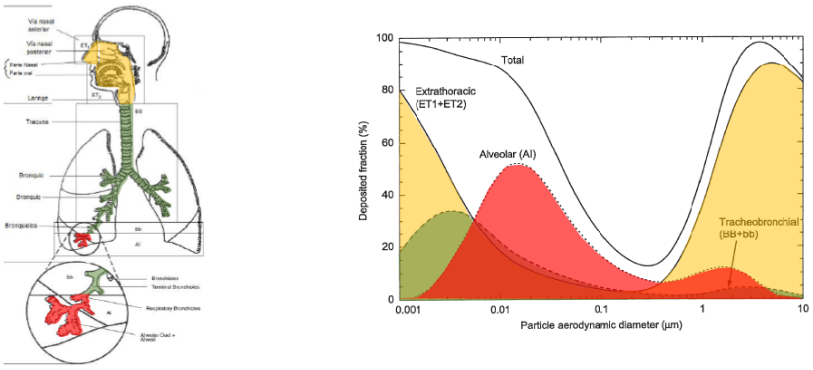


Figura 12. Fracción de deposición del PM en el sistema respiratorio según diámetro de partícula.
Fuente: (Colbeck & Lazaridis, 2014b) adaptado por (Rueda, 2017)

Las complejas características del PM pueden deberse a que su formación se atribuye a diferentes clases de fuentes de emisión, entre las que se encuentran las fuentes vehiculares, fuentes industriales, incendios forestales, material resuspendido de vías o construcciones, entre otras (Chan & Mozurkewich, 2007; Jancsek-Turóczi et al., 2013; Ram et al., 2014).

En general, la penetrabilidad pulmonar de las partículas incrementa proporcionalmente con el número de partículas e inversamente con el tamaño de estas, especialmente con las que tienen diámetros inferiores a 0,1 µm (Zhou, Kim, Hopke, Stanier, & Pandis, 2004). Por lo tanto, el objetivo para reducir los riesgos en la salud pública por material particulado no solo apunta a disminuir la concentración másica, sino también la concentración de partículas del modo Acumulación y Aitken, siendo necesario evaluar si las estrategias de control de emisiones, principalmente vehiculares, tienen resultados asertivos en términos de salud pública.

1.5. Instrumentos para medición de número de partículas

El diámetro de una partícula ambiental se puede determinar por varios medios, incluidas las mediciones de dispersión de luz, la caracterización de la resistencia aerodinámica de la partícula y la medición de su movilidad eléctrica o velocidad de sedimentación, por lo que se dispone de una amplia variedad de técnicas e instrumentos para medir y caracterizar los aerosoles. Cada uno tiene ventajas y desventajas en términos de rango de tamaño, rango de concentración, resolución de medición, velocidad de respuesta, etc. (Colbeck & Lazaridis, 2014b)

Para la medición de características como la distribución de tamaño y la concentración en número de partículas, existen diferentes equipos especializados de alta resolución. Entre estos se encuentra el SMPS (por las siglas en inglés de *Scanning Mobility Particle Sizer*) y el DMPS (*Differential Mobility Particle Sizer)*. De estos se pueden encontrar diferentes experiencias internacionales en donde se reportan mediciones en diferentes temporalidades en zonas tanto urbanas como rurales. Es así que estos equipos se toman como referencia en las mediciones de distribución de tamaño y número de partículas.

A su vez, existen otros equipos menos robustos, pero permiten hacer mediciones indicativas del conteo de partículas. Este es el caso del equipo ELPI+ de la marca DEKATI, que consiste en un impactador en cascada de 14 etapas, cada una midiendo un intervalo de diámetros aerodinámicos entre 0.016 µm y 10 µm, el cual también cuenta con la posibilidad de recolección de muestras que pueden ser posteriormente caracterizadas. Las partículas son inicialmente cargadas hasta su equilibrio en un cargador corona. Posteriormente, pasan por las múltiples etapas del impactador, el cual las clasifica y

recolecta por su tamaño de impactación. Al impactar contra el plato de impactación correspondiente, cada partícula libera su carga. El conjunto de partículas que impactan genera una corriente que es medida por un electrómetro de la etapa correspondiente. La corriente medida en cada etapa es transformada para estimar el número de partículas que impactó y su concentración en aire ambiente. La unión de todas las etapas forma la distribución de la concentración en número de partículas. Posteriormente, esta concentración puede ser transformada a la distribución en área superficial, en volumen y en masa del aerosol, con alta resolución temporal. Este equipo puede ser usado tanto en mediciones atmosféricas como mediciones directas en las fuentes emisoras (Dekati Ltd., 2011).

2. Metodología

2.1 Ubicación de puntos de monitoreo

La ubicación de los puntos para las campañas de medición, requerían de instalaciones adecuadas para instalar el equipo ELPI+ que proporcione seguridad, acceso a conexión a energía eléctrica y protección de lluvia y viento. En este sentido se contactó a la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), la cual es la administradora de la RMCAB para solicitar permiso de instalación en las estaciones de monitoreo que tuvieran accesibilidad y disponibilidad de instalaciones de otros equipos. Es así, como se seleccionaron las estaciones de San Cristóbal y Las Ferias ubicadas según el mapa de la Figura 13b de las cuales se describen algunos parámetros en la Tabla 1. La primera, ubicada al sur oriente de la ciudad, en la localidad de San Cristóbal (Figura 15), rodeada por un área residencial, que usualmente presenta bajas concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ comparado con otras áreas de la ciudad (Secretaría Distrial de Ambiente, 2021). La estación de San Cristóbal está categorizada como una estación de Fondo Urbano. La segunda estación, está ubicada en el centro geográfico de la ciudad, en el barrio de Las Ferias (Figura 14), rodeada por un área comercial y varias autopistas donde circulan buses del sistema de transporte masivo de la ciudad (Transmilenio), vehículos particulares y vehículos de carga. La estación de Las Ferias está categorizada como una estación con influencia de tráfico vehicular, principalmente. En el interior de estas estaciones se encuentran instrumentos de monitoreo meteorológico, gases criterio, PM_{10} y $PM_{2.5}$, como se muestra en la Tabla 1, particularmente las concentraciones másicas de material particulado son monitoreadas con instrumentos BAM (*Beta Attenuation Monitor*) con una frecuencia de registro de concentraciones de 10 minutos.

Tabla 1. Características de las estaciones San Cristóbal y Las Ferias de la RMCAB.

Estación	San Cristóbal	Las Ferias
Localidad	San Cristóbal	Engativá
Tipo de Zona	Urbana	Urbana
Tipo de Estación	De fondo	De trafico
Contaminantes monitoreados	PM_{10}, $PM_{2.5}$, O_3	PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_x, CO

Fuente Información: Secretaría Distrital de Ambiente, 2017

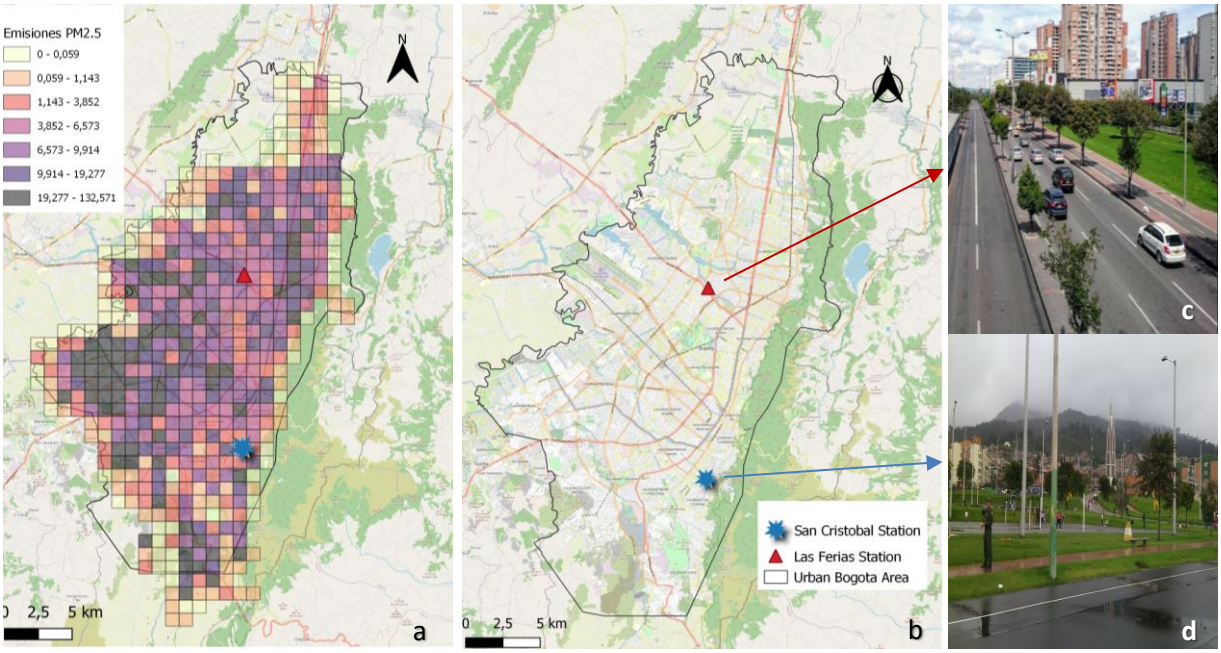


Figura 13. a) Distribución espacial de emisiones de $PM_{2.5}$ en Bogotá año 2018, b) ubicación de las estaciones, c) fotográfica de alrededores de la estación de Las Ferias, d) fotográfica de alrededores de la estación de San Cristóbal.

Figura 14. a) Mapas de la estación de Las Ferias y b) fotografía de su ubicación
Fuente b): (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017)

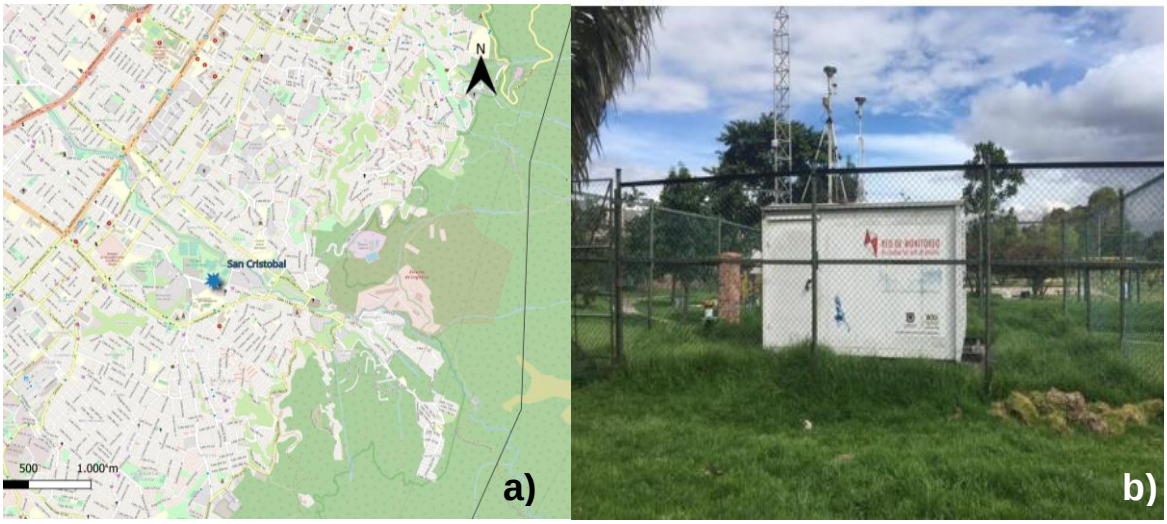


Figura 15. a) Mapas de la estación de San Cristóbal y b) fotografía de su ubicación
Fuente b): (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017)

2.2 Campañas de medición

Se realizaron en este estudio tres campañas de medición una de ellas en la estación de Las Ferias y las otras dos en la estación de San Cristóbal, en las fechas reportas en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de campañas de medición

Número de campaña	Estación	Nombre de la campaña	Fecha
1	Las Ferias	Las Ferias	23 de junio – 6 julio de 2017
2	San Cristóbal	San Cristóbal 1	30 agosto– 11 septiembre de 2017
3	San Cristóbal	San Cristóbal 2	27 septiembre – 11 octubre de 2017

Para estas campañas de medición se solicitó permiso a la SDA para la instalación del equipo completo dentro de las estaciones. Para este fin, se realizaron algunas adecuaciones a la instalación que permitieron el funcionamiento optimo del equipo. Una de ellas consistió en improvisar pieza en forma de U al inicio de la manguera donde el equipo muestrea el aire fuera de la cabina de la estación, evitando que en caso de lluvia ingrese humedad al equipo (Figura 16a). Quedando finamente la boca de muestreo de ELPI+ a una altura de 4.6 m sobre el nivel del suelo (Figura 16b).

a)

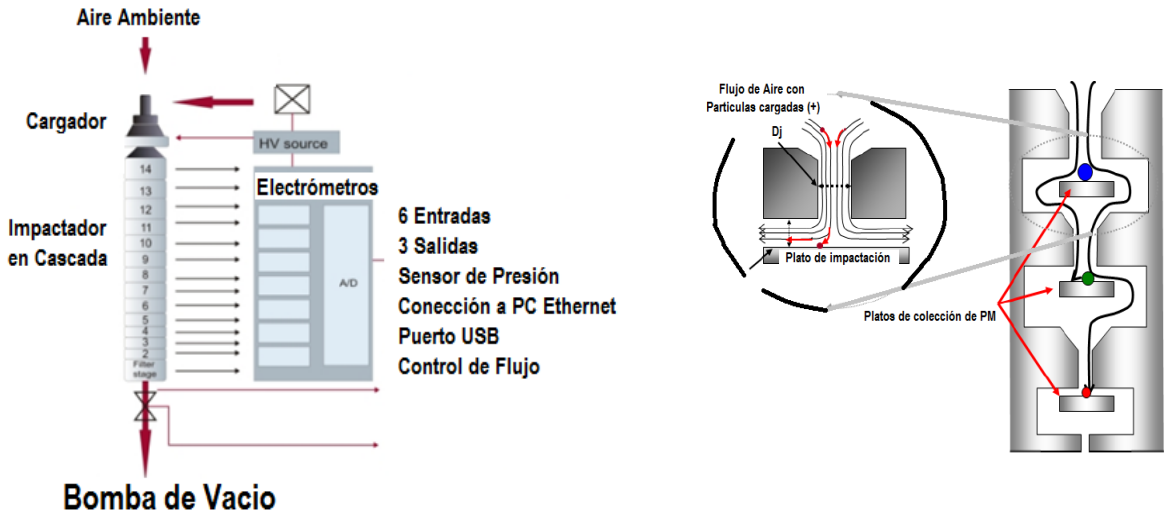
b)

Figura 16. a) Pieza plástica en forma de U instalada en la salida del equipo ELPI+; b) vista final de instalación de la boquilla de muestreo para el ELPI+ ubicado en la parte superior de la estación de Las Ferias

2.3 Instrumentos utilizados

2.3.1 Medición de CNP y PNSD

La concertación de número de partículas y la distribución de tamaño de partícula, se midieron con el impactador eléctrico de baja presión (o por sus siglas en ingles ELPI+), que consiste en un cargador de corona unipolar, un impactador en cascada con 14 etapas de clasificación de tamaño con una etapa de filtro adicional y un conjunto de electrómetros para detectar la corriente de cada partícula cuando impacta sobre cada etapa. Adicionalmente, el equipo viene acompañado de una bomba para aspirar el aire muestreado, permitiendo su transporte a través del instrumento. Un esquema del equipo y del funcionamiento de impactador cascada se presenta en la Figura 17.



a) **b)**

Figura 17 . a) Esquema general de las partes del equipo ELPI+. b) Esquema de funcionamiento del impactador de cascada para separación y conteo de partículas. Fuente: (Dekati Ltd., 2011)

La cámara de difusión unipolar tiene un cargador de corona (una aguja) que produce un alto voltaje positivo (3.5 kV), descarga constante de 1 μA hacia las partículas de aerosol que fluyen a través de ella. El flujo de iones liberado produce partículas con una carga positiva conocida que es estable en diferentes condiciones de operación y es lo suficientemente alta como para asegurar la detección por electrómetros. Luego, las partículas fluyen a través de una trampa de voltaje, formada por dos conos concéntricos con una diferencia de potencial de 20 V ± 2 V, que produce un campo estático de corriente

continua (CC), eliminando las partículas cargadas que tienen un tamaño más pequeño que el rango de medición del instrumento antes de que ingresen al impactador (Marjama et al., 2000). La carga unipolar del ELPI+ está relacionada con el área superficial activa de las partículas más pequeñas, por lo que la señal principal de los electrómetros corresponde a la distribución del tamaño del área superficial de la partícula (Pagels et al., 2007).

El impactador en cascada de ELPI+ se utiliza para clasificar y recoger las partículas según el diámetro aerodinámico en el rango de 6 nm - 10 µm. Así, la etapa 14 tiene un diámetro de corte de 10 µm y las etapas posteriores tienen diámetros de corte más pequeños, hasta la etapa 2, con un diámetro de corte de 17 nm.

La etapa 1 o etapa de filtrado consta de múltiples capas de malla fina que atrapa partículas menores de 17 nm, con un diámetro de corte de 6 nm.

Tabla 3. Diámetro promedio de partícula asociado a las etapas del equipo ELPI+

Etapa de impactador	$D_{promedio}$ (µm)	Clasificación de partículas
14	5.3	Gruesas
13	3.6	
12	2.5	Finas
11	1.6	
10	0.94	
9	0.60	
8	0.38	
7	0.25	
6	0.15	
5	0.094	
4	0.054	Ultrafinas
3	0.030	
2	0.016	
1	0.006	

Como parte del estudio realizado por (Mateus, 2023) se desarrolló la intercomparación instrumental entre el instrumento ELPI+ utilizado en este estudio y un SMPS utilizado como referencia para comprobar la concentración del número de partículas submicrométricas y su distribución de tamaño. En este ejercicio de intercomparación, se identificó que la etapa de filtrado del ELPI+ (etapa 1) presentaba sobreestimación de las concentraciones del

número de partículas y un máximo artificial en el extremo inferior de la distribución de tamaño, por lo que para fines del presente estudio se descartaron las mediciones de esta etapa.

Durante las campañas, las mediciones registradas en cada etapa de ELPI+ se fueron guardando cada segundo, obteniendo cerca de 17634 datos guardados en Las Ferias y 37553 datos guardados en San Cristóbal. Estos datos se promediaron por hora, con el fin de facilitar los análisis y hacer comparables estas mediciones con las reportadas por la RMCAB en relaciones a las condiciones meteorológicas y contaminantes en fase gaseosa y particulada.

2.3.2 Medición de concentración másica de contaminantes criterio

Los valores de las variables meteorológicas y concentraciones de contaminantes criterio fueron obtenidas de los reportes de la RMCAB descargados de su portal virtual (SDA, s.f.) para cada estación.

Las mediciones de concentraciones de contaminantes criterio se realizan en las estaciones de la RMCAB con equipos que se basan de métodos de referencia de la EPA. La descripción de los equipos y su funcionamiento se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4.Descripción de equipos de medición utilizados por la RMCAB

Contaminante	Equipo	Descripción
PM_{10}, $PM_{2.5}$	Met One Bam 1020	Es un equipo de medición continua de partículas, que utiliza como principio la atenuación beta. Consiste en una bomba de vacío que extrae un flujo controlado de aire exterior que posteriormente pasa a través de una cinta de filtro en el cual se deposita el polvo presente en el aire. Esta cinta se coloca entre la fuente de rayos beta y el detector, generando una atención de los rayos debido a las manchas de polvo en comparación con la cinta limpia. Esta medida se utiliza para estimar la masa de partículas, que en conjunto con la medida del flujo muestreado se reporta en términos de concentración volumétrica de material particulado presente en el aire ambiente (ACOEM, s.f.).

CO	Thermo Scientific 48i	Este equipo se basa en el principio de absorción de rayos infrarrojo de longitud de onda de 4.6 migras del CO, el cual consiste en un dispositivo electrónico que transforma la lectura no linear de absorción a una linear en términos de concentración volumétrica de CO (ThermoFisher Scientific, 2023).
SO2	Thermo Scientific 43i	Utiliza como principio de medición la fluorescencia que producen las moléculas de SO2 ala absorber luz UV del rango de 190 a 230 nm. Es así, que el equipo funciona con una lampara que emite luz UV que se filtra a 214 nm, excitando las moléculas de SO2 que generan fluorescencia que es medida por un tubo fotomultiplicador (IDEAM, s.f.).
Ozono	Ecotech 9811	Este equipo utiliza como principio de medición la fotometría de absorción de UV, que consiste en medir la cantidad de luz absorbida por el ozono, en una longitud de onda de 254 nm.

2.4 Análisis de datos

Diferentes herramientas y métodos modelos fueron utilizados para facilitar el análisis de las mediciones recolectadas en las campañas. Estos permitieron visualizar el comportamiento temporal de la información, identificar correlación entre variables y finalmente identificar posibles casusas del comportamiento de las mediciones. Un resumen de las herramientas utilizadas se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de herramienta y métodos utilizados para el análisis de resultados

Herramienta o método	Propósito	Datos
RStudio- OpenAir (Función "Timevariation")	Visualización de variabilidad temporal	- Mediciones meteorológicas - Concentraciones de PM2.5 - Concentraciones de número de partículas
RStudio- OpenAir (Función "PolarPlot")	Identificar la proveniencia de las concentraciones de número de partículas promedio día y desagregado por día	Concentraciones de número de partículas
RStudio- Ggplot	Visualización de la distribución de tamaño de partículas	Concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+
Análisis ANOVA	Comparación de la varianza de mediciones de variables para corroborar si son afectadas por la temporalidad	-Mediciones meteorológicas - Concentraciones de PM2.5

Prueba Shapiro Wilk	Comprobar de la normalidad de los datos para determinar la prueba de correlación aplicable	-Mediciones meteorológicas - Concentración de número de partículas.
Prueba de correlación de Kendall	Identificar correlaciones entre variables meteorológicas y concentraciones de número de partículas.	-Mediciones meteorológicas - Concentraciones de número de partículas
Análisis PCA	Identificar factores con varianza similar que se puedan relacionar al comportamiento de la concentración de número de partículas	-Mediciones meteorológicas - Concentraciones de PM2.5 - Concentraciones de número de partículas

En esta sección se describirán dichas herramientas y se explicará como cada una de ellas se usó en los diferentes análisis que se presentarán en la sección de resultados.

2.4.1 OpenAir

OpenAir es un paquete de funciones para RStudio, con el que se realizaron gráficas de la variación temporal y espacial de las concentraciones de $PM_{2.5}$, variables meteorológicas y concentraciones de número de partículas medidas en las diferentes campañas. En general se utilizaron dos funciones de este paquete. La primera de ellas es *timevariation,* con la cual se graficaron los perfiles mensuales, semanales y diarios de las mediciones de las variables presentadas en la Tabla 5. La segunda función corresponde a *polarPlot*, la cual genera gráficas polares que presentan la variación de las concentraciones de número de partículas con respecto a la velocidad y dirección del viento. Estas gráficas permitieron de identificar de forma cualitativa la proveniencia de contaminantes y por lo tanto de posibles fuentes de emisión. Estos análisis se elaboraron para promedios diarios y horarios en cada campaña de medición como se presentan en la sección 3.5.

2.4.2 Prueba de normalidad de los datos

Como parte de la verificación de requisitos para la sección de la prueba de correlación adecuada para ser aplicada a las mediciones, inicialmente consiste en determinar la normalidad del conjunto de datos recolectados de variables meteorológicas (velocidad del viento y humedad) y la concentración de número de partículas por cada una de las etapas de medición del equipo ELPI+.

Esta verificación se realizó aplicando la prueba de Shapiro-Wilk en RStudio con la función *shapiro.test* del paquete *stats*. Esta prueba tiene como hipótesis nula que las variables siguien una distribución normal. Por lo tanto, p-value mayores a 0.05 confirman esta hipótesis, y valores menores indican que la variable no cumple con el requisito de normalidad.

Se aplicó esta prueba para cada variable que sería evaluada en las pruebas de correlación, obteniendo que ninguna se comportaba como una distribución normal. Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 6, entendiéndose como CNP las siglas de concentración de número de partículas.

Tabla 6. Resultados de prueba Shapiro-Wilk por variable

Variable	p-value
Humedad relativa	2.35×10^{-6}
Velocidad del viento	5.22×10^{-10}
CNP de la etapa 2	1.35×10^{-6}
CNP de la etapa 3	3.66×10^{-10}
CNP de la etapa 4	1.52×10^{-12}
CNP de la etapa 5	9.37×10^{-16}
CNP de la etapa 6	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 7	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 8	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 9	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 10	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 11	2.98×10^{-8}
CNP de la etapa 12	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 13	$<2.20 \times 10^{-16}$
CNP de la etapa 14	$<2.20 \times 10^{-16}$

2.4.3 Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza también llamado ANOVA, es una prueba estadística que permite comparar la media de dos o más grupos. Este análisis realiza una comparación de las varianzas de las medias de los grupos de los cuales se componen la muestra. La hipótesis nula de este test es que las distintas observaciones provienen de la misma población por

lo que las medias y sus varianzas son similares. El estadístico estudiado en la ANOVA sigue la distribución F de Fisher-Snedecor (Diez et al., 2015).

Este análisis se utilizó para entender la influencia de la temporalidad en las mediciones de número de partículas, y corroborar si era apropiado comparar directamente las mediciones realizadas de concentración de número de partículas en la estación de Ferias y San Cristóbal, considerando las campañas de medición no se hicieron de forma simultánea. Es decir, que la diferencia entre las mediciones de número de partículas entre las dos locaciones no se veía afectada por las épocas del año en que se realizaron. Considerando que los equipos de medición de concentración de contaminantes (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y de variables meteorológicas de las estaciones de monitoreo (velocidad del viento, humedad y temperatura) funcionan continuamente durante todo el año, se hicieron pruebas ANOVA para estas variables comparando sus valores para cada rango de fechas en el que se realizaron las tres campañas.

Aunque en algunas referencias se menciona la necesidad de normalidad de los datos para aplicar la prueba ANOVA, otras fuentes afirman que la prueba con muestras iguales funciona bastante bien incluso cuando se viola el supuesto de normalidad, a menos que una o más de las distribuciones sean altamente asimétricas o las varianzas sean muy diferentes (Minitab Statistical Software, 2023).

