



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DE LOS EPISODIOS EXTREMOS DE
CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO FINO EN COYHAIQUE,
PATAGONIA, CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y
CLIMATOLOGÍA

LUIS ALBERTO GÓMEZ PARADA

PROFESORA GUÍA:
LAURA ELEONOR GALLARDO KLENNER

PROFESOR CO-GUÍA:
NICOLAS JORGE HUNEEUS LAGOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSÉ ANGEL JUAN RUTLLANT COSTA
JUAN PABLO BOISIER ECHENIQUE

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA
POR: LUIS ALBERTO GÓMEZ PARADA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: SRA. LAURA ELEONOR GALLARDO KLENNER
PROF. CO-GUÍA: SR. NICOLAS JORGE HUNEEUS LAGOS

CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DE LOS EPISODIOS EXTREMOS DE
CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO FINO EN COYHAIQUE,
PATAGONIA, CHILE

La ciudad de Coyhaique, localizada en un valle cordillerano semicerrado de la región de Aysén y con alrededor de 60 mil habitantes, registra recurrentemente las más altas concentraciones de material particulado fino ($MP_{2,5}$) de Chile. De acuerdo con el último inventario de emisiones, realizado el 2017 por el Ministerio del Medioambiente de Chile (MMA), un 98 % de las emisiones a la atmósfera de $MP_{2,5}$ en esta ciudad, son generadas por la combustión de leña residencial para calefacción.

El presente estudio tiene como objetivos identificar y estudiar aquellos patrones meteorológicos de escala sinóptica vinculados a los eventos de emergencia de calidad del aire por $MP_{2,5}$ en Coyhaique, es decir, concentraciones atmosféricas que igualan o superan los $170\mu g/m^3$ como promedio de 24 horas. Con este fin, se identificaron eventos diarios de emergencia para el período entre 2014 y 2020 a partir de los valores medios diarios de $MP_{2,5}$ medidos en las estaciones de la Red SINCA de Coyhaique. En el registro analizado, un 20 % de los días (502 días) presentó algún nivel de contaminación considerado peligroso y un 6 % de los días (158 días) alcanzaron un nivel de emergencias por $MP_{2,5}$. Para la muestra de días de emergencia, se analizaron los campos meteorológicos de reanálisis de NCEP-NCAR. Esto incluye la altura geopotencial, velocidad de viento vertical (ω), cobertura nubosa total, viento y temperatura en los niveles de 925 y 500 hPa, además de cortes verticales en 45° y 55° de latitud sur, y se obtuvieron los campos medios y sus anomalías respecto de la climatología (1991-2020). Los resultados muestran que los episodios de emergencia de $MP_{2,5}$ están relacionados con una anomalía media de altura geopotencial positiva en 500 hPa, típicamente superior a 120 m. El centro de la anomalía se ubica en la tropósfera media, entre “*Tierra del Fuego*” y el “*Paso Drake*”, para los días de máxima concentración de $MP_{2,5}$ en Coyhaique. Esta configuración de gran escala produce típicamente un debilitamiento del viento zonal en toda la tropósfera, un calentamiento anómalo de la tropósfera y un fortalecimiento de la inversión próxima a la capa de límite, inhibiendo los procesos de ventilación y dispersión de contaminantes en Coyhaique. Dentro de los factores que intensifican la inversión térmica son un enfriamiento radiactivo nocturno, desde la superficie, y un calentamiento generado por una compresión adiabática desde la tropósfera media. Conjuntamente, el patrón meteorológico durante días de episodio se asocia con un mayor enfriamiento e incrementando la demanda térmica media de los hogares, condición que favorece la demanda por calefacción y con ello, las emisiones de $MP_{2,5}$ a la atmósfera.

A la memoria de Humberto Fuenzalida y Pablo Ulriksen, dos grandes maestros que nos permitieron ver hacia el horizonte de la meteorología y la calidad del aire en Chile.

Agradecimientos

Para mi compañera Claudia Torres, que me alentó a retomar nuevamente el Magíster y que sin su apoyo y generosidad jamás podría haber terminado. A mis hijos, Camilo y Edmundo, por esas largas ausencias que implicó el dedicarme a ser nuevamente un estudiante. A mis amigas, colegas y mentoras Laura Gallardo y Manuela López, que sangraron sus ojos mientras leían mi paupérrimo español y me apoyaron con sus consejos y guías. A la comisión completa Laura, Nicolás, Juan Pablo y Pepe por sus consejos que permitieron mejorar el trabajo presentado. A los profesores del magíster en particular Ricardo, Rene y Roberto por su conocimiento y consejos. Para mis amigos, Claudio Herranz por su apoyo estadístico y Diego Vergara, por ese imprescindible apoyo mental que me permitió enfrentar un año complejo, a todo mi equipo del laboratorio Ecoclimático del CIEP-UCh, que estuvieron apanando mi ausencia y por supuesto, a mis Padres.

Esta investigación se realizó con el apoyo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, proyecto FONDAP/ANID n°15110009 ; Laboratorio Ecoclimático CONICYT R17A10002 del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia CIEP; Evaluación de un Plan Piloto Orientado a Reducir las Emisiones de material Particulado en la Ciudad de Coyhaique; Código BIP: 400218825-0, CIEP y Gobierno Regional de Aysén; Perfilador de Viento y Temperatura vertical de Coyhaique SODAR-RASS. CONICYT FONDEQUIP EQM160-161, Universidad Austral de Chile; y Ecosystem climate change and socio-environmental linkages along the continent ocean continuum research in patagonia (patser), Código: R-20F0002 CIEP.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Geografía física de Coyhaique	3
1.1.2. Gran escala asociada a altas concentraciones de material particulado	4
1.1.3. Material particulado fino: fuentes, transformaciones e impactos	11
1.1.4. Emisiones de $MP_{2,5}$ en Coyhaique	15
1.1.5. Mediciones de la calidad del aire en Coyhaique	17
1.2. Motivación	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivos específicos	19
2. Metodología y datos empleados	20
2.1. Datos empleados	20
2.2. Reconstrucción de la serie diaria de $MP_{2,5}$ en Coyhaique	22
2.3. Identificación función de probabilidad de $MP_{2,5}$	23
2.4. Metodología para la identificación de los patrones sinópticos	23
2.5. Selección de eventos diarios de contaminación por $MP_{2,5}$	24
2.6. Estimación de episodio de emergencia por $MP_{2,5}$	25
2.6.1. Identificación de patrones sinópticos	26
2.6.2. Análisis de las variables meteorológicas locales	28

2.6.3.	Análisis de las variables meteorológicas locales durante días de episodio	28
3.	Caracterización del material particulado fino en Coyhaique	30
3.1.	Ciclo estacional material particulado fino	32
3.2.	Ciclo diario de material particulado fino	34
3.3.	Variabilidad interanual de las concentraciones de material particulado fino .	36
3.4.	Comportamiento entre estaciones de monitoreo.	38
3.4.1.	Función de probabilidad del $MP_{2,5}$	38
3.4.2.	Covariación y correlación del $MP_{2,5}$ en Coyhaique	39
4.	Eventos diarios y episodios de alta concentración de $MP_{2,5}$	41
4.1.	Análisis de datos de $MP_{2,5}$	41
4.2.	Caracterización de los eventos diarios de $MP_{2,5}$	44
4.3.	Probabilidad de excedencia de la norma diaria de $MP_{2,5}$	47
4.4.	Clasificación de los episodios de contaminación	47
5.	Condiciones atmosféricas asociadas a la escala sinóptica que modulan los episodios con nivel de emergencia de $MP_{2,5}$ en Coyhaique	51
5.1.	Altura Geopotencial (hgt) durante los episodios de $MP_{2,5}$	51
5.2.	Omega (ω) durante los episodios de $MP_{2,5}$	55
5.3.	Viento zonal (u) durante los episodios de $MP_{2,5}$	58
5.4.	Viento meridional (v) durante los episodios de $MP_{2,5}$	61
5.5.	Campo de temperatura (T) durante episodios de emergencia por $MP_{2,5}$. . .	64
5.6.	Cobertura nubosa durante los episodios de $MP_{2,5}$	68
5.7.	Comparación de los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$ de distinta duración .	70
6.	Meteorología a una escala local durante episodios con nivel de emergencia por $MP_{2,5}$	77
6.1.	Descripción de las variables meteorológicas superficiales	77

6.2. Meteorología local y los episodios de emergencia	80
6.3. Relación escala local y la sinóptica durante episodios de emergencia de MP _{2,5}	84
7. Análisis de un episodio de contaminación de MP_{2,5} en la ciudad de Coyhaique	87
7.1. Escenario meteorológico a escala sinóptica	87
7.2. Variables meteorológicas superficiales medidas en Coyhaique	94
7.3. Nubosidad a partir de datos satelitales	96
7.4. Datos de radiosonda para el episodio de emergencia por MP _{2,5}	97
8. Discusión y conclusiones	100
9. Bibliografía	105
10. Anexos	120
10.1. Demografía y actividad económica de la ciudad de Coyhaique	120
10.2. Marco jurídico y administrativo de la zona de estudio	122
10.3. Filtrado de datos de material particulado	123
10.3.1. Inspección visual	125
10.3.2. Eliminación de datos no validados	126
10.3.3. Límite de detección	126
10.3.4. Restricción física	126
10.3.5. Resumen	126
10.4. Tablas variables meteorológicas medidas en la red SINCA	131
10.5. Gráfica material particulado en Coyhaique	134
10.6. Resumen estadístico de las concentraciones de MP _{2,5} de la red SINCA	134
10.7. Modelo para la determinación de las concentraciones de MP _{2,5}	136
10.7.1. Determinación de las emisiones	136
10.7.2. Determinación de altura mezcla	138

10.7.3. Ajuste del modelo y resultados	140
10.8. Modelo de dispersión y variables meteorológicas locales	142
10.8.1. Análisis de tendencia de $MP_{2,5}$ medidos y modelado	142
10.9. Concentraciones de $MP_{2,5}$ en un Escenario de Cambio Climático	146
10.10 Discusión del modelo de $MP_{2,5}$	147
10.11 Test de funciones de distribución de probabilidad para las concentraciones de $MP_{2,5}$ en Coyhaique	148
10.12 Cambios y proyecciones de $MP_{2,5}$ en Coyhaique	150
10.13 Climatologías de Campos Meteorológicos NCEP-NCAR	150
10.14 Gráficos tipo caja y violín	159

Capítulo 1

Introducción

La ciudad de Coyhaique, está localizada en un valle cordillerano semicerrado de la Patagonia Chilena ($45^{\circ}34'19''$ S, $72^{\circ}4'15''$ O, 330 m.s.n.m) y tiene una población de 57.818 habitantes según estimación actual del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, <http://www.ine.cl/>) (Ver Anexo 10.1). En este centro urbano se registran las más altas concentraciones de material particulado fino del país, esto es, de diámetro aerodinámico inferior a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) (Toro A et al., 2015; Molina et al., 2017). Para los meses de junio a agosto, entre los años 2014 al 2017, se alcanzó una concentración media, calculado sobre la base de promedios horarios, de $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ basado en los datos publicados por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA) (<https://sinca.mma.gob.cl/>). Estas altas concentraciones superan en más del doble la norma chilena diaria de $\text{MP}_{2,5}$ ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ día, DS N.º 12, 2011, <http://bcn.cl/1uyym>) y casi cinco veces el valor máximo para promedio de 24 horas, recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, OMS 2021). Esta situación constituye un significativo riesgo para la salud de su población (Cohen et al., 2017).

En distintas regiones del mundo, suceden episodios de ventilación superficial débil, los cuales, comúnmente, se relacionan con configuraciones sinópticas específicas como altas de presión y subsidencia (e.g., Wei et al., 2011; Horton 2012). Estas condiciones pueden favorecer el estancamiento del aire superficial, lo que afecta negativamente la dispersión de contaminantes atmosféricos cercanos a la superficie, incrementando su concentración en condiciones locales de emisión (e.g. Whiteman et al., 2014). Episodios invernales significativos de ventilación débil y altos niveles de contaminación superficial asociados a forzantes de escala sinóptica, son descritos en muchas ciudades del mundo; por ejemplo en Nanjink, Beijing, Taiyuan, Lanzhou y Guangzhou en China, e.g., (Wang et al., 2014, Li et al., 2014), Boston, Nueva York, St. Louis, Birmingham, Cleveland, Philadelphia y Seattle en los Estados Unidos (Davis y Kalkstein, 1990, Greene et al., 1999, Pasch et al., 2011), Christchurch en Nueva Zelanda, e.g., (Appelhans et al., 2013), Eordean, Grecia (Triantafyllou, 2001), Moscú en Rusia (Shahgedanova et al., 1998), Santiago (Rutllant y Garreud, 1995; Toro A et al., 2019) y Valparaíso en Chile (Pozo et al., 2019).

Por otra parte, investigaciones realizadas, por ejemplo Tai et al., 2012; Hou y Wu, 2016; Chowdhury et al., 2018; Pendergrass et al., 2019, muestran cómo el cambio climático puede llevar a un incremento de la probabilidad de ocurrencia de eventos meteorológicos vinculados a

episodios de alta concentración por $MP_{2,5}$ sobre los continentes. Resultados de investigaciones han mostrado que un incremento futuro de la frecuencia de los estancamientos atmosféricos (*Horton et al., 2012-2014*) o una disminución de la frecuencia anual de los sistemas de baja de presión (*Tai et al., 2012*), estarían correlacionados con un aumento en la probabilidad de eventos extremos de contaminantes atmosféricos como $MP_{2,5}$. De esta forma, conociendo características como la frecuencia, intensidad, ubicación de los patrones sinópticos asociados, directa o indirectamente a eventos extremos de $MP_{2,5}$, se podría mejorar el pronóstico diario de episodios de contaminación atmosférica, identificar mejores lugares desde el punto de vista de la calidad del aire, para la instalación de ciudades o zonas industriales que tengan emisiones de contaminantes atmosféricos, estimar el impacto de un clima cambiante, sobre la calidad del aire en una ciudad como Coyhaique, entre otros aspectos.

En Chile los niveles de concentración que determinarán situaciones de emergencia ambiental para $MP_{2,5}$ están definidos en el artículo 5° del DS N.º 12, 2011, de la República de Chile (<http://bcn.cl/1uyym>). Según esta norma, se verifican niveles diarios (d) de alerta, preemergencia y emergencia con concentraciones de $80-109 \mu g/m^3d$, $110 - 169 \mu g/m^3d$ y mayor o igual $170 \mu g/m^3d$ respectivamente, para promedio de veinticuatro (24) horas (Ver anexo 10.2). Según estudios previos del MMA en Coyhaique, las concentraciones con nivel de emergencia por $MP_{2,5}$, se vinculan a días de alta emisión, bajas temperaturas y escasa ventilación superficial (*MMA, 2018*). Dichas condiciones se intensifican durante el invierno, de manera particular, en horas de la noche hasta el amanecer. Estudios realizados por la autoridad ambiental indican que casi la totalidad de las emisiones de $MP_{2,5}$ en la ciudad están asociadas a la combustión de leña residencial utilizada para la calefacción y cocción de alimentos (*Silva et al., 2017*). Este consumo se incrementa durante días y horas de baja temperatura (*Saide et al., 2016*). De acuerdo con información oficial entregada por el MMA, en el año 2016 se registraron 63 episodios de emergencia, 37 preemergencias y 27 alertas (MMA 2019), siendo el año más crítico del período 2013 y 2020.

Lo anterior tiene severas consecuencias sobre la salud de las personas tanto en términos de mortalidad como de morbilidad (e.g., *Huneeus et al., 2020; Ruiz et al., 2010; Díaz-Robles et al., 2014; Barría et al., 2016; World Health Organization, 2016; Anenberg et al., 2019*). Lo anterior ha llevado a las autoridades ambientales a establecer un plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante (DS. N.º 7, 2019 de la República de Chile <http://bcn.cl/2aru9>) (Ver anexo 10.2).

Como se especificará más adelante, este trabajo contribuye a la identificación de los patrones sinópticos concurrentes con niveles de emergencia por $MP_{2,5}$, información que podrá ser utilizada como base para el pronóstico de episodios y, eventualmente, para la evaluación de condiciones de ventilación en un clima cambiante.

En las secciones siguientes de este capítulo se presentan en más detalle algunos de los antecedentes antes discutidos. También se indica la motivación y objetivos de este trabajo. t

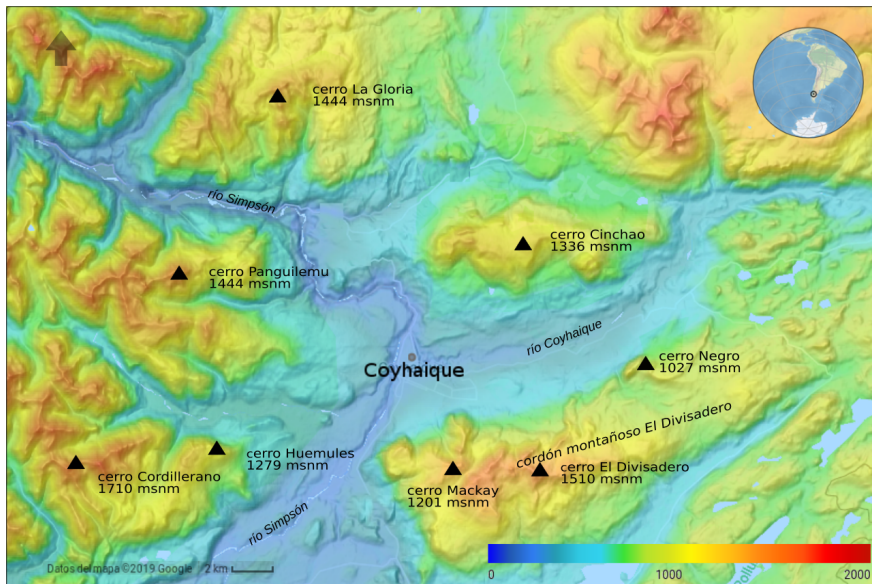


Figura 1.1: Ubicación de la ciudad de Coyhaique y topografía circundante. Confección Propia. Fuente de datos: Modelo de elevación digital ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) dataset (ASTGTM) versión 2 (v2), NASA; Google Maps, Cartopy Python

1.1. Antecedentes

1.1.1. Geografía física de Coyhaique

La ciudad de Coyhaique se ubica en la zona austral de Sudamérica, en parte occidental de la Patagonia Chilena, en la Región de Aysén. Un rasgo morfológico dominante del territorio es la presencia de la cordillera de los Andes, la que atraviesa toda la región política. La cordillera tiene una influencia tanto en el clima del territorio como en la circulación local (*Garreaud et al., 2013; Viale y Garreaud, 2015*). La ciudad se emplaza sobre un valle semi cerrado, junto a la intersección del río Coyhaique y río Simpson (Ver figura 1.1). Este centro urbano se sitúa a una altura aproximada de 330 m s.n.m. a los pies del cerro “Mackay” (1.201 m s.n.m. al sur de la ciudad) entre el cordón montañoso “El Divisadero” (1.510 m s.n.m. ubicado al sureste de la ciudad), el cerro “Cinchao” (1.336 m s.n.m. al norte de la ciudad) y cerro “Cordillerano” (1.710 m s.n.m. sur oeste de la ciudad).

