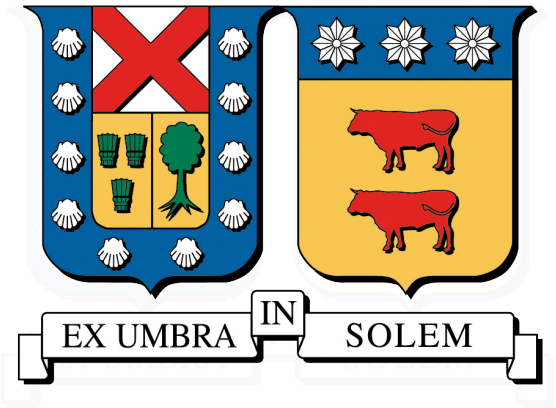
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



Evaluación experimental de la calidad del aire en un entorno urbano para establecer el origen y nivel de exposición a material particulado atmosférico

RODRIGO SEBASTIÁN SAN FRANCISCO CARVAJAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA : DR. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE : DR. FABIAN GUERRERO C.

Enero 2024

Agradecimientos

Todo este proceso fue posible gracias al esfuerzo y compromiso de mis padres. Ellos fueron un apoyo fundamental durante todos estos años y el colchón que me ayudaba a mantener la calma en los momentos de debilidad y miedo.

¡Muchas gracias! A todas esas personas que creyeron en mí, y me dieron su apoyo durante este proceso, en especial a mis hermanas, familiares, profesores y amigos.

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco de la iniciativa denominada “Red de colaboración para el fortalecimiento de la línea de impacto de procesos de combustión de biomasa sobre la calidad del aire” de la convocatoria MEC USM – 2022, el presente trabajo busca evaluar experimentalmente la calidad del aire en un entorno urbano de la ciudad de Villa Alemana, para analizar el nivel de exposición a material particulado fino y carbono negro durante el invierno, identificando su fuente de emisión desde biomasa y/o combustibles fósiles.

Para el desarrollo y entendimiento de la investigación, se trabajó con un marco teórico centrado en el material particulado, sus efectos en la salud y deterioro del medio ambiente. Al contar con un equipo de medición de black carbon, capaz de medir en dos longitudes de onda, se utilizó el exponente de Ángstrom para identificar las principales fuentes de contaminación de black carbon en función de las horas del día.

Se realizó un procedimiento y diseño experimental, en donde se presenta un esquema que ayuda a entender las disposiciones de las estaciones de medición, se entrega una descripción de los equipos y su identificación, con el fin de volver la experiencia reproducible, además de caracterizar el lugar de medición.

Los datos obtenidos fueron modelados utilizando el programa MATLAB, donde los gráficos de calor realizados buscan dar un entendimiento más didáctico de los fenómenos analizados. Finalmente, se pudo llegar a evidenciar: la existencia de más de un episodio donde la ciudad presentaba exceso de material particulado fino ($PM_{2,5}$) con respecto a la normativa ambiental vigente, y más aun, las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS); la existencia de franjas horarias donde predominaba el black carbon proveniente de la combustión de biomasa, presumiblemente debido al uso de equipos de combustión para calefacción residencial; y la existencia de una relación inversamente proporcional entre la concentración de material particulado fino y la altura de medición.

ABSTRACT

Within the framework of the initiative called 'Red de colaboración para el fortalecimiento de la línea de impacto de procesos de combustión de biomasa sobre la calidad del aire' of the call MEC USM - 2022, this work seeks to experimentally evaluate the air quality air quality in an urban environment of the city of Villa Alemana to analyze the level of exposure to fine particulate matter and black carbon during the winter, identifying its source of emission from biomass and / or fossil fuels.

For the development and understanding of the research, we worked with a theoretical framework focused on particulate matter, its effects on health and environmental deterioration. By having a black carbon measurement equipment, capable of measuring in two wavelengths, the Angstrom exponent was used to identify the main sources of black carbon pollution according to the hours of the day.

An experimental procedure and design was carried out, in which a scheme is presented that helps to understand the arrangements of the measuring stations, a description of the equipment and its identification is given, in order to make the experience reproducible, as well as to characterize the measurement site.

The data obtained were modeled using the MATLAB program, where the heat graphs made seek to give a more didactic understanding of the phenomena analyzed. Finally, it was possible to demonstrate: the existence of more than one episode where the city presented an excess of fine particulate matter ($PM_{2,5}$) with respect to current environmental regulations, and moreover, the recommendations of the World Health Organization (WHO); the existence of time slots where black carbon from biomass combustion predominated, presumably due to the use of combustion equipment for residential heating; and the existence of an inversely proportional relationship between the concentration of fine particulate matter and the height of measurement.

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**

2. Objetivos **3**
2.1. Objetivo general . . . 3
2.2. Objetivos específicos . . . 3

3. Marco teórico **4**
3.1. Calidad del aire . . . 4
3.2. Material particulado . . . 4
3.2.1. Black carbon . . . 6
3.3. Exponente de Ángstrom . . . 7
3.4. Norma primaria de calidad ambiental en Chile . . . 8
3.5. Consecuencias de la mala calidad del aire . . . 11
3.5.1. Daño a humanos y animales . . . 11
3.5.2. Daño a la vegetación . . . 12
3.5.3. Daño en materiales . . . 13
3.5.4. Efecto en la visibilidad . . . 14
3.5.5. Contribución al cambio climático . . . 14
3.6. Antecedentes sobre el material particulado en Chile . . . 15

4. Diseño y procedimiento experimental **17**
4.1. Diseño experimental . . . 17
4.2. Caracterización de equipos . . . 19
4.2.1. Estación de monitoreo ambiental . . . 20
4.2.2. Monitor portátil de carbono negro . . . 20
4.2.3. Monitor de material particulado . . . 21
4.2.4. Estación Meteorológica . . . 21
4.3. Área de estudio: Villa Alemana . . . 22
4.4. Lugar de ejecución: Municipalidad de Villa Alemana . . . 23
4.5. Supervisión de estaciones de monitoreo . . . 23
4.6. Conteo de autos . . . 24

5. Presentación y análisis de resultados **26**
5.1. Caracterización de datos . . . 26
5.2. Condiciones ambientales . . . 28

5.3. Material particulado grueso (PM_{10}) 33
5.4. Material particulado fino ($PM_{2,5}$) 37
5.5. Black carbon 41
5.6. Monóxido de carbono (CO) 42
5.7. Dióxido de azufre (SO_2) 44
5.8. Fuentes de black carbon 45

6. Conclusiones y recomendaciones **46**

Bibliografía **48**

Índice de Tablas

3.1. **Concentraciones limite según la norma primaria de calidad ambiental en Chile** 9
3.2. **Directrices sobre la calidad del aire por la OMS** 11

4.1. **Descripción de estaciones de monitoreo** 19

5.1. **Caracterización de datos durante el proyecto** 27

Índice de Figuras

1.1. Principales contaminantes del aire en Chile 2

3.1. Comparación tamaño del material particulado 5
3.2. Inhalación del material particulado 12
3.3. Efecto de la lluvia ácida en plantas 13
3.4. Efectos de la lluvia ácida sobre esculturas 13
3.5. Esmog fotoquímico 14

4.1. Distribución de equipos 18
4.2. Configuración de locaciones 18
4.3. Estación de monitoreo ambiental 20
4.4. Monitor portátil de carbono negro 20
4.5. Monitor de material particulado 21
4.6. Estación Meteorológica 21
4.7. Villa Alemana 22
4.8. Municipalidad de Villa Alemana 23
4.9. Mapa conteo de autos 25

5.1. Temperatura ambiente en base a estación fija (piso) 28
5.2. Medición de temperatura en base a la estación fija (piso) 29
5.3. Humedad relativa en base a estación fija (piso) 30
5.4. Medición de humedad relativa con base en la estación fija (piso) 30
5.5. Milímetros de agua a diario 31
5.6. Dirección del viento en base a la estación meteorológica 32
5.7. Comparación de la medición de PM_{10} y estándares respecto a estación fija (piso) 33
5.8. Medición de PM_{10} con base en la estación fija (piso) 33
5.9. Comparación de la medición de PM_{10} y estándares respecto a estación fija (techo) 34
5.10. Medición de PM_{10} en base a la estación fija (techo) 35
5.11. Comparación de la medición de PM_{10} y estándares respecto a monitor de material particulado 36
5.12. Medición de PM_{10} respecto a monitor de material particulado 36
5.13. Comparación de la medición de $PM_{2,5}$ y estándares respecto a estación fija (piso) 37

5.14. Medición de $PM_{2,5}$ con base en la estación fija (piso) 37
5.15. Comparación de la medición de $PM_{2,5}$ y estándares respecto a estación fija (techo) 38
5.16. Medición de $PM_{2,5}$ en base a la estación fija (techo) 39
5.17. Comparación de la medición de $PM_{2,5}$ y estándares respecto a monitor de material particulado 40
5.18. Medición de $PM_{2,5}$ respecto a monitor de material particulado 40
5.19. Medición de BC_{880} en base al monitor portátil de carbono negro 41
5.20. Medición de BC_{370} en base al monitor portátil de carbono negro 41
5.21. Medición de CO con base en la estación fija (piso) 42
5.22. Medición de CO en base a la estación fija (techo) 43
5.23. Medición de SO_2 en base a la estación fija (techo) 44
5.24. Exponente de Ángstrom aplicado en Black carbon (370/880) 45

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Biomasa Se refiere a la materia orgánica derivada de plantas y animales, así como de residuos orgánicos, que puede ser utilizada como fuente de energía renovable.

Combustible fósil Son recursos energéticos derivados de restos orgánicos de plantas y animales que han experimentado procesos geológicos durante millones de años. Incluyen carbón, petróleo y gas natural.

Partículas en suspensión Son partículas sólidas o líquidas que se encuentran dispersas en un medio gaseoso o líquido.

Material particulado fino conocido como $PM_{2,5}$, se refiere a partículas en el aire que tienen un diámetro aerodinámico de 2.5 micrómetros o menos.

Material particulado grueso conocido como PM_{10}, se refiere a partículas en el aire que tienen un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros o menos.

Diámetro aerodinámico Se refiere al tamaño de una partícula en suspensión en el aire, y se define en términos de su capacidad para comportarse aerodinámicamente. Especifica el diámetro de una esfera perfecta con la misma densidad y velocidad de sedimentación en un fluido en particular que la partícula en cuestión.

Aerosoles se refieren a partículas finas o gotas líquidas suspendidas en un gas o aire.

1 | Introducción

La calidad del aire es uno de los asuntos ambientales que toma cada vez más notoriedad e importancia en las últimas décadas debido a los múltiples impactos que puede generar en temas prioritarios como los son la salud de las personas, cuidado del medio ambiente y preservación de la naturaleza. Está directamente relacionada con la creciente urbanización, desarrollo tecnológico y las necesidades intrínsecas de confort del ser humano que, como resultado, exigen mayores requerimientos energéticos que, en la actualidad, siguen siendo en su mayoría dependientes del uso de combustibles fósiles, responsables de liberar los principales contaminantes atmosféricos que repercuten en la salud de los seres vivos, ecosistemas y materiales.

En Chile las 3 fuentes principales de contaminación de la calidad del aire son los medios de transporte, la minería y la calefacción con leña residencial[14], siendo este último, el que presenta mayor impacto en la salud de las personas. Dado el contexto geográfico del país, las características de la calidad del aire varían dependiendo de la ubicación geográfica en la que se encuentre (norte, centro o sur), este fenómeno se ilustra en la Figura 1.1 . En Chile se cuenta con alrededor de 200 estaciones de calidad del aire[15] ubicadas a lo largo del país, que miden principalmente el material particulado (MP), y también otros contaminantes de interés particular. Estos son administrados a través de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y sus datos son de acceso público a través de su sitio web. No obstante, para la ciudad de Villa Alemana no existe a la fecha una estación fija de monitorio por parte del SINCA, por lo que, esta ciudad se convierte en un sitio de interés de estudio dado sus características mayoritariamente urbanas.

La mala calidad del aire es una realidad, y lamentablemente si no se hace algo al respecto solo puede empeorar. Dada su vital importancia, se vuelve relevante la investigación, estudio y desarrollo de nuevas tecnología, de fácil acceso y control para las comunidades afectadas y a las que aún no están sufriendo sus consecuencias. Como primer paso, se vuelve necesario realizar un análisis que permita realizar un diagnóstico del estado del aire que respiran los habitantes de la ciudad, despertar el interés por la problemática e incentivar la colaboración y apoyo de las personas.

