



UNIVERSIDAD DE CHILE – FACULTAD DE CIENCIAS – ESCUELA DE PREGRADO

**“EFECTO DE LA ESTRATIFICACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA  
DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE AEROSOL SEGREGADOS POR  
TAMAÑO EN LA ATMÓSFERA DE SANTIAGO”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

**QUÍMICA AMBIENTAL**

**PAULA DANIELA CARRASCO CARRASCO**

Director de Seminario de Título: Dr. Richard Toro Araya.

Octubre 2018  
Santiago - Chile



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la candidata:

**PAULA DANIELA CARRASCO CARRASCO**

### **“EFECTO DE LA ESTRATIFICACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE AEROSOLES SEGREGADOS POR TAMAÑO EN LA ATMÓSFERA DE SANTIAGO”**

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental.

Dr. Richard Toro Araya

**Director Seminario de Título:**

---

**Comisión Revisora y Evaluadora:**

Dr. Manuel Leiva Guzmán

**Presidente Comisión:**

---

Sebastián Tolvett

**Corrector:**

---

Santiago de Chile, Octubre de 2018

*A mi familia, amigas y amigos testigos de esta etapa.  
A todos quienes grabaron en mi memoria recuerdos eternos,  
Y a todos los que preguntaban “Ya po, ¿y cuándo la tesis?”.*

## AGRADECIMIENTOS

Como partir.

A mi familia, por despertar la confianza en uno mismo y la valentía para perseguir mis sueños y objetivos. Por ser el sostén fundamental en mi vida y la columna de todo lo que he sido capaz de construir.

A mis amigos, los que fueron y los que se quedaron. A mi amiga Paula, la de siempre.

A mi equipo, mi familia universitaria, esas chiquillas compañeras y amigas. Por las derrotas que nos hicieron más fuertes y los desafíos que, tras mucho trabajo, se volvieron victorias.

A los profesores, aquellos que incentivaron las prácticas indagatorias y alimentaron mis ansias de seguir creciendo. Especialmente al Dr. Richard Toro, por la paciencia, empatía y el apoyo en este proceso tan largo y todo lo que significó enfrentarlo con la nueva responsabilidad de ser madre.

Al Chona, mi pareja, por acompañarme en esta hermosa aventura de ser padres, familia y hogar, por impulsarme a superar nuevos desafíos, porque para eso estamos. Por el apoyo, la alegría y por el amor.

A mi Valentín que con su llegada me enseñó que, aunque las cosas se pongan difíciles se pueden cumplir las metas. Por sus ojitos llenos de vida que hoy me acompañan y me convencen día a día que tengo que ser la mejor mamá del mundo.

Finalmente, agradezco al proyecto FONDECYT N°11150931, marco en el cual se desarrolló esta investigación.

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	vi
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	1
1.1    Caracterización física y morfoquímica del MP .....	2
1.2    Efectos del MP sobre la salud y el Medio Ambiente .....	5
1.3    La contaminación por MP en Chile y en Santiago.....	6
1.3.1    Santiago y sus características .....	7
1.3.2    Episodios críticos de contaminación .....	9
1.4    Monitoreo de la Calidad del aire en la Región Metropolitana .....	9
1.5    Mediciones en altura .....	11
1.5.1    Distribución en altura de aerosoles segregados por tamaño.....	14
1.6    Marco Teórico.....	15
1.6.1    Distribución log-normal .....	15
1.6.2    Estadísticas log-normal, CMD y $\sigma_g$ .....	15
1.6.3    Concentración normalizada $dN/d\text{Log}D_p$ .....	17
1.6.4    Representación gráfica de distribución de partículas .....	18
1.6.5    Ley Barométrica, Estabilidad Atmosférica e Inversiones Térmicas .....	20
1.7    Marco Normativo .....	26
1.7.1    Norma DAN 151 .....	26
1.7.2    Norma DAN 91 .....	27
<b>2. HIPÓTESIS</b> .....	29
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	30
3.1    General .....	30
3.2    Específicos .....	30
<b>4. MATERIALES Y METODOS</b> .....	31
4.1    Equipos: Especificaciones técnicas y principio de funcionamiento.....	31
4.2    Diseño de la plataforma de soporte para instrumentos de medición.....	39
4.3    Extensión de la toma de muestras del espectrómetro de aerosoles .....	40

4.4	Validación datos, “Outliers” .....	41
4.5	Análisis estadístico comparativo de dos muestras independientes .....	42
4.6	Medición de perfiles verticales .....	43
4.6.1	Recuperación de los datos de las mediciones en vuelo .....	45
4.6.2	Sincronización de los datos LGR, 11-C y Arduino.....	45
4.6.3	Obtención de la altura a partir de los datos del Arduino .....	46
4.7	Procesamiento de datos.....	46
4.7.1	Modo de Vuelo.....	46
4.7.2	Perfil vertical de Humedad relativa y Temperatura .....	47
4.7.3	Distribución de partículas en el perfil vertical .....	48
4.7.4	Distribución vertical de MP segregado por tamaño en altura .....	49
4.7.5	Caracterización del MP en altura y en superficie.....	50
4.8	Programas.....	50
5.	<b>RESULTADOS Y DISCUSION</b> .....	53
5.1	Validación de la extensión de toma de muestras.....	53
5.2	Diseño de la plataforma  de medición .....	57
5.2.1	Ubicación de los equipos, sensores y punto de colección de muestras .....	57
5.2.2	Construcción de la plataforma para instrumentos de medición .....	60
5.3	Medición de perfiles verticales .....	62
5.3.1	Modo de Vuelo.....	62
5.3.2	Abundancia relativa de partículas en el perfil vertical .....	64
5.3.3	Análisis de variables meteorológicas en altura .....	66
5.3.4	Concentración de material particulado en el perfil vertical .....	74
5.3.5	Efecto de la estratificación atmosférica sobre la concentración en el perfil vertical	86
5.3.6	Distribución de MP segregado por tamaño en altura .....	96
5.3.7	Caracterización de la distribución de tamaños del MP en altura y en superficie	100
6.	<b>CONCLUSIONES</b> .....	102
7.	<b>REFERENCIAS</b> .....	105
8.	<b>ANEXOS</b> .....	109

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Especificaciones técnicas del espectrómetro portátil de aerosoles modelo 11-C .....	33
<b>Tabla 2.</b> Características del sensor 1158-EE. ....	34
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones técnicas Logger LGR32.....	35
<b>Tabla 4.</b> Especificaciones técnicas sensor PFPN-STH54-001. ....	36
<b>Tabla 5.</b> Especificaciones técnicas Drone DJI Matrice 600. ....	38
<b>Tabla 6.</b> Especificaciones técnicas de los sensores conectados al Arduino .....	39
<b>Tabla 7.</b> Análisis estadístico para extensión de teflón.....	54
<b>Tabla 8.</b> Análisis estadístico para una extensión de silicona.....	54
<b>Tabla 9.</b> Análisis estadístico para extensión de tubo de aluminio (2 m).....	55
<b>Tabla 10.</b> Análisis estadístico para extensión de tubo de aluminio (70 cm) .....	55
<b>Tabla 11.</b> Análisis estadístico para el blanco .....	56
<b>Tabla 12.</b> Campañas de medición, Campus Antumapu, Universidad de Chile.....	62
<b>Tabla 13.</b> Resumen condiciones de estabilidad atmosférica para los cuatro vuelos .....	73
<b>Tabla 14.</b> Resultados de parámetros CMD y $\sigma_g$ para la clasificación de aerosoles en superficie y altura .....	100

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Nomenclatura, origen, tiempo de vida y tamaño de los aerosoles que contribuyen a los tres modos observados en la atmósfera según Willeke y Whitby, 1975. ....	3
<b>Figura 2.</b> Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste. Magnitud y dirección del viento promedio anual. ....	8
<b>Figura 3.</b> Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Santiago .....	10
<b>Figura 4.</b> Ejemplo de distribución logarítmica de número de partículas, medición en superficie con espectrómetro 11-C, Software GRIMM 1178. ....	19
<b>Figura 5.</b> Representación gráfica de la relación entre temperatura y altura de un volumen de aire para condiciones inestable, neutra y estable en relación a la atmósfera ambiente .....	23
<b>Figura 6.</b> Representación esquemática de una inversión térmica .....	25
<b>Figura 7.</b> Mini Laser Aerosol Spectrometer Model 11-C .....	31
<b>Figura 8.</b> Principio de funcionamiento del espectrómetro 11-C .....	32
<b>Figura 9.</b> Sensor de temperatura y humedad modelo 1158-EE.....	34
<b>Figura 10.</b> Instrumento LGR32 .....	34
<b>Figura 11.</b> Sensor PFPN-STH54-001.....	36
<b>Figura 12.</b> Drone DJI Matrice 600 .....	37
<b>Figura 13.</b> Lugar de medición, Campus Antumapu, Universidad de Chile .....	44
<b>Figura 14.</b> Ampliación Figura 13 .....	44
<b>Figura 15.</b> Resultados del estudio “Desarrollo y validación de un sistema UAV para mediciones de contaminación del aire”. Velocidad del viento en diferentes direcciones con las hélices del drone en funcionamiento .....	58
<b>Figura 16.</b> Resultados del estudio “Desarrollo y validación de un sistema UAV para mediciones de contaminación del aire”. Velocidad del viento en diferentes ejes.....	59



<b>Figura 17.</b> Plataforma de soporte de instrumentos de medición. ....	60
<b>Figura 18.</b> Plataforma de medición definitiva.....	61
<b>Figura 19.</b> Perfiles verticales correspondientes a la campaña de medición del 04 de agosto del 2017, prueba metodología de vuelo para el muestreo en altura. a) Registro de datos en ascenso, VUELO 1 y b) Registro de datos en descenso, VUELO 2. ....	63
<b>Figura 20.</b> Contribución porcentual promedio de distintas fracciones finas a la concentración de partículas en n/L para los cuatro vuelos seleccionados.....	65
<b>Figura 21.</b> Perfil vertical de T y Hr, Vuelo 1 .....	67
<b>Figura 22.</b> Perfil vertical de T y Hr, Vuelo 3, 4 y 5 .....	68
<b>Figura 23.</b> Perfil vertical de Concentración de MP, T y Hr, Vuelo 1. ....	74
<b>Figura 24.</b> Perfil vertical de Concentración de MP, T y Hr, Vuelo 3. ....	77
<b>Figura 25.</b> Perfil vertical de Concentración de MP, T y Hr, Vuelo 4. ....	78
<b>Figura 26.</b> Perfil vertical de Concentración de MP, T y Hr, Vuelo 5 .....	80
<b>Figura 27.</b> Perfil vertical de concentración de MP 0.5 – 10.0 $\mu\text{m}$ en n/L para los Vuelos 1, 3, 4 y 5. ....	83
<b>Figura 28.</b> Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño, Vuelo 1. ....	87
<b>Figura 29.</b> Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño, Vuelo 3. ....	89
<b>Figura 30.</b> Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño, Vuelo 4. ....	92
<b>Figura 31.</b> Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño, Vuelo 5 .....	94
<b>Figura 32.</b> Distribución tamaños del material particulado segregado por tamaños en altura v/s en superficie para Vuelo 1. ....	97
<b>Figura 33.</b> Distribución de material particulado segregado por tamaños en altura v/s en superficie Vuelo 4. ....	98

## RESUMEN

A la fecha, 12 de las 15 regiones de Chile conforman zonas saturadas de  $MP_{10}$  y/o  $MP_{2.5}$ , lo que deja en evidencia el grave problema ambiental que enfrenta el país. En la actualidad, el monitoreo de la calidad del aire en Santiago, una de las zonas saturadas de Chile, se lleva a cabo a través de 11 estaciones de monitoreo fijas en superficie distribuidas en la Región Metropolitana, las cuales conforman la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire y Meteorología (red MACAM). Las mediciones son de carácter superficial y por lo tanto permiten registrar las concentraciones de contaminantes y su variabilidad espacial en dos dimensiones (2D); no obstante, los contaminantes se mueven e interactúan en toda la capa de mezcla conforme lo permiten las condiciones atmosféricas, incluyendo escenarios sinópticos que inducen la transferencia, acumulación y la formación de contaminantes a escalas regionales, lo que es trascendental a la hora de prevenir, controlar y modelar la contaminación atmosférica en tres dimensiones.

Con el objetivo de responder a la necesidad de información que existe con respecto a la concentración de aerosoles en altura y el efecto de la estratificación atmosférica sobre su distribución vertical, se analizaron las condiciones de estabilidad atmosférica a través del estudio de perfiles verticales de variables meteorológicas (temperatura, punto de rocío, presión y humedad relativa) y concentración de material particulado segregado por tamaño ( $n/L$  y  $\mu g/m^3$ ), utilizando un monitor continuo de partículas 11-C y sensores acoplados a un vehículo aéreo no tripulado o Drone.

Se realizaron cinco campañas de medición que permitieron definir el modo de vuelo en ascenso a velocidad constante como el más apropiado y reproducible y evidenciar el efecto de las zonas de estabilidad sobre la concentración de MP en altura.

Se comprobó que la estratificación atmosférica limita el desplazamiento vertical de aerosoles, afectando principalmente y en mayor magnitud las fracciones de mayor tamaño (diámetro entre 1.00  $\mu\text{m}$  y 10.0  $\mu\text{m}$ ), cuyas concentraciones en número disminuyen considerablemente luego de una inversión en la mayoría de los casos, esto explica que la fracción más afectada en masa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sea el  $\text{MP}_{10}$ , ya que son las partículas más gruesas las que más contribuyen en la masa de la muestra. En consecuencia, las partículas del tamaño mencionado disminuyen su contribución en el número total de partículas por litro en altura, siendo ésta la mayor diferencia al comparar la distribución de MP en altura con la distribución de MP en superficie.

Finalmente, se clasificaron los aerosoles según su distribución de tamaño en altura y en superficie en dos vuelos seleccionados. Para ambos vuelos, se clasificaron como polidispersos los aerosoles en superficie y se determinó que la clasificación de monodisperso o polidisperso de una muestra de partículas en altura puede deberse tanto a la diferencia de altura de la medición como a la intensidad de la estratificación atmosférica en ambos vuelos.

## ABSTRACT

To date, 12 of the 15 regions of Chile conform saturated zones with  $MP_{10}$  and/or  $MP_{2.5}$ , which shows the serious environmental problem facing the country. Currently, the air quality monitoring in Santiago, one of the saturated zones of Chile, is carried out through 11 fixed surface monitoring stations distributed in the Metropolitan Region, which make up the Automatic Monitoring Network of Air Quality and Meteorology (MACAM network). The measurements are superficial and therefore allow recording the concentrations of pollutants and their spatial variability in two dimensions (2D); however, pollutants move and interact throughout the mix layer as atmospheric conditions allow, including synoptic scenarios that induce the transfer, accumulation and formation of pollutants at regional scales, which is crucial to preventing, control and model air pollution in three dimensions.

In order to respond to the need for information that exists regarding the concentration of aerosols in height and the atmospheric stratification's effect on its vertical distribution, the atmospheric stability conditions were analyzed through a vertical profile of meteorological variables (temperature, dew point, pressure and relative humidity) and concentration of particulate material segregated by size ( $n/L$  and  $\mu g/m^3$ ) study, using a portable laser aerosol spectrometer and sensors coupled to an unmanned aerial vehicle or Drone.

Five measurement campaigns were carried out that allowed defining the ascending flight mode at constant speed as the most appropriate and reproducible and evidencing the effect of the stability zones on the MP concentration at height.

It was verified that atmospheric stratification limits the vertical displacement of aerosols, affecting mainly and in greater magnitude the larger fractions (diameter between 1.00  $\mu\text{m}$  and 10.0  $\mu\text{m}$ ), whose concentrations in number decrease considerably after an investment in most cases, this explains that the fraction most affected in mass ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) is the  $\text{MP}_{10}$ , since it is the thickest particles that contribute the most in the mass of the sample. Consequently, the particles of the mentioned size decrease their contribution in the total number of particles per liter in height, this being the biggest difference when comparing the distribution of MP in height with the distribution of MP in surface.

Finally, the aerosols were classified according to their size distribution of height and surface in two selected flights. For both flights, surface aerosols were classified as polydispersed and it was determined that the monodisperse or polydisperse classification of a sample of particles in height may be due both to the height difference of the measurement and to the intensity of the atmospheric stratification in both flights.

## 1. INTRODUCCION

La atmósfera, cuya composición natural ha sido alterada por actividades antrópicas a lo largo de los años, actúa como un reactor químico de grandes dimensiones al constituir el medio físico donde interactúan especies en diferentes fases (Morales, 2016); el entendimiento del complejo comportamiento de este reactor se ha vuelto relevante especialmente en las últimas décadas, donde la degradación de la calidad del aire, principal problema que enfrentan muchas áreas urbanas, ha provocado impactos significativos sobre la salud de las personas, el clima y los ecosistemas naturales (Toro, 2015).

Entre los principales componentes que alteran o degradan la calidad del aire, se encuentran gases y aerosoles; un reconocido tipo de aerosol es el material particulado, que en la actualidad es considerado uno de los principales indicadores de calidad del aire. Las fuentes de este contaminante son variadas e incluyen (Toro, 2015):

- Procesos de combustión de biomasa y combustibles fósiles.
- Emisiones vehiculares.
- Resuspensión de polvo.
- Procesos de formación de partículas secundarias a partir de gases.

A partir de estos procesos se originan partículas de diferente composición, que son clasificadas según su tamaño mediante el diámetro aerodinámico máximo de las partículas expresado en micrones ( $\mu\text{m}$ ), asumiendo que son esféricas y tienen densidad unitaria. De este modo, se pueden clasificar las partículas como  $\text{MP}_{10}$ ,  $\text{MP}_{2.5}$  o  $\text{MP}_1$ .

Dado que los impactos negativos que generan las partículas sobre diferentes receptores han sido ampliamente aceptados, su caracterización fisicoquímica en zonas urbanas se ha vuelto tan relevante como comprender la variabilidad espaciotemporal de su concentración con el objetivo de resguardar el recurso aire y con ello, la salud de las personas (Toro, 2015).

### **1.1 Caracterización física y morfoquímica del MP**

El material particulado ha sido clasificado como el contaminante más significativo asociado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población por exposición a corto y largo plazo (MMA, 2011), demostrándose que la intensidad de sus potenciales impactos está determinada tanto por el tamaño aerodinámico de las partículas que lo conforman, como por su composición química (C. Arden Pope y col., 2006), características que pueden cambiar mediante varios procesos, como condensación, evaporación, coagulación a través del movimiento browniano por la hidrodinámica y fuerzas gravitacionales o eléctricas, confiriéndole al material particulado una amplia gama de propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas (Suárez, 2012). Esto permitió a Willeke y Whitby en 1975, clasificar un aerosol de acuerdo al origen, tiempo de vida y tamaño según el proceso de formación, definiendo tres modos observados en la atmósfera: el rango de núcleos transitorios, el rango de acumulación y el rango de aerosoles mecánicos (Willeke, K., Whitby, K. T., 1975). Como se ilustra en la Figura 1, el tiempo de residencia atmosférico es diferente para las distintas fracciones del aerosol, fluctuando entre minutos y días; mientras el  $MP_{2.5}$  puede tener tiempos de vida de días o incluso semanas y, por ende, puede ser transportado miles de kilómetros, las partículas cuyo diámetro es mayor a

2.5  $\mu\text{m}$ , poseen tiempos de residencia de minutos a horas, dada su mayor velocidad de sedimentación (M. Préndez y col., 2007).

El tamaño de las partículas que componen un aerosol puede ser caracterizado por el diámetro geométrico (partículas esféricas), diámetro equivalente (partículas de forma arbitraria), diámetro aerodinámico (partículas que poseen inercia apreciable, tamaño mayor a 0,5  $\mu\text{m}$  de diámetro), diámetro difuso (tamaño menor a 0,5 $\mu\text{m}$ , porque experimentan movimiento browniano) o diámetro óptico que se define como el tamaño de partícula que detecta un instrumento calibrado a partir de su interacción con la luz.

		Partículas Finas ←		→ Partículas Gruesas	
Nombre		← Rango de núcleos transitorios	← Rango de acumulación	← Rango de aerosoles mecánicos	→
Tamaño $\mu\text{m}$	0.001	0.01	0.1      1	10      100	
Fuentes		- Combustión - Nucleación heterogénea	- Coagulación desde núcleos transitorios - Condensación - Combustión	- Polvo arrastrado por el viento - Emisión de partículas grandes - Aerosoles marinos	
Tiempo de vida		Menos de una hora	Días	Horas Días	Minutos Horas

**Figura 1.** Nomenclatura, origen, tiempo de vida y tamaño de los aerosoles que contribuyen a los tres modos observados en la atmósfera según Willeke y Whitby, 1975.



La distribución de tamaños de las partículas de un aerosol, permiten clasificarlo como monodisperso (tamaño uniforme) o polidisperso (tamaños significativamente diferentes) en donde las partículas se distribuyen en un cierto rango de tamaños con el objetivo de describir una población de partículas cuantitativamente (John, 1995).

Con respecto al origen de los aerosoles urbanos, es importante mencionar que el material particulado primario proviene principalmente de la abrasión del transporte, actividades domésticas, agrícolas e industriales, construcción, entre otras, mientras que el material particulado secundario de origen antropogénico está constituido principalmente por sales de sulfato y nitrato de amonio además de compuestos orgánicos, provenientes de reacciones químicas promovidas en la atmósfera oxidante (Morales, 2016).

Especies como sulfatos, ácidos, nitratos y metales, no sólo irritan las vías respiratorias y afectan la salud de las personas, sino también intervienen en procesos biogeoquímicos al encontrarse adsorbidos en el material particulado debido al enriquecimiento que ocurre a los aerosoles al permanecer en suspensión periodos más largos de tiempo (C. Arden Pope y col., 2006).

En este contexto, el análisis físico y morfoquímico del material particulado permite evaluar el riesgo y el impacto potencial que tendrán los aerosoles sobre diversos receptores. A partir de la composición química de las partículas se puede indagar acerca de su origen, predecir su comportamiento frente a la radiación o la temperatura, conocer las respuestas biológicas que generarán al ser inhaladas por el ser humano y sus mecanismos de interacción con otras especies en la atmósfera, ya que se pueden desarrollar fenómenos de enriquecimiento y envejecimiento del material particulado.

## 1.2 Efectos del MP sobre la salud y el Medio Ambiente

Tomando en consideración las propiedades toxicológicas y los efectos fisiológicos del material particulado, se ha determinado que las fracciones más finas generan un mayor impacto sobre la salud humana; en primer lugar, porque sus partículas poseen un diámetro suficientemente pequeño que les permite penetrar en las vías respiratorias llegando hasta los pulmones y alvéolos y, en segundo lugar, porque en su composición poseen adsorbidos, comúnmente,

elementos que irritan las vías respiratorias como sulfatos, nitratos, ácidos y metales pesados (C. Arden Pope y col., 2006).

Se han identificado como efectos de exposición a la fracción fina, mortalidad y morbilidad en pacientes con enfermedades pulmonares obstructivas y cardiovasculares, incremento en casos de infecciones, inflamación y cáncer pulmonar, incremento de asma, infartos y disfunciones endoteliales (MMA, 2011; C. Arden Pope y col., 2006; Abdón y col., 2010); mientras que la exposición a la fracción total respirable, MP<sub>10</sub>, según la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), posee una aparente relación entre la exposición de corto plazo y los efectos respiratorios y cardiovasculares (MMA, 2011), inflamación, estrés oxidativo, citotoxicidad, alteraciones del sistema nervioso y coagulación (Vargas, 2011), además de provocar efectos adicionales como disminución de la visibilidad y corrosión de materiales de construcción (C. Arden Pope y col., 2006).

Por otro lado, la importancia que ha adquirido el MP no sólo radica en los impactos que causa sobre la salud humana, sino también en los potenciales efectos ambientales que algunas especies de MP poseen, como por ejemplo la capacidad de absorber y dispersar la radiación solar o la luz (V. Ramanathan y col., 2008), fenómenos que pueden tener

consecuencias a escala global si se considera que esto puede llegar a afectar el balance radiativo terrestre al disminuir el albedo del planeta de diferentes maneras, por absorción de radiación solar, deposición sobre nieve y glaciares o su disolución en las gotas de agua en las nubes y cristales de hielo (Jacobson, 2001); además la capacidad de absorción de radiación infrarroja puede afectar la transmisión de radiación solar en la atmosfera terrestre e intensificar el calentamiento de la superficie (Junta de Andalucía, 2017).

Entre las especies de MP que provocan los efectos recién descritos, cabe destacar el carbono negro (CN), considerado el segundo contribuyente más importante al calentamiento global después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) al provocar deshielos por oscurecimiento de su superficie favoreciendo la absorción de la radiación solar (Jacobson, 2001; T.C. Bond et. all, 2013).

### **1.3 La contaminación por MP en Chile y en Santiago**

A la fecha, 12 de las 15 regiones de Chile conforman zonas saturadas de  $\text{MP}_{10}$  y/o  $\text{MP}_{2.5}$ . El Ministerio del Medio Ambiente declaró que al menos el 60% de la población nacional está expuesta a una concentración promedio anual de  $\text{MP}_{2.5}$  mayor al estándar nacional establecido ( $20 \mu\text{gm}^{-3}$ ), lo que deja en evidencia el grave problema ambiental que enfrenta el país. Entre las ciudades que exceden la norma anual de exposición a MP se encuentran: Osorno, Temuco, Rancagua, Chillán, Coyhaique, Concepción, Los Ángeles, Valdivia y Santiago (Toro, 2015). En estas ciudades existen condiciones meteorológicas y geográficas que dificultan la ventilación de las cuencas donde están insertas, dando lugar al desarrollo de episodios críticos de contaminación atmosférica, donde la concentración de material particulado durante los meses fríos alcanza valores que superan sistemáticamente los estándares establecidos a nivel nacional e internacional (Toro, 2015).

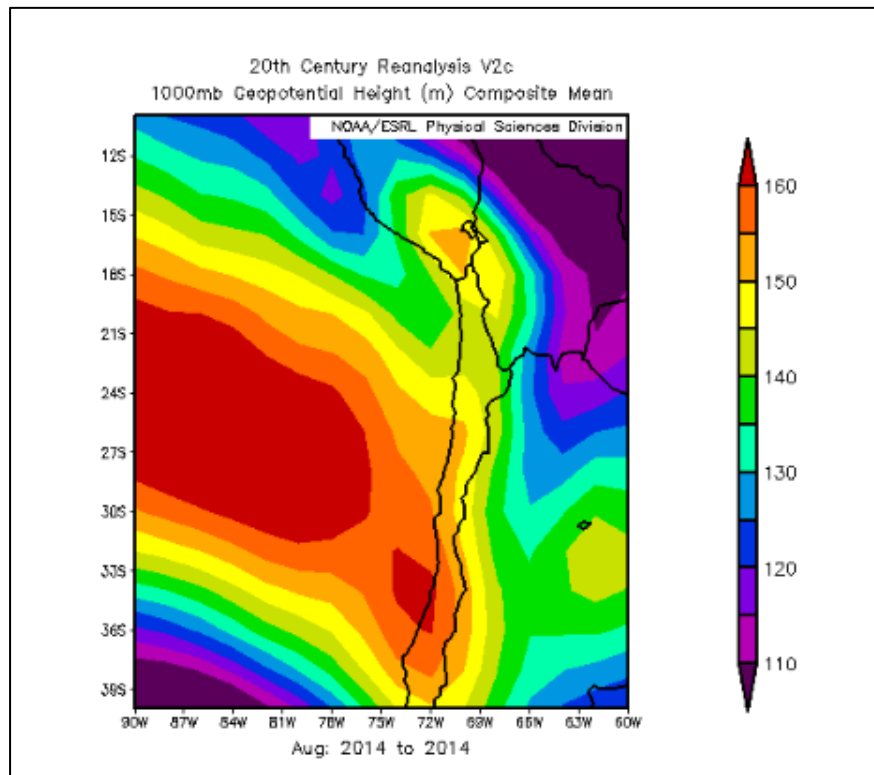
### **1.3.1 Santiago y sus características**

La cuenca de Santiago se ubica en el borde occidental de Sudamérica subtropical ( $33.5^{\circ}\text{S}$ ,  $70.8^{\circ}\text{O}$ ), delimitada en el norte y el sur por cadenas montañosas transversales a la cordillera de los Andes y la cordillera de la costa, cuyas alturas promedio sobrepasan los 4.500 y 1.200 m.s.n.m, respectivamente. La cordillera de la costa presenta una interrupción de 50 Km de longitud por donde drena el río Maipo (Morales, 2016).

El clima en la Región Metropolitana es mediterráneo con estación seca prolongada y frío de alturas en la Cordillera de los Andes (BCN, 2018) y se encuentra influenciado por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste (ASPS) durante casi todo el año, lo que provoca un clima semiárido, con precipitaciones más frecuentes en los meses de invierno que promedian anualmente los 300 mm (Morales, 2016). A escala estacional, en el verano austral, el ASPS es más intenso frente a la costa centro-sur de Chile (aproximadamente  $35^{\circ}\text{S}$ ) y en invierno es más intenso frente a la costa de La Serena (norte de Chile, aproximadamente  $30^{\circ}\text{S}$ ) (Ancapichun, S., Garces-Vargas, J, 2015).

El anticiclón del pacífico tiene su centro ubicado alrededor de los  $30^{\circ}$  de latitud Sur y  $90^{\circ}$  de longitud Oeste provocando una inversión térmica por subsidencia que a los  $33^{\circ}\text{S}$  se observa alrededor del 70 % de los días de invierno, donde la base y el tope de la inversión alcanzan los 600 y 1200 metros de altura respectivamente, efecto que se mantiene a lo largo de la costa norte y centro de Chile (Morales, 2016) debido a la presencia de un centro de baja presión en superficie como se muestra en la Figura 2, el ciclo diario de enfriamiento-calentamiento de la superficie terrestre también juega un rol importante en la ubicación de la base de la inversión térmica y la intensidad de la misma, un ejemplo de ello es el enfriamiento nocturno de la superficie terrestre que genera una inversión térmica

de 3°C en los primeros 20 m sobre el nivel del suelo. Esta inversión se conoce como inversión de superficie, que se acopla a la inversión térmica por subsidencia, formando una capa muy estable, lo que produce una dispersión vertical mínima de los contaminantes durante la noche y madrugada, cuando las diferencias de temperatura entre el aire y la superficie son mayores, quedando gases y partículas atrapadas en la capa de mezcla aumentando su concentración (Morales, 2016).



**Figura 2.** Magnitud Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste. Agosto 2014 (NOAA, 2018).

Sin embargo, estas condiciones no son permanentes y se encuentran interrumpidas por la migración de centros de baja presión (vaguadas) en superficie y el paso de dorsales (alta presión) en altura. La irrupción de una vaguada está asociada a eventos de recuperación rápida de la calidad de aire de la cuenca, ya que al romper la inversión térmica se facilita la dispersión vertical de los contaminantes; por el contrario, la irrupción de dorsales en altura se encuentra asociado con periodos de baja ventilación y altos niveles de contaminación.