Climatología de la zona de estudio

De acuerdo con la clasificación de *Köppen-Geiger*, Coyhaique se emplaza en un Clima Templado, sin estación seca y verano cálido (CFb) (*Beck et al., 2018*), como se ilustra en la 1.2. Las precipitaciones anuales alcanzan 1025 ± 181 mm/año y una temperatura media anual de 8.2 ± 0.5 °C según se registra en la estación “Aeródromo Teniente Vidal”, situado a 1 km de la ciudad de Coyhaique (periodo 1990-2019). Esto se ilustra en la figura 1.3.

En Coyhaique, las temperaturas a lo largo del año generan una demanda por calefacción

de 10 a 11 meses al año (*Ulriksen et al., 1979*). En particular en los meses de invierno se registran las menores temperaturas mensuales, en torno a los 5°C. El ciclo diario de temperaturas en el invierno muestra un máximo alrededor de las 15:00 horas y un mínimo en la noche, especialmente al amanecer en torno a las 08:00 horas dependiendo de la época del año (ver figura 1.4).

En la región, domina la circulación general de vientos del oeste (figura 1.4). Esto favorece el paso sucesivo de sistemas de alta y baja presión por el territorio. Esta franja latitudinal se conoce como “corredor de tormentas”, debido al paso recurrente de sistemas baroclínicos, e.g., (*O’Kane et al., 2014*). La circulación general se ve influenciada por una compleja orografía local lo que provoca, entre otros, un descenso de la rapidez del viento, como se ve en la figura 1.4.

El viento superficial muestra un ciclo estacional marcado con valores mínimos en invierno y máximos en verano (figura 1.5). Dada la circulación general dominante, el viento en superficie, tanto en frecuencia como en intensidad, es del oeste (O) (figura 1.6). Esta condición se observa durante todos los meses del año. No obstante aquello, en el invierno se incrementa la frecuencia de la dirección noreste - este del viento (NE-E), sin llegar a ser dominante. El ciclo diario invernal (ver figura 1.6) tiene un mínimo de rapidez en horas de la noche y un máximo alrededor de las 15:00 horas (hora local). De igual manera, durante las noches de invierno, es cuando las componentes del viento del este (E) y sur (S) tienen una influencia relativa mayor, situación que podrían estar asociadas con fenómenos catabáticos (ladera abajo) y debilitamiento del viento zonal en altura (figura 1.7).

La interacción del viento del oeste, cargado de humedad oceánica, con la cordillera de los Andes, facilita la precipitación orográfica (*Garreaud et al., 2013*). Esto conforma un “biombo climático” con una importante variabilidad longitudinal de las precipitaciones (*Viale y Garreaud, 2015*), lo que depende de la vertiente cordillerana en la que se encuentre la medición de la lluvia. En particular, la ciudad de Coyhaique se halla en una zona de transición climática, entre una región hiperhúmeda templada en la costa oeste de la Patagonia y una zona árida fría ubicada al este, vale decir, la Pampa Argentina (*Garreaud, 2018*).

1.1.2. Gran escala asociada a altas concentraciones de material particulado

Las condiciones meteorológicas de gran escala o sinóptica, sobre un territorio cordillerano como el de Aysén, son alterados de manera significativa por su topografía compleja. Esto genera múltiples interacciones mecánicas y termodinámicas (*Stull, 1988; Daly et al., 2010*), afectando la ventilación sobre una cuenca atmosférica como la de Coyhaique. Por ejemplo, en los valles de lugares montañosos se observa una disminución en la magnitud del viento, cambio en su dirección y la conformación de una serie de fenómenos de circulación local como lo son: viento valle montaña, apozamiento atmosférico, viento catabático, viento anabáticos, rotores, entre otros (*Collaud Coen et al., 2011; Whiteman et al., 2014; Zhang et al., 2016*).

De igual forma, la variabilidad natural de los fenómenos meteorológicos de gran escala, modulan la atmósfera local afectando las concentraciones de contaminantes atmosféricos su-

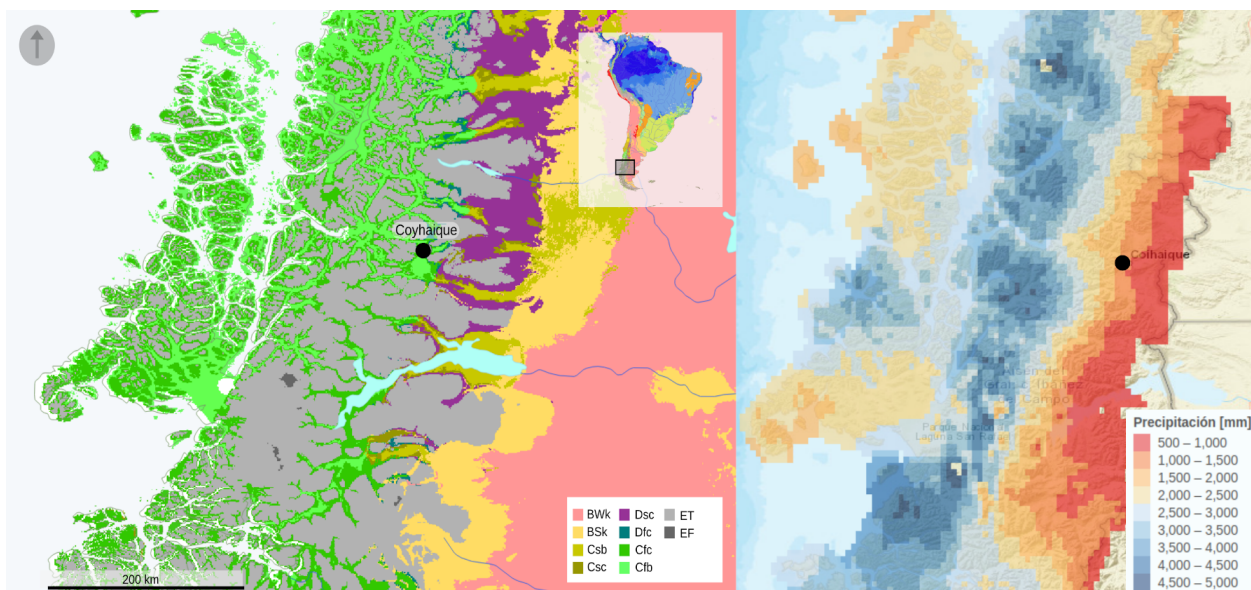


Figura 1.2: Panel izquierdo: Clasificación climática de la Región de Aysén de Köppen-Geiger, para el periodo 1980-2016, Coyhaique (círculo negro) **BWk:** desierto árido frío; **BSk:** Estepa árida fría; **Csb:** Templado, veranos seco y cálido; **Csc:** Templado, verano seco y frío; **Dsc:** Continental verano seco y cálido; **Dfc:** Continental, sub ártico; **Cfc:** Templado, verano frío y húmedo; **Cfb:** Templado, verano cálido y húmedo; **ET:** Tundra polar Clasificación climática de la Región de Aysén de Köppen-Geiger, para el periodo 1980-2016, Coyhaique (círculo blanco) **EF:** Polar (Fuente(Beck et al., 2018) **Panel derecho:** Precipitación anual acumulada (Fuente: modelo cr2met) (plano extraído directamente de explorador de lluvias del CR2 <https://mawun.cr2.cl/>)

perficiales. Dentro de estos procesos que son influenciados por la gran escala, se encuentra altura de la capa de mezcla superficial, transporte y dispersión del contaminante, transformación y remoción fisicoquímica, entre otros aspectos (Zhu 2012; Hakim 2018; Yang 2017). Por ejemplo, los ciclones y frentes meteorológicos suelen presentar vientos intensos e inestabilidad atmosférica, lo que genera una buena mezcla vertical y facilita la dispersión y el transporte de los contaminantes atmosféricos a otros territorios (Cooper et al., 2001; Li 2005; Tai et al., 2012). Adicionalmente, si los sistemas frontales dan lugar a precipitación, se incrementa la probabilidad de que ocurran procesos de deposición húmeda de los contaminantes atmosféricos, como se verá más adelante. A una escala local, la mayor turbulencia o mezcla cerca de la superficie favorece los procesos de deposición seca (Wesely e Hicks 2000).

Por otra parte, intensos anticiclones (alta presión) pueden estar asociados a fenómenos superficiales denominados estancamiento atmosférico (EA) (Davis y Kalkstein, 1990; White-man et al., 2014) y han sido vinculados con episodios críticos de contaminación atmosférica en zonas urbanas principalmente (Horton et al., 2012,2014). Dentro de las características de los EA se encuentra: presentar un lento desplazamiento del fenómeno sinóptico; viento débil en algunas zonas próximas a la superficie y movimiento descendente del aire desde tropósfera media, fenómeno que es conocido como subsidencia. Esta última característica, de viento descendente o de subsidencia, provoca una compresión adiabática del aire, calentándolo desde la altura. Este calentamiento genera perfiles termodinámicamente más estables, es decir capas cálidas de la atmósfera ubicadas por sobre capas frías, lo que da como resultado una inversión térmica vertical o un aumento de la temperatura potencial con la altura (Stull 1988; Wang y Angell, 1999; Lu y Zhong 2014). La inversión térmica inhibe la mezcla vertical de los con-

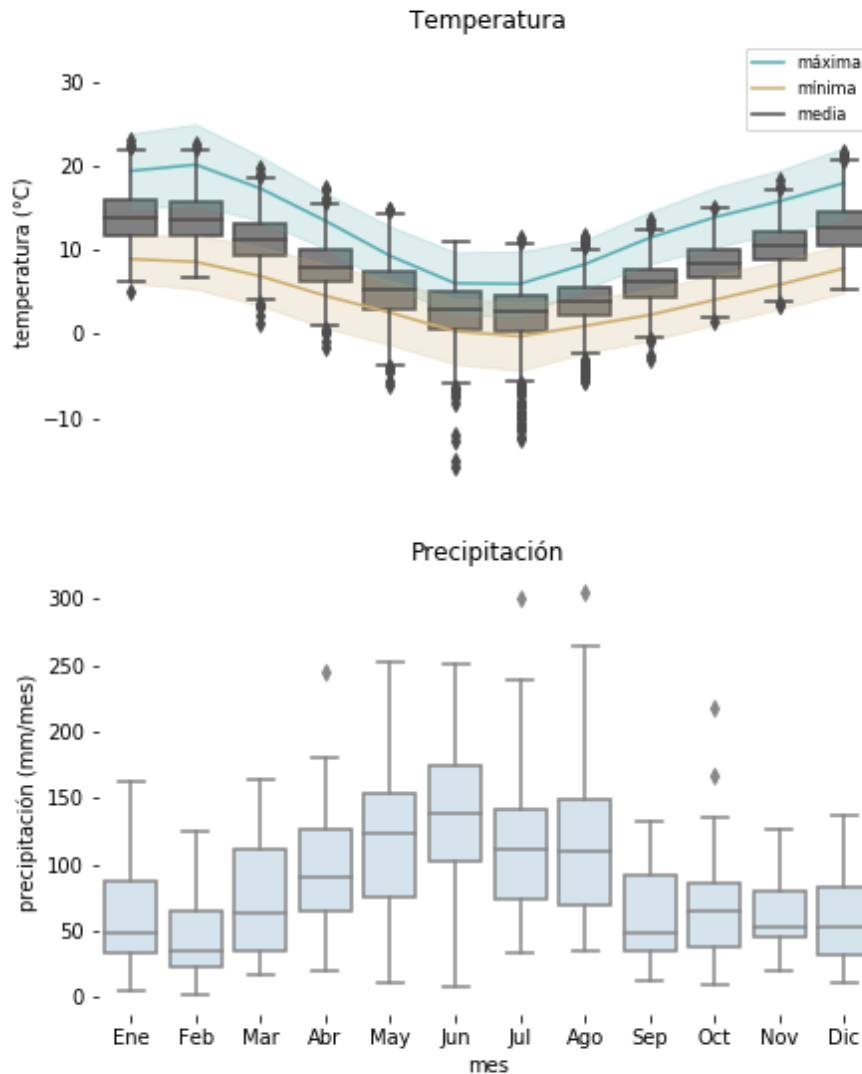


Figura 1.3: Climatología de temperatura promedio mensual calculada a partir de media, mínima y máxima diaria (panel superior) y precipitación mensual acumulada de Coyhaique según datos registrados entre 1990 y 2019 en la estación Aeródromo Teniente Vidal de Coyhaique. Los datos fueron obtenidos desde <http://explorador.cr2.cl/>. El tipo de representación corresponde a un gráfico de cajas, y con él se busca representar aspectos relevantes de la distribución estadística de la muestra. Por ejemplo, si tomamos la caja del mes de enero, lo que está contenido dentro de la caja representa el 50 % de los datos, es decir entre 40 y 90 mm, se encuentra el 50 % de las precipitaciones de enero. La línea recta horizontal que cruza al medio de la caja representa el valor de la mediana, es decir, en este caso está en torno a los 50 mm. Por último, las líneas verticales que salen de la caja en la parte superior e inferior, también conocidos como bigotes, representan los datos que están dentro de la curva de distribución, pero que se encuentran fuera del 50 % de los datos. Los puntos son los valores atípicos que se salen de la curva de distribución. Más detalles de gráficos de caja ver Anexo 10.12 figura 10.22

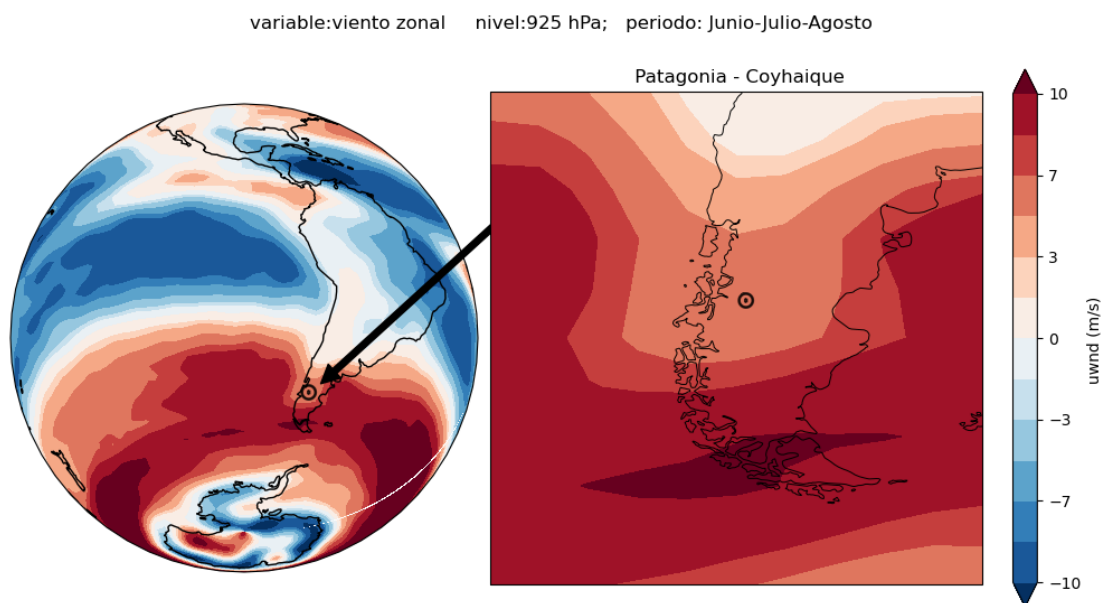


Figura 1.4: Climatología de viento zonal (en m/s) calculado a partir de los datos del reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR) período 1991-2020. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

taminantes, y puede llegar a provocar un confinamiento de los contaminantes atmosféricos cuando son emitidos en las zonas bajas de la tropósfera, próximas al suelo dentro de la capa de mezcla (*Leibensperger et al., 2008; Bressi et al., 2013; Tai et al., 2010; Dawson et al., 2014*). Esta situación acelera el incremento de la concentración de los contaminantes que son emitidos en superficie, al existir un menor volumen de aire en que diluirse. Estas condiciones se pueden agudizar en horas de la noche y madrugada, momento en que se suele generar una inversión térmica nocturna, por una mayor pérdida radiativa superficial favorecida por noches de escasa o nula nubosidad, Chilead (*Daly et al., 2010*), condición normal de observar en días con EA. Adicionalmente, bajo condiciones adecuadas de radiación y gases precursores, durante un EA se puede provocar un incremento en la formación de material particulado de origen fotoquímico (*Whiteman et al., 2014*). Por el contrario, los procesos comunes que facilitan el descenso de las concentraciones de contaminantes atmosféricos como el transporte, la deposición seca por impactación y húmeda se encuentran debilitados durante este tipo de eventos.

Ejemplos de correlaciones y variables atmosféricas estudiadas han sido descritas para la temperatura (*Aw y Kleeman, 2003*), la intensidad del viento (ejem *Tie et al., 2015*), la humedad y la cobertura nubosa (*Shahgedanova et al., 1998*). Estudios de sensibilidad realizados con modelos de transporte químico (MTQ) unidos a modelos de circulación general (MCG) han permitido mejorar la comprensión de los procesos que afectan la concentración de MP urbano (*Jacob y Winner, 2009*). De acuerdo con estos autores, existe una correlación positiva entre las concentraciones de MP y el EA; así mismo se observa una correlación negativa entre las altas concentraciones de MP y la altura de capa de mezcla y la precipitación (Ver Tabla 1.1).