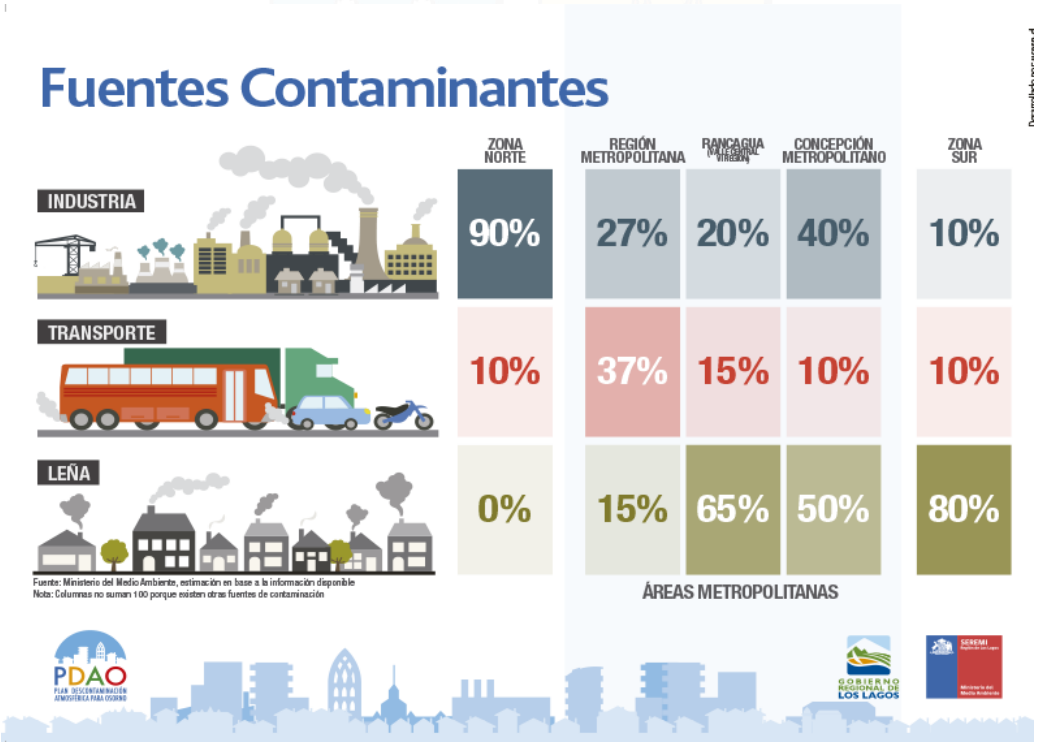


Figura 1.1: Principales contaminantes del aire en Chile

Fuente: Infografía fuentes contaminantes del aire, Ministerio del Medio Ambiente (2019)[10]

2 | Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar experimentalmente la calidad del aire en un entorno urbano para analizar el nivel de exposición a material particulado fino y carbono negro durante el invierno, identificando su fuente de emisión desde biomasa y/o combustibles fósiles

2.2. Objetivos específicos

- Analizar la normativa nacional e internacional (OMS) para la calidad del aire.
- Implementar la instalación de estaciones fijas de monitoreo de parámetros de calidad del aire para registrar en tiempo real la concentración de material particulado, gases y carbono negro.
- Instalar una estación meteorológica para registrar humedad, temperatura, dirección del viento y pluviometría.
- Analizar la concentración de material particulado en el aire, y evaluar el cumplimiento de la normativa nacional vigente.
- Identificar las principales fuentes de emisión de carbono negro registrados en el aire urbano.

3 | Marco teórico

3.1. Calidad del aire

Se entiende por calidad del aire al conjunto de propiedades o elementos presentes en el aire. Su calidad puede disminuir con la presencia de contaminantes, donde estos incluyen todo elemento, energía, radiación, vibración o ruido cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.

Los principales contaminantes de interés y normados, respecto a la calidad del aire, suelen ser compuestos orgánicos e inorgánicos. En Chile las normas de calidad del aire los clasifican en primarios o secundarios[16], donde las normas primarias de calidad del aire tienen como objetivo proteger la saluda de la población humana dentro del territorio nacional, mientras que las normas secundarias de calidad del aire tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza y son de carácter local y no necesariamente nacional.

3.2. Material particulado

El material particulado es un conjunto de partículas sólidas o líquidas que se encuentran en suspensión. Estas suelen clasificarse según su diámetro aerodinámico como $MP_{2,5}$ o MP_{10}, que son conocidos como material particulado fino y material particulado grueso respectivamente y se clasifican en el orden de las micras.

EL $MP_{2,5}$ contiene toda partícula con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 μm, mientras que, el MP_{10} contiene a toda partícula con un diámetro aerodinámico menor o igual a los 10 μm, es decir que, las concentraciones de MP_{10}, también contiene a las concentraciones de $MP_{2,5}$. El MP_{10} puede diferenciarse en una fracción fina que contiene a toda molécula de diámetro aerodinámico menor o igual a las 2,5 μm y una fracción gruesa que contiene a toda molécula con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm y mayor a 2,5 μm. A modo de comparación se puede mencionar que un cabello humano tiene un diámetro de al rededor de 50 μm o 70 μm, lo que sería unas 20 veces más grande que el material particulado fino.

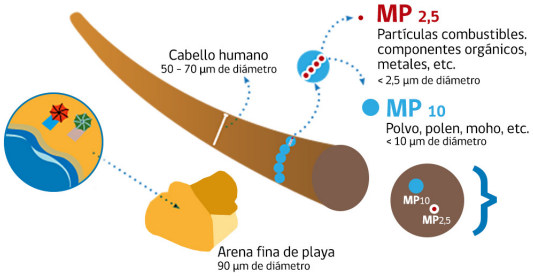


Figura 3.1: Comparación tamaño del material particulado

Fuente: Comparación del tamaño de un pelo y de la arena fina de playa con partículas MP_{10} Y $MP_{2,5}$, Ministerio del Medio Ambiente [9]

El material particulado fino ($MP_{2,5}$) se forma de manera directa en la combustión de combustibles fósiles o biomasa, a partir de la condensación de gases, de reacciones químicas en la atmósfera a partir de gases precursores como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, amoníaco, y otros compuestos; y a través de procesos de nucleación y coagulación de partículas ultrafinas.

Las partículas finas pueden permanecer en el aire durante días o semanas, siendo capaces de recorrer largas distancias teniendo un impacto regional, mientras que, las partículas más gruesas pronto vuelven al suelo debido a la precipitación y gravedad, teniendo un impacto más local.

3.2.1. Black carbon

El carbono negro o black carbon por su nombre en inglés, es un aerosol secundario perteneciente al material particulado fino ($PM_{2,5}$), formado por la combustión incompleta de biomasa o combustibles fósiles. Está conformado principalmente por moléculas de carbono y su estructura puede variar dependiendo de varios factores, como el tipo de combustible quemado, las condiciones de combustión, la temperatura y otros factores ambientales. Su efecto en la salud es un tema ampliamente estudiado en la actualidad y su impacto está asociado a problemas respiratorios y enfermedades cardiovasculares.

Tipos de black carbon

1. **Black carbon de combustión de biomasa**: Proviene de la quema de material orgánico como madera, residuos agrícolas o estiércol. Las partículas de carbono negro de la combustión de biomasa pueden variar en tamaño y forma según el tipo de combustión y el material quemado. Puede incluir otros compuestos orgánicos, pero tiende a ser más puro en comparación con el black carbon de combustibles fósiles.

2. **Black carbon de origen de combustible fósil**:Producido por la quema de combustibles derivados del petróleo, carbón o gas natural. Este tipo de carbono negro puede contener una variedad de compuestos químicos, incluyendo hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y otros contaminantes asociados con la quema de combustibles fósiles.

Efectos de el black carbon en la salud

1. **Efectos respiratorios**: Se ha demostrado que la exposición al carbono negro está asociada con el empeoramiento de enfermedades respiratorias como asma, bronquitis crónica y enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Además, puede causar irritación de las vías respiratorias.

2. **Impacto Cardiovascular**: Estudios epidemiológicos han relacionado la exposición al carbono negro con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, incluyendo

enfermedades del corazón, hipertensión arterial y accidentes cerebrovasculares[17].

Efectos de el black carbon en el medio ambiente

- Posee la capacidad de almacenar radiación solar, por lo que, contribuye en el aumento de la temperatura de su entorno, como en el caso de, el aumento de la temperatura de la atmósfera, acelerar el derretimiento de glaciales, hielos y nieve.
- Disminución de la fertilidad de los suelos al tener la capacidad de interactuar con sus nutrientes y/o disminuir la aeración y agua disponible al cubrir las superficies.
- Impacto en ecosistemas y vida silvestre al contaminar habitas delicados, alterando la biodiversidad[3].

3.3. Exponente de Ángstrom

El exponente de Ángstrom es el nombre que recibe la expresión que describe capacidad de aerosoles, de absorber o dispersar la luz en función de la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente. Esta ecuación[2] puede ser utilizada como se muestra a continuación:

$$\alpha = -\frac{ln\frac{C1}{C2}}{ln\frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \tag{3.1}$$

Donde:

- $\lambda_1 y \lambda_2$ son las longitudes de onda en las cuales se realizó la medición de concentración.
- C1 y C2 son las concentraciones de black carbon para las longitudes de onda $\lambda_1 y \lambda_2$

Dependiendo de el material de combustión que genere el black carbon, este tendrá diferentes comportamientos, siendo:

- Black carbon de combustión de biomasa: tiene mayor capacidad de absorción de radiación en las longitudes de onda ultravioleta, en comparación a la infrarroja.

- Black carbon de origen de combustible fósil: tiene mayor capacidad de absorción de radiación en las longitudes de onda infrarroja, en comparación a la ultravioleta.

En cuanto a los valores que puede tomar la ecuación 3.1, para el caso del black carbon:

- Valores positivos: el black carbon posee mayor capacidad de absorción de longitudes de onda en el rango ultravioleta en comparación a los cercanos al infrarrojo, por lo que, predomina el black carbon producido por la combustión de biomasa.
- Valor cercano a 0: el black carbon n o presenta una capacidad de absorción predominante entre las longitudes de onda evaluadas.
- Valores negativos: el black carbon posee mayor capacidad de absorción de longitudes de onda en el rango infrarrojo en comparación a los cercanos al ultravioleta, por lo que, predomina el black carbon producido por la combustión de combustibles fósiles.

3.4. Norma primaria de calidad ambiental en Chile

En Chile, durante el año 1994 fue promulgada la ley de bases del medio ambiente (ley N° 19.300). Esta ley establece las bases para la protección y conservación del medio ambiente, incluida la calidad del aire. Con la llegada de Decreto Supremo N° 60/2002 se establecieron valores máximos de concentración para ciertos contaminantes atmosféricos.

La norma primaria de calidad del aire establece las concentraciones máximas permitidas para ciertos contaminantes atmosféricos. Esta ley busca cuidar la salud de las personas y la preservación del medio ambiente, estableciendo valores tolerables de exposición.

La ley abarca una serie de contaminantes que incluyen, partículas en suspensión (PM_{10}, $PM_{2,5}$), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) y plomo (O_3)[16]. Los límites y periodos de evaluación se muestran en la Tabla 3.1, en donde:

- **Concentración promedio anual**: Establece el límite máximo permitido para la concentración media anual de un contaminante. Se refiere a la cantidad máxima de contaminante que puede estar presente en el aire durante un año en promedio.

- **Concentraciones máximas diarias**: Estos límites definen la concentración máxima permitida para un contaminante durante un período de 24 horas. Representan la concentración más alta que se puede alcanzar en un solo día.

- **Límites para periodos de 8 horas y 1 hora**: Estos límites se refieren a la concentración máxima permitida de un contaminante en el aire durante un periodo de 8 horas y de 1 hora, respectivamente.

El cumplimiento de estas normas es esencial para proteger la salud de la población y el medio ambiente, especialmente en áreas urbanas y zonas industriales donde la concentración de contaminantes puede ser más alta y representar un riesgo para la salud pública.

Tabla 3.1: Concentraciones limite según la norma primaria de calidad ambiental en Chile

CONTAMINANTE	**CONCENTRACIÓN** $[\mu gr/m^3]$			
	PROMEDIO ANUAL	24 HORAS	8 HORAS	1 HORA
$PM_{2,5}$	20	50	-	-
PM_{10}	50	130	-	-
SO_2	60	150	-	350
NO_2	100	-	-	400
CO	-	-	10000	30000
PLOMO	0.5	-	-	-
O^3	-	-	120	-

Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

La OMS es una agencia especializada de las Naciones Unidas que tiene como objetivo principal promover la salud, prevenir enfermedades y mejorar las condiciones de vida de

las personas en todo el mundo.