La prueba ANOVA fue aplicada a través de RStudio con la función *aov* del paquete *stats*. Un ejemplo de cómo se visualizan los resultados en una prueba de comparación de mediciones de humedad relativa en dos fechas distintas se presenta en la Figura 18. De estos valores es importante el valor del estadístico F y del p-value. Este relacionado al valor de significancia que se desea manejar, en el caso de este estudio si se obtienen valores mayores a 0.05 se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, se concluye que no hay evidencia de que las medias de las muestras sean significativamente diferentes. En el caso del ejemplo de la figura se obtiene un p-value menor a 0.05, por lo que se afirma que hay diferencias significativas entre las dos mediciones de humedad relativa, por lo que se concluye que esta variable sí es afectada considerablemente por la época del año en que se mide.

```
Response: HR
           Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Estacion    1  57777   57777  425.18 < 2.2e-16 ***
Residuals 970 131811     136
```

Figura 18. Ejemplo de resultados de la prueba ANOVA para comparar dos fechas de medición de humedad relativa

2.4.4 Pruebas de correlación

Como parte de los ejercicios de análisis para dar explicación a varios de los resultados obtenidos de CNP, se precisó identificar el grado en que estas mediciones puede depender de algunas variables meteorológicas. Es así, que se realizaron pruebas estadísticas para determinar la correlación entre la CNP por diámetro medido con la velocidad del viento y la humedad relativa. Sin embargo, se debe tener claro que las correlaciones no necesariamente son prueba de causalidad entre las variables, sino es más bien una semejanza de comportamiento en el tiempo. Por lo tanto, si se encuentran valores de correlaciones altas entre algunas variables se debe analizar detalladamente de donde puede radicar esta dependencia.

Existen varios tipos de pruebas estadísticas para terminación el nivel correlación. Las más conocidas son las pruebas de Pearson, Spearman y Kendall. La primera de ellas requiere que los datos se comporten como una distribución normal, por lo que se descarta para ser usada con las mediciones de este estudio considerando los resultados de normalidad reportados en la sección 2.4.2. De esta forma, se realizaron las pruebas de correlación con Spearman y Kendall, mostrando resultados similares con cada variable. Estos análisis se hicieron con la función *cor.test* del paquete *stats* de Rstudio. De las dos opciones, se presentan en la sección 3.5 los resultados para la prueba de Kendall ya que es una buena alternativa cuando las variables no cumplen con los requisitos básicos para el uso de una prueba paramétrica como es la normalidad de los datos. Sin embargo, los resultados para la prueba de Spearman se presentan en el ANEXO A.

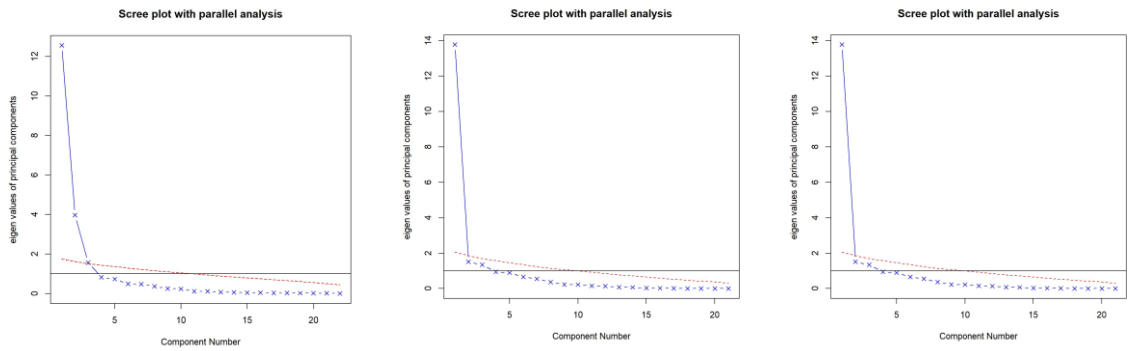
2.4.5 Análisis de Componentes Principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) es utilizado para extraer información relevante de un conjunto multivariable de datos y expresarla en un

conjunto más pequeño de nuevos valores llamados componentes principales. Estos componentes principales corresponden a grupos de las variables que pueden tener una alta correlación. Así que, aunque no se considere propiamente un modelo de receptores, pueden identificar posibles fuentes emisión como lo presentan ejercicios realizados por(Chan & Mozurkewich, 2007; Harrison & Jones, 1995; Miller et al., 2002).

En el presente estudio se realizó un PCA con las variables meteorológicas, concentraciones másicas de contaminantes criterio que se median en cada estación de monitoreo, y las mediciones de CNP por etapa medidas con el ELPI+. Para este propósito, inicialmente se preparó la información requerida para las corridas, que incluyó la unificación de las bases de datos medidas y la eliminación de filas con valores faltantes (NA). Así mismo, como parte del preprocesamiento de la información, se realizó la estandarización de las variables, con el propósito de hacerlas comparables y que sus unidades o valores atípicos no afecten el ejercicio (Kassambara, 2017). La metodología de estandarización implementada fue una transformación logarítmica como es sugerido por (Veneables & Brian, 2002), en donde para cada variable se calculó su correspondiente logaritmo.

Como paso preliminar para correr el modelo PCA, se seleccionaron el número de componentes a ser extraídos. Este paso es sugerido y evita obtener información de componentes principales innecesarios que en conjunto representan menos del 20% de la varianza del conjunto de datos. El método utilizado para el cálculo de la cantidad de componentes fue el de valores propios asociados, que se genera con la función de RStudio *fa.parallel* del paquete *psych*. Como resultado se obtuvieron las gráficas presentadas en la Figura 19, en donde la cantidad de componentes sugeridos son aquellos valores propios mayores a 1 (línea negra horizontal). En las tres campañas se identificaron 3 componentes principales que representan cerca del 80% de la varianza.



a) b) c)

Figura 19. Resultados de análisis de valores propios para la campaña de a) Las Ferias, b) San Cristóbal 1 y c) San Cristóbal 2

Finalmente, se realizó el PCA con ayuda de la función *principal* del paquete *psych* de RStudio. Aquí se seleccionó como método de rotación *varimax*, siendo esta una rotación tipo ortogonal comúnmente usada en esta clase de ejercicios, que permite volver los valores de la matriz de carga de los componentes principales más entendible. En este sentido, se realizaron corridas independientes para cada campaña de medición obteniendo la matriz de cargas por componente y variables como se reporta en el ANEXO B.

3. Resultados

3.1 Condiciones meteorológicas en las campañas de medición

Debido a que las mediciones de las CNP y la distribución de tamaño realizadas con el equipo ELPI+, no se realizaron simultáneamente en las estaciones Las Ferias y San Cristóbal, se compararon las condiciones meteorológicas en periodos de tiempo de cada campaña de medición para determinar si existen diferencias significativas, que puedan afectar el comportamiento de la concentración y la formación de partículas.

En el caso de la precipitación se tiene una importante influencia de El Niño Oscilación del Sur, que establece un patrón climático con más precipitaciones entre abril a mayo y octubre a noviembre y menores precipitaciones de enero a febrero y de junio a septiembre (Figura 20). Durante las mediciones en la estación de Las Ferias no se reportaron eventos de precipitación, mientras que algunos días de mediciones en San Cristóbal se vieron afectados por precipitaciones leves (Figura 21).

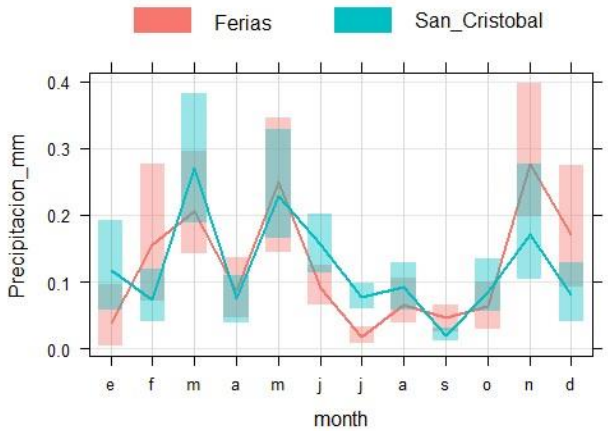


Figura 20. Precipitación en estaciones de Las Ferias y San Cristóbal reportada por la RMCAB

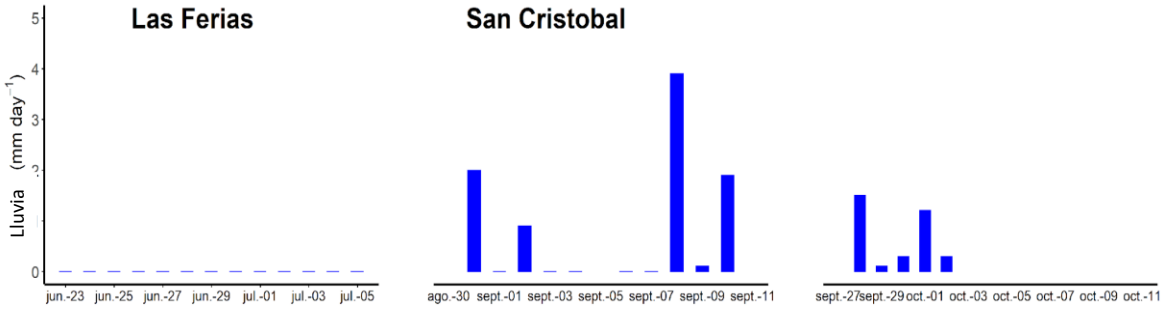


Figura 21. Eventos de precipitación durante los días de medición, reportados por la RMCAB

En cuanto a la dirección del viento en la ciudad, la autoridad ambiental local informó que en 2017 los vientos provenían del sureste y noreste y se juntaban en el centro geográfico de la ciudad, cerca de la estación Las Ferias (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018). En ambas estaciones la dirección predominante de vientos es el oriente y sur oriente en donde los vientos de mayor velocidad se presentaron en la estación de San Cristóbal en la campaña 2 (Figura 22).

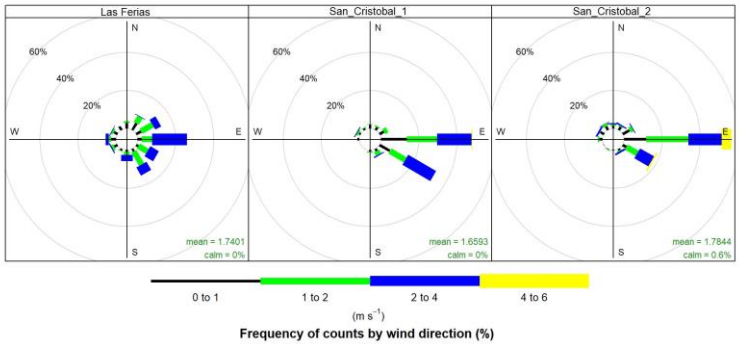


Figura 22. Rosas de viento durante los días elaborados con mediciones reportadas por la RMCAB

En cuanto a las velocidades del viento, en la campaña de Las Ferias su valor promedio fue de 1.740 m/s (min. 0.1 y max. 4.0); para la campaña San Cristóbal 1 su promedio fue de 1.659 m/s (min. 0.1 y max. 4.1) y San Cristóbal 2 fue de 1.784 m/s (min. 0.1 y max. 5.9). Al realizar análisis ANOVA entre las 3 campañas de medición se obtuvo un p-value entre 0.02 y 5.9×10^{-7}, por lo que se identifica una diferencia significativa entre el comportamiento de los valores medios de las velocidades del viento durante estas fechas. Aunque los promedios horarios reflejan un comportamiento similar entre las 3 campañas durante el día, en donde las mayores velocidades se presentan cerca de medio día y las primeras

horas de la tarde (Figura 18), el comportamiento mensual de la velocidad el viento en ambos sitios de medición entre junio a octubre es diferente como se observa en la Figura 23.

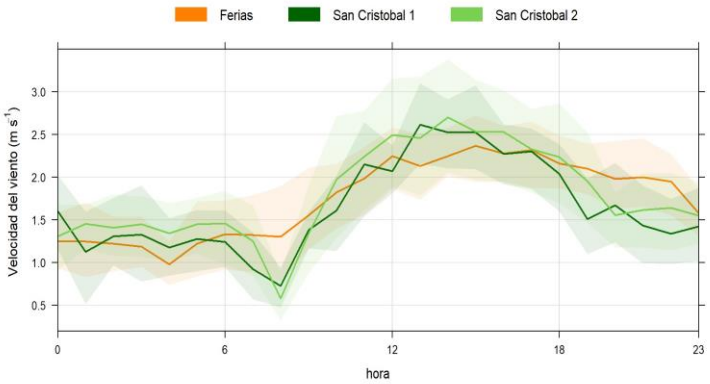


Figura 23. Comportamiento horario de la velocidad del viento en las 3 campañas en las correspondientes estaciones de medición

La estación de Las Ferias sigue la tendencia de ciudad como se observó en la Figura 5, en donde para los meses posteriores a junio las velocidades del viento tienden a disminuir; mientras que para la estación de San Cristóbal se presenta un comportamiento a la alza de las velocidades después del mes de agosto, teniendo los valores más altos en octubre, mes donde se realizó la campaña 3 y donde se podría presentar arrastre de contaminantes provenientes de afuera de la ciudad.

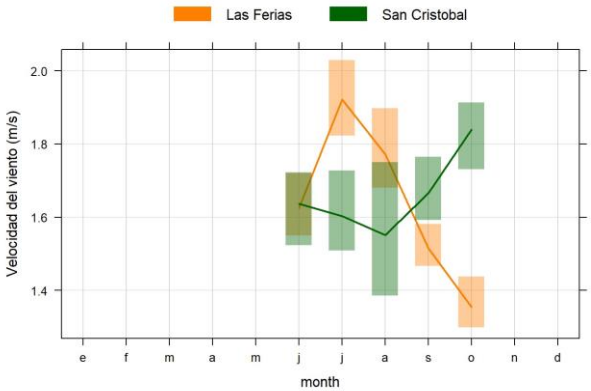


Figura 24. Comportamiento mensual desde junio a octubre por estación

Por su parte la humedad relativa (HR) no presentó diferencias significativas entre periodos de tiempo. Así, la HR promedio diaria durante el período de medición en San Cristóbal 1 fue de 65% (mín.: 37 %, máx.: 90 %), en San Cristóbal 2 fue de 64 % (mín.: 38 %, máx. 86

%) mientras que en Las Ferias fue de 61 %. (mín: 40 %, máx: 80 %). La Figura 25 muestra la variabilidad temporal del %HR en ambas estaciones durante los periodos de medición.

La humedad relativa (HR%) tuvo el típico patrón diurno, en el que la HR% fue inversa a la radiación solar diurna y la temperatura ambiente. Así, el %HR más alto (~70%) se reportó durante las primeras seis horas (horas de oscuridad en la noche) y luego disminuyó hasta el valor mínimo al mediodía (~50%). En horas de la tarde, la tasa de incremento del %HR medido en San Cristóbal fue mayor que en Las Ferias (Figura S2.b). La diferencia de HR% observable en ambas estaciones podría estar asociada a que las horas de luz diurna durante junio y julio podrían ser ligeramente mayores que en septiembre y octubre. Por lo tanto, durante el período de medición en que se realizó este estudio oscureció más temprano en la estación San Cristóbal que en Las Ferias debido a las fechas en que se realizó cada campaña.

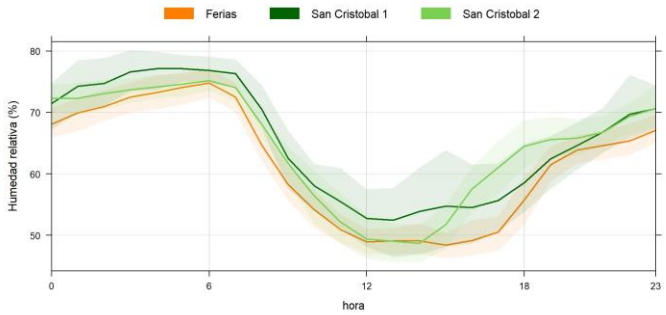


Figura 25. Comportamiento horario de la humedad relativa por estación en la correspondiente campaña de medición

Otras condiciones meteorológicas, como la temperatura (p-value~0.28) y la radiación solar no fueron significativamente diferentes en ambas estaciones durante junio y octubre de 2017.

3.2 Condiciones de concentración de $PM_{2.5}$

Continuando con el ejercicio para evaluar la importancia de la temporalidad en las mediciones realizadas en las diferentes campañas, se realizó la comparación de la concentración de $PM_{2.5}$ para verificar si existen diferencias significativas.

El promedio diario de concentración de $PM_{2.5}$ reportado para la campaña de Las Ferias (entre junio a julio) fue de 10.7 µg m^{-3}, valores similares a las reportadas en campaña de San Cristóbal 1 (septiembre) que fue de 10.2 µg m^{-3}, y un poco más bajas que las mediciones de San Cristóbal 2 (septiembre y octubre) que fue de11.87 µg m^{-3}; se podría concluir de forma errónea que las concentraciones en la estación de San Cristóbal en promedio son más altas que en la estación de Las Ferias. Sin embargo, si se analiza el perfil semanal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en ambas estaciones (Figura 26) se observa que las concentraciones de ambas estaciones tienen una tendencia a incrementar desde junio hasta octubre y que las concentraciones de en San Cristóbal son siempre menores a la estación de Las Ferias (

Tabla 7). Al realizar una prueba ANOVA entre los promedios de concentración de $PM_{2.5}$ en las estaciones de Las Ferias and San Cristóbal para las fechas de cada campaña de medición se encuentra que la diferencia entre las concentraciones es significativa con valores de p-value menores a 0.0001. Por esta razón los análisis de las siguientes secciones se reportarán por campaña de medición y como promedio por estación de monitoreo.

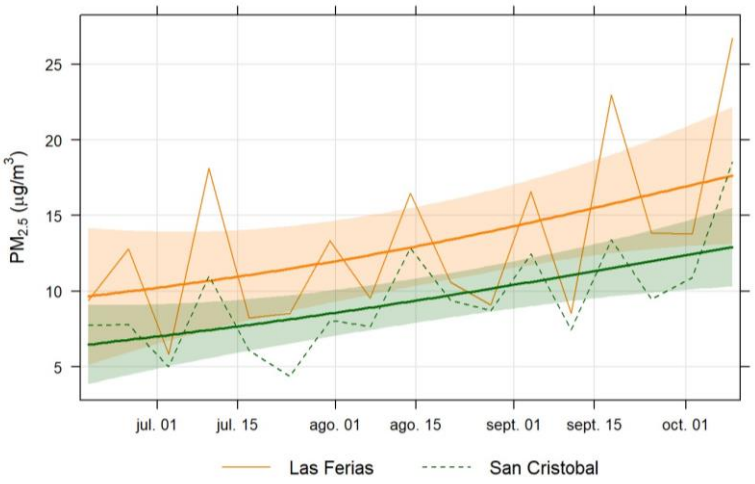
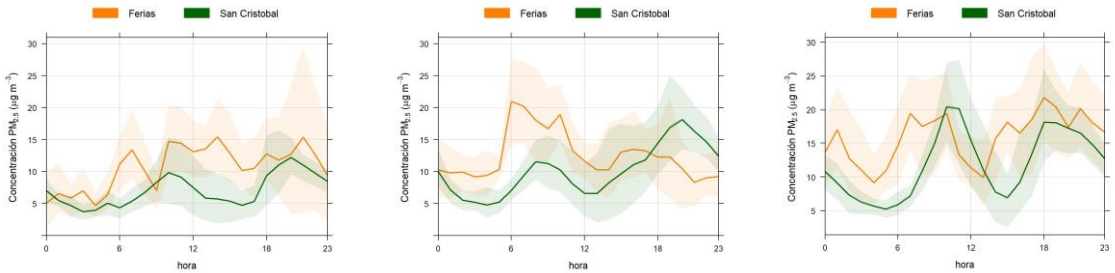


Figura 26. Promedio semanal de la concentración de $PM_{2.5}$ para las estaciones de San Cristóbal y Las Ferias reportadas por la RMCAB

Tabla 7. Promedio mensual de la concentración de $PM_{2.5}$ en las estaciones de Las Ferias y San Cristóbal durante los periodos de las campañas de medición. Elaboración propia. Fuente de información:(Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

Fechas de medición por mes	Campaña	Estación donde se realizó la campaña de medición	Mes	Promedio mensual de concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) medida por la RMCAB	
				Las Ferias	San Cristóbal
23 a 30 junio	Campaña 1	Las Ferias	Junio	12.9	8.6
1 a 5 julio 2017	Campaña 1	Las Ferias	Julio	5.3	3.9
1 a 11 septiembre 2017	Campaña 2	San Cristóbal	Septiembre	13.8	11.5
27 a 30 septiembre	Campaña 3	San Cristóbal	Septiembre	14.1	10.4
1 a 10 octubre 2017	Campaña 3	San Cristóbal	Octubre	15.0	11.8



a) Campaña 1 b) Campaña 2 c) Campaña 3

Figura 27. Comportamiento horario de la concentración de $PM_{2.5}$ medidas en las estaciones de Las Ferias y San Cristóbal por la RMCAB durante los periodos de las campañas de medición. Elaboración propia. Fuente de información:(Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

Por su parte, en el perfil horario de la concentración de $PM_{2.5}$ se observa que en la estación de San Cristóbal las concentraciones de la hora pico de la mañana aproximante a las 8:00 H a diferencia de Las Ferias, en la cual este pico de concentraciones inicia a las 6:00H. de la misma forma se evidencian cambios de los perfiles horarios para las fechas de cada campaña. Por ejemplo, en las Ferias sus concentraciones para las fechas campaña 3 presentaron un aumento hasta llegar a un pico a las 18:00 H. Mismo pico que se acentúa en esas fechas en San Cristóbal junto con el pico de concentración observado a las 11:00 H.

3.3 Concentración de número de partícula y variación temporal

Los estudios de CNP y la distribución de tamaños basados en mediciones terrestres se han realizado durante mucho tiempo, principalmente en Europa (Leoni et al., 2018; Rivas

et al., 2020; Rogula-Kozłowska & Klejnowski, 2013), Estados Unidos y Canadá (Kasumba et al., 2009; Ogulei et al., 2007) y algunos países asiáticos (Gani et al., 2020; Li et al., 2013; Wu et al., 2021). Pocos y recientes estudios se han realizado en América Latina, como el realizado en Brasil por Agudelo-Castañeda et al., 2019; Monteiro dos Santos et al., 2021, en Chile por Fults et al., 2019; Sánchez P. et al., 2021 Fults et al., (2019) y Manzano et al., (2021) y mediciones de aeronaves en México (Kleinman et al., 2009). En Colombia, las variaciones de las concentraciones de partículas ultrafinas en microambientes de transporte han sido estudiadas por (Avila Prada, 2016) quien reveló una exposición con un rango de 1.7 – $1.0x10^5$ #/cm^3 para los viajeros que utilizan bicicletas, automóviles, autobuses y caminando.

Para este estudio, la CNP fue significativamente diferente dependiendo de la campaña de medición. Las concentraciones reportadas en campaña de San Cristóbal 2 exhibió un mayor número de partículas con un promedio horario de 5.1x 10^3 ± 3.7 x 10^3 #/cm3 (min: $3.3x10^2$ #/cm^3 y máx. $1.0x10^4$ #/cm^3), mientras que en la campaña de San Cristóbal 1 la CNP promedio horario fue de $2.2x10^3$±$1.8x10^3$#/cm^3 (min: $3.3x10^2$ #/cm^3 y máx. $2.2x10^4$ #/cm^3). Valor similar al de la campaña de Las Ferias donde el promedio horario es de $2.8x10^3$ ± $2.7x10^3$ #/cm^3 (mín. 1.7 $x10^2$ #/cm^3 y máx. 1.3 $x10^5$ #/cm^3). Las diferencias de CNP entre campañas de medición podrían atribuirse principalmente a las partículas en modo nucleación (Figura 28), ya que estas son aproximadamente tres veces mayores en San Cristóbal 2 ($1.5X10^3$ ± 968 #/cm^3) que en campaña de Las Ferias (389 ± 349 #/cm^3) y San Cristóbal 1 (304 ± 176 #/cm^3).

En términos de nanopartículas, en la campaña de Las Ferias el 83.4% de las partículas se clasificaba en esta categoría de tamaño, en la campaña de San Cristóbal 1 fueron el 82.9% y en San Cristóbal 2 corresponde al 82.9% de las partículas medidas. Así mismo, el número promedio de nanopartículas en San Cristóbal 1 y Las Ferias fue de $1.7x10^3$ ± 1.3 $x10^3$ y $2.3x10^3$ ± 2.2 x103, respectivamente. Mientras que San Cristóbal 2 tuvo un número de nanopartículas de 4.1x103 ± 2.9 $x10^3$, valor duplica los valores de las demás campañas.

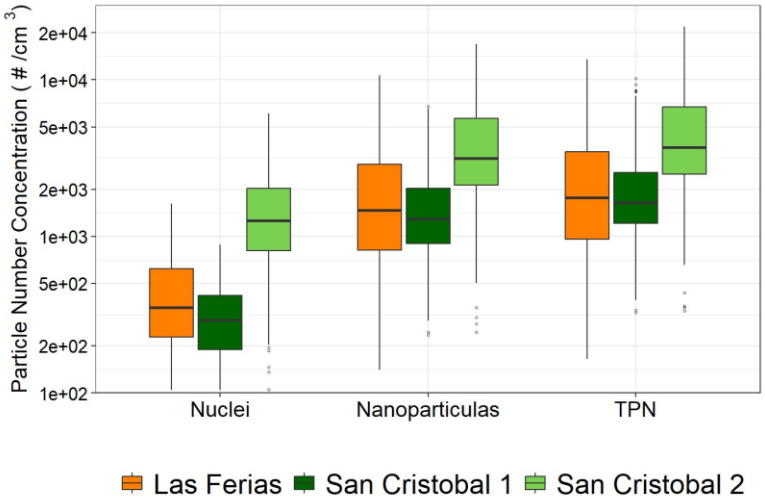


Figura 28. Concentración de número de partículas por tamaño y campaña de medición

La CNP obtenidos en este estudio fueron comparados con otros estudios en Colombia, Latinoamérica y el mundo. Díaz Fonseca (2021) encontró una mayor concentración de nanopartículas (~ 40 veces mayor) en una ubicada junto a una carretera en este estudio. El CNP encontrado en Bogotá fue similar a los encontrados en Atlanta (EE. UU.), Brisbane (Australia), Londres (Reino Unido), Zúrich (Suiza), Estocolmo (Suecia), Barcelona (España), Roma y Milán (Italia), que reportaron concentraciones entre $1x10^4$ y $9,7x10^4$ # partículas/cm^3 (Klejnowski et al., 2013), mientras que Zabrze (Polonia), Viena (Austria), Praga (República Checa) y Hohenpei ßenberg (Alemania) informó concentraciones de $1,1x10^3$ a $8,0x10^3$ # partículas/cm^3.