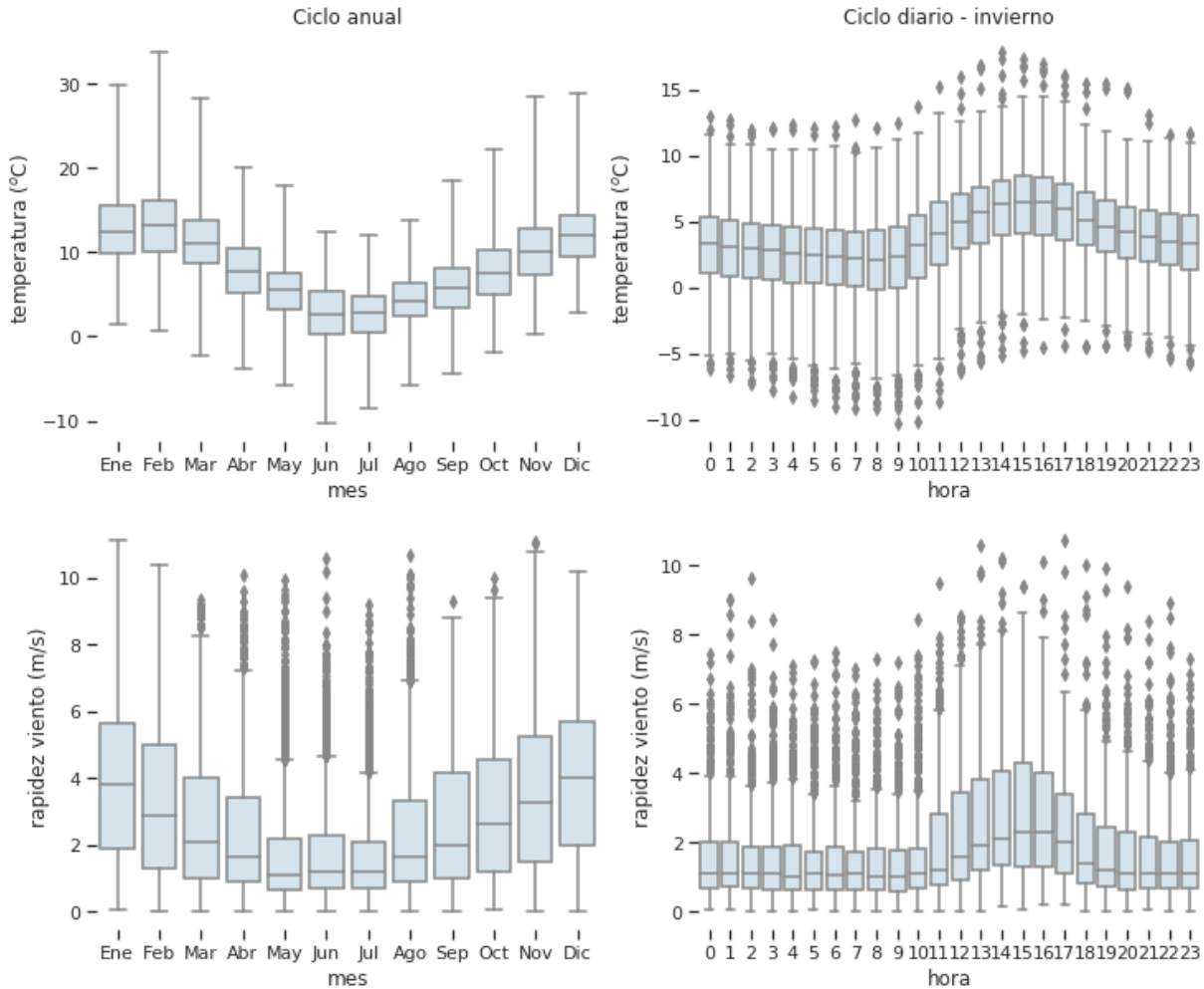


Figura 1.5: Ciclo estacional (izquierda) y ciclo diario (de invierno; derecha) de temperatura (en °C; arriba) y rapidez del viento (en m/s; abajo) en Coyhaique. Los datos provienen de la estación de calidad de aire COY1 manejada por el MMA para el período entre 2014 y 2019. Fuente de datos: <https://sinca.mma.gob.cl/>. Para ver la ubicación de la estación puede ver la figura 1.9. Más detalles de gráficos de caja ver Anexo figura 10.22

Tabla 1.1: Dependencia de la calidad del aire superficial y variables meteorológicas según (Jacob y Winner, 2009)

<i>Variable</i>	<i>MP</i>
Temperatura	generalmente negativa (-)
Estancamiento atmosférico	consistentemente positivo (++)
Velocidad del viento	generalmente negativa (-)
Altura de mezcla	consistentemente negativa (-)
Humedad	generalmente positiva (++)
Cobertura de nubosa	generalmente negativa (-)
Precipitación	consistentemente negativa (-)

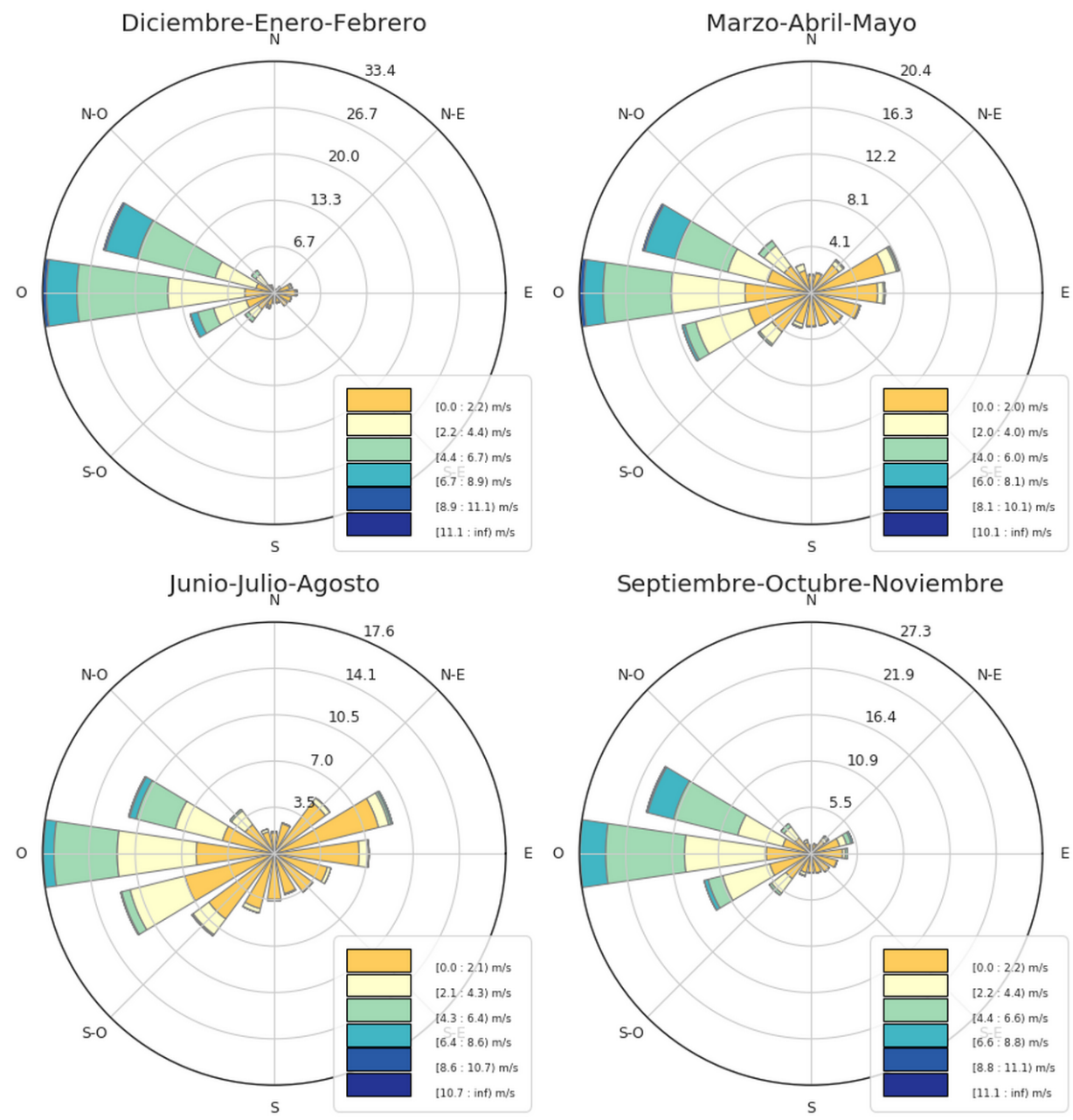


Figura 1.6: Rosa de vientos estacional de la dirección (frecuencia acumulada en grados) y rapidez del viento (en m/s color) en Coyhaique. Los datos provienen de la estación de calidad de aire COY1 manejada por el MMA para el período entre 2014 y 2019. Fuente de datos: <https://sinca.mma.gob.cl/>

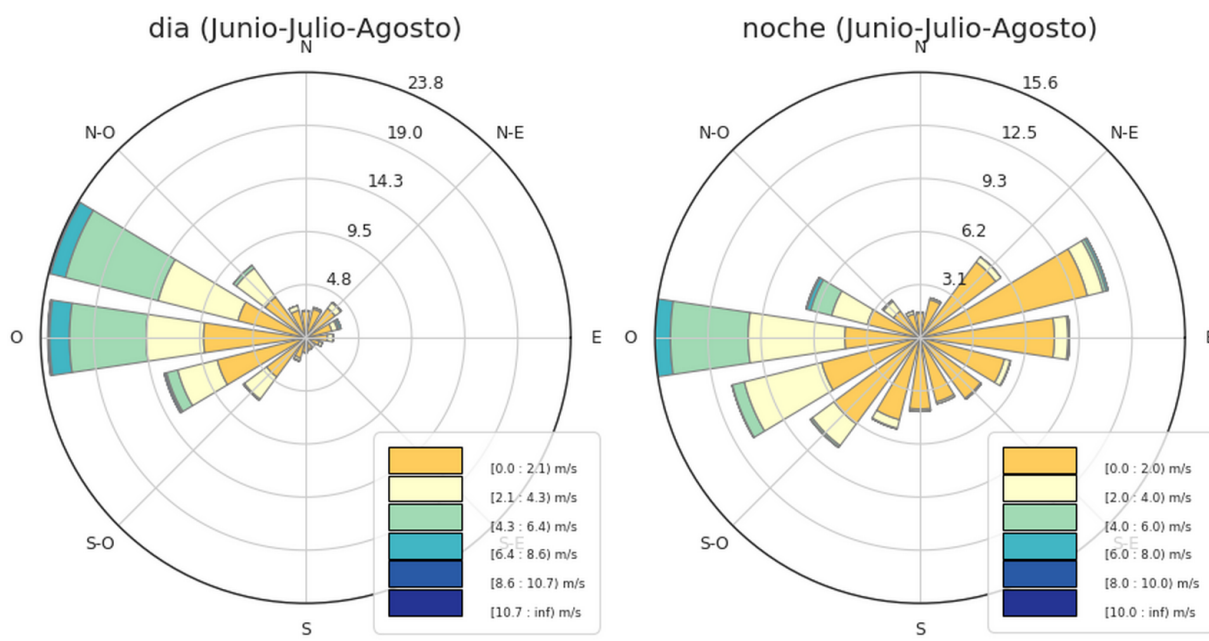


Figura 1.7: Rosa de vientos invernal, día (panel izquierdo) y noche (panel derecho) de la dirección (frecuencia acumulada en grados) y rapidez del viento (en m/s color) en Coyhaique. Los datos provienen de la estación de calidad de aire COY1 manejada por el MMA para el período entre 2014 y 2019. Fuente de datos: <https://sinca.mma.gob.cl/>

No obstante, en los últimos años, investigaciones sobre extensos territorios, en el que se involucra una importante cantidad de ciudades y fuentes de emisión (China y Estados Unidos), han sugerido una reevaluación del impacto que tiene él EA sobre la calidad del aire (*Kerr y Waugh 2018; Yang et al., 2017; Huang et al., 2018*). En particular indican tener precaución al inferir cambios futuros en la contaminación atmosférica basándonos únicamente en cambios proyectados del EA, bajo condiciones de cambio climático. En este sentido, en ocasiones es posible observar en Coyhaique, en la medida que se intensifica una anomalía de alta presión, durante un proceso de EA, un incremento de la magnitud del viento del este (E), lo que mejora las condiciones de ventilación. Consecuentemente, se observa una disminución de la concentración del $MP_{2,5}$ en la ciudad, lo que a primera vista parece un resultado no esperable. Es decir, un mismo patrón meteorológico de gran escala, en una misma ubicación, puede influenciar de manera distinta la concentración de un contaminante atmosférico. En síntesis, la suma de todos procesos que ocurren durante un evento de EA (u otro) que afectan la concentración de un contaminante, como MP, pueden tener en algunas ocasiones, correlaciones débiles o poco significativas. Estas son difíciles de entender si únicamente se observa la relación estadística (*Kerr y Waugh 2018*), sin tener en cuenta aspectos de la meteorología local o el comportamiento fisicoquímico del contaminante.

Un ejemplo de configuración meteorológica de gran escala resultante en eventos de EA en latitudes medias, corresponden a los bloqueos atmosféricos (*Hoskins y James 2013; Cash y Lee 2000*). Esta configuración se caracteriza por una duración que en algunos casos supera la escala sinóptica. Es decir, entre tres y quince días de persistencia en torno a una determinada región. Los bloqueos atmosféricos generan subsidencia y calentamiento adiabático en toda la tropósfera. En el caso de Patagonia, ello provoca, entre otros aspectos, un aumento de la

estabilidad vertical y un debilitamiento o inversión del viento zonal (*Horton et al., 2012*). En este sentido, factores como una menor magnitud del viento superficial y altura de mezcla reducida, inhiben la ventilación en las capas de aire cercanas al suelo, lo que afecta negativamente la capacidad que tiene la atmósfera para dispersar y diluir contaminantes emitidos desde la superficie.

Las proyecciones de escala global realizadas por *Horton et al. (2012-2014)* y *Hou y Wu, (2016)*, indican un incremento en la ocurrencia de episodios meteorológicos extremos de EA lo que podrían favorecer un aumento del número de eventos de contaminantes como ozono (O_3) y $MP_{2,5}$. En particular, la zona que incorpora a la ciudad de Coyhaique, *Horton et al., (2012)* estima un aumento absoluto en torno a los 9 días de EA al año, para fines del siglo XXI, bajo condiciones de cambio climático. Este resultado concuerda con los datos entregados desde los modelos de globales de cambio climático en viento superficial, en los que el panel intergubernamental de expertos por el cambio climático (IPCC), prevé una disminución de aproximadamente de -4 m/s para el escenario más crítico (SSP5-8.5) (*Atlas IPCC 2021, <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>*).

Dada la evidencia actual, que, por una parte, nos indica que los EA están asociados a un aumento de la contaminación atmosférica en superficie, pero también nos plantea que se debe tener precaución al momento de generalizar esta aseveración. De acuerdo a los antecedentes expuestos, consideramos esencial que los futuros estudios contemplen, a lo menos, la relación que existe entre los fenómenos de gran escala con los factores meteorológicos locales relevantes que afectan las concentraciones de contaminantes atmosféricos emitidos desde la superficie. En este sentido, pensamos que esto también es necesario de evaluar en un análisis como Coyhaique. Adicionalmente, en investigaciones que consideren las proyecciones climáticas de calentamiento global se debe tener presente que, en un planeta más cálido, la demanda térmica de los hogares podría disminuir afectando de manera directa el consumo de leña asociado a la calefacción. Esto último podría ser positivo al disminuir las emisiones de $MP_{2,5}$ atmosférico.

1.1.3. Material particulado fino: fuentes, transformaciones e impactos

El material particulado (MP) se refiere a aerosoles o partículas presentes en la atmósfera (ver figura 1.8). Las partículas pueden emitirse directamente a la atmósfera (partículas primarias) o formarse in situ por la oxidación de gases precursores (partículas secundarias), como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV) (*Seinfeld y Pandis, 1998*). Los productos de oxidación resultante, se puede nuclear para formar nuevas partículas o se condensan sobre partículas preexistentes (*Zhang et al., 2015*).