La OMS busca proporcionar un marco general para la protección de la salud pública, desarrollando estándares internacionales, directrices y recomendaciones en áreas clave de la salud pública, como la calidad del aire. En el año 2006 la OMS hizo una publicación sobre la calidad del aire, en donde, para ciertos contaminantes se establecían valores máximos y periodos de evaluación, con el fin de orientar a los encargados de establecer políticas ambientales y profesionales de la salud, en todo el mundo. Con el paso de los años y con las nuevas investigaciones se han ido actualizando estas directrices y su última publicación fue en el año 2021[4]. En la Tabla 3.2, se muestran los valores de la última actualización, en donde:

- **Concentración promedio anual**: Establece el límite máximo permitido para la concentración media anual de un contaminante. Se refiere a la cantidad máxima de contaminante que puede estar presente en el aire durante un año en promedio.
- **Concentraciones máximas diarias**: Estos límites definen la concentración máxima permitida para un contaminante durante un período de 24 horas. Representan la concentración más alta que se puede alcanzar en un solo día.
- **Límites para periodos de 8 horas**: Este límite se refieren a la concentración máxima permitida de un contaminante en el aire durante un periodo de 8 horas.
- **Temporada alta**: Promedio de la media máxima diaria de ocho horas de concentración de O_3 correspondiente al período de seis meses consecutivos con el promedio móvil semestral de concentración de O_3 más alto.

Tabla 3.2: Directrices sobre la calidad del aire por la OMS

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN [$\mu gr/m^3$]			
	PROMEDIO ANUAL	24 HORAS	8 HORAS	TEMPORADA ALTA
$PM_{2,5}$	5	15	-	-
PM_{10}	15	45	-	-
SO_2	-	40	-	-
NO_2	10	25	-	-
CO	-	4000	-	-
O_3	-	-	100	60

3.5. Consecuencias de la mala calidad del aire

3.5.1. Daño a humanos y animales

Las partículas y compuestos en cierta concentración pueden ocasionar efectos nocivos en la salud de seres humanos y animales, como, por ejemplo, reducción de la función pulmonar, aumento de la susceptibilidad de contraer infecciones respiratorias, muertes prematuras y cáncer, entre otros. El material particulado puede ingresar al tracto respiratorio de los seres vivos, si bien, la fracción gruesa no es capaz de continuar su avance, y el mismo cuerpo se encarga de eliminarlo, para el caso de la fracción fina, está es capaz de ingresar a los pulmones y los alvéolos quedando incrustado e incluso siendo capaz de ingresar al torrente sanguíneo[12]. En el caso particular de black carbon, está demostrado que la exposición de humanos a cierta concentración de este contaminante tiene propiedades cancerígenas(referencia).

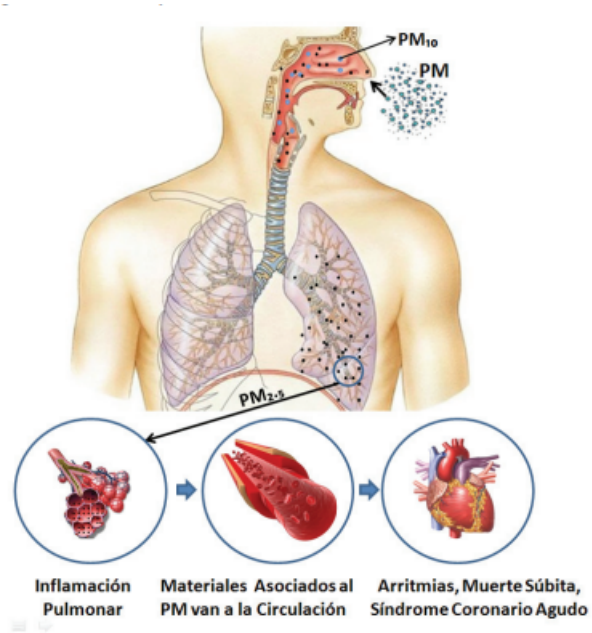


Figura 3.2: Inhalación del material particulado

Fuente: Contaminación por material particulado, estrés oxidativo e inflamación, Rosa I. Rodríguez-Cotto (2015)[12]

3.5.2. Daño a la vegetación

Las plantas son afectadas por la calidad del aire en diferentes aspectos, desde el perjuicio a la fotosíntesis donde necesitan de luz solar y dióxido de carbono para sobrevivir, y luego, devolver oxigeno al ambiente hasta en su misma estructura y apariencia. La fotosíntesis puede ser perjudicada desde una disminución de los rayos de luz que inciden, debido al material particulado capaz de absorber la misma longitud de onda que la planta, por la presencia de esmog fotoquímico que genera ozono (O_3) y otros compuestos que al ingresar dentro de la planta es capaz de dañar su estructura. Los estomas pueden verse afectados por la infiltración de material particulado, entorpeciendo el intercambio gaseoso e hídrico con la atmósfera.

La lluvia ácida es capaz de cambiar el pH del suelo y degenerar los tejidos de las hojas produciendo manchas focalizadas de tonos rojizos, blancos, verde claro o amarillos por déficit de clorofila. Si la acción contaminante es muy fuerte, puede llegar a paralizar el crecimiento de la planta. En especial, la presencia de dióxido de nitrógeno (NO_2) o dióxido de azufre (SO_2) en altas o bajas concentraciones por cortos o largos periodos de tiempo

pueden generar efectos nocivos en la apariencia y desarrollo de la vegetación[1].



Figura 3.3: Efecto de la lluvia ácida en plantas
Fuente: Efecto de la contaminación del aire sobre las plantas, Arboreto Luis Ceballos [1]

3.5.3. Daño en materiales

Otro de los puntos críticos, que aunque no insidia con la salud de los seres vivos, es el daño a materiales. Principalmente en las grandes ciudades es cada vez más habitual la presencia de lluvias ácidas, este fenómeno genera la sedimentación de partículas sobre monumentos, esculturas y estructuras, afectando su apariencia externa y favoreciendo la existencia de la **oxidación**, una reacción capaz de alterar y deteriorar las propiedades físicas y químicas de los materiales, produciendo grandes daños monetarios sobre estructuras e irreparables sobre monumentos histórico y artístico. Los principales agentes oxidantes sobre los materiales son los óxidos de azufre (SO_x)[18].



Figura 3.4: Efectos de la lluvia ácida sobre esculturas
Fuente: Arte devorado por el cambio climático, Irene Hdez. Velazco[18]

3.5.4. Efecto en la visibilidad

El **esmog fotoquímico** es el principal responsable de darle un aspecto **nebuloso** al cielo de grandes ciudades alrededor del mundo, en especial esas con gran actividad industrial y tráfico vehicular. Se origina por la combinación del aire contaminado durante un período de altas presiones, a partir de las reacciones entre la luz solar y los óxidos de nitrógeno (NO_x) y/o compuestos orgánicos volátiles (COV). Estas reacciones provocan la formación de ozono (O^3) y otros contaminantes secundarios como sulfatos, nitratos, formaldehído y cetonas[14].



Figura 3.5: Esmog fotoquímico
Fuente: ¿Qué te quita el aire?,Adrianna Quintero [11]

3.5.5. Contribución al cambio climático

La mala calidad del aire puede contribuir significativamente al cambio climático debido a la presencia de contaminantes atmosféricos que tienen impactos directos e indirectos en el sistema climático. A continuación se enumeran algunos ejemplos de como la mala calidad del aire contribuye al cambio climático:

1. **Emisiones de Gases de Efecto Invernadero** : La mala calidad del aire resulta de la emisión de gases contaminantes como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros gases de efecto invernadero. Estos gases atrapan el calor en la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático.

2. **Partículas de Material Particulado (PM)**: La presencia de partículas finas en el aire, como el black carbon o carbono negro, pueden absorber la radiación solar y calentar la atmósfera. Además, las partículas pueden afectar la formación de nubes y la reflexión de la luz solar, alterando los patrones de radiación y el clima regional.

3.6. Antecedentes sobre el material particulado en Chile

El impacto del material particulado es un fenómeno altamente estudiado en todo el mundo debido a sus impactos en la salud, ecosistemas, agricultura, etc. En cuanto a Chile, se han tomado una serie de medidas y enfoques para combatirlo, dentro de las que se incluyen:

- **Políticas ambientales**: implementación de normativas y estándares ambientales que regulen la concentraciones máximas de contaminantes ambientales. La Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) es la encargada de regular y hacer cumplir estos asuntos.
- **Control de emisiones vehiculares**: implementación de estándares más estrictos para las emisiones de vehículos e incentivos a la adopción de vehículos más limpios y eficientes desde el punto de vista energético.
- **Gestión de la quema de biomasa**: aplicación de planes de descontaminación de localidades altamente afectadas por las emisiones de material particulado, especialmente las ubicadas en el sur del país.
- **Monitoreo continuo**: existencia de red de monitoreo nacional de los principales contaminantes ambientales regularizados por la norma primaria y secundaria de la calidad del aire. Monitorizada por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (Sinca).

Carbono negro

Si bien, en Chile la lucha contra el material particulado está latente, no es tan así, con uno de sus principales agentes, el carbono negro. Donde el primer acercamiento ocurrió

con la formulación del primer inventario de emisiones para carbono negro durante el año 2018, que da evidencia de las principales fuentes de este contaminante a lo largo de Chile. El siguiente avance apareció en el contexto del Acuerdo de París, este último abarca una serie de acuerdos internacionales en donde se busca abordar el cambio climático y sus consecuencias, fue llevado a cabo por primera vez durante el año 2015, teniendo como objetivo principal, "limitar el aumento de temperatura global a 2 °C respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5 °C", este objetivo no establece un periodo específico y se centra en acciones a largo plazo. Durante el año 2020, Chile actualizo sus compromisos ambientales incluyendo esta vez al carbono negro, donde se propuso como objetivo, reducir sus emisiones. La meta establecida es lograr disminuir las emisiones en un 25 % al año 2030, tomando como base 2016. Para esto se desarrolló el proyecto “Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile”, su desarrollo se encargó a Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) para el Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

En cuanto a casas de estudio, aún no se cuenta con gran variedad de trabajos que se relacionen al carbono negro, y si es que existen, no superando las 1 ó 2 publicaciones, y estás abarcando temas más puntuales, como su comportamiento, efecto en una determinada muestra o lugar, estimación de sus emisiones para determinada fuente y propuesta de diseño de red de monitoreo.

4 | Diseño y procedimiento experimental

La preparación, organización y ejecución del proyecto fue realizado en el Laboratorio de Energías Renovables(LER), perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, sede Viña del Mar, Chile.

El proyecto fue ejecutado en los recintos de la municipalidad de Villa Alemana durante dos meses, específicamente entre el 20 de julio del año 2023 y el 26 de septiembre del año 2023. Los equipos de medición disponibles fueron configurados en 2 puntos de interés, teniendo como principal diferencia la altura de medición (nivel suelo y 20 metros de altura). Estos puntos de medición fueron supervisados de manera periódica por el equipo de investigación con el fin de poder recolectar y trabajar los datos de manera oportuna, reducir la intervención y efectos de factores externos y mantener la correcta operación de los equipos. De manera complementaria, se realizó un conteo vehicular en las calles aledañas a los puntos de monitoreo.

4.1. Diseño experimental

La red de monitoreo utilizada constó de 5 estaciones de medición de parámetros de la calidad del aire, distribuidas en 2 locaciones dentro de la Municipalidad de Villa Alemana. Estas fueron distribuidas como se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1: Distribución de equipos
Fuente: Elaboración propia

En donde, para los sectores 1 y 2, los equipos fueron distribuidos de la siguiente manera:

- Locación 1: Una estación de monitoreo ambiental (I).
- Locación 2: Una estación de monitoreo ambiental (II), un monitor portátil de carbono negro, un monitor de material particulado y una estación meteorológica.



Figura 4.2: Configuración de locaciones
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.1 se enlistan los equipos de medición utilizados y los parámetros de la calidad del aire medidos por cada uno de ellos durante la investigación.

Tabla 4.1: Descripción de estaciones de monitoreo

ESTACIÓN	PARÁMETRO CUANTIFICADO
Estación de monitoreo ambiental I	CO, PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}, TSP, temperatura y humedad
Estación de monitoreo ambiental II	CO, SO_2, PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}, TSP, temperatura y humedad
Monitor portátil de carbono negro	UVPM, BC y temperatura
Monitor de material particulado	Número de partículas, PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10} y TSP
Estación meteorológica	Temperatura, humedad, presión, velocidad del viento, ráfaga, dirección de viento, punto de roció, sensación térmica y nivel de lluvia

4.2. Caracterización de equipos

En esta sección se describirán los equipos utilizados durante el proyecto de investigación. Se incluirán funciones, características, parámetros y rangos de operación, con tal de volver la experiencia reproducible y comparable a futuro.