### **1.3.2 Episodios críticos de contaminación**

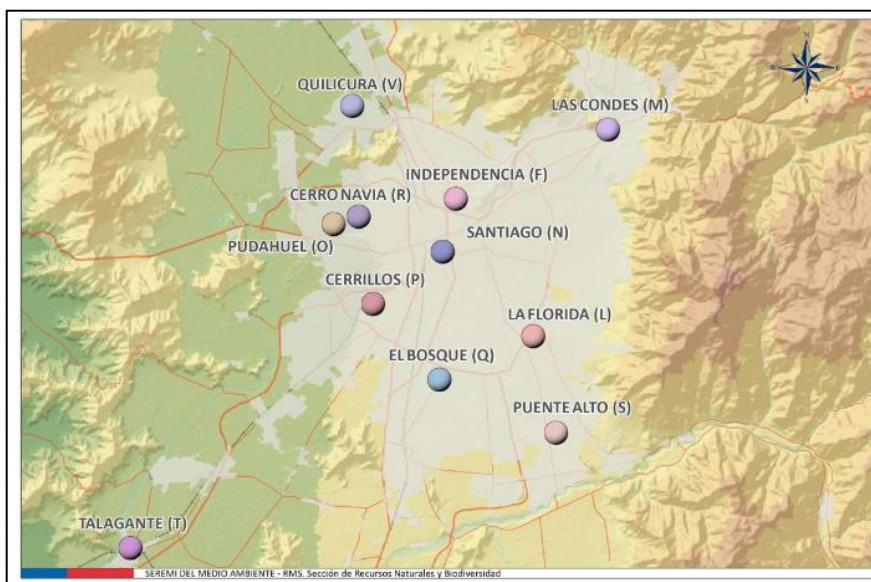
Los episodios críticos de contaminación, definidos como períodos de tiempo en que se registran elevados niveles de concentración de ciertos contaminantes durante períodos de corta duración, a los cuales la población está expuesta, han sido considerados por las autoridades como una clara señal de riesgo para la salud, por lo que se han transformado en un índice cuantitativo de la evolución de las medidas de gestión ambiental (Morales, 2016).

Estos eventos se presentan con mayor frecuencia durante los meses fríos (abril-septiembre) donde la altura de la capa de mezcla disminuye considerablemente en comparación a la época estival, aumentando la concentración de contaminantes a los que están expuestas las personas debido a los fenómenos producidos por el anticiclón del pacífico (GEP, 2014).

### **1.4 Monitoreo de la Calidad del aire en la Región Metropolitana**

En la actualidad, el monitoreo de la calidad del aire en Santiago se lleva a cabo a través del registro de las concentraciones horarias de contaminantes normados en 11 estaciones fijas en superficie distribuidas en la Región Metropolitana como se ilustra en la Figura 3

(MMA, 2016), las cuales conforman la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire y Meteorología (red MACAM). La implementación de estas estaciones de monitoreo, además de registrar las concentraciones de contaminantes normados y variables meteorológicas locales como velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente y humedad relativa, está orientada al cumplimiento de la norma primaria de calidad del aire establecida en el artículo 32 de la Ley 19.300, que resguarda la salud de las personas.



**Figura 3.** Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Santiago (MMA, 2016).

Las estaciones de monitoreo de la red MACAM deben tener instalada la entrada de la toma de muestra a una altura superior a tres metros e inferior a 10 metros sobre nivel del suelo (MINSAL y Subsecretaría de Salud Pública, 2008), lo que implica que las mediciones son de carácter superficial y por lo tanto permiten registrar las concentraciones de contaminantes y su variabilidad espacial en dos dimensiones (2D); no obstante, los contaminantes se mueven e interactúan en toda la capa de mezcla conforme lo permiten las condiciones atmosféricas, que también determinan la circulación local y regional de

las masas de aire. De acuerdo a esto, las observaciones de la Red MACAM son sólo representativas de las concentraciones en superficie, es decir, de la contaminación a la que está expuesta la población y no de la contaminación asociada a escenarios sinópticos que inducen la transferencia, acumulación y la formación de contaminantes a escalas regionales (Han, S. y col., 2015).

Si bien se han realizado esfuerzos por mejorar la cobertura y alcance territorial de las mediciones de material particulado a nivel nacional y regional, aún existen vacíos de información respecto a la distribución de tamaño del MP en las ciudades contaminadas de Chile. Estos vacíos son fundamentales considerando la importancia de conocer las características físicas y morfoquímicas de las partículas para evaluar apropiadamente riesgos para la salud y sus impactos ambientales.

### **1.5 Mediciones en altura**

Las mediciones a escalas locales no permiten investigar adecuadamente problemas de contaminación regional, ya que, además de ser representativas de lo que ocurre en superficie, siempre existe la posibilidad de que una estación de monitoreo de calidad de aire esté influenciada directamente por fuentes de emisión locales (Han, S. y col., 2015). Por otra parte, las mediciones de concentración de partículas dentro y sobre la capa de mezcla, en lugar de solo medir en superficie, proveen un mejor entendimiento de las fuentes y sumideros de aerosoles y también de los posibles mecanismos de formación y transporte (Toro, 2015), asunto particularmente importante durante el invierno, cuando la atmósfera presenta una capa de mezcla reducida y los contaminantes tienden a acumularse cerca de la superficie (Toro, 2015).



Las mediciones en altura se han desarrollado a lo largo de los años y han adquirido importancia especialmente en las últimas décadas, lo que se ha visto reflejado en las diversas publicaciones acerca del comportamiento e impacto de los contaminantes en altura (Toro, 2015; Z. Peng y col., 2015; L. Ferrero y col., 2011; Han, S. y col., 2015). Utilizando metodologías y tecnologías diferentes, los resultados han dejado en evidencia lo importante que es tener conocimiento acerca de cómo evolucionan las especies según las condiciones ambientales que se presentan dentro de la capa de mezcla, en orden de prevenir, controlar y modelar la contaminación atmosférica en tres dimensiones (Toro, 2015).

Una característica importante que considerar es la estratificación de la atmósfera con la altura y cómo varía con ello la concentración y distribución de tamaño de los aerosoles. De acuerdo con esto, diversos estudios han demostrado que la capa de mezcla puede ser descrita mediante mediciones directas de las temperaturas y la humedad atmosférica en altura empleando globos cautivos y aeronaves equipadas con sensores y muestreadores (Toro, 2015) o bien puede ser inferida a través de la distribución vertical de aerosoles usando mediciones indirectas de dispersión de aerosoles a partir de ceilómetros (Muñoz y Alcañuz, 2012) o LIDAR (Montilla-Rosero y col., 2016).

Entre las variables meteorológicas que determinan el movimiento vertical de los contaminantes y condicionan la altura de mezcla, se encuentra la estabilidad atmosférica, que se mide a partir del análisis de la variación de la temperatura y la humedad en función de la altura o gradiente adiabático seco y húmedo (Lazaridis, 2011).

Las inversiones térmicas afectan directamente el transporte vertical de aerosoles sobre la capa de mezcla, es por esto que resulta importante analizar perfiles de variables

meteorológicas en altura, ya que estas condiciones determinarán la concentración de aerosoles y su distribución en altura, parámetros que son relevantes en el establecimiento de los potenciales efectos directos (ej. alteración del clima al dispersar o absorber la luz solar) e indirectos asociados (ej. conforman núcleos de condensación que modifican la formación de nubes, su tiempo de vida, el tamaño de la gota de agua y la tasa de precipitación) (L. Ferrero y col., 2011).

El desarrollo de esta área en Chile se refleja en las diferentes líneas de investigación que han surgido en los últimos años, donde cabe mencionar que, en abril del año 2016, la Universidad de Chile a través del Departamento de Geofísica y en compañía del ministro del Medio Ambiente Pablo Badenier, lanzó un globo cautivo para monitorear la concentración de carbono negro en altura. El profesor Roberto Rondanelli, del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR) anunció que el globo “aporta información adicional muy valiosa de cómo se distribuyen los contaminantes ahora por sobre la superficie e incluso por arriba de lo que se llama la capa de mezcla, que es donde los contaminantes están bien fusionados” (U. Chile Noticias, 2016).

Por otro lado, la Universidad Católica de Valparaíso también durante el año 2016 comenzó a desarrollar un proyecto Fondecyt de tres años donde se busca investigar el impacto de la contaminación de Santiago sobre los glaciares cercanos a la ciudad, poniendo mayor énfasis en el carbono negro como uno de los principales causantes de la recesión de los hielos cordilleranos (PUCV Noticias, 2016).

Adicionalmente se han desarrollado áreas de estudios que consideran la dinámica de distribución vertical de los contaminantes y su alcance espacial y temporal (Orfanoz, 2016).

### **1.5.1 Distribución en altura de aerosoles segregados por tamaño**

La distribución de aerosoles segregados por tamaño en altura, que puede representarse mediante la distribución de la densidad de número de partículas o masa respecto al diámetro de las partículas en un intervalo definido por unidad de volumen (Grainger, 2015), ha sido medida directamente usando monitores fijos montados en torres u otras construcciones, a través de colección y posterior análisis químico del material depositado a diferentes alturas (Toro, 2015), lo que ha permitido entender mejor fenómenos de transporte, distribución vertical de aerosoles y su relación con las condiciones meteorológicas, la dinámica de las capas límite y los procesos fisicoquímicos en el aire (Han, S. y col., 2015). Si bien la determinación de la distribución de MP en altura se ha visto limitada por la dimensión y peso de los instrumentos, la reciente implementación de vehículos aéreos no tripulados o drones como plataforma de sensores, ha significado un importante avance en las mediciones en altura e investigación de variación de fenómenos y procesos en capas límites urbanas (Toro, 2015).

Estudios han demostrado que la distribución de aerosoles en el aire urbano, por lo general, es de naturaleza multimodal (Willeke, K., Whitby, K. T., 1975), lo que se relaciona con la fuerza gravitacional y con las propiedades aerodinámicas que adquieren las partículas según su tamaño (W. Wang y col., 2008).

Este Seminario de Título busca responder a la necesidad de información que existe sobre la concentración de aerosoles en altura y su distribución de tamaño dentro y sobre la capa de mezcla, permitiendo proyectar diversas líneas de investigación relacionadas con la evaluación de los potenciales impactos indirectos relacionados con el clima y el alcance

regional y global que pueden tener los aerosoles producidos en una zona urbana como Santiago.

## **1.6 Marco Teórico**

### **1.6.1 Distribución log-normal**

La función log-normal, es el ajuste más utilizado para ilustrar la distribución de tamaño del material particulado; si bien no existe fundamento teórico que justifique su uso, se ha comprobado empíricamente que a través de éste se obtienen los mejores resultados a partir de datos experimentales (John, 1995; TSI Incorporated, 2012). Esta distribución es más útil cuando el número de rangos de tamaño de partículas que se miden es mayor a 10 unidades (que en este caso se cumple ya que el espectrómetro empleado mide 31 rangos de tamaño entre 0.25 y 32  $\mu\text{m}$ ), si el rango de datos es menor, la distribución se aproxima a una distribución normal (TSI Incorporated, 2012).

### **1.6.2 Estadísticas log-normal, CMD y $\sigma_g$**

La diferencia entre el tamaño de las partículas que componen un aerosol, permiten clasificarlo como monodisperso (tamaño uniforme) o polidisperso (tamaños significativamente diferentes). De esta forma, es necesario analizar la desviación estándar geométrica ( $\sigma_g$ ) de la población de partículas, ya que este parámetro permite la caracterización a través del criterio según John, 1995.

Si bien este criterio presenta cierto grado de subjetividad, se considera una buena condición para determinar si un aerosol es monodispersos (distribución de tamaño estrecha y una desviación estándar pequeña, o bien  $\sigma_g \leq 1,25$ ), o polidispersos (distribución de tamaño más amplia y una desviación geométrica estándar mayor, o bien  $\sigma_g > 1,25$ ).

Como el software del espectrómetro portátil entrega la distribución en un histograma con número de partículas por intervalo de tamaños sucesivos, la distribución log-normal para el número de partículas por intervalo de tamaño se muestra en la ecuación *ec.1*:

$$dN(d_p) = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[ \frac{-(\ln d_p - \ln CMD)^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right] d \ln d_p \quad (ec. 1)$$

Donde  $dN(d_p)$  corresponde al número de partículas ( $n/L$ ) en el rango de tamaño  $d \ln d_p$  ( $\mu\text{m}$ ),  $N_T$  es el número total de partículas,  $CMD$  es el diámetro medio del grupo de partículas ( $\mu\text{m}$ ) y  $\sigma_g$  ( $\mu\text{m}$ ), es la desviación estándar geométrica, dada por:

$$\ln \sigma_g = \left[ \frac{\sum n_i (\ln d_i - \ln d_g)^2}{N_t - 1} \right]^{1/2} \quad (ec. 2)$$

Donde  $n_i$  corresponde al número total de partículas de diámetro  $d_i$  ( $\mu\text{m}$ ),  $d_g$  corresponde al diámetro geométrico medio ( $\mu\text{m}$ ) y  $N_T$ , a la sumatoria de todos los  $n_i$ .

En distribución log-normal, se cumple que el diámetro geométrico medio ( $d_g$ ), que corresponde al tamaño por debajo del cual se encuentra el 50% del área bajo la curva, es equivalente al CMD, ya que la distribución log-normal es simétrica y, por ende, la media y la mediana poseen el mismo valor.

El cálculo del diámetro geométrico medio se realiza a través de la ecuación *ec.3*:

$$\ln d_g = \frac{1}{N_T} \int (\ln d_p) d_n \quad (ec. 3)$$

O bien a partir de la ecuación *ec. 4*:

$$\ln d_g = \frac{1}{N_T} \sum n_j \ln d_j \quad (\text{ec. 4})$$

Estos parámetros permiten clasificar un aerosol como polidisperso o monodisperso según lo establecido de forma preliminar. De acuerdo a esto, la desviación estándar geométrica describe cuánto se desvían los valores en la distribución. En una distribución log-normal, el 95% de las partículas se encuentran en  $10^{\ln CMD \pm 2 \ln \sigma_g}$ , o:

$$\frac{CMD}{\sigma_g^2} < 95\% \text{ diámetro de partículas} < CMD \cdot \sigma_g^2 \quad (\text{ec. 5})$$

### 1.6.3 Concentración normalizada $dN/d\text{Log}D_p$

En la distribución log-normal, los datos se representan en función de la concentración en número de partículas ( $dN$ ), superficie ( $dS$ ) o masa ( $dM$ ) para cada rango de tamaño de partículas que conforman el aerosol. Esta representación funciona bien si se trabaja exclusivamente sólo con un tipo de instrumento o si se están comparando dos instrumentos con la misma resolución. Una forma de normalizar la concentración de partículas e independizarla de la resolución del instrumento es calcular la concentración normalizada  $dN/d\text{Log}D_p$  definida por la expresión que se muestra en la *ec. 6* (John, 1995):

$$\frac{dN}{d\text{Log}D_p} = \frac{dN}{\log D_{p,i} - \log D_{p,f}} \quad (\text{ec. 6})$$

Donde  $dN$  corresponde a la concentración de partículas o número de partículas en un rango de tamaño determinado,  $D_p$  al diámetro medio de partícula,  $D_{p,i}$ , al diámetro inferior del canal y  $D_{p,f}$ , al diámetro superior del canal.  $d\text{Log}D_p$  es la diferencia entre el logaritmo del ancho de banda, y se calcula mediante la resta entre el logaritmo del límite mayor y el

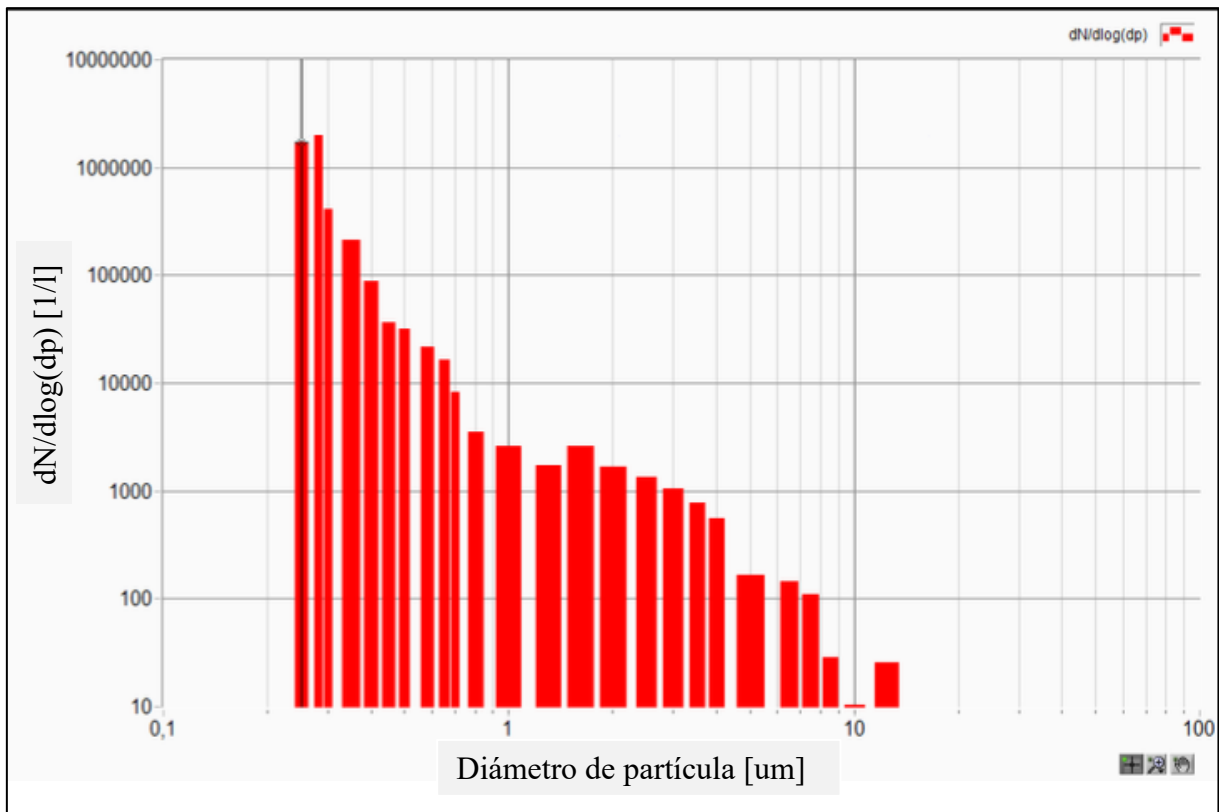
logaritmo del límite menor del canal, normalizando con el ancho de banda, con la finalidad de obtener una concentración normalizada independiente del ancho de banda empleado o resolución instrumental.

#### **1.6.4 Representación gráfica de distribución de partículas**

La distribución de los tamaños de partícula puede representarse mediante una distribución de densidad de número de radio diferencial,  $n(r)$  que representa el número de partículas con radios entre  $r$  y  $r + dr$  por unidad de volumen (Grainger, 2015), como se muestra en la *ec. 7*.

$$N(r) = \int_r^{r+dr} n(r) dr \quad (\text{ec. 7})$$

En la Figura 4 se ilustra la forma en que el software del equipo de medición utilizado entrega la información de concentración en número de partículas normalizada ( $dN/d\text{Log}D_p$ ) de cada diámetro de partícula por litro de aire muestreado.



**Figura 4.** Ejemplo de distribución logarítmica de número de partículas, medición en superficie con espectrómetro 11-C, Software GRIMM 1178 (Elaboración propia).

En el eje de las ordenadas se representa la concentración normalizada de número de partículas y en el eje de las abscisas se muestra el diámetro de las partículas medidas en micrones  $\mu\text{m}$ , ambos representados en escala logarítmica, lo que simplifica la interpretación de las fracciones que más contribuyen en el número de partículas registradas. El equipo entrega la misma información para la distribución de partículas como concentración en masa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y superficie ( $\text{mm}^2/\text{L}$ ).

No es inusual que la distribución de tamaño de las partículas tenga más de un modo, especialmente cuando hay más de una fuente del aerosol, entonces la distribución puede ser ajustada a una suma de distribuciones log-normal (John, 1995).



### 1.6.5 Ley Barométrica, Estabilidad Atmosférica e Inversiones Térmicas

#### i) Ley Barométrica

La variación de la presión atmosférica con la altura puede ser descrita a partir de la ecuación hidrostática, que se muestra en la *ec. 8*:

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\rho(z) g \quad (\text{ec. 8})$$

Donde  $\rho(z)$  es la densidad del aire (g/L) a cierta altura  $z$  (m).

A partir de la *ec. 8* y la ley de los gases ideales, tal como se detalla en el ANEXO I, la ecuación hidrostática también puede ser representada a través de la ecuación *ec. 9*.

$$\frac{p(z)}{p_o} = e^{-\frac{z}{H}} \quad (\text{ec. 9})$$

Donde  $p(z)$  representa la presión a una altura  $z$  (m) y  $p_o$ , la presión a nivel de superficie, ambas en atmósferas. El término  $z$  corresponde a la variación de altura en metros y  $H$  corresponde a la escala de altura, que representa la distancia a la cual la presión atmosférica disminuye en un factor de  $e$  (es decir, aproximadamente en un factor de 2,72).

#### ii) Estabilidad Atmosférica

Las condiciones de estabilidad atmosférica están relacionadas con la capacidad de la atmósfera para mezclar y dispersar contaminantes en la dimensión vertical, lo que depende de las condiciones de temperatura y humedad del ambiente a diferentes alturas.

Según esto último, se pueden distinguir tres estados en una porción vertical de la atmósfera, lo que la clasifica como: inestable, neutra y estable, adjetivos que se refieren al comportamiento de una parcela de aire que se desplaza adiabáticamente en dirección vertical (Hanna, S. y col., 1982). Para comprender este concepto, es necesario tomar en cuenta que las condiciones que determinan la estabilidad atmosférica son diferentes en

una atmósfera húmeda o en una atmósfera seca, por lo tanto, la dispersión vertical de un volumen de aire se verá influenciado por un gradiente adiabático húmedo o un gradiente adiabático seco.

Si bien el proceso no es puramente adiabático ya que las masas de aire no se encuentran térmicamente aisladas, se asume este comportamiento debido a que los fenómenos de expansión y compresión de las masas de aire ocurren rápidamente en comparación al proceso de intercambio de calor por conducción o radiación.

### iii) Gradiente adiabático seco

La temperatura a la cual el vapor de agua comienza a condensarse o la temperatura a la cual la atmósfera se satura, es definida como punto de rocío. Cuando la temperatura ambiente se encuentra por sobre el punto de rocío, las condiciones atmosféricas verticales son representadas por el gradiente adiabático seco, que es descrito por la ecuación ec. 10, obtenida a partir de conceptos fisicoquímicos que se detallan en el ANEXO IV A).

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{Cp} \quad (\text{ec. 10})$$

Donde  $Cp = \frac{R}{M_{aire}} + c'_v$ , y  $c'_v$  es la capacidad calorífica (J/K) a volumen constante por unidad de masa.

El gradiente adiabático seco  $-\frac{g}{Cp}$ , para masa de aire seco es 0,976 °C/100m, y se representa con el símbolo  $\Gamma_{seco}$ .

#### iv) Gradiente adiabático húmedo

Si la temperatura ambiente se encuentra por debajo del punto de rocío, el gradiente adiabático que mejor representa las condiciones verticales de la atmósfera es el gradiente adiabático húmedo, ya que la atmósfera se satura y el vapor de agua comienza a condensarse.

En una atmósfera saturada la capacidad calorífica del aire debe ser corregida como se expresa en el ANEXO IV B), ya que se cumple que el calor específico del vapor de agua es mayor al calor específico del aire seco, por lo tanto, el gradiente adiabático húmedo ( $\Gamma_{húm}$ ) tendrá una tasa de enfriamiento menor que el aire seco.

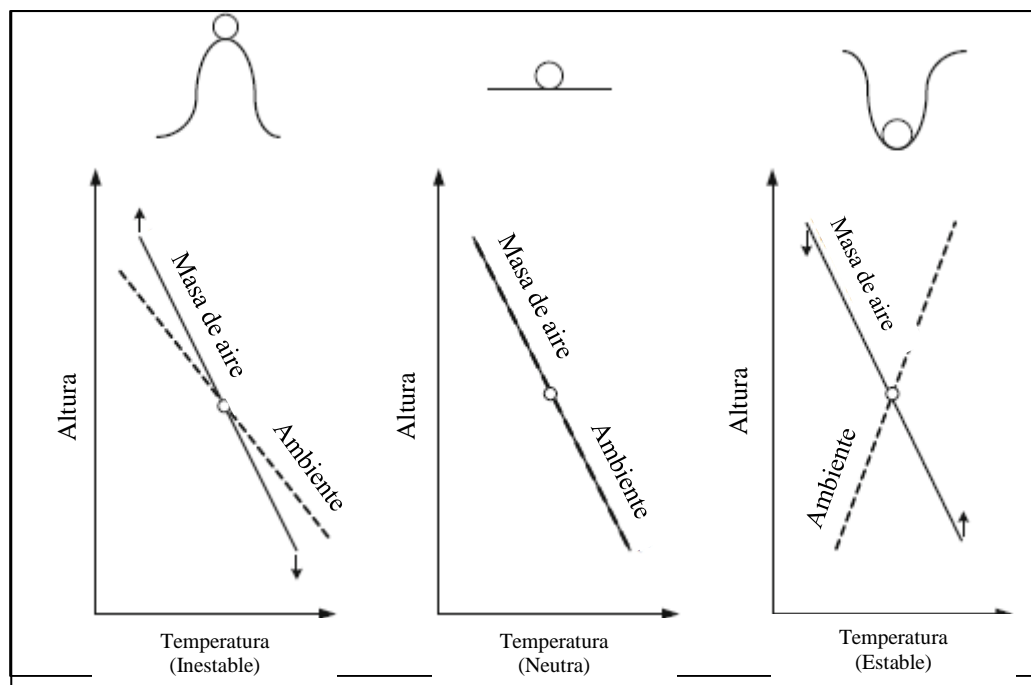
A partir de conceptos fisicoquímicos detallados en el ANEXO IV B), se tiene que el gradiente diabático húmedo es descrito a partir de la ecuación *ec. 11*

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} - \frac{\Delta H_v}{C_p} \frac{dw_v}{dz} \quad (\text{ec. 11})$$

Cuando el gradiente adiabático de la atmósfera es igual al gradiente adiabático de a parcela de aire analizada, se desarrolla una zona de neutralidad en la atmósfera ( $\Lambda = \Gamma$ , neutra). Cuando el gradiente adiabático de la atmósfera es mayor al gradiente adiabático de la parcela de aire, se desarrolla una situación de estabilidad atmosférica ( $\Lambda < \Gamma$ , estable), cuando el gradiente adiabático es menor que el de la parcela de aire, entonces se desarrolla una zona de inestabilidad ( $\Lambda > \Gamma$ , inestable).

De acuerdo con los gradientes adiabáticos, cuando aún no se ha alcanzado el punto de rocío, es decir, cuando la temperatura ambiente es mayor a la temperatura a la cual se satura la atmósfera, la estabilidad se determina comparando el gradiente ambiental con el perfil adiabático seco ( $\Gamma_{\text{seco}}$ ); y, en caso contrario, cuando la atmósfera se satura por efecto del enfriamiento para una determinada humedad absoluta (es decir, cuando la temperatura del aire se encuentra por debajo de la temperatura de punto de rocío) se determina la estabilidad comparando el gradiente atmosférico ambiental con el perfil adiabático húmedo ( $\Gamma_{\text{húm}}$ ) considerando un valor de 0.55 K/Km

En la Figura 5 se ilustra el comportamiento de una masa de aire de acuerdo con las diferentes condiciones de estabilidad que se desarrollan en la atmósfera.



**Figura 5.** Representación gráfica de la relación entre temperatura y altura de un volumen de aire para condiciones inestable, neutra y estable en relación a la atmósfera ambiente (modificado de Lazaridis, 2011).

En cada imagen, la parcela se origina a la altura indicada por el círculo, donde su temperatura es igual a la del entorno. Si la densidad de la parcela es menor que la de su entorno ( $\rho_p < \rho_e$  o  $T_p > T_e$ ), entonces la parcela será acelerada hacia arriba. Sin embargo, si la densidad de la parcela es mayor a la del entorno ( $\rho_e < \rho_p$  o  $T_e > T_p$ ), entonces la parcela será acelerada hacia abajo, lo que se conoce como condición de inversión. Finalmente, si la densidad de la parcela es igual a la de su entorno ( $T_e = T_p$ ), seguirá el movimiento de la atmósfera adyacente (Hanna, S. y col., 1982).

En las imágenes que se encuentran por sobre los gráficos de altura v/s temperatura, se ejemplifica la fuerza que se ejerce sobre la parcela de aire al encontrarse en las diferentes condiciones de estabilidad, siendo una analogía gravitacional de una bola sobre diferentes superficies. Por ejemplo, en el estado inestable, la fuerza sobre la parcela de aire, la acelera continuamente lejos de su origen. En el estado neutro, al ser la temperatura de la parcela y del entorno iguales, no hay fuerza sobre el volumen de aire. Finalmente, en el estado estable, la fuerza que se ejerce sobre la parcela de aire, la acelera continuamente hacia su origen.

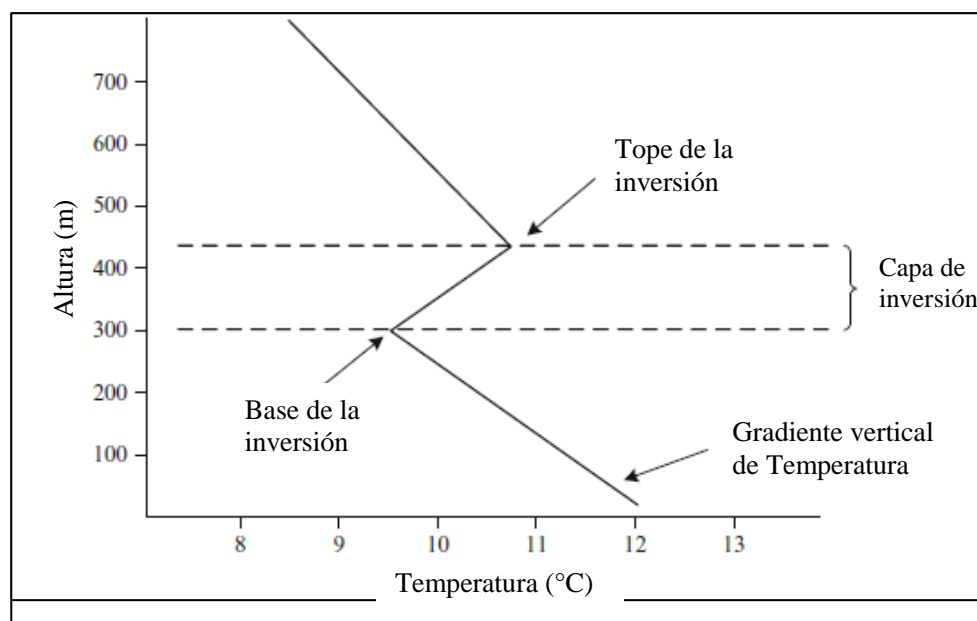
#### v) **Inversión Térmica**

La inversión térmica está asociada estrechamente con condiciones de estabilidad atmosférica, que se producen cuando la densidad de una parcela de aire es mayor a la densidad del aire circundante, o cuando la temperatura de esta parcela de aire es menor a la temperatura del entorno; lo que limita el transporte vertical de los gases y aerosoles.

La porción vertical de la atmósfera en la cual se generan estas condiciones de estabilidad se conoce como inversión térmica, lo que se presenta gráficamente como un aumento de

la temperatura con la altura, en lugar de una disminución. En la Figura 6 se ilustra un ejemplo de inversión térmica, con sus partes características. La base de la inversión es un tope por encima del cual se produce muy poca turbulencia vertical o mezcla; el espacio entre la superficie y la base de la inversión se conoce como capa de mezcla, que es el lugar donde los aerosoles están distribuidos y mezclados ya que la atmósfera presenta condiciones de inestabilidad.