En función del diámetro de la partícula (D_p), existen diversas clasificaciones de MP, de acuerdo con su abundancia, volumen, origen, grado de penetración en humanos, etc. (*Heintzenberg et al. 2002*). De acuerdo con su origen (tamaño), se pueden clasificar en modos llamados de nucleación ($D_p < 0,01\mu m$), Aitken o ultrafino ($0,01\mu m < D_p < 0,1\mu m$), acumulación ($0,1\mu m < D_p < 1\mu m$) y grueso ($D_p > 1\mu m$) (ver figura 1.8). Cada uno de estos

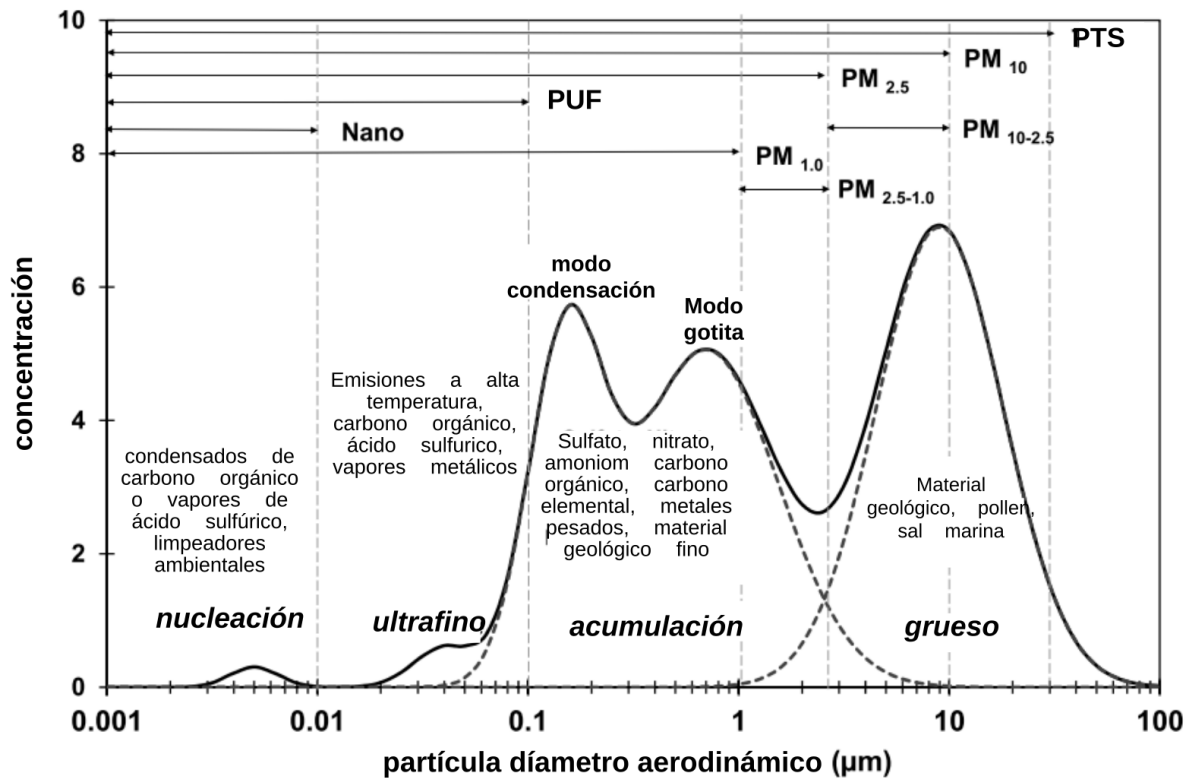


Figura 1.8: Ejemplo idealizado de una distribución de tamaño de partícula ambiental, siguiendo el modelo de Chow (1995) y Watson et al., (2002). PTS = partículas totales suspendidas. PUF = Partículas ultrafinas. Nano = nanopartículas. Adaptada de *Cao et al.* (2013)

modos son el resultado de un proceso específico de formación. Por ejemplo, la nucleación corresponde al paso de gas a partícula. El modo Aitken está asociado a condensación y coagulación de las partículas más finas. La formación de partículas por reacciones químicas en gotas de agua y la coagulación son típicamente observadas en el modo de acumulación (*Cao et al.*, 2013). Por último, la formación de partículas gruesas está dominada por procesos mecánicos como la fractura y desgaste de materiales a través de olas o viento.

Según su tamaño y método de medición, en contextos legislativos en donde aspectos relacionados con la salud son relevantes, se suele considerar una clasificación de aerosoles por tamaño, distinguiéndose partículas de diámetro aerodinámico menor a $10 \mu\text{m}$ (MP_{10}), $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) y $1 \mu\text{m}$ (MP_1) y denominándose gruesas, finas y ultrafinas respectivamente (*EPA*, 1991; *EPA*, 2005; *Squizzato et al.*, 2016). En la legislación ambiental chilena, se define como MP respirable fino al $\text{MP}_{2,5}$, y MP respirable al MP_{10} (DS N° 12, 2011, <http://bcn.cl/1uyym>).

Dentro de las fuentes antropogénicas la combustión residencial es la principal fuente primaria de MP nivel global, aportando aproximadamente un 45% de las emisiones de $\text{MP}_{2,5}$ y menos de un 40% de las emisiones de MP_{10} (*Klimont et al.*, 2017). Otras fuentes primarias antropogénicas de MP son en orden de importancia: los procesos industriales, la combustión a gran escala (grandes hornos empleados para la industria y termoeléctricas), la agricultura (quemadas agrícolas y emisiones de amonio de las operaciones agrícolas), transporte sobre

carreteras, transporte naviero, quema de desechos, entre otros (ver Tabla 1.2).

Formación secundaria de material particulado

Corresponde a aquella fracción de MP que es generada en la misma atmósfera a partir de transformación de contaminantes gaseosos en procesos de oxidación, condensación y coagulación (*Kroll y Seinfeld, 2008*). Los mayores precursores de MP en la atmósfera son SO_2 , NO_x (NO y NO_2), NH_3 y compuestos orgánicos volátiles (COV) (*Dawson et al., 2014*). El MP orgánico está conformado principalmente por MP de origen secundario (*Shiraiwa y Seinfeld, 2012*). Su formación es producto de múltiples oxidaciones de compuestos orgánicos volátiles (COV), donde se generan compuestos de baja volatilidad, más higroscópicos y fases condensadas (*Jimenez et al., 2009*), conformados por sustancias orgánicas e inorgánicas. Existen fuentes naturales y antrópicas relacionadas con la formación de aerosol secundario (*Figueruelo y Marino, 2004*). La formación secundaria de aerosoles orgánicos es un tema de gran interés, dado el grado de incerteza que se tiene en su formación y las implicancias que puede tener tanto a nivel local como global, en temas relacionados con el balance radiativo (*Bellouin et al. 2005*).

Tabla 1.2: Emisiones globales divididas por actividad en el 2010 en Gg/año (fuente: *Klimont et al., 2017*)

Actividad	MP₁₀ <i>Gg/año</i>	MP_{2,5} <i>Gg/año</i>	MP1 <i>Gg/año</i>	Carbono Negro <i>Gg/año</i>
Agricultura	6555	3848	2883	337
Combustión Residencial	23078	21857	20742	4163
Procesos Industriales	12162	8340	4135	462
Combustión gran escala	11561	6420	3812	136
Minería gasolina y gas	1706	571	412	226
Transporte en carretera	3339	2925	2524	1349
Transporte no en ruta	861	823	795	363
Quema desechos	1388	1272	876	97
Transporte naviero	1856	1758	1612	120
Aviación	30	30	28	10
Globales Antropogénicos	62537	47843	37819	7264
Incendios forestales y sabana	48207	33014	33014	2268
Balance Global	110744	80858	70834	9532

Remoción del material particulado

Los principales procesos involucrados en la eliminación de partículas desde la atmósfera son la deposición húmeda (involucrando hidrometeoros), la sedimentación y la deposición seca (*Wesely e Hicks, 2000; Zhang et al., 2003*). La sedimentación sucede por efecto del campo gravitatorio sobre el aerosol y está asociada a la densidad de la partícula y puede ser evaluada mediante la ley de Stokes (*Figueruelo y Dávila, 2004*). La transferencia de masa a una superficie, que no sea por lluvia, se define como “deposición seca” (*Dolske y*

Gatz, 1985). La deposición podría ocurrir sobre superficies como árboles, hierbas, cultivos, cuerpos de agua, construcciones, seres humanos, etc. La velocidad de la deposición seca depende en gran medida del tamaño de la partícula (*Petroff y Zhang, 2010*) y de ella se puede distinguir la sedimentación gravitacional (potenciada por la turbulencia) y la difusión browniana. En el caso de las partículas mayores a $5 \mu\text{m}$ de diámetro (D_p) las moléculas que componen el aire -mayoritariamente nitrógeno molecular y oxígeno molecular- no son capaces de desviar su trayectoria y terminan impactando o interceptado sobre las superficies (*Zhang et al., 2003*). En cambio, las partículas de tamaños menores a los $0,1 \mu\text{m}$ de D_p , sus movimientos sí son afectados por las moléculas de aire, por lo que su velocidad de deposición depende del mecanismo denominado difusión browniana (*Figueruelo y Dávila, 2004*). En el caso de tamaños intermedios, los procesos antes descritos son poco significativos, por lo que su remoción por este camino es poco eficiente (*Mariraj, 2016*). Esto permite tiempos de residencia mayores en la atmósfera, facilitando su transporte por el viento por largas distancias (*Dirgawati et al., 2016*). El tiempo de vida medio de un aerosol en la atmósfera, varía entre unas pocas horas y unos pocos días (*Seinfeld y Pandis, 1998*). Las velocidades de deposición tienden a decrecer durante la noche y se incrementa sustancialmente en el día. Esto último es principalmente favorecido por las condiciones dinámicas inestables cercanas a la superficie (*Wesely e Hicks 2000*). En general factores como alta humedad relativa cercana a superficies, particularmente rugosas, tienen una buena eficiencia en la captura de partículas de distinto tamaño (*Wesely e Hicks 2000*).

Impactos y efectos sobre la salud

Recientes investigaciones muestran que a nivel global la contaminación atmosférica es la principal causa de muerte prematura en personas (*Errigo et al. 2020, WHO b 2016*) y únicamente el $\text{MP}_{2,5}$ representa el quinto factor de riesgo de muerte con 4,2 millones de personas fallecidas en el año 2015 (*Cohen et al., 2017*) y más de 103 millones de dólares en pérdidas económicas atribuibles a la pérdida de años de vida (*Schraufnagel et al. 2019*). Esta cantidad indica un incremento de las muertes en un 20 % a nivel mundial, respecto al año 1990. La situación intradomiciliaria no es mejor, se estiman 3.8 muertes al año asociadas al uso ineficiente de combustibles entre ellos la leña (*WHO 2019*). Estudios de la OMS (o WHO por su sigla en inglés), indican que un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ de las concentraciones anuales y diarias, generan un aumento del riesgo de mortalidad de 6 % y 1 % respectivamente (*WHO 2005*).

Las primeras regulaciones de MP orientadas a la protección de la salud por la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) son del año 1987. En ellas se definieron las concentraciones máximas permitidas para el MP con diámetro aerodinámico inferior a $10 \mu\text{m}$ (MP_{10}) y en 1997 otro para material $\text{MP}_{2,5}$ (*Cao et al., 2013*). En el año 2000 y 2005, la OMS elaboró guías de riesgo para $\text{MP}_{2,5}$ (*WHO 2005*), las que fueron actualizados en 2013 (*WHO 2013*). Estos definen límites de concentración recomendables para evitar impactos adversos sobre la salud de la población causando muertes prematuras, incrementos en la mortalidad, morbilidad y admisiones hospitalarias.

La fracción gruesa del MP o MP_{10} , al ser inhalada por los humanos, dado su tamaño, queda retenida en la parte superior del sistema respiratorio (región torácica). En cambio, la fracción

fina ($MP_{2,5}$) puede penetrar en las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones y traspasar los alvéolos, incorporándose al torrente sanguíneo (*Kodros et al., 2018*). En cuanto a individuos se describen una serie de efectos, crónicos y agudos del $MP_{2,5}$. Por ejemplo aumento de los casos de asma y sus síntomas, acrecentamiento del riesgo de infartos al miocardio, inflamación pulmonar, inflamación sistémica, disfunciones endoteliales y vasculares, desarrollo de un tipo específico de aterosclerosis, mayor incidencia de infecciones y cáncer relacionado con el sistema respiratorio (*Neira y Prüss-Ustün, 2016; Zhang et al., 2018; Li et al., 2018, Campbell y Prüss. 2019*).

Impactos radiativos

Dependiendo de su composición y tamaño, los aerosoles interactúan a través de diversos procesos con la radiación electromagnética, tanto en el espectro solar como terrestre (*Seinfeld y Pandis, 1998 y Fiore et al., 2015*). Además, el MP pueden actuar como núcleos de condensación de agua y hielo (*Boucher et al., 2013*). Lo anterior se traduce en impactos sobre la visibilidad (e.g., *Xue y Liu, 2014; Liu et al., 2017; Singh et al., 2017*) y el clima (e.g., *Stocker et al., 2013; Boucher et al., 2013; Fiore et al., 2015; Masson-Delmotte et al., 2018 y Westervelt et al., 2018*). Se estima que, globalmente, los aerosoles tienen un forzamiento climático de $-1,2 W/m^2$ (i.e., enfriamiento) pero con un rango de incerteza significativo (-0.4 y $-2.7 W/m^2$) (*Stocker et al., 2013*). Por otro lado, regionalmente el forzamiento por aerosoles puede ser mucho mayor (*Shindell et al., 2015; Mallet et al., 2016*).

A escala local, se ha descrito una retroalimentación negativa entre el MP y el desarrollo de la capa límite planetaria como describen algunos estudios (*Xing et al. 2016, Qu et al. 2018*). Dichos estudios muestran que mayores concentraciones de MP generan una atenuación de la radiación solar que llega a la superficie. Esto afecta negativamente el mecanismo de desarrollo de la capa límite diurna, incrementado aún más las concentraciones de MP en zonas superficiales ya contaminadas. Otros estudios han mostrado que los aerosoles en la tropósfera baja pueden ayudar al calentamiento del aire en el tope superior de la capa límite y disminuir el calentamiento en la superficie, lo que provoca una estabilización vertical de la atmósfera local (*Wang et al. 2013; Wilcox et al., 2016; y Huang et al. 2016*).

1.1.4. Emisiones de $MP_{2,5}$ en Coyhaique

La combustión de leña para calefacción residencial es una fuente significativa de aerosol atmosférico en Chile y en el mundo, siendo de uso común en regiones con climas templados a fríos (*Beekmann et al., 2015; Villalobos et al., 2017; Vicente y Alves, 2018*). A nivel global, se estima que aproximadamente 2,8 millones de personas queman biomasa o carbón para uso residencial en calefacción y cocina (*Bonjour et al., 2013; Bailis et al., 2015*). En Chile, la quema de leña prevalece como combustible para la calefacción en la zona centro y sur (*Huneus et al., 2020; Schueftan et al., 2016*).

En el caso de Coyhaique para el año 2013, él 98% de las viviendas encuestadas declara utilizar leña como combustible (*MMA 2018*). El consumo anual de leña para calefacción

en la ciudad se estima en 485.368 metros cúbicos estéreos por año, según se especifica en la actualización de inventario de emisiones para Coyhaique para el año 2016 (*Silva et al., 2017*). Las principales especies arbóreas ocupadas como leña son la lenga (71 %) y el ñire (23 %) (*Sáez et al., 2015*). La humedad de la leña es uno de los parámetros esenciales que disminuye la eficiencia de su combustión e incrementa las emisiones de $MP_{2,5}$ a la atmósfera. Es así como *Guerreiro et al., (2019)*, con leña de eucaliptus con un 0 % de humedad han registrado emisiones de $MP_{2,5}$ de 2,3 a 3,15 g/h. En cambio, para una de humedad de la leña de 25 % las emisiones se incrementaron en diez veces (27 a 36 g/h). En el caso de Coyhaique la calidad de la leña declarada por la población es 62 % mixta (leña húmeda y seca), 49 % seca y 22 % húmeda (*MORI 2015*).

En cuanto a las emisiones, existen dos inventarios para Coyhaique: uno para el año base 2009 (*Conama, 2009*) y una actualización para el año base 2016 (*Silva et al., 2017*). En estos inventarios, la quema de leña para calefacción residencial y cocción de alimentos representan el 95 % y 98 % de las emisiones directas de MP_{10} y $MP_{2,5}$ respectivamente. Los flujos de emisiones se indican en la tabla 1.3. Otras fuentes de $MP_{2,5}$, como fuentes móviles representan un aporte marginal de un 0,2 % de las emisiones totales de $MP_{2,5}$; asimismo las calderas y las quemas agrícolas, en conjunto no superan el 0,1 % de las emisiones (*Silva et al., 2017*).

Tabla 1.3: Inventarios de emisiones en Coyhaique para los años base 2009 y 2015. Fuente: *Silva et al., 2017*

Sector	Inventario 2009		Inventario 2017	
	MP_{10} kton/año	$MP_{2,5}$ kton/año	MP_{10} kton/año	$MP_{2,5}$ kton/año
Residencial	7,2	7,0	6,6	6,2
Fuentes móviles	0,05	-	-	0,01
Grandes consumidores	0,4	0,4	-	-
Calderas	-	-	0,09	0,07
Quemas agrícolas y forestales	0,04	0,04	0,0	0,0
Total	7.6	7,4	6,6	6,3

Estudios de percepción de consumo de leña de la población, indican un aumento relativo del uso mensual durante los meses de invierno (*Conama et al., 2009*). Es así como el 97 % de la población declara ocupar ocho o más horas al día las estufas en invierno (*MORI 2015*). Este resultado se condice con las menores temperaturas registradas en los meses de invierno, lo que genera una mayor demanda por calefacción para este periodo del año. Por ejemplo, a partir de los datos de temperatura del “*Aeródromo Teniente Vidal*” y sobre una temperatura de confort base de 15,5 °C se estima, para el periodo 2015-2019, una demanda de 243 grados Celsius día para los meses de verano (diciembre, enero y febrero), en comparación a los 1091 grados Celsius día que se necesitan para los meses de invierno (junio, julio y agosto) (calculado con www.degreeedays.net). Cabe mencionar que el término Grados Celsius Día corresponde a la sumatoria de la diferencia de temperatura horaria que se encuentran bajo un cierto umbral de confort y nos da una idea de la demanda térmica (energía) requerida para poder alcanzar dicho umbral de confort. En cuanto al comportamiento diario, los resultados del estudio MORI muestran que, en los días de semana, entre las 6:00 - 8:00 horas (76 %), es cuando se registra la mayor cantidad de encendido de estufas, en cambio, el mayor número de apagados de estufas ocurre entre las 22:00 y 00:00 horas (61 %) (*MORI 2015*).



Figura 1.9: **panel izquierdo:** Ubicación de las estaciones de calidad del aire de Coyhaique I (COY1) y Coyhaique II (COY2) de la red del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)(fuente adaptada de <https://sinca.mma.gob.cl/>). **panel derecho:** fotografía de la estación COY2 (imagen propia).

1.1.5. Mediciones de la calidad del aire en Coyhaique

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del MMA, administra y despliega de manera pública, los datos de calidad del aire de 183 estaciones superficiales ubicadas en distintas ciudades, localidades y centros industriales del país. En Coyhaique cuenta con dos Estaciones Meteorológicas con Representación Poblacional (EMRP) denominadas Coyhaique I (COY1) y Coyhaique II (COY2) (Ver Figura 1.9). Estas estaciones tienen como principal objetivo medir la concentración de contaminantes atmosféricos de modo que se permita evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente con el fin de resguardar la salud de la población.

Las estaciones COY1 y COY2, indicadas en la figura 1.9, cuentan con “resoluciones de representatividad poblacional” y están ubicadas a poca distancia entre sí (880 m) en la zona urbana de Coyhaique. Ambas estaciones se encuentran muy cercanas (menos de 10 metros de distancia) a las fuentes de emisión como calles transitadas por vehículos y salidas de calefactores a leña de viviendas (a menos de 50 metros de distancia). En las estaciones se registran concentraciones horarias de MP (MP₁₀ y MP_{2,5}) y variables meteorológicas, entre ellas, humedad relativa, temperatura y viento (Ver Anexo 10.2). En la estación COY2 también se miden otros contaminantes: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3).