4.2.1. Estación de monitoreo ambiental



Figura 4.3: Estación de monitoreo ambiental

Fuente:Aeroqual AQM65, Grupo A y T[19]

- Marca: Aeroqual
- Modelo: AQM65
- Recolección de información: WIfi u online

4.2.2. Monitor portátil de carbono negro



Figura 4.4: Monitor portátil de carbono negro

BC 1060 monitor portátil de carbono negro. Met One, Inteccon[7]

- Marca: Met One Instruments
- Modelo: BC1060
- Recolección de información: memoria USB

4.2.3. Monitor de material particulado



Figura 4.5: Monitor de material particulado

Fuente: Grimm 11-D Advanced Real-Time Dust Monitor, Laftech[8]

- Marca: GRIMM AEROSOL TECHNIK
- Modelo: 11-D
- Recolección de información: memoria USB más software computacional

4.2.4. Estación Meteorológica



Figura 4.6: Estación Meteorológica

Fuente: PCE FWS 20 Weather Station, Emin[6]

- Marca: PCE Instruments

- Modelo: PCE-FWS 20
- Recolección de información: software computacional

4.3. Área de estudio: Villa Alemana

Villa Alemana es una comuna de la zona central de Chile ubicada en la Provincia de Marga Marga, en la Región de Valparaíso. Junto con las Comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué y Concón, forma parte del área metropolitana del Gran Valparaíso.

A continuación, se muestran algunos datos de la ciudad[5]:

- Una población de 126.548 habitantes.
- Superficie total de 97 km^2.
- Una altitud media de 143 m.s.n.m.
- Un clima templado.



Figura 4.7: Villa Alemana

Fuente:Plaza Belén, Villa Alemana, Región de Valparaíso, Chile, Carlos Figueroa Rojas[13]

4.4. Lugar de ejecución: Municipalidad de Villa Alemana

La Ilustre Municipalidad de Villa alemana es un establecimiento ubicado en el corazón de la ciudad(dirección: Buenos Aires #850), rodeada de actividad urbana y comercial.

En las primeras etapas de planificación del proyecto, se tuvo como estándar primario el resguardo de la integridad del equipo de investigación y las estaciones de monitoreo, por lo que se deseaba encontrar un lugar que pudiese reducir al mínimo la intervención externa durante el proceso, y así también, velar por la prolijidad de los datos medidos. Una vez realizadas las pertinentes gestiones y reuniones con la directiva de la municipalidad, se encontró una muy buena disposición e interés por las problemáticas derivadas de la mala calidad del aire, por parte de las autoridades, que se vieron reflejadas en muy buena disposición de los espacios, difusión en redes sociales y una charla donde los investigadores pudimos exponer la problemática a la comunidad y el alcance del proyecto que se iba a realizar en ese entonces.



Figura 4.8: Municipalidad de Villa Alemana

Municipalidad de Villa Alemana

4.5. Supervisión de estaciones de monitoreo

Las estaciones fueron supervisadas de manera diaria por el equipo de investigación, entre los protocolos a seguir se encontraban:

- Recolectar los datos medidos cada dos días 2 y compartirlos con el resto del equipo

- Borrar las memorias internas de las estaciones que estuvieran por llenarse
- Cambiar el filtro del monitor de material particulado cada 4 días (posteriormente se cambió a 10 días)
- Comprobar que las estaciones de monitoreo hubieran estado trabajando sin interrupción
- Registrar las mediciones actuales de las estaciones con monitor

Todos estos protocolos fueron registrados utilizando una bitácora, la cual se encuentra en Anexo x.

4.6. Conteo de autos

Con tal de poder tener una estimación del impacto del tráfico vehicular en las lecturas de las estaciones de monitoreo, se decidió realizar un conteo de autos en las calles aledañas a la ilustre municipalidad de Villa Alemana. Se escogieron las calles más cercanas a los puntos de monitoreo, siendo estas:

- Buenos Aires, con un sentido del tránsito
- Progreso, con doble sentido del tránsito

Ambas calles contaban con semáforos, y se situaban en los puntos 1 y 2, que se muestran en la Figura 4.9. Los puntos 1 y 2 también fueron utilizados como ubicación para contar el tráfico en las calles progreso y Buenos Aires respectivamente.

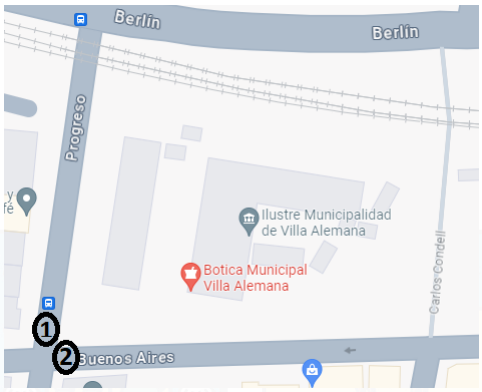


Figura 4.9: Mapa conteo de autos

Fuente: Elaboración propia

Los conteos fueron realizados en 2 días durante dos períodos específicos y duraron 45 min cada uno. Estos periodos corresponden de 7:15 a 8:00 h y de 20:00 h a 20:45 h, y fueron escogidos debido a que en esos horarios se evidenciaban los mayores picos de emisión de carbono negro.

5 | Presentación y análisis de resultados

Para analizar los datos recolectados se trabajó en el programa MatLab, con la licencia de estudiante disponible gracias a la casa de estudio. Se utilizaron principalmente 2 tipos de gráficas, estas son:

- Gráfica de líneas, para analizar la evolución de los elementos estudiados en función del tiempo
- Mapa de calor, para analizar el comportamiento de los elementos estudiados en función de las horas del día

Además, ya que se cuenta con las concentraciones de black carbon para dos longitudes de onda diferente (370 nm y 880 nm), fue posible recurrir al 'Exponente de Ángstrom'. Esta variable, para el caso del black carbon, permite identificar la fuente predominante en las partículas medidas, que podría ser, combustible fósil o biomasa.

5.1. Caracterización de datos

En la Tabla 5.1 se indica la cantidad de datos recolectados y el periodo de recolección para las estaciones de monitoreo durante el periodo de estudio (20/07/2023 - 26/09/2023).

Tabla 5.1: Caracterización de datos durante el proyecto

Estación	Cantidad de datos	Periodo de medición
Estación fija (piso)	97.843	1 min
Estación fija (techo)	88.989	1 min
Monitor portátil de black carbon	98748	1 min
Monitor de material particulado	91.443	1 min
Estación meteorológica	20.756	5 min

Consideraciones

- Durante el periodo de la campaña de investigación, hubo un cambio de hora en el territorio nacional, en donde, se adelantó 1 hora. Para efectos de la investigación, no se realizó la modificación en las estaciones de medición.
- La estación fija (techo) presentaba un error, en el que, después de un periodo de tiempo fijo (24 horas), dejaba de recolectar datos y esta debía ser reiniciada para retomar la medición. Una vez descubierto este patrón (09/08/2023) se tomaron medidas satisfactorias para asegurar la continuidad en los datos.
- La estación fija (Piso), presento un problema de medición desde el inicio de la investigación, que alteraba las mediciones de material particulado, fue posteriormente solucionado (04/08/23).
- El monitor de material particulado utilizó un filtro que no era el recomendado, y la entrada de muestra no era la original.
- En los datos medidos por la estación meteorológica, había secciones donde aparecían mediciones incoherentes, donde, no había continuidad entre las mediciones. Se optó por eliminar esos datos.
- Para los gráficos de calor, algunos valores que se alejaban considerablemente de la tendencia fueron acotados para brindarle mayor heterogeneidad a la ilustración y volverla más didáctica.

5.2. Condiciones ambientales

En primer lugar se incluirán gráficas de temperatura, humedad relativa, pluviometría y dirección del viento, con el fin de poder relacionar sus mediciones con las concentraciones de contaminante que se analizarán en la secciones siguientes.

Entre las estaciones de monitoreo, no hubo gran diferencia entre las mediciones de temperatura y humedad relativa, por lo que, en esta sección solo se incluirán los resultados de la estación fija (piso), dado que, es la que se encuéntrala más cercana a las fuentes de contaminación que se busca estudiar (vehículos motorizados o estufas de calefacción). Los resultados de las demás estaciones se presentan en el Anexo x.

Temperatura

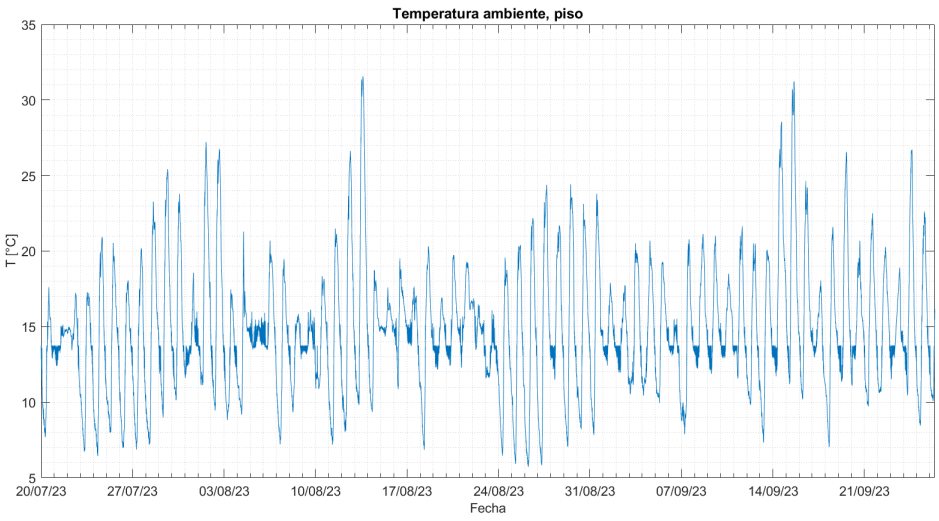


Figura 5.1: Temperatura ambiente en base a estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

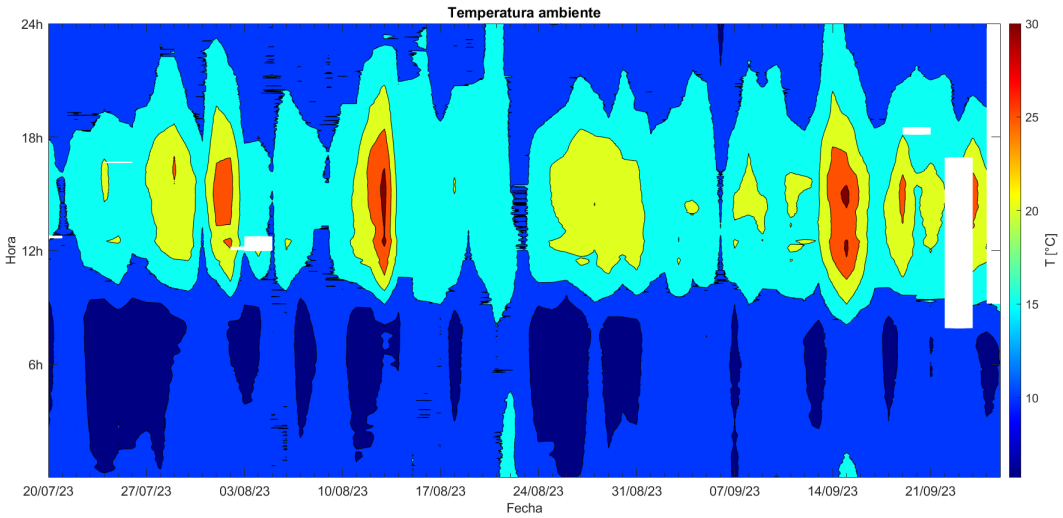


Figura 5.2: Medición de temperatura en base a la estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

Al analizar la Figura 5.1 y la Figura 5.2, se puede concluir qué:

- La temperatura promedia los 15°C, con una desviación estándar de 5 °C, esto resulta coherente a una región con clima templado, como lo es Villa Alemana.
- Desde la madrugada hasta las 11h se mantienen temperaturas relativamente bajas entre 7 °C y 10 °C.
- A partir de las 11h la temperatura suele subir progresivamente hasta alcanzar su máximo alrededor de las 18 h, luego vuelve a decaer progresivamente.