Los perfiles horarios de la CNP categorizados por modo nucleación, nanopartículas y el total partículas se presentan desde la Figura 29 a la Figura 31. En estas gráficas se observa cómo las concentraciones de partículas en cada categoría tiene un comportamiento similar para las campañas de Las Ferias y San Cristóbal 1. Por su parte San Cristóbal 2, aunque presenta valores similares a las otras campañas en las horas de la madrugada para el total de partículas y nanopartículas, desde las 6:00 H inicia un aumento de concentración separándose de los valores promedio. Para el modo de nucleación las concentraciones de partículas tienen valores mayores a las demás campañas en la mayoría de las horas del día. En general se observó un pico de CNP en la mañana, entre las 5:00 y las 9:00 horas. Este pico está asociado a las emisiones de tráfico en hora pico (Secretaría Distrital de

Ambiente (SDA), 2022) intensificadas por condiciones meteorológicas que influyen en la altura de la capa límite (capa de mezcla). Típicamente, la altura mínima de la capa de mezcla se registra a las 6:00 -7:00 H (Manuel Rincón-Riveros et al., 2020), lo que resulta en el estancamiento de la atmósfera que impide la dispersión de partículas en el aire. Después de las 8:30 - 9:00 H, la capa de mezcla se expande sobre la altura de la cordillera oriental, lo que facilita la dispersión y, por lo tanto, reduce la concentración del número de partículas.

Los valores máximos de CNP se observaron espacialmente en las primeras horas de la mañana, en donde a las 7:00H se presenta el máximo para campaña de Las Ferias con un valor de $5.5x10^3$ #/cm^3, en San Cristóbal 1 a las 6:00 H con un valor de concentración de 5.3 $x10^3$ #/cm^3 y en San Cristóbal 2 a las 7:00 H con $1.03x10^4$ #/cm^3. En contraste, la concentración mínima se observó en la madruga, como es el caso de Las Ferias que presenta valores mínimos a la 4:00 H con un valor de 1.6 $x10^3$ #/cm^3, en San Cristóbal 1 se presentó a la 1:00 H con un valor de 9.7 $x10^2$ #/cm3 y en San Cristóbal 2 se presenta un mínimo de 1.6 $x10^3$ #/cm3 a las 3:00 H.

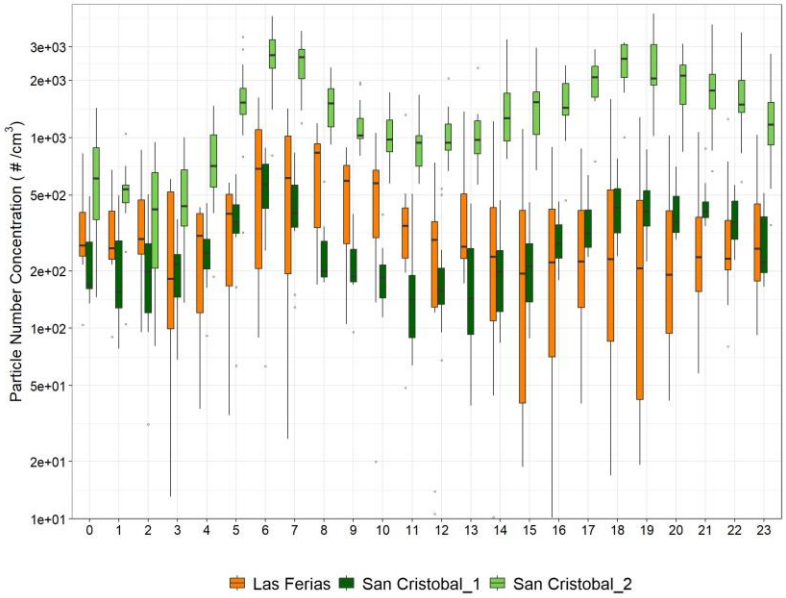


Figura 29. Distribución horaria de la concentración de número de partículas del modo nucleación

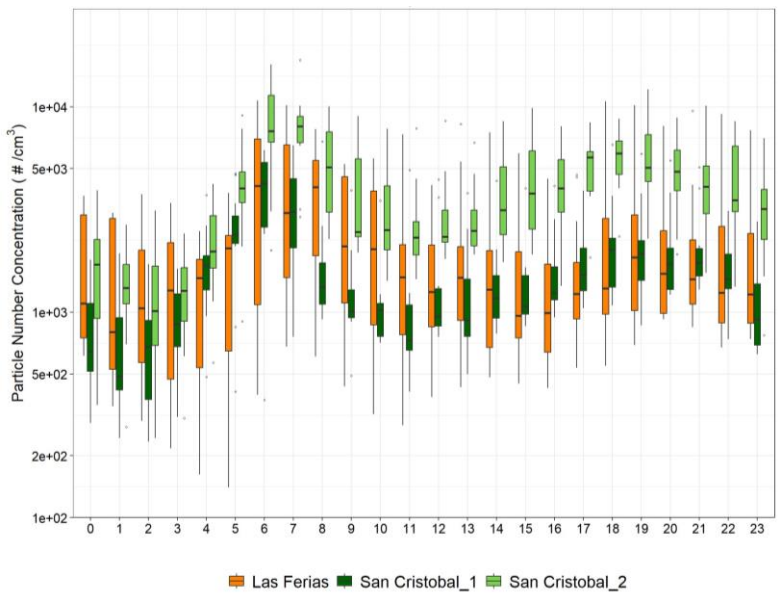


Figura 30. Distribución horaria de la concentración de número de partículas del tamaño de nanopartículas

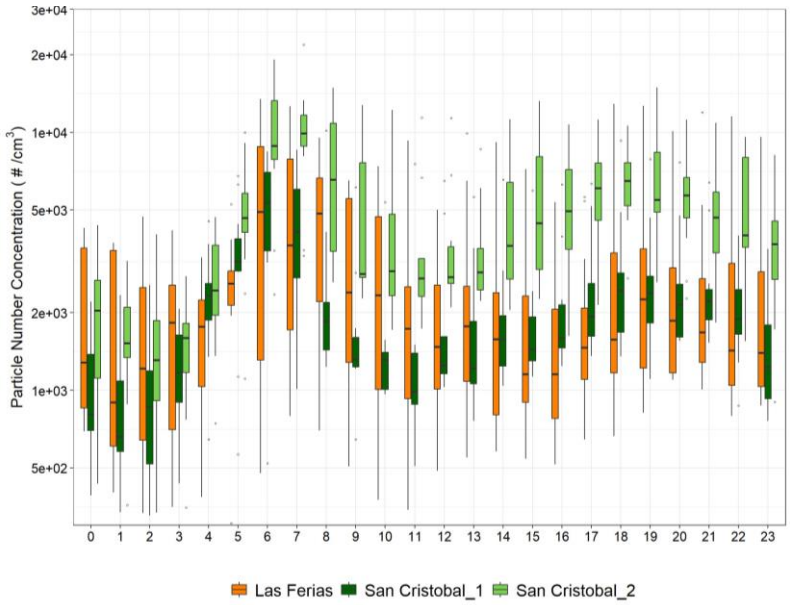


Figura 31. Distribución horaria de la concentración del total de número de partículas

Con relación al comportamiento semanal, (Figura 32) la CNP exhibió valores más altos entre semana que en fin de semana en ambos sitios. Sin embargo, la diferencia de CNP entre semana y fin de semana fue mayor en Las Ferias, con una diferencia del 64% que en las otras campañas de San Cristóbal 1 (27%) y San Cristóbal 2 (35%). Esto se debe a la gran influencia que tiene las fuentes vehiculares sobre la estación de Las Ferias, las cuales se reducen sus emisiones los fines de semana, especialmente los Domingos por

reducción del flujo vehicular. Mientras que, en San Cristóbal, al ser una estación de fondo urbano, la influencia de las fuentes propias de la ciudad como las fuentes fijas y vehiculares es menor. Como se observa en la Figura 32 cada campaña tiene un perfil semanal en donde San Cristóbal 1 presenta las concentraciones más bajas durante la semana, tiene un pico el viernes, el cual disminuye para el fin de semana. Por su parte San Cristóbal 2, presenta las mayores concentraciones de número de partículas de las 3 campañas, inicia la semana con las mayores concentraciones que van disminuyendo hasta el fin de semana. Por su parte en Las Ferias, incrementa sus emisiones desde inicio de semana hasta el miércoles y después se reduce nuevamente hasta el fin de semana.

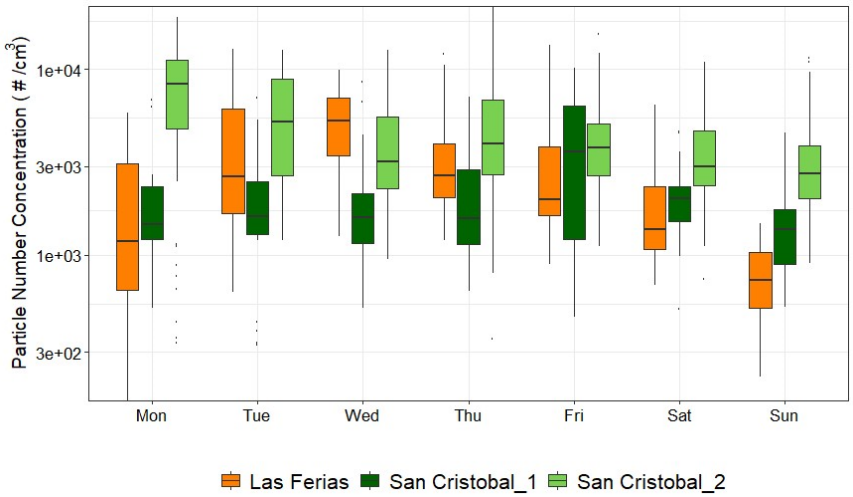


Figura 32. Comportamiento semanal de las concentraciones de número de partículas para cada campaña de medición

El resumen de los promedios de la concentración de número de partículas entre semana y fines de semana se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Promedio de concentración de número de partículas entre semana y fines de semana

Campaña	**Promedio de concentración de número de partículas (#/cm^3)**	
	Entre semana	**Fines de semana**
Las Ferias	3.60x10^3	1.29 x10^3
San Cristóbal 1	2.43 x10^3	1.78 x10^3
San Cristóbal 2	5.66 x10^3	3.65 x10^3

3.4 Distribución de tamaño de partícula

La comparación de la distribución del tamaño del número de partículas (PNSD por sus siglas en inglés) promedio por hora para ambos sitios se presenta en la Figura 33. La PNSD en Las Ferias y San Cristóbal 1 fue notablemente unimodal, con un máximo cercano a 5.12 x 10^3 #/cm^3 en el rango de diámetro de 60 a 108 nm para ambas campañas. Es decir, que la mayoría de estas partículas se encuentran entre modo Aitken y acumulación, las cuales pueden estar muy influenciado por procesos de condensación de precursores y reacciones de COV (Seinfeld & Pandis, 2006). Por su parte San Cristóbal 2 presenta una distribución bimodal, en donde la moda más fina se encuentra en el diámetro de 16 nm es donde se presenta el máximo valor de concentración de 6.1x10^3 #/cm^3. Esta moda se encuentra en el rango de las partículas Aitken, las cuales se encuentran relacionadas al crecimiento de partículas primarias por condensación o nucleación de vapores. El segundo valor modal se presenta en los rangos de los diámetros de las demás campañas con un máximo cercano a 5.10 x 10^3 #/cm^3.

Los valores máximos en las distribuciones de tamaño para cada campaña de este estudio (5.2 x 10^3 #/cm^3 en Las Ferias, 4.5 x 10^3 #/cm^3 en San Cristóbal 1 y 7.0 x 10^3 #/cm^3 en San Cristóbal 2) fueron inferiores a las reportadas en el área urbana de Beijing durante las Olimpiadas (1.3 x 10^4 #/cm^3), cuando se aplicaron las mayores medidas de control para evitar altos niveles de contaminantes atmosféricos y se centró en tamaño de partícula mayor que en Beijing (70 – 100 nm) (Wang et al., 2013). Por otro lado, el tamaño de las partículas modales observado en las áreas urbanas de Polonia fue unimodal y se centró en las partículas modales de acumulación (157 – 263 nm) (Klejnowski et al., 2013a) como las que se encontraron para Las campañas de Ferias y San Cristóbal 1.

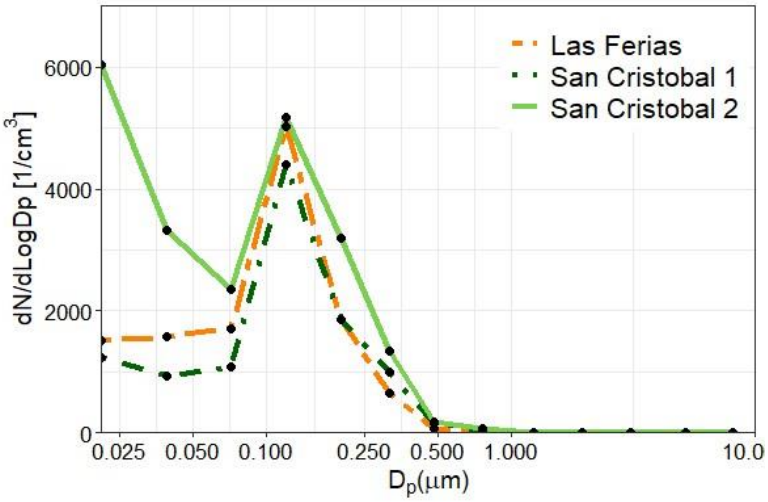


Figura 33. Promedio día de la distribución tamaño de partícula por campaña de medición

El PNSD es dinámico a lo largo del día, como se muestran desde la Figura 34 hasta la Figura 36, en donde para las campañas de Las Ferias y de San Cristóbal 1 se presenta un comportamiento similar y acorde a la dinámica de ciudad en donde la PNSD de mayores valores de partículas se encuentran en las horas pico de la mañana (6:00 H a 9:00 H), seguido de la horas pico de la tarde (17:00 H a 20 H), por lo que se pueden concluir que en estas épocas existe una fuerte influencia de las fuentes locales. Estas distribuciones presentan en su mayoría partículas en modo acumulación, sin embargo, en las horas de la mañana en Las Ferias se observa una mayor cantidad de partículas menores a 54 nm que pueden encontrarse entre los modos de nucleación y Aitken, asociadas a partículas primarias o crecimiento de estas partículas, lo que se puede relacionar directamente con la influencia que las emisiones de fuentes vehiculares tiene sobre la estación de Las Ferias.

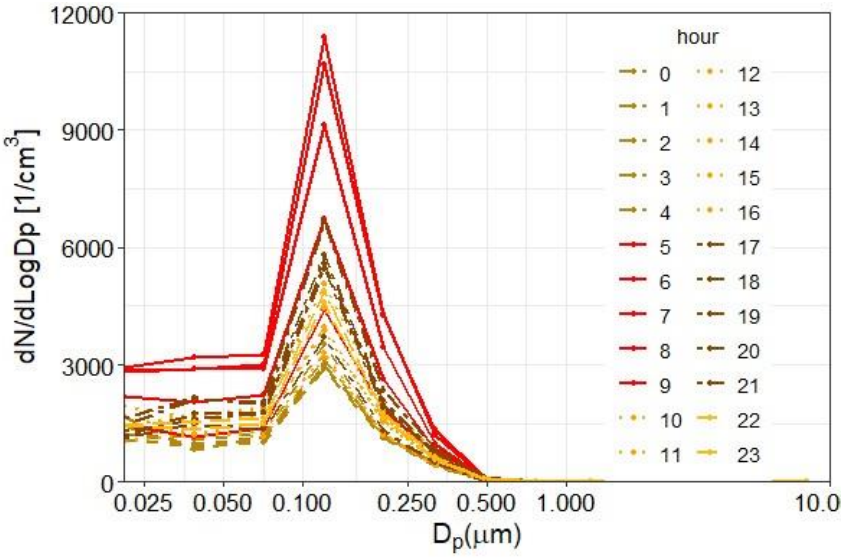


Figura 34. Distribución de tamaño de partícula por hora en la estación de Las Ferias

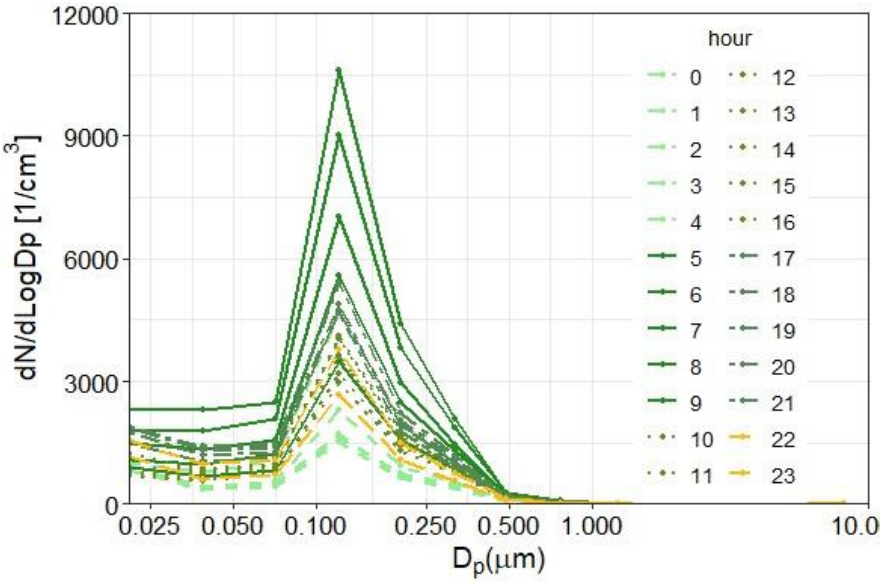


Figura 35. Distribución de tamaño de partícula por hora en la estación de San Cristóbal 1

Por su parte, la PNSD de San Cristóbal 2 presenta un comportamiento bimodal en donde la concentración más alta de número partículas en el día se presenta en las horas de la mañana diámetro de 94 nm. A diferencia de las otras campañas, la cantidad de partículas con diámetro menor a 54 nm son muy significativas, siento 4.4 veces mayores que en la campaña de San Cristóbal 1 y 3 veces que la de Las Ferias. En este rango de diámetro se encuentra el segundo modo identificado en el diámetro de 16 nm. Los valores más altos

en este modo se presentan principalmente en las horas de la tarde noche entre las 17:00 H a las 21:00 H. Considerando que este resultado se diferencia de forma significativa del comportamiento de las mediciones de las demás campañas, se realizó una segunda verificación de los parámetros de calidad del equipo ELPI+, corroborando su buen funcionamiento durante este periodo de tiempo.

El incremento de partículas de nucleación y Aitken en San Cristóbal 2 puede sugerir la presencia de precursores que sufren procesos químicos y físicos, tales como, nucleación y condensación de vapores sobresaturados. Así, las partículas en modo nucleación en San Cristóbal podrían haber resultado de los vapores derivados del proceso de combustión o emisiones de vapores biogénicos, intensificados durante las horas pico de tráfico de la tarde, así como las condiciones meteorológicas.

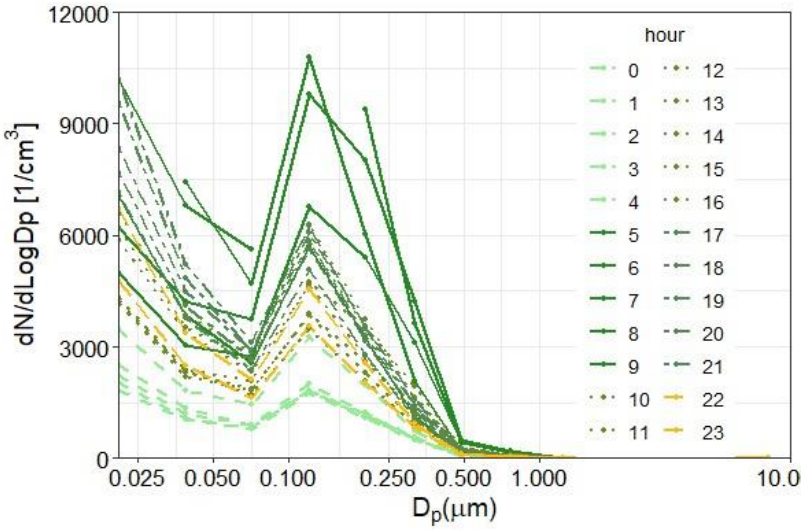


Figura 36. Distribución de tamaño de partícula por hora en la estación de San Cristóbal 2

Estudios previos han demostrado mediciones de la PNSD cerca a tráfico alto exhiben un centro de distribución en un modo Aitken en diámetros aproximados a 75 nm (Rose et al., 2006; Virtanen et al., 2006). En particular, el PNSD de las emisiones de escape diesel ha revelado una distribución unimodal centrada en 88 nm durante los ciclos transitorios. Por lo que se puede intuir que las emisiones de escape por combustión interna de diésel en vehículos están dominadas por partículas de modo Aitken compuestas de partículas de hollín aglomeradas formadas a temperaturas más altas durante el proceso de combustión incompleta (Rissler et al., 2012). Este comportamiento modal, es muy similar al encontrado en las campañas de Las Ferias como en San Cristóbal 1 por lo que se puede suponer que

la mayoría de las partículas observadas podrían derivar de emisiones vehiculares y que luego cambiaron a tamaños mayores debido a la condensación de vapor y el proceso de aglomeración entre ellos. Por otro lado, el modo de Aitken y nucleación observada en la hora pico de la mañana a las 7:00 H y 6:00H y en la hora pico de la tarde (17:00 H hasta 20:00 H) en San Cristóbal 2 reveló la producción de partículas frescas a partir de las emisiones de combustión y del proceso de crecimiento de (Hama et al., 2017) partículas que pueden estar relacionadas a fuentes biogénicas.

3.5 Correlación de la concentración de número de partículas con variables meteorológicas

Con el propósito de identificar una posible influencia entre la concentración de número de partículas y las variables meteorológicas, que den respaldo a lo observado en los resultados de las secciones 3.3 y 3.4, se realizó un análisis de correlación estadística implementando la prueba de Kendall y variabilidad espacio temporal con gráficas tipo PolarPlot.

Los análisis estadísticos de correlación se realizaron entre la CNP-humedad relativa y CNP-velocidad del viento. Se escogieron estas dos variables meteorológicas que se consideran las de mayor influencia en la transformación y dispersión de las partículas. Así mismo, se encontraron algunas diferencias significativas entre cada campaña para estas variables en la sección 3.1. Los resultados que se presentan desde la Tabla 9 a la Tabla 14, las cuales en la parte superior reportan los coeficientes de correlación resultado de la prueba de Kendall para cada hora del día (columnas) y para cada etapa de medición del equipo ELPI+ (Filas). A los coeficientes de correlación se les aplico un formato condicional tipo semáforo, en donde los valores verdes corresponden a las correlaciones más positivas; naranjas y amarillos a correlaciones medias y bajas; y rojos correlaciones inversas altas. Así mismo, en la parte inferior de las tablas se presentan los valores del p-value para cada correlación, en donde se resaltan con color verde aquellos valores de esta variable menores o iguales a 0.05, que corresponde a valores aceptables con errores por debajo del 5%.

En la Tabla 9 se presenta los resultados del análisis para la campaña de Las Ferias y su correlación con las mediciones de la humedad relativa. Este análisis presenta coeficientes de correlación medios (entre 0.4 a 0.6 representados en color verde) desde las 14:00 H hasta las 18:00 H. Sin embargo, muy pocos de estos valores tienen un p-value aceptable (color verde). Por lo que análisis de esta correlación no es posible hacerlo sin un error aceptable. Esto mismo sucede en esta campaña para el análisis con la velocidad del viento (

Tabla 10), la mayoría de los resultados de p-value son menores a 0.05 con excepción de las correlaciones inversas para las 10:00 H, 21:00 H y 22:00 H. Así que este análisis no genera ninguna conclusión clara para la campaña de Las Ferias.

Los resultados del análisis de correlación entre CNP-Humedad relativa para la campaña de San Cristóbal 1 (Tabla 11) presentan correlaciones positivas de hasta 0.9 (color verde) entre las 8:00 H y las 12:00 H. Estas horas corresponden a los mayores valores de HR como se observó en la Figura 25, siendo varios de estos valores presentan un p-value menor a 0.05 por lo que se consideran aceptables. Por lo tanto se puede encontrar a esta hora una influencia significativa de la HR para en la mayoría de las etapas del EIPI+. Por su parte el análisis con velocidad del viento (

Tabla 12) no obtiene gran cantidad de resultados de p-values válidos, solo se observa una correlación negativa (color rojo) importante a las 17:00 H.

Los análisis para las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2 (

Tabla 13) presentaron correlaciones de hasta 0.78 (color verde) entre CNP y Humedad con valores de p-value válidos, entre las 16:00 H hasta las 20 H, especialmente para las etapas de las 5 hasta las 12, que contemplan partículas en modo de acumulación. Durante estas horas según la Figura 25, se presenta en la campaña de San Cristóbal 2 una pendiente más alta de incremento de la humedad relativa, que en las demás campañas. En cuanto al análisis para la velocidad del viento (Tabla 14), esta campaña es la que presenta mayor cantidad de resultados con un p-value valido. Sin embargo, se encuentran asociados con coeficientes de correlación media baja, por lo que se puede incluir que esta variable tiene una gran influencia sobre el número de partículas.