Detalles relativos a la medición de MP completamente respirable se indican en la Tabla 1.4. Se han usado dos métodos de medición de MP: atenuación beta (*Macías y Husar, 1976*) y un método óptico (*Grimm y Eatough 2009; Grimm, 2010*). Cabe mencionar que la calidad de las mediciones ha sido evaluada por autores independientes del MMA (*Toro A. et al., 2015*) y en él se describe que no asegura plenamente la calidad de los datos provistos por

la Red SINCA. Los autores describen problemas en el procedimiento de aseguramiento de calidad de los datos presentados. Por este motivo es esencial validar nuevamente los datos entregados por la Red (Ver Anexo 10.1). Las mediciones de variables meteorológicas en las estaciones COY1 y COY2 se especifican en las Tablas del Anexo 10.4.

Las series de tiempo de las variables medidas son almacenadas como valores horarios en las bases de datos del MMA. Esta información se encuentra disponible en internet, con acceso público, en la página de SINCA: <https://sinca.mma.gob.cl/>.

Tabla 1.4: Ubicación, instrumentos, periodo de funcionamiento y método de medición para $MP_{2,5}$ en Coyhaique. Fuente: *Hanne (2016)*.

Estación	Coordenadas (latitud, longitud, altitud)	Método de medición	Equipo y referencia	Período de funcionamiento	Resolución de representatividad poblacional
COY1	45°34'47,4"S	Atenuación Beta EQM-0308-170	MetOne BAM1020(EQM-0308-170)	MP _{2,5} :2013-2020	EMPRP-MP _{2,5} Res. N°279 2015 del MMA, de la República de Chile
	72°03'40,3"O 333 m s.n.m.			MP ₁₀ :2007-2010	
COY2	45°34'45"S	Óptico Atenuación Beta O	GRIMM 180C (EQM-0311-195) MetOne BAM1020 (EQM-0308-170)	MP _{2,5} :2014-2020	EMPRP-MP _{2,5} Res. N°160 2015 del MMA, de la República de Chile
	72°02'60 255m s.n.m.			MP ₁₀ :2013-2020	

1.2. Motivación

Las variables meteorológicas de gran escala son conocidas como factores moduladores que se relacionan con los altos niveles de contaminación urbana. Identificar su comportamiento e influencia sobre la meteorología local ayudará a mejorar la comprensión de los mecanismos implicados en el desarrollo de los episodios extremos de $MP_{2,5}$ en Coyhaique.

Con dicha comprensión se espera incrementar la capacidad de anticiparnos a aquellos factores meteorológicos que provocan los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$. Adicionalmente, aportar con antecedentes objetivos a la discusión de la calidad del aire en un escenario de cambio climático y contaminación urbana en la región de Aysén.

Con esto se pretende que este trabajo aporte con nuevos antecedentes que contribuyan a una solución colectiva de la contaminación atmosférica en Coyhaique entre el Estado, la ciencia y la comunidad.

1.3. Objetivos

Identificar, analizar y describir las forzantes meteorológicas de escala sinóptica asociadas a concentraciones de material particulado fino o $MP_{2,5}$ que alcanzan el nivel emergencia, esto es, valores iguales o superiores a $170 \mu g/m^3$ promedio de 24 horas para el periodo 2014-2020, en la ciudad de Coyhaique.

1.3.1. Objetivos específicos

- Describir las concentraciones de $MP_{2,5}$ y las variables meteorológicas locales, empleando las observaciones superficiales de la Red de Calidad del Aire SINCA, en Coyhaique.
- Analizar las condiciones meteorológicas de gran escala como viento, temperatura, cobertura nubosa y altura geopotencial que modulan las condiciones de ventilación durante los episodios de emergencia de $MP_{2,5}$.
- Aplicar el conocimiento adquirido a un caso de estudio.

Capítulo 2

Metodología y datos empleados

2.1. Datos empleados

Para los fines de identificar días de emergencia por $MP_{2,5}$ se usaron los datos provistos por el Ministerio del Medio Ambiente a través del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA, <https://sinca.mma.gob.cl/>). Para ello se descargaron los valores horarios de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para el periodo entre marzo 2013 y diciembre 2020 de las estaciones COY1 y COY2 descritas en la Introducción (La descarga se realizó con fecha 08 de enero de 2021). Los datos de MP_{10} fueron utilizados para validar la serie de $MP_{2,5}$ y completar la serie, en caso de ausencia de datos de $MP_{2,5}$. Las categorías de datos empleadas fueron validados y preliminares, dejándose fuera los datos no validados. Los datos se sometieron a un proceso de validación que consideró: 1) la inspección visual de las series de datos; 2) la eliminación de datos que se salen de los rangos de medición, por ejemplo, valores negativos, duplicados, etc.; 3) la aplicación de un control respecto del límite de detección; 4) análisis de frecuencia de las series, en donde se analizan los rangos de concentración de $MP_{2,5}$ que pudieran presentar frecuencias anómalas, por ejemplo, cambios bruscos de frecuencias entre rangos de concentraciones próximos; y 5) aplicación de una restricción física que impone que $MP_{2,5}$ no puede superar a MP_{10} . Más detalles de la validación se muestran en el Anexo 10.3. De las mismas estaciones COY1 y COY2 se emplearon las variables meteorológicas locales de superficie como presión, viento, temperatura, humedad relativa. En este caso, para la validación, se realizó una inspección visual de los datos analizando gráficos la distribución de frecuencias y concentraciones que estuvieran fuera de los valores esperables.

Para abordar la escala sinóptica se emplearon los datos diarios obtenidos del reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) descritos por (*Kalnay et al., 1996*) para el periodo 1991 al 2020. Los campos meteorológicos de escala sinóptica empleados en el estudio fueron: altura geopotencial (hgt); viento zonal (u); viento meridional (v); viento vertical omega (ω), cobertura nubosa total y temperatura (T). El dominio utilizado para la representación de las figuras cubría el hemisferio sur próximo a Sudamérica y parte de Antártica. Todos los campos fueron extraídos a niveles de 925 hPa y 500 hPa, es decir, próximo a la superficie y a unos 5000 m de

altura, aproximadamente. Con el nivel de 500 hPa (tropósfera media), se busca identificar, en la tropósfera libre, algunas características importantes de los sistemas sinópticos, como ubicación y ubicación relativa, intensidad, cobertura, entre otros aspectos. El nivel de 925 hPa busca describir la forma en que los sistemas sinópticos interactúan con las capas atmosféricas próximas a la superficie del suelo, permitiendo examinar, por ejemplo, situaciones de estabilidad mecánica generalmente asociado a flujos de tipo laminar, que generalmente ocurre con bajas velocidad de viento o también la estabilidad termodinámica en donde los movimientos convectivos verticales están atenuados, como ocurre durante una inversión térmica vertical.

Dentro de los primeros campos que se evaluaron para entender los sistemas sinópticos, se encuentran los campos de presión, o su expresión en altura que es la hgt. En este sentido, los diferenciales de presión son las forzantes mecánicas que explican gran parte de los movimientos y cambios que sufre la atmósfera a una escala sinóptica. Por ejemplo, con observar los campos de hgt es posible aproximar la ubicación de los sistemas de alta y baja presión, una idea de la dirección e intensidad del viento geostrófico, condiciones propicias para el viento de subsidencia, advección térmica de masas de aire, etc. Por otra parte, para comprender los factores sinópticos asociados a una estabilidad termodinámica, como lo es la inversión térmica de la atmósfera, se opta por analizar los perfiles de temperatura, los que dan cuenta de cambios de temperatura con la altura. De igual forma, para entender algunos de los factores que generan los cambios de temperatura troposféricos, distintos a la advección térmica, es necesario analizar los campos de ω , los que describen condiciones de subsidencia (viento descendente) y que generan aumentos de temperatura por procesos de compresión adiabática de las parcelas de aire y disminución de la cobertura nubosa, entre otros aspectos. Por último, tenemos los campos de viento horizontal, componentes u y v , necesarios para describir fenómenos como la dispersión de contaminantes o estancamiento atmosférico en superficie, advección térmica, turbulencia mecánica, entre otros procesos.

Adicionalmente, se construyeron gráficas que representaban las secciones verticales de los campos meteorológicos obtenidos del reanálisis NCEP-NCAR. Estas gráficas permiten visualizar secciones verticales de la tropósfera, es decir, desde la superficie hasta los 200 hPa (10 niveles, es decir, 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200 hPa) para los cortes verticales, en distintas latitudes próximas a Coyhaique. Los cortes se realizaron en latitudes donde la anomalía es más significativa, es decir 45°S para las variables omega y viento zonal, y 55°S para las variables hgt, viento meridional y temperatura (ver Figura 2.1). Estos cortes entregan una aproximación de la interacción vertical que tienen los sistemas sinópticos, es decir, observar la interacción entre los distintos niveles de la tropósfera, identificar patrones de estabilidad atmosférica, como lo son inversión térmica generada por viento de subsidencia u omega e identificar el grado de baroclinicidad del sistema, entre otros aspectos.

Es importante considerar que los datos obtenidos del reanálisis de NCEP/NCAR corresponden a una representación espacial y temporal de la atmósfera. Los campos son obtenidos a partir de modelos meteorológicos, ajustados mediante metodologías de asimilación. Esto es, ajustados por consistencia dinámica y por observaciones de estaciones en superficie, plataformas aéreas, satelitales, entre otras. Se considera a este tipo de modelos, como la mejor representación de la atmósfera para un momento dado. En la actualidad existe una amplia variedad de reanálisis desarrollados por distintas agencias meteorológicas en el mundo. Los motivos de la elección del reanálisis de NCEP/NCAR fueron: cuenta con un reconocido pres-

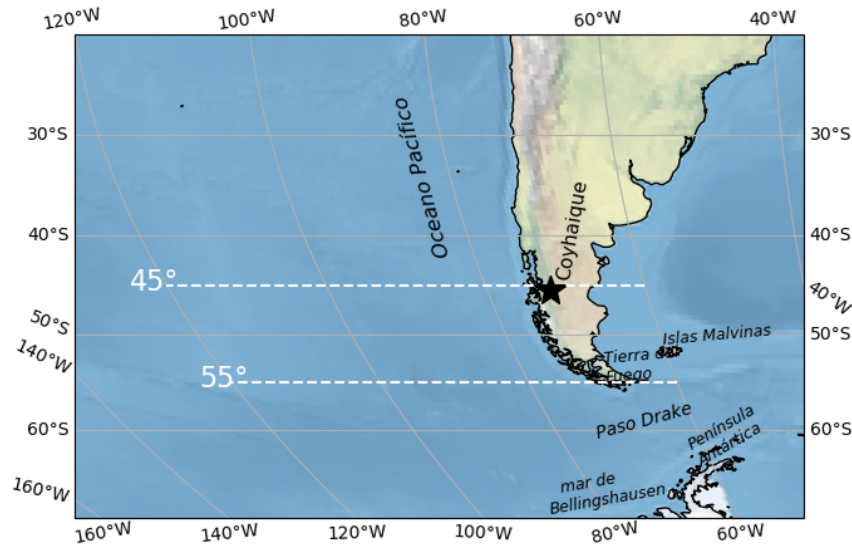


Figura 2.1: Mapa que ilustra la posición de los cortes latitudinales (línea blanca segmentada) y principales puntos de referencia que se utilizarán en este capítulo (construido a partir de Cartopy 0.18, Proyección Robinson).

tigio en el área meteorológica; facilidad para acceder a los datos y escala espacio temporal razonable para los objetivos del estudio. Adicionalmente, se quiere contrastar los resultados de este trabajo con los obtenidos con el modelo ERA-Interim que actualmente está evaluando el CR2 (*Huneus et al., 2020; Osses et al., 2020*).

Por último, en el análisis del episodio de contaminación atmosférica por $MP_{2,5}$ del 2 al 4 de julio del 2018 se emplearon las imágenes satelitales del MODIS canal visible (cobertura nubosa) e infrarrojo (superficie de suelo) (fuente: <https://go.nasa.gov/2GWSMsv>). De estos datos se ocuparon la nubosidad y la temperatura continental superficial. En el caso de los perfiles de viento y temperatura, que ayudan a entender la estabilidad termodinámica y mecánica se utilizaron las mediciones obtenidas durante los lanzamientos de radiosonda de la Estación Dirección Meteorológica de Chile (*DMC N.º 85934*) de Punta Arenas para el periodo del 1 al 6 de julio del 2018.

2.2. Reconstrucción de la serie diaria de $MP_{2,5}$ en Coyhaique

Con el objetivo de contar con una serie lo más completa posible, se optó combinar las series de $MP_{2,5}$ de Coyhaique. Para ello, se ocuparon las concentraciones promedio diarias obtenidas en las estaciones COY1 y COY2. La reconstrucción tomó inicialmente, como base, la concentración de material particulado fino en la estación COY1, debido a que esta estación, contaba con el mayor número de datos validados en el periodo frío. Los valores nulos asociados a concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ en COY1, fueron reemplazados por una proyección lineal

de las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ de COY2 en COY1. Los parámetros empleados para el cálculo son los encontrados en la regresión lineal para los períodos, cálido y frío, de manera separada. En caso de continuar existiendo valores nulos, en la nueva serie de datos generada, y dada la alta correlación entre las series de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en COY1 ($r = 0,99$), se ocupó, únicamente en estos casos, una proyección lineal del MP_{10} de COY1, para completar la serie de $MP_{2,5}$.

2.3. Identificación función de probabilidad de $MP_{2,5}$

Con el objeto de entender de mejor manera la distribución de las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$, conocer sus mejores estimadores poblacionales y detectar cambios en la distribución, se decidió buscar la mejor función de probabilidades que la describiera. Para ello, se ajustaron funciones estadísticas de probabilidad a la distribución de frecuencia $MP_{2,5}$ mediante el método de máxima verosimilitud (*MV*) (*Myung, 2003*), el cual es comúnmente utilizado para estas tareas. Para ello se probaron las siguientes distribuciones: “*normal*”, “*Log normal*”, “*Powerlognormal*”, “*Gamma Invertida*”, “*Gen extremo*”, “*Chi cuadrado*”, “*Gamma*”, “*Medio logística*”, “*Exponencial*”, “*Weibull min*” y “*Logística*”, presentes en el paquete estadísticos de Scipy (<https://scipy.org/>). Mediante una prueba *Kolmogórov-Smirnov (K-S)*, se evaluó bondad del ajuste (*valor p*). Para evitar obtener soluciones locales en el método *MV*, el parámetro de posición fue ajustado manualmente, buscando maximizar el valor de probabilidad (*valor p*) de la prueba *K – S*. De las pruebas aplicadas se seleccionó aquel que tenía el mejor ajuste. Para resultados de las distintas pruebas de ajuste de curvas de probabilidades ver figura 3.6 y Anexo 10.9.

2.4. Metodología para la identificación de los patrones sinópticos

En este trabajo se busca, en primer término, identificar los patrones atmosféricos de gran escala o sinópticos, asociados a la ocurrencia de episodios de emergencia por material particulado completamente respirable ($MP_{2,5} \geq 170 \mu g/m^3$ como promedio de 24 horas) en Coyhaique. Esto quiere decir, patrones meteorológicos de escala sinóptica que generen una mayor “estabilidad” mecánica y termodinámica en la atmósfera baja, cercana al suelo, propiciando condiciones para el aumento de las concentraciones superficiales de contaminantes atmosféricos como el $MP_{2,5}$. La elección del $MP_{2,5}$ por sobre el MP_{10} se debe a que el primer contaminante es mucho más importante de acuerdo con los efectos en la salud (*OMS 2021*) y ambos contaminantes están estrechamente correlacionados, por lo que el aporte de información nueva de un contaminante por sobre el otro, es poco significativo para los fines que persigue este estudio. Para ello, en este trabajo se adopta el enfoque de climatología sinóptica (ECS), el cual es aplicado a, entre otras cosas, a la calidad del aire (*Collaud Coen et al. 2011*).

El enfoque ECS comprende el estudio, clasificación o predicción de los diversos patrones

sinópticos representativos para una zona dada y que están relacionados con la calidad del aire local. En efecto, esta metodología se ha empleado en múltiples ocasiones para analizar y predecir de una forma satisfactoria e integral, complejas relaciones entre patrones atmosféricos de gran escala con el comportamiento y variabilidad de contaminantes presentes en niveles próximos a la superficie del suelo, e.g., (*Holzworth, 1967; Davis and Kalkstein, 1990; Davis, 1991; Dorling et al., 1992; Comrie, 1994; Rutllant y Garreaud, 1995; Triantafyllou, 2001; Wang et al., 2018; Zhao et al., 2018; Li et al., 2019; Pozo et al., 2019*).

Básicamente, este método consiste en identificación de patrones meteorológicos de gran escala a partir de combinar, para un mismo instante, categorías de un elemento (por ejemplo, niveles de contaminación, indicadores de plagas, etc.) con variables meteorológicas (viento, temperatura, humedad, etc.) o campos meteorológicos. Con los resultados de la combinación se busca obtener grupos o clases que representan configuraciones de gran escala, que estarían asociado a un determinado nivel de elemento de estudio. Por ejemplo, niveles contaminación críticos asociado a un patrón específico de alta presión atmosférica. A este procedimiento se le denomina identificación de patrones. Los grupos identificados se ocupan como índices, permitiendo clasificar las condiciones sinópticas que están relacionadas con algún parámetro ambiental (como ventilación, concentración, etc.) y cuyas variaciones dependen de los distintos estados de la atmósfera en diferentes momentos (*Davis and Kalkstein, 1990*).

2.5. Selección de eventos diarios de contaminación por $MP_{2,5}$

Para la estimación de la concentración media diaria de $MP_{2,5}$ se aplicó el procedimiento descrito en la norma primaria nacional de calidad ambiental para material particulado fino $MP_{2,5}$ (<http://bcn.cl/1veh2>). Así, el promedio diario se calculó sobre los valores horarios entre las 0 y las 23 horas, si se contaba con al menos 18 registros horarios por día. Con las concentraciones medias diarias de $MP_{2,5}$ se identificaron los días en que los valores superan el límite inferior del nivel de emergencia, esto es, valores superiores o iguales a $170 \mu g/m^3$ como promedio de 24 horas. Para el análisis, se trabajó con datos del período frío, vale decir, entre mayo y septiembre, desde diciembre del 2013 y diciembre del 2020. El mismo criterio se utilizó para los días de alerta y preemergencia, dicho de otras palabras, concentraciones que igualan o superan los $80 \mu g/m^3$ y $110 \mu g/m^3$ de $MP_{2,5}$ para promedio de 24 horas, respectivamente.