Humedad relativa

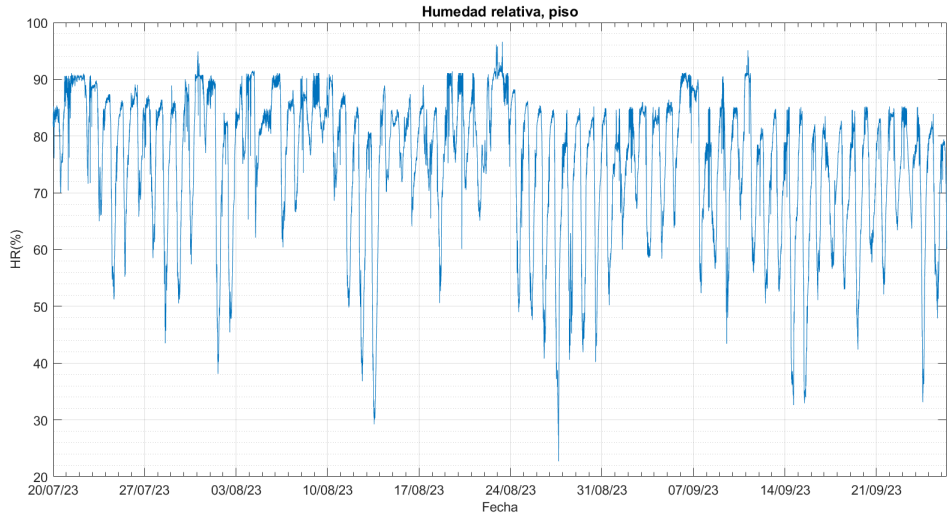


Figura 5.3: Humedad relativa en base a estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

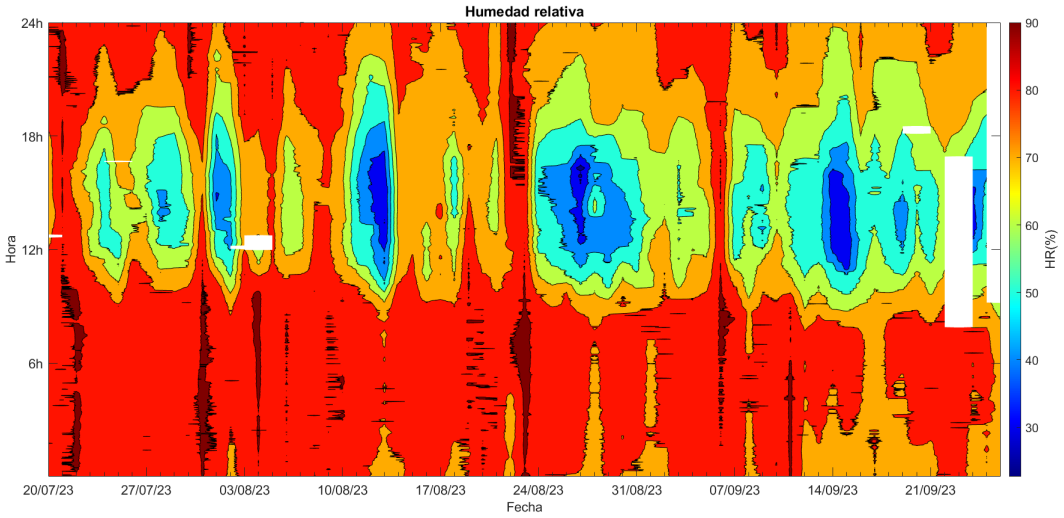


Figura 5.4: Medición de humedad relativa con base en la estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

Al analizar la Figura 5.3 y la Figura 5.4 se puede concluir qué:

- La humedad relativa promedio de fue 76,8 %, con una desviación estándar de 12,3 %, resultando en promedio bastante alta, puede deberse a la presencia de precipitaciones

durante el periodo de investigación.

- Las gráficas de humedad presentan un comportamiento opuesto a las gráficas de temperatura, lo cual era esperable, dado que, el aire al aumentar la temperatura, aumenta la capacidad de retener vapor de agua, por lo que, la humedad relativa disminuye.

Pluviometría

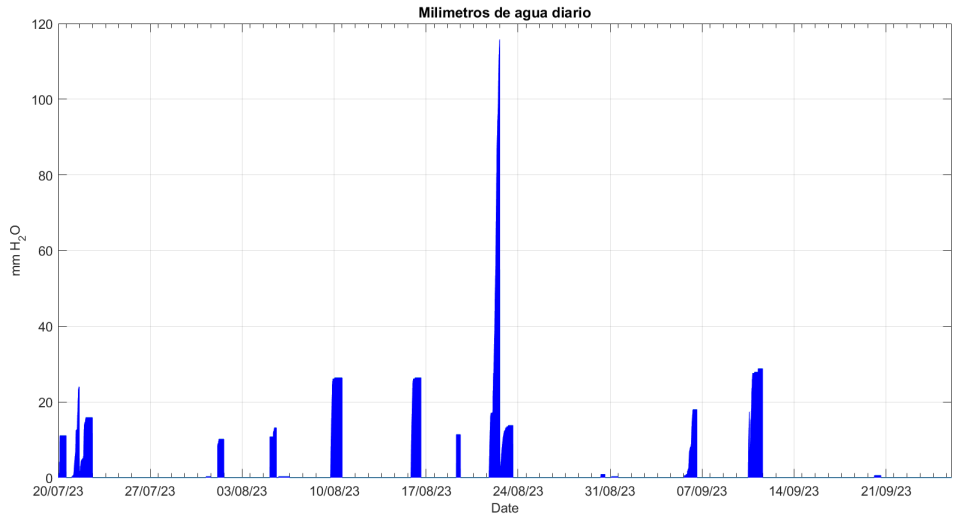


Figura 5.5: Milímetros de agua a diario

Fuente: Elaboración propia

Analizando la Figura 5.5, se puede observar qué:

- Hubo al menos 12 días donde cayeron precipitaciones que superaron los 10 milímetros de agua, incluyendo un episodio donde se alcanzaron los 115 milímetros.

- Las irregularidades en las gráficas de temperatura y humedad, en donde, la temperatura no aumentó en horarios donde solía ocurrir o que la humedad no disminuyó en horarios en los que solía pasar, existieron precipitaciones considerables.

Dirección del viento

La dirección fue medida por la estación meteorológica, la cual, entrega 16 direcciones del viento, aunque a ojos del autor, el esquema se entendia de mejor manera al utilizar solamento 8, como se muestra en la Figura 5.6.

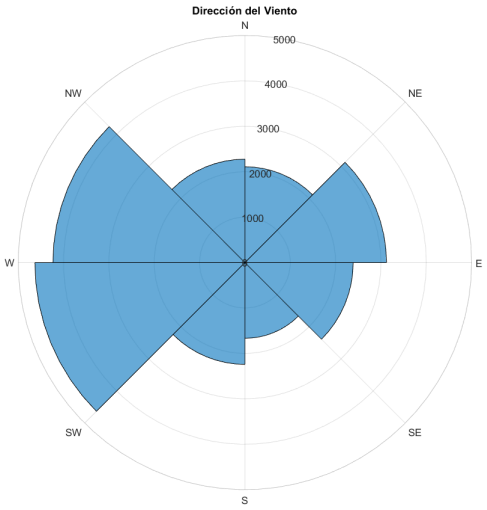


Figura 5.6: Dirección del viento en base a la estación meteorológica

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.6 se puede observar que las direcciones del viento predominante son principalmente las con dirección este y oeste, que coincide con su ubicación en el valle del río Marga Marga que se recorre de este a oeste. Esto podría resultar en un traslado considerable de material particulado entre las ciudades aledañas por este efecto túnel.

5.3. Material particulado grueso (PM_{10})

Análisis nivel piso

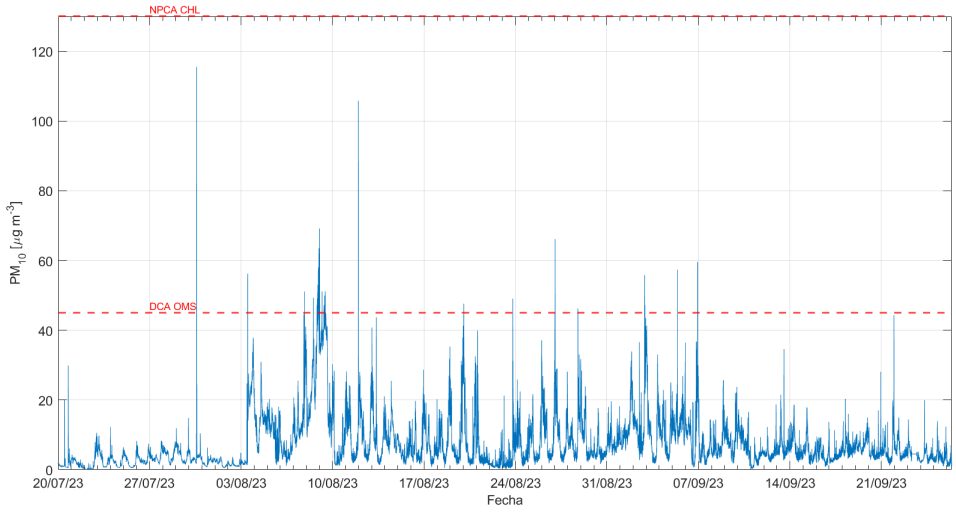


Figura 5.7: Comparación de la medición de PM_{10} y estándares respecto a estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

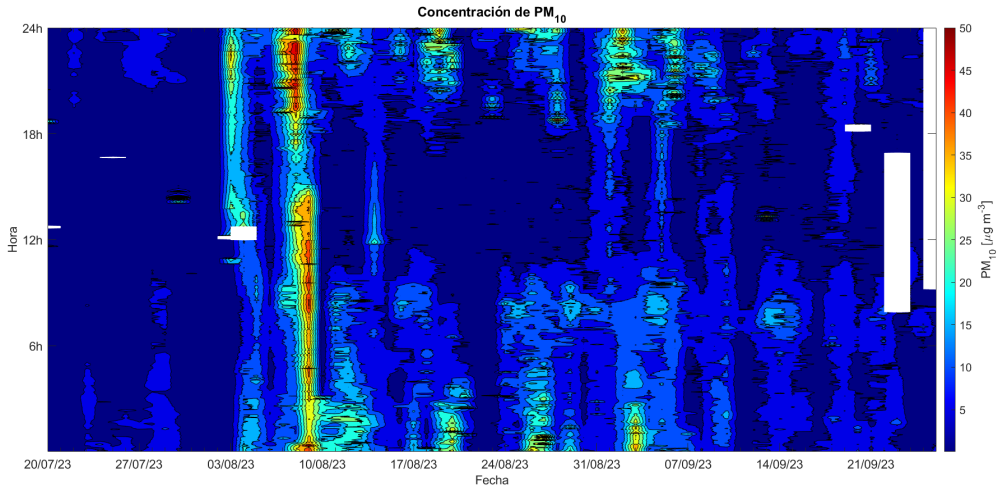


Figura 5.8: Medición de PM_{10} con base en la estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.7 y la Figura 5.8 se observa::

- Para la concentración de 24 h, cumplimiento de la norma primaria de calidad del aire nacional(NPCA CHL), no así, las recomendaciones y directrices de la calidad del aire dado por la OMS(DCA OMS).
- Existen zonas de mayor concentración de material particulado grueso, estas aparecen entre las 18 h y las 12 h del día siguiente, con un pico de concentración entre las 20 h y 03 h del día siguiente, dado el horario, se presume que es originado por el uso de estufas de calefacción residencial.
- A partir del 03/08 gran parte de las ocasiones donde se rompió una tendencia de alta concentración de PM_{10}, coincide con la presencia de precipitaciones.
- Existe una zona de baja concentración. Esta aparece entre las 12 h y las 18 h.