Tabla 9. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de medición en Las Ferias

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0,14	0,14	-0,14	0,14	0,00	0,57	-0,14	0,00	-0,07	-0,07	0,29	-0,36	-0,21	0,07	0,50	0,44	0,17	0,44	0,50	0,17	-0,06	0,06	0,07	-0,14
3	0,07	0,07	0,14	0,21	0,07	0,71	0,00	-0,07	0,00	0,00	0,29	-0,21	-0,07	0,21	0,50	0,50	0,22	0,39	0,44	0,33	0,39	0,39	0,36	0,36
4	-0,07	0,00	0,07	0,21	0,36	0,71	-0,07	-0,07	0,14	0,14	0,21	-0,14	-0,14	0,14	0,50	0,39	0,06	0,22	0,44	0,39	0,33	0,39	0,50	0,43
5	-0,07	0,07	0,14	0,29	0,36	0,43	0,07	0,00	0,00	0,00	0,21	-0,07	-0,29	0,07	0,50	0,44	0,17	0,33	0,50	0,28	0,44	0,33	0,50	0,36
6	-0,14	0,14	0,07	0,36	0,29	0,43	0,00	-0,14	-0,14	-0,07	0,21	-0,14	-0,29	0,07	0,57	0,50	0,28	0,39	0,56	0,28	0,33	0,28	0,43	0,29
7	0,14	0,14	0,21	0,36	0,36	0,71	0,07	-0,21	-0,07	0,14	0,21	-0,14	-0,29	0,07	0,57	0,61	0,22	0,33	0,50	0,44	0,28	0,33	0,50	0,36
8	0,21	0,21	0,14	0,36	0,29	0,64	0,29	0,07	0,07	0,14	0,36	0,00	-0,21	0,07	0,50	0,50	0,17	0,39	0,56	0,39	0,28	0,28	0,57	0,43
9	0,00	0,33	0,18	0,29	0,14	0,57	0,07	-0,07	-0,07	0,00	0,21	-0,21	-0,14	-0,07	0,29	0,56	0,11	0,33	0,28	0,33	0,44	0,33	0,50	0,43
10	0,00	-0,07	0,00	0,21	0,14	0,36	0,00	-0,07	-0,21	-0,14	0,14	-0,14	-0,14	0,14	0,50	0,39	0,44	0,17	0,61	0,06	-0,22	0,00	-0,14	-0,07
11	-0,14	0,11	0,33	0,43	0,14	0,21	-0,14	-0,07	-0,07	-0,14	0,14	-0,21	-0,14	0,00	0,29	0,50	0,00	0,28	0,06	0,33	0,56	0,44	0,57	0,50
12	0,00	0,14	0,14	0,14	0,14	0,57	-0,14	-0,21	-0,29	-0,07	0,14	-0,07	-0,14	0,14	0,50	0,56	0,33	0,56	0,61	0,39	0,33	0,22	0,29	0,14
13	0,07	0,07	0,21	0,00	0,07	0,21	-0,07	0,07	-0,07	0,14	0,21	-0,14	-0,14	0,14	0,43	0,28	0,28	0,39	0,56	0,44	0,39	0,56	0,29	0,21
14	-0,07	-0,21	-0,14	0,14	0,29	0,57	-0,07	-0,07	-0,50	0,21	0,36	-0,07	-0,07	0,14	0,36	0,33	0,28	0,28	0,44	0,00	-0,22	-0,06	-0,14	-0,36
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,72	0,72	0,72	0,72	1,00	0,06	0,72	1,00	0,90	0,90	0,40	0,28	0,55	0,90	0,11	0,12	0,61	0,12	0,08	0,61	0,92	0,92	0,90	0,72
3	0,90	0,90	0,72	0,55	0,90	0,01	1,00	0,90	1,00	1,00	0,40	0,55	0,90	0,55	0,11	0,08	0,48	0,18	0,12	0,26	0,18	0,18	0,28	0,28
4	0,90	1,00	0,90	0,55	0,28	0,01	0,90	0,90	0,72	0,72	0,55	0,72	0,72	0,72	0,11	0,18	0,92	0,48	0,12	0,18	0,26	0,18	0,11	0,18
5	0,90	0,90	0,72	0,40	0,28	0,18	0,90	1,00	1,00	1,00	0,55	0,90	0,40	0,90	0,11	0,12	0,61	0,26	0,08	0,36	0,12	0,26	0,11	0,28
6	0,72	0,72	0,90	0,28	0,40	0,18	1,00	0,72	0,72	0,90	0,55	0,72	0,40	0,90	0,06	0,08	0,36	0,18	0,04	0,36	0,26	0,36	0,18	0,40
7	0,72	0,72	0,55	0,28	0,28	0,01	0,90	0,55	0,90	0,72	0,55	0,72	0,40	0,90	0,06	0,02	0,48	0,26	0,08	0,12	0,36	0,26	0,11	0,28
8	0,55	0,55	0,72	0,28	0,40	0,03	0,40	0,90	0,90	0,72	0,28	1,00	0,55	0,90	0,11	0,08	0,61	0,18	0,04	0,18	0,36	0,36	0,06	0,18
9	1,00	0,26	0,53	0,40	0,72	0,06	0,90	0,90	0,90	1,00	0,55	0,55	0,72	0,90	0,40	0,04	0,76	0,26	0,36	0,26	0,12	0,26	0,11	0,18
10	1,00	0,90	1,00	0,55	0,72	0,28	1,00	0,90	0,55	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,11	0,18	0,12	0,61	0,02	0,92	0,48	1,00	0,72	0,90
11	0,72	0,70	0,26	0,18	0,72	0,55	0,72	0,90	0,90	0,72	0,72	0,55	0,72	1,00	0,40	0,08	1,00	0,36	0,92	0,26	0,04	0,12	0,06	0,11
12	1,00	0,72	0,72	0,72	0,72	0,06	0,72	0,55	0,40	0,90	0,72	0,90	0,72	0,72	0,11	0,04	0,26	0,04	0,02	0,18	0,26	0,48	0,40	0,72
13	0,90	0,90	0,55	1,00	0,90	0,55	0,90	0,90	0,90	0,72	0,55	0,72	0,72	0,72	0,18	0,36	0,36	0,18	0,04	0,12	0,18	0,04	0,40	0,55
14	0,90	0,55	0,72	0,72	0,40	0,06	0,90	0,90	0,11	0,55	0,28	0,90	0,90	0,72	0,28	0,26	0,36	0,36	0,12	1,00	0,48	0,92	0,72	0,28

Tabla 10. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de Las Ferias.

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0,11	-0,04	0,04	-0,25	0,18	-0,25	-0,18	0,00	0,25	-0,30	-0,55	-0,40	-0,18	-0,57	-0,04	-0,42	0,03	-0,22	0,31	-0,06	0,00	-0,22	-0,40	-0,15
3	0,11	-0,40	0,18	-0,04	0,18	-0,33	-0,25	-0,08	0,04	-0,37	-0,55	-0,40	-0,04	-0,57	-0,04	-0,37	0,08	-0,28	0,25	0,06	0,00	-0,44	-0,62	-0,22
4	-0,04	-0,33	0,11	-0,18	-0,11	-0,33	-0,33	-0,16	-0,11	-0,44	-0,62	-0,47	-0,18	-0,64	-0,04	-0,37	0,14	-0,33	0,25	-0,11	-0,06	-0,56	-0,76	-0,30
5	-0,04	-0,40	0,18	-0,25	-0,18	-0,11	-0,33	-0,08	-0,11	-0,37	-0,62	-0,40	-0,33	-0,57	-0,04	-0,31	0,14	-0,22	0,20	0,00	-0,06	-0,61	-0,76	-0,37
6	0,04	-0,18	0,25	-0,18	-0,11	-0,11	-0,25	-0,16	0,04	-0,30	-0,62	-0,33	-0,33	-0,57	0,04	-0,37	0,03	-0,28	0,25	0,00	0,06	-0,56	-0,76	-0,44
7	0,04	-0,33	0,11	-0,18	-0,18	-0,33	-0,33	-0,16	-0,18	-0,30	-0,76	-0,47	-0,33	-0,57	-0,11	-0,37	0,20	-0,22	0,20	-0,17	0,00	-0,61	-0,76	-0,37
8	0,11	-0,40	0,04	-0,18	-0,11	-0,33	-0,40	-0,08	-0,33	-0,59	-0,76	-0,47	-0,40	-0,71	-0,18	-0,37	0,14	-0,28	0,14	-0,11	0,11	-0,56	-0,69	-0,30
9	0,19	-0,07	0,07	-0,11	0,04	-0,25	-0,33	0,00	-0,04	-0,37	-0,76	-0,55	-0,33	-0,57	0,11	-0,31	0,20	-0,11	0,03	-0,17	-0,06	-0,61	-0,76	-0,44
10	-0,34	-0,18	0,04	-0,04	0,04	-0,18	-0,40	0,00	-0,04	-0,37	-0,69	-0,47	-0,18	-0,64	-0,18	-0,48	-0,20	-0,50	0,31	0,11	0,06	0,17	0,04	0,07
11	0,64	0,15	0,07	0,04	0,04	-0,04	-0,33	0,00	-0,04	-0,37	-0,69	-0,55	-0,04	-0,21	-0,04	-0,25	0,31	0,06	-0,20	-0,29	-0,06	-0,61	-0,69	-0,30
12	-0,26	-0,18	-0,11	-0,11	0,04	-0,25	-0,33	-0,08	0,04	-0,30	-0,69	-0,40	-0,18	-0,64	-0,04	-0,31	-0,03	-0,11	0,20	-0,11	0,06	-0,39	-0,40	-0,30
13	0,04	-0,11	-0,04	-0,11	0,18	-0,25	-0,40	-0,48	-0,33	-0,74	-0,76	-0,47	-0,25	-0,64	0,04	-0,25	0,03	-0,28	0,20	-0,06	-0,11	-0,28	-0,55	-0,22
14	-0,42	-0,04	-0,11	-0,11	-0,11	-0,25	-0,40	-0,08	-0,18	-0,52	-0,62	-0,40	-0,11	-0,50	-0,04	-0,42	-0,08	-0,50	0,37	0,06	0,28	0,22	0,04	0,07
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,70	0,90	0,90	0,38	0,53	0,38	0,53	1,00	0,38	0,32	0,06	0,17	0,53	0,06	0,90	0,12	0,92	0,48	0,25	0,83	1,00	0,48	0,17	0,62
3	0,70	0,17	0,53	0,90	0,53	0,26	0,38	0,79	0,90	0,21	0,06	0,17	0,90	0,06	0,90	0,17	0,75	0,36	0,35	0,83	1,00	0,12	0,03	0,45
4	0,90	0,26	0,71	0,53	0,71	0,26	0,26	0,60	0,71	0,13	0,03	0,11	0,53	0,03	0,90	0,17	0,60	0,26	0,35	0,67	0,92	0,05	0,01	0,32
5	0,90	0,17	0,53	0,38	0,53	0,71	0,26	0,79	0,71	0,21	0,03	0,17	0,26	0,06	0,90	0,25	0,60	0,48	0,46	1,00	0,92	0,03	0,01	0,21
6	0,90	0,53	0,38	0,53	0,71	0,71	0,38	0,60	0,90	0,32	0,03	0,26	0,26	0,06	0,90	0,17	0,92	0,36	0,35	1,00	0,92	0,05	0,01	0,13
7	0,90	0,26	0,71	0,53	0,53	0,26	0,26	0,60	0,53	0,32	0,01	0,11	0,26	0,06	0,71	0,17	0,46	0,48	0,46	0,53	1,00	0,03	0,01	0,21
8	0,70	0,17	0,90	0,53	0,71	0,26	0,17	0,79	0,26	0,04	0,01	0,11	0,17	0,01	0,53	0,17	0,60	0,36	0,60	0,67	0,76	0,05	0,02	0,32
9	0,53	0,80	0,80	0,71	0,90	0,38	0,26	1,00	0,90	0,21	0,01	0,06	0,26	0,06	0,71	0,25	0,46	0,76	0,92	0,53	0,92	0,03	0,01	0,13
10	0,25	0,53	0,90	0,90	0,90	0,53	0,17	1,00	0,90	0,21	0,02	0,11	0,53	0,03	0,53	0,08	0,46	0,08	0,25	0,67	0,92	0,61	0,90	0,80
11	0,03	0,61	0,80	0,90	0,90	0,90	0,26	1,00	0,90	0,21	0,02	0,06	0,90	0,55	0,90	0,35	0,25	0,92	0,46	0,29	0,92	0,03	0,02	0,32
12	0,38	0,53	0,71	0,71	0,90	0,38	0,26	0,79	0,90	0,32	0,02	0,17	0,53	0,03	0,90	0,25	0,92	0,76	0,46	0,67	0,92	0,18	0,17	0,32
13	0,90	0,71	0,90	0,71	0,53	0,38	0,17	0,12	0,26	0,01	0,01	0,11	0,38	0,03	0,90	0,35	0,92	0,36	0,46	0,83	0,76	0,36	0,06	0,45
14	0,16	0,90	0,71	0,71	0,71	0,38	0,17	0,79	0,53	0,08	0,03	0,17	0,71	0,11	0,90	0,12	0,75	0,08	0,17	0,83	0,36	0,48	0,90	0,80

Tabla 11. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 1

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,43	0,05	-0,05	0,24	-0,81	-0,14	0,14	0,14	0,71	0,81	0,62	0,90	0,43	0,64	0,43	0,44	0,33	0,17	0,28	0,06	0,00	0,00	0,14	0,36
3	0,50	0,24	-0,33	-0,24	-0,62	-0,14	-0,05	0,14	0,62	0,71	0,33	0,52	-0,05	0,57	0,43	0,28	0,11	0,11	0,28	0,00	-0,17	0,11	-0,14	-0,07
4	0,64	0,24	-0,24	0,05	-0,81	-0,05	0,33	0,05	0,62	0,62	0,33	0,71	0,33	0,57	0,43	0,22	0,11	0,17	0,33	0,06	-0,06	0,17	-0,14	0,00
5	0,79	0,62	0,05	0,14	-0,90	-0,33	-0,05	0,05	0,81	0,71	0,43	0,52	0,24	0,43	0,29	0,28	0,28	0,22	0,28	0,17	0,00	0,11	0,14	0,07
6	0,86	0,52	-0,14	0,24	-0,81	-0,43	-0,05	0,14	0,81	0,62	0,43	0,52	0,14	0,50	0,21	-0,06	0,17	0,22	0,33	0,17	0,06	0,11	0,36	0,29
7	0,71	0,33	0,05	0,24	-0,52	-0,33	0,05	0,05	0,71	0,33	0,33	0,52	0,05	0,29	0,07	0,11	0,06	0,28	0,28	0,28	0,11	0,17	0,36	0,50
8	0,50	0,43	0,05	0,05	-0,52	-0,14	0,05	0,05	0,81	0,52	0,43	0,71	0,05	0,57	0,43	0,28	0,17	0,33	0,39	0,33	0,28	0,39	0,71	0,64
9	0,43	0,62	0,05	0,14	-0,52	-0,24	0,05	0,05	0,81	0,62	0,62	0,71	0,14	0,43	0,36	0,11	0,11	0,22	0,11	0,22	-0,06	0,22	0,21	0,21
10	0,71	0,52	0,24	0,43	-0,71	-0,24	0,24	0,24	0,71	0,24	0,24	0,33	0,14	0,50	0,43	0,28	0,67	0,56	0,78	0,67	0,67	0,67	0,79	0,79
11	-0,43	-0,24	-0,14	-0,14	-0,43	-0,24	-0,05	-0,33	0,24	0,24	-0,24	-0,05	-0,24	-0,21	-0,14	-0,06	0,17	0,11	-0,06	-0,28	-0,17	-0,28	-0,29	-0,14
12	0,57	0,52	0,14	0,62	-0,81	-0,24	0,24	0,14	0,81	0,62	0,62	0,71	0,43	0,71	0,50	0,33	0,22	0,22	0,22	0,28	0,17	0,28	0,14	0,29
13	0,00	-0,33	-0,24	-0,14	-0,43	-0,33	0,24	0,14	0,71	0,62	0,52	0,71	0,43	0,71	0,79	0,39	0,33	0,17	0,22	-0,11	-0,22	-0,28	-0,14	-0,21
14	0,21	-0,33	0,05	0,33	-0,14	-0,05	0,05	0,14	0,62	0,52	0,71	0,71	0,14	0,71	0,71	0,44	0,67	0,72	0,67	0,39	0,11	-0,17	-0,21	-0,14
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,18	1,00	1,00	0,56	0,01	0,77	0,77	0,77	0,03	0,01	0,07	0,00	0,24	0,03	0,18	0,12	0,26	0,61	0,36	0,92	1,00	1,00	0,72	0,28
3	0,11	0,56	0,38	0,56	0,07	0,77	1,00	0,77	0,07	0,03	0,38	0,14	1,00	0,06	0,18	0,36	0,76	0,76	0,36	1,00	0,61	0,76	0,72	0,90
4	0,03	0,56	0,56	1,00	0,01	1,00	0,38	1,00	0,07	0,07	0,38	0,03	0,38	0,06	0,18	0,48	0,76	0,61	0,26	0,92	0,92	0,61	0,72	1,00
5	0,01	0,07	1,00	0,77	0,00	0,38	1,00	1,00	0,01	0,03	0,24	0,14	0,56	0,18	0,40	0,36	0,36	0,48	0,36	0,61	1,00	0,76	0,72	0,90
6	0,00	0,14	0,77	0,56	0,01	0,24	1,00	0,77	0,01	0,07	0,24	0,14	0,77	0,11	0,55	0,92	0,61	0,48	0,26	0,61	0,92	0,76	0,28	0,40
7	0,01	0,38	1,00	0,56	0,14	0,38	1,00	1,00	0,03	0,38	0,38	0,14	1,00	0,40	0,90	0,76	0,92	0,36	0,36	0,36	0,76	0,61	0,28	0,11
8	0,11	0,24	1,00	1,00	0,14	0,77	1,00	1,00	0,01	0,14	0,24	0,03	1,00	0,06	0,18	0,36	0,61	0,26	0,18	0,26	0,36	0,18	0,01	0,03
9	0,18	0,07	1,00	0,77	0,14	0,56	1,00	1,00	0,01	0,07	0,07	0,03	0,77	0,18	0,28	0,76	0,76	0,48	0,76	0,48	0,92	0,48	0,55	0,55
10	0,01	0,14	0,56	0,24	0,03	0,56	0,56	0,56	0,03	0,56	0,56	0,38	0,77	0,11	0,18	0,36	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
11	0,18	0,56	0,77	0,77	0,24	0,56	1,00	0,38	0,56	0,56	0,56	1,00	0,56	0,55	0,72	0,92	0,61	0,76	0,92	0,36	0,61	0,36	0,40	0,72
12	0,06	0,14	0,77	0,07	0,01	0,56	0,56	0,77	0,01	0,07	0,07	0,03	0,24	0,01	0,11	0,26	0,48	0,48	0,48	0,36	0,61	0,36	0,72	0,40
13	1,00	0,38	0,56	0,77	0,24	0,38	0,56	0,77	0,03	0,07	0,14	0,03	0,24	0,01	0,01	0,18	0,26	0,61	0,48	0,76	0,48	0,36	0,72	0,55
14	0,55	0,38	1,00	0,38	0,77	1,00	1,00	0,77	0,07	0,14	0,03	0,03	0,77	0,01	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01	0,18	0,76	0,61	0,55	0,72

Tabla 12. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 1

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0,35	-0,42	-0,29	-0,49	-0,13	0,48	0,04	-0,04	-0,11	-0,30	-0,51	-0,26	-0,46	-0,06	0,11	0,01	-0,38	-0,44	0,04	-0,05	0,13	-0,32	-0,34	-0,17
3	-0,14	-0,31	-0,26	-0,22	-0,05	0,44	-0,07	-0,07	-0,07	-0,52	-0,44	-0,18	-0,43	-0,03	-0,20	-0,48	-0,48	-0,52	-0,09	0,13	0,16	-0,30	-0,40	-0,27
4	-0,32	-0,27	-0,40	-0,26	0,02	0,37	-0,11	-0,04	-0,19	-0,56	-0,51	-0,15	-0,39	0,00	-0,02	-0,17	-0,51	-0,62	0,04	0,00	0,03	-0,37	-0,34	-0,33
5	-0,14	-0,05	-0,29	0,07	0,02	0,18	-0,15	-0,15	-0,26	-0,22	-0,59	-0,11	-0,17	0,21	-0,08	-0,14	-0,38	-0,57	0,01	-0,03	0,16	-0,53	-0,28	-0,30
6	-0,05	-0,05	-0,11	0,11	-0,02	0,37	-0,18	-0,19	-0,37	-0,15	-0,51	-0,15	-0,20	0,09	-0,11	-0,14	-0,41	-0,52	0,09	-0,03	0,10	-0,35	-0,28	-0,36
7	0,02	-0,02	-0,11	0,15	-0,05	0,29	-0,11	-0,15	-0,34	-0,11	-0,48	-0,37	-0,31	-0,15	-0,26	-0,27	-0,46	-0,68	0,04	0,08	0,08	-0,22	-0,25	-0,24
8	-0,14	0,02	-0,11	0,19	-0,13	0,33	-0,22	-0,11	-0,30	-0,37	-0,26	-0,18	-0,31	-0,18	-0,14	0,01	-0,35	-0,76	-0,06	0,00	0,03	-0,32	-0,18	-0,24
9	-0,20	-0,09	-0,11	-0,15	-0,13	0,33	-0,15	-0,07	-0,15	0,04	-0,18	-0,11	-0,09	-0,24	-0,39	-0,41	-0,54	-0,70	0,01	-0,05	0,08	-0,22	-0,28	-0,30
10	0,02	0,02	-0,15	0,07	-0,02	0,15	-0,07	-0,11	-0,22	-0,64	-0,44	-0,33	-0,31	-0,09	-0,02	0,09	-0,17	-0,44	-0,04	-0,05	0,03	-0,19	-0,22	-0,30
11	0,12	-0,02	0,02	-0,15	0,20	0,29	-0,33	0,04	0,19	-0,26	-0,29	-0,22	-0,20	-0,18	-0,05	-0,22	-0,22	-0,01	0,14	0,05	-0,16	0,04	0,03	0,03
12	-0,20	0,02	-0,26	-0,04	-0,13	0,26	0,00	0,04	-0,19	-0,22	-0,37	-0,22	-0,24	-0,24	0,02	-0,07	-0,43	-0,49	-0,01	-0,16	-0,05	-0,32	-0,22	-0,24
13	-0,47	-0,02	-0,44	0,00	-0,13	0,22	-0,11	-0,19	0,11	-0,11	-0,44	-0,33	-0,09	-0,09	-0,02	-0,30	-0,25	-0,09	0,12	-0,32	-0,21	-0,43	-0,25	-0,39
14	-0,20	0,13	-0,04	0,11	-0,24	0,18	0,04	-0,22	-0,04	-0,19	-0,40	-0,22	-0,06	0,03	0,29	0,27	-0,01	-0,30	-0,04	-0,05	0,05	-0,22	0,00	-0,20
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,11	0,09	0,21	0,04	0,65	0,04	0,88	0,88	0,64	0,21	0,03	0,27	0,05	0,84	0,63	0,95	0,08	0,04	0,85	0,81	0,54	0,13	0,13	0,44
3	0,54	0,22	0,27	0,35	0,88	0,06	0,75	0,75	0,75	0,03	0,06	0,43	0,07	0,95	0,37	0,02	0,02	0,02	0,67	0,54	0,46	0,16	0,07	0,24
4	0,15	0,28	0,09	0,27	1,00	0,12	0,64	0,88	0,43	0,02	0,03	0,53	0,10	1,00	0,94	0,43	0,02	0,00	0,85	1,00	0,90	0,08	0,13	0,14
5	0,54	0,88	0,21	0,75	1,00	0,43	0,53	0,53	0,27	0,35	0,01	0,64	0,48	0,38	0,73	0,50	0,08	0,01	0,95	0,90	0,46	0,01	0,21	0,19
6	0,84	0,88	0,64	0,64	1,00	0,12	0,43	0,43	0,12	0,53	0,03	0,53	0,39	0,74	0,63	0,50	0,06	0,02	0,67	0,90	0,62	0,10	0,21	0,11
7	0,95	1,00	0,64	0,53	0,88	0,21	0,64	0,53	0,16	0,64	0,04	0,12	0,18	0,55	0,24	0,20	0,03	0,00	0,85	0,71	0,71	0,30	0,27	0,30
8	0,54	1,00	0,64	0,43	0,65	0,16	0,35	0,64	0,21	0,12	0,27	0,43	0,18	0,46	0,53	0,95	0,10	0,00	0,76	1,00	0,90	0,13	0,41	0,30
9	0,37	0,76	0,64	0,53	0,65	0,16	0,53	0,75	0,53	0,88	0,43	0,64	0,70	0,31	0,08	0,06	0,01	0,00	0,95	0,81	0,71	0,30	0,21	0,19
10	0,95	1,00	0,53	0,75	1,00	0,53	0,75	0,64	0,35	0,01	0,06	0,16	0,18	0,74	0,94	0,67	0,43	0,04	0,85	0,81	0,90	0,36	0,33	0,19
11	0,58	1,00	0,94	0,53	0,45	0,21	0,16	0,88	0,43	0,27	0,21	0,35	0,39	0,46	0,84	0,30	0,30	0,95	0,50	0,81	0,46	0,85	0,89	0,89
12	0,37	1,00	0,27	0,88	0,65	0,27	1,00	0,88	0,43	0,35	0,12	0,35	0,31	0,31	0,94	0,76	0,04	0,02	0,95	0,46	0,81	0,13	0,33	0,30
13	0,03	1,00	0,06	1,00	0,65	0,35	0,64	0,43	0,64	0,64	0,06	0,16	0,70	0,74	0,94	0,16	0,24	0,67	0,58	0,14	0,33	0,04	0,27	0,08
14	0,37	0,65	0,88	0,64	0,36	0,43	0,88	0,35	0,88	0,43	0,09	0,35	0,81	0,95	0,19	0,20	0,95	0,16	0,85	0,81	0,81	0,30	1,00	0,37