El tope de la inversión corresponde al lugar donde la temperatura nuevamente comienza a descender con la altura, como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Representación esquemática de una inversión térmica (modificado de Lazaridis, 2011)

La inversión puede ser de dos tipos:

a) Inversión de superficie

Durante la noche, la superficie de la tierra pierde calor rápidamente por radiación, mientras que el aire ambiente lo hace lentamente por convección, por lo tanto, se conoce como inversión de superficie cuando la temperatura del aire a cierta distancia sobre el suelo es

más alta que la temperatura del aire muy cerca del suelo, en otras palabras, el gradiente adiabático ambiental es positivo dentro de la capa de inversión, aumentando con la altitud.

b) Inversión de altura, de subsidencia

En la inversión de subsidencia el aumento de temperatura con la altura se produce debido a la convergencia de masas de aire en altura y su descenso paulatino asociado a la presencia del anticiclón. La subsidencia, provoca que el aire se caliente por compresión, creando una capa de aire muy estable.

## **1.7 Marco Normativo**

El uso de aeronaves pilotadas a distancia en Chile se encuentra regulado por la Dirección General Aeronáutica Civil (DGAC) a través de normas que limitan el uso de estos instrumentos a asuntos de interés público con el objetivo de resguardar la seguridad de las operaciones que se efectúan en el país.

### **1.7.1 Norma DAN 151**

Norma titulada “Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) en asuntos de interés público, que se efectúen sobre áreas pobladas” de la DGAC (DGAC, 2017). Esta norma tiene por objeto garantizar la seguridad de operaciones donde se utilicen aeronaves no tripuladas sobre áreas pobladas, estableciendo responsabilidades y requisitos de las personas o entidades que operan el drone, entre ellas:

- El peso máximo de despegue de la aeronave debe ser de nueve kilogramos.
- La aeronave debe ser construida de fábrica y contar con instructivos técnicos de operación.

- El dron debe operar con paracaídas de emergencia y tener la capacidad de ser controlado manualmente.
- Toda operación se efectuó en condiciones meteorológicas de vuelo visual, manteniendo permanente contacto visual directo con el RPA.
- El límite de altura de vuelo es 130 metros y la distancia a 500 metros en una pendiente visual.
- El tiempo total de vuelo no puede exceder el 80% de la máxima autonomía que permite la carga eléctrica del RPA.

De acuerdo con la normativa, la DGAC puede autorizar un vuelo cuando el operador posea la tarjeta de registro del RPA, la credencial de pilotos a distancia que operan la nave registrada y la póliza de seguro exigida por la Junta Aeronáutica Civil (JAC), documentos que deben ser portados cada vez que se realiza una operación luego de obtener la autorización de la DGAC.

### **1.7.2 Norma DAN 91**

Norma aeronáutica titulada “Reglas del aire” de la Dirección General Aeronáutica Civil (DGAC, 2015), establece la normativa técnica con el objetivo de regular el tránsito aéreo, maniobras de vuelo, movimiento de las aeronaves en superficie y la utilización del espacio aéreo en territorio nacional, a fin de proporcionar el máximo de seguridad y un desarrollo fluido y eficiente de las operaciones aéreas que se realizan en el país.

El vehículo aéreo no tripulado Matrice 600, de nueve kilogramos, debe cumplir con esta norma, ya que sólo están exentas aquellas RPA fabricadas de polietileno de peso máximo 750 gramos, destinadas a uso privado o recreacional y que no vuelen a más de 50 metros



de altura sobre el obstáculo de mayor altura de la zona recorrida en lugares privados, debiendo responder el operador ante cualquier daño a tercero que cause durante el vuelo.

En esta norma se detallan entre otras cosas:

- Las definiciones de terminologías asociadas a la operación de un vuelo.
- Se establece la protección a la propiedad privada, limitando las altitudes y las condiciones de operación.
- Las restricciones de operación en zonas prohibidas, restringidas y peligrosas.
- La obtención de la autorización de la DGAC previo a realizar cualquier vuelo, que será otorgada al entregar un documento específico que tiene por objetivo resguardar la seguridad de la operación.
- Las maniobras que ejecutar para prevenir las colisiones.
- Las luces que deben ostentar las aeronaves: luces de navegación y anticolidión.

## **2. HIPÓTESIS**

De acuerdo con los antecedentes mencionados y haciendo hincapié en la necesidad de generar información respecto a la dinámica del material particulado en altura y su relación con variables meteorológicas, considerando los fenómenos de transporte vertical de aerosoles en la atmósfera de Santiago, se plantea la siguiente hipótesis:

La distribución vertical de concentración de material particulado segregado por tamaño en la atmósfera urbana de Santiago se encuentra restringida por las condiciones de estabilidad atmosférica, siendo las fracciones más finas las que tienen mayor abundancia relativa en altura.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 General**

Determinar la concentración de aerosoles y su distribución de tamaños en el perfil vertical y su relación con las condiciones de estabilidad atmosférica en la capa de mezcla de un sitio en la ciudad de Santiago.

#### **3.2 Específicos**

1. Equipar y validar un vehículo aéreo no tripulado como plataforma de sensores de variables meteorológicas y aerosoles segregados por tamaño empleando un espectrómetro de aerosoles portátil.
2. Determinar la concentración de aerosoles, su distribución de tamaños, la temperatura y la humedad relativa en el perfil vertical de la atmósfera.
3. Analizar, procesar e interpretar los datos de temperatura, humedad relativa y concentración de aerosoles y su distribución en altura, construyendo perfiles verticales para el sitio de muestreo.

## 4. MATERIALES Y METODOS

**4.1 Equipos: Especificaciones técnicas y principio de funcionamiento** Con el objetivo de registrar las variables meteorológicas y la concentración de material particulado segregado por tamaño en altura, se seleccionaron instrumentos de medición que posteriormente se acoplarán a la plataforma de vuelo, cuyas especificaciones técnicas y principios de funcionamiento se detallan en los siguientes puntos.

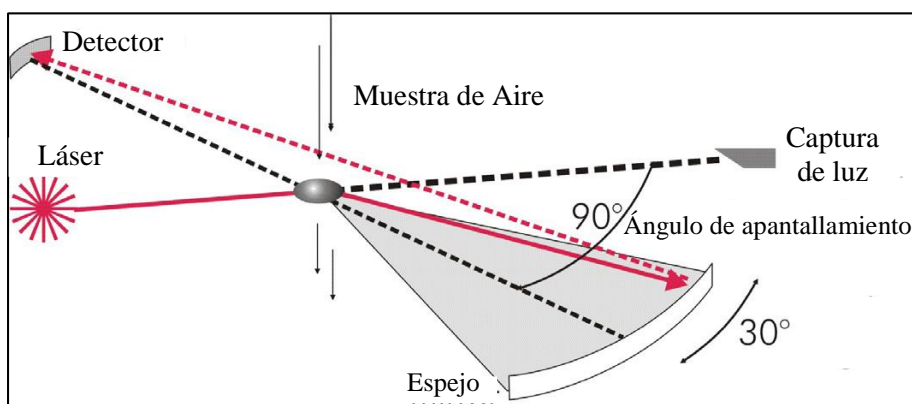
**i) Monitor continuo de partículas modelo 11-C**



**Figura 7.** Mini Laser Aerosol Spectrometer Model 11-C (GmbH & Co.KG, 2016a).

El Mini Laser Aerosol Spectrometer Model 11-C es un espectrómetro de aerosol portátil de origen alemán que permite medir la distribución de tamaño y la concentración de partículas en suspensión en número de partículas y en masa en una muestra de aire a flujo constante, en un intervalo de tiempo definido por el usuario (GmbH & Co.KG, 2016a).

El principio de funcionamiento del instrumento se fundamenta en la dispersión producida por la presencia de partículas sobre un haz de luz láser al incidir sobre la muestra, como se observa en la Figura 8.



**Figura 8.** Principio de funcionamiento del espectrómetro 11-C, (GmbH & Co.KG, 2016a)

La muestra de aire (que contiene un flujo de partículas) ingresa a la cámara de medición y sobre ella incide perpendicularmente un haz de luz cuya fuente es un láser de diodo. La luz dispersada es reflejada por un espejo curvo cuyo ángulo de apertura genera una dispersión de 90°, desviando la luz hacia un diodo receptor. Posteriormente, el detector clasifica la señal en diferentes canales de tamaño en un rango desde 0.25 a 32  $\mu\text{m}$  de diámetro de acuerdo a la intensidad de la señal, que será mayor mientras mayor sea el diámetro de la partícula, ya que la dispersión de luz es proporcional a su tamaño. Finalmente, las partículas de la muestra de aire son colectadas en un filtro de teflón, lo que permite realizar análisis gravimétricos posteriores a las mediciones ópticas en tiempo real.

Algunas de las ventajas que posee este instrumento, es que puede conectarse directamente a la corriente o utilizar como fuente de energía una batería de ion litio (Li-Ion battery back 11.1V 44.4 Wh), que lo hace portátil. Además, puede conectarse a un computador a través de una interface RS-232 o mediante bluetooth, lo que permite la transferencia de datos en

tiempo real, y puede utilizarse con una tarjeta de memoria microSD como sistema de almacenamiento de datos, lo que permite recuperar series de datos cuando se pierde la transferencia directa o como sistema de registro al usar el dispositivo a largas distancias.

La información obtenida desde el monitor, que puede ser recuperada desde la tarjeta de memoria microSD o puede ser observada en tiempo real a través del software proporcionado por el fabricante (GRIMM Windows 1178), permite ver número de partículas, masa o distribuciones de tamaño y concentración, y ajustar parámetros y propiedades de almacenamiento de datos.

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas del espectrómetro portátil de aerosoles modelo 11-C (GmbH & Co.KG, 2016a)

Tamaño de partículas que miden los canales (31 fracciones)	0.25 - 0.28 - 0.3 - 0.35 - 0.4 - 0.45 - 0.5 - 0.58 - 0.65 - 0.7 - 0.8 - 1 - 1.3 - 1.6 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4 - 5 - 6.5 - 7.5 - 8.5 - 10 - 12.5 - 15 - 17.5 - 20 - 25 - 30 - 32 [ $\mu\text{m}$ ]
Rango de medición	1 to 2,000,000 partículas/litro
Masa de partículas	Desde 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 100 $\text{mg}/\text{m}^3$
Datos medioambientales	MP <sub>10</sub> ; MP <sub>2.5</sub> ; MP <sub>1</sub> continua y simultáneamente.
Reproducibilidad	$\pm 3$ % sobre el rango total de medición
Flujo de muestreo	1.2 l/min $\pm 5$ % regulada automáticamente
Sistema de colección	Filtro de PTFE 47 mm, removible
Peso	2.5 Kg
Altura máxima	2000 m
Temperatura y humedad de operación	4°C – 40°C; H <sub>R</sub> < 95 %
Transferencia de datos	Bluetooth, Tarjeta SD
Suplemento energético	Li-Ion battery back 11.1V 44.4 Wh

Por otro lado, el monitor continuo de partículas trae consigo un sensor de temperatura y humedad relativa modelo 1158-EE (GmbH & Co.KG, 2016a), que permite registrar estos

parámetros en tiempo real, en intervalos de un minuto; sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características del sensor 1158-EE (GmbH & Co.KG, 2016a).

	Temperatura °C	Humedad relativa %	Dimensiones
Rango	-40 – 60	0 – 100	Diámetro 12mm largo 83mm largo cable 1,5 m
Exactitud	± 0,2	± 2	
Resolución	0,1	0,1	



**Figura 9.** Sensor de temperatura y humedad modelo 1158-EE (GmbH & Co.KG, 2016a)

ii) **Sensor de temperatura y humedad Newsteo Wireless LGR32**



**Figura 10.** Instrumento LGR32, transmisión por radiofrecuencia (Newsteo LGR, 2016a).

El dispositivo LGR 32 es un instrumento de origen francés que permite monitorear condiciones de humedad, temperatura y punto de rocío con alta resolución temporal y sensibilidad. Está constituido por un sensor modelo PFPN-STH54-001, acoplado a un

logger que envía la señal mediante radiofrecuencia a la llave RF-to-USB conectada a un computador; esta llave es el puente entre el computador y los loggers, siendo el receptor de la señal. Los datos son observados en el computador a través del Software RF Monitor en tiempo real o posteriormente al recuperarlos desde la memoria interna del logger (Newsteo LGR, 2016a).

Entre las ventajas que posee el instrumento se encuentra su elevada precisión, visualización instantánea del punto de rocío, transmisión de datos en tiempo real, almacenamiento y recuperación de los datos cuando se pierde la conexión, largo tiempo de duración de la batería, gran capacidad de almacenamiento de datos; es pequeño, liviano y no requiere de cables conectores para transmitir información (Newsteo LGR, 2016b).

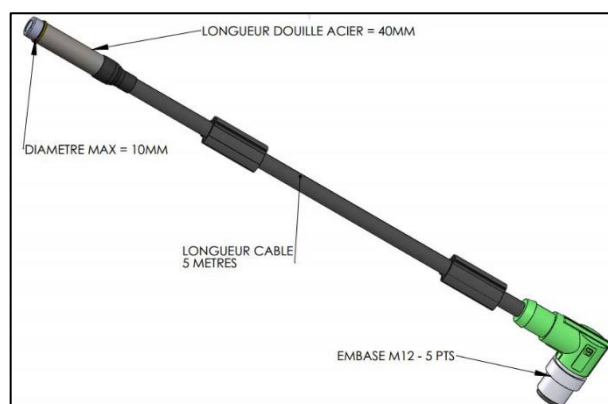
Las especificaciones técnicas de LGR32, se muestran en la Tabla 3

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas Logger LGR32 (Newsteo LGR, 2016b).

Conexión	Wirless PC
Suplemento energético	Batería de tionilo de litio AA (3,6 V)
Dimensiones	98 mm x 64 mm x 34 mm
Peso Neto	250 g
Intervalo menor de medición	1 segundo
Rango de transferencia RF aire libre	100m a 1 km
Capacidad memoria interna	32786 datos con fecha y tiempo
Radio frecuencia de trasmisión	868 MHz



El equipo se encuentra conectado a una sonda con sensores de temperatura y humedad relativa modelo PFPN-STH54-001 (Figura 11) con lo que se puede obtener también el punto de rocío. Las especificaciones técnicas del sensor se ilustran en la Tabla 4.



**Figura 11.** Sensor PFPN-STH54-001 (Newsteo LGR, 2016a).

**Tabla 4.** Especificaciones técnicas sensor PFPN-STH54-001 (Newsteo LGR, 2016a).

	Rango	Exactitud	Resolución
Temperatura °C	-40 – 125	± 0,2	0,015
Humedad relativa %	0 - 100	± 1,8	0,03
Dimensiones	Diámetro 10mm, largo 40mm, largo del cable 5 m		

### iii) Drone DJI Matrice 600

El drone marca DJI modelo Matrice 600 (Figura 12), es un vehículo aéreo no tripulado controlado a distancia, cuya estructura de fibra de carbono y sistema de seis rotores permiten cargarlo con 6 Kg más sobre su propio peso, pudiendo elevarse a alturas de hasta 2500 msnm soportando ráfagas de viento de máximo 8 m/s (H. Store, 2016).

El sistema de control de vuelo A3 y el uso de un sistema de seis baterías inteligentes garantizan un funcionamiento preciso, seguro y controlado del instrumento hasta por 36 minutos.



**Figura 12.** Drone DJI Matrice 600 (Elaboración propia)

El manejo del dron se realiza a través de un radio control (RC) acoplado a un teléfono inteligente o tablet con la aplicación DJI GO, que permite el acceso a información y configuraciones como modos de vuelo, trayectorias, puntos de interés, carga de baterías, entre otros. La Tabla 5 resume las especificaciones técnicas del dron.

Por otro lado, la aeronave se encuentra equipada con un paracaídas que soporta el peso máximo que puede alcanzar la estructura completa y que puede ser accionado a través de un control independiente.

**Tabla 5.** Especificaciones técnicas Drone DJI Matrice 600, (H. Store, 2016).

Dimensiones (mm)	1668 x 1518 x 759(Hélices, brazos y montura GPS desplegados)
Temperatura de funcionamiento	-10°C - 40° C
Peso máximo de despegue	15,1 kg
Velocidad máx. de ascenso	5 m/s
Velocidad máxima de descenso	3 m/s
Resistencia al viento	8 m/s
Altitud máxima de vuelo	2500 m
Velocidad máxima de vuelo (sin viento)	18 m/s
Tiempo de vuelo estacionario (con 6 baterías)	Sin carga: 36 min Con 6 Kg: 16 min
Distancia máxima de transmisión	5 Km
Sistema de control de vuelo	A3
Baterías	6 baterías modelo TB47S, TB48S
Modelo paracaídas	Rescue Kit DJI S1000 – Disparador Futaba 1,1 Km

#### iv) Sistema Arduino para registro de la presión atmosférica

El Arduino es una plataforma microcontroladora de prototipos electrónica basada en hardware y software de fácil manipulación. Este dispositivo permite registrar variables mediante la recepción de entradas de diversos sensores y hace posible almacenar datos en una memoria microSD para luego recuperarlos. Entre las ventajas del uso de este dispositivo está su bajo costo, su fácil programación y la versatilidad de la plataforma de acuerdo a la construcción del circuito deseado, que en este caso permitió registrar las variables de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, esta última de vital importancia para registrar la altura del equipamiento en vuelo. El Arduino utilizado

corresponde a un Arduino Nano, microcontrolador ATMEGA328, que posee 14 puertos digitales y 6 pines análogos.

Los sensores utilizados en el circuito construido y sus especificaciones técnicas se describen en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Especificaciones técnicas de los sensores conectados al Arduino

Sensor	Presión	Humedad relativa (Hr) y Temperatura (T)	Reloj de tiempo real
Modelo	BMP180	DHT22	RTC DS3231
Rango	300 hPa – 1100 hPa	Hr = 0 % -100 % T = -40 ° C – 80 ° C	
Resolución	0.03 hPa	Hr = 0.1 % T = 0.1 ° C	
Exactitud	$\pm 2$ ° C		
T de operación	-40 ° C – 85 ° C		
Precisión		Hr = 2 % T = $\pm 0.5$ ° C	> 1-2 s/mes

#### 4.2 Diseño de la plataforma de soporte para instrumentos de medición

Se diseñó una estructura de tubos huecos de fibra carbono trenzada y uniones de plástico de alta densidad como soporte de los instrumentos de medición para acoplar en el drone, con la finalidad que la estructura contribuyera lo menos posible al peso del conjunto.

Para asegurar la plataforma y los equipos, las uniones de plástico fueron fijadas con tornillos pasados y reforzadas con pegamento para evitar cualquier desajuste provocado por la vibración del drone en vuelo. Este efecto también fue considerado en la

manipulación del dispositivo 11-C, al cual se le adhirió una goma de un centímetro de espesor para evitar defectos en el funcionamiento del aparato óptico.

Se construyó una plataforma para instalar el equipo LGR y el sistema Arduino con placas de aluminio fijadas al soporte de tubos de fibra de carbono, que permitieron asegurar los instrumentos a través de tornillos. Para proteger los sensores de los instrumentos, se decidió utilizar cubiertas de plástico que permiten mantener el flujo de aire y evitan el efecto de la luz solar directa sobre los sensores.

#### **4.3 Extensión de la toma de muestras del espectrómetro de aerosoles**

Considerando que las hélices del drone agitan el aire produciendo turbulencia en el entorno del vehículo en vuelo y perturbando la muestra de aire colectada, se realizaron pruebas en superficie para determinar el efecto del acople de una extensión a la toma de muestras del espectrómetro 11-C. Se seleccionaron tres tipos de material inerte al MP: Manguera de teflón, Manguera de silicona y Tubo de aluminio. Las longitudes de las extensiones utilizadas fueron seleccionadas de acuerdo con los resultados obtenidos y la búsqueda bibliográfica (Villa y col., 2016), de esta manera se experimentó con extensiones de dos metros para todos los materiales y de 70 centímetros para el tubo de aluminio, todas ellas de cuatro milímetros de diámetro interno y seis milímetros de diámetro externo, para acoplar directamente al equipo por un extremo y por el otro, el cabezal.

Las mediciones se llevaron a cabo en las canchas de básquetbol del complejo deportivo del Campus Juan Gómez Millas, en el exterior. El método experimental se describe a continuación:

- a) Se realizaron series de mediciones de 10 minutos con manguera y los siguientes 10 minutos sin manguera, por triplicado.
- b) Los datos fueron recuperados a través del Software GRIMM Windows 1178 y exportados a Excel para validarlos según la metodología descrita en el punto 4.4.
- c) Se ordenaron y clasificaron los datos asignando valores de 1 ó 2 de acuerdo a si estaban sin extensión o con extensión respectivamente.
- d) Las series de datos fueron exportadas por separado al programa informático SPSS Statistics a través del cual fueron sometidas al análisis estadístico expresado en el punto 4.5, con el objetivo de determinar diferencia significativa entre las mediciones con y sin extensión.
- e) Se repitió el procedimiento para una extensión de tubo de aluminio de 70 centímetros de longitud.
- f) Se repitió la experiencia para un blanco, midiendo 20 minutos de corrido, sin acoplar extensión, con el objetivo de considerar comportamientos propios de la naturaleza de las mediciones.
- g) Se seleccionó el material apropiado de acuerdo al efecto de la extensión sobre las mediciones.

#### **4.4 Validación datos, “Outliers”**

El criterio definido por la Conferencia Internacional de Extracción de Datos en 2010 “Outlier Detection Techniques” (Hans-Peter Kriegel y col., 2010), postula que los puntos “outliers” se encuentran por sobre o por debajo tres veces la desviación estándar del promedio, calculado considerando los potenciales outliers. Por lo tanto, el límite superior

e inferior del rango en el cual se dispersa una serie de datos, están determinados por el intervalo que se muestra en la ecuación 12.

$$\bar{y} - 3\sigma < x < \bar{y} + 3\sigma \text{ (ec. 12)}$$

Si el dato no se encuentra en el rango establecido, se considera outlier, y es reemplazado por el promedio; anulando de esta manera, los eventos aislados en un grupo de datos.

Este criterio fue utilizado al medir concentraciones de especies químicas o contaminantes en un sitio y en un período de tiempo determinado y acotado.

#### **4.5 Análisis estadístico comparativo de dos muestras independientes**

La comparación de series de datos de dos muestras independientes, para el caso de las pruebas de extensión de la toma de muestras para el espectrómetro de aerosoles 11-C, detallado en el punto 4.3, se desarrolló a través de un análisis estadístico de normalidad, comparación de medias y homogeneidad de varianzas utilizando el programa SPSS Statistics con el objetivo de determinar la significancia estadística entre medias y varianzas para las mediciones con extensión y sin extensión.

- i) **Test de Normalidad Smirnov** (Universidad de Barcelona, 2005): Como el universo de datos es mayor a 50 se aplica este test para determinar si la distribución es normal o no, lo cual permite diferenciar si el análisis de comparación de medias se realiza mediante análisis de varianza (ANOVA) o prueba de Kruskal Wallis, respectivamente.

- ii) **ANOVA** (Universidad de Barcelona, 2005): Prueba estadística para comparar la media entre dos muestras independientes de datos cuando la distribución del conjunto completo es normal y se cumple la homogeneidad de varianzas.
- iii) **Kruskal Wallis** (Universidad de Barcelona, 2005): Prueba estadística para comparar la media entre dos muestras independientes de datos cuando la distribución del conjunto completo no es normal.
- iv) **Test de Levene** (Universidad de Barcelona, 2005): Análisis de homogeneidad de varianzas, que permite comparar si la desviación de los datos con respecto a la media de dos muestras independientes, son estadísticamente similares o diferentes.

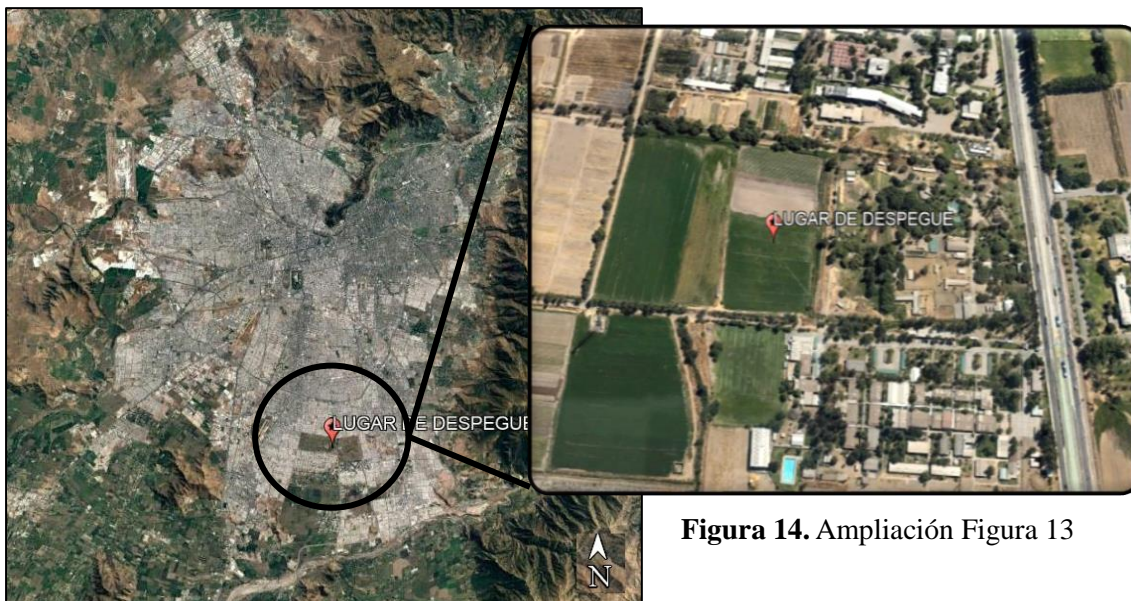
El análisis estadístico completo se detalla en el ANEXO VII.

#### **4.6 Medición de perfiles verticales**

Una vez construida la plataforma de medición y con la presencia de un especialista en operación de vehículos aéreos no tripulados, se realizaron vuelos de prueba en la comuna de Las Condes, Santiago. En primera instancia se utilizó una caja de madera rellena con arena cuyas dimensiones y peso eran similares al espectrómetro de aerosoles, para volar sin arriesgar el equipamiento de alto costo y, en segundo lugar, se comprobó que los instrumentos no generasen interferencias, asegurando un vuelo normal y una correcta transmisión y almacenamiento de datos.

De esta manera, durante el mes de agosto del año 2017 se realizaron cinco vuelos en el Campus Antumapu de la Universidad de Chile, en la comuna de La Pintana, Santiago (Figura 13 y 14).





**Figura 13.** Lugar de medición, Campus Antumapu, Universidad de Chile

**Figura 14.** Ampliación Figura 13

En las diferentes campañas de medición se registraron las horas de los diferentes instrumentos con el objetivo de sincronizar posteriormente los datos según el método siguiente:

- a) Se anotó la hora del LGR y la hora del 11-C, para considerar el desfase de ambos relojes en el cruce de datos
- b) Se anotó la hora exacta que registraba el reloj del LGR al encender el Arduino.
- c) Los instrumentos fueron sincronizados de acuerdo a la hora del LGR.

Se probaron distintas metodologías de vuelo y se tomó nota de los tiempos (LGR) de eventos relevantes como hora de despegue, hora de altura máxima, hora de descenso, hora de fin del vuelo, altura máxima según control del drone, y otros, obteniendo además parámetros de temperatura, humedad relativa, punto de rocío, presión atmosférica y concentración de partículas a través de los instrumentos de medición acoplados a la plataforma.

#### **4.6.1 Recuperación de los datos de las mediciones en vuelo**

- a) Los datos del LGR fueron recuperados a partir del Software RF Monitor y exportados a Excel para ser ordenados de acuerdo al tiempo, obteniendo un valor de temperatura, humedad y punto de rocío para cada segundo de vuelo.
- a) Las mediciones obtenidas desde del 11-C, se recuperaron a partir del Software GRIMM Windows 1178 y fueron exportadas a Excel, para facilitar la posterior sincronización de datos. Como el 11-C registra un dato promedio cada seis segundos, se interpolaron las mediciones repitiendo el valor para los cinco segundos anteriores, de modo de obtener un valor de concentración para cada segundo de vuelo.
- b) Las mediciones obtenidas desde el Arduino fueron recuperadas en Excel y ordenadas de modo que cada 0,0708 segundos el instrumento registró un valor de presión, temperatura y humedad. Por lo tanto, para cada segundo se recuperaron 14 datos, los cuales fueron promediados para obtener un dato de presión, temperatura y humedad para cada segundo.

#### **4.6.2 Sincronización de los datos LGR, 11-C y Arduino**

- a) Se editó la hora de la planilla Excel 11-C. Considerando el tiempo de desfase con el LGR, se sincronizó la hora de acuerdo al reloj del LGR.
- b) Se asignó al primer dato de la planilla Excel del Arduino, la hora del LGR anotada al encender el instrumento
- c) Se ordenaron y cruzaron los datos de los diferentes instrumentos de tal forma que para cada segundo de vuelo se obtuvo un valor de presión,

temperatura, humedad, punto de rocío, concentración en número de partículas (n/L) y masa de MP 10, MP 2.5, MP 1 y MP 0.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

#### **4.6.3 Obtención de la altura a partir de los datos del Arduino**

- a) Una vez ordenados los datos en Excel, se reemplazó cada dato de presión por altura, calculada a través de la ley barométrica descrita en la ecuación *ec. 9* y en el ANEXO I.
- b) Una vez calculada la altura, se ratificó la concordancia entre el valor encontrado y el arrojado por el control del vehículo aéreo no tripulado, además del tiempo al cual se alcanzó la altura máxima.
- c) Finalmente se obtuvo un valor de presión, temperatura, humedad, punto de rocío, concentración en número de partículas (N/L) y masa de MP 10, MP 2.5, MP 1 y MP 0.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para cada altura de vuelo.

### **4.7 Procesamiento de datos**

Los datos obtenidos en las campañas de medición fueron procesados elaborando gráficos en los programas Origin, Excel y R-Studio, lo que permitió ilustrar el perfil vertical de las variables meteorológicas humedad relativa y temperatura, la concentración de aerosoles y su distribución de tamaño en superficie y en altura de cada vuelo.

#### **4.7.1 Modo de Vuelo**

Utilizando los datos de los vuelos 1 y 2 se construyeron perfiles verticales con el objetivo de determinar la metodología de vuelo y su repercusión en la obtención de información y presentación de ésta. Para esto se recuperaron los datos de los vuelos seleccionados y se siguió el siguiente método:

- a) Se crearon planillas “.csv” de Altura v/s Temperatura y Humedad relativa
- b) A partir del Software R-Studios se elaboró el perfil vertical de temperatura y humedad relativa de cada vuelo utilizando la línea de comandos que se detalla en el ANEXO II.

#### **4.7.2 Perfil vertical de Humedad relativa y Temperatura**

Se construyeron los perfiles de humedad relativa y temperatura con el objetivo de analizar el efecto de la temperatura en la humedad e identificar la estratificación atmosférica al comparar el perfil de temperatura con el perfil adiabático.