Análisis nivel techo

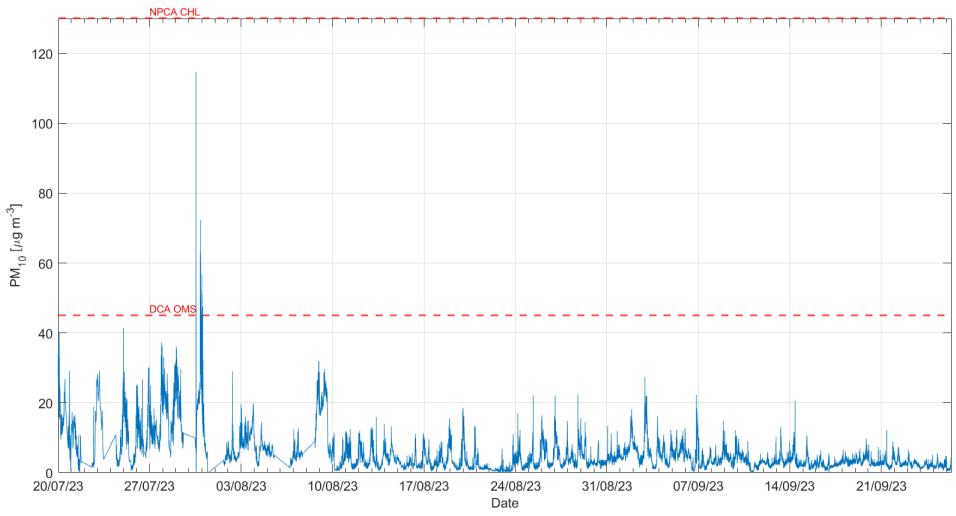


Figura 5.9: Comparación de la medición de PM_{10} y estándares respecto a estación fija (techo)

Fuente: Elaboración propia

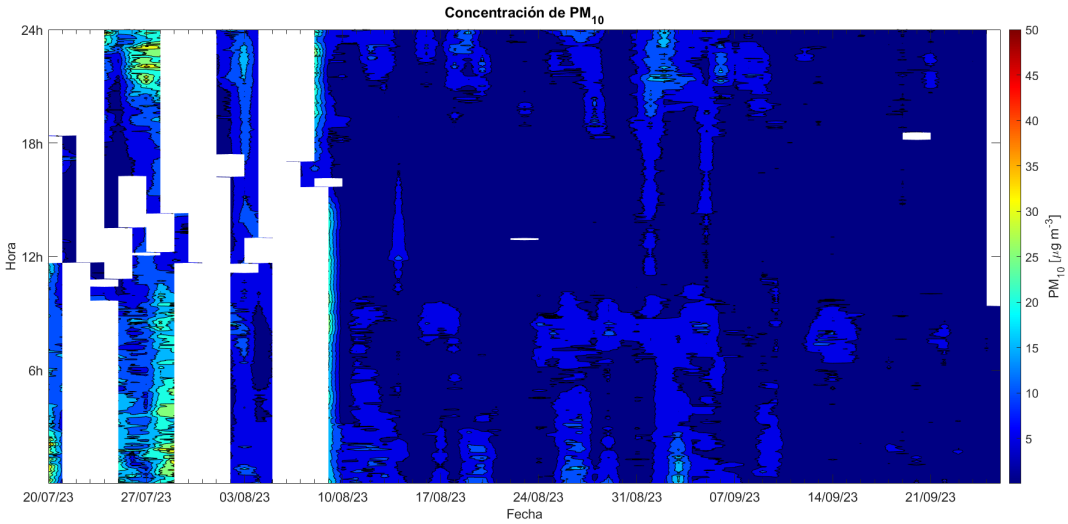


Figura 5.10: Medición de PM_{10} en base a la estación fija (techo)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.9 y la Figura 5.10 se observa:

- Para la concentración de 24 h, cumplimiento de la norma primaria de calidad del aire nacional(NPCA CHL), no así, las recomendaciones y directrices de la calidad del aire dado por la OMS(DCA OMS).
- Se aprecian diferencias entre las concentraciones para una misma fecha, siendo las que están a nivel piso mas altas que las de nivel techo. Este resultado es coherente, dado que a nivel piso, existe una mayor proximidad a las principales fuentes de combustión (vehículos motorizados y estufas).
- Existen zonas de mayor concentración de material particulado, aparecen entre las 18 h y las 12 h del día siguiente. Esta zona desaparece casi por completo a partir del 10/09/23.
- Existe una zona de baja concentración. Esta aparece entre las 12 h y las 18 h.
- Dentro de la Figura 5.10, las franjas en blanco representan períodos en donde no se cuenta con los datos.

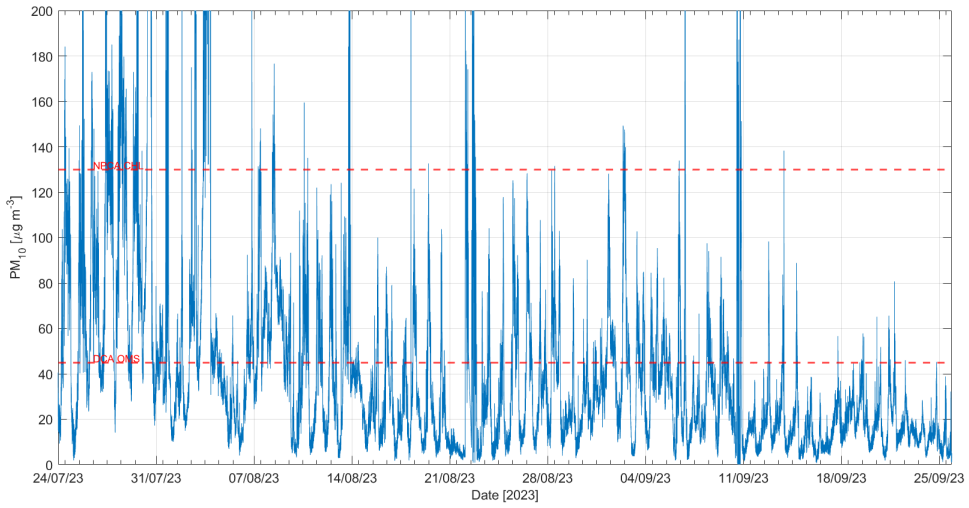


Figura 5.11: Comparación de la medición de PM_{10} y estándares respecto a monitor de material particulado

Fuente: Elaboración propia

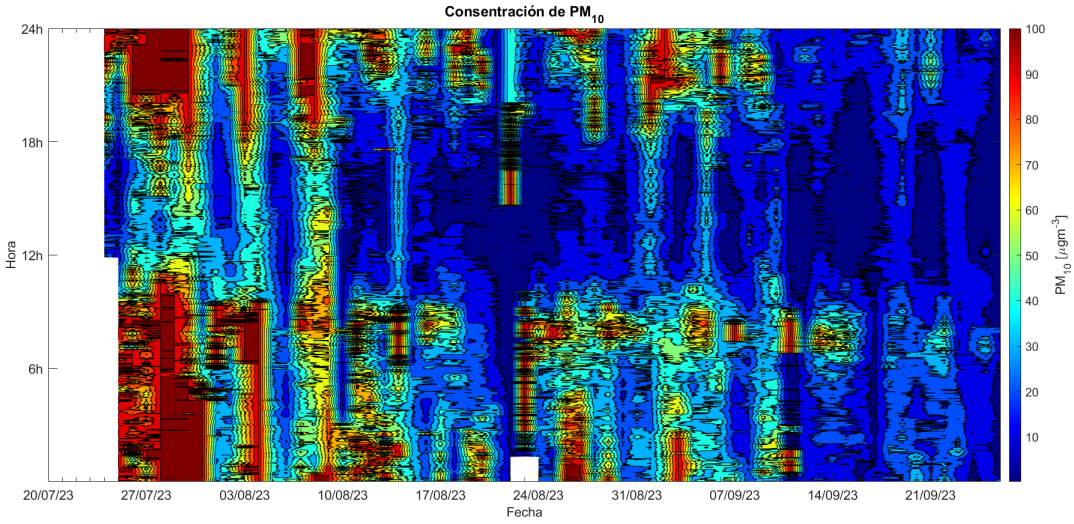


Figura 5.12: Medición de PM_{10} respecto a monitor de material particulado

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.11 y la Figura 5.12 se observa:

- Una cantidad considerable de ocasiones donde la norma primaria de calidad del aire nacional no fue cumplida, y en concentraciones considerablemente mayores a la estación fija para un mismo periodo de tiempo. Este suceso puede explicarse debido

a que, mientras se realizó el muestreo, no se utilizó una zona termoregulable, lo cual, puede alterar la medición, volviendo los datos no representativos.

5.4. Material particulado fino ($PM_{2,5}$)

Análisis nivel piso

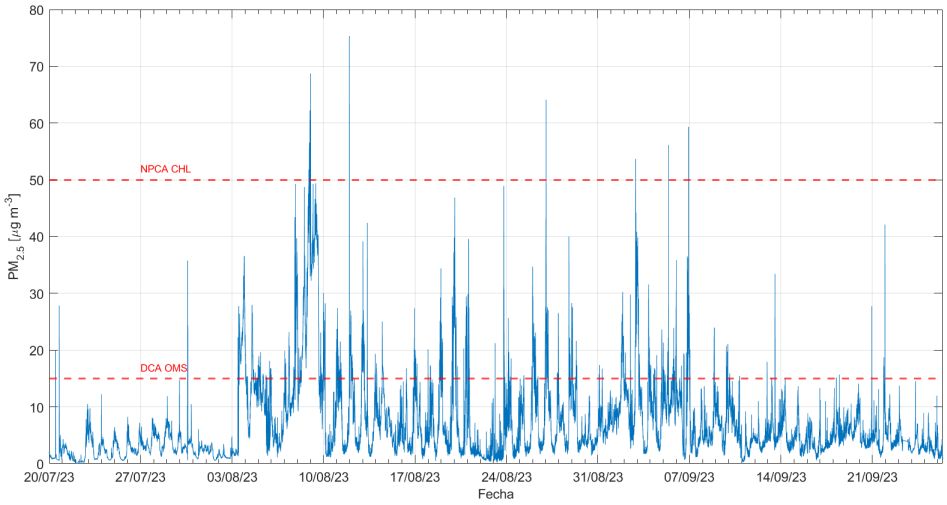


Figura 5.13: Comparación de la medición de $PM_{2,5}$ y estándares respecto a estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

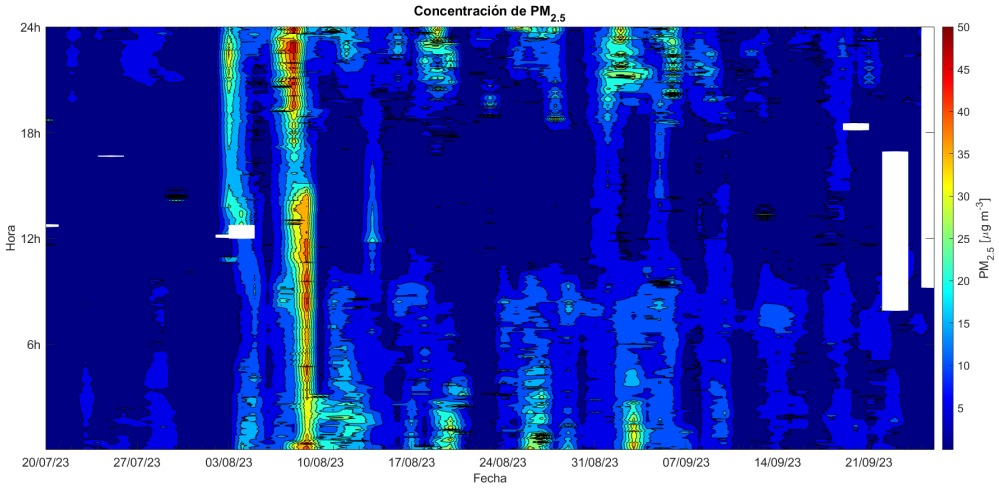


Figura 5.14: Medición de $PM_{2,5}$ con base en la estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.13 y la Figura 5.14 se observa:

- En cuanto a las concentraciones de 24 h, incumplimiento de la norma primaria de calidad del aire nacional(NPCA CHL), así como con, las recomendaciones y directrices de la calidad del aire dado por la OMS(DCA OMS).
- Existen zonas de mayor concentración de material particulado grueso, estas aparecen entre las 18 h y las 12 h del día siguiente, con un pico de concentración entre las 20 h y 03 h del día siguiente, dado el horario, se presume que es originado por el uso de estufas de calefacción residencial.
- Existe una zona de baja concentración. Esta aparece entre las 12 h y las 18 h.
- Al comparar el particulado fino y particulado grueso medido por la estación fija (piso), se observan zonas donde existe mayor concentración de PM_{10}, en comparación al $PM_{2,5}$, siendo un resultado coherente.