Tabla 13. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,51	-0,11	-0,42	-0,07	0,29	-0,07	-0,16	0,24	0,11	0,29	0,29	0,11	0,42	0,51	-0,11	0,07	0,42	0,24	0,47	0,56	0,33	0,29	0,29	-0,02
3	0,56	0,11	-0,29	-0,07	0,20	-0,11	-0,11	0,47	-0,02	0,20	0,38	-0,02	0,16	0,51	-0,16	0,20	0,47	0,16	0,42	0,33	0,29	0,29	0,24	0,02
4	0,64	0,24	-0,16	0,02	0,24	-0,11	-0,02	0,38	-0,02	-0,02	0,29	-0,07	0,07	0,33	-0,16	0,24	0,47	0,29	0,69	0,42	0,42	0,33	0,33	0,29
5	0,69	0,20	-0,11	-0,07	0,24	-0,11	-0,02	0,29	0,02	-0,02	0,20	0,02	0,16	0,42	-0,02	0,29	0,69	0,47	0,69	0,47	0,42	0,38	0,33	0,29
6	0,64	0,24	0,07	0,11	0,16	0,02	-0,02	0,29	0,02	-0,11	0,20	-0,20	0,07	0,42	0,02	0,42	0,73	0,56	0,64	0,56	0,51	0,42	0,42	0,29
7	0,42	0,11	0,02	0,07	-0,16	0,11	0,07	0,11	-0,02	-0,11	-0,07	-0,38	-0,16	0,16	0,07	0,29	0,69	0,51	0,56	0,51	0,51	0,42	0,60	0,29
8	0,33	0,07	0,20	0,11	0,07	0,29	0,16	0,11	0,11	-0,07	0,02	-0,33	-0,16	0,02	-0,24	0,11	0,64	0,38	0,38	0,47	0,51	0,20	0,33	0,24
9	0,16	0,02	0,16	-0,02	-0,07	0,07	0,07	0,16	0,11	-0,07	0,02	-0,42	-0,20	0,02	0,02	0,16	0,69	0,51	0,51	0,51	0,33	0,33	0,47	0,02
10	0,16	-0,16	-0,16	-0,11	-0,33	0,02	-0,02	0,16	0,07	-0,02	0,16	-0,16	0,20	0,42	0,07	0,16	0,78	0,56	0,51	0,51	0,56	0,56	0,73	0,29
11	0,51	0,11	-0,16	0,24	0,33	0,24	-0,16	0,38	0,11	0,02	0,07	-0,16	0,29	0,51	0,24	0,33	0,56	0,56	0,33	0,51	0,60	0,51	0,33	0,29
12	0,40	-0,07	-0,31	-0,09	-0,02	-0,38	-0,11	0,16	0,07	-0,16	0,11	-0,07	0,27	0,41	-0,02	0,38	0,69	0,33	0,42	0,33	0,56	0,47	0,38	0,20
13	0,33	0,11	-0,37	0,11	0,14	-0,21	0,00	0,14	-0,13	-0,36	-0,02	-0,13	0,02	0,23	-0,08	0,21	0,18	-0,23	0,00	-0,05	0,12	0,18	0,28	0,29
14	NA	-0,45	-0,45	-0,25	-0,06	0,18	0,17	0,41	0,03	-0,03	0,00	-0,08	-0,11	0,11	-0,16	0,33	0,13	-0,07	-0,03	-0,07	0,03	0,18	0,28	0,18
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,05	0,73	0,11	0,86	0,29	0,86	0,60	0,38	0,73	0,29	0,29	0,73	0,11	0,05	0,73	0,86	0,11	0,38	0,07	0,03	0,22	0,29	0,29	1,00
3	0,03	0,73	0,29	0,86	0,48	0,73	0,73	0,07	1,00	0,48	0,16	1,00	0,60	0,05	0,60	0,48	0,07	0,60	0,11	0,22	0,29	0,29	0,38	1,00
4	0,01	0,38	0,60	1,00	0,38	0,73	1,00	0,16	1,00	1,00	0,29	0,86	0,86	0,22	0,60	0,38	0,07	0,29	0,00	0,11	0,11	0,22	0,22	0,29
5	0,00	0,48	0,73	0,86	0,38	0,73	1,00	0,29	1,00	1,00	0,48	1,00	0,60	0,11	1,00	0,29	0,00	0,07	0,00	0,07	0,11	0,16	0,22	0,29
6	0,01	0,38	0,86	0,73	0,60	1,00	1,00	0,29	1,00	0,73	0,48	0,48	0,86	0,11	1,00	0,11	0,00	0,03	0,01	0,03	0,05	0,11	0,11	0,29
7	0,11	0,73	1,00	0,86	0,60	0,73	0,86	0,73	1,00	0,73	0,86	0,16	0,60	0,60	0,86	0,29	0,00	0,05	0,03	0,05	0,05	0,11	0,02	0,29
8	0,22	0,86	0,48	0,73	0,86	0,29	0,60	0,73	0,73	0,86	1,00	0,22	0,60	1,00	0,38	0,73	0,01	0,16	0,16	0,07	0,05	0,48	0,22	0,38
9	0,60	1,00	0,60	1,00	0,86	0,86	0,86	0,60	0,73	0,86	1,00	0,11	0,48	1,00	1,00	0,60	0,00	0,05	0,05	0,05	0,22	0,22	0,07	1,00
10	0,60	0,60	0,60	0,73	0,22	1,00	1,00	0,60	0,86	1,00	0,60	0,60	0,48	0,11	0,86	0,60	0,00	0,03	0,05	0,05	0,03	0,03	0,00	0,29
11	0,05	0,73	0,60	0,38	0,22	0,38	0,60	0,16	0,73	1,00	0,86	0,60	0,29	0,05	0,38	0,22	0,03	0,03	0,22	0,05	0,02	0,05	0,22	0,29
12	0,11	0,78	0,23	0,72	1,00	0,16	0,73	0,60	0,86	0,60	0,73	0,86	0,28	0,10	1,00	0,16	0,00	0,22	0,11	0,22	0,03	0,07	0,16	0,48
13	0,24	0,70	0,18	0,68	0,59	0,40	1,00	0,59	0,59	0,15	0,93	0,59	0,93	0,39	0,77	0,40	0,50	0,36	1,00	0,86	0,64	0,50	0,29	0,29
14	NA	0,12	0,12	0,38	0,82	0,50	0,52	0,11	0,92	0,92	1,00	0,77	0,68	0,68	0,54	0,21	0,63	0,78	0,92	0,78	0,92	0,50	0,29	0,50

Tabla 14. Valor de correlación Kendall con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de número de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0,29	-0,22	-0,18	-0,38	0,01	-0,09	0,00	0,01	-0,23	-0,37	-0,20	-0,34	-0,46	-0,10	-0,38	-0,23	-0,40	-0,11	-0,07	-0,14	-0,09	-0,27	-0,75	-0,45
3	-0,31	-0,27	-0,27	-0,42	-0,06	-0,13	-0,18	-0,24	-0,25	-0,37	-0,36	-0,38	-0,39	-0,06	-0,29	-0,26	-0,51	-0,29	-0,29	-0,14	-0,11	-0,24	-0,77	-0,47
4	-0,27	-0,18	-0,22	-0,33	0,03	-0,04	-0,29	-0,42	-0,23	-0,41	-0,38	-0,41	-0,34	0,08	-0,33	-0,28	-0,40	-0,29	-0,35	-0,21	-0,14	-0,31	-0,75	-0,27
5	-0,18	-0,11	-0,20	-0,15	0,12	-0,07	-0,34	-0,46	-0,30	-0,39	-0,42	-0,38	-0,23	-0,03	-0,33	-0,19	-0,40	-0,29	-0,33	-0,23	-0,11	-0,29	-0,66	-0,29
6	-0,25	-0,04	0,00	0,04	0,14	-0,13	-0,25	-0,55	-0,32	-0,34	-0,49	-0,32	-0,28	-0,06	-0,31	-0,14	-0,35	-0,22	-0,35	-0,28	-0,09	-0,31	-0,64	-0,27
7	-0,31	0,27	-0,07	0,20	0,19	-0,04	-0,16	-0,55	-0,30	-0,48	-0,49	-0,34	-0,32	-0,26	-0,24	0,03	-0,27	-0,13	-0,31	-0,32	-0,16	-0,09	-0,35	-0,02
8	-0,20	0,11	-0,20	0,18	0,28	-0,11	-0,31	-0,51	-0,44	-0,54	-0,65	-0,49	-0,37	-0,46	-0,49	-0,32	-0,40	-0,20	-0,49	-0,21	-0,07	-0,27	-0,29	-0,07
9	-0,16	0,13	-0,13	0,13	0,14	-0,02	-0,18	-0,42	-0,39	-0,50	-0,60	-0,36	-0,34	-0,30	-0,24	-0,08	-0,31	-0,15	-0,38	-0,21	-0,20	-0,13	-0,24	0,04
10	-0,02	0,09	-0,27	0,02	0,03	-0,20	-0,22	-0,46	-0,32	-0,46	-0,58	-0,38	-0,46	-0,39	-0,44	-0,12	-0,42	-0,27	-0,51	-0,34	-0,05	-0,20	-0,51	-0,02
11	-0,18	-0,13	-0,27	-0,02	0,17	0,11	0,07	-0,30	-0,42	-0,41	-0,27	-0,10	-0,28	-0,28	-0,11	-0,01	-0,07	0,09	0,13	-0,23	-0,07	-0,27	-0,24	-0,11
12	-0,21	-0,28	-0,25	-0,21	-0,06	-0,28	-0,47	-0,51	-0,21	-0,30	-0,47	-0,23	-0,40	-0,09	-0,49	-0,21	-0,35	-0,33	-0,40	-0,12	-0,07	-0,27	-0,55	-0,40
13	-0,39	-0,52	-0,37	-0,48	-0,19	-0,16	-0,44	-0,45	-0,06	-0,20	-0,43	-0,20	-0,43	-0,18	-0,52	-0,27	-0,40	-0,39	-0,26	-0,03	-0,06	-0,26	-0,69	-0,67
14	-0,32	-0,09	-0,16	-0,46	-0,56	-0,23	-0,32	-0,11	-0,33	-0,23	-0,22	-0,34	-0,42	-0,19	-0,49	-0,28	-0,35	-0,27	-0,14	-0,13	-0,13	-0,28	-0,37	-0,43
Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0,15	0,27	0,38	0,06	0,96	0,66	1,00	0,96	0,27	0,07	0,32	0,10	0,02	0,62	0,06	0,25	0,05	0,58	0,74	0,48	0,66	0,19	0,00	0,03
3	0,12	0,19	0,19	0,04	0,78	0,51	0,38	0,25	0,22	0,07	0,08	0,06	0,05	0,78	0,15	0,21	0,01	0,15	0,15	0,48	0,58	0,23	0,00	0,02
4	0,19	0,38	0,27	0,10	0,87	0,83	0,15	0,04	0,27	0,04	0,06	0,05	0,09	0,70	0,10	0,17	0,05	0,15	0,08	0,30	0,51	0,12	0,00	0,19
5	0,38	0,58	0,32	0,44	0,55	0,74	0,10	0,02	0,15	0,05	0,04	0,06	0,25	0,87	0,10	0,35	0,05	0,15	0,10	0,25	0,58	0,15	0,00	0,15
6	0,23	0,83	1,00	0,83	0,48	0,51	0,23	0,01	0,12	0,09	0,02	0,13	0,17	0,78	0,12	0,48	0,08	0,27	0,08	0,17	0,66	0,12	0,00	0,19
7	0,12	0,19	0,74	0,32	0,35	0,83	0,44	0,01	0,15	0,02	0,02	0,10	0,11	0,20	0,23	0,87	0,19	0,51	0,12	0,11	0,44	0,66	0,08	0,91
8	0,32	0,58	0,32	0,38	0,17	0,58	0,12	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,07	0,02	0,02	0,11	0,05	0,32	0,02	0,30	0,74	0,19	0,15	0,74
9	0,44	0,51	0,51	0,51	0,48	0,91	0,38	0,04	0,06	0,01	0,00	0,08	0,09	0,14	0,23	0,70	0,12	0,44	0,06	0,30	0,32	0,51	0,23	0,83
10	0,91	0,66	0,19	0,91	0,87	0,32	0,27	0,02	0,12	0,02	0,00	0,06	0,02	0,05	0,03	0,55	0,04	0,19	0,01	0,09	0,83	0,32	0,01	0,91
11	0,38	0,51	0,19	0,91	0,41	0,58	0,74	0,14	0,04	0,04	0,19	0,67	0,17	0,17	0,58	0,96	0,74	0,66	0,51	0,25	0,74	0,19	0,23	0,58
12	0,30	0,18	0,22	0,30	0,78	0,17	0,02	0,01	0,32	0,14	0,02	0,28	0,05	0,66	0,02	0,30	0,08	0,10	0,05	0,55	0,74	0,19	0,01	0,05
13	0,08	0,03	0,09	0,03	0,37	0,46	0,03	0,03	0,78	0,32	0,04	0,32	0,04	0,39	0,01	0,20	0,06	0,06	0,20	0,87	0,78	0,22	0,00	0,00
14	0,17	0,70	0,49	0,05	0,01	0,29	0,12	0,60	0,13	0,29	0,33	0,11	0,05	0,37	0,02	0,19	0,09	0,18	0,50	0,54	0,53	0,18	0,08	0,04

Una forma de visualizar la variabilidad de la concentración de número de partículas con respecto a la velocidad y dirección del viento son las gráficas polares plot. Estas también permiten identificar la proveniencia de las concentraciones de partículas e inferir algunas fuentes de emisión.

En la Figura 37 se presenta el polarPlot del promedio diario del número de partículas totales sobre el mapa de las cercanías a la estación para la campaña de Las Ferias, en donde se observa que las mayores concentraciones de número de partículas provienen del occidente, donde se encuentra la Avenida Calle 80 representada en el mapa en color naranja. Por lo que la influencia de las emisiones vehiculares en la cantidad de partículas es muy importante para esta ubicación. Esto se ve de forma clara en la Figura 38, donde se presenta cada polarPlot por rangos de horas, en donde en las horas de la madrugada (0:00 H a 6:00 H) las CNP provenientes del occidente son casi nulas, después en las horas de la mañana (7:00 H a 12:00 H) esta concentración aumenta y persiste durante el día, de forma similar al tráfico vehicular. En la noche, aunque se reduce la presencia de vehículos, permaneciendo las CNP hasta media noche debido a que la velocidad del viento decae y por la tanto la dispersión de contaminante. Por otro lado, en los todos los polarPlot se observan unas concentraciones de menor valor provenientes de oriente y suroriente, estas partículas pueden provenir del oriente de la ciudad, que por el viento son arrastradas a la estación de Las Ferias.

Figura 37. PolarPlot de número de partículas para la campaña de Las Ferias

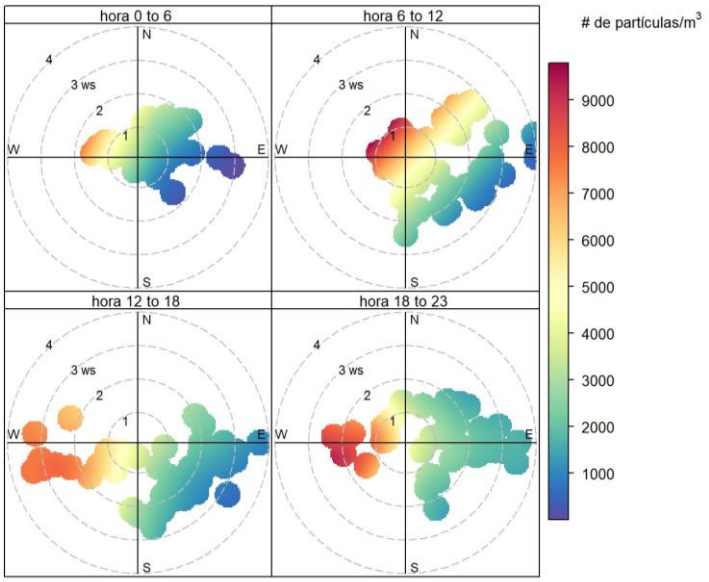


Figura 38. PolarPlot de la concentración promedio del número de partículas para la campaña de Las Ferias

Los polarPlots en la estación de San Cristóbal muestran que la campaña San Cristóbal 2 presenta casi el doble de las máximas CNP de la campaña San Cristóbal 1. Sin embargo, ambas campañas tienen un comportamiento similar como se observa en las Figura 39 y Figura 41, en donde se presentan los polarPlot promedio día de CNP. En general ambas campañas presentan como mayor CNP proviene del noroccidente. Estas concentraciones posiblemente provenientes de la avenida carrera décima que tienen un alto flujo de vehículos y por la cual pasa Transmilenio. También se observa una concentración de fondo que presenta una CNP de casi 1000 #/m^3, que proviene del oriente, donde no hay presencia de fuentes de emisión antropogénicas y son transportadas por velocidades altas, por lo que pueden ser partículas pequeñas provenientes de fuera de la ciudad posiblemente de fuentes biogénicas. Para descartar emisiones provenientes de incendios se realizó una verificación de posibles hotspots en el oriente de la región a través de la plataforma FIRMS (NASA, 2023), en donde no se encontró ningún posible incendio en las fechas de ambas campañas de medición.

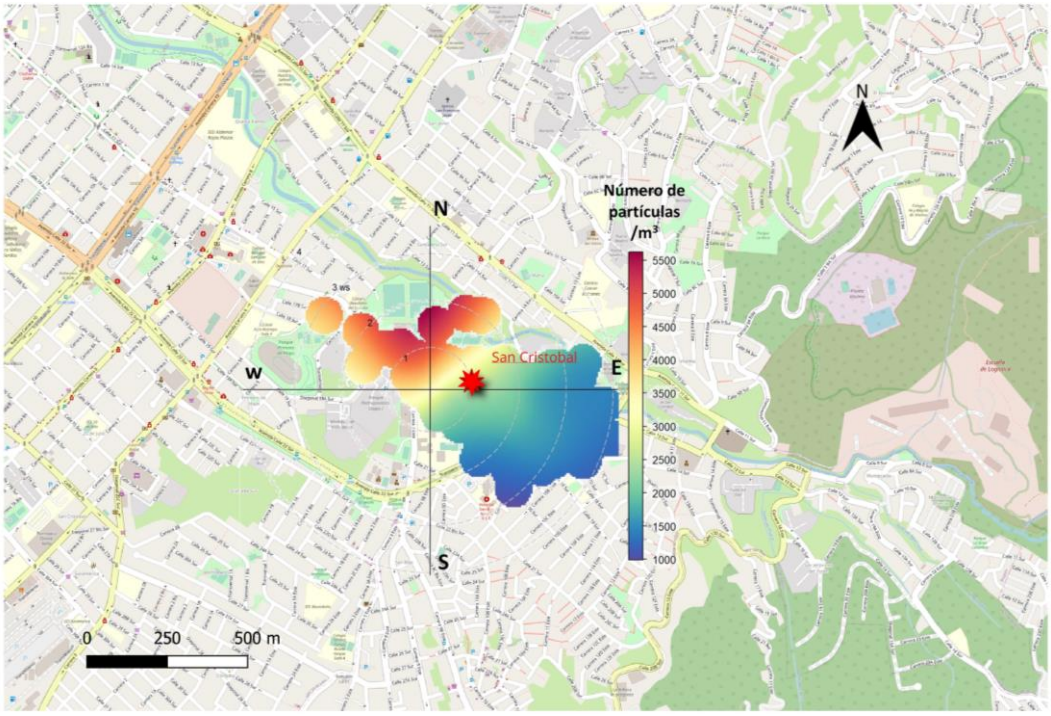
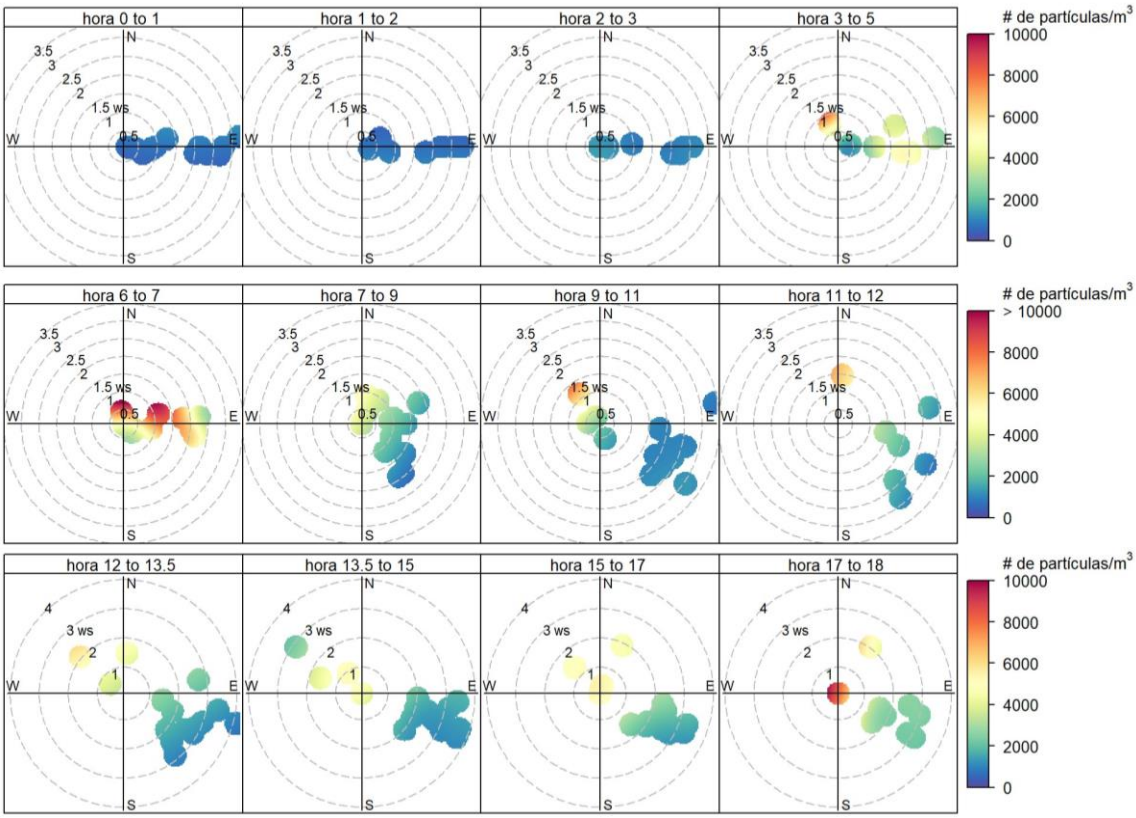


Figura 39. PolarPlot de la concentración promedio día del número de partículas para la campaña San Cristóbal 1



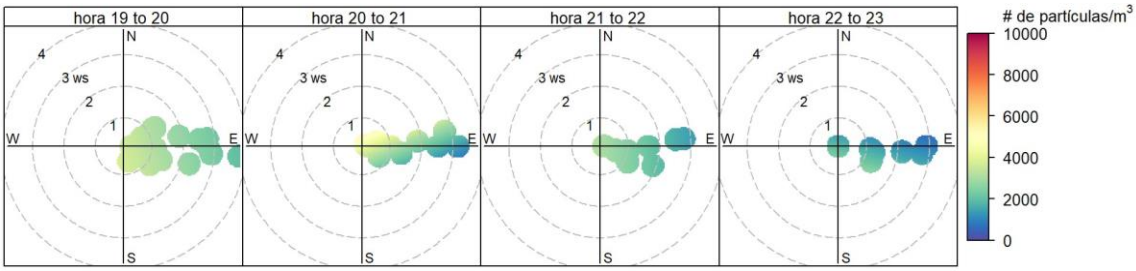


Figura 40. PolarPlot de número de partículas para la campaña de San Cristóbal 1 por rangos de las horas del día

Adicionalmente, los polarPlot por hora para ambas campañas (Figura 40 y Figura 42), muestran que en las horas de la madrugada las emisiones de fondo persisten desde los cerros orientales y entre las 3:00 H a 7:00 H aumentan. Estas partículas no se encuentran relacionadas con las emisiones por vehículos debido a su dirección de proveniencia y a que las concentraciones de material particulado asociadas a la hora pico de la mañana, en la estación de San Cristóbal se presentan después de las 8:00 H como se discutió en la sección 3.2. Durante las horas de la mañana, las CNP provenientes del noroccidente aumentan y llegan a la estación a velocidades relativamente bajas, lo que respalda la hipótesis que tenga como fuentes las vías cercanas de alto flujo vehicular. Durante las horas de la noche las CNP de esta dirección disminuyen y permanecen las concentraciones de fondo provenientes del oriente.