- a) Se recuperaron los datos de Altura, Temperatura, Punto de rocío y Humedad relativa para cada vuelo y se organizaron en Excel.
- b) Se determinó el perfil adiabático que describía las condiciones atmosféricas al comparar la temperatura ambiente con el punto de rocío para cada vuelo en todas las alturas.
- c) Se graficó Altura v/s Temperatura sobre el gradiente adiabático determinado anteriormente para cada vuelo.
- d) Se identificaron condiciones de estabilidad atmosférica al comparar el perfil vertical de temperatura con el gradiente adiabático respectivo y se destacaron en las zonas de inversión en los gráficos construidos.
- e) Se cuantificó el efecto de la temperatura sobre la humedad relativa por medio del análisis de covarianzas en Excel, utilizando la función “=COEF.DE.CORREL”.

### 4.7.3 Distribución de partículas en el perfil vertical

Se construyeron perfiles verticales de concentración de los diferentes vientos, con el objetivo de analizar el efecto de la temperatura y humedad relativa sobre la concentración de material particulado en altura.

- a) Se recuperaron los datos de concentración en masa ( $MP_1$ ,  $MP_{2.5}$  y  $MP_{10}$  en  $ug/m^3$ ) y en número de partículas ( $n/L$ ), seleccionando, a partir de un análisis de contribución porcentual, las cinco fracciones más importantes para efectos de presentar la información claramente.
- b) Se elaboraron planillas Excel de Altura v/s  $MP_1$ ,  $MP_{2.5}$  y  $MP_{10}$  y v/s concentración de partículas de tamaño o rangos de tamaños seleccionados.
- c) Haciendo uso de R-Studios y utilizando el paquete “Rcmdr” se importaron las planillas elaboradas y se graficaron los perfiles Temperatura, Humedad relativa y concentración de partículas en masa y número, utilizando la opción “XY conditional plot” que permite graficar múltiples variables dependientes y presentar varios gráficos juntos.
- d) Se destacaron las zonas de estabilidad identificadas anteriormente y se analizó visualmente el efecto de la estratificación atmosférica sobre la concentración de MP fino y grueso en el perfil vertical.
- e) Posteriormente utilizando Excel se calcularon los promedios de las diferentes zonas de estabilidad, obteniendo un valor de concentración por tamaño de partículas en las zonas de inestabilidad, neutralidad y estabilidad atmosférica.

- f) Por medio de la misma plataforma, se construyeron gráficos en barra destacando las zonas de inversión térmica y comparando los promedios de concentración de partículas por tamaño de las zonas de inestabilidad antes y después de las zonas de estabilidad atmosférica, con el objetivo de determinar la significancia de la inversión y su efecto sobre la concentración de partículas en altura.

#### **4.7.4 Distribución vertical de MP segregado por tamaño en altura**

- a) Se seleccionaron dos vuelos a partir de los cuales se tomaron los promedios de concentración por tamaño en número de partículas por litro en superficie (primeros metros de vuelo) y en altura, considerando como altura, la última zona de inestabilidad que se mide en cada vuelo analizado.
- b) Las concentraciones se ingresaron a una planilla Excel programada para calcular el  $dN/d\text{Log}D_p$ , que se muestra en el ANEXO III.
- c) Utilizando el programa Origin, se construyeron los gráficos de  $dN/d\text{Log}D_p$  v/s  $D_p$ , ingresando en el eje X los tamaños  $0.25 \mu\text{m} - 32 \mu\text{m}$  y en el eje Y, el promedio de concentraciones en  $n/L$  por tamaño en superficie y en altura. Se utilizó la opción “plot” – “line” - “Vertical Step”, para obtener un diagrama parecido al que entrega el Software GRIMM Windows 1178.
- d) Se compararon visualmente los resultados, considerando la diferencia en la contribución al  $n/L$  por tamaño de partículas.

#### **4.7.5 Caracterización del MP en altura y en superficie**

Se clasificó los aerosoles en superficie y en altura como monodispersos o plidispersos de acuerdo a la distribución vertical de MP segregado por tamaño a ambas alturas.

- a) Se calculó el CMD y  $\sigma_g$  por medio de una planilla Excel programada (ANEXO VI) lo que permitió caracterizar los aerosoles según el criterio establecido.

#### **4.8 Programas**

##### **i) Software GRIMM Windows 1178 (GmbH & Co.KG, 2016b)**

Programa asociado al monitor continuo de partículas 11-C. Permite observar la información en tiempo real con un intervalo mínimo de seis segundos como número de partículas, distribuciones de tamaño, masa y concentración, clasificándolas también por diámetro. Además, entrega la temperatura y humedad cada un minuto y construye gráficos de distribución logarítmica. También el software permite la obtención de datos a partir del almacenamiento de éstos en una tarjeta SD y exportación a Excel, además de la elaboración de los mismos gráficos y tablas que se construyen a partir de una medición en tiempo real.

##### **ii) Software RF Monitor (Newsteo Wireless Monitoring, 2016)**

Software que permite observar datos de temperatura, humedad y punto de rocío en tiempo real, en intervalos de un segundo, construyendo gráficos a partir de las mediciones registradas por el LGR32. Los datos se pueden exportar desde el RF Monitor a Excel facilitando el tratamiento y análisis de datos. A partir de este software se pueden

modificar tiempo de medición, intervalos de registro de datos y radiofrecuencia de transmisión.

**iii) SPSS (Universidad de Barcelona, 2005)**

Programa informático de uso sencillo, que permite realizar análisis estadísticos de acuerdo a la necesidad del usuario y construir gráficos y tablas representativas de los datos analizados. Entre las funciones del programa se encuentra: Análisis de estadística descriptiva básica univariante, contraste de hipótesis paramétricas y no paramétricas, especificación, estimación y evaluación de series de datos.

**iv) R Studio (RStudio, 2017)**

Es un Software de libre acceso que permite realizar análisis estadístico de cierto grupo de datos y también entrega opciones de construcción de gráficos de acuerdo a la necesidad del usuario; todo esto por programación a través de comandos.

**v) Origin (Origin, 2016)**

Software que permite análisis y gráfica de datos, ofreciendo una interface de fácil uso para principiantes y opciones más avanzadas para aquellos que están más familiarizados con el programa.

**vi) Excel (Microsoft Corporation, 2014)**

Herramienta de análisis automático y organización masiva de datos.



**vii) Software Arduino (Arduino Company, 2018)**

Es multiplataforma, compatible con sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux, además es de código abierto, de software y hardware extensible para programadores experimentados. Permite recuperar datos del Arduino en formato documento de texto.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSION**

### **5.1 Validación de la extensión de toma de muestras**

Con la finalidad de minimizar el efecto de las hélices en funcionamiento sobre el aire muestreado, surgió la necesidad de alejar el punto de colección de estos puntos donde la perturbación era significativa. De esta manera se seleccionaron diversos materiales de diversa longitud para utilizarlos como extensión de la toma de muestras y se realizaron pruebas para comparar los datos de mediciones realizados por el espectrómetro con extensión y sin extensión. Para determinar si existía una diferencia significativa en las concentraciones que se registraron en ambos escenarios, se realizó un análisis de comparación de medias y homogeneidad de varianzas (dispersión del conjunto de datos de cada muestra con respecto a la media).

Las pruebas para comprobar que la extensión de la toma de muestras no afectara la medición fueron realizadas siguiendo el método descrito en el punto 4.3, 4.4 y 4.5. Los resultados obtenidos del correspondiente tratamiento de datos se ilustran en las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11 para el material Teflón (2m), Silicona (2m), Tubo de aluminio (2m), Tubo de aluminio (70 cm) y un Blanco, respectivamente. Los números del 1 al 31 representan las diferentes fracciones de tamaño de partícula que mide el equipo (1 para la fracción más fina de 0.25  $\mu\text{m}$  y 31 para la fracción más gruesa de 32  $\mu\text{m}$ ); la interpretación de estos valores se detalla en el ANEXO V, donde se expresa el diámetro de partículas asociadas a cada número.

**Tabla 7.** Análisis estadístico para extensión de teflón (\*)

<b>TEFLON (2 metros)</b>			
	Prueba	Homogeneidad de varianzas	Comparación media
MP	1	<b>MP 1- MP 2,5- MP 10</b>	<b>MP 1</b>
	2	MP 1	NS
	3	MP 1- MP 2,5	NS
N° PARTICULAS (n/L)	1	4, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 17, 18	29, 30, 31
	2	<b>5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13</b>	<b>5, 6, 7, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	3	1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, <b>12, 15</b> , 18	<b>12, 15, 27, 28, 29, 30, 31</b>
MASA (ug/m <sup>3</sup> )	1	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 17, 18	29, 30, 31
	2	<b>5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15</b>	<b>5, 6, 7, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	3	1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13, <b>15</b>	<b>12, 15, 27, 28, 29, 30, 31</b>

(\*) En negrita, fracciones de aerosoles que no se ven perturbadas significativamente por el uso de la extensión, es decir, concentración media y homogeneidad de varianzas sin diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95% (valor  $p > 0.05$ ). NS, no hay igualdad significativa entre las fracciones (Elaboración propia).

**Tabla 8.** Análisis estadístico para una extensión de silicona (\*)

<b>SILICONA (2 metros)</b>			
	Prueba	Homogeneidad de varianzas	Comparación media
MP	1	NS	NS
	2	NS	MP 1
	3	MP 1	NS
N° PARTICULAS (n/L)	1	5, 7, 8, 9, 10, 11, <b>12</b> , 13, 15, 16	<b>12, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	2	3, 4, 5, 6, <b>7</b> , 8, 11, 12, 14	1, <b>7</b> , 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31
	3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, <b>11, 12</b> , 13, 14	<b>11, 12, 27, 28, 29, 30, 31</b>
MASA (ug/m <sup>3</sup> )	1	2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, <b>12</b> , 13, 15, 16	<b>12, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	2	<b>1, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 14</b>	<b>1, 7, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	3	1, 2, 3, 5, 6, 7, <b>11</b> , 12, 13, 14	<b>11, 27, 28, 29, 30, 31</b>

(\*) En negrita, fracciones de aerosoles que no se ven perturbadas significativamente por el uso de la extensión, es decir, concentración media y homogeneidad de varianzas sin diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95% (valor  $p > 0.05$ ). NS, no hay igualdad significativa entre las fracciones (Elaboración propia).

**Tabla 9.** Análisis estadístico para extensión de tubo de aluminio (\*)

<b>TUBO DE ALUMINIO (2 metros)</b>			
	Prueba	Homogeneidad de varianzas	Comparación media
MP	1	MP 1	NS
	2	MP 1	NS
	3	MP 1	- NS
N° PARTICULAS (n/L)	<b>1</b>	3, 5, 6, <b>8, 9, 10, 11, 12, 13</b> , 14, <b>15</b> , 17, 18	<b>8, 9, 10, 11, 12, 13, 15</b> , 16, 29, 30, 31
	2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, <b>13</b> , 14, 17, 18	<b>13</b> , 15, 27, 29, 30, 31
	<b>3</b>	<b>2, 3, 4, 6</b> , 7, 9, <b>11, 12, 13</b> , 14, 19	1, <b>2, 3, 4, 6, 11, 12, 13</b> , 29, 30, 31
MASA (ug/m <sup>3</sup> )	<b>1</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5</b> , 6, <b>8, 9, 10, 11, 12, 13</b> , 14, 15, 17, 18	<b>2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13</b> , 16, 29, 30, 31
	2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, <b>13</b> , 14	<b>13</b> , 15, 27, 29, 30, 31
	<b>3</b>	2, 3, 4, <b>6, 7, 11, 12, 13</b> , 14, 17, 19	<b>6, 11, 12, 13</b> , 29, 30, 31

(\*) En negrita, fracciones de aerosoles que no se ven perturbadas significativamente por el uso de la extensión, es decir, concentración media y homogeneidad de varianzas sin diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95% (valor  $p > 0.05$ ). NS, no hay igualdad significativa entre las fracciones (Elaboración propia).

**Tabla 10.** Análisis estadístico para extensión de tubo de aluminio (\*)

<b>TUBO DE ALUMINIO (70 centímetros)</b>			
	Prueba	Homogeneidad de varianzas	Comparación media
MP	1	MP 1- MP 2,5- MP 10	NS
	2	MP 1- MP 2,5- MP 10	NS
	<b>3</b>	<b>MP 1- MP 2,5- MP 10</b>	<b>MP 1</b>
N° PARTICULAS (n/L)	<b>1</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13</b> , 14, <b>15, 16, 17, 20, 21</b>	<b>1, 2, 11, 12, 13, 15, 16, 17</b> , 28, 29, 30, 31
	2	4, <b>5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15</b> , 17, <b>18, 19, 20</b>	<b>5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 15</b> , 16, <b>18, 19</b> , 23, 26, 27, 28, 29, 30, 31
	<b>3</b>	1, 2, 3, 4, 5, <b>6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14</b> , <b>15, 16</b> , 17, 18, 21, 22, <b>24</b>	<b>6, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 24</b> , 28, 29, 30, 31
MASA (ug/m <sup>3</sup> )	<b>1</b>	3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, <b>11, 12, 13</b> , 14, <b>15, 16, 17</b> , 20, 21	1, <b>11, 12, 13, 15, 16, 17</b> , 28, 29, 30, 31
	2	1, 2, 4, <b>5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15</b> , 17, <b>18, 19, 20</b>	<b>5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 15</b> , 16, <b>18, 19</b> , 23, 26, 27, 28, 29, 30, 31
	<b>3</b>	1, 3, 4, <b>5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15</b> , <b>16, 17, 18, 21, 22, 24</b>	<b>5, 6, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 24</b> , 28, 29, 30, 31

(\*) En negrita, fracciones de aerosoles que no se ven perturbadas significativamente por el uso de la extensión, es decir, concentración media y homogeneidad de varianzas sin diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95% (valor  $p > 0.05$ ). NS, no hay igualdad significativa entre las fracciones (Elaboración propia)..

**Tabla 11.** Análisis estadístico para el blanco (\*)

<b>BLANCO</b>			
	Prueba	Homogeneidad de varianzas	Comparación media
MP	<b>1</b>	<b>MP 1- MP 2,5</b>	<b>MP 2,5</b>
	<b>2</b>	<b>MP 1- MP 2,5- MP 10</b>	<b>MP 2,5</b>
	<b>3</b>	<b>MP 1- MP 2,5- MP 10</b>	<b>MP 1- MP 2,5</b>
N° PARTICULAS (n/L)	<b>1</b>	<b>1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 26</b>	<b>3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	<b>2</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 31</b>	<b>1, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	<b>3</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26</b>	<b>3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31</b>
MASA (ug/m <sup>3</sup> )	<b>1</b>	<b>1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 26</b>	<b>2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	<b>2</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 29</b>	<b>9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31</b>
	<b>3</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26</b>	<b>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31</b>

(\*) En negrita, fracciones de aerosoles que no se ven perturbadas significativamente por el uso de la extensión, es decir, concentración media y homogeneidad de varianzas sin diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95% (valor  $p > 0.05$ ). *NS*, no hay igualdad significativa entre las fracciones (Elaboración propia).

Como se observa en la Tabla 11, el blanco presenta diferencias estadísticamente significativas en algunas fracciones, lo que se explica por la metodología de medición, ya que, al medir 10 minutos con extensión y los siguientes 10 minutos sin extensión, el aire muestreado podría cambiar la concentración de partículas como consecuencia del aumento natural de corrientes de aire que, al erosionar el suelo, resuspenden partículas.

Es importante considerar este comportamiento en el blanco al analizar los resultados de las otras pruebas, tomando en cuenta que existe una desigualdad inherente a la medición,

lo que podría mejorar al muestrear simultáneamente con dos equipos. Por lo tanto, entre los diferentes materiales y extensiones probados se debe considerar válida la extensión de la toma de muestras que permita encontrar resultados similares a los obtenidos para la medición blanco.

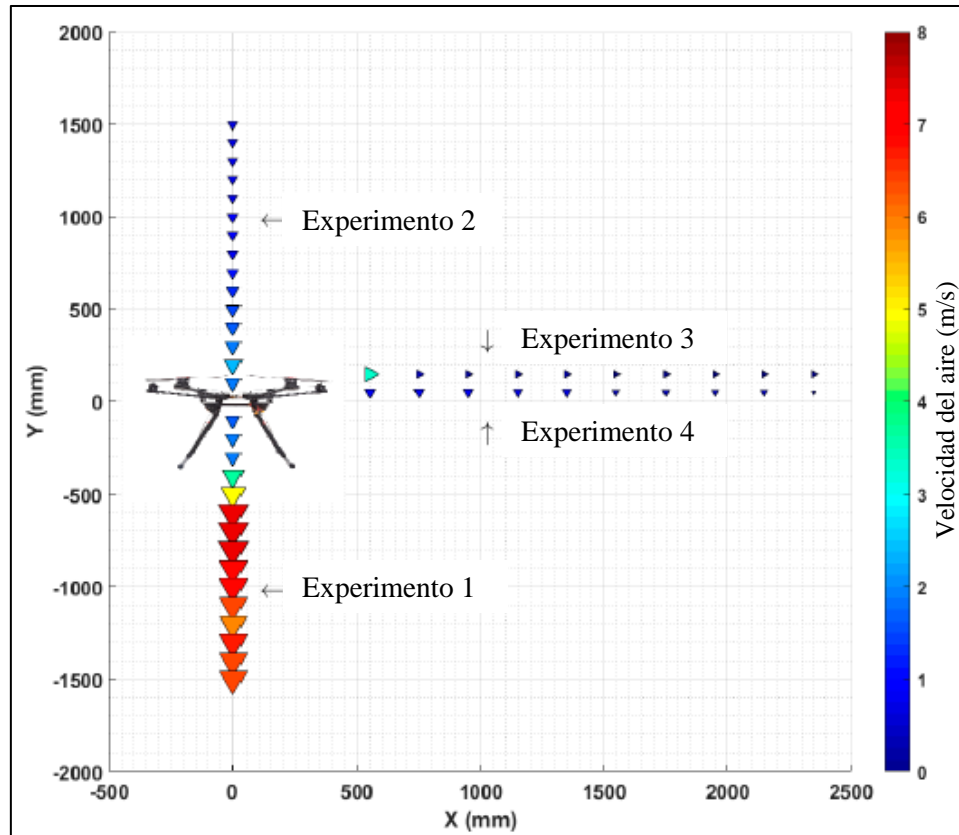
A partir de los resultados obtenidos se infiere que las extensiones de teflón y silicona retienen partículas en las paredes internas de las mangueras, lo que explica las diferencias estadísticamente significativas que presentaron la mayoría de las fracciones en las pruebas realizadas midiendo una menor concentración de partículas al utilizar las mangueras respecto de los datos obtenidos sin manguera.

Tal como se observa en las Tablas 9 y 10, si bien la adsorción de partículas en la extensión disminuyó al emplear el tubo de aluminio de dos metros de longitud, el material que presentó igualdad significativa para mayor cantidad de fracciones en las pruebas realizadas fue el tubo de aluminio de 70 centímetros de longitud, por lo cual se seleccionó este material y longitud como la extensión más apropiada para ser acoplada al espectrómetro de aerosoles portátil.

## **5.2 Diseño de la plataforma de medición**

### **5.2.1 Ubicación de los equipos, sensores y punto de colección de muestras**

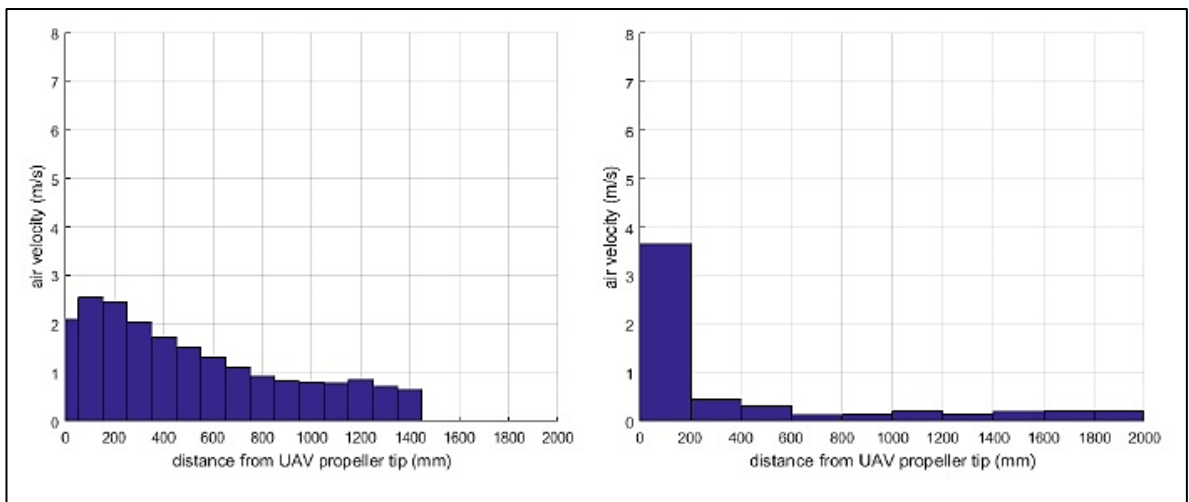
Con el objetivo de no desestabilizar el dron en vuelo, se decidió ubicar los instrumentos de medición justo por debajo del marco central de éste, en su centro de masa. Por otro lado, se seleccionó la ubicación de los sensores y de la toma de muestras de acuerdo con la literatura, donde se analizó el efecto de las hélices encendidas de un dron hexacóptero en la velocidad del aire en tres ejes (Villa y col., 2016), obteniéndose como uno de los resultados la imagen ilustrada en la Figura 15.



**Figura 15.** Resultados del estudio “Desarrollo y validación de un sistema UAV para mediciones de contaminación del aire”. Velocidad del viento en diferentes direcciones con las hélices del drone en funcionamiento (modificado de Villa y col., 2016)

En el artículo publicado por Tommaso Francesco Villa y col., 2016, el sistema diseñado busca cumplir el propósito de medir emisiones desde fuentes de combustión, por lo que se concluye que la toma de muestra debe estar dentro de la pluma y lejos de las hélices del drone, siendo la mejor forma de muestrear, instalar una extensión en dirección horizontal, 70 centímetros desde la punta de la hélice hacia el interior de la pluma. Sin embargo, para efectos de este estudio, considerando la longitud de las posibles extensiones de colección del espectrómetro 11-C (2 metros y 70 cm) y la distancia entre el centro del drone y la hélice (1.6 metros aproximadamente) se determinó que la mejor posición de muestreo era hacia arriba, en el eje Y positivo como se ilustra en el Experimento 2 de la Figura 15; ya que la velocidad del viento en el eje Y negativo, como muestra el Experimento 1, indicaría

una alta perturbación en las masas de aire por debajo del drone y direccionar la toma de muestras horizontalmente, como muestra el Experimento 3, significaría utilizar la extensión de dos metros de longitud que incrementa la adsorción de partículas en las paredes internas del tubo de aluminio y disponer el punto final de muestreo entre 0 y 40 centímetros de la hélice, donde la velocidad del viento puede alcanzar casi los 4 m/s, como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16.** Resultados del estudio “Desarrollo y validación de un sistema UAV para mediciones de contaminación del aire”. Medición de la velocidad del aire mediante un anemómetro estándar profesional (a) Velocidad del viento en el eje Y positivo, distancia cero corresponde al centro del drone. (b) Velocidad del viento en el eje X positivo, distancia cero corresponde a la punta de la hélice, a 50 cm del centro del drone (modificado de Villa y col., 2016).

De esta manera, la validación, el análisis de la literatura y la factibilidad de instalación permitieron determinar que la mejor ubicación del punto de colección de aire del espectrómetro es a 70 centímetros por sobre el drone, minimizando de esta manera el efecto de las hélices en la velocidad del viento y la adsorción de partículas en las paredes internas de la extensión de la toma de muestras.



### 5.2.2 Construcción de la plataforma para instrumentos de medición

De acuerdo con los resultados obtenidos y la literatura, se instalaron los equipos en el centro del dron como se observa en la Figura 17, ubicando la toma de muestras del espectrómetro a 70 centímetros por sobre las hélices de la aeronave. Para los sensores se construyó una extensión como soporte con un tubo de fibra de carbono y un protector de cubiertas plásticas, simulando un protector de estación meteorológica, tal como se observa en la Figura 18, lo que permitió proteger los sensores de la incidencia directa del sol. Los sensores se fijaron a este soporte mediante abrazaderas plásticas y se aseguraron mediante un sistema de vientos para evitar la vibración de la estructura.

En las Figuras 17 y 18, se ilustra el modelo seleccionado como el más apropiado para conservar la estabilización del dron, disminuir el efecto de adsorción de partículas en la extensión y minimizar la interferencia en las mediciones consecuencia de la perturbación del aire adyacente a las hélices en funcionamiento.



**Figura 17.** Plataforma de soporte de instrumentos de medición (Elaboración propia).



**Figura 18.** Plataforma de medición definitiva (Elaboración propia)

Se logró construir la plataforma de medición, equipándola con el espectrómetro portátil de aerosoles 11-C, sensores de humedad relativa y temperatura, LGR y sensores de presión y temperatura, Arduino; cumpliendo el primer objetivo de este seminario.

### 5.3 Medición de perfiles verticales

Las mediciones en altura se realizaron a partir de cinco vuelos con el objetivo de analizar el modo de vuelo y la variación vertical del material particulado respecto a las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa. En la Tabla 12 se muestran en detalle las características de los vuelos realizados y la hora de medición.

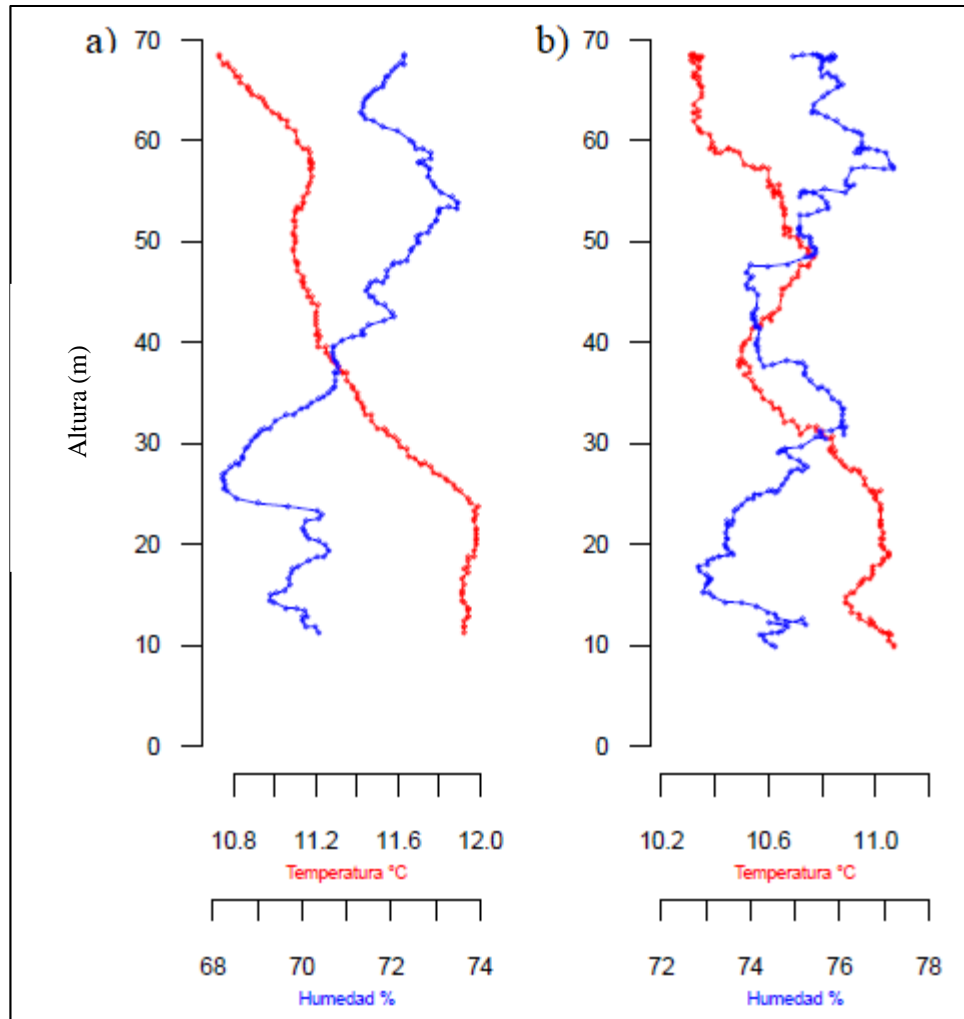
**Tabla 12.** Campañas de medición efectuadas en Campus Antumapu, Universidad de Chile

Fechas	Modo de vuelo	Intervalo de altura (m)	Hora de Medición	Nombre del Vuelo
04-08-2017	Ascenso	10 – 70	13:13:30 – 13:17:08	VUELO 1
	Descenso	70 – 10	13:17:08 – 13:20:46	VUELO 2
25-08-2017	Ascenso	10 – 120	14:51:45 – 14:56:49	VUELO 3
	Ascenso	10 – 120	14:59:29 – 15:04:15	VUELO 4
	Ascenso	10 – 200	16:01:43 – 16:10:40	VUELO 5

#### 5.3.1 Modo de Vuelo

Durante la primera campaña de medición, realizada el día 04 de agosto, se efectuaron vuelos utilizando dos metodologías diferentes de barrido vertical: registrando datos en ascenso y en descenso a una velocidad aproximada de 0,3 m/s, para analizar el efecto de la perturbación del aire agitado por las hélices en la lectura de los sensores de temperatura y humedad relativa.

Esta información fue procesada obteniéndose como resultado los perfiles verticales que se muestran en la Figura 19.



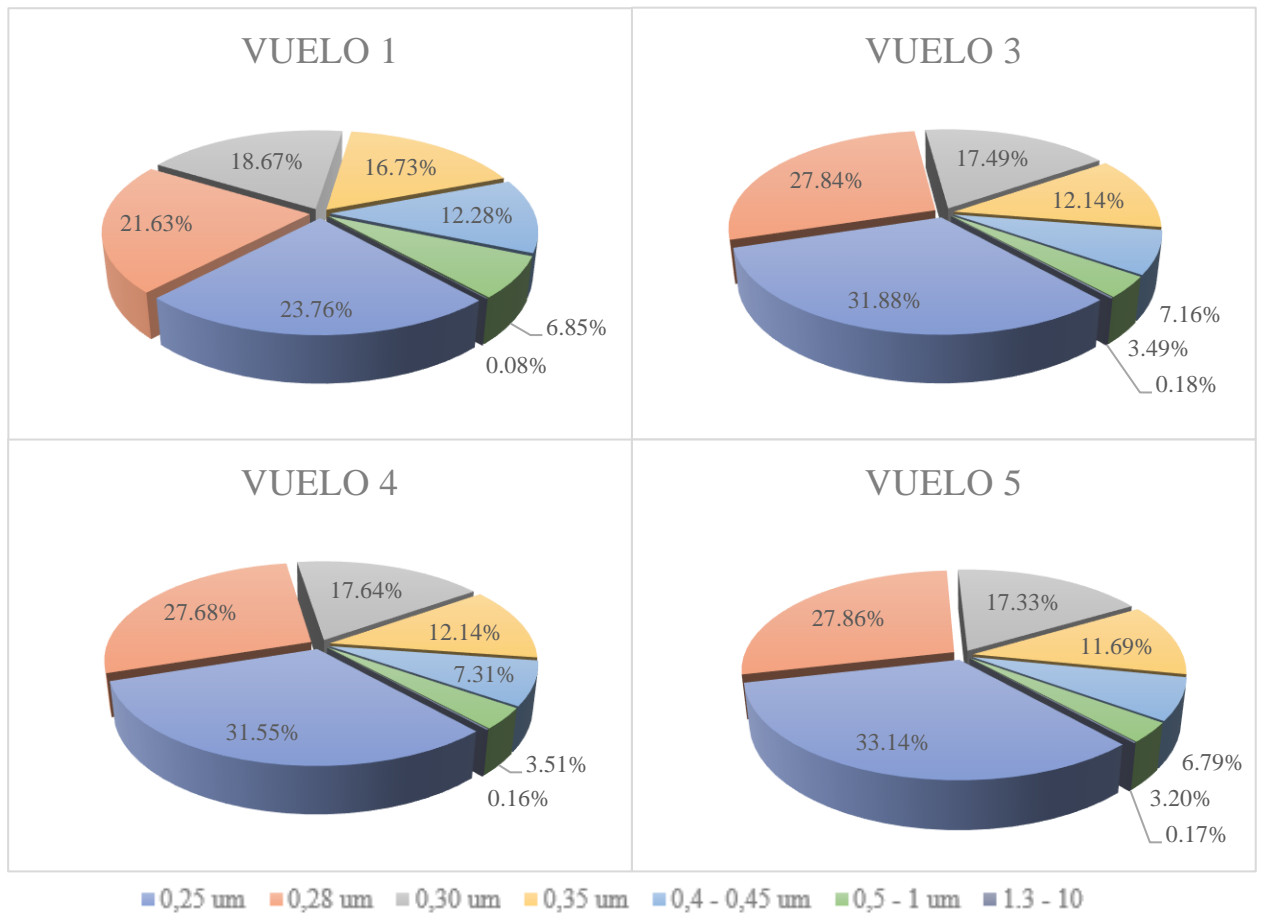
**Figura 19.** Perfiles verticales correspondientes a la campaña de medición del 04 de agosto del 2017, prueba metodología de vuelo para el muestreo en altura. a) Registro de datos en **ascenso**, VUELO 1 y b) Registro de datos en **descenso**, VUELO 2 (Elaboración propia).