Análisis nivel techo

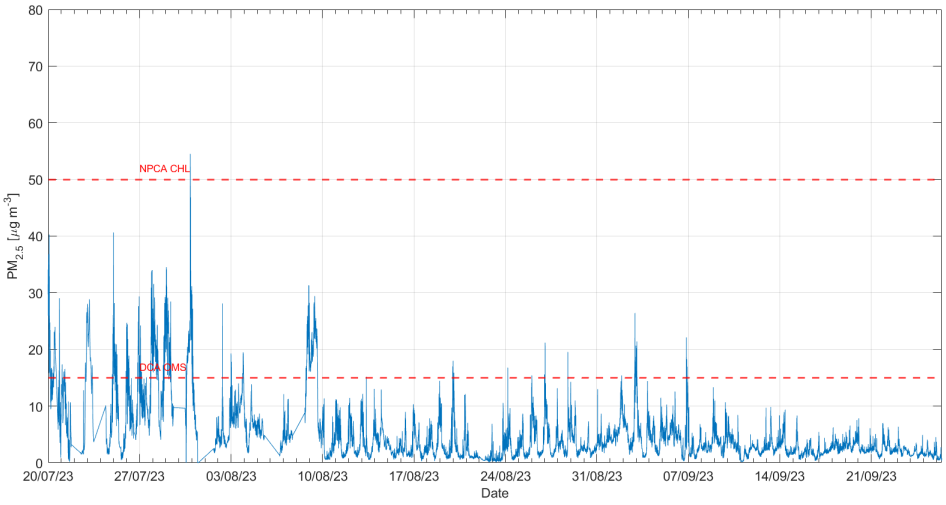


Figura 5.15: Comparación de la medición de $PM_{2,5}$ y estándares respecto a estación fija (techo)

Fuente: Elaboración propia

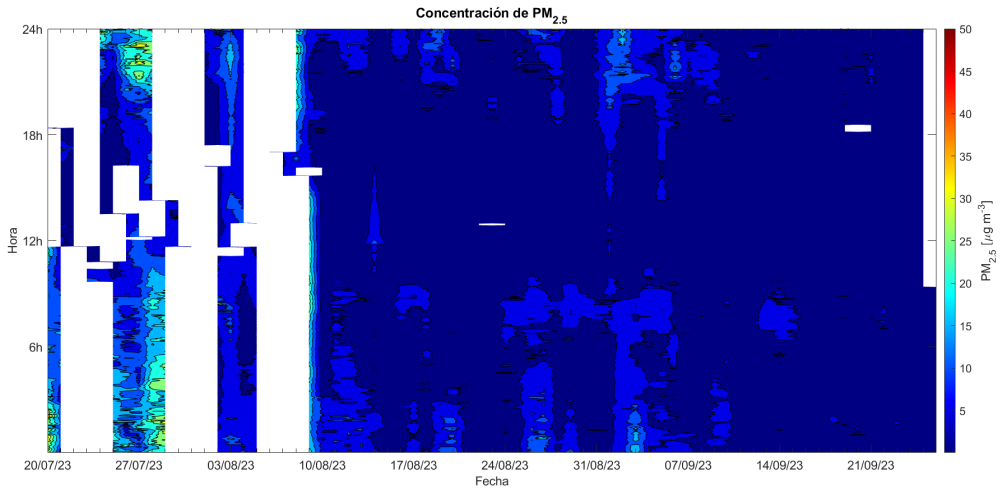


Figura 5.16: Medición de $PM_{2,5}$ en base a la estación fija (techo)
Fuente:Elaboración propia

En la Figura 5.15 y la Figura 5.16 se observa:

- En cuanto a las concentraciones de 24 h, incumplimiento de la norma primaria de calidad del aire nacional(NPCA CHL), así como con, las recomendaciones y directrices de la calidad del aire dado por la OMS(DCA OMS).
- Existen zonas de mayor concentración de material particulado grueso, estas aparecen entre las 18 h y las 12 h del día siguiente.
- Existe una zona de baja concentración. Esta aparece entre las 12 h y las 18 h.
- Dentro de la Gráfica, las franjas en blanco representan períodos en donde no se cuenta con los datos.

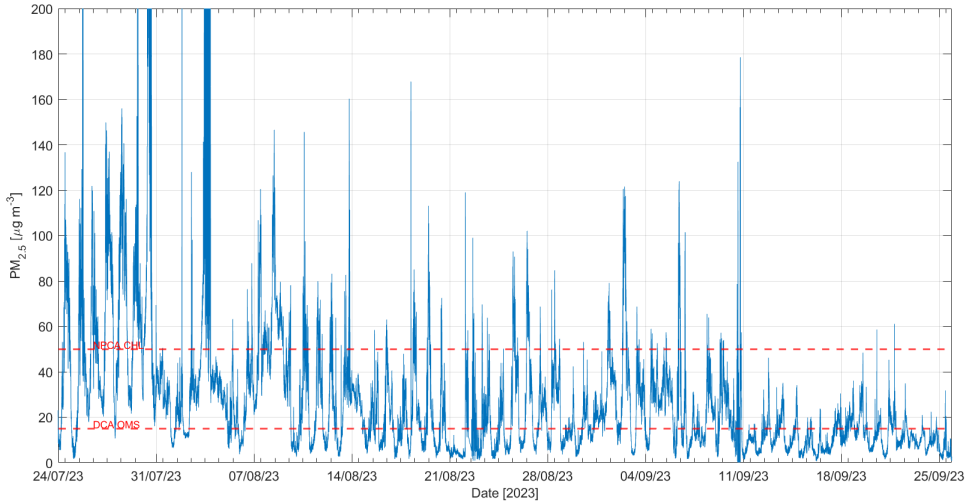


Figura 5.17: Comparación de la medición de $PM_{2,5}$ y estándares respecto a monitor de material particulado

Fuente: Elaboración propia

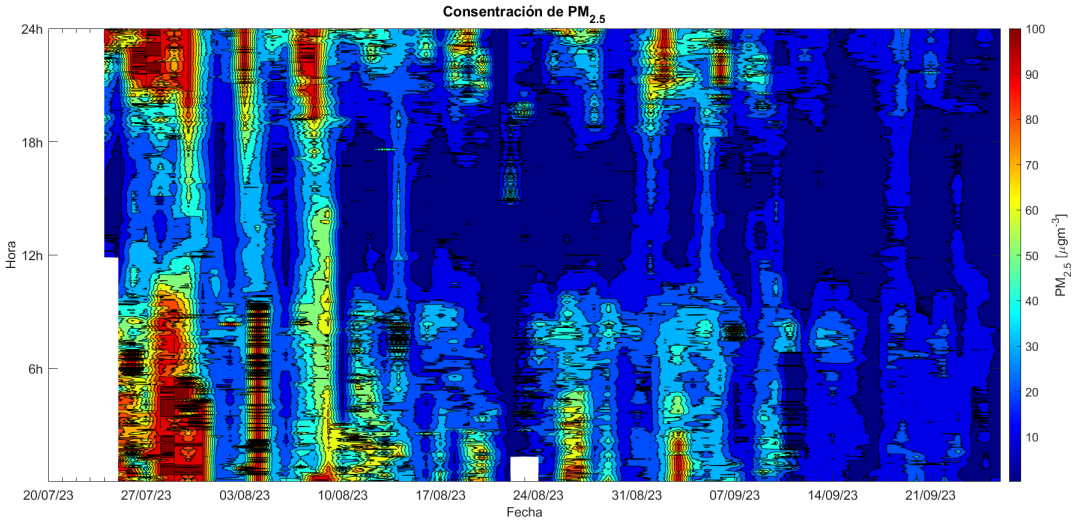


Figura 5.18: Medición de $PM_{2,5}$ respecto a monitor de material particulado

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.17 y la Figura 5.18 se observa:

- Una cantidad considerable de ocasiones donde la norma primaria de calidad del aire nacional no fue cumplida, y en concentraciones considerablemente mayores a la estación fija para un mismo periodo de tiempo. Este suceso puede explicarse debido

a que, mientras se realizó el muestreo, no se utilizó una zona termoregulable, lo cual, puede alterar la medición, volviendo los datos no representativos.

5.5. Black carbon

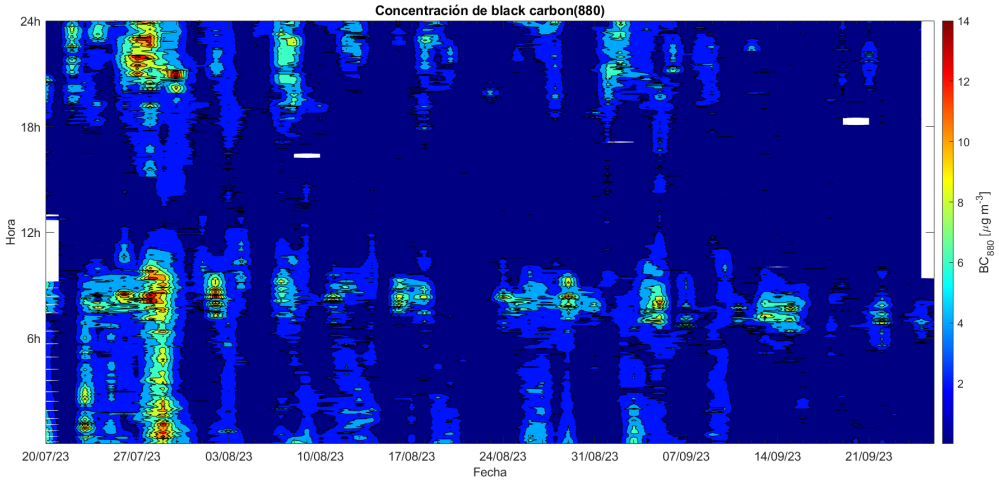


Figura 5.19: Medición de BC_{880} en base al monitor portátil de carbono negro

Fuente: Elaboración propia

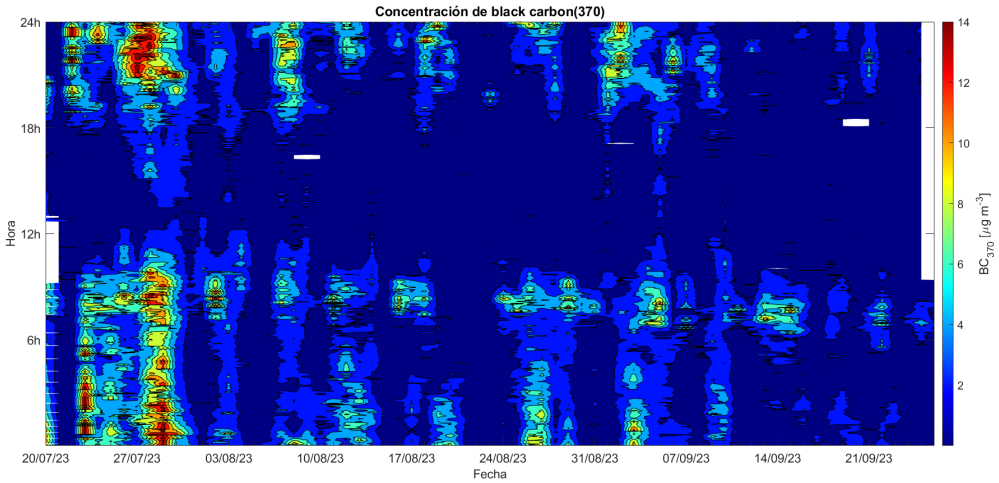


Figura 5.20: Medición de BC_{370} en base al monitor portátil de carbono negro

Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar la Figura 5.19 y la Figura 5.20, se puede apreciar que:

- El BC_{370} presenta mayor intensidad en las zonas de mayor concentración (entre las 18 h y 12 h del día siguiente) que el BC_{880}, lo cual podría indicar predominancia de residuos de combustión de fuentes de biomasa, presumiblemente, estufas de calefacción residencial.

5.6. Monóxido de carbono (CO)

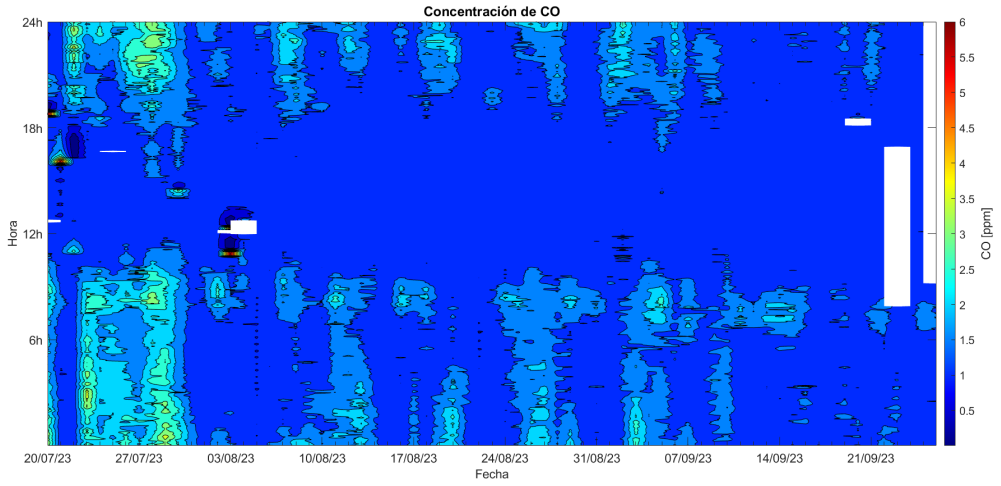


Figura 5.21: Medición de *CO* con base en la estación fija (piso)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.21 se observa:

- Una zona de mayor concentración entre las 18 h y las 10 h del día siguiente, donde la concentración de CO no suele superar las 3,5 ppm o 4 $\mu g/m^3$, estando muy por debajo de los 30.000 $\mu g/m^3$ que limita la norma nacional para periodos de 1 h.

- Una zona de menor concentración entre las 10 h y las 18 h, donde las concentraciones de CO no superan las 1,5 ppm o 1,7 $\mu g/m^3$.