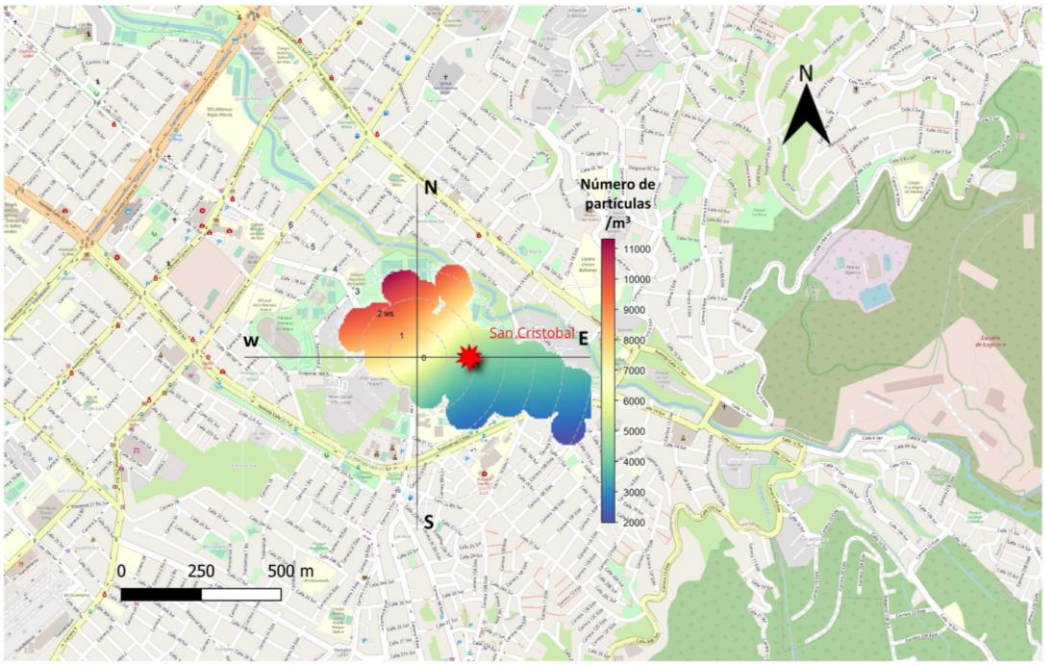


Figura 41. PolarPlot de la concentración promedio día del número de partículas para la campaña San Cristóbal 2

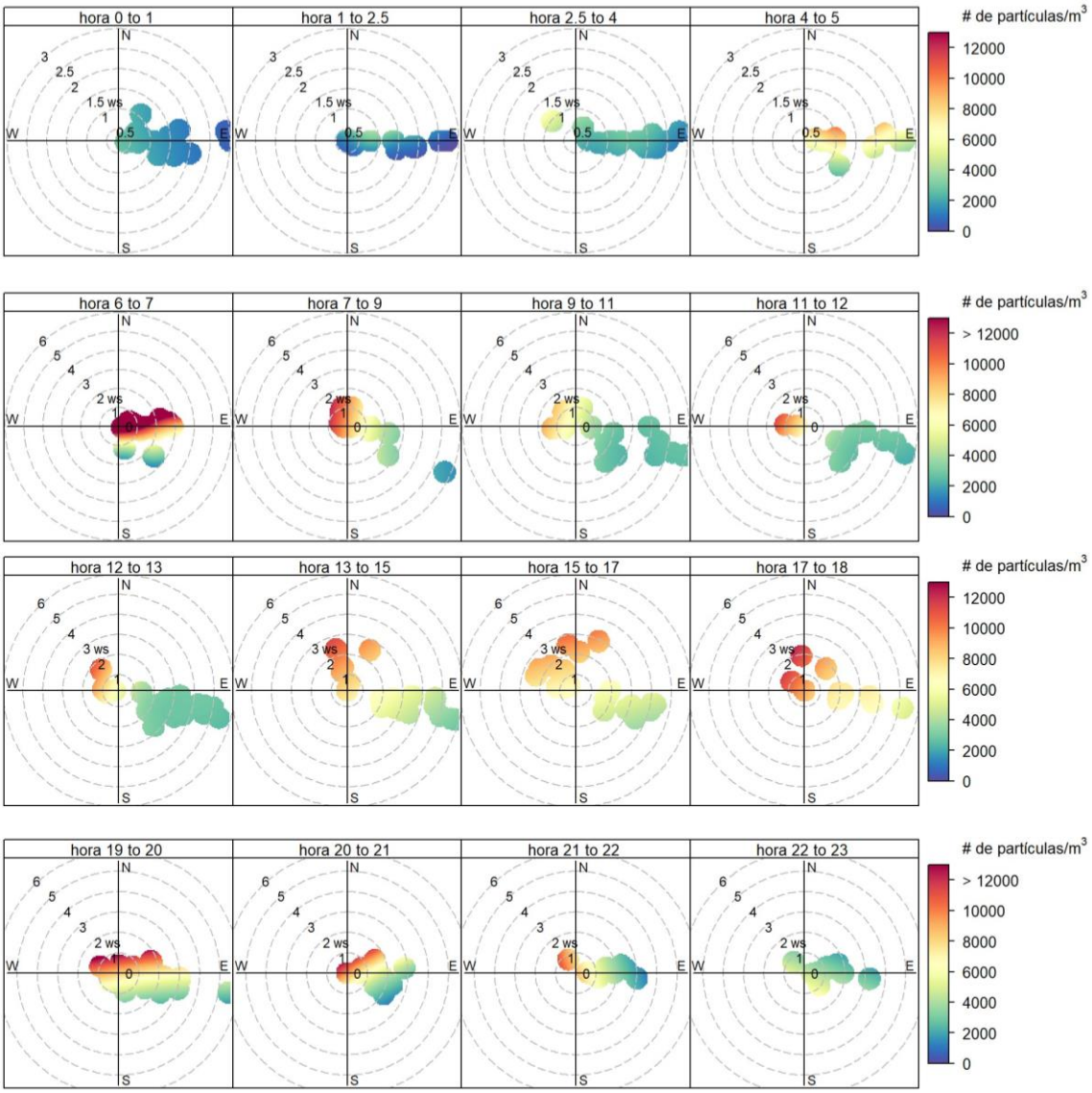


Figura 42. PolarPlot de número de partículas para la campaña de San Cristóbal 2 por rangos de las horas del día

3.6 Componentes principales por campaña de medición

Como se mencionó en la sección se realizó el Análisis de Componente Principales, que permitió identificar 3 componentes principales para cada campaña de medición. A

continuación, se presentan los resultados y un análisis de las fuentes o fenómenos asociados a cada uno de ellos.

3.6.1 Campaña de Las Ferias

Para la campaña de Las Ferias los resultados de los tres componentes principales se presentan en la Figura 43. El componente RC1 representa el 37% de la varianza, esta se puede asociar a las emisiones vehiculares generadas directamente sobre vía más cercana a la estación (avenida calle 80), debido que este componente tiene una carga alta para contaminantes como material particulado, NO_X y CO, estos últimos asociados a de emisiones vehiculares; adicionalmente, tiene cargas importantes para las etapas del ELPI menores a 1 µm o partículas ultrafinas, por lo que se puede inferir una alta cercanía a la fuente de emisión, ya que estas partículas aún se encuentran en proceso de crecimiento.

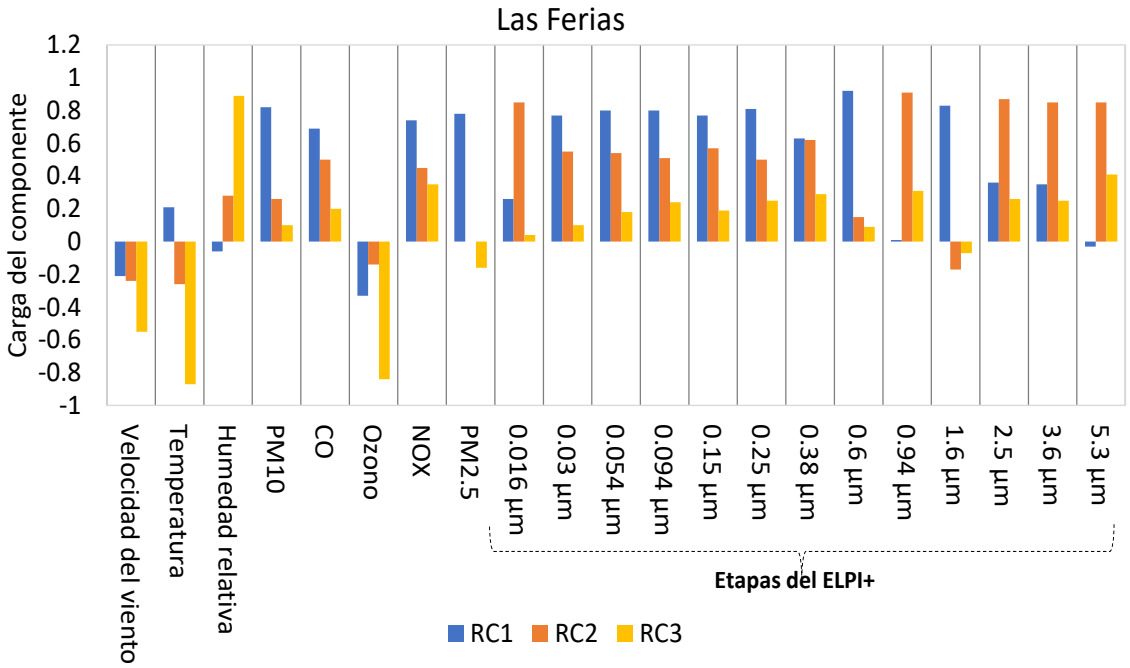


Figura 43. Factores relevantes identificados para la campaña de Las Ferias

El componente RC2 representa el 29% de la varianza y se asociada a emisiones de antropogénicas de fuentes a combustión que son arrastradas de otra parte de la ciudad. Esto se concluye debido a que este componente tiene cargas altas en las partículas de

tamaño mayor a 2.5 µm, por lo que se pueden pensar que son partículas de mayor tiempo de vida. También presenta carga importante en las concentraciones de PM_{10}, CO y NO_X y casi nulas para PM2.5. Esta afirmación se encuentra acorde con lo observado en el análisis con polarPlot, en donde se identificó una CNP proveniente del oriente de la ciudad a velocidades del viento mayores a 3 m/s.

El componente RC3 se encuentra asociado a condiciones meteorológicas. Esto se concluye porque este componente tiene una carga positiva alta en la mayoría de las etapas del equipo ELPI+. Además, tiene una carga alta con respecto a la humedad relativa e inversa con respecto a la temperatura y a la concentración de ozono, por lo que se puede intuir que este componente tiene relevancia en las horas alta de la noche y horas de la madrugada, donde emisiones de fuentes antropogénicos no son de relevancia. Este componente tiene un 16% de la varianza, por lo que se puede pensar que se encuentra asociado a concentraciones bajas de número de partículas.

3.6.2 Campañas de San Cristóbal 1 y San Cristóbal 2

Las campañas realizadas en la estación de San Cristóbal presentaron tres componentes principales cada una pero que son semejantes entre sí, como se presenta en la Figura 44 y Figura 45. El componente RC1 tiene una carga importante para las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, y se encuentra asociado a la CNP de la mayoría de los diámetros, especialmente los superiores a ultrafinas. Por lo que este componente se asocia a fuentes antropogénicas, especialmente fuentes vehiculares que se identificaron en los análisis de polarPlot. Este componente representa la varianza del 46% para San Cristóbal 1 y 46% para San Cristóbal 2, por lo que representan las CNP más altas observadas en esta estación.

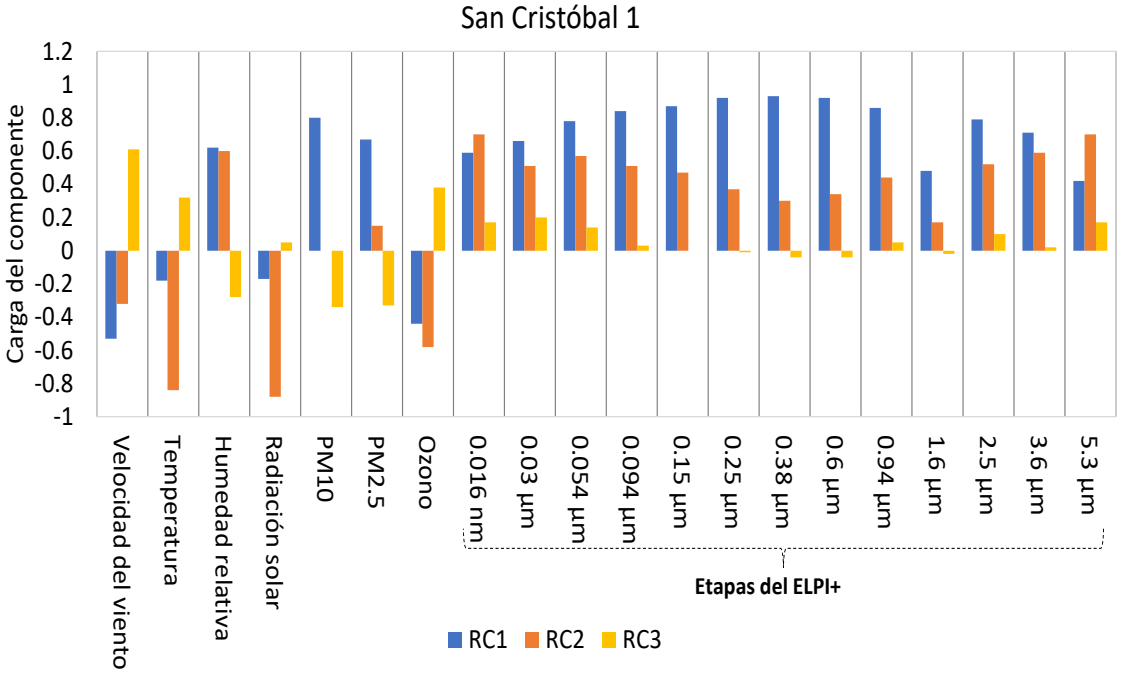


Figura 44. Factores relevantes identificados para la campaña de San Cristóbal 1

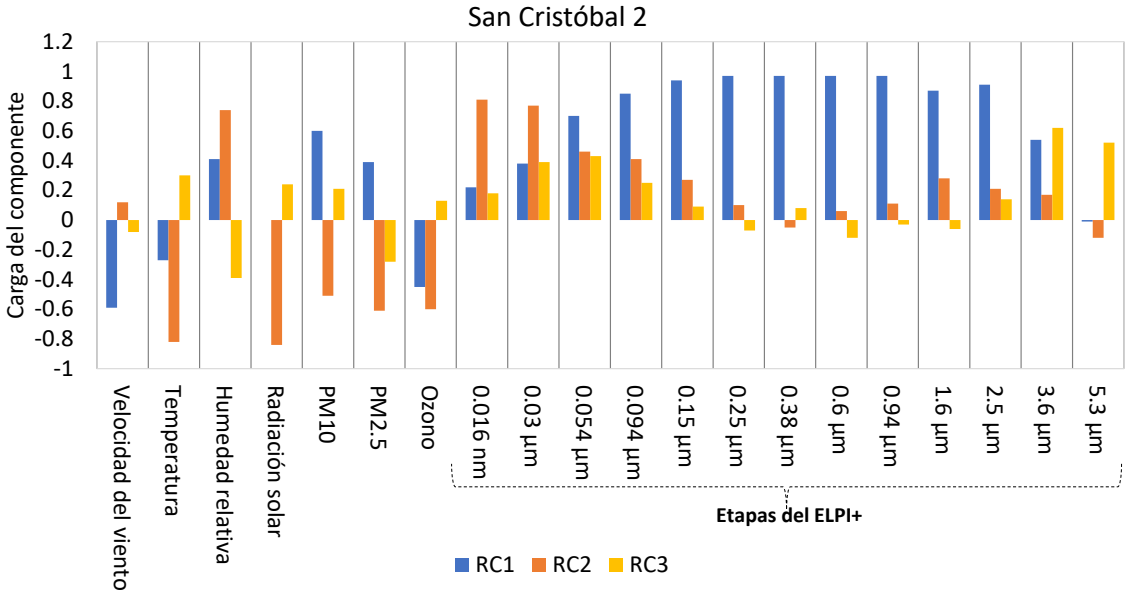


Figura 45. Factores relevantes identificados para la campaña de San Cristóbal 2

El componente RC2 representa la varianza de los datos en 26% para San Cristóbal 1 y 24% para San Cristóbal 2. Presenta una relación positiva con las etapas de medición para partículas ultrafinas, especialmente de las etapas 2 y 3. Este cuenta con una carga inversa o nula con las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10}, por lo que no se puede asociar a fuentes

de emisión directa de material particulado. Adicionalmente, su carga en ambas campañas es inversa a la temperatura, radiación solar y concentraciones de ozono, y altamente positiva con la humedad relativa. Esto permite concluir que este componente representa fenómenos de transporte de partículas que se desarrollan en las horas de la noche y en la madrugada y que tiene una alta influencia alta de condiciones meteorológicas. Este componente es posiblemente biogénico provenientes de los cerros orientales según los resultados de los polarPlot.

Finalmente, el componente RC3 (que representa la varianza del 7% y 8% de las campañas de San Cristóbal 1 y 2), también se asoció con material transportado, muy relacionado a las CNP de fondo que se identificaron en esta estación en la sección 3.5 y que se pueden suponer de fuentes biogénicas por la dirección de su proveniencia. Este componente tiene una carga inversa a $PM_{2.5}$, por lo que se descarta las emisiones vehiculares cercanas. Así mismo, es el único componente que tiene carga positiva con ozono y en concordancia una carga positiva con la temperatura y radiación solar, e inversa con la humedad, por lo que se asocia a fenómenos que suceden en las horas del día. Este componente tiene afinidad con partículas ultrafinas como partículas gruesas por lo que la distancia que recorrieron para llegar a la estación se puede suponer distinta para cada rango de diámetro. Es decir, que pueden provenir tanto de vegetación cercana como lejana. Estas últimas se pueden asociar a la carga positiva de la velocidad de viento, variable que presentó los valores más altos en la campaña de San Cristóbal 2.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Este estudio buscó realizar un ejercicio pionero en el país en la medición de la CNP y PNSD con el equipo contador de partículas ELPI+ en dos estaciones de monitoreo de calidad del aire del de Bogotá. Estas mediciones se realizaron en tres campañas de medición entre junio y octubre de 2017. Los resultados obtenidos fueron procesados de tal forma que permitieron generar promedios horarios de concentración de partículas entre diámetros medios desde 0.016 µm hasta 5.3 µm. Estos resultados en conjunto con la medición de variables metereológicas y concentraciones de número de partículas de las estaciones de calidad del aire permitieron hacer análisis de proveniencia de contaminantes, correlaciones estadísticas y análisis de componentes de los cuales se pudieron obtener las siguientes conclusiones.

La temporalidad afecta significativamente el comportamiento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en cada estación de monitoreo. Esta variable se encuentra relaciona con partículas ultrafinas que en mayor proporción componen la PNSD de las mediciones realizadas, por lo que influencia de la temporalidad también afecta las mediciones de CNP. De este modo, se puede generar la hipótesis de que si se hubieran realizado de forma simultánea las mediciones con el equipo ELPI+ en ambas locaciones, las mayores CNP se hubieran presentado en la estación de las Ferias y no en la estación de San Cristóbal. Por esta razón, para fines de los resultados de este estudio no se comparan de forma directa los valores CNP por estación de CNP sino por campaña de medición.

Cada uno de los análisis respalda la fuerte influencia de las emisiones de fuentes vehiculares sobre las mediciones observada en la campaña de Las Ferias. Es así que los

picos de CNP se presentaron en la mañana con valores cercanos a $5.5x10^3$ #/cm^3, provenientes principalmente en dirección de la Avenida calle 80 y con una PNSD unimodal centrada principalmente diámetros de partículas de modos Aitken y acumulación (diámetros entre 60 a 108 nm). De igual forma, se presenta una diferencia del 64% entre los promedios de CNP entre fines de semana y entre semana asociada principalmente a la reducción de la actividad vehicular los domingos.

El valor máximo de CNP en las campañas de San Cristóbal 1 y San Cristóbal 2 se presentan en las horas de la mañana a las 6:00 H ($5.3 x10^3$ #/cm^3) y a las 7:00 H ($1.03x10^4$ #/cm^3), respectivamente. Independiente de que la campaña de San Cristóbal 1 presenta una PNSD unimodal y la de San Cristóbal 2 una distribución bimodal, en ambas campañas se observa una moda de CNP en el mismo diámetro que en la campaña de Las Ferias, la cual se ha demostrado se encuentra altamente influenciada por fuentes vehiculares, comportamiento que se maximiza en las horas de la mañana por la hora pico de tráfico. Sin embargo, en el análisis de proveniencia de los vientos se muestra que en horas de la mañana en la estación de San Cristóbal hay CNP moderadas que vienen en dirección de los cerros orientales. Por tal motivo se concluye que los picos de concentración tienen una aportación combinada de emisiones de fuentes vehiculares y posibles fuentes biogénicas de fondo urbano. Esto explicaría el por qué en el perfil horario de concentración de $PM_{2.5}$ en la estación de San Cristóbal, las concentraciones asociadas al pico de tráfico de la mañana se observan de forma tardía (casi a las 9:00 H para la campaña de San Cristóbal 1 y casi a las 11:00 H en la campaña de San Cristóbal 2). Tampoco se descarta la influencia de condiciones meteorológicas como una altura mínima de capa limite que se presenta a estas horas de la mañana, que impide la dispersión de partículas en el aire.

San Cristóbal 2 fue la campaña de medición con la mayor CNP (con un valor promedio de $5.1x\ 10^3 \pm 3.7\ x\ 10^3$ #/m^3), en donde se triplica la presencia de partículas en modo nucleación en comparación con las demás campañas, reflejándose en un comportamiento bimodal de su PNSD. La primera moda de esta distribución (diámetros entre 60 a 108 nm) presentada a las 7:00 H la segunda (diámetro de 16 nm) se presenta entre 17:00 H a las 21:00H. Ambos picos fueron asociadas a una combinación de dos fuentes de emisión. La primera corresponde a la concentración de fondo de fuentes biogénicas proveniente del oriente, respaldados por dos componente principales asociados a fenómenos diurnos y nocturnos; la segunda asociada a emisiones de fuentes vehiculares generadas en vías

cercanas como la Avenida Decima (dirección noroccidente) que presenta un alto flujo vehicular, identificó como componentes principales que explica la mayor cantidad de varianza de los datos y que se encuentra asociado fuertemente a concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10}.

Los análisis de correlación entre las variables meteorológicas (como humedad y velocidad del viento) y las CNP presentaron pocos resultados con valores de p-value valioso. Esto no descarta la influencia de la meteorología en el comportamiento de las CNP, ya que en el análisis de componentes principales se identificaron factores con alta carga de correlación a variables meteorológicas, que aportaban un importante porcentaje de la varianza de los datos, especialmente en las campañas de la estación de San Cristóbal (~20%).

4.2 Recomendaciones

Este estudio demostró que la caracterización del tamaño partícula en conjunto con mediciones de variables meteorológicas y de concentración de contaminantes, pude brindar información sobre posibles fuentes aportantes a la contaminación en zonas específicas de la ciudad. Por lo que se recomienda continuar realizando estudios similares que puedan tener tiempos de campañas de medición más largos y se realicen en otros sitios de la ciudad, pudiendo identificar otra clase de fuentes de emisión con el uso de modelos de receptores más robustos.

El comportamiento atípico bimodal de la PNSD de la campaña de San Cristóbal 2, y sus mayores CNP en comparación con las demás campañas, centrado especialmente en aporte de partículas en modo nucleación, no se pudo explicar en su totalidad. Es así, que se sugiere comprobar si este fenómeno ocurre periódicamente en estas épocas del año o fue un evento específico de esa campaña. Esto puede realizarse a través de otras campañas de medición en la estación de San Cristóbal o se pueden usar otras herramientas como modelos de calidad que permitan dar explicación a este comportamiento.

Se recomienda tanto a autoridades amiéntales locales y regionales a realizar estudios de caracterización de tamaño de partícula, los cuales pueden ayudar al mejorar el entendiendo de la contaminación en la atmósfera y sus afectaciones sobre la salud de la población.

A. Anexo: Resultados de correlación con prueba de Spearman

En las siguientes tablas se presentan los resultados de correlación entre variables meteorológicas y CNP que se hicieron de forma complementaria con la prueba Spearman.

Tabla Anexo A. 1. Valor de correlación Spearman con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de numero de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 1.

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.48	0.07	-0.07	0.29	-0.89	-0.18	0.21	0.21	0.89	0.93	0.75	0.96	0.46	0.79	0.60	0.65	0.42	0.22	0.42	0.07	0.00	0.07	0.12	0.40
3	0.62	0.32	-0.43	-0.32	-0.79	-0.18	0.11	0.21	0.79	0.86	0.39	0.68	-0.14	0.76	0.60	0.38	0.28	0.08	0.42	0.00	-0.23	0.15	-0.12	-0.07
4	0.74	0.36	-0.25	0.14	-0.93	-0.14	0.29	0.14	0.79	0.75	0.39	0.86	0.32	0.71	0.55	0.33	0.20	0.28	0.52	0.02	-0.08	0.18	-0.12	-0.02
5	0.90	0.82	0.04	0.18	-0.96	-0.50	0.04	0.14	0.93	0.86	0.54	0.68	0.29	0.60	0.43	0.37	0.37	0.32	0.38	0.17	-0.07	0.20	0.21	0.07
6	0.93	0.71	-0.18	0.32	-0.89	-0.54	0.04	0.32	0.93	0.64	0.54	0.68	0.11	0.67	0.33	0.10	0.23	0.32	0.47	0.22	0.00	0.17	0.50	0.36
7	0.88	0.39	0.04	0.29	-0.68	-0.43	0.07	0.29	0.82	0.46	0.46	0.68	0.04	0.43	0.21	0.18	0.17	0.38	0.42	0.30	0.10	0.15	0.45	0.57
8	0.69	0.57	0.04	0.14	-0.68	-0.21	0.07	0.29	0.93	0.61	0.54	0.86	0.04	0.69	0.43	0.32	0.23	0.43	0.53	0.43	0.40	0.50	0.83	0.76
9	0.52	0.64	0.04	0.21	-0.68	-0.25	0.07	0.29	0.89	0.75	0.71	0.86	0.21	0.52	0.45	0.23	0.22	0.30	0.18	0.18	-0.08	0.32	0.29	0.29
10	0.86	0.71	0.21	0.64	-0.86	-0.36	0.25	0.39	0.82	0.39	0.32	0.39	0.11	0.62	0.43	0.35	0.80	0.78	0.92	0.82	0.83	0.78	0.90	0.90
11	-0.43	-0.14	-0.11	-0.11	-0.57	-0.32	0.11	-0.21	0.32	0.25	-0.25	-0.11	-0.39	-0.29	-0.14	-0.07	0.25	0.05	-0.05	-0.38	-0.33	-0.38	-0.45	-0.26
12	0.69	0.68	0.11	0.79	-0.89	-0.36	0.21	0.21	0.93	0.75	0.79	0.86	0.54	0.83	0.64	0.40	0.33	0.35	0.30	0.30	0.15	0.28	0.19	0.31
13	0.05	-0.43	-0.36	-0.11	-0.57	-0.46	0.32	0.32	0.86	0.71	0.68	0.89	0.54	0.76	0.86	0.52	0.32	0.20	0.20	-0.20	-0.32	-0.32	-0.29	-0.29
14	0.24	-0.43	0.00	0.39	-0.21	-0.14	0.07	0.18	0.82	0.68	0.89	0.86	0.18	0.83	0.86	0.58	0.83	0.90	0.83	0.55	0.15	-0.17	-0.31	-0.19
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.24	0.91	0.91	0.56	0.01	0.71	0.66	0.66	0.01	0.01	0.07	0.00	0.30	0.03	0.13	0.07	0.27	0.58	0.27	0.88	1.00	0.88	0.79	0.33
3	0.11	0.50	0.35	0.50	0.05	0.71	0.84	0.66	0.05	0.02	0.40	0.11	0.78	0.04	0.13	0.31	0.46	0.84	0.27	1.00	0.55	0.71	0.79	0.88
4	0.05	0.44	0.59	0.78	0.01	0.78	0.56	0.78	0.05	0.07	0.40	0.02	0.50	0.06	0.17	0.39	0.61	0.46	0.16	0.98	0.84	0.64	0.79	0.98
5	0.00	0.03	0.96	0.71	0.00	0.27	0.96	0.78	0.01	0.02	0.24	0.11	0.56	0.13	0.30	0.34	0.34	0.41	0.31	0.68	0.88	0.61	0.62	0.88
6	0.00	0.09	0.71	0.50	0.01	0.24	0.96	0.50	0.01	0.14	0.24	0.11	0.84	0.08	0.43	0.81	0.55	0.41	0.21	0.58	1.00	0.68	0.22	0.39
7	0.01	0.40	0.96	0.56	0.11	0.35	0.91	0.56	0.03	0.30	0.30	0.11	0.96	0.30	0.62	0.64	0.68	0.31	0.27	0.44	0.81	0.71	0.27	0.15
8	0.07	0.20	0.96	0.78	0.11	0.66	0.91	0.56	0.01	0.17	0.24	0.02	0.96	0.07	0.30	0.41	0.55	0.25	0.15	0.25	0.29	0.18	0.02	0.04
9	0.20	0.14	0.96	0.66	0.11	0.59	0.91	0.56	0.01	0.07	0.09	0.02	0.66	0.20	0.27	0.55	0.58	0.44	0.64	0.64	0.84	0.41	0.50	0.50
10	0.01	0.09	0.66	0.14	0.02	0.44	0.59	0.40	0.03	0.40	0.50	0.40	0.84	0.11	0.30	0.36	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00
11	0.30	0.78	0.84	0.84	0.20	0.50	0.84	0.66	0.50	0.59	0.59	0.84	0.40	0.50	0.75	0.88	0.52	0.91	0.91	0.31	0.39	0.31	0.27	0.54
12	0.07	0.11	0.84	0.05	0.01	0.44	0.66	0.66	0.01	0.07	0.05	0.02	0.24	0.02	0.10	0.29	0.39	0.36	0.44	0.44	0.71	0.46	0.66	0.46
13	0.93	0.35	0.44	0.84	0.20	0.30	0.50	0.50	0.02	0.09	0.11	0.01	0.24	0.04	0.01	0.16	0.41	0.61	0.61	0.61	0.41	0.41	0.50	0.50
14	0.58	0.35	1.00	0.40	0.66	0.78	0.91	0.71	0.03	0.11	0.01	0.02	0.71	0.02	0.01	0.11	0.01	0.00	0.01	0.13	0.71	0.68	0.46	0.66

Tabla Anexo A. 2. Valor de correlación Spearman con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de numero de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2.