La metodología de cálculo ocupada en el presente trabajo difiere de la forma realizada por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA). En particular, MMA para su estimación emplea el promedio móvil de 24 horas de $MP_{2,5}$ y escoge el nivel más crítico entre ambas estaciones (COY1 y COY2). Lo que se observa es que el promedio móvil tiende a sobrestimar el número de episodios en comparación al promedio diario de 24 horas. No obstante, las tendencias de cambio son consistentes entre el presente estudio y los informados por MMA (ver enlace web). Esta opción se debe a la necesidad de contar categorías de eventos diarios de contaminación por $MP_{2,5}$ que sean representativos de las condiciones meteorológicas diarias, resolución temporal propia de la escala sinóptica. Por ejemplo, la condición de promedio móvil puede generar en días con altas concentración de $MP_{2,5}$ sean categorizados como días

buenos (baja concentración de $MP_{2,5}$), producto de las menores concentraciones en el día previo y, por el contrario, días con baja concentración de $MP_{2,5}$ pasen como días críticos producto de altas concentraciones del día previo. Esto afecta directamente la detección de la configuración sinóptica apropiada, particularmente en episodios de baja duración, como un día, por ejemplo.

2.6. Estimación de episodio de emergencia por $MP_{2,5}$

Para este estudio se definirá como episodios críticos por $MP_{2,5}$ al conjunto de eventos diarios de emergencia consecutivos que igualan o superan los niveles de contaminación establecidos en la normativa chilena para los “eventos diarios de contaminación” (alerta, preemergencia y emergencia por $MP_{2,5}$). De esta manera, se busca obtener independencia temporal de los eventos diarios con nivel de emergencia y analizar la evolución meteorológica de los mismos episodios de contaminación. En este sentido, se busca reconocer que los fenómenos meteorológicos que provocan niveles críticos de contaminación pueden tener más de un día de duración y evolucionan en el tiempo. Siendo, desde el punto de vista sinóptico no comparable el día 0 de episodio con el día 1 o 2. Por este motivo, también es posible poder clasificar los episodios de acuerdo con su duración temporal, es decir episodio de uno, dos, tres, y así sucesivamente, días de duración (n). Lo anterior nos permite poder generar compuestos de episodios de igual duración que sean comparables.

En este apartado clasificaremos como intensidad del episodio de contaminación como las concentraciones diarias alcanzadas de $MP_{2,5}$, que igualan o superan el nivel de alerta ($\geq 80 \mu g/m^3d$), preemergencia ($\geq 110 \mu g/m^3d$) y emergencia ($\geq 170 \mu g/m^3d$) ambiental. Esto quiere decir, por ejemplo, que un episodio con nivel de alerta ambiental contendrá concentraciones iguales o superiores a $\geq 80 \mu g/m^3d$ de $MP_{2,5}$, incluido los niveles de preemergencia y emergencia ambiental. Un episodio de preemergencia serán aquellos días consecutivos en los que se iguala o se supera el valor $110 \mu g/m^3d$ de $MP_{2,5}$, esto incluye los días de emergencia; y los episodios de emergencia en donde se iguala o se supera el valor $170 \mu g/m^3d$ de $MP_{2,5}$. El motivo de tomar esta decisión, de que un episodio de preemergencia incluye concentraciones con nivel emergencia por $MP_{2,5}$, es para evitar que un episodio meteorológico de mala ventilación se vea truncado arbitrariamente, por un incremento de la concentración en que se supera determinado umbral de concentración.

Para la obtención de los compuestos representativos de los episodios de $MP_{2,5}$ con los que se trabajó, el procedimiento de cálculo fue el siguiente: 1) Se identificaron los días con nivel emergencia por $MP_{2,5}$ y, los días consecutivos, se agruparon y enumeraron los episodios. Es decir un episodio es el conjunto de días consecutivos con nivel de emergencia; 2) dentro de cada episodio de emergencia identificado, se enumeraron los días, siendo 0 el primer día en que se supera la condición de emergencia, 1 el segundo día y así sucesivamente hasta llegar a $n-1$ días, momento en que finaliza el episodio; 3) Cada uno de los episodios fueron clasificados y agrupados de acuerdo a su duración del episodio en días (n), por lo tanto, tendremos grupos de episodios de duración de 1 día, 2 días, 3 días y así sucesivamente; 4) Por último, dentro del conjunto de episodios de una misma duración n , se subagruparon los días con la misma posición diaria dentro del episodio y para cada uno de estos días se calculó el promedio de

las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$, generándose el compuesto. Por lo tanto, un compuesto de un episodio de $MP_{2,5}$ se puede interpretar como un vector (ecuación (2.1)) que contiene el promedio de la concentración de $MP_{2,5}$, para cada día del episodio de una misma duración n

$$C_n = \{\bar{c}_{(n,0)}, \bar{c}_{(n,1)}, \dots, \bar{c}_{(n,n-1)}\} \quad (2.1)$$

Siendo $\bar{c}_{(n,0)}$ el promedio de las concentraciones del día inicial (día = 0) de los episodios de $MP_{2,5}$ de duración n y así sucesivamente, para cada día del episodio hasta el día $n - 1$, donde finaliza el episodio. Con ello se obtienen una serie de vectores que representan los compuestos de episodios de igual duración en días. Adicionalmente, para cada compuesto, se considera dos días previos al inicio del episodio, etiquetados como días -2 y día -1 y dos días posteriores a la finalización del episodio. Tanto los días previos como los días posteriores facilitan el análisis de la evolución temporal del episodio crítico de $MP_{2,5}$. En efecto, un episodio de 1 día de duración está compuesto por un vector que contiene los promedios de las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ de los días -2, -1, 0, +1, +2. Quedando el vector de la siguiente forma (2.2):

$$C_n = \{\bar{c}_{(n,-2)}, \bar{c}_{(n,-1)}, \bar{c}_{(n,0)}, \dots, \bar{c}_{(n,n-1)}, \bar{c}_{(n,n)}, \bar{c}_{(n,n+1)}\} \quad (2.2)$$

2.6.1. Identificación de patrones sinópticos

La metodología de trabajo para el cálculo de los patrones sinópticos fue:

- 1) **Cálculo climatología diaria (Md) para cada campo meteorológico:** Para ello se calculó, para cada punto de la grilla, el promedio de hgt, u, v, ω y t, para cada punto en el espacio (celda) y para cada día del año (d), es decir de 1 a 365 días, durante los últimos 30 años (período entre 1991 y 2020), de acuerdo con la ecuación (2.3):

$$\bar{m}_d = \frac{1}{30} \sum_{i=1991}^{2020} m_{(d,i)} \quad (2.3)$$

donde d representa el día del año en calendario que va de 1 a 365 días. Por lo tanto, la climatología diaria (M) para cada punto en el espacio queda como lo descrito en la ecuación (2.4):

$$\bar{M}_i = \{\bar{m}_{(i=1)}, \bar{m}_{(i=2)}, \dots, \bar{m}_{(i=365)}\} \quad (2.4)$$

- 2) **Suavizado de climatología:** Dada la importante variabilidad entre días que presentan los campos climatológicos, es común suavizar la curva de datos diarios. Para ello se calculó el promedio mensual y luego aplico una curva de interpolación (splin cúbico (*Chapra y Canale, 2015*)), como se ve en la figura 2.2 y Anexo 10.11 figura 10.21. (Para más detalles de los campos climatológicos ver Anexo 10.11)
- 3) **Cálculo de anomalía climatológica:** Se seleccionaron los campos meteorológicos diarios para los días con nivel de emergencia por $MP_{2,5}$. Luego cada celda del campo

meteorológico (hgt, u, v, ω , cobertura nubosa y T).), de acuerdo con el día del año m_d , se calculó la diferencia con la climatología suavizada de los últimos 30 años, obtenida en el paso 2 (anterior). Por lo tanto, la anomalía diaria para cada variable se representa como los descritos en la ecuación (2.5)

$$a_d = (m_d - \bar{M}_i) \quad (2.5)$$

4) Construcción de compuestos de anomalía para episodio: 1) Con las fechas de cada evento diario de emergencia, se seleccionaron las anomalías climatológicas diarias (hgt, u, v, ω , cobertura nubosa y t) obtenidas en el paso anterior (paso 3); 2) De manera equivalente a lo realizado para el cálculo del compuesto de episodio de $MP_{2,5}$, se procedió a agrupar las anomalías diarias consecutivas en episodios; 3) Cada episodio fue clasificado y agrupado de acuerdo a la duración en días (n); 4) Dentro de cada grupo (duración episodio: 1, 2, 3 y 6 días de duración), se promediaron los días con posición temporal equivalente dentro del episodio, es decir, todos los días 0 (inicio del episodio), todos los días 1 y así sucesivamente hasta el último día del episodio. Es decir, se construye un vector que representa el compuesto de anomalía diaria de una variable meteorológica, para un episodio de emergencia de duración n (ver ecuación (2.6)):

$$A_n = \{\bar{a}_{(n,-2)}, \bar{a}_{(n,-1)}, \bar{a}_{(n,0)}, \dots, \bar{a}_{(n,n-1)}, \bar{a}_{(n,n)}, \bar{a}_{(n,n+1)}\} \quad (2.6)$$

Donde A_n es el compuesto de anomalía para cada tipo de campo, para los episodios de emergencia de $MP_{2,5}$ de duración n . Cada vector (A_n) está compuesto de los promedios diarios de las anomalías (a) desde los días -2, -1, 0, 1, 2 hasta $n + 1$, donde el subíndice 0 es el día inicial del episodio con nivel de emergencia por $MP_{2,5}$. Este cálculo se repite para cada celda del modelo tridimensional del Reanálisis.

Adicionalmente, se aplicaron criterios de validación para los patrones sinópticos grupales identificados para los episodios. Este control, que llamamos de coherencia, considera los siguientes pasos:

- Los días que pertenecen a un mismo patrón grupal deben mostrar situaciones sinópticas similares, a juicio de observador entrenado.
- Los patrones identificados para grupos de distinta configuración sinóptica deben ser distintos entre sí, a juicio de observador entrenado.
- Las medias y los rangos de las variables meteorológicas de cada patrón grupal deben ser consistentes con las variables meteorológicas para cada situación sinóptica.
- Aplicación de un control estadístico, test de student, para evaluar la significancia de la anomalía encontrada.

Para cada variable analizada, los dos primeros campos corresponden a los compuestos de anomalía de 2 días previos al episodio de contaminación por $MP_{2,5}$, señalizados como -2 y -1. El día 0 es el día que se alcanza el nivel de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$. Los dos últimos campos (1 y 2) comprenden a los dos días posteriores, ocurrido el episodio, en donde no se constata la condición de emergencia por $MP_{2,5}$. A cada gráfico se le agregó la significancia estadística de la anomalía (zona no achurada). La significancia estadística de la anomalía fue calculada con un 90 % de confianza.

2.6.2. Análisis de las variables meteorológicas locales

Las variables meteorológicas de gran escala pueden ser considerados como forzantes y/o moduladores de las variables meteorológicas locales. A su vez las variables meteorológicas locales son las que afectan de manera más directa la emisión, dispersión, remoción de los contaminantes atmosféricos, entre otros procesos. Por este motivo, se busca describir el comportamiento de las variables meteorológicas locales que concurren durante de episodios críticos de $MP_{2,5}$ y se analiza como son afectadas por la escala sinóptica. Para ellos se construyen compuestos de anomalías estandarizadas de cada una de las variables meteorológicas para los días de episodio de emergencia de $MP_{2,5}$ de 1, 2 y 3 días de duración. Se entiende como anomalía estandarizada a la variable diaria menos la variable media para ese día del año y dividida por su desviación estándar. Adicionalmente, se incluyen índices como demanda térmica (grados-día), amplitud térmica diaria y factor de ventilación, que son calculados a partir de las mismas variables meteorológicas de acuerdo con lo descrito en el anexo 10.7. Por último, y empleando el modelo descrito en el anexo 10.7 se realiza una estimación el efecto que tendría un bajo un escenario de Cambio Climático SSP5-8.5 al 2050 ([enlace web](#)) que implica un incremento planetario medio de la temperatura de 2 °C y una reducción media de la rapidez del viento de 0.4 m/s, por sobre el valor actual. Cabe mencionar para su cálculo se empleó el mismo set de datos diarios del periodo 2016-2020, al cual se modificó su condición media incrementando en 2 °C la temperatura y restándoles 0.4 m/s a la rapidez del viento. Esto quiere decir, que no se considera un cambio significativo en la varianza de estas variables para su evaluación. El incremento anual de la frecuencia de eventos de estancamiento fue extraído de *Horton et al., (2012)*.

2.6.3. Análisis de las variables meteorológicas locales durante días de episodio

Para ello, se analizará el comportamiento de las variables meteorológicas locales medidas por la Red SINCA como presión, viento, humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad del viento durante los días de episodio. Adicionalmente se emplearon tres indicadores relacionados con la contaminación atmosférica y que fueron construidos a partir de las mismas variables meteorológicas medidas por la Red SINCA, como son los grados día de calor, oscilación térmica diaria y factor de ventilación.

Por último, basándose en la evidencia de los análisis previos, se propondrá un modelo físico y conceptual que permita explicar lo observado y con ello describir las principales forzantes meteorológicas implicadas en los episodios críticos de contaminación por $MP_{2,5}$ en la ciudad de Coyhaique.

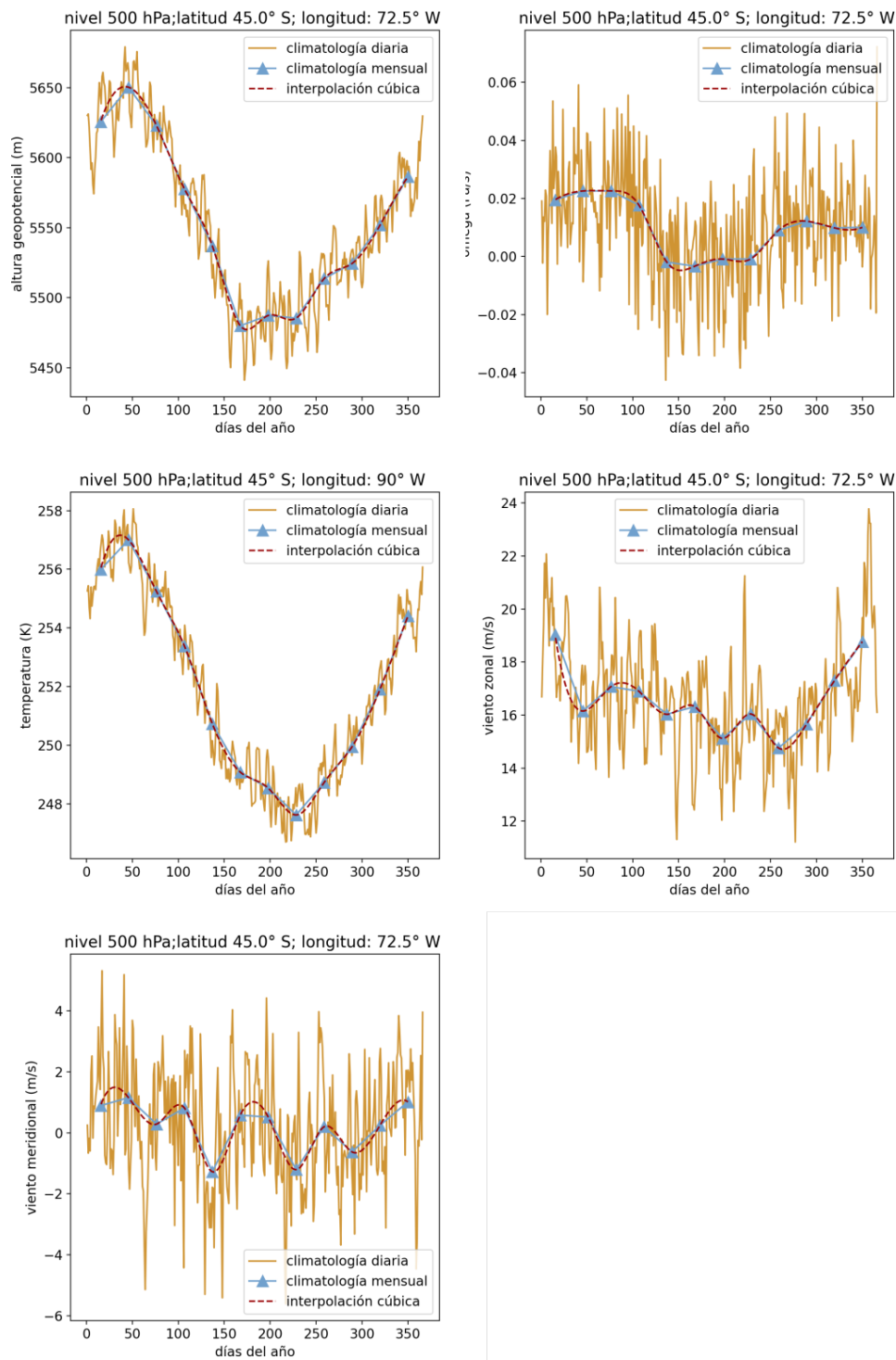


Figura 2.2: Ejemplo de Climatología a nivel 500 hPa para un punto en el espacio de las distintas variables altura geopotencial, omega, temperatura, viento zonal y viento longitudinal. Línea café: Climatología diaria 30 años, periodo 1991 al 2020; Triángulo azul: climatología mensual; Línea segmentada roja: interpolación cúbica de la climatología mensual. Construido a partir datos reanálisis NCEP-NCAR periodo 1991-2000.