Como se observa en el Figura 19 a), el perfil construido a partir de los datos registrados durante el ascenso de la aeronave presenta un comportamiento regular, experimentando una variación libre de ruido en temperatura y humedad relativa que permite identificar zonas de estabilidad atmosférica. Por otro lado, el perfil obtenido a partir de la lectura de datos en descenso muestra una serie de saltos en temperatura y humedad en tiempos continuos de registro, dibujándose una señal ruidosa no reproducible.

Al considerar la posición de los sensores, 70 centímetros por sobre el drone y el flujo de aire turbulento hacia abajo que provocan las hélices para mantener la nave en vuelo, se infiere que la explicación al “ruido” en los registros de la Figura 19 *b*) se debe a los flujos turbulentos asociados a la perturbación del aire agitado por las hélices. Por este motivo, las mediciones en descenso se consideran erráticas e irreproducibles y se concluye que el modo de vuelo apropiado para obtener resultados reproducibles, minimizando el efecto de la turbulencia generada por las hélices del drone sobre las mediciones en altura es un vuelo en ascenso continuo a velocidad constante (0,3 m/s).

### **5.3.2 Abundancia relativa de partículas en el perfil vertical**

Para construir los perfiles verticales y presentar gráficamente la variación de la concentración de material particulado en altura, se utilizó la concentración de partículas en masa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), agrupando las fracciones en  $\text{MP}_1$ ,  $\text{MP}_{2.5}$  y  $\text{MP}_{10}$ , y la concentración en número de partículas (n/L) para las fracciones más finas. Lo anterior debido que al analizar los datos colectados desde el espectrómetro de aerosoles 11-C en los cuatro vuelos seleccionados, se encontró que la mayor contribución porcentual al número de partículas por litro está asociada a las fracciones más finas, como se observa en la Figura 20.



**Figura 20.** Contribución porcentual promedio de distintas fracciones finas a la concentración de partículas en n/L para los cuatro vuelos seleccionados (Elaboración propia).

Como se aprecia en la Figura 20, las fracciones más finas son las que contribuyen en mayor porcentaje a la concentración en número (n/L), siendo las partículas de diámetro óptico entre 0.25 μm y 0.35 μm, las que superan el 80 o 90% del total de partículas muestreadas en los cuatro vuelos seleccionados. Por esta razón, y con el objetivo de presentar de mejor manera la información y los resultados en altura, se seleccionaron cuatro fracciones individuales de tamaño de partículas (0.25 μm, 0.28 μm, 0.30 μm, y 0.35 μm de diámetro) y dos rangos de tamaños agrupados entre 0.40-0.45 μm y 0.5-1.00 μm.

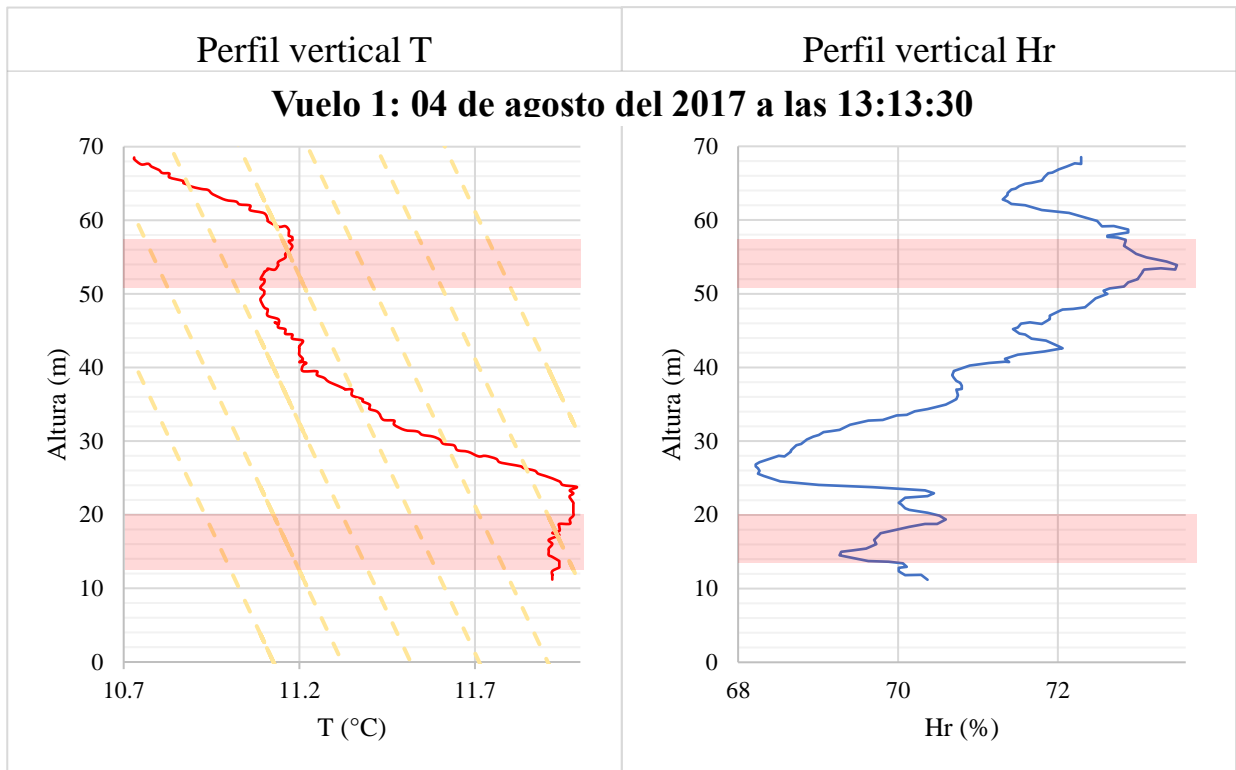
Este intervalo de tamaños ( $<1.00 \mu\text{m}$ ) concentra más del 99.5% del total de partículas registradas para cada vuelo.

A partir de los datos registrados a través de los instrumentos: temperatura, presión barométrica, humedad relativa y la correspondiente variación de la concentración de material particulado en altura, se construyeron los perfiles verticales de los vuelos 1, 3, 4 y 5.

### **5.3.3 Análisis de variables meteorológicas en altura**

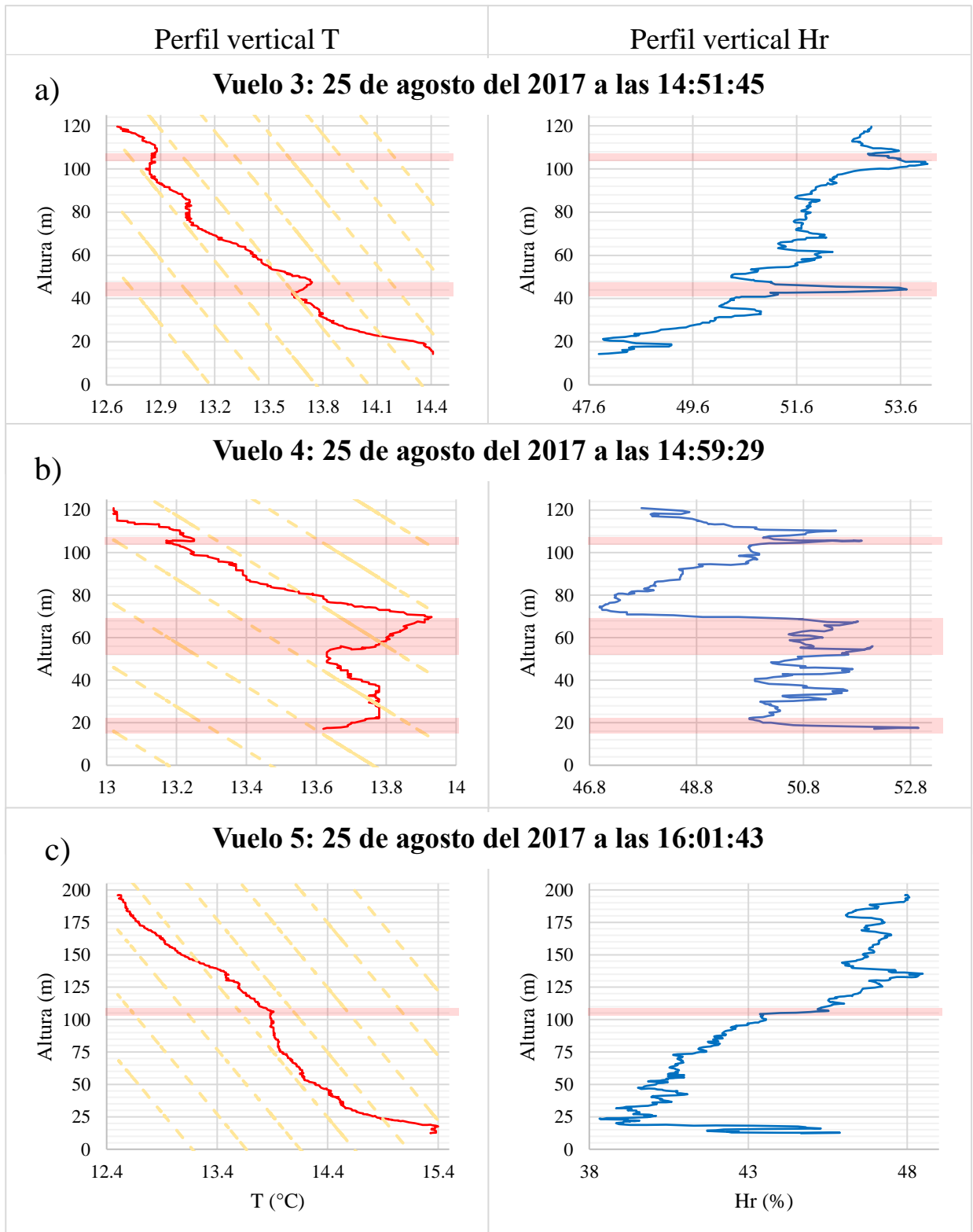
En las figuras 21 y 22 *a*), *b*) y *c*) se muestran los perfiles verticales de temperatura (rojo) y humedad relativa (azul) obtenidos a partir de los datos registrados en altura para el Vuelo 1 realizado el día 4 de agosto y los vuelos 3, 4 y 5 del día 25 de agosto respectivamente. En ellas se destacan las zonas de estabilidad atmosférica, que permiten describir la dinámica vertical desarrollada en cada vuelo.

Al analizar los datos de temperatura obtenidos a través de los sensores del LGR-32 y compararlos con el punto de rocío, se encontró que la temperatura ambiente fue mayor en los cuatro vuelos y en todas las mediciones sin excepciones, lo que implica que el gradiente adiabático seco o perfil adiabático seco (PAS) es el que mejor describe la dinámica atmosférica en cada vuelo y permite distinguir las zonas de estabilidad en el perfil, establecidas según el cambio de temperatura y su comparación con el gradiente adiabático seco.



**Figura 21.** En rojo, perfil vertical de Temperatura (T) y en azul, Humedad relativa (Hr). En línea segmentada, gradiente adiabático seco. Zonas destacadas en rojo, zonas de estabilidad atmosférica (Elaboración propia).





**Figura 22.** En rojo, perfil vertical de Temperatura (T) y en azul, Humedad relativa (Hr). En línea segmentada, gradiente adiabático seco. Zonas destacadas en rojo, zonas de estabilidad atmosférica (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en los cuatro vuelos seleccionados, los perfiles verticales presentan amplias diferencias debido a que las características del perfil están determinadas por las condiciones de vuelo específicas bajo las cuales se desarrollaron las mediciones. Se debe destacar que los Vuelos 3, 4 y 5 se realizaron el mismo día a diferentes horas, por lo cual su análisis muestra la evolución del perfil vertical en el tiempo.

Las condiciones ambientales desarrolladas durante el Vuelo 1, realizado el viernes 4 de agosto del año 2017 (Figura 21), se caracterizaban por una densa nubosidad y baja temperatura, lo que explica que los rangos de temperatura se encontraran entre  $10,73^{\circ}\text{C}$  y  $11,99^{\circ}\text{C}$  y de humedad relativa entre 68,22% y 73,49%.

Como se aprecia en la Figura 21 en los primeros 15 metros de altura aproximadamente, se observa una condición de neutralidad en la atmósfera seguida por un aumento de la temperatura ( $0,07^{\circ}\text{C}$ ) que provoca una inversión térmica o condición de estabilidad atmosférica entre los 15 y 20 metros de altura, donde la pendiente es positiva para la temperatura ambiente, lo que teóricamente, limitaría el transporte vertical de los aerosoles.

A partir de los 25 metros de altura y hasta los 50, se observa una disminución de la temperatura con una pendiente menor al gradiente adiabático seco, lo que representa una condición de inestabilidad atmosférica, donde la mezcla de aerosoles es homogénea y, por ende, el transporte vertical no se vería limitado. En los siguientes 6-8 metros la atmósfera se comporta de una manera estable, aumentando su temperatura en  $0,08^{\circ}\text{C}$  y en los últimos 10 metros se desarrollan nuevamente condiciones de inestabilidad atmosférica.

Los vuelos 3, 4 y 5, efectuados el día 25 de agosto del 2017 (Figura 22 *a*), *b*) y *c*) respectivamente), las condiciones ambientales fueron distintas a las que se desarrollaron

el día 4 de agosto, lo que explica el hecho de que la variación de temperatura durante los Vuelos 3, 4 y 5 fluctuara entre 12,66 °C y 15,40 °C y la humedad relativa entre 38,32 % y 54,12 %. En más detalle, durante el Vuelo 3 había nubosidad que se disipó parcialmente al terminar el vuelo, lo que significa que al momento de realizar el Vuelo 4, las condiciones ambientales habían cambiado. Al comenzar las mediciones del Vuelo 5, la nubosidad se disipó totalmente, por lo que los registros corresponden a los de un día despejado.

Desde el perfil vertical obtenido a partir de los datos registrados en el Vuelo 3, en la Figura 22 a), se pueden identificar dos intervalos de altura donde se desarrollan condiciones de estabilidad atmosférica, entre los 42 y 47 metros, donde la variación de temperatura fue 0,1°C y entre los 105 y 108 metros, donde fue 0,02°C. Las condiciones de inestabilidad en este vuelo se observan entre los 11 y los 42 metros de altura, desde los 47 a los 77 metros de altura y entre los 108 y 120 metros de altura; entre los 85 y 105 metros de altura, la atmósfera se muestra neutra con algunos puntos donde la temperatura desciende. Finalmente, ente los 77 y 85 metros de altura, la atmósfera se comporta de manera neutra.

A partir de los datos registrados en el Vuelo 4, ejecutado alrededor de 8 minutos después de comenzado el Vuelo 3, se construyó el perfil vertical de las condiciones meteorológicas ilustrado en la Figura 22 b) y se logró identificar en primera instancia, la aparición de una inversión térmica entre los 17 y 23 metros de altura, que no se observó en el Vuelo 3, esta condición de estabilidad, producida por un aumento en la temperatura de 0,16 °C, se explica por el calentamiento de la superficie y el movimiento vertical de la masa de aire en contacto con ella por diferencia de temperatura entre la parcela de aire caliente y el ambiente.

Otro fenómeno de inversión térmica se puede observar entre los 53 y los 69 metros de altura, donde la variación de temperatura alcanza los  $0,29^{\circ}\text{C}$ . Esta inversión sería la misma que se percibió en el Vuelo 3 entre los 42 y 47 metros de altura, lo que se explica por la evolución de las condiciones ambientales, que provocarían el rompimiento de la estabilidad atmosférica al aumentar la incidencia solar en la superficie y por ende la temperatura de las masas de aire subyacentes, permitiendo el transporte vertical de los gases y aerosoles. Finalmente se puede observar que la inversión térmica entre 104 y 105 metros de altura, que registra una variación de  $0,07^{\circ}\text{C}$ , permanece constante en los Vuelos 3 y 4, aumentando sólo la magnitud de la variación de temperatura.

En el Vuelo 5 (Figura 22 *c*)), se aprecia el desarrollo de una condición de inestabilidad en casi la totalidad del perfil vertical, sin embargo, entre los 17 - 20, los 31 - 39 y entre los 79 - 103 metros de altura se observa una atmósfera neutra que presenta sólo un evento de inversión térmica a los 103-106 metros de altura, donde la temperatura aumenta en  $0,03^{\circ}\text{C}$ .

Cuando la atmósfera es neutra, la pendiente de la curva de temperatura ambiente es igual a la pendiente del gradiente adiabático seco ( $\Gamma_{seco} = m$ ). Cuando la atmósfera es estable, la pendiente de la curva de temperatura ambiente es mayor a la pendiente del gradiente adiabático seco ( $\Gamma_{seco} < m$ ). Finalmente, cuando la atmósfera es inestable, la pendiente de la curva es menor que la del gradiente adiabático seco ( $\Gamma_{seco} > m$ ).

Las inversiones identificadas son clasificadas como inversiones de superficie, puesto que se deben a cambios de temperatura de las masas de aire a nivel local, lo que se infiere de la altura a la cual se generan y de la evolución del perfil con el cambio de nubosidad en los vuelos 3, 4 y 5. Por otro lado, la inversión térmica de subsidencia producida por el

anticiclón del pacífico se produce alrededor de los 600 metros de altura, como se especificó en la introducción.

La humedad relativa, que según la literatura depende directamente de la temperatura del ambiente, corresponde a la relación de presión de vapor de agua sobre la presión en equilibrio, representando el porcentaje de saturación de la atmósfera (Lazaridis, 2011). A partir de los datos registrados en los distintos vuelos, se cuantificó el efecto de la temperatura sobre la humedad relativa por medio del análisis de covarianza, que permitió encontrar un coeficiente de correlación negativa de -0.767, -0.908 y -0.799 para los vuelos 1, 3 y 5 respectivamente y 0.226 para el vuelo 4. El signo negativo en el coeficiente de correlación indica una proporcionalidad inversa entre las pendientes de las variables medidas, una correlación negativa perfecta estaría dada por el valor -1.

El coeficiente de correlación positivo encontrado para el Vuelo 4, es una excepción que se debe a que los datos encontrados en la humedad relativa conforman una señal ruidosa con fluctuaciones que impiden calcular una pendiente representativa que pueda correlacionarse correctamente con la temperatura

En la Tabla 13, se presenta el resumen de las condiciones de estabilidad identificadas para los Vuelos 1, 3, 4 y 5.

**Tabla 13.** Resumen condiciones de estabilidad atmosférica para los cuatro vuelos (\*)

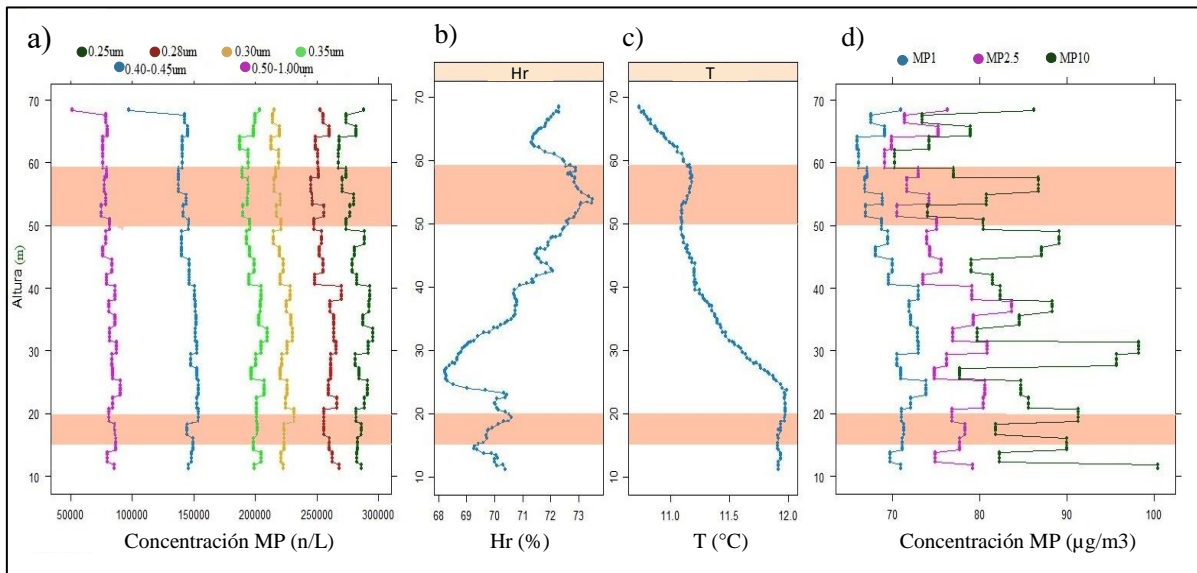
Vuelo	Altura (m)	Condición de estabilidad	$\Delta T$ (°C)
1	11 – 15	Neutra	
	15 - 20	Estable	0,07
	25 - 50	Inestable	
	50 - 58	Estable	0,08
	60- 70	Inestable	
3	11 - 42	Inestable	
	42 - 47	Estabilidad	0,1
	47 – 77	Inestabilidad	
	77 - 85	Neutra	
	85 - 105	Neutra-Inestable	
	105 - 108	Estable	0,02
	108 – 120	Inestable	
4	17 - 23	Estable	0,16
	23 - 37	Neutra	
	37 – 50	Inestable	
	50 – 53	Neutra	
	53 – 69	Estable	0,29
	69 – 104	Inestable	
	104 – 105	Estable	0,07
	105 – 120	Inestable	
5	12 – 17	Neutra - Inestable	
	17 – 31	Inestable	
	31 - 39	Neutra - Inestable	
	40 – 79	Inestable	
	79 – 103	Neutra	
	103 – 106	Estable	0,03
	106 – 200	Inestable	

(\*) Calculado a partir de la diferencia de temperatura entre mediciones consecutivas  
(Elaboración propia)

### 5.3.4 Concentración de material particulado en el perfil vertical

Con respecto a la concentración de material particulado en altura, en las Figuras 23, 24, 25 y 26 se ilustra el perfil vertical de temperatura, humedad relativa y concentración de material particulado, expresado en número de partículas por litro de aire muestreado para las fracciones de tamaño entre 0.25  $\mu\text{m}$  y 1.00  $\mu\text{m}$  de diámetro y en masa como microgramos por metro cúbico de aire muestreado para las fracciones MP<sub>1</sub>, MP<sub>2.5</sub> y MP<sub>10</sub> para los vuelos 1, 3, 4 y 5. En ellas se destacan los sectores donde se producen condiciones de estabilidad, con lo cual se describe el efecto que tiene en la distribución vertical de MP, la estratificación atmosférica.

Vuelo 1: 04 de agosto del 2017 a las 13:13:30 (\*)



**Figura 23.** Perfil vertical de *a)* Concentración de MP en n/L, *b)* Temperatura (T), *c)* Humedad relativa (Hr) y *d)* Concentración de MP en masa  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . (\*) Zonas de estabilidad destacadas en rojo (Elaboración propia).

Tomando en consideración los resultados de la Figura 23 *a)* en el Vuelo 1, se aprecia que la variación del número de partículas finas por litro en el perfil vertical no se ve afectado de manera significativa por la estratificación atmosférica cuya base de inversión se encontró a los 15 metros de altura, esto se traduce en una distribución constante de

concentración en altura para los rangos de tamaño de partículas seleccionados antes y después de esa zona de estabilidad. Este comportamiento también se observa en las mediciones de MP en masa  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 23 *d*)), donde no se aprecian cambios significativos en la concentración de MP<sub>1</sub>, MP<sub>2.5</sub> y MP<sub>10</sub> antes y después de la primera inversión. Con respecto a la zona de estabilidad ubicada entre los 50 y 60 metros de altura, se encontró una disminución en los valores de concentración en n/L y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , los que corresponden a los mínimos de todas las mediciones y para todos los tamaños. De este modo se observa que la segunda zona de estabilidad atmosférica registrada durante el Vuelo 1 condiciona el transporte vertical de MP en número y masa en altura al provocar una disminución en la concentración de los rangos de tamaños seleccionados.

Los rangos de concentración en número de partículas y masa para el Vuelo 1 se encuentran aproximadamente entre 50.000 n/L – 300.000 n/L y 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, por sobre los rangos encontrados en los vuelos 3, 4 y 5. Esto tiene su fundamento en las condiciones bajo las cuales se desarrollaron las mediciones. La temperatura durante el Vuelo 1 era más bien baja y había gran nubosidad, estas características ambientales provocan el enfriamiento de la superficie, la cual al encontrarse a una menor temperatura actúa como una trampa de aerosoles, que son arrastrados por convección hacia abajo.

Por otra parte, si se considera el efecto del anticiclón del pacífico (70% de los días de invierno), se podría inferir que las mediciones están influenciadas por una inversión de altura que impide la circulación de los aerosoles fuera de la cuenca de Santiago, por lo que el movimiento y transporte vertical del material particulado se verían disminuidos por la estratificación atmosférica, explicándose la diferencia en los valores de concentración



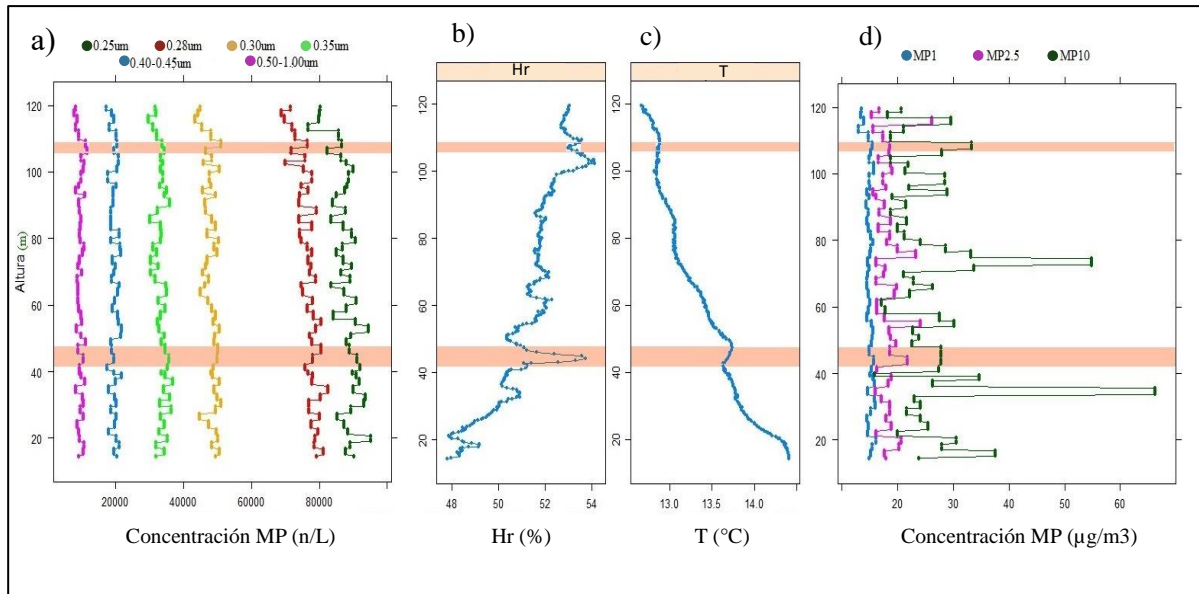
registrados en que las variables meteorológicas desarrolladas durante el Vuelo 1 intensifican el fenómeno del anticiclón.

En las Figuras 24, 25 y 26 se muestran los perfiles verticales de los vuelos 3, 4 y 5, realizados el día 25 de agosto del 2017, para los cuales se debe prestar especial atención a los rangos de concentración en los cuales se encuentran las escalas de los gráficos contruidos, ya que partir de ello se puede interpretar el efecto que tienen las condiciones ambientales en las mediciones de concentración de acuerdo con la evolución de las variables meteorológicas, considerando que los registros fueron tomados de manera consecutiva.

En los Vuelos 3, 4 y 5 las concentraciones en número de partículas varían en rangos aproximados de 10.000-100.000 n/L, 10.000-90.000 n/L y 5.000-45.000 n/L y en masa entre 10-70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 10-35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 5-15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, disminuyendo ambas considerablemente. Esto tiene su explicación en la evolución de las condiciones ambientales durante las mediciones: incremento en la temperatura y disipación de nubosidad. El aumento de la incidencia del sol en la superficie debido a la disipación de la nubosidad y el incremento de temperatura permiten la ruptura de la estratificación atmosférica en el tiempo de medición, lo cual se observa en los perfiles de temperatura de los vuelos consecutivos 3, 4 y 5; esto se traduce en el aumento del transporte vertical de partículas en forma de aerosoles y, por ende, en la mezcla homogénea de la atmósfera.

En la Figura 24, se ilustra el perfil vertical de Temperatura, Humedad relativa y Concentración de material particulado para el Vuelo 3.