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.70	-0.16	-0.49	-0.12	0.32	-0.05	-0.21	0.36	0.08	0.33	0.43	-0.01	0.60	0.66	-0.14	0.10	0.52	0.33	0.64	0.68	0.52	0.30	0.36	-0.03
3	0.76	0.19	-0.38	-0.08	0.24	-0.12	-0.20	0.55	-0.01	0.22	0.43	-0.05	0.22	0.66	-0.19	0.28	0.56	0.21	0.55	0.52	0.39	0.30	0.35	0.04
4	0.81	0.37	-0.20	-0.01	0.33	-0.08	0.05	0.50	-0.09	-0.01	0.30	-0.09	0.15	0.39	-0.16	0.31	0.59	0.36	0.82	0.56	0.53	0.38	0.52	0.36
5	0.84	0.35	-0.15	-0.04	0.32	-0.08	-0.02	0.42	-0.03	-0.01	0.15	0.04	0.27	0.58	0.02	0.44	0.84	0.61	0.84	0.64	0.53	0.42	0.53	0.35
6	0.79	0.42	0.05	0.25	0.14	0.08	-0.01	0.39	-0.07	-0.09	0.19	-0.14	0.15	0.52	0.04	0.58	0.85	0.70	0.81	0.73	0.70	0.49	0.59	0.35
7	0.48	0.15	0.07	0.08	-0.31	-0.02	0.01	0.24	-0.07	-0.08	-0.08	-0.54	-0.22	0.19	0.04	0.42	0.82	0.70	0.73	0.72	0.62	0.55	0.75	0.45
8	0.38	0.19	0.19	0.14	-0.04	0.25	0.18	0.27	0.12	-0.04	0.02	-0.43	-0.27	-0.02	-0.35	0.09	0.79	0.60	0.62	0.73	0.70	0.27	0.48	0.35
9	0.16	0.09	0.13	-0.03	-0.20	-0.03	0.09	0.25	0.12	-0.04	0.07	-0.61	-0.25	0.04	-0.01	0.16	0.82	0.70	0.70	0.67	0.53	0.43	0.58	0.07
10	0.34	0.02	-0.19	-0.21	-0.55	-0.03	-0.08	0.25	0.07	0.04	0.24	-0.08	0.32	0.60	0.09	0.21	0.84	0.76	0.70	0.75	0.72	0.62	0.85	0.30
11	0.71	0.14	-0.17	0.29	0.48	0.36	-0.16	0.65	0.09	0.09	0.14	-0.20	0.39	0.69	0.43	0.50	0.66	0.64	0.43	0.71	0.77	0.66	0.43	0.44
12	NA	NA	NA	NA	-0.56	-0.49	-0.07	0.15	-0.09	-0.27	-0.32	-0.50	-0.07	0.29	-0.23	-0.17	0.62	0.47	0.29	0.53	0.66	0.30	NA	NA
13	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.11	0.52	-0.41	NA	NA	-0.06	NA	0.29	NA	NA	0.52	NA	NA	NA	NA	-0.06	NA	NA
14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.52	0.52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.03	0.66	0.15	0.76	0.37	0.89	0.56	0.31	0.84	0.35	0.22	1.00	0.07	0.04	0.71	0.79	0.13	0.35	0.05	0.04	0.13	0.41	0.31	0.95
3	0.02	0.61	0.28	0.84	0.51	0.76	0.58	0.10	1.00	0.54	0.22	0.89	0.54	0.04	0.61	0.43	0.10	0.56	0.10	0.13	0.26	0.41	0.33	0.92
4	0.01	0.30	0.58	1.00	0.35	0.84	0.89	0.14	0.81	1.00	0.41	0.81	0.68	0.26	0.66	0.39	0.08	0.31	0.01	0.10	0.12	0.28	0.13	0.31
5	0.00	0.33	0.68	0.92	0.37	0.84	0.97	0.23	0.95	1.00	0.68	0.92	0.45	0.09	0.97	0.20	0.00	0.07	0.00	0.05	0.12	0.23	0.12	0.33
6	0.01	0.23	0.89	0.49	0.71	0.84	1.00	0.26	0.86	0.81	0.61	0.71	0.68	0.13	0.92	0.09	0.00	0.03	0.01	0.02	0.03	0.15	0.08	0.33
7	0.17	0.68	0.86	0.84	0.39	0.97	1.00	0.51	0.86	0.84	0.84	0.11	0.54	0.61	0.92	0.23	0.01	0.03	0.02	0.02	0.06	0.10	0.02	0.19
8	0.28	0.61	0.61	0.71	0.92	0.49	0.63	0.45	0.76	0.92	0.97	0.22	0.45	0.97	0.33	0.81	0.01	0.07	0.06	0.02	0.03	0.45	0.17	0.33
9	0.66	0.81	0.73	0.95	0.58	0.95	0.81	0.49	0.76	0.92	0.86	0.07	0.49	0.92	1.00	0.66	0.01	0.03	0.03	0.04	0.12	0.22	0.09	0.86
10	0.34	0.97	0.59	0.56	0.10	0.95	0.84	0.49	0.86	0.92	0.51	0.84	0.37	0.07	0.81	0.56	0.00	0.02	0.03	0.01	0.02	0.06	0.00	0.41
11	0.03	0.70	0.64	0.41	0.17	0.31	0.66	0.05	0.81	0.81	0.71	0.58	0.26	0.03	0.22	0.14	0.04	0.05	0.22	0.03	0.01	0.04	0.22	0.20
12	NA	NA	NA	NA	0.09	0.15	0.85	0.67	0.80	0.45	0.36	0.14	0.85	0.42	0.52	0.64	0.06	0.17	0.42	0.12	0.04	0.40	NA	NA
13	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.76	0.12	0.24	NA	NA	0.87	NA	0.42	NA	NA	0.12	NA	NA	NA	NA	0.87	NA	NA
14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.12	0.12	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla Anexo A. 3. Valor de correlación Spearman con su correspondiente p-value, entre humedad relativa y concentración de numero de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de Las Ferias.

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0.17	0.07	-0.14	0.21	-0.02	0.81	-0.12	-0.05	-0.14	-0.07	0.19	-0.5	-0.36	0.1	0.71	0.68	0.43	0.6	0.72	0.22	-0.1	-0.05	-0.1	-0.19
3	0.17	0.21	0.31	0.31	0.07	0.83	0	-0.1	0	0.02	0.26	-0.29	-0.24	0.17	0.71	0.7	0.47	0.52	0.63	0.4	0.5	0.55	0.45	0.4
4	-0.1	0.1	0.24	0.31	0.31	0.83	-0.05	-0.1	0.19	0.33	0.17	-0.19	-0.21	0.14	0.71	0.65	0.37	0.43	0.63	0.65	0.48	0.53	0.62	0.5
5	-0.1	0.12	0.31	0.33	0.43	0.69	0.07	-0.07	0.1	0.02	0.17	-0.12	-0.38	0.1	0.71	0.67	0.4	0.52	0.65	0.42	0.55	0.48	0.62	0.4
6	-0.14	0.1	0.14	0.43	0.29	0.69	0	-0.14	-0.17	-0.02	0.17	-0.19	-0.38	0.1	0.76	0.7	0.47	0.52	0.73	0.37	0.38	0.4	0.48	0.26
7	0.21	0.19	0.38	0.45	0.43	0.86	0.14	-0.17	-0.02	0.26	0.14	-0.19	-0.38	0.1	0.74	0.73	0.45	0.5	0.65	0.67	0.32	0.48	0.62	0.4
8	0.31	0.31	0.31	0.45	0.29	0.83	0.38	0.24	0.17	0.29	0.36	0.07	-0.24	0.1	0.69	0.7	0.4	0.52	0.68	0.63	0.33	0.4	0.67	0.5
9	0	0.34	0.35	0.43	0.19	0.76	0.07	-0.1	-0.05	0.02	0.14	-0.33	-0.19	-0.07	0.45	0.72	0.3	0.43	0.48	0.52	0.55	0.48	0.71	0.52
10	-0.02	-0.07	0	0.14	0.14	0.48	0.05	-0.1	-0.19	-0.14	0.12	-0.19	-0.19	0.14	0.69	0.52	0.67	0.28	0.72	0.02	-0.3	0	-0.19	-0.14
11	-0.17	0.12	0.54	0.5	0.14	0.29	-0.1	-0.1	-0.07	-0.14	0.12	-0.24	-0.31	-0.19	0.5	0.63	0.1	0.37	0.27	0.52	0.68	0.57	0.76	0.55
12	0	0.19	0.21	0.12	0.24	0.69	-0.1	-0.17	-0.43	-0.02	0.12	-0.05	-0.26	0.14	0.71	0.72	0.52	0.73	0.77	0.53	0.37	0.35	0.26	0.1
13	0.1	0.07	0.33	-0.02	0.17	0.38	-0.1	0.07	0.1	0.21	0.14	-0.19	-0.31	0.12	0.6	0.37	0.48	0.57	0.72	0.68	0.63	0.68	0.4	0.24
14	-0.1	-0.24	-0.21	0.07	0.38	0.76	-0.05	-0.07	-0.64	0.36	0.26	-0.05	-0.07	0.12	0.55	0.43	0.48	0.45	0.65	0	-0.28	-0.1	-0.26	-0.36
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.69	0.87	0.74	0.61	0.96	0.01	0.78	0.91	0.74	0.87	0.65	0.21	0.39	0.82	0.05	0.04	0.24	0.09	0.03	0.58	0.8	0.9	0.82	0.65
3	0.69	0.61	0.46	0.46	0.87	0.01	1	0.82	1	0.96	0.53	0.49	0.57	0.69	0.05	0.04	0.21	0.15	0.07	0.29	0.17	0.12	0.26	0.32
4	0.82	0.82	0.57	0.46	0.46	0.01	0.91	0.82	0.65	0.42	0.69	0.65	0.61	0.74	0.05	0.06	0.33	0.24	0.07	0.06	0.19	0.14	0.1	0.21
5	0.82	0.78	0.46	0.42	0.29	0.06	0.87	0.87	0.82	0.96	0.69	0.78	0.35	0.82	0.05	0.05	0.29	0.15	0.06	0.26	0.12	0.19	0.1	0.32
6	0.74	0.82	0.74	0.29	0.49	0.06	1	0.74	0.69	0.96	0.69	0.65	0.35	0.82	0.03	0.04	0.21	0.15	0.02	0.33	0.31	0.29	0.23	0.53
7	0.61	0.65	0.35	0.26	0.29	0.01	0.74	0.69	0.96	0.53	0.74	0.65	0.35	0.82	0.04	0.02	0.22	0.17	0.06	0.05	0.41	0.19	0.1	0.32
8	0.46	0.46	0.46	0.26	0.49	0.01	0.35	0.57	0.69	0.49	0.39	0.87	0.57	0.82	0.06	0.04	0.29	0.15	0.04	0.07	0.38	0.29	0.07	0.21
9	1	0.42	0.4	0.29	0.65	0.03	0.87	0.82	0.91	0.96	0.74	0.42	0.65	0.87	0.26	0.03	0.43	0.24	0.19	0.15	0.12	0.19	0.05	0.18
10	0.96	0.87	1	0.74	0.74	0.23	0.91	0.82	0.65	0.74	0.78	0.65	0.65	0.74	0.06	0.15	0.05	0.46	0.03	0.97	0.43	1	0.65	0.74
11	0.69	0.77	0.17	0.21	0.74	0.49	0.82	0.82	0.87	0.74	0.78	0.57	0.46	0.65	0.21	0.07	0.8	0.33	0.49	0.15	0.04	0.11	0.03	0.16
12	1	0.65	0.61	0.78	0.57	0.06	0.82	0.69	0.29	0.96	0.78	0.91	0.53	0.74	0.05	0.03	0.15	0.02	0.02	0.14	0.33	0.36	0.53	0.82
13	0.82	0.87	0.42	0.96	0.69	0.35	0.82	0.87	0.82	0.61	0.74	0.65	0.46	0.78	0.12	0.33	0.19	0.11	0.03	0.04	0.07	0.04	0.32	0.57
14	0.82	0.57	0.61	0.87	0.35	0.03	0.91	0.87	0.09	0.39	0.53	0.91	0.87	0.78	0.16	0.24	0.19	0.22	0.06	1	0.46	0.8	0.53	0.39

Tabla Anexo A. 4. Valor de correlación Spearman con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de numero de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 1

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0.10	-0.20	-0.05	-0.30	0.32	-0.37	-0.29	-0.10	0.23	-0.33	-0.69	-0.66	-0.25	-0.81	0.06	-0.34	0.11	-0.27	0.38	-0.08	0.12	-0.23	-0.51	-0.28
3	0.08	-0.53	0.07	-0.06	0.25	-0.40	-0.42	-0.15	0.01	-0.41	-0.74	-0.59	-0.04	-0.76	0.06	-0.33	0.08	-0.32	0.24	0.10	0.00	-0.65	-0.78	-0.51
4	-0.04	-0.37	0.04	-0.26	-0.01	-0.40	-0.47	-0.23	-0.14	-0.45	-0.77	-0.66	-0.31	-0.83	-0.02	-0.32	0.23	-0.40	0.24	-0.20	-0.13	-0.73	-0.85	-0.55
5	-0.04	-0.41	0.07	-0.32	-0.18	-0.18	-0.44	-0.15	-0.11	-0.41	-0.77	-0.54	-0.40	-0.81	-0.02	-0.26	0.14	-0.27	0.14	-0.02	-0.17	-0.80	-0.85	-0.59
6	0.05	-0.22	0.10	-0.30	-0.01	-0.18	-0.42	-0.23	0.06	-0.35	-0.77	-0.51	-0.40	-0.81	0.08	-0.28	0.02	-0.32	0.28	0.03	-0.05	-0.77	-0.85	-0.65
7	0.00	-0.38	0.05	-0.31	-0.18	-0.44	-0.46	-0.23	-0.24	-0.35	-0.91	-0.66	-0.40	-0.81	-0.11	-0.40	0.29	-0.25	0.14	-0.22	-0.13	-0.80	-0.85	-0.59
8	0.08	-0.54	0.01	-0.31	-0.01	-0.44	-0.47	-0.13	-0.43	-0.67	-0.91	-0.61	-0.42	-0.86	-0.13	-0.33	0.25	-0.32	0.13	-0.13	0.00	-0.77	-0.81	-0.55
9	0.27	-0.13	0.02	-0.25	0.08	-0.30	-0.38	-0.08	-0.04	-0.41	-0.91	-0.75	-0.40	-0.76	0.11	-0.27	0.21	-0.08	-0.06	-0.28	-0.17	-0.80	-0.89	-0.61
10	-0.46	-0.26	0.01	-0.02	0.16	-0.24	-0.51	-0.08	-0.14	-0.43	-0.86	-0.66	-0.30	-0.83	-0.13	-0.38	-0.21	-0.62	0.38	0.25	0.20	0.22	-0.04	0.10
11	0.74	0.11	0.08	-0.01	0.16	-0.06	-0.49	-0.08	-0.06	-0.43	-0.86	-0.71	-0.12	-0.31	0.04	-0.24	0.42	0.18	-0.23	-0.38	-0.15	-0.82	-0.85	-0.55
12	-0.29	-0.32	-0.19	-0.17	0.04	-0.41	-0.49	-0.15	0.05	-0.35	-0.86	-0.51	-0.25	-0.83	0.06	-0.31	-0.01	-0.22	0.20	-0.12	0.10	-0.53	-0.56	-0.43
13	-0.01	-0.10	-0.12	-0.05	0.20	-0.32	-0.54	-0.53	-0.43	-0.88	-0.91	-0.66	-0.37	-0.83	0.14	-0.25	0.03	-0.33	0.26	-0.16	-0.12	-0.42	-0.61	-0.33
14	-0.51	-0.08	-0.08	-0.11	-0.12	-0.30	-0.60	-0.10	-0.28	-0.48	-0.77	-0.51	-0.18	-0.74	0.04	-0.35	-0.10	-0.57	0.42	0.08	0.42	0.33	0.11	0.11
Etapa Elpi+	P-value																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.82	0.63	0.91	0.47	0.43	0.37	0.49	0.81	0.59	0.43	0.06	0.08	0.55	0.01	0.89	0.37	0.78	0.49	0.32	0.83	0.77	0.55	0.19	0.51
3	0.84	0.18	0.87	0.89	0.55	0.33	0.30	0.72	0.98	0.31	0.03	0.13	0.93	0.03	0.89	0.39	0.83	0.41	0.53	0.80	1.00	0.06	0.02	0.20
4	0.93	0.37	0.93	0.53	0.98	0.33	0.24	0.59	0.73	0.27	0.03	0.08	0.45	0.01	0.96	0.40	0.54	0.29	0.53	0.60	0.73	0.02	0.01	0.15
5	0.93	0.32	0.87	0.43	0.67	0.67	0.27	0.72	0.80	0.31	0.03	0.17	0.33	0.01	0.96	0.50	0.72	0.49	0.72	0.97	0.67	0.01	0.01	0.12
6	0.91	0.61	0.82	0.47	0.98	0.67	0.30	0.59	0.89	0.40	0.03	0.19	0.33	0.01	0.84	0.46	0.97	0.41	0.47	0.93	0.90	0.02	0.01	0.08
7	1.00	0.35	0.91	0.45	0.67	0.27	0.26	0.59	0.57	0.40	0.00	0.08	0.33	0.01	0.80	0.28	0.44	0.52	0.72	0.57	0.73	0.01	0.01	0.12
8	0.84	0.17	0.98	0.45	0.98	0.27	0.24	0.77	0.29	0.07	0.00	0.11	0.30	0.01	0.76	0.39	0.51	0.41	0.75	0.73	1.00	0.02	0.01	0.15
9	0.52	0.77	0.97	0.55	0.84	0.47	0.35	0.86	0.93	0.31	0.00	0.03	0.33	0.03	0.80	0.49	0.59	0.83	0.88	0.47	0.67	0.01	0.00	0.11
10	0.25	0.53	0.98	0.96	0.71	0.57	0.19	0.86	0.73	0.28	0.01	0.08	0.47	0.01	0.76	0.32	0.59	0.08	0.31	0.51	0.61	0.58	0.93	0.82
11	0.04	0.79	0.85	0.98	0.71	0.89	0.22	0.86	0.89	0.28	0.01	0.05	0.78	0.46	0.93	0.53	0.26	0.64	0.54	0.32	0.70	0.01	0.01	0.15
12	0.48	0.43	0.65	0.69	0.93	0.32	0.22	0.72	0.91	0.40	0.01	0.19	0.55	0.01	0.89	0.42	0.98	0.58	0.60	0.76	0.80	0.14	0.15	0.28
13	0.98	0.82	0.78	0.91	0.63	0.43	0.17	0.18	0.29	0.00	0.00	0.08	0.37	0.01	0.73	0.51	0.95	0.38	0.50	0.68	0.77	0.26	0.11	0.43
14	0.20	0.84	0.84	0.80	0.78	0.47	0.12	0.81	0.51	0.23	0.03	0.19	0.67	0.04	0.93	0.35	0.80	0.11	0.26	0.83	0.26	0.38	0.80	0.80

Tabla Anexo A. 5. Valor de correlación Spearman con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de numero de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de San Cristóbal 2

Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0.25	-0.48	-0.71	-0.47	-0.24	-0.19	-0.32	0.01	-0.19	-0.59	-0.39	-0.28	-0.61	-0.37	-0.72	-0.53	-0.71	-0.04	-0.22	-0.68	-0.18	-0.66	-0.87	-0.46
3	-0.30	-0.55	-0.71	-0.53	-0.29	-0.17	-0.46	-0.50	-0.12	-0.55	-0.57	-0.45	-0.72	-0.33	-0.68	-0.70	-0.84	-0.31	-0.71	-0.67	-0.27	-0.66	-0.88	-0.50
4	-0.47	-0.43	-0.56	-0.57	-0.31	-0.21	-0.67	-0.67	-0.10	-0.53	-0.65	-0.49	-0.48	-0.30	-0.77	-0.72	-0.75	-0.37	-0.71	-0.71	-0.37	-0.68	-0.89	-0.03
5	-0.41	-0.46	-0.47	-0.49	-0.22	-0.21	-0.71	-0.75	-0.26	-0.53	-0.68	-0.49	-0.53	-0.40	-0.79	-0.59	-0.76	-0.39	-0.66	-0.78	-0.37	-0.62	-0.81	-0.14
6	-0.44	-0.44	-0.27	-0.11	-0.19	-0.40	-0.65	-0.82	-0.27	-0.33	-0.74	-0.53	-0.41	-0.42	-0.81	-0.39	-0.68	-0.21	-0.70	-0.79	-0.27	-0.64	-0.79	-0.14
7	-0.49	0.07	-0.21	0.19	0.07	-0.43	-0.23	-0.80	-0.33	-0.58	-0.65	-0.48	-0.33	-0.47	-0.70	-0.22	-0.45	-0.25	-0.74	-0.84	-0.46	-0.41	-0.45	0.35
8	-0.49	0.10	-0.41	-0.02	0.09	-0.54	-0.63	-0.80	-0.54	-0.59	-0.84	-0.67	-0.60	-0.67	-0.90	-0.67	-0.66	-0.35	-0.75	-0.70	-0.27	-0.59	-0.32	0.27
9	-0.36	0.09	-0.33	0.07	0.09	-0.39	-0.34	-0.66	-0.46	-0.59	-0.74	-0.45	-0.34	-0.49	-0.64	-0.26	-0.45	-0.25	-0.75	-0.72	-0.56	-0.45	-0.37	0.59
10	-0.05	-0.06	-0.61	-0.18	-0.32	-0.65	-0.55	-0.74	-0.42	-0.50	-0.71	-0.49	-0.61	-0.71	-0.71	-0.30	-0.55	-0.30	-0.80	-0.83	-0.19	-0.43	-0.61	0.41
11	-0.61	-0.55	-0.58	-0.28	-0.15	0.16	-0.13	-0.74	-0.58	-0.39	-0.61	-0.47	-0.52	-0.48	-0.44	-0.24	-0.38	0.07	0.12	-0.30	0.08	-0.12	-0.26	0.43
12	-0.09	-0.41	-0.52	-0.18	0.06	-0.32	-0.66	-0.74	-0.02	-0.36	-0.80	-0.32	-0.54	-0.21	-0.79	-0.38	-0.49	-0.41	-0.40	-0.33	-0.20	-0.52	-0.75	-0.30
13	-0.51	-0.70	-0.57	-0.64	-0.44	-0.16	-0.60	-0.68	0.07	-0.24	-0.69	-0.48	-0.68	-0.36	-0.72	-0.38	-0.72	-0.44	-0.13	-0.03	-0.18	-0.39	-0.85	-0.79
14	NA	0.41	-0.17	-0.41	-0.58	-0.23	-0.23	-0.07	-0.30	-0.43	-0.50	-0.58	-0.61	-0.36	-0.75	-0.47	-0.69	-0.44	-0.12	0.06	-0.34	-0.56	-0.63	-0.57
Etapa Elpi+	Valor de correlación																							
	Hora del día																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.49	0.16	0.02	0.17	0.51	0.60	0.36	0.97	0.60	0.07	0.26	0.43	0.06	0.29	0.02	0.12	0.02	0.91	0.53	0.03	0.61	0.04	0.00	0.18
3	0.39	0.10	0.02	0.12	0.42	0.64	0.18	0.14	0.73	0.10	0.09	0.19	0.02	0.35	0.03	0.03	0.00	0.38	0.02	0.03	0.44	0.04	0.00	0.14
4	0.17	0.22	0.09	0.09	0.38	0.57	0.03	0.03	0.77	0.12	0.04	0.15	0.16	0.40	0.01	0.02	0.01	0.29	0.02	0.02	0.30	0.03	0.00	0.93
5	0.24	0.18	0.17	0.15	0.53	0.57	0.02	0.01	0.47	0.12	0.03	0.15	0.11	0.26	0.01	0.07	0.01	0.26	0.04	0.01	0.30	0.05	0.00	0.70
6	0.20	0.20	0.45	0.76	0.60	0.26	0.04	0.00	0.46	0.35	0.01	0.12	0.24	0.23	0.00	0.26	0.03	0.56	0.02	0.01	0.45	0.05	0.01	0.70
7	0.15	0.84	0.56	0.60	0.84	0.22	0.53	0.01	0.36	0.08	0.04	0.16	0.35	0.17	0.03	0.53	0.19	0.49	0.02	0.00	0.18	0.24	0.19	0.32
8	0.15	0.78	0.24	0.95	0.82	0.11	0.05	0.01	0.11	0.07	0.00	0.03	0.07	0.03	0.00	0.03	0.04	0.33	0.01	0.03	0.45	0.07	0.37	0.44
9	0.31	0.81	0.35	0.85	0.80	0.26	0.34	0.04	0.18	0.07	0.01	0.19	0.34	0.15	0.05	0.47	0.19	0.49	0.01	0.02	0.09	0.19	0.29	0.08
10	0.88	0.87	0.06	0.61	0.37	0.04	0.10	0.01	0.23	0.14	0.02	0.15	0.06	0.02	0.02	0.40	0.10	0.40	0.01	0.00	0.60	0.21	0.06	0.24
11	0.06	0.10	0.08	0.43	0.69	0.66	0.71	0.01	0.08	0.27	0.06	0.17	0.13	0.16	0.20	0.51	0.28	0.85	0.75	0.40	0.83	0.75	0.47	0.21
12	0.80	0.24	0.12	0.62	0.87	0.37	0.04	0.01	0.96	0.31	0.01	0.37	0.11	0.56	0.01	0.28	0.15	0.24	0.26	0.35	0.58	0.13	0.01	0.40
13	0.13	0.02	0.08	0.05	0.21	0.66	0.07	0.03	0.84	0.50	0.03	0.16	0.03	0.30	0.02	0.28	0.02	0.21	0.71	0.93	0.62	0.26	0.00	0.01
14	NA	0.24	0.63	0.24	0.08	0.51	0.52	0.85	0.41	0.21	0.15	0.08	0.06	0.31	0.01	0.17	0.03	0.21	0.73	0.88	0.34	0.09	0.05	0.09