Capítulo 3

Caracterización del material particulado fino en Coyhaique

Las series temporales promedio de $MP_{2,5}$ (horario y diario) de las estaciones COY1 y COY2 de la red SINCA, son presentadas en la figura 3.1. A primera vista, se aprecia una variabilidad periódica anual de $MP_{2,5}$, esto quiere decir, altas concentraciones de $MP_{2,5}$ en el periodo frío (mayo a septiembre) y bajas concentraciones en periodo cálido (noviembre a marzo), como se observa en la tabla 3.1. En efecto, las concentraciones alcanzadas en la estación COY1 (COY2) para el periodo frío son de $102 \pm 86 \mu g/m^3d$ ($101 \pm 74 \mu g/m^3d$) como valor promedio y de $373 \mu g/m^3d$ ($332 \mu g/m^3d$) en el caso de concentraciones en el percentil 98 %. Estos valores superan de manera significativa la norma anual, situación que no mejora si tomamos los valores anuales promedio. Por otro lado, en el periodo cálido se registran concentraciones que se ajustan a la norma anual, es decir valores que podrían ser considerados como buenos.

Tabla 3.1: Resumen estadístico de las concentraciones de $MP_{2,5}$ de la red SINCA de Coyhaique y agrupadas en el periodo total (diciembre 2013 a diciembre 2020), frío (mayo a septiembre) y cálido (noviembre a marzo).

Grupo	n	promedio	$MP_{2,5} \mu g/m^3d$					máxima
			mínima	25	50	75	98	
COY1 todo	2144	53 ± 68	3	12	27	66	260	592
COY2 todo	2251	49 ± 58	4	13	26	61	234	511
COY1 frío	748	102 ± 86	12	44	75	129	373	592
COY2 frío	668	101 ± 74	7	49	82	126	332	511
COY1 cálido	810	14 ± 12	3	7	10	16	49	117
COY2 cálido	1003	16 ± 11	4	10	13	18	49	105

Cabe mencionar que la distribución de concentraciones de material particulado fino, para el periodo frío, se diferencia de manera significativa a la del periodo cálido, valor $p = 0,04$ para COY1, por lo que es razonable segmentar los datos en periodo cálido y frío durante el año.

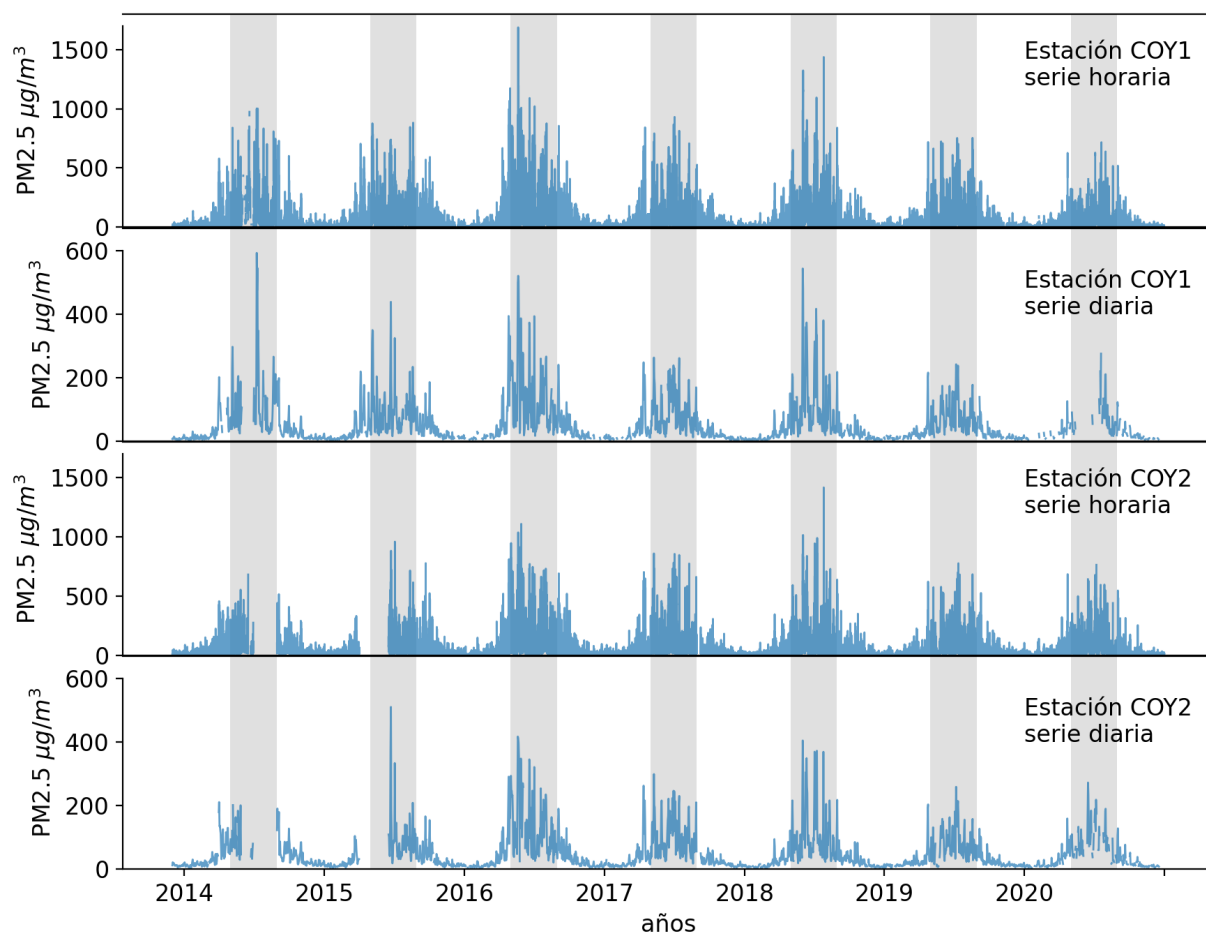


Figura 3.1: Series de MP_{2,5}. Estación COY1 serie horaria (panel superior); Estación COY1 serie diaria (segundo panel). Estación COY2 serie horaria (tercer panel). Estación COY2 serie diaria (panel inferior) periodo años diciembre 2013-2020. Elaboración propia a partir de datos SINCA).

3.1. Ciclo estacional material particulado fino

La variabilidad estacional del material particulado fino medido en COY1 y COY2 se ilustra en la figura 3.1. Los valores mensuales se calculan a partir de los promedios diarios presentados en la figura 3.2 y en el Anexo 10.6 tabla 10.8, pero agrupados por cada uno de los meses del año, entre el 2014 y 2020. Nuevamente, se destaca el incremento de las concentraciones en el período frío. Las altas concentraciones se explican, en parte, por el aumento de la demanda de combustión de leña para calefacción, lo que genera un incremento de las emisiones domiciliarias de $MP_{2,5}$ al aire. De igual manera, y como vimos antes, durante el período invernal, la intensidad del viento promedio tiene su mínimo anual, cuestión que no favorece la dispersión de contaminantes. Como se mostrará más adelante, esto se asocia, a su vez, a condiciones sinópticas que incrementan la estabilidad de la tropósfera baja, condición conocida como “estancamiento atmosférico”. Por el contrario, las condiciones estivales incrementan la ventilación de la cuenca, con un aumento en la intensidad del viento y la turbulencia superficial (mecánica y térmica). A esto se suma una disminución de la demanda de calefacción, producto de temperaturas más cálidas. Ambos factores, altas temperaturas y mayor rapidez del viento, inciden en un descenso de las concentraciones de $MP_{2,5}$.

Los meses más críticos, en términos de altas concentraciones por material particulado fino, son junio y julio, cuando el promedio mensual de ambas estaciones está entre 113 ± 94 y $117 \pm 95 \mu g/m^3 d$ $MP_{2,5}$ en el período entre 2013 y 2020. Es notable que, en ambas estaciones, COY1 y COY2, se registren valores sobre el $234 \mu g/m^3$ para el percentil 98 y máximo promedio diario de hasta $592 \mu g/m^3 d$ de $MP_{2,5}$. En este sentido, existe un orden de magnitud de diferencia, entre las concentraciones en los meses enero y julio, lo que resalta la significativa variabilidad de contaminación entre el período cálido y frío (Figura 3.2).

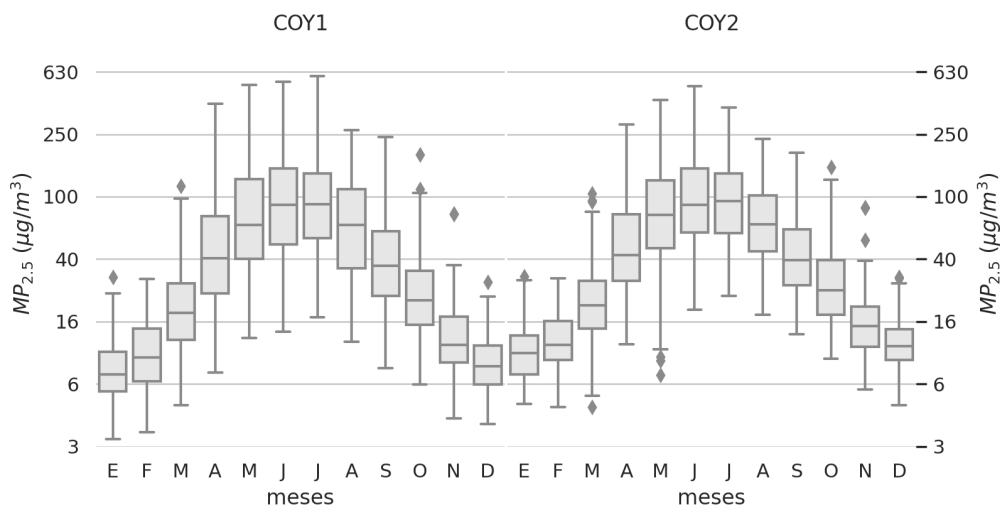


Figura 3.2: Ciclo estacional mostrado sobre los promedios mensuales calculado sobre valores diarios de $MP_{2,5}$ en escala logarítmica. Estaciones COY1 y COY2 panel izquierdo y derecho respectivamente. Período de datos diciembre 2013 y 2020. Para cada mes del año, la barra horizontal central de la caja (rectángulo), representa la mediana. El extremo inferior y superior de la caja, es el 25 % y 75 % de los datos y el final de las líneas verticales representan los valores extremos inferior y superior respectivamente. Los puntos son los valores fuera de rango de los valores normales. (Elaboración propia a partir de datos SINCA). Mas detalles de gráficos de caja ver Anexo figura 10.22

3.2. Ciclo diario de material particulado fino

En la figura 3.3 se ilustra el ciclo diario de las concentraciones horarias de $MP_{2,5}$, agrupadas en cuatro conjuntos: COY1 y COY2, para los períodos cálidos y fríos. Se trabajó con los datos entre diciembre del 2013 y diciembre del 2020. El ciclo diario en todos los grupos muestra dos máximos, en horas de la mañana (07:00 a 08:00 a.m.) y otro, al anochecer (18:00 p.m. a 02:00 a.m.). El primer incremento de concentraciones coincide con el inicio de las actividades diarias, las que están influenciadas por el encendido de los calefactores al amanecer. El segundo aumento diario del material particulado fino en horas de la tarde noche, se puede asociar a una combinación de cuatro factores: la disminución de la intensidad del viento (ver Figura 3.3), el encendido de los calefactores al regresar al hogar, inversión térmica superficial nocturna y una disminución de las temperaturas en horas de la tarde. Al avanzar la noche, y parte de la madrugada, se registra un descenso paulatino de las concentraciones nocturnas, tendencia que se mantiene hasta el amanecer. Esto se explica, posiblemente, por una disminución de las emisiones de $MP_{2,5}$, tras el apagado de calefactores y el transporte de contaminantes, que genera la brisa nocturna ladera abajo.

Las concentraciones de $MP_{2,5}$ descienden en horas de la tarde (12:00 a 15:00 horas). Esta disminución diurna de las concentraciones se explicaría por el incremento de la ventilación media, es decir, mayor intensidad del viento y un desarrollo de la mezcla vertical. Ambos factores favorecen la dispersión de contaminantes. También contribuye, el hecho que durante la tarde baja el número de calefactores encendidos, ya que parte de la población se encuentra fuera de su vivienda y la demanda por calefacción es menor (asociado al máximo de temperatura promedio diaria).

En las noches de junio, en promedio, las concentraciones horarias de $MP_{2,5}$ están sobre $150\mu g/m^3$ la hora, mientras que en enero los valores solo alcanzan 20 a $30\mu g/m^3$. También es evidente que muchas veces el percentil 98 excede 600 ‘con la hora, en ambas estaciones, llegando a valores de $1688\mu g/m^3$ la hora. Estas altísimas concentraciones superan las observadas en ciudades como Nueva Delhi o Beijing, lugares en donde las concentraciones de contaminación atmosférica por material particulado completamente respirable son consideradas alarmantes, e.g., (*Chelani, 2017; Sinha y Kumar, 2019*).

Cabe mencionar, que existe una diferencia horaria de los máximos diurnos de las concentraciones horarias de $MP_{2,5}$. Esta diferencia horaria es de alrededor de una (1) a dos (2) horas, entre el periodo cálido y el frío. Esto se explicaría, por el efecto que tiene una mayor cantidad de horas de luz solar durante el verano, aumentando con ello el periodo diurno de ventilación y las horas productivas. De igual manera, el cambio horario local de Chile de 3 GMT a 4 GMT ha sido descrito como uno de los factores que inciden en el comportamiento de la población y, por lo tanto, en el horario de inicio del encendido de la calefacción y en consecuencia de la generación de emisiones.

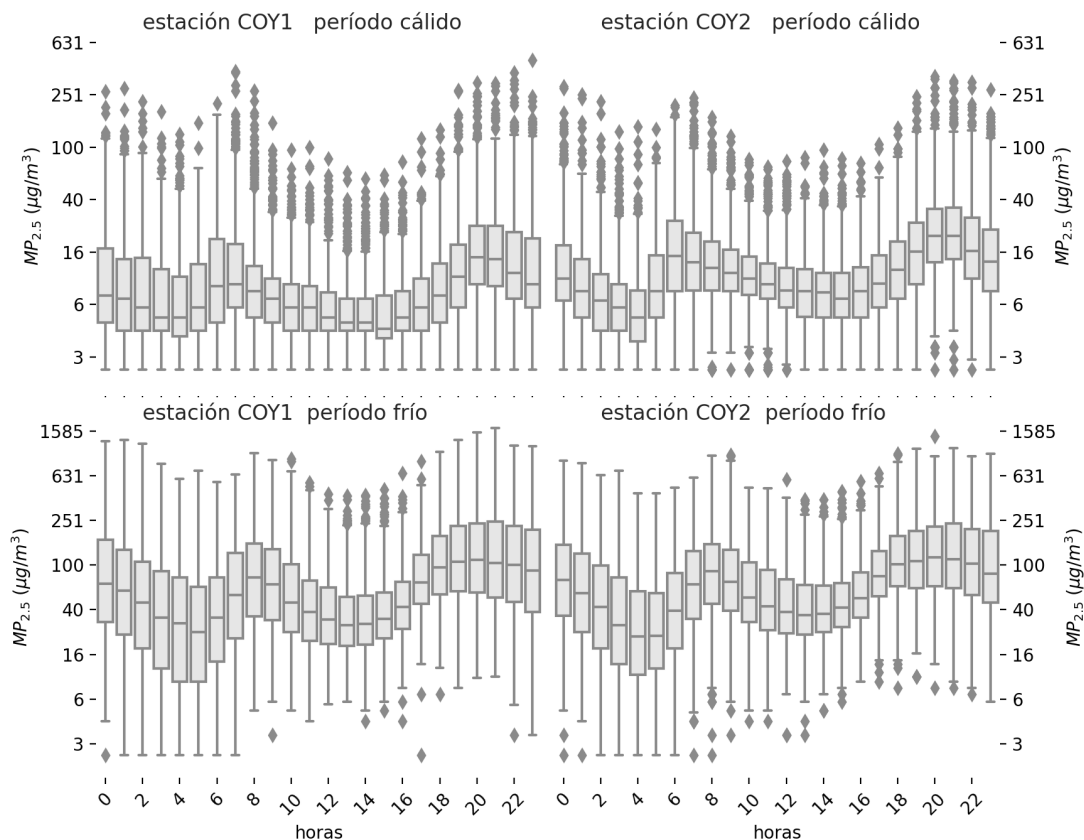


Figura 3.3: Gráficos de caja que representan los ciclos diarios de $MP_{2,5}$ para COY1 (panel lado izquierdo) y COY2 (panel lado derecho) en escala logarítmica. Periodo verano (gráficas superiores) y periodo invierno (gráficas inferiores). El grafico de caja representa el primer, segundo, tercero y tercer cuartil, de una serie de datos, como línea inferior, caja inferior, caja superior y línea superior respectivamente. Adicionalmente se incorpora los datos que estadísticamente están fuera de la distribución (rombos). Calculado a partir de las concentraciones horarias de $MP_{2,5}$ durante el periodo diciembre 2013-2020. (Elaboración propia a partir de datos SINCA. Mas detalles de gráficos de caja ver Anexo figura 10.22

3.3. Variabilidad interanual de las concentraciones de material particulado fino

En la Figura 3.4 se ilustra la variabilidad interanual de las concentraciones promedio anuales de $MP_{2,5}$ entre los años 2014 y 2020 para las estaciones COY1 y COY2. En ambas estaciones, se verifica la superación de la norma anual de $MP_{2,5}$ vigente en Chile: de $20 \mu g/m^3$ promedio al año, durante tres años consecutivos, y la de percentil 0,98 de $50 \mu g/m^3$. De hecho, los valores observados casi triplican el valor de la norma y quintuplican el valor de percentil 98. En particular, se puede corroborar que en el año 2016 se alcanzaron las concentraciones anuales locales más altas, desde que se tiene registro en Coyhaique, año en que se cuadruplica el valor de la norma anual promedio. El 2016 es descrito, para el territorio de Patagonia, como un año extremo: de altas temperaturas y escasa precipitación (*Garreaud, 2018*). Los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020 muestran, de manera sistemática, medianas y promedios menores que los años anteriores. De acuerdo a los datos, se estima una baja probabilidad, cercano a un 12,5%, de que la tendencia observada a la disminución pueda ser producto del azar. Estimación realizada en base a suponer como hechos aleatorios e independientes que la concentración anual suba o baje en el tiempo. La regresión lineal de las medianas anuales del período de estudio entre 2016 y 2020 muestra una tendencia negativa de $-3 \pm 3 \mu g/m^3$ año ($-2 \pm 1 \mu g/m^3$ año) para la estación COY1 (COY2) (ver tabla Anexo 10.10). Como se ve en la figura 3.5, es importante mencionar que, en la medida que se ocupan los percentiles de concentración más altos para el cálculo de la regresión, la magnitud de la tendencia es mayor. Por ejemplo, en el percentil 75 la tendencia es de $-8 \pm 8 \mu g/m^3d$ ($-4 \pm 5 \mu g/m^3d$) y cambia a $-39 \pm 15 \mu g/m^3d$ ($-25 \pm 12 \mu g/m^3d$) en el percentil 98, para la estación COY1 (COY2). Esto puede deberse, a que las medidas de descontaminación están mayoritariamente enfocadas sobre las concentraciones más altas, como, por ejemplo, lo establecido como “periodo crítico” y “gestión de episodios críticos”, descritos en el PDA de Coyhaique (ver Anexo 10.2).