### Vuelo 3: 25 de agosto del 2017 a las 14:51:45



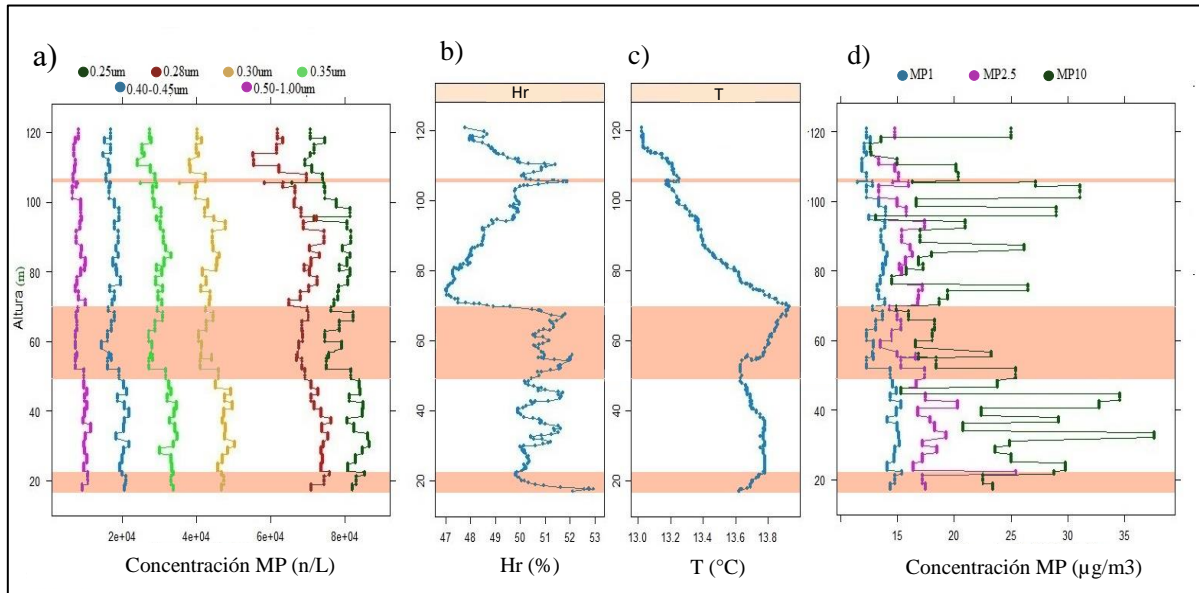
**Figura 24.** Perfil vertical de *a*) Concentración de MP en n/L, *b*) Temperatura (T), *c*) Humedad relativa (Hr) y *d*) Concentración de MP en masa  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . (\*) Zonas de estabilidad destacadas en rojo (Elaboración propia).

Al observar los resultados ilustrados en la Figura 24 *a*) y 24 *d*) en el perfil vertical de concentración para el Vuelo 3, se aprecia que la primera zona de estabilidad (entre los 42 y los 47 metros de altura) no afecta significativamente ni la concentración en masa para las fracciones  $\text{MP}_1$  y  $\text{MP}_{2.5}$ , ni la concentración en número de partículas finas de diámetros entre  $0.25 \mu\text{m}$  y  $1.00 \mu\text{m}$  en el perfil vertical, ya que las mediciones antes, durante y después de esta zona poseen fluctuaciones mínimas que no parecen estar influenciadas por la zona de estabilidad. Sin embargo, la fracción más gruesa de material particulado en masa,  $\text{MP}_{10}$  (Figura 24 *d*)), es la que se ve mayormente afectada por la primera inversión térmica observándose una disminución en las concentraciones mínimas y máximas medidas luego del tope de la inversión, a los 47 metros de altura. Con respecto a la inversión térmica que se encontró entre los 105 y 108 metros de altura se aprecia una influencia significativa sobre todos los tamaños y rangos de tamaños de MP analizados,

provocando una disminución considerable en las concentraciones tanto en número de partículas como en masa sobre el tope de la inversión.

En la Figura 25, se ilustra el perfil vertical de Temperatura, Humedad relativa y Concentración de material particulado para el Vuelo 4.

**Vuelo 4: 25 de agosto del 2017 a las 14:59:29**



**Figura 25.** Perfil vertical de *a*) Concentración de MP en n/L, *b*) Temperatura (T), *c*) Humedad relativa (Hr) y *d*) Concentración de MP en masa  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . (\*) Zonas de estabilidad destacadas en rojo (Elaboración propia).

En la Figura 25, se ilustra el perfil vertical de concentración en número de partículas (25 *a*) y en masa (25 *d*)), Temperatura y Humedad relativa del Vuelo 4, en el cual se puede observar que la concentración de MP en número de partículas y en masa para todos los tamaños y rangos de tamaños seleccionados excepto para el MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>, experimenta cambios insignificantes dentro de la primera zona de estabilidad, ubicada entre los 17 y 23 metros de altura y después de ella, es decir, esta inversión no conforma un limitante en el movimiento vertical del material particulado fino en los primeros 50 metros de altura para las fracciones mencionadas.

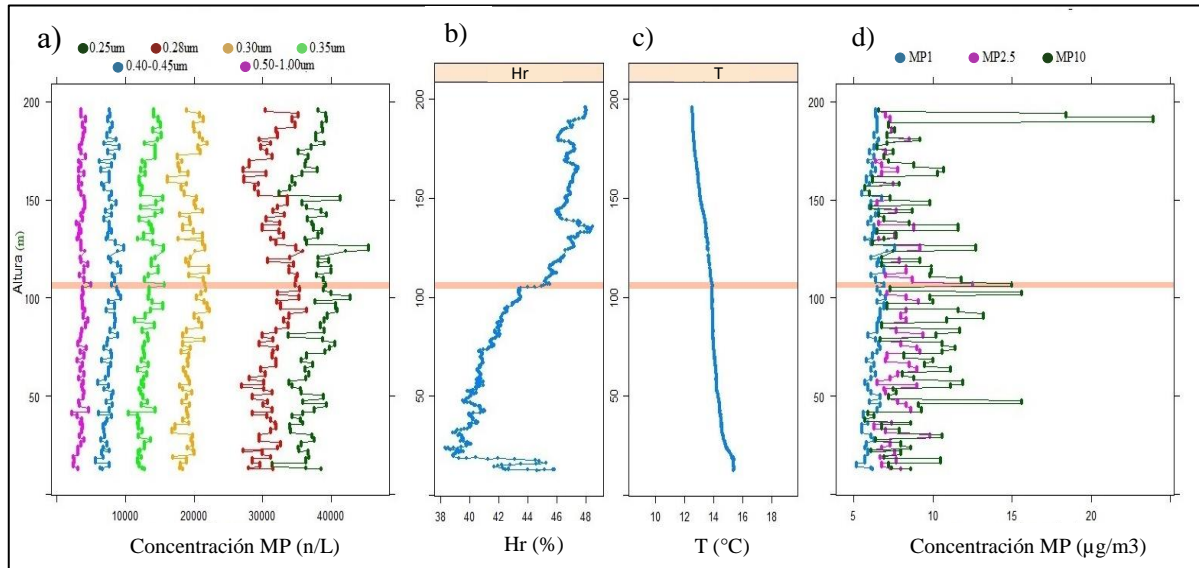
Por su parte, la concentración en masa de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  aumenta sobre el tope de la inversión (Figura 25 *d*).

En la segunda zona de estabilidad ubicada entre los 53 y 69 metros de altura (Figura 25 *c*)), se observa una disminución en la concentración de todos los tamaños y rangos de tamaños de partículas a partir de la base de la inversión tanto en número de partículas como en masa. La concentración en n/L no experimenta cambios significativos dentro de la zona de estabilidad para todos los tamaños seleccionados. Entre el tope de la segunda y la base de la tercera inversión, a los 104 metros de altura, se aprecia un incremento en la concentración de las fracciones de tamaños entre  $0.25\ \mu\text{m}$  y  $0.35\ \mu\text{m}$ , lo cual continúa con la disminución de la concentración de partículas del rango mencionado. A partir de allí la reducción en la concentración se produce en mayor magnitud. Por otra parte, la concentración en masa disminuye considerablemente para las tres fracciones analizadas, las cuales continúan reduciendo su concentración dentro de la zona de estabilidad. A partir del tope de la segunda inversión se observa una mezcla homogénea que permanece constante hasta la base de la tercera inversión, a los 104 metros de altura, donde nuevamente se aprecia la influencia del aumento de temperatura en la reducción considerable de la concentración en masa de las tres fracciones de MP seleccionadas.

La estratificación atmosférica desarrollada en el Vuelo 4 limita el desplazamiento vertical de los aerosoles, especialmente la inversión térmica que tiene su base en los 53 metros de altura, donde se aprecia una disminución considerable en el número de partículas por litro de todos los tamaños seleccionados y en la concentración en masa de  $MP_1$ ,  $MP_{2.5}$  y  $MP_{10}$ .

En la Figura 26, se ilustra el perfil vertical de Temperatura, Humedad relativa y Concentración de material particulado para el Vuelo 5.

### Vuelo 5: 25 de agosto del 2017 a las 16:01:43



**Figura 26.** Perfil vertical de *a*) Concentración de MP en n/L, *b*) Temperatura (T), *c*) Humedad relativa (Hr) y *d*) Concentración de MP en masa  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . (\*) Zonas de estabilidad destacadas en rojo (Elaboración propia).

A partir de la Figura 26 *c*), se puede observar que el perfil vertical de temperatura permitiría clasificar la atmosfera como completamente inestable, si no fuera por la pequeña inversión que se identificó entre los 103 y 106 metros de altura. Si la condición de inestabilidad es la que predomina en el perfil, se esperaría que tanto la concentración de material particulado tanto en masa (Figura 26 *d*)) como en número de partículas (Figura 26 *a*)) se encontrara homogéneamente distribuida en el perfil vertical, que es lo que se observa en el Vuelo 5, donde el número de partículas por litro para las partículas de diámetro mayor o igual a  $0.30 \mu\text{m}$  y la masa de  $\text{MP}_{10}$  y  $\text{MP}_{2.5}$  sufren cambios insignificantes en altura (Figura 26 *a*)). Visualmente, la concentración en número de partículas para aerosoles de diámetro menor a  $0.30 \mu\text{m}$  muestra cambios en mayor magnitud, sin embargo, al comparar la escala de los ejes X en las Figuras 23, 24, 25 y 26 *a*), se tiene que la magnitud del cambio en la concentración en número de partículas para el Vuelo 5 es menor que para los demás vuelos seleccionados.

Este mismo efecto se puede apreciar en la gráfica del perfil vertical de concentración de MP en masa, especialmente para el MP<sub>10</sub> (Figura 26 *d*).

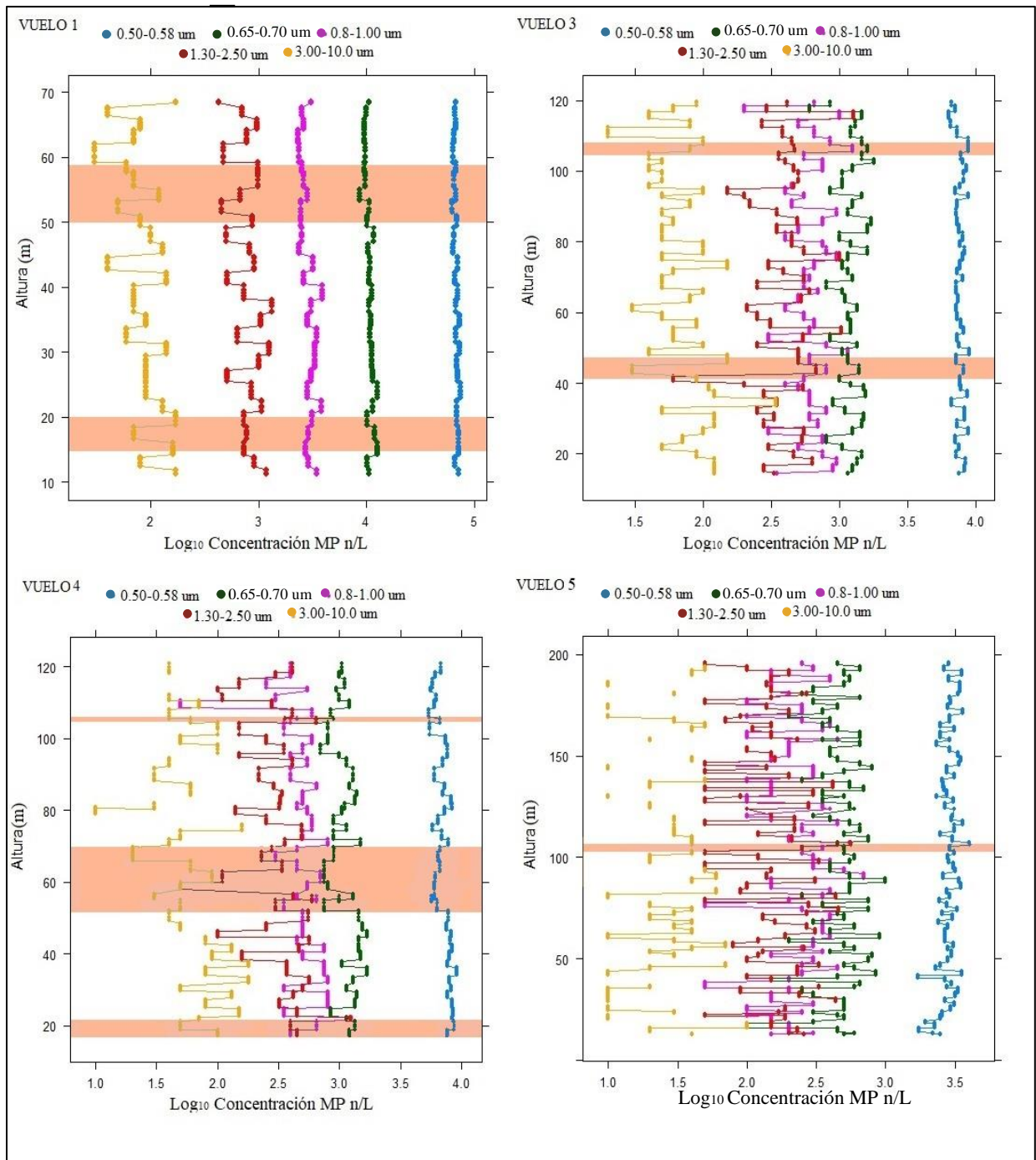
Con respecto al perfil vertical de concentración en masa para el Vuelo 5, se puede apreciar que las tres fracciones seleccionadas se encuentran distribuidas de manera más uniforme que en los demás vuelos, salvo por un pequeño aumento en la concentración que corresponde a un punto de acumulación coincidente con la base de la inversión, la cual limita el movimiento vertical de los aerosoles, produciendo el aumento de las tres fracciones en esa zona para luego volver a mezclarse homogéneamente.

En general, las inversiones térmicas registradas en los distintos vuelos producen una disminución de las concentraciones de MP entre la base y el tope de la inversión, lo cual puede explicarse por la acumulación de partículas que se produce justo por debajo de la base de la inversión térmica como resultado de la ausencia de mezclado vertical en dichas zonas de la atmósfera. Si bien se encontraron variaciones en la concentración de las distintas fracciones de MP, no todas ellas están determinadas por las zonas de estabilidad detectadas.

Expuesto ya lo que ocurre con las partículas más finas, que son las que poseen mayor abundancia relativa, es necesario ilustrar el comportamiento de las fracciones entre 0.5 y 10  $\mu\text{m}$  de diámetro para analizar el efecto de la estratificación atmosférica sobre las partículas más gruesas. El MP fue agrupado en rangos de tamaños de acuerdo al número de partículas por litro encontrado para ajustar las diferentes fracciones de tamaño a la misma escala en una figura. De esta manera, los intervalos seleccionados fueron: 0.5 - 0.58, 0.65 - 0.70, 0.8 - 1.00, 1.30 - 2.5 y 3.00 - 10.0  $\mu\text{m}$  de diámetro. Se utilizó una escala logarítmica en el eje de las abscisas debido a la diferencia en la magnitud de los valores,

lo que permite presentar de una manera más clara las mediciones que se encuentran entre 10 y 100.000 partículas por litro.

En la Figura 27 se observa el perfil vertical de concentración en número de partículas por litro de material particulado entre 0.5 y 10  $\mu\text{m}$  de diámetro para los vuelos 1, 3, 4 y 5, destacando las zonas de estabilidad atmosférica.



**Figura 27.** Perfil vertical de concentración de MP 0.5 – 10.0  $\mu\text{m}$  en n/L para los Vuelos 1, 3, 4 y 5. (\*) Zonas de estabilidad destacadas en rojo (Elaboración propia).



Para en Vuelo 1 se puede apreciar que el transporte vertical de las fracciones de 0.5 - 0.7  $\mu\text{m}$  no se ve influenciado por las zonas de estabilidad encontradas en el perfil vertical, sin embargo la concentración de partículas cuyo diámetro es mayor a 0.8  $\mu\text{m}$  muestra un decrecimiento que se vuelve más importante a medida que aumenta el rango de tamaños considerado; esto se traduce en que las concentraciones de las partículas de diámetro mayor a 1.30  $\mu\text{m}$  muestran cambios importantes que pueden ser atribuidos a la estratificación atmosférica.

La estratificación de la atmósfera en el Vuelo 1 conforma un limitante en el transporte vertical de MP de diámetro mayor a 0.8  $\mu\text{m}$ .

En el Vuelo 3, se repite el comportamiento, observándose una mayor variación en las partículas de mayor diámetro, sin embargo, la variación en la concentración de MP sólo puede ser atribuida a la estratificación atmosférica en el caso de las partículas cuyo diámetro es mayor a 1.30  $\mu\text{m}$ , donde se aprecia una clara disminución en el número de partículas luego de las zonas de estabilidad.

En el Vuelo 4, se puede apreciar que la variación en la concentración de partículas se produce para todos los rangos de tamaños seleccionados en la Figura 27, atribuyéndose la mayor limitante a la inversión térmica ubicada entre 53 y 69 metros de altura. Las fracciones más gruesas (mayor a 0.8  $\mu\text{m}$ ) son las más influenciadas por el cambio de temperatura, encontrándose incluso valores nulos para las partículas cuyo diámetro se encuentra entre 3.00  $\mu\text{m}$  y 10.0  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Finalmente, en el Vuelo 5 se puede apreciar variaciones significantes en la concentración de MP, sin embargo, éstas no se pueden atribuir a la inversión térmica encontrada entre los 103 y 106 metros de altura.

Nuevamente para esta distribución se encontró que las partículas de mayor tamaño disminuyen en número con la altura, en mayor magnitud las que poseen diámetros a partir de los 1.30  $\mu\text{m}$ . En el caso de las partículas de diámetro mayor a 3.00  $\mu\text{m}$ , se observa un aumento de las mediciones nulas para la concentración, esto no puede atribuirse únicamente a la inversión térmica, también se debe considerar que el vuelo 5 se desarrolló hasta una altura de 200 metros, por lo que es comparable con las demás mediciones hasta los 120 metros.

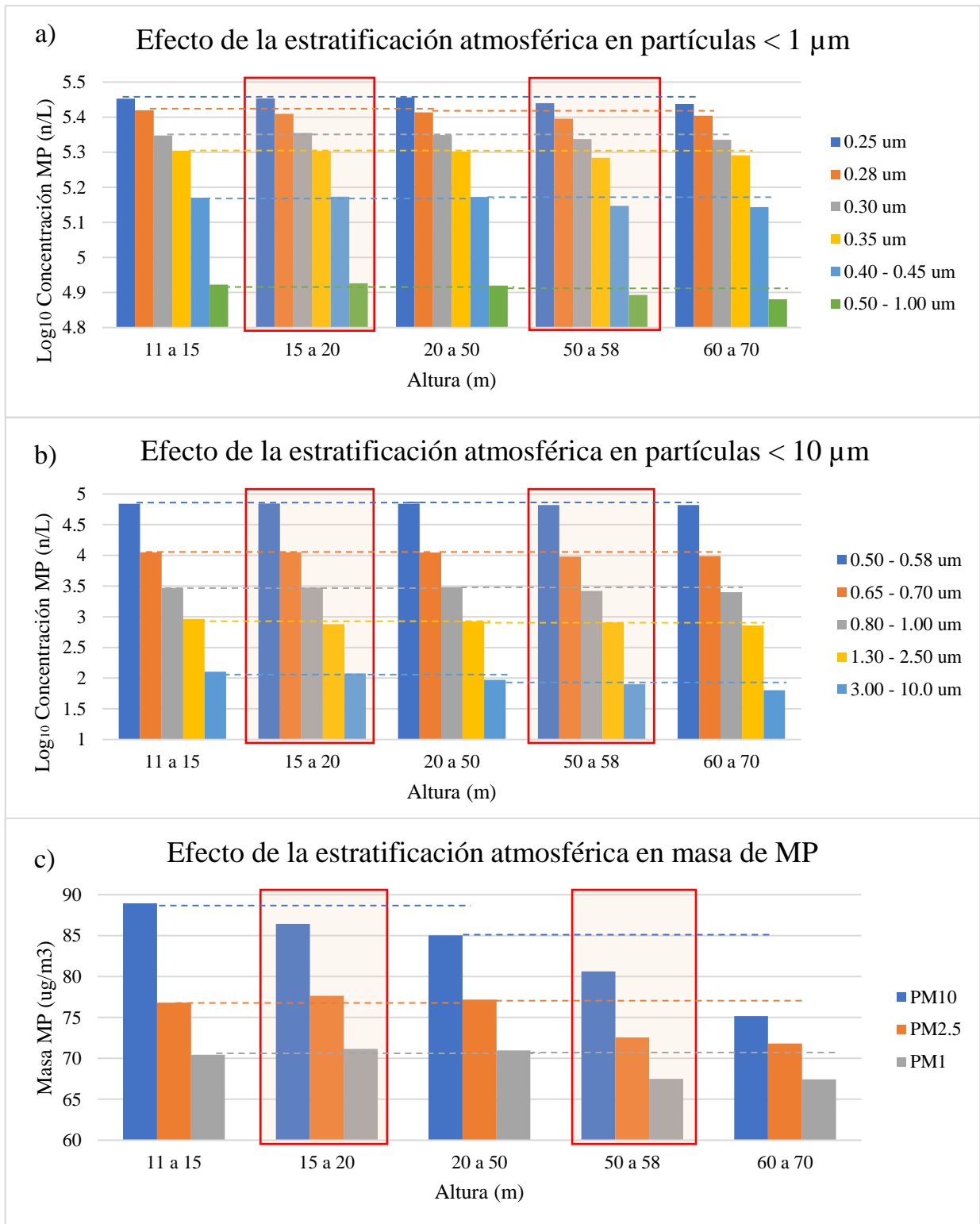
Las variaciones en la concentración de MP para todas las fracciones consideradas en el Vuelo 5, sufren cambios insignificantes antes y después de la zona de estabilidad. Los cambios en la concentración pueden ser atribuidos al tamaño de la partícula, que determina su tiempo de vida en la atmosfera, ya que el perfil en general es inestable y permite el desplazamiento vertical de los aerosoles.

En síntesis, la Figura 27 se puede apreciar que las fracciones más gruesas se encuentran mayormente influenciadas por la estratificación atmosférica, lo que se evidencia claramente para las fracciones de tamaño mayor a 0.8  $\mu\text{m}$  en los 4 vuelos. Este efecto se desarrolla en mayor magnitud en el rango de tamaños 3.00  $\mu\text{m}$  – 10.0  $\mu\text{m}$ , donde la disminución del número de partículas luego de las zonas de estabilidad o el aumento de mediciones de concentraciones nulas representa el efecto de las inversiones sobre el transporte vertical de las fracciones de MP cuyo diámetro es mayor a 1.00  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento, que también se observa en el rango de tamaños 1.30  $\mu\text{m}$  - 2.50  $\mu\text{m}$ , pero

en menor magnitud, permite inferir que las fracciones más finas, cuyo desplazamiento vertical no se ve estrictamente limitado por la estratificación atmosférica, aumentan su abundancia relativa en altura, al desaparecer o disminuir en gran magnitud las partículas de diámetro mayor a  $1.00\ \mu\text{m}$ .

### **5.3.5 Efecto de la estratificación atmosférica sobre la concentración en el perfil vertical**

A modo de resumen, en la Figura 28, 29, 30 y 31 *a*), *b*) y *c*) se presenta gráficamente el efecto de la estratificación atmosférica en la concentración de material particulado segregado por tamaño en número de partículas y masa, para los vuelos 1, 3, 4 y 5 respectivamente; destacándose las zonas de estabilidad (cuadro rojo) y las zonas de neutralidad (cuadro amarillo) atmosférica. Estas ilustraciones permiten una mejor interpretación de los datos, mostrando directamente como una zona de estabilidad atmosférica afecta la concentración de partículas ( $n/L$ ) para los tamaños y rangos de tamaños seleccionados, siendo posible comparar el número de partículas antes y después de una inversión térmica a través de la proyección de líneas punteadas para cada tamaño.

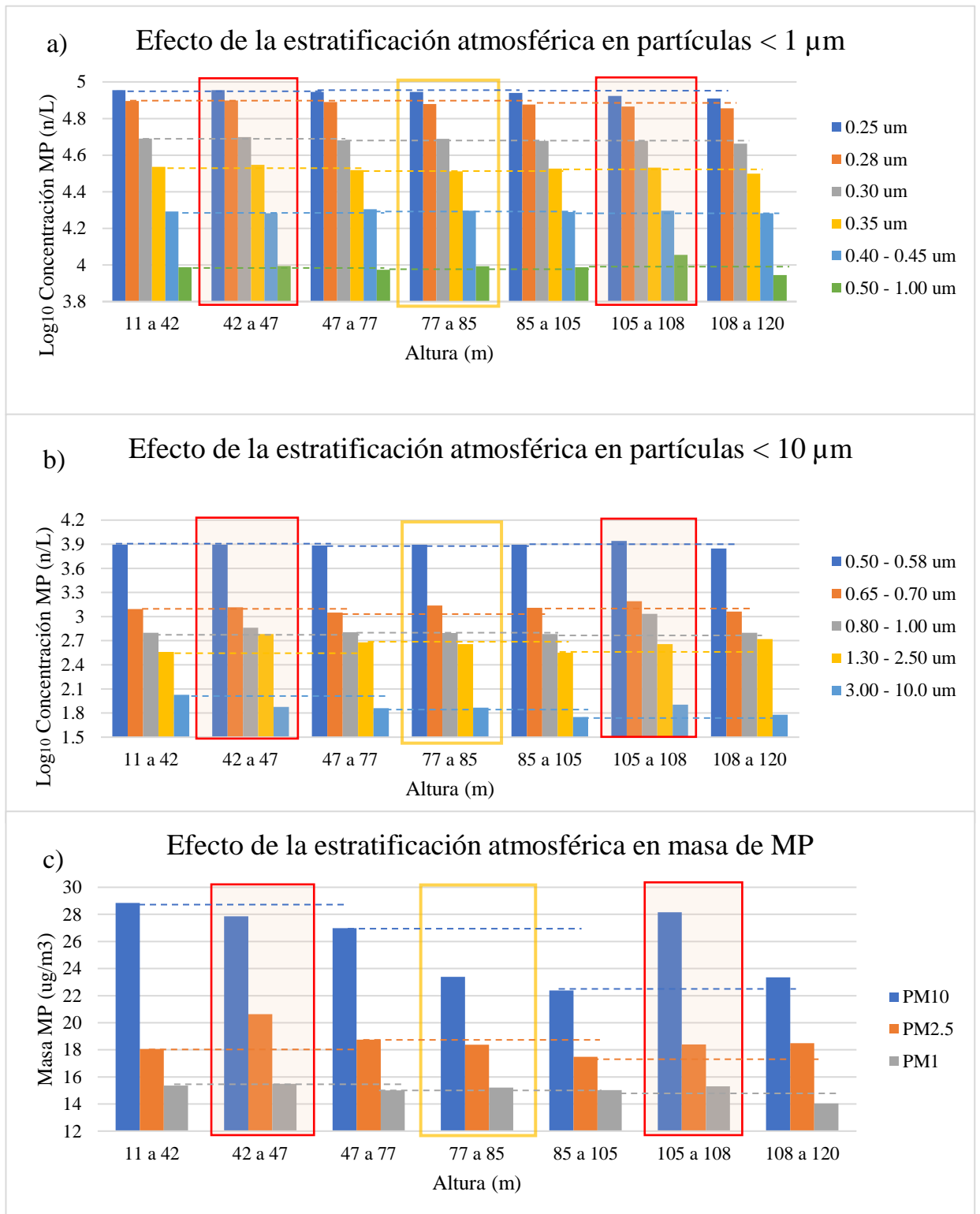


**Figura 28.** Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño. a) Número de partículas de diámetros menores a 0.5 μm, b) Número de partículas de diámetro entre 0.5 μm y 10 μm, c) Masa de MP en microgramos. (\*) Cuadro rojo representa zona de estabilidad atmosférica y las líneas segregadas, la proyección de la concentración partículas (Elaboración propia).

En las Figuras 28 *a)* y *b)* se aprecia que la primera zona de estabilidad no produce cambios significativos en el número de partículas cuyo diámetro es menor a  $2.50\ \mu\text{m}$  ni en la masa de MP 2.5 y MP 1 antes y después de la inversión térmica ubicada entre los 15 y 20 metros de altura. El rango de partículas cuyo diámetro fluctúa entre  $3.00\ \mu\text{m}$  y  $10.0\ \mu\text{m}$  muestra una disminución significativa en  $n/L$  luego del tope de la primera inversión en conjunto con el MP 10 en masa, siendo esta fracción la que sufre cambios mayores, como se ilustra en la Figura 28 *c)* a través de las líneas segregadas azules.

Con respecto a la segunda zona de inversión térmica, ubicada entre los 50 y 58 metros de altura, el efecto se observa en gran magnitud sobre las partículas cuyo diámetro se encuentran en los rangos de tamaño desde los  $0.40\ \mu\text{m}$  y hasta los  $10\ \mu\text{m}$ , incrementándose a medida que el tamaño del rango de partículas aumenta. En este caso se debe prestar especial atención a las escalas del eje Y en las Figuras 28 *a)* y 28 *b)*, lo que permite inferir que los cambios en el número de partículas para las fracciones de tamaño  $< 10\ \mu\text{m}$  es mayor que los efectos de la estratificación sobre las partículas de diámetro  $< 1.00\ \mu\text{m}$ .

Este efecto también se observa en todas las fracciones de MP en masa, las partículas disminuyen su concentración significativamente antes y después de a segunda inversión, evento que se ilustra de forma clara en las proyecciones de las líneas segregadas en la Figura 28 *c)*.



**Figura 29.** Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño. a) Número de partículas de diámetros menores a 0.5 μm, b) Número de partículas de diámetro entre 0.5 μm y 10 μm, c) Masa de MP en microgramos. (\*) Cuadro rojo representa zona de estabilidad atmosférica, cuadro amarillo, zona de neutralidad y las líneas segregadas, la proyección de la concentración partículas (Elaboración propia).

La primera zona de estabilidad encontrada en el Vuelo 3, entre 42 y 47 metros de altura, sólo afecta el número de partículas cuyo tamaño se encuentra en el rango más grande de MP, con un diámetro entre 3.00 -10.0  $\mu\text{m}$ . Este efecto no se aprecia en los rangos de menor tamaño e incluso existen fracciones que aumentaron su concentración, como es el caso de las partículas de diámetro entre 1.30 y 2.50  $\mu\text{m}$ . Con respecto a la concentración en masa, la primera inversión tiene efectos de mayor magnitud en la fracción más gruesa, como se ilustra en le Figura 29 c), la concentración de MP 10 antes es mucho mayor que la medida luego de la zona de estabilidad atmosférica. Este mismo comportamiento se observa en menor magnitud sobre el material particulado fino MP<sub>1</sub>, mientras que el MP<sub>2.5</sub> aumentó su concentración al compararlo con la altura de mezcla antes de la primera inversión. Se debe mencionar que la concentración de MP<sub>2.5</sub> dentro de la zona de estabilidad es mayor a la que se encuentra sobre el tope de la inversión, lo que se puede explicar por el efecto de acumulación de aerosoles atribuido a la limitación del desplazamiento vertical producto del aumento de temperatura. Este mismo evento se produjo en la concentración en n/L para el rango de tamaños de partículas cuyo diámetro se encuentra entre 1.30  $\mu\text{m}$  – 2.50  $\mu\text{m}$  de la primera inversión.