Tabla Anexo A. 6. Valor de correlación Spearman con su correspondiente p-value, entre velocidad del viento y concentración de numero de partículas por etapa del equipo ELPI+ y hora del día en las mediciones de la campaña de Las Ferias

Etapa Elpi+	Valor de correlación																						
	Hora del día																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	-0.10	-0.20	-0.05	-0.30	0.32	-0.37	-0.29	-0.10	0.23	-0.33	-0.69	-0.66	-0.25	-0.81	0.06	-0.34	0.11	-0.27	0.38	-0.08	0.12	-0.23	-0.51	-0.28
3	0.08	-0.53	0.07	-0.06	0.25	-0.40	-0.42	-0.15	0.01	-0.41	-0.74	-0.59	-0.04	-0.76	0.06	-0.33	0.08	-0.32	0.24	0.10	0.00	-0.65	-0.78	-0.51
4	-0.04	-0.37	0.04	-0.26	-0.01	-0.40	-0.47	-0.23	-0.14	-0.45	-0.77	-0.66	-0.31	-0.83	-0.02	-0.32	0.23	-0.40	0.24	-0.20	-0.13	-0.73	-0.85	-0.55
5	-0.04	-0.41	0.07	-0.32	-0.18	-0.18	-0.44	-0.15	-0.11	-0.41	-0.77	-0.54	-0.40	-0.81	-0.02	-0.26	0.14	-0.27	0.14	-0.02	-0.17	-0.80	-0.85	-0.59
6	0.05	-0.22	0.10	-0.30	-0.01	-0.18	-0.42	-0.23	0.06	-0.35	-0.77	-0.51	-0.40	-0.81	0.08	-0.28	0.02	-0.32	0.28	0.03	-0.05	-0.77	-0.85	-0.65
7	0.00	-0.38	0.05	-0.31	-0.18	-0.44	-0.46	-0.23	-0.24	-0.35	-0.91	-0.66	-0.40	-0.81	-0.11	-0.40	0.29	-0.25	0.14	-0.22	-0.13	-0.80	-0.85	-0.59
8	0.08	-0.54	0.01	-0.31	-0.01	-0.44	-0.47	-0.13	-0.43	-0.67	-0.91	-0.61	-0.42	-0.86	-0.13	-0.33	0.25	-0.32	0.13	-0.13	0.00	-0.77	-0.81	-0.55
9	0.27	-0.13	0.02	-0.25	0.08	-0.30	-0.38	-0.08	-0.04	-0.41	-0.91	-0.75	-0.40	-0.76	0.11	-0.27	0.21	-0.08	-0.06	-0.28	-0.17	-0.80	-0.89	-0.61
10	-0.46	-0.26	0.01	-0.02	0.16	-0.24	-0.51	-0.08	-0.14	-0.43	-0.86	-0.66	-0.30	-0.83	-0.13	-0.38	-0.21	-0.62	0.38	0.25	0.20	0.22	-0.04	0.10
11	0.74	0.11	0.08	-0.01	0.16	-0.06	-0.49	-0.08	-0.06	-0.43	-0.86	-0.71	-0.12	-0.31	0.04	-0.24	0.42	0.18	-0.23	-0.38	-0.15	-0.82	-0.85	-0.55
12	-0.29	-0.32	-0.19	-0.17	0.04	-0.41	-0.49	-0.15	0.05	-0.35	-0.86	-0.51	-0.25	-0.83	0.06	-0.31	-0.01	-0.22	0.20	-0.12	0.10	-0.53	-0.56	-0.43
13	-0.01	-0.10	-0.12	-0.05	0.20	-0.32	-0.54	-0.53	-0.43	-0.88	-0.91	-0.66	-0.37	-0.83	0.14	-0.25	0.03	-0.33	0.26	-0.16	-0.12	-0.42	-0.61	-0.33
14	-0.51	-0.08	-0.08	-0.11	-0.12	-0.30	-0.60	-0.10	-0.28	-0.48	-0.77	-0.51	-0.18	-0.74	0.04	-0.35	-0.10	-0.57	0.42	0.08	0.42	0.33	0.11	0.11

Etapa Elpi+	P-value																						
	Hora del día																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	0.82	0.63	0.91	0.47	0.43	0.37	0.49	0.81	0.59	0.43	0.06	0.08	0.55	0.01	0.89	0.37	0.78	0.49	0.32	0.83	0.77	0.55	0.19	0.51
3	0.84	0.18	0.87	0.89	0.55	0.33	0.30	0.72	0.98	0.31	0.03	0.13	0.93	0.03	0.89	0.39	0.83	0.41	0.53	0.80	1.00	0.06	0.02	0.20
4	0.93	0.37	0.93	0.53	0.98	0.33	0.24	0.59	0.73	0.27	0.03	0.08	0.45	0.01	0.96	0.40	0.54	0.29	0.53	0.60	0.73	0.02	0.01	0.15
5	0.93	0.32	0.87	0.43	0.67	0.67	0.27	0.72	0.80	0.31	0.03	0.17	0.33	0.01	0.96	0.50	0.72	0.49	0.72	0.97	0.67	0.01	0.01	0.12
6	0.91	0.61	0.82	0.47	0.98	0.67	0.30	0.59	0.89	0.40	0.03	0.19	0.33	0.01	0.84	0.46	0.97	0.41	0.47	0.93	0.90	0.02	0.01	0.08
7	1.00	0.35	0.91	0.45	0.67	0.27	0.26	0.59	0.57	0.40	0.00	0.08	0.33	0.01	0.80	0.28	0.44	0.52	0.72	0.57	0.73	0.01	0.01	0.12
8	0.84	0.17	0.98	0.45	0.98	0.27	0.24	0.77	0.29	0.07	0.00	0.11	0.30	0.01	0.76	0.39	0.51	0.41	0.75	0.73	1.00	0.02	0.01	0.15
9	0.52	0.77	0.97	0.55	0.84	0.47	0.35	0.86	0.93	0.31	0.00	0.03	0.33	0.03	0.80	0.49	0.59	0.83	0.88	0.47	0.67	0.01	0.00	0.11
10	0.25	0.53	0.98	0.96	0.71	0.57	0.19	0.86	0.73	0.28	0.01	0.08	0.47	0.01	0.76	0.32	0.59	0.08	0.31	0.51	0.61	0.58	0.93	0.82
11	0.04	0.79	0.85	0.98	0.71	0.89	0.22	0.86	0.89	0.28	0.01	0.05	0.78	0.46	0.93	0.53	0.26	0.64	0.54	0.32	0.70	0.01	0.01	0.15
12	0.48	0.43	0.65	0.69	0.93	0.32	0.22	0.72	0.91	0.40	0.01	0.19	0.55	0.01	0.89	0.42	0.98	0.58	0.60	0.76	0.80	0.14	0.15	0.28
13	0.98	0.82	0.78	0.91	0.63	0.43	0.17	0.18	0.29	0.00	0.00	0.08	0.37	0.01	0.73	0.51	0.95	0.38	0.50	0.68	0.77	0.26	0.11	0.43
14	0.20	0.84	0.84	0.80	0.78	0.47	0.12	0.81	0.51	0.23	0.03	0.19	0.67	0.04	0.93	0.35	0.80	0.11	0.26	0.83	0.26	0.38	0.80	0.80

B. Anexo: Resultados del Análisis de Componentes Principales

Se presenta a continuación los resultados de los componentes principales para su correspondiente campaña de medición. La variable h2 corresponde a la cantidad de varianza en cada variable explicada por los componentes.

Tabla Anexo B. 1. Resultado de componentes principales para la campaña de Las Ferias

Variable	Componente principal			h2
	RC1	RC2	RC3	
Velocidad del viento	-0.21	-0.24	-0.55	0.41
Temperatura	0.21	-0.26	-0.87	0.87
Humedad relativa	-0.06	0.28	0.89	0.87
PM_{10}	0.82	0.26	0.1	0.76
CO	0.69	0.5	0.2	0.76
Ozono	-0.33	-0.14	-0.84	0.84
NO_X	0.74	0.45	0.35	0.88
$PM_{2.5}$	0.78	0	-0.16	0.64
0.016 µm	0.26	0.85	0.04	0.79
0.03 µm	0.77	0.55	0.1	0.9
0.054 µm	0.8	0.54	0.18	0.96
0.094 µm	0.8	0.51	0.24	0.97
0.15 µm	0.77	0.57	0.19	0.96
0.25 µm	0.81	0.5	0.25	0.96
0.38 µm	0.63	0.62	0.29	0.86
0.6 µm	0.92	0.15	0.09	0.88
0.94 µm	0.01	0.91	0.31	0.93
1.6 µm	0.83	-0.17	-0.07	0.73
2.5 µm	0.36	0.87	0.26	0.94
3.6 µm	0.35	0.85	0.25	0.91
5.3 µm	-0.03	0.85	0.41	0.89

Tabla Anexo B. 2. Resultado de componentes principales para la campaña de San Cristóbal 1

Variable	Componente principal			h2
	RC1	RC2	RC3	
Velocidad del viento	-0.53	-0.32	0.61	0.77
Temperatura	-0.18	-0.84	0.32	0.84
Humedad relativa	0.62	0.6	-0.28	0.82
Radiación solar	-0.17	-0.88	0.05	0.8
PM_{10}	0.8	0	-0.34	0.75
$PM_{2.5}$	0.67	0.15	-0.33	0.58
Ozono	-0.44	-0.58	0.38	0.67

Variable	Componente principal			h2
	RC1	RC2	RC3	
0.016 nm	0.59	0.7	0.17	0.86
0.03 µm	0.66	0.51	0.2	0.73
0.054 µm	0.78	0.57	0.14	0.94
0.094 µm	0.84	0.51	0.03	0.97
0.15 µm	0.87	0.47	0	0.97
0.25 µm	0.92	0.37	-0.01	0.98
0.38 µm	0.93	0.3	-0.04	0.96
0.6 µm	0.92	0.34	-0.04	0.97
0.94 µm	0.86	0.44	0.05	0.94
1.6 µm	0.48	0.17	-0.02	0.26
2.5 µm	0.79	0.52	0.1	0.9
3.6 µm	0.71	0.59	0.02	0.86
5.3 µm	0.42	0.7	0.17	0.69

Tabla Anexo B. 3. Resultado de componentes principales para la campaña de San Cristóbal 2

Variable	Componente principal			h2
	RC1	RC2	RC3	
Velocidad del viento	-0.59	0.12	-0.08	0.37
Temperatura	-0.27	-0.82	0.3	0.84
Humedad relativa	0.41	0.74	-0.39	0.88
Radiación solar	0	-0.84	0.24	0.76
PM_{10}	0.6	-0.51	0.21	0.67
$PM_{2.5}$	0.39	-0.61	-0.28	0.6
Ozono	-0.45	-0.6	0.13	0.58
0.016 µm	0.22	0.81	0.18	0.74
0.03 µm	0.38	0.77	0.39	0.88
0.054 µm	0.7	0.46	0.43	0.89
0.094 µm	0.85	0.41	0.25	0.95
0.15 µm	0.94	0.27	0.09	0.97
0.25 µm	0.97	0.1	-0.07	0.96
0.38 µm	0.97	-0.05	0.08	0.95
0.6 µm	0.97	0.06	-0.12	0.96
0.94 µm	0.97	0.11	-0.03	0.96
1.6 µm	0.87	0.28	-0.06	0.83
2.5 µm	0.91	0.21	0.14	0.89
3.6 µm	0.54	0.17	0.62	0.71
5.3 µm	-0.01	-0.12	0.52	0.29

Bibliografía

Agudelo-Castañeda, D. M., Teixeira, E. C., Braga, M., Rolim, S. B. A., Silva, L. F. O., Beddows, D. C. S., Harrison, R. M., & Querol, X. (2019). Cluster analysis of urban ultrafine particles size distributions. *Atmospheric Pollution Research*, *10*(1), 45–52. https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.06.006

Avila Prada, L. (2016). *Determinación del nivel de exposición de viajeros pendulares a partículas ultrafinas según el modo de transporte en la ciudad de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.

Beddows, D. C. S., Harrison, R. M., Green, D. C., & Fuller, G. W. (2015). Receptor modelling of both particle composition and size distribution from a background site in London, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(17), 10107–10125. https://doi.org/10.5194/acp-15-10107-2015

Chan, T. W., & Mozurkewich, M. (2006). Application of absolute principal component analysis to size distribution data: identification of particle origins. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, *6*(5), 10493–10522. https://doi.org/10.5194/acpd-6-10493-2006

Chan, T. W., & Mozurkewich, M. (2007). Atmospheric Chemistry and Physics Application of absolute principal component analysis to size distribution data: identification of particle origins. En *Atmos. Chem. Phys* (Vol. 7). www.atmos-chem-phys.net/7/887/2007/

Colbeck, I., & Lazaridis, M. (2014a). *Aerosol Science*.

Colbeck, I., & Lazaridis, M. (2014b). *Aerosol Science: Technology and Application*.

Dekati Ltd. (2011). *ELPI Plus User Manual* (1.12).

Diez, D. M., Barr, C. D., & Cetinkaya-Rundel, M. (2015). *OpenIntro Statistics* (4a ed.). Duke University.

España, G. DE, & Pindado Mª Pérez S García, O. R. (2013). *Informes Técnicos Ciemat Desarrollo del Modelo de Factorización de la Matriz Positiva (PMF) al Estudio Anual de la Composición Orgánica del PM2.5 en Chapinería*. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/060/44060243.pdf

Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, J. N. (1999). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere* (1a ed.). Academic Press.

Friedlander, S. K. (2000). *Smoke, dust, and haze. Fundamentals of Aerosols Dynamics* (2a ed.). Oxford University Press.

Fults, S. L., Massmann, A. K., Montecinos, A., Andrews, E., Kingsmill, D. E., Minder, J. R., Garreaud, R. D., & Snider, J. R. (2019). Wintertime aerosol measurements during the Chilean Coastal Orographic Precipitation Experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*(19), 12377–12396. https://doi.org/10.5194/acp-19-12377-2019

Gani, S., Bhandari, S., Patel, K., Seraj, S., Soni, P., Arub, Z., Habib, G., Hildebrandt Ruiz, L., & Apte, J. S. (2020). Particle number concentrations and size distribution in a polluted megacity: the Delhi Aerosol Supersite study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(14), 8533–8549. https://doi.org/10.5194/acp-20-8533-2020

Guarieiro, L. L. N., & Guarieiro, A. L. N. (2015). Impact of the Biofuels Burning on Particle Emissions from the Vehicular Exhaust. En *Biofuels - Status and Perspective*. InTech. https://doi.org/10.5772/60110

Hama, S. M. L., Cordell, R. L., Kos, G. P. A., Weijers, E. P., & Monks, P. S. (2017). Sub-micron particle number size distribution characteristics at two urban locations in Leicester. *Atmospheric Research*, *194*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.021

Harrison, R. M., & Jones, M. (1995). The chemical composition of airborne particles in the UK atmosphere. *Science of The Total Environment*, *168*(3), 195–214. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04536-A

Hopke, P. K. (2003). Recent developments in receptor modeling. *Journal of Chemometrics*, *17*(5), 255–265. https://doi.org/10.1002/cem.796

IDEAM. (2021). *Informe de Calidad del Aire de Colombia*.

Jain, S., Sharma, S. K., Choudhary, N., Masiwal, R., Saxena, M., Sharma, A., Mandal, T. K., Gupta, A., Gupta, N. C., & Sharma, C. (2017). Chemical characteristics and source apportionment of PM2.5 using PCA/APCS, UNMIX, and PMF at an urban site of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(17), 14637–14656. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8925-5

Jancsek-Turóczi, B., Hoffer, A., Nyírö-Kósa, I., & Gelencsér, A. (2013). Sampling and characterization of resuspended and respirable road dust. *Journal of Aerosol Science*, *65*, 69–76. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.07.006

Jones, A. M., & Harrison, R. M. (2004). The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review. *Science of The Total Environment*, *326*(1–3), 151–180. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.021

Kassambara, A. (2017). *Multivariate Analisys* .

Kasumba, J., Hopke, P. K., Chalupa, D. C., & Utell, M. J. (2009). Comparison of sources of submicron particle number concentrations measured at two sites in Rochester, NY. *Science of the Total Environment*, *407*(18), 5071–5084. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.040

Kleinman, L. I., Springston, S. R., Wang, J., Daum, P. H., Lee, Y.-N., Nunnermacker, L. J., Senum, G. I., Weinstein-Lloyd, J., Alexander, M. L., Hubbe, J., Ortega, J., Zaveri, R. A., Canagaratna, M. R., & Jayne, J. (2009). The time evolution of aerosol size distribution over the Mexico City plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *9*(13), 4261–4278. https://doi.org/10.5194/acp-9-4261-2009

Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V.-M., Birmili, W., & McMurry, P. H. (2004). Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *Journal of Aerosol Science*, *35*(2), 143–176. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.10.003

Leoni, C., Pokorná, P., Hovorka, J., Masiol, M., Topinka, J., Zhao, Y., Křůmal, K., Cliff, S., Mikuška, P., & Hopke, P. K. (2018). Source apportionment of aerosol particles at a European air pollution hot spot using particle number size distributions and chemical composition. *Environmental Pollution*, *234*, 145–154. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.097

Li, Q.-F., Wang-Li, L., Jayanty, R. K. M., & Shah, S. B. (2013). Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Fine Particulate Matter in an Animal Agriculture Intensive Area in North Carolina: Estimation of Secondary Organic Carbon Concentrations. *Open Journal of Air Pollution*, *02*(01), 7–18. https://doi.org/10.4236/ojap.2013.21002

Miller, S. L., Anderson, M. J., Daly, E. P., & Milford, J. B. (2002). Source apportionment of exposures to volatile organic compounds. I. Evaluation of receptor models using simulated exposure data. *Atmospheric Environment*, *36*(22), 3629–3641. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00279-0

Minitab Statistical Software. (2023). *Modelos ANOVA*.

Monteiro dos Santos, D., Rizzo, L. V., Carbone, S., Schlag, P., & Artaxo, P. (2021). Physical and chemical properties of urban aerosols in São Paulo, Brazil: links between composition and size distribution of submicron particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *21*(11), 8761–8773. https://doi.org/10.5194/acp-21-8761-2021

Na, K., Sawant, A. A., Song, C., & Cocker, D. R. (2004). Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California.

Atmospheric Environment, *38*(9), 1345–1355. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.11.023

Ogulei, D., Hopke, P. K., Ferro, A. R., & Jaques, P. a. (2007). Factor analysis of submicron particle size distributions near a major United States-Canada trade bridge. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, *57*(2), 190–203. https://doi.org/10.1080/10473289.2007.10465316

OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*.

Pekkanen, Juha., & Kuopio University Printing Office). (2000). *Ultra : exposure and risk assessment for fine and ultrafine particles in ambient air ; study manual and data book*. National Public Health Institute.

Ram, S. S., Kumar, R. V., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S. C., Sudarshan, M., & Chakraborty, A. (2014). Physico-chemical characterization of street dust and re-suspended dust on plant canopies: An approach for finger printing the urban environment. *Ecological Indicators*, *36*, 334–338. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.08.010

Rissler, J., Swietlicki, E., Bengtsson, A., Boman, C., Pagels, J., Sandström, T., Blomberg, A., & Löndahl, J. (2012). Experimental determination of deposition of diesel exhaust particles in the human respiratory tract. *Journal of Aerosol Science*, *48*, 18–33. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2012.01.005

Rivas, I., Beddows, D. C. S., Amato, F., Green, D. C., Järvi, L., Hueglin, C., Reche, C., Timonen, H., Fuller, G. W., Niemi, J. V., Pérez, N., Aurela, M., Hopke, P. K., Alastuey, A., Kulmala, M., Harrison, R. M., Querol, X., & Kelly, F. J. (2020). Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities. *Environment International*, *135*, 105345. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105345

Rogula-Kozłowska, W., & Klejnowski, K. (2013). Submicrometer Aerosol in Rural and Urban Backgrounds in Southern Poland: Primary and Secondary Components of PM1. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *90*(1), 103–109. https://doi.org/10.1007/s00128-012-0868-4

Rose, D., Wehner, B., Ketzel, M., Engler, C., Voigtländer, J., Tuch, T., & Wiedensohler, A. (2006). Atmospheric number size distributions of soot particles and estimation of emission factors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *6*(4), 1021–1031. https://doi.org/10.5194/acp-6-1021-2006

Rueda, J. (2017). *NANO-PARTÍCULAS, Impactos en salud e influencia de los vehículos motorizados*.

Sánchez P., L. F., Manzano, C. A., Leiva-Guzmán, M. A., Canales A., M., & Toro Araya, R. (2021). Urban atmospheric particle size distribution in Santiago, Chile.

Atmospheric Pollution Research, *12*(10), 101201. https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101201

Secretaría Distrital de Ambiente. (2017). *Hoja de vida estaciones de monitoreo RMCAB*. http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Hojas_de_Vida_Estaciones_2017%20(1).pdf

Secretaría Distrital de Ambiente. (2022). *Inventario de emisiones contaminantes atmosféricas de Bogotá, Año 2021*.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (2a ed.). Wiley.

Slezakova, K., Morais, S., & Carmo Pereir, M. do. (2013a). Atmospheric Nanoparticles and Their Impacts on Public Health. En *Current Topics in Public Health*. InTech. https://doi.org/10.5772/54775

Slezakova, K., Morais, S., & Carmo Pereir, M. do. (2013b). Atmospheric Nanoparticles and Their Impacts on Public Health. En *Current Topics in Public Health*. InTech. https://doi.org/10.5772/54775

Taiwo, A. M., Beddows, D. C. S., Shi, Z., & Harrison, R. M. (2014). Mass and number size distributions of particulate matter components: Comparison of an industrial site and an urban background site. *Science of The Total Environment*, *475*, 29–38. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.076

Tan, J., Duan, J., Chai, F., He, K., & Hao, J.-M. (2014). Source apportionment of size segregated fine/ultrafine particle by PMF in Beijing. *Atmospheric Research*, *139*, 90–100. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.007

Tan, J., Duan, J., Zhen, N., He, K., & Hao, J. (2016). Chemical characteristics and source of size-fractionated atmospheric particle in haze episode in Beijing. *Atmospheric Research*, *167*, 24–33. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.015

Villalobos, A. M., Barraza, F., Jorquera, H., & Schauer, J. J. (2015). Chemical speciation and source apportionment of fine particulate matter in Santiago, Chile, 2013. *Science of the Total Environment*, *512–513*, 133–142. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.006

Virtanen, A., Rönkkö, T., Kannosto, J., Ristimäki, J., Mäkelä, J. M., Keskinen, J., Pakkanen, T., Hillamo, R., Pirjola, L., & Hämeri, K. (2006). Winter and summer time size distributions and densities of traffic-related aerosol particles at a busy highway in Helsinki. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *6*(9), 2411–2421. https://doi.org/10.5194/acp-6-2411-2006

William C. Hinds, Y. Z. (2022). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 3rd Edition* (3a ed.). Wiley.

Wu, H., Li, Z., Jiang, M., Liang, C., Zhang, D., Wu, T., Wang, Y., & Cribb, M. (2021). Contributions of traffic emissions and new particle formation to the ultrafine particle size distribution in the megacity of Beijing. *Atmospheric Environment*, *262*, 118652. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118652

EPA. (24 de Junio de 2023). *Criteria Air Pollutans*. Obtenido de https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants

NASA. (2023). *Fire Information for Resource Managment System*. Obtenido de https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/

Observarorio Ambiental de Bogotá. (2022). *Informe de seguimiento semestral al Plan Aire 2030.* Bogotá. Obtenido de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=25679

Planeación, S. D. (14 de junio de 2023). *Visor de población*. Obtenido de https://sdpbogota.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=baabe888c3ab42c6bb3d10d4eaa993c5

SDA. (s.f.). *Calidad del Aire de Bogota*. Obtenido de http://rmcab.ambientebogota.gov.co/home/map

Secretaría Distrial de Ambiente. (2021). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá.* Bogotá.

Secretaría Distrial de Ambiente. (26 de Junio de 2023). *RMCAB*. Obtenido de http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Report/stationreport

Secretaría Distrital de Ambiente. (2017). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire*. Obtenido de http://ambientebogota.gov.co/web/sda/estaciones-rmcab

Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2020.* Bogotá.