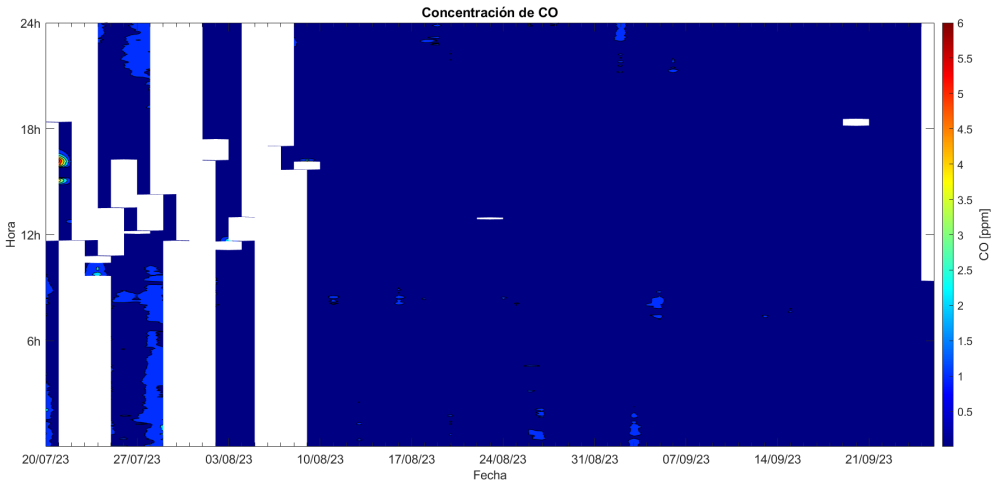


Figura 5.22: Medición de *CO* en base a la estación fija (techo)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.22 se observa:

- En general, solo se aprecia una zona de baja concentración de CO, inferior a 0.5 ppm.
- Entre las gráficas de concentración de CO, se aprecia una marcada diferencia de concentración, que podría explicarse por la diferencia de altura en las estaciones de medición.
- Dentro de la Gráfica, las franjas en blanco representan períodos en donde no se cuenta con los datos.

5.7. Dióxido de azufre (SO_2)

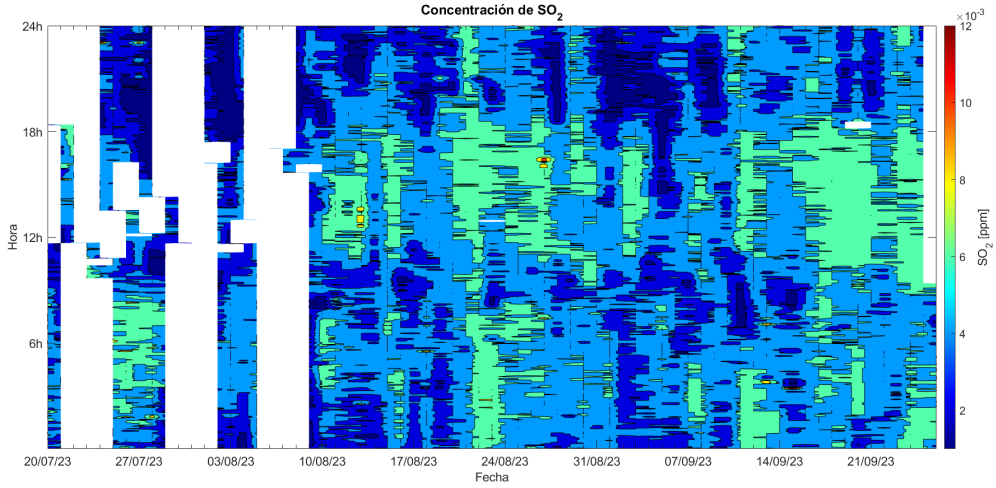


Figura 5.23: Medición de SO_2 en base a la estación fija (techo)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.23 se observa:

- Una zona de mayor concentración de SO_2 entre las 0 h y las 18 h, donde las concentraciones se mantienen bajo las 7 ppm o 18,6 $\mu g/m^3$, muy inferior a los 150 $\mu g/m^3$ establecidos como límite diario por la norma de calidad ambiental chilena. Este resultado podía intuir, dado que, el SO_2 se produce mayormente en zonas industriales, al contrario de lo que es Villa Alemana.

- Una zona de menor concentración de SO_2 entre las 18 h y las 24 h, donde las concentraciones se mantienen, en general, bajo las 2 ppm o 2,7 $\mu g/m^3$.

- Dentro de la gráfica, existen franjas en blanco que representan períodos donde no se cuenta con los datos.

5.8. Fuentes de black carbon

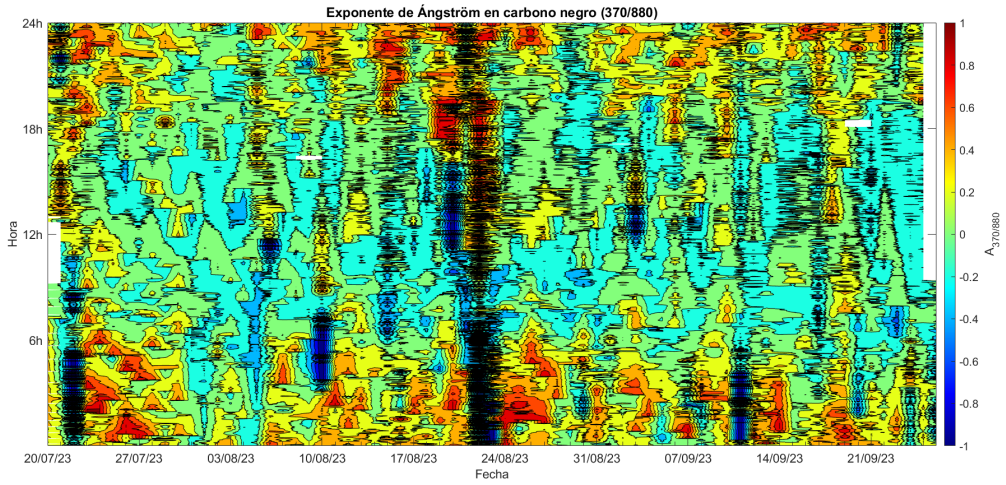


Figura 5.24: Exponente de Ángstrom aplicado en Black carbon (370/880)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.24 se observa:

- Entre las 20 h y las 06 h del día siguiente se observa una zona donde, en la gran mayoría de los casos, predominan valores del Exponente de Ángstrom mayores a 0, lo que indicaría que para esa franja horaria predominan fuentes de combustión que utilizan la biomasa como combustible.

- Entre las 06 h y las 20 h se observa una zona mixta donde, en la gran mayoría de los casos, existen valores del Exponente de Ángstrom menores o iguales a 0. Esto indicaría que en esta franja horaria no suele haber una predominancia respecto al tipo de fuente y su combustible, y cuando la hay, es con fuentes que utilizan combustibles fósiles como combustible, presumiblemente vehículos motorizados.

- Las zonas que se ven oscuras y caóticas, coinciden con días donde hubo precipitaciones.

6 | Conclusiones y recomendaciones

Se desarrolló una investigación sobre la calidad el aire en la ciudad de Villa Alemana, que tenia como objetivo general 'Establecer estadísticamente el nivel de exposición a material particulado fino y carbono negro durante el invierno, identificando su fuente de emisión desde biomasa y/o combustibles fósiles', en donde se pudo llegar a los siguientes resultados y conclusiones:

1. Si se comparan la norma primaria de calidad del aire de Chile, con las directrices establecidas por la OMS, se puede apreciar una notoria diferencia, donde las recomendaciones de la OMS son mucho más estrictas que la normativa aplicable actual en Chile. Por parte de la OMS se puede notar una gran preocupación por la contaminación del aire y sus efectos en la salud de los seres vivos y perjuicio hacia ecosistemas, respaldada por una continua investigación del área. Esta diferencia puede explicarse por el desfase temporal, cercano a los 20 años, entre la actualización de ambas normas, donde, la norma chilena no ha presentado grandes cambios, a diferencia de las directrices de la OMS.

2. La instalación y control de estaciones de monitoreo de la calidad del aire es posible llevarla a cabo con éxito buscando medir material particulado y black carbon.

3. Tras analizar las concentraciones de material particulado y comparar respecto a la norma nacional y recomendaciones internacionales, se pudo concluir que:

    - En cuanto al material particulado fino ($PM_{2,5}$), para las tres estaciones de medición se encontraron días, en donde, para las concentraciones de 24 h se excedieron las concentraciones de contaminante respecto a la norma de calidad

de aire primaria nacional y, más aún, las directrices de la OMS.

- Al comparar las emisiones, en especial de material particulado fino ($PM_{2,5}$), se puede concluir que existe una relación entre las concentraciones de material particulado y la altura de medición, en donde, las concentraciones de partículas en suspensión tienden a disminuir con la altura. Este fenómeno es atribuible a la proximidad con las fuentes de emisión, en donde, para el caso urbano se encuentran a nivel del piso.
- En cuanto al material particulado grueso (PM_{10}), para ambas estaciones fijas, no se encontraron días, en donde, para las concentraciones de 24 h se excedieran los límites dictados por la norma de calidad de aire primaria nacional, aunque sí, hubo días en donde se sobrepasaron los límites recomendados por la OMS. En cuanto al Monitor de material particulado, para las concentraciones de 24 h si se encontraron días donde se excedieran los límites dictados por la norma de calidad de aire primaria nacional y las directrices de la OMS.
- Para el caso de las estaciones fijas, no se encontró gran diferencia entre las concentraciones de material particulado fino y grueso.

4. Gracias al uso del exponente de Ángstrom, fue posible identificar las principales fuentes de contaminación por black carbon en la ciudad de Villa Alemana en función del horario del día, donde, para la franja existente entre las 20 h y 06 h del día siguiente se puede concluir que existe una importante participación de la biomasa como combustible a diferencia del combustible fósil. Esto puede explicarse por el uso de estufas, que están presentes en la gran mayoría de casas de la ciudad como fuente de calefacción. Este patrón puede relacionarse con el aumento de las concentraciones de material particulado fino ($PM_{2,5}$) en la franja horaria señalada.

Bibliografía

[1] A. L. Ceballos. Efecto de la contaminación del aire sobre las plantas, jun 2020. https://arboretoluisceballos.blogspot.com/2020/06/efecto-de-la-contaminacion-del-aire.html. 3.5.2, 3.3

[2] Y. Y. M. S. Chao Liu, Chul Eddy Chung. The absorption Ångström exponent of black carbon: from numerical aspects. Atmos. Chem. Phys., may 2018. https://acp.copernicus.org/articles/18/6259/2018/acp-18-6259-2018.html. 3.3

[3] Climate and C. A. Coalition. CarbÓn negro. https://www.ccacoalition.org/es/short-lived-climate-pollutants/black-carbon: :text=El3.2.1

[4] O. M. de la Salud. Directrices mundiales de la oms sobre la calidad del aire, sep 2021. 3.4

[5] B. del Congreso Nacional de Chile. Villa alemana reporte comunal | 2021., 2021. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021idcom=5804. 4.3

[6] Emin. Pce fws 20 weather station. https://emin.com.mm/pcefws-20-pce-fws-20-weather-station-2677/pr.html. 4.6

[7] Inteccon. Bc 1060 monitor portÁtil de carbono negro. met one. https://inteccon.com/es/productos/bc-1060-monitor-portatil-de-carbono-negro-met-one/. 4.4

[8] Laftech. Grimm 11-d advanced real-time dust monitor. https://laftech.com.au/product/grimm-11-d-portable-aerosol-spectrometer-dust-decoder/. 4.5

[9] G. d. C. Ministerio del Medio Ambiente. Preguntas frecuentes. https://airechile.mma.gob.cl/faq. 3.1

[10] G. d. C. Ministerio del Medio Ambiente. Infografía fuentes contaminantes del aire, ministerio del medio ambiente, sep 2019. 1.1

[11] A. Quintero. ¿qué te quita el aire?, feb 2012. https://www.nrdc.org/es/bio/adrianna-quintero/te-quita-aire. 3.5

[12] R. I. Rodríguez-Cotto. ContaminaciÓn por material particulado, estrÉs oxidativo e inflamaciÓn, sep 2015. 3.5.1, 3.2

[13] C. F. Rojas. Plaza belén, villa alemana, región de valparaíso, chile., dec 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/Villa_Alemana. 4.7

[14] G. d. C. Sistema de Información Ambiental. Informe del estado del medio ambiente / capÍtulo 14 / calidad del aire., apr 2021. 1, 3.5.4

[15] G. d. C. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Estadísticas de parámetros contaminantes. https://sinca.mma.gob.cl/index.php/estadisticas. 1

[16] G. d. C. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Normativa aplicable. https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma. 3.1, 3.4

[17] J. A. B. Smith, J. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. Journal of Environmental Health, may 2010. 2

[18] I. H. VELASCO. Arte devorado por el cambio climático. El Mundo, may 2016. https://www.elmundo.es/ciencia/2016/05/01/5723527422601d644a8b45d4.html. 3.5.3, 3.4

[19] G. A. y T. Aeroqual aqm65. https://www.ayt.cl/catalogo-de-productos/estaciones-de-medicion-de-calidad-de-aire/estaciones-portatiles/aeroqual-aqm65/. 4.3