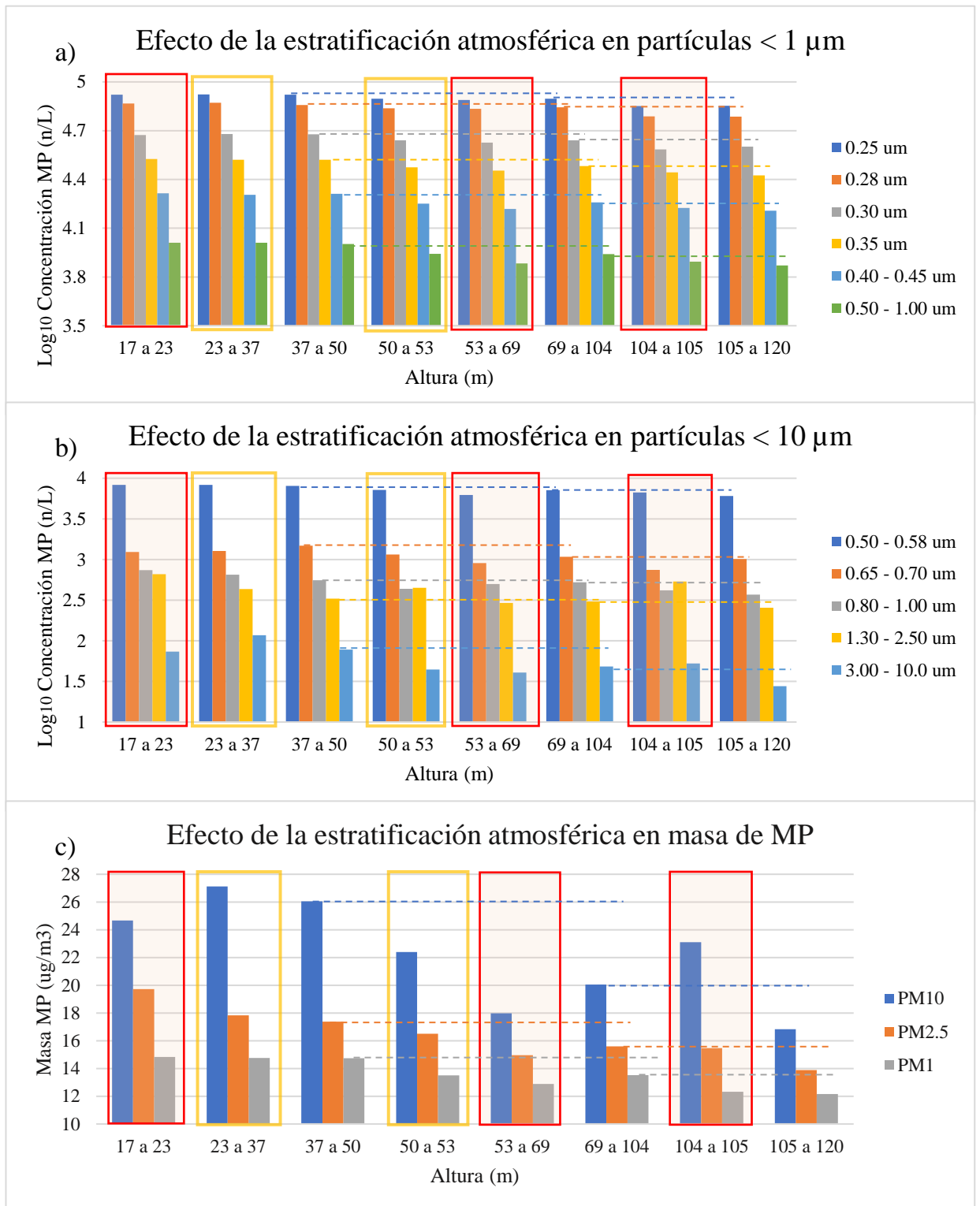
Con respecto a la segunda zona de estabilidad ubicada entre 105 y 108 metros de altura, se puede apreciar que existe una disminución mínima de la concentración de MP en número de partículas para todas las fracciones de diámetro menor a 1.00  $\mu\text{m}$ , cambiando en mayor magnitud el rango de partículas de diámetro entre 0.50  $\mu\text{m}$  y 1.00  $\mu\text{m}$ . La variación en la concentración de las partículas de diámetro entre 0.50  $\mu\text{m}$  y 10.0  $\mu\text{m}$  es insignificante, excepto para el rango de tamaños entre 1.30  $\mu\text{m}$  - 2.50  $\mu\text{m}$  y entre 3.00  $\mu\text{m}$  - 10.0  $\mu\text{m}$ , donde se aprecia el aumento en el número de partículas después de la inversión.

Con respecto a la concentración en masa, a simple vista se observa un aumento de las fracciones más gruesas MP 10 y MP 2.5 y una disminución de la fracción más fina MP 1, lo que se puede explicar considerando que la comparación se hizo con las mediciones entre los 85 y 105 metros de altura, excluyendo los valores de la zona de neutralidad; lo cual podría cambiar si se utiliza el promedio de las mediciones entre los 47 y los 105 metros de altura; esto mostraría la disminución del MP en masa luego de la inversión.

Por otro lado, se debe destacar que el aumento en la concentración en masa de MP después de la inversión, se ve antecedida por un aumento en la concentración dentro de la zona de estabilidad.

La dinámica atmosférica que se desarrolló durante el Vuelo 3 fue en un contexto de alta nubosidad que se disipó parcialmente al terminar el vuelo, lo que significa que al momento de realizar el Vuelo 4, las condiciones ambientales habían cambiado. Al comenzar las mediciones del Vuelo 5, la nubosidad se disipó totalmente, por lo que los registros corresponden a los de un día despejado.



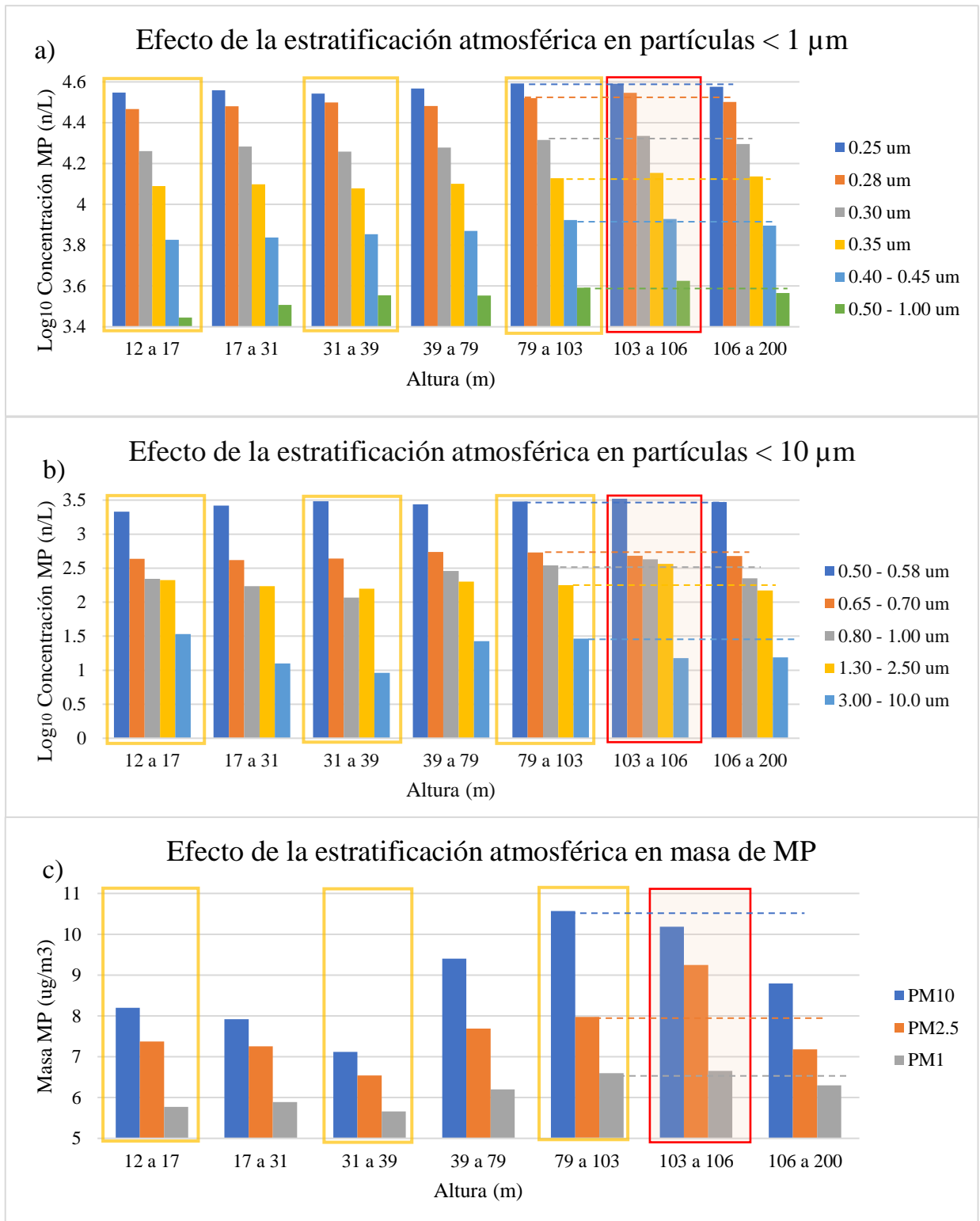


**Figura 30.** Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño. a) Número de partículas de diámetros menores a  $0.5 \mu\text{m}$ , b) Número de partículas de diámetro entre  $0.5 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$ , c) Masa de MP en microgramos. (\*) Cuadro rojo representa zona de estabilidad atmosférica, cuadro amarillo, zona de neutralidad y las líneas segregadas, la proyección de la concentración partículas (Elaboración propia).

En Vuelo 4, las inversiones identificadas entre 53 y 69 metros de altura y entre 104 y 105 metros de altura se pueden considerar limitantes del desplazamiento vertical de MP en todos los rangos de tamaños, produciendo ambos, efectos de similar magnitud. Como se ilustra en la Figura 30 *a)* y 30 *b)*, todas las fracciones disminuyen considerablemente su número de partículas antes y después de las zonas de estabilidad. Nuevamente las fracciones de mayor tamaño muestran una mayor magnitud en el cambio de concentración si se considera la diferencia de escala entre los ejes de las ordenadas en las Figuras 30 *a)* y *b)*.

Con respecto a la concentración de MP en masa, en la Figura 30 *c)* se muestra la estratificación atmosférica también afecta las fracciones MP 10, MP 2.5 y MP 1 en las alturas de 53 – 69 metros y 104 – 105 metros, siendo la primera inversión la que genera cambios en mayor magnitud en masa. Las partículas más grandes son las que contribuyen en mayor porcentaje a la masa de la muestra, y son estas mismas las que se ven afectadas por la estratificación vertical en mayor magnitud. Esto fundamenta el hecho de que se el MP<sub>10</sub> en masa, la fracción que sufre el cambio en mayor magnitud.

Durante este vuelo las condiciones ambientales cambiaron, disipándose la nubosidad parcialmente, por lo que la inversión ubicada entre los 42 y 47 metros de altura en el Vuelo 3 se desplazó verticalmente hasta los 53 metros de altura, por el calentamiento de la superficie al aumentar la incidencia solar. Esta inversión es la que posee mayor diferencia de temperatura entre la base y el tope en comparación al resto de los vuelos, esto explicaría la mayor magnitud en el efecto sobre la concentración de MP en n/L y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el Vuelo 4.



**Figura 31.** Efecto de la estratificación atmosférica sobre el MP segregado por tamaño. a) Número de partículas de diámetros menores a 0.5  $\mu\text{m}$ , b) Número de partículas de diámetro entre 0.5  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$ , c) Masa de MP en microgramos. (\*) Cuadro rojo representa zona de estabilidad atmosférica, cuadro amarillo, zona de neutralidad y las líneas segregadas, la proyección de la concentración partículas (Elaboración propia).

La estratificación vertical desarrollada durante el Vuelo 5, se produjo en un momento en que se disipó totalmente la nubosidad, por lo que la inversión encontrada entre los 53 y 69 metros de altura durante el Vuelo 4 se rompió con el aumento de la temperatura superficial, encontrándose sólo una zona de estabilidad entre los 103 y 106 metros de altura.

La variación del número de partículas antes y después de la zona de estabilidad, puede considerarse significativa sólo para los aerosoles cuyo diámetro es mayor a  $0.80 \mu\text{m}$ , donde la disminución en la concentración se hace perceptible en la Figura 31 *b*) considerando también la escala del eje de las ordenadas. El rango mayor de tamaños, partículas con diámetros entre  $3.00 \mu\text{m} - 10.0 \mu\text{m}$ , nuevamente es el que se encuentra disminuido en mayor magnitud.

Si bien el número de partículas de la mayoría de las fracciones no se ve disminuido considerablemente luego de la zona de estabilidad, el efecto de la inversión sobre la masa de  $\text{MP}_{10}$ ,  $\text{MP}_{2.5}$  y  $\text{MP}_1$  si sufre cambios significativos, siendo las partículas más afectadas las de  $\text{MP}_{10}$ , seguidas por el  $\text{MP}_{2.5}$  y por último el  $\text{MP}_1$ , cuyo cambio es mínimo. Esto último se condice con lo mencionado anteriormente, las partículas que disminuyen en mayor número son aquellas cuyo diámetro es mayor a  $0.80 \mu\text{m}$ , que al mismo tiempo son las que tienen mayor contribución en masa.

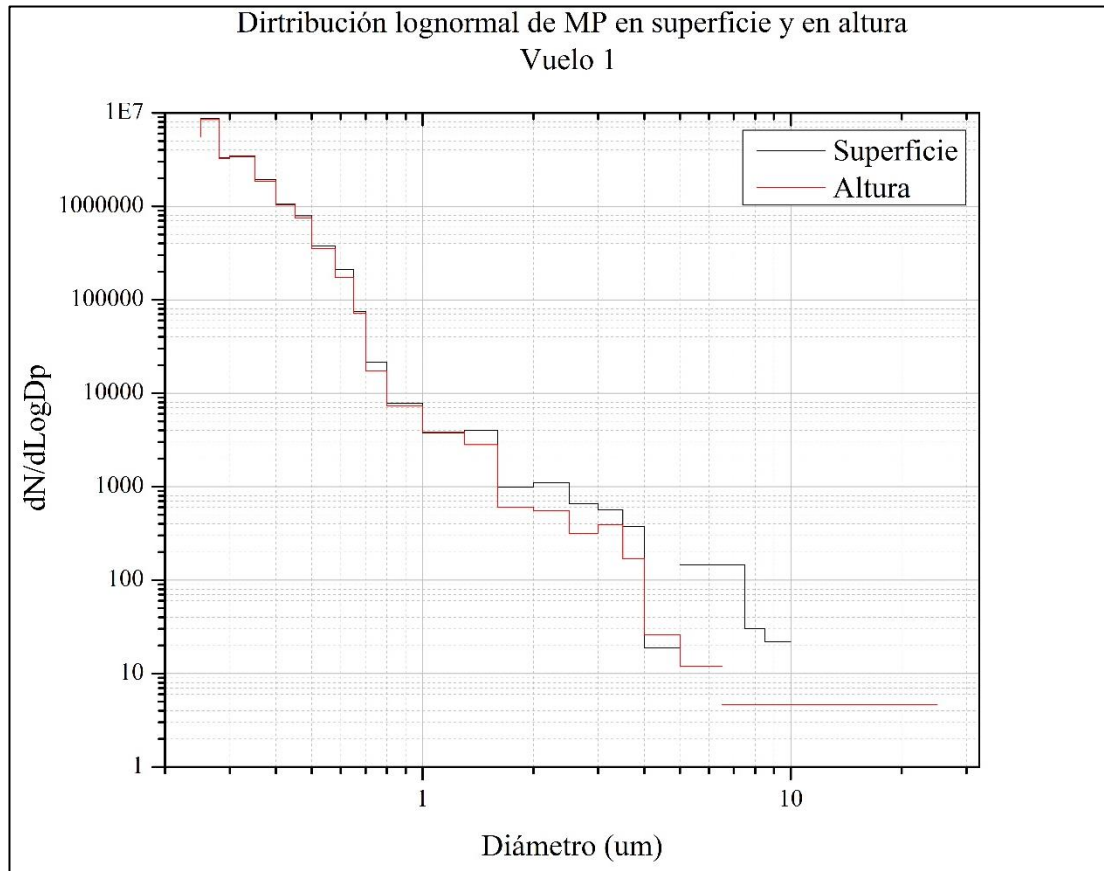
El perfil de temperatura, casi en su totalidad inestable durante el Vuelo 5, permite que los aerosoles se desplacen verticalmente sin limitaciones, esto provoca que las partículas se acumulen justo antes de la única zona de estabilidad (103 -106 metros de altura), registrándose en este punto, los valores de mayor concentración para la mayoría de las fracciones.

Con respecto a los resultados se debe destacar que se observó mayor influencia de la estratificación atmosférica sobre las fracciones más gruesas de MP, lo que tiene su fundamento en que las partículas más finas poseen mayor tiempo de vida atmosférico siendo capaces de permanecer mayor tiempo suspendidas debido a la resistencia de la fuerza gravitacional con respecto a las fracciones más gruesas. Por lo tanto, la disminución de las concentraciones de las fracciones más gruesas con la altura, puede atribuirse al efecto de la estratificación atmosférica y también a los efectos gravitacionales que en ellas causan una mayor incidencia, lo que se puede argumentar a partir de las Figuras 23, 24, 25 y 26, donde se aprecia que en altura las concentraciones de MP<sub>10</sub> comienzan a igualarse con las concentraciones de MP<sub>2.5</sub>, lo que significa que las partículas de diámetro mayor a 2.5  $\mu\text{m}$  han desaparecido.

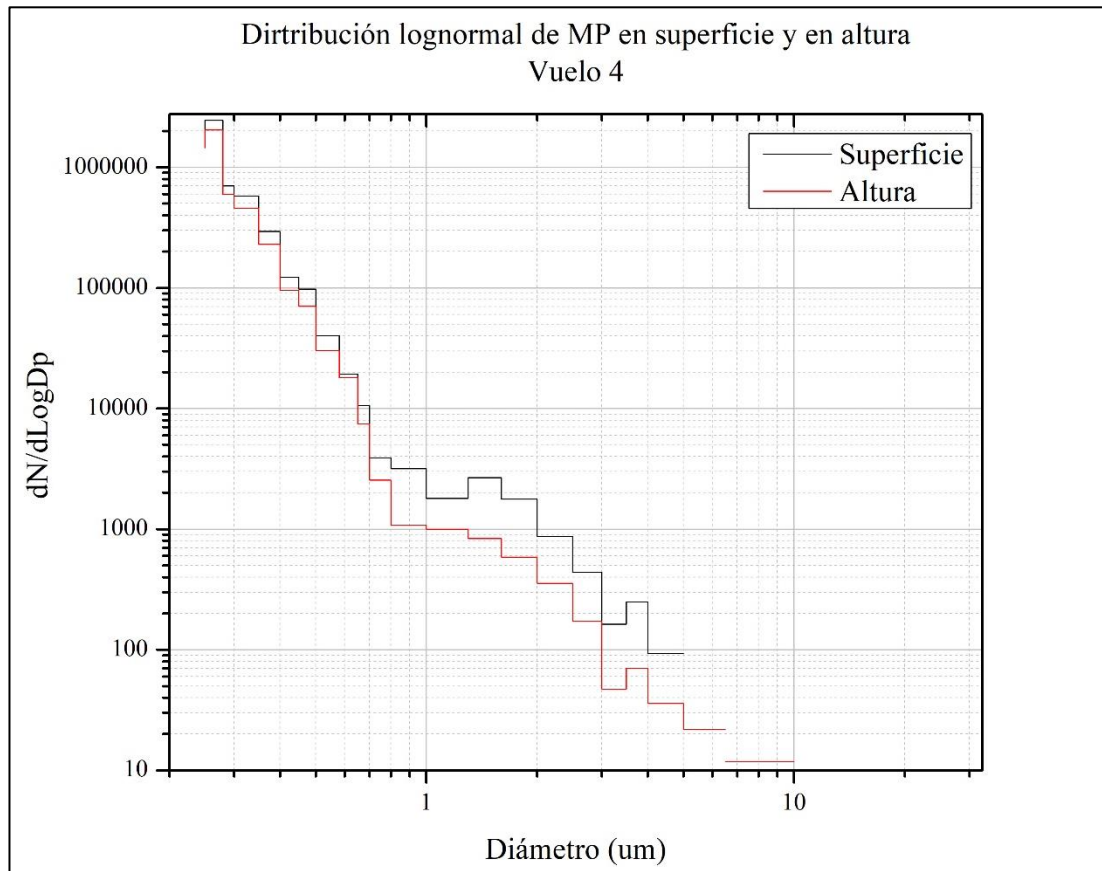
Por otro lado, al ser las fracciones de mayor tamaño las que se ven afectadas en mayor magnitud por la altura y la estratificación atmosférica; es esperable que la diferencia de concentración en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  antes y después de una inversión sea mayor para el MP<sub>10</sub>, por ser la fracción de tamaño que más contribuye a la masa de la muestra.

### **5.3.6 Distribución de MP segregado por tamaño en altura**

Con el objetivo de observar las implicancias de la estratificación atmosférica sobre la distribución de material particulado segregado por tamaño en altura, a partir de las mediciones del Vuelo 1 y Vuelo 4 se construyeron gráficos comparativos de la distribución de tamaño a dos alturas diferentes. La concentración de las diferentes fracciones de tamaño de partículas se presenta normalizada con respecto al logaritmo del diámetro de partículas ( $dN/d\text{Log}D_p$ ) y en escala logarítmica. Los resultados se observan en las Figura 32 y 33.



**Figura 32.** Distribución tamaños del material particulado segregado por tamaños en altura v/s en superficie para Vuelo 1.



**Figura 33.** Distribución de material particulado segregado por tamaños en altura v/s en superficie Vuelo 4.

Para el Vuelo 1, se consideraron como mediciones de superficie los registros entre 11 y 15 metros de altura y como datos en altura, los registros entre 60 y 70 metros para el análisis de distribución vertical de MP. Por otro lado, en el Vuelo 4 las mediciones consideradas de altura fueron las registradas entre 105 y 120 metros, mientras que las mediciones de superficie correspondieron a aquellos datos registrados entre 17 y 23 metros de altura. En ambos vuelos se desarrollaron dos zonas de estabilidad atmosférica en el perfil vertical.

Tanto en la Figura 32 como en la Figura 33 se puede apreciar en primera instancia, que el número de partículas en altura (rojo) es menor que el número de partículas en superficie

(negro), lo cual comprueba el efecto de las zonas de estabilidad sobre la concentración de MP descritos anteriormente y permite interpretar que las fracciones más finas se ven en menor medida influenciadas por estos fenómenos de inversión térmica que, en el caso del vuelo uno, es imperceptible para las partículas de diámetro menor a  $1.30\ \mu\text{m}$ . La diferencia en el número de partículas cercana a la superficie y en altura se incrementa al analizar las fracciones de mayor tamaño, como se puede apreciar en la Figura 32 la distribución de MP fino es prácticamente idéntica, sin embargo, las partículas con diámetros a partir de  $1.30\ \mu\text{m}$  se ven influenciadas por la altura, disminuyendo su contribución al número de partículas totales y conformando por ende, una diferencia sustancial entre la distribución de material particulado segregado por tamaño en altura y en superficie.

Con respecto al Vuelo 4 en a Figura 33 también se aprecia una distribución similar, sin embargo, se muestra una diferencia significativa en el número de partículas a partir de las fracciones más finas; esta diferencia permanece prácticamente constante hasta las partículas de diámetro cercano a  $1.00\ \mu\text{m}$ , donde se aprecia una disminución en la contribución al número de partículas totales por parte de las que poseen un diámetro mayor a  $1.00\ \mu\text{m}$ .

La magnitud de la diferencia en el número de partículas, que se aprecia de manera más clara en el Vuelo 4, puede deberse a la influencia de las zonas de estabilidad sobre los mecanismos de transporte, mientras mayor sea el efecto de una inversión sobre el MP mayor probabilidad de encontrar diferencias significativas en la distribución vertical de aerosoles segregados por tamaño.

La distribución de material particulado no varía en gran medida en altura y superficie, en ambas la mayor contribución en número de partículas está dada por las fracciones más



finas y el comportamiento va evolucionando por tamaños de forma muy similar para las fracciones finas cuyo diámetro se encuentra por debajo de 1.00  $\mu\text{m}$ .

### 5.3.7 Caracterización de la distribución de tamaños del MP en altura y en superficie

Se analizó la desviación estándar geométrica y el CMD a partir de los datos considerados en el análisis de distribución vertical de partículas con el objetivo de clasificar como monodisperso o polidisperso los aerosoles en superficie y en altura. En el ANEXO VI se pueden encontrar las planillas Excel a partir de las cuales se obtuvieron los resultados que se ilustran en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Resultados de parámetros CMD y  $\sigma_g$  para la clasificación de aerosoles en superficie y altura, calculado a partir de las ecuaciones ec.4 y ec.5. (\*\*)

VUELO	Altura	CMD ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$ ( $\mu\text{m}$ )	95% <sup>(*)</sup>	Clasificación
<b>1</b>	Superficie	0.316	1.68	0.11	Polidisperso
	11m-15m			0.89	
	Altura	0.315	1.65	0.12	Polidisperso
	60m-70m			0.86	
<b>4</b>	Superficie	0.299	1.26	0.19	Polidisperso
	17m-23m			0.48	
	Altura	0.296	1.21	0.20	Monodisperso
	105m-120m			0.44	

(\*) Rango de tamaño (diámetro,  $\mu\text{m}$ ) donde se encuentra el 95% de las partículas del aerosol

(\*\*) CMD, diámetro medio del total de partículas.  $\sigma_g$  desviación estándar geométrica (Elaboración propia).

A partir de los resultados obtenidos, se interpreta que para el Vuelo 1 las condiciones de estratificación atmosférica no producen cambios considerables en la distribución de material particulado, clasificándose los aerosoles como polidispersos tanto en altura como

en superficie. Esto significa que la desviación geométrica estándar del tamaño de partículas es alta, lo que se traduce en una distribución de tamaño más amplia.

Por el contrario, en el Vuelo 4 se dio que los aerosoles de altura se clasificaron como monodispersos a diferencia de los aerosoles de superficie, que resultaron ser polidispersos. Esto puede deberse a dos variables, primero a la altura de la medición, que en el caso del Vuelo 4 es mayor que en el Vuelo 1, por lo que naturalmente se espera una disminución más significativa en cantidad y tamaño del MP; y segundo, por la intensidad del efecto de la estratificación atmosférica sobre el desplazamiento vertical de las partículas.

Una distribución de tamaño monodispersa en altura para el Vuelo 4, nos muestra que el 95% de las partículas se encuentran en un rango acotado de tamaño, por lo que la desviación estándar geométrica de esa muestra es pequeña, en este caso y según el criterio utilizado, menor a 1.25.

## 6. CONCLUSIONES

- Se logró diseñar y construir una plataforma de soporte para acoplar todos los equipos y sensores de medición a la aeronave, ubicándolos justo por debajo del centro de masas del dron. La extensión de la toma de muestras más apropiada para acoplar al espectrómetro portátil de aerosoles 11-C fue el tubo de aluminio de 70 cm de longitud y la mejor posición según la validación y la literatura fue la **proyección vertical de la toma de muestras por sobre el dron**, ya que así se puede asegurar que el aire muestreado y por ende, los datos colectados no están alterados por las turbulencias generadas por las hélices en el aire circundante durante el vuelo de la aeronave.
- Se determinó que la metodología más apropiada para medir MP en altura obteniendo resultados reproducibles es en **ascenso a velocidad constante**, ya que de esta forma se minimiza el efecto de la turbulencia generada por las hélices del dron sobre las mediciones.
- Se construyeron perfiles verticales de variables meteorológicas y concentración de material particulado de los vuelos seleccionados, relacionando temperatura, humedad relativa y concentración de MP en altura, lo que permitió identificar zonas de estabilidad atmosférica y su efecto sobre la concentración y distribución del MP.
- Se comprobó que la estratificación atmosférica limita el desplazamiento vertical del número de partículas, **afectando principalmente y en mayor magnitud las fracciones de mayor tamaño**, cuyo diámetro se encuentra desde  $1.00\ \mu\text{m}$  – 10

- $\mu\text{m}$ . Mientras mayor es el diámetro de las partículas, éstas se ven más afectadas por una zona de estabilidad, provocando una disminución en la concentración en altura. Este efecto no se observa con claridad en las partículas más finas ( $<1\mu\text{m}$ ) que poseen un mayor tiempo de vida atmosférico haciendo que las zonas de estabilidad no permanentes y de corta duración no tengan un efecto significativo en la distribución vertical de estas fracciones de tamaño de partícula. Al ser las partículas de mayor tamaño las más afectadas en su concentración en n/L se produce un cambio de mayor magnitud en la concentración en masa de la fracción  $\text{MP}_{10}$ .
- Se encontró que la estratificación atmosférica provoca diferencias en la distribución vertical de MP segregado por tamaño. Su efecto sobre las partículas más gruesas genera una disminución en la contribución de esta fracción al número de partículas por litro en altura, lo que conforma la mayor diferencia al comparar la distribución en altura con la distribución en superficie.
- Se concluyó, para los casos donde se encontró una mayor concentración de aerosoles dentro de la zona de estabilidad, que se debía a un efecto de acumulación de aerosoles atribuido a la limitación del desplazamiento vertical producto del aumento de temperatura.
- Se resolvió que la clasificación de un aerosol como polidisperso o monodisperso puede ser determinada por la altura de la medición y por la intensidad del efecto de la estratificación atmosférica sobre el desplazamiento vertical de las partículas. Para el caso específico del Vuelo 4, la distribución de tamaño monodispersa en altura, muestra que el 95% de las partículas se encuentran en un rango acotado de tamaño.

- Se comprobó que las condiciones ambientales determinan la estratificación atmosférica. La disipación de la nubosidad y calentamiento de la superficie por el aumento de la incidencia solar entre los vientos 3, 4 y 5 provocaron en primera instancia el desplazamiento vertical de las zonas de estabilidad y luego la ruptura de la inversión térmica, generando una disminución en la concentración de MP en masa y en número de partículas.
- La metodología de medición conforma una herramienta para complementar información necesaria sobre la estratificación atmosférica de Santiago y su efecto sobre la distribución de MP en altura, considerando una tercera dimensión.

## 7. REFERENCIAS

- L. Abdón, N. Borchers, C. Cabrera, J. Gómez, M. Rodríguez (2010). Relación de la Norma de Calidad Primaria MP<sub>2,5</sub> con la Norma de Calidad Primaria de MP<sub>10</sub>. Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- Ancapichun, S., & Garces-Vargas, J. (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Cienc. Mar*, 41(1), 1-20. (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Cienc. Mar*, 1-20.
- Arduino Company (2018). ¿Qué es Arduino? [en línea] <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, BCN. (2018). Clima y Vegetación Región Metropolitana de Santiago. [en línea] <http://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>
- C. Arden Pope, D. W. Dockery. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Air & Waste Management Association*, 709–742.
- DGAC. (2015). Norma DAN 91: Reglas del Aire. Dirección general de aeronautica civil: Chile.
- DGAC. (2017). Norma DAN 151: Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) en asuntos de interés público, que se efectúen sobre áreas pobladas. Dirección General de Aeronáutica Civil: Chile.
- Ferrero L., Mocnik G., Ferrini B.S., Perrone M.G., Sangiorgi G., Bolzacchini E. (2011). Vertical profiles of aerosol absorption coefficient from micro-Aethalometer data and Mie calculation over Milan. *Science of the Total Environment*, Vol. 409, 2824-2837
- Grainger, R. G. (2015). *Some Useful Formulae for Aerosol Size Distributions and Optical Properties*. England: University of Oxford, 2012.
- GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. (2016a). Manual Portable Laser Aerosol Spectrometer Model 11-C.
- GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. (2016b). GRIMM Software for Optical Particle Counter, Portable Aerosol Spectrometer Series 1.100.
- Han, S., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Tian, Y., Wang, Y., ... & Cai, Z. (2015). Evaluation of regional background particulate matter concentration based on vertical distribution characteristics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11165-11177.
- Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker Jr, R. P. (1982). *Handbook on atmospheric diffusion*. Oak ridge: National Oceanic and Atmospheric Administration.

- Hans-Peter K., Kröger P., Zimek A. (2010). Outlier Detection Techniques. Germany : Ludwig-Maximilians-Universität München Universität München Munich (LMU).
- H. Store, 2016. DJI Matrice 600. [en línea] <http://www.hstore.cl/>
- Jacobson, M. Z. (2001). Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 695-697.
- John, W. (1995). Size Distribution Characteristics of Aerosols. particle science, CA 94596.
- Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del territorio (2017). Material particulado atmosférico, efectos perjudiciales sobre salud humana. [en línea] <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/>
- Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje, GEP, Universidad de Chile. (2014). Biodiversidad Terrestre de la Región de Arica y Parinacota, pág. 44. [en línea] [http://www.levs.uchile.cl/Biodiversidad/img/Libro\\_Biodiversidad\\_Regional.pdf](http://www.levs.uchile.cl/Biodiversidad/img/Libro_Biodiversidad_Regional.pdf)
- Lazaridis, M. (2011). First Principles of Meteorology. In First Principles of Meteorology and Air Pollution. Springer Netherlands, 67-118.
- Microsoft Corporation, 2014. Excel 2016. [en línea] <https://products.office.com/es-cl/excel>
- MINSAL y Subsecretaría de Salud Pública, (2008). Aprueba reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos. Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- MMA. (2011). Informe del Estado del Medio Ambiente, Contaminación del Aire. Chile: Gobierno de Chile.
- MMA. (2016). Informe Final para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable (MP<sub>10</sub>). Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente : Chile.
- Montilla-Rosero, E., Silva, A., Jimenez, C., Hernandez, R., & Saavedra, C. (2016). Optical characterization of lower tropospheric aerosols by the Southern East Pacific Lidar station (Concepcion, Chile). *Journal of Aerosol Science*, 16-26.
- Morales, R. G. (2016). Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Santiago: Editorial Universitaria.
- Muñoz Magnino, R., & Alcañal, R. I. (2012). Variability of urban aerosols over Santiago, Chile: Comparison of surface MP<sub>10</sub> concentrations and remote sensing with ceilometer and lidar. *Aerosol and Air Quality Research*, 8-19.

- Newsteo LGR, 2016a. Range Temperature Humidity Product Specification. [en línea]  
[http://www.temperatur-logger.ch/img/cms/Temperatur relative Feuchtigkeitslogger LGR plus Sonden LGR3 2 LGR64 EN.pdf](http://www.temperatur-logger.ch/img/cms/Temperatur_relative_Feuchtigkeitslogger_LGR_plus_Sonden_LGR3_2_LGR64_EN.pdf)
- Newsteo LGR, 2016b. Temperature and humidity probe for wireless measurements. [en línea]  
<http://www.newsteo.com/en/datalogger/temperature-humidity-recorder/wireless-temperature-humidity-logger/>
- Newsteo Wireless Monitoring, 2016. User Guide for RF Monitor software. [en línea]  
[https://www.newsteo.com/wp-content/uploads/\\_DWL/QUICK\\_START/SFDO-RFMxx-012-0101.pdf](https://www.newsteo.com/wp-content/uploads/_DWL/QUICK_START/SFDO-RFMxx-012-0101.pdf)
- NOAA, Earth System Research Laboratory . [en línea] <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/>
- Orfanoz, Andrea. Estratificación vertical y transporte viento abajo de contaminantes urbanos de Santiago de Chile. Tesis (Magíster en Ciencias, Mención Geofísica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2016.
- Origin (2016). OriginLab (Versión Origin Pro 8.5). [software computacional] Northampton, MA. Descargado Agosto, 2016.
- Préndez M., Corvalán R.M., Cisternas M. (2007). Estudio Preliminar del Material Particulado de Fuentes Estacionarias: Aplicación al Sistema de Compensación de Emisiones en la Región Metropolitana. Revista de Información Tecnológica , 93-103.
- PUCV noticias, 2016. Investigan cómo impacta la contaminación de Santiago en glaciares cercanos a la ciudad. [en línea] <http://geografiapucv.cl/2016/04/investigan-como-impacta-la-contaminacion-de-santiago-en-glaciares-cercanos-a-la-ciudad/>
- Ramanathan V., Carmichael G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geoscience, 221-227.
- RStudio (2017). RStudio: Integrated development environment for R (Version 3.4.0) [software computacional]. Boston, MA. Descargado Mayo, 2017.
- Suárez, A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM<sub>10</sub>. Luna Azul , 195-213.
- T.C. Bond, J. Doherty, D. W. Fahey, et. all. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 5380–5552.



- Toro, R. (2015). Atmospheric stratification dynamics of size-segregated aerosols in the urban area of Santiago. Santiago: National Research Funding Competition.
- TSI Incorporated (2012). Aerosol statistics lognormal distributions and  $dN/d\log D_p$ . [en línea] [http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site\\_Root/Products/Literature/Application\\_Notes/PR-001-RevA\\_Aerosol-Statistics-AppNote.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/PR-001-RevA_Aerosol-Statistics-AppNote.pdf)
- Universidad de Barcelona. Riera V., Guillén M., Muñoz C., Maqueda I. Torrelles E., Viladomiu N., 2005. Análisis de datos, Manual SPSS. [en línea] [http://www.ub.edu/aplica\\_infor/spss/](http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/)
- U. Chile noticias, 2016. U. de Chile lanzó globo cautivo para monitorear calidad de aire en Santiago. [en línea] <http://www.uchile.cl/noticias/120188/u-de-chile-lanzo-globo-cautivo-para-monitorear-la-calidad-del-aire>
- Vargas, C. (2011). Efectos de la fracción gruesa (PM10-2.5) del material particulado sobre la salud humana. Chile: MINSAL.
- Villa, T.F.; Salimi, F.; Morton, K.; Morawska, L.; Gonzalez, F. (2016). Development and validation of a UAV Based System for air pollution measurements. *Sensors* 2202
- Wang W., Ren L., Zhang Y., Chen J., Liu H., Bao L., Fan S., y Tang D. (2008). Aircraft measurements of gaseous pollutants and particulate matter over Pearl River Delta in China. *Atmospheric Environment*, 42, 6187–6202.
- Willeke, K., Whitby, K. T. (1975). Atmospheric aerosols: size distribution interpretation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 529-534.
- Z. Peng, D. Wang, Z. Wang, Y. Gao, S. Lu. (2015). A study of vertical distribution patterns of  $MP_{2.5}$  concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles: A case in Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 357-369.

## 8. ANEXOS

### ANEXO I. Ley barométrica

La variación de la presión atmosférica con la altura puede ser descrita a partir de la ecuación hidrostática, que se muestra en la *ec. 1*:

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\rho(z) g \quad (ec. 1)$$

A partir de la ley de gases ideales se obtiene que:

$$p(z) \frac{M_{aire}}{\rho(z)} = R T(z) \rightarrow \rho(z) = \frac{M_{aire} p(z)}{R T(z)} \quad (ec. 2)$$

Donde  $M_{aire}$  es la masa molar del aire (28,97 g mol<sup>-1</sup>), R es la constante de los gases ideales (0,082 atm L mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), T la temperatura en Kelvin y  $p$  es la presión en atmósferas. De las ecuaciones *ec. 8* y *ec. 9*, se tiene que:

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\frac{M_{aire} g p(z)}{R T(z)} \quad (ec. 3)$$

El término  $\frac{R T(z)}{M_{aire} g}$  corresponde a la escala de altura  $H(z)$  (m), que representa la distancia en la cual la presión disminuye en un factor de e (es decir, aproximadamente un factor de 2,72). Introduciendo el término  $H(z)$  en la ecuación anterior, se tiene que:

$$\frac{1}{p(z)} \frac{dp(z)}{dz} = -\frac{1}{H(z)} \quad (ec. 4)$$

Integrando entre  $P_0$  y  $P(z)$

$$\int_{P_0}^{P(z)} \frac{1}{p(z)} dp(z) = \int_0^z -\frac{dz}{H(z)} \quad (ec. 5)$$

$$\ln p(z) - \ln p_0 = -\frac{z}{H} \quad (ec. 6)$$

o bien:

$$\frac{p(z)}{p_o} = e^{-\frac{z}{H}} \quad (\text{ec. 7})$$

## **ANEXO II. Comandos gráfica en R-Studios perfil vertical de temperatura y humedad relativa**

```
> library(ggplot2)
> setwd("c:/ubicación/de/los/archivo")
> Temperatura<-read.table("Temperatura.csv", head=T, sep=";")
> Humedad<-read.table("Humedad.csv", head=T, sep=";")
> par(mar=c(12, 5, 4, 4) + 0.1)
> plot(Temperatura, type="p", cex=0.3, axes=F, col="red", xlab="", ylab="", main="",
ylim=c(desde, hasta), xlim=c(desde,hasta))
> axis(1, xlim=c(desde,hasta),col="red",lwd=1, cex.axis=0.65)
> mtext(1,text="Temperatura °C",line=2, col="red", cex=0.65)
> par(new=TRUE)
> plot(Humedad, type="p", cex=0.3, axes=F, col="blue", xlab="", ylab="", main="",
ylim=c(desde,hasta), xlim=c(desde,hasta))
> axis(1, line=3.5, xlim=c(desde,hasta), col="blue",lwd=1, cex.axis=0.65)
> mtext(1,text="Humedad %",line=5, col="blue", cex=0.65)
> axis(2, ylim=c(desde,hasta), col="black", lwd=1, cex.axis=0.65)
> mtext("Hora",side=2,col="black",line=2,cex=0.65)
> par(new=TRUE)
> plot(Temperatura, type="l", cex=0.3, axes=F, col="red", xlab="", ylab="", main="",
ylim=c(desde,hasta), xlim=c(desde,hasta))
> par(new=TRUE)
```

```
> plot(Humedad, type="l", cex=0.3, axes=F, col="blue", xlab="", ylab="", main="",  
ylim=c(desde,hasta), xlim=c(desde,hasta))
```

### ANEXO III. Planilla de cálculo dN/dLogDp, Excel

Superficie/altura						
Di	Df	concentracion	Log Di	Log Df	dLogDp	dN/dLogDp
0.25	0.28		-0.60205999	-0.55284197	0.04921802	0
0.28	0.3		-0.55284197	-0.52287875	0.02996322	0
0.3	0.35		-0.52287875	-0.45593196	0.06694679	0
0.35	0.4		-0.45593196	-0.39794001	0.05799195	0
0.4	0.45		-0.39794001	-0.34678749	0.05115252	0
0.45	0.5		-0.34678749	-0.30103	0.04575749	0
0.5	0.58		-0.30103	-0.23657201	0.06445799	0
0.58	0.65		-0.23657201	-0.18708664	0.04948536	0
0.65	0.7		-0.18708664	-0.15490196	0.03218468	0
0.7	0.8		-0.15490196	-0.09691001	0.05799195	0
0.8	1		-0.09691001	0	0.09691001	0
1	1.3		0	0.11394335	0.11394335	0
1.3	1.6		0.11394335	0.20411998	0.09017663	0
1.6	2		0.20411998	0.30103	0.09691001	0
2	2.5		0.30103	0.39794001	0.09691001	0
2.5	3		0.39794001	0.47712125	0.07918125	0
3	3.5		0.47712125	0.54406804	0.06694679	0
3.5	4		0.54406804	0.60205999	0.05799195	0
4	5		0.60205999	0.69897	0.09691001	0
5	6.5		0.69897	0.81291336	0.11394335	0
6.5	7.5		0.81291336	0.87506126	0.06214791	0
7.5	8.5		0.87506126	0.92941893	0.05435766	0
8.5	10		0.92941893	1	0.07058107	0
10	12.5		1	1.09691001	0.09691001	0
12.5	15		1.09691001	1.17609126	0.07918125	0
15	17.5		1.17609126	1.24303805	0.06694679	0
17.5	20		1.24303805	1.30103	0.05799195	0
20	25		1.30103	1.39794001	0.09691001	0
25	30		1.39794001	1.47712125	0.07918125	0
30	32		1.47712125	1.50514998	0.02802872	0

## ANEXO IV

### A) Gradiente adiabático seco

El gradiente adiabático de un volumen de aire seco se calcula considerando una expansión adiabática como se mencionó anteriormente. La primera ley de la termodinámica define que:

$$dU = dQ + dW \quad (ec. 8)$$

Donde U, Q y W corresponden a la energía interna del volumen de aire, calor y trabajo, respectivamente. La energía interna está dada por la expresión que se ilustra en la ecuación ec. 9:

$$dU = C_v dT \quad (ec. 9)$$

Donde  $C_v$  es la capacidad calorífica del sistema a volumen constante. La expresión del trabajo es:

$$dW = -pdV \quad (ec. 10)$$

De la ley de los gases ideales se tiene que:

$$pV = m R \frac{T}{M_{aire}} \quad (ec. 11)$$

Donde  $m$  es la masa de aire de nuestra parcela y  $M_{aire}$  es la masa molar del aire, ambas constantes. A partir de la ec. 11, se obtienen las ecuaciones ec. 12 y la ec. 13:

$$d(pV) = m R \frac{dT}{M_{aire}} \quad (ec. 12)$$

$$p dV + V dp = m R \frac{dT}{M_{aire}} \quad (ec. 13)$$

Dado que se asume un proceso adiabático, se cumple que  $dQ = 0$ ; combinando las ecuaciones *ec. 8* y *ec. 13*, se obtiene que:

$$C_v dT = V dp - \frac{m R dT}{M_{aire}} = \frac{m R T dp}{m_{aire} p} - \frac{m R dT}{M_{aire}} \rightarrow \frac{dT}{dp} = \frac{m R T / M_{aire} p}{C_v + m R / M_{aire}} \quad (ec. 14)$$

El cambio de presión con la altura fue descrito en la ecuación *ec. 10*, por lo tanto, al combinar la ecuación *ec. 7* con la ecuación *ec. 14* se obtiene que:

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{m g}{C_v + m R / M_{aire}} = - \frac{g}{c'_v + R / M_{aire}} \quad (ec. 15)$$

Donde  $c'_v$  es la capacidad calorífica a volumen constante por unidad de masa.

Finalmente puede el gradiente adiabático seco puede ser descrito por la ecuación 16.

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{C_p} \quad (ec. 16)$$

Donde  $C_p = \frac{R}{M_{aire}} + c'_v$

El gradiente adiabático seco  $-\frac{g}{C_p}$ , para masa de aire seco es 0,976 °C/100m, y se representa con el símbolo  $\Gamma_{seco}$ .

### **B) Gradiente adiabático húmedo**

La temperatura a la cual el vapor de agua comienza a condensarse o la temperatura a la cual la atmósfera se satura, es definida como punto de rocío. Bajo esta temperatura el gradiente adiabático que mejor representa las condiciones verticales de la atmósfera es el gradiente adiabático húmedo.

En una atmósfera saturada, la capacidad calorífica  $Cp$  del aire debe ser corregida, de acuerdo a la ecuación *ec. 17*:

$$Cp' = (1 - w_v)Cp_a + w_vCp_v \quad (ec. 17)$$

Donde  $w_u$  es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen de aire específico. Los subíndices  $a$  y  $v$  se refieren a “aire” y “vapor de agua” respectivamente. Se cumple que  $Cp_v > Cp$  y por lo tanto  $Cp' > Cp$ ; lo que quiere decir que el calor específico del vapor de agua es mayor que el calor específico del aire seco y por lo tanto  $Cp'$ , que corresponde al calor específico del aire húmedo es mayor que el calor específico del aire seco  $Cp$ , por lo tanto, el gradiente adiabático húmedo tendrá una tasa de enfriamiento menor que el aire seco.

El volumen de aire húmedo aumenta hasta que la presión parcial del vapor de agua se iguala a la presión de vapor de agua de equilibrio. Lo que conduce a la condensación del vapor de agua. Si  $\Delta H_v$  es el calor de vaporización del vapor de agua, entonces el calor liberado del proceso de condensación está dado por la expresión:

$$dQ = -\Delta H_v m dw_v \quad (ec. 18)$$

A partir de la primera ley de la termodinámica, se puede concluir que:

$$\begin{aligned} C_v dT &= -\Delta H_v m dw_v + \frac{m R T dp}{M_{aire} p} - \frac{m R dT}{M_{aire}} \\ \rightarrow \left( C_v + \frac{m R}{M_{aire}} \right) dT &= -\Delta H_v m dw_v + \frac{m R T dp}{M_{aire} p} \quad (ec. 19) \end{aligned}$$

A partir de la ecuación *ec. 19*, se obtiene:



$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{Cp} - \frac{\Delta H_v}{Cp} \frac{dw_v}{dz} \quad (ec. 20)$$

El término  $\frac{dw_v}{dz}$  es un valor negativo si se considera que con el incremento de la altura disminuye el vapor de agua por el proceso de condensación, la tasa de enfriamiento del aire húmedo dentro de las nubes es menor que en el aire seco. El término  $\frac{dw_v}{dz}$  depende de la temperatura ya que la presión de vapor de equilibrio del vapor de agua aumenta considerablemente con la temperatura.

El gradiente adiabático húmedo,  $-\frac{g}{Cp} - \frac{\Delta H_v}{Cp} \frac{dw_v}{dz}$ , es menor que el gradiente adiabático seco y se representa como  $\Gamma_{húm}$ .

En una atmósfera saturada, la capacidad calorífica  $Cp$  del aire debe ser corregida, de acuerdo a la ecuación *ec. 21*:

$$Cp' = (1 - w_v)Cp_a + w_vCp_v \quad (ec. 21)$$

Donde  $w_u$  es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen de aire específico. Los subíndices  $a$  y  $v$  se refieren a “aire” y “vapor de agua” respectivamente. Se cumple que  $Cp_v > Cp$  y por lo tanto  $Cp' > Cp$ ; lo que quiere decir que el calor específico del vapor de agua es mayor que el calor específico del aire seco y por lo tanto  $Cp'$ , que corresponde al calor específico del aire húmedo es mayor que el calor específico del aire seco  $Cp$ , por lo tanto, el gradiente adiabático húmedo tendrá una tasa de enfriamiento menor que el aire seco.

El volumen de aire húmedo aumenta hasta que la presión parcial del vapor de agua se iguala a la presión de vapor de agua de equilibrio. Lo que conduce a la condensación del

vapor de agua. Si  $\Delta H_v$  es el calor de vaporización del vapor de agua, entonces el calor liberado del proceso de condensación está dado por la expresión:

$$dQ = -\Delta H_v m dw_v \quad (ec. 22)$$

A partir de la primera ley de la termodinámica, se puede concluir que:

$$C_v dT = -\Delta H_v m dw_v + \frac{m R T dp}{M_{aire} p} - \frac{m R dT}{M_{aire}}$$

$$\rightarrow \left( C_v + \frac{m R}{M_{aire}} \right) dT = -\Delta H_v m dw_v + \frac{m R T dp}{M_{aire} p} \quad (ec. 23)$$

A partir de la ecuación *ec. 23*, se obtiene:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} - \frac{\Delta H_v}{C_p} \frac{dw_v}{dz} \quad (ec. 24)$$

El término  $\frac{dw_v}{dz}$  es un valor negativo si se considera que con el incremento de la altura disminuye el vapor de agua por el proceso de condensación, la tasa de enfriamiento del aire húmedo dentro de las nubes es menor que en el aire seco. El término  $\frac{dw_v}{dz}$  depende de la temperatura ya que la presión de vapor de equilibrio del vapor de agua aumenta considerablemente con la temperatura.

El gradiente adiabático húmedo,  $-\frac{g}{C_p} - \frac{\Delta H_v}{C_p} \frac{dw_v}{dz}$ , es menor que el gradiente adiabático seco

y se representa como  $\Gamma_{húm.}$ .

## ANEXO V.

**Tabla de diámetros para análisis estadístico**

<b>Tamaño</b>	<b>Diámetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
1	0,25
2	0,28
3	0,30
4	0,35
5	0,40
6	0,45
7	0,50
8	0,58
9	0,65
10	0,70
11	0,80
12	1,00
13	1,30
14	1,60
15	2,00
16	2,50
17	3,00
18	3,50
19	4,00
20	5,00
21	6,50
22	7,50
23	8,50
24	10,00
25	12,50
26	15,00
27	17,50
28	20,00
29	25,00
30	30,00
31	32,00

ANEXO VI.

Planilla Excel calculo CMD y  $\sigma_g$

D1, $\mu\text{m}$	n1	Indj	CxD	log-sigma <sup>2</sup>	Di	InDi	LnDg	log Di- logDg	(log Di-logDg) <sup>2</sup>	nj log Di-logDg  <sup>2</sup>
0.25	274017.4074	-1.386294361	-379868.787	274017.407	0.25	-1.38629436	-1.15451488	-0.23177948	0.053721728	14720.68853
0.28	253604.4444	-1.272965676	-322829.753	253604.444	0.28	-1.27296568	-1.15451488	-0.1184508	0.014030591	3558.220213
0.3	216395.9259	-1.203972804	-260534.81	216395.926	0.3	-1.2039728	-1.15451488	-0.04845792	0.002446086	529.3230944
0.35	195460.3704	-1.049822124	-205198.621	195460.37	0.35	-1.04982212	-1.15451488	0.10469276	0.010960573	2142.357689
0.4	95393.33333	-0.916290732	-87408.0272	95393.3333	0.4	-0.91629073	-1.15451488	0.23822415	0.056750745	5413.642734
0.45	47501.85185	-0.798507696	-37930.5943	47501.8519	0.45	-0.7985077	-1.15451488	0.35600718	0.126741115	6020.437661
0.5	48440.74074	-0.693147181	-33576.5629	48440.7407	0.5	-0.69314718	-1.15451488	0.4613677	0.212860155	10311.10356
0.58	17396.2963	-0.544727175	-9476.23534	17396.2963	0.58	-0.54472718	-1.15451488	0.60978771	0.371841045	6468.656998
0.65	5598.148148	-0.430782916	-2411.58858	5598.14815	0.65	-0.43078292	-1.15451488	0.72373196	0.523787956	2932.242578
0.7	4168.518519	-0.356674944	-1486.80611	4168.51852	0.7	-0.35667494	-1.15451488	0.79783994	0.636548564	2653.464479
0.8	1688.888889	-0.223143551	-376.864664	1688.88889	0.8	-0.22314355	-1.15451488	0.93137133	0.867452553	1465.030978
1	833.3333333	0	0	833.3333333	1	0	-1.15451488	1.15451488	1.332904609	1110.753041
1.3	344.4444444	0.262364264	90.36991332	344.4444444	1.3	0.26236426	-1.15451488	1.41687914	2.007546511	691.4882428
1.6	272.2222222	0.470003629	127.9454324	272.2222222	1.6	0.47000363	-1.15451488	1.62451851	2.639060309	718.4108835
2	58.88888889	0.693147181	40.8186673	58.8888889	2	0.69314718	-1.15451488	1.84766206	3.413855092	201.0381332
2.5	43.7037037	0.916290732	40.04529865	43.7037037	2.5	0.91629073	-1.15451488	2.07880561	4.288235884	187.4117905
3	21.11111111	1.098612289	23.19292609	21.1111111	3	1.09861229	-1.15451488	2.25312717	5.07658204	107.1722875
3.5	22.59259259	1.252762968	28.30316336	22.5925926	3.5	1.25276297	-1.15451488	2.40727785	5.794986642	130.9237723
4	16.2962963	1.386294361	22.59146366	16.2962963	4	1.38629436	-1.15451488	2.54080924	6.455711602	105.2041891
5	2.962962963	1.609437912	4.768704926	2.96296296	5	1.60943791	-1.15451488	2.76395279	7.639435042	22.63536309
6.5	0.740740741	1.871802177	1.386520131	0.74074074	6.5	1.87180218	-1.15451488	3.02631706	9.158594932	6.784144394
7.5	0	2.014903021	0	0	7.5	2.01490302	-1.15451488	3.1694179	10.04520983	0
8.5	0	2.140066163	0	0	8.5	2.14006616	-1.15451488	3.29458104	10.85426426	0
10	0	2.302585093	0	0	10	2.30258509	-1.15451488	3.45709997	11.95154023	0
12.5	0	2.525728644	0	0	12.5	2.52572864	-1.15451488	3.68024352	13.5441924	0
15	0	2.788050201	0	0	15	2.7880502	-1.15451488	3.86256508	14.91940901	0
17.5	0	2.862200881	0	0	17.5	2.86220088	-1.15451488	4.01671576	16.13400551	0
20	0	2.995732274	0	0	20	2.99573227	-1.15451488	4.15024715	17.22455144	0
25	0.37037037	3.218875825	1.192176231	0.37037037	25	3.21887582	-1.15451488	4.37339071	19.12654626	7.083906023
30	0	3.401197382	0	0	30	3.40119738	-1.15451488	4.55571226	20.75451422	0
32	0	3.465735903	0	0	32	3.4657359	-1.15451488	4.62025078	21.3467173	0
In1 = N	1161282.593	EOxD = nj indj	-1340718.03						Inj(log Di-logDg) <sup>2</sup>	59496.99118
1/N	8.61117E-07								Inj(log Di-logDg) <sup>2</sup> /	0.25284622
									[Inj(log Di-logDg) <sup>2</sup> ]	0.502838165
									log-sigma <sup>2</sup>	0.502838165
									$\sigma_{\text{mag}}$	1.65340726
									$\sigma_{\text{mag}}^2$	2.733755568
									CMD/ $\sigma_{\text{mag}}^2$	0.11530307
									CMD* $\sigma_{\text{mag}}^2$	0.86170823

## ANEXO VII.

### Ejemplo de análisis estadístico. Manguera de teflón de 2 metros, Prueba 1.

#### 1. Normalidad

Tamaño	s/c manguera	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>		
		Estadístico	gl	Sig.
1	1	0,059	101	,200*
	2	0,056	101	,200*
2	1	0,051	101	,200*
	2	0,066	101	,200*
3	1	0,073	101	,200*
	2	0,099	101	0,016
4	1	0,052	101	,200*
	2	0,067	101	,200*
5	1	0,072	101	,200*
	2	0,072	101	,200*
6	1	0,092	101	0,033
	2	0,091	101	0,04
7	1	0,106	101	0,007
	2	0,103	101	0,01
8	1	0,091	101	0,038
	2	0,121	101	0,001
9	1	0,123	101	0,001
	2	0,093	101	0,032
10	1	0,123	101	0,001
	2	0,095	101	0,024
11	1	0,108	101	0,006
	2	0,131	101	0
12	1	0,094	101	0,028
	2	0,121	101	0,001

13	1	0,137	101	0
	2	0,148	101	0
14	1	0,127	101	0
	2	0,133	101	0
15	1	0,094	101	0,029
	2	0,156	101	0
16	1	0,114	101	0,003
	2	0,128	101	0
17	1	0,101	101	0,013
	2	0,107	101	0,006
18	1	0,147	101	0
	2	0,118	101	0,001
19	1	0,093	101	0,031
	2	0,121	101	0,001
20	1	0,131	101	0
	2	0,173	101	0
21	1	0,227	101	0
	2	0,429	101	0
22	1	0,252	101	0
	2	0,527	101	0
23	1	0,262	101	0
	2	0,528	101	0
24	1	0,302	101	0
25	1	0,48	101	0
26	1	0,5	101	0
27	1	0,538	101	0
28	1	0,528	101	0
29	1	0,539	101	0

Los tamaños para los cuales se miden cero partículas en los diez minutos, son omitidos en los análisis estadísticos de normalidad. Esto sucedió para los tamaños 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31 con manguera de teflón acoplada y para los tamaños 30 y 31 sin manguera.

Este análisis se realizó mediante Kolmogorov-Smirnov, ya que el conjunto de datos es mayor a 50.

Para los tamaños 1, 2, 4 y 5, se cumple que los datos distribuyen normal para los casos sin y con manguera (s/c manguera 1 y 2 respectivamente).

## 2. Homogeneidad de varianzas. Estadístico de Levene

Tamaño	Estadístico de Levene	Sig.
1	27,808	0
2	21,345	0
3	35,227	0
4	3,653	0,057
5	2,646	0,105
6	0,045	0,832
7	0,952	0,33
8	0,964	0,327
9	2,531	0,113
10	2,307	0,13
11	4,69	0,032
12	0,278	0,599
13	0,752	0,387
14	1,179	0,279
15	3,314	0,07
16	20,544	0

Tamaño	Estadístico de Levene	Sig.
17	0,019	0,891
18	0,19	0,663
19	4,723	0,031
20	23,45	0
21	40,196	0
22	81,532	0
23	81,257	0
24	289,733	0
25	126,21	0
26	141,444	0
27	34,773	0
28	42,544	0
29	13,03	0
30	.	.
31	.	.

Para los tamaños 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17 y 18 se cumple que la homogeneidad de varianzas es estadísticamente similar para los casos con y sin manguera de teflón mediante la determinación del estadístico de Levene.

Para los casos donde se cumple tanto la distribución normal como la homogeneidad de varianzas, la comparación de medias se realiza mediante la prueba t-student para dos muestras independientes. En caso contrario, se utiliza Kruskal Wallis.

Es importante mencionar que para los tamaños 30 y 31 el análisis no arroja resultados porque no se registró número de partículas para esos tamaños. (ver si tiene que ser los dos casos 0 en los diez minutos, o con que uno sea 0 basta)

### 3. Comparación de medias

Para efectos del caso de estudio, los tamaños 4 y 5 cumplen con lo mencionado en el párrafo anterior, por lo que se comparan sus medias a través de t-student

Tamaño	prueba t para la igualdad de medias						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
						Inferior	Superior
4	17,397	200	0	1515,84158	87,13046	1344,02937	1687,6538
5	11,898	200	0	602,9703	50,6803	503,034	702,9066

Para ninguno de los dos casos se cumple que las medias son estadísticamente iguales, ya que significancia es menor a 0,05.

Para el resto de los casos, la comparación de medias se realizó a través de Kruskal Wallis.

Tamaño	Chi-cuadrado	Sig. asintótica
1	148,117	0
2	145,989	0
3	133,773	0
6	37,76	0
7	49,899	0
8	34,181	0
9	35,511	0
10	38,223	0
11	10,408	0,001
12	11,791	0,001
13	10,117	0,001
14	15,097	0
15	10,079	0,001
16	12,316	0

17	34,972	0
18	22,992	0
19	76,182	0
20	96,23	0
21	70,616	0
22	74,946	0
23	85,761	0
24	66,793	0
25	22,05	0
26	19,663	0
27	7,215	0,007
28	9,371	0,002
29	3,03	0,082
30	0	1
31	0	1

Para los tamaños 29, 30 y 31 se cumple la igualdad de medias, pero esto es porque para los últimos casos, la variación de mediciones es casi nula y fluctúan entre 0 y 10, siendo para los últimos dos tamaños 0 durante los 20 minutos de medición.

De esta manera, en esta medición no existe ningún tamaño con igualdad estadísticamente significativa. La manguera interfiere en la medición.