La tendencia observada, de mantenerse en el tiempo, permitiría alcanzar concentraciones en norma en un plazo de 7 ± 3 años (7 ± 1 años) para el promedio anual en COY1 (COY2) y de 9 ± 2 años (12 ± 3 años) para el percentil 98. Este resultado pudiera estar relacionado al impacto positivo de las medidas de planes de descontaminación por $MP_{2,5}$ en Coyhaique. Sin embargo, es importante considerar que, la dificultad en la implementación de las medidas de mitigación de emisiones tiende a requerir mayores esfuerzos con el tiempo. Debido a que, generalmente, se implementan las medidas más sencillas en un comienzo y posteriormente las más complejas por lo que la tendencia a la disminución podría desacelerarse en el futuro. También es interesante notar que este resultado no difiere de lo encontrado en el informe a las naciones del CR2 (*Huneeus et al., 2020*), ya que, de acuerdo a los mismos antecedentes, se seguirán observados eventos diarios críticos de contaminación en el futuro.

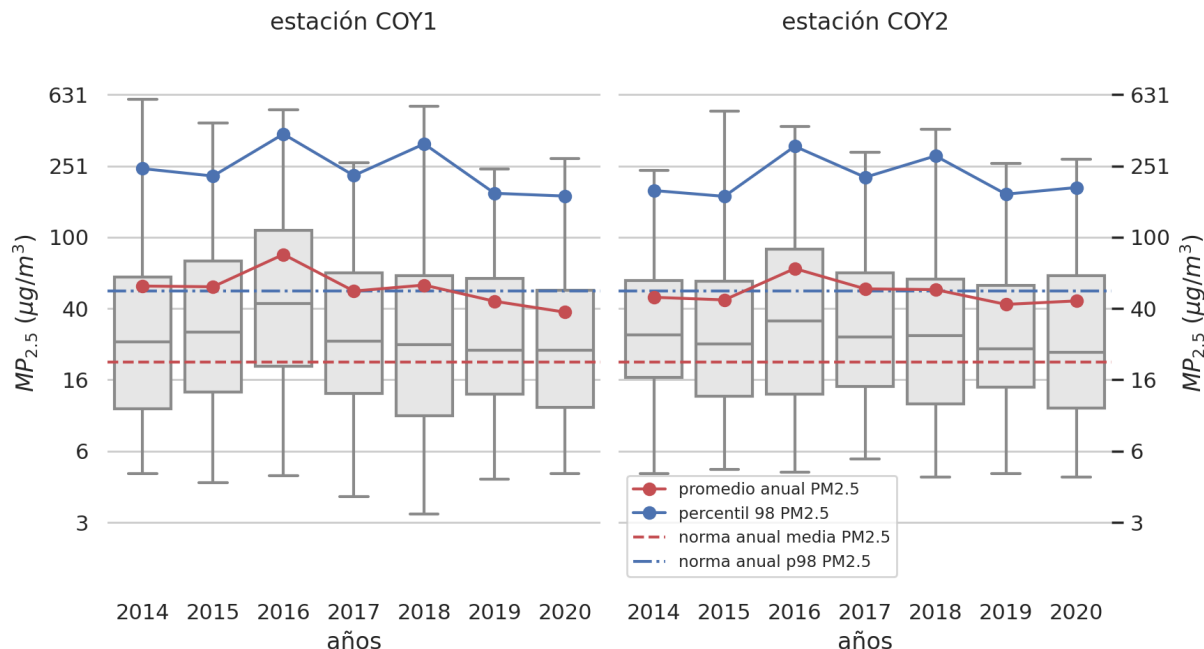


Figura 3.4: Distribución de las concentraciones anuales para el periodo diciembre 2013-2020 en las estaciones COY1 (panel izquierdo) y COY2 (panel derecho). (Elaboración propia a partir de datos SINCA). Mas detalles de gráficos de caja ver Anexo figura 10.22

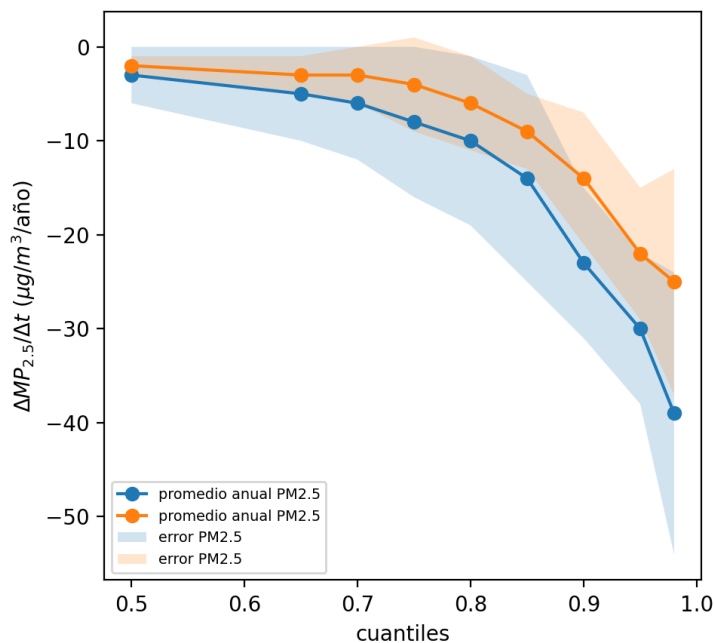


Figura 3.5: Valor de la pendiente en la regresión lineal de la distribución de las concentraciones anuales de MP_{2.5} para distintos percentiles entre 50 a 98 para COY1 y COY1 diciembre 2013 a 2020.

3.4. Comportamiento entre estaciones de monitoreo.

Al existir una buena concordancia entre el comportamiento de COY1 y COY2, no se podría descartar que existan factores comunes que modulan la variabilidad de ambas estaciones. En particular, esto sugeriría que tanto los factores meteorológicos de gran escala, como los de escala local, influyen de modo similar sobre ambas estaciones. Para ello, se realizan pruebas estadísticas sobre grupos de datos de material particulado fino, pertenecientes a los periodos cálidos y fríos de las estaciones COY1 y COY2.

3.4.1. Función de probabilidad del $MP_{2,5}$

Al comparar las distribuciones de probabilidades de concentración diaria de $MP_{2,5}$, no es posible rechazar que, durante el periodo frío, los dos grupos de datos pertenecientes a las estaciones COY1 y COY2, corresponden a una misma población, con un *valor p* de 0,88, mediante la prueba de *Kolmogórov-Smirnov (K-S)*. Por el contrario, las distribuciones entre el periodo cálido y el periodo frío, se observa una diferencia significativa para ambas estaciones (ver tabla 3.2), con un valor *p* de 0,07 y 0,05 para COY1 y COY2 respectivamente. Situación similar ocurre dentro del periodo cálido.

Las distribuciones de densidad de probabilidad diaria, en ambas estaciones, durante el periodo frío, se ajustan de mejor forma a una distribución de tipo log-normal (ver figura 3.6), con un valor *p* de 0,84 (0,98) para la estación COY1 (COY2). Los parámetros de ajuste encontrados para la función *log-normal* con el método máxima verosimilitud fueron, sigma: 0,86 (0,69), posición: 7,08 (0,55) y escala: 66,45 (79,89) para COY1 (COY2) (ver figura 3.6). Cabe mencionar que, la función *log-normal* en COY1 se ajusta a las observaciones en todo el rango de concentraciones, en cambio, COY2 se observa una desviación a la baja, en las concentraciones de $MP_{2,5}$ superiores a los $400 \mu g/m^3 d$, como se ve en el gráfico cuantil cuantil (*QQ*), en la figura 3.6 panel derecho. No obstante, los datos de COY2 presentan una mejor bondad de ajuste a la función *log-normal* que COY1.

Tabla 3.2: estadística de los grupos asociados al período frío y cálido en las estaciones COY1 y COY2 mediante una prueba de *Kolmogórov-Smirnov (K-S)*. Calculado a partir de datos de SINCA diciembre 2013 a 2020

	$MP_{2,5}$		estadístico K-S	valor p	correlación
	grupo 1	grupo 2			
1	COY1 todo	COY2 todo	0,04	0,02	0,98
2	COY1 frío	COY2 frío	0,03	0,88	0,97
3	COY1 cálido	COY2 cálido	0,05	0,17	0,95
4	COY1 frío	COY1 cálido	0,07	0,04	-
5	COY2 frío	COY2 cálido	0,05	0,15	-

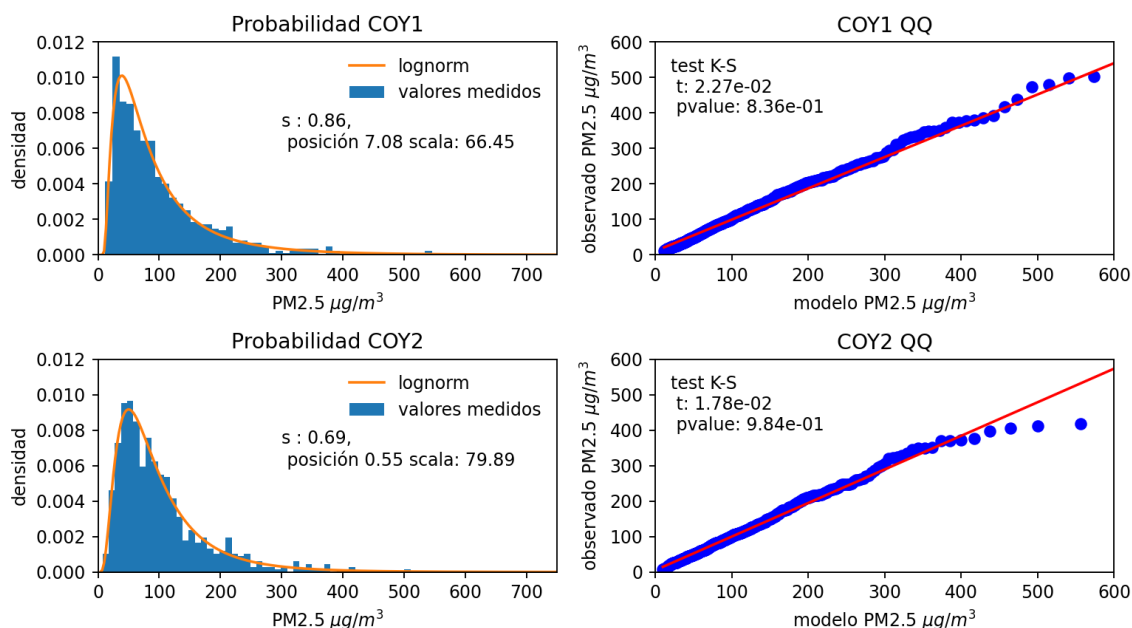


Figura 3.6: Distribución de probabilidad de $MP_{2,5}$ para COY1 y COY2 medido y función *log-normal* ajustada mediante el método de MV. Periodo verano (gráficas superiores) y periodo invierno (gráficas inferiores). Calculado a partir de las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ durante el periodo diciembre 2013 a 2020. (Elaboración propia a partir de datos SINCA).

3.4.2. Covariación y correlación del $MP_{2,5}$ en Coyhaique

En la figura 3.6 se muestra dicha relación entre COY1 y COY2 para los períodos cálidos y fríos, considerando valores horarios y diarios. Allí se verifica la alta correlación y covariación de ambas estaciones, especialmente a escala interdiaria. No obstante, también es claro que la estación COY2 tiene más informlog-normalización que COY1 en el período considerado (ver Anexo 10.3 Tabla 10.4 y 10.5). Adicionalmente, la pendiente de la curva cercana a uno indicaría que los efectos en la magnitud de los forzamientos (meteorológicos y emisiones) serían de similar magnitud en ambas estaciones. Esta situación permite, entonces, caracterizar la variabilidad de origen sinóptico a partir de cualquiera de las estaciones o una combinación de ambas. Tabla 3.2: Comparación estadística de los grupos asociados al período frío y cálido en las estaciones COY1 y COY2 mediante una prueba de *Kolmogórov-Smirnov* ($K - S$)

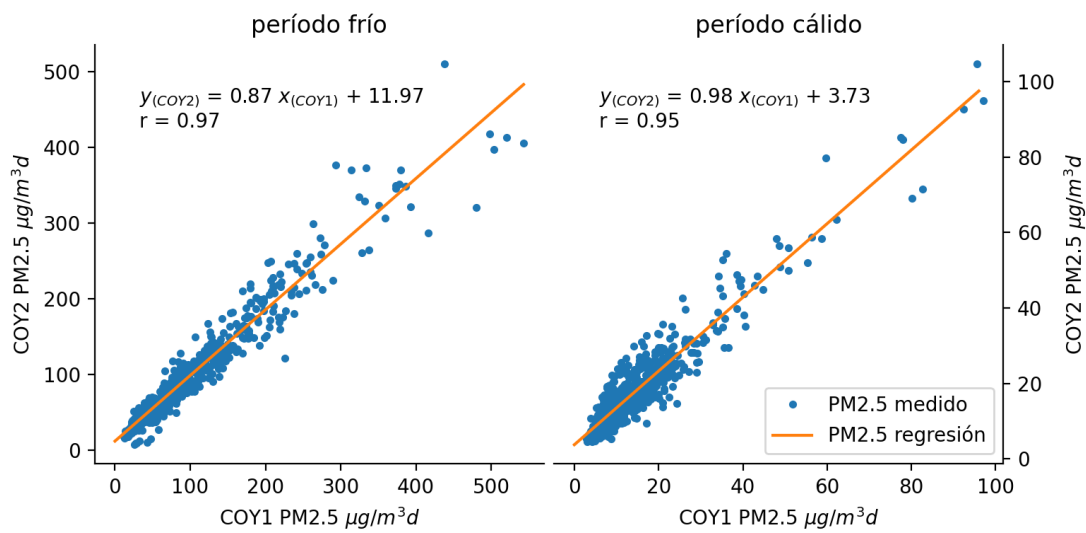


Figura 3.7: Comparación de concentraciones $\text{MP}_{2,5}$ entre las estaciones COY1 y COY2. Los dos gráficos superiores corresponden a datos horarios y los dos inferiores a datos promedio diarios. Las relaciones se construyeron tanto para el periodo frío como el cálido. Periodo de datos diciembre 2013 a diciembre 2020. (Elaboración propia fuente de datos SINCA, periodo diciembre 2013 a 2020)

Capítulo 4

Eventos diarios y episodios de alta concentración de $MP_{2,5}$

4.1. Análisis de datos de $MP_{2,5}$

Para el análisis de los episodios críticos de calidad del aire, se trabajó sobre una serie que combinaba de las concentraciones de $MP_{2,5}$ de ambas estaciones de Calidad del Aire de Coyhaique. Para este estudio, se consideró como episodios de emergencia ambiental por $MP_{2,5}$, al conjunto de días consecutivos con concentraciones medias diarias que superan los niveles que definen situaciones de emergencia ambiental. Un resumen estadístico, con los resultados de la nueva serie son mostrados en la tabla 4.1. De ellos se aprecia que la nueva serie no difiere, significativamente, de los datos originales en los distintos segmentos de la curva de distribución de probabilidades (percentiles). De igual forma, se mantiene una alta correlación con COY2 ($r = 0,97$), particularmente en el periodo frío (ver figura 4.1). También se mejora la distribución de probabilidades de COY1, en las concentraciones bajas principalmente, en donde se observaban algunas “frecuencias anómalas”, es decir, cambios bruscos de frecuencias de ocurrencias entre rangos de concentraciones próximas o similares. Esta mejora permite obtener un valor $p = 0,95$ para una prueba de K-S, aplicando una distribución log-normal como se ve en la figura 4.2. Por último, y quizás lo más importante para temas de análisis de episodios de contaminación para este trabajo, es que se logra incrementar el número de días válidos, pasado de 748 días (COY1) a 858 días (nueva serie) en el periodo frío. Esta consideración es crítica para evitar que episodios sean catalogados inadecuadamente de acuerdo con su duración. Lo que permite comparar días equivalentes dentro de una misma clasificación de episodios, por ejemplo, todos los días 2 dentro de un episodio de 3 días de duración, factor necesario para la construcción de los compuestos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los mejores estimadores estadísticos para describir la población de datos de $MP_{2,5}$ de Coyhaique mediante una función log-normal, son sigma: 0,86 (0,69), posición: 7,08 (0,55) y escala: 66,45 (79,89), para COY1 (COY2). En consecuencia, se recomienda que la visualización de las concentraciones, como por ejemplo gráficos de caja anual, sea empleando la escala logarítmica para la concentración diaria de $MP_{2,5}$. Esto, entre

otras cosas, reduce ostensiblemente en las gráficas el número de datos fuera de rango.

Tabla 4.1: Comparación estadística de concentraciones de material particulado fino, entre la nueva serie y medidas por las estaciones COY1 y COY2 de SINCA. Datos calculados a partir las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$. Periodo empleado diciembre 2013 a 2020.

	$MP_{2,5} \mu g/m^3d$					
	COY1	año completo			período frío	
		COY2	Serie nueva	COY1	COY2	Serie nueva
número	2144	2251	2522	748	668	858
promedio	53	49	51	102	101	101
Desviación	68	58	67	86	74	85
Mínimo	3	4	2	12	7	3
25 %	12	13	10	44	49	44
50 %	27	26	24	75	82	76
75 %	66	61	62	129	126	130
98 %	260	234	258	373	332	351
Máximo	592	511	592	592	511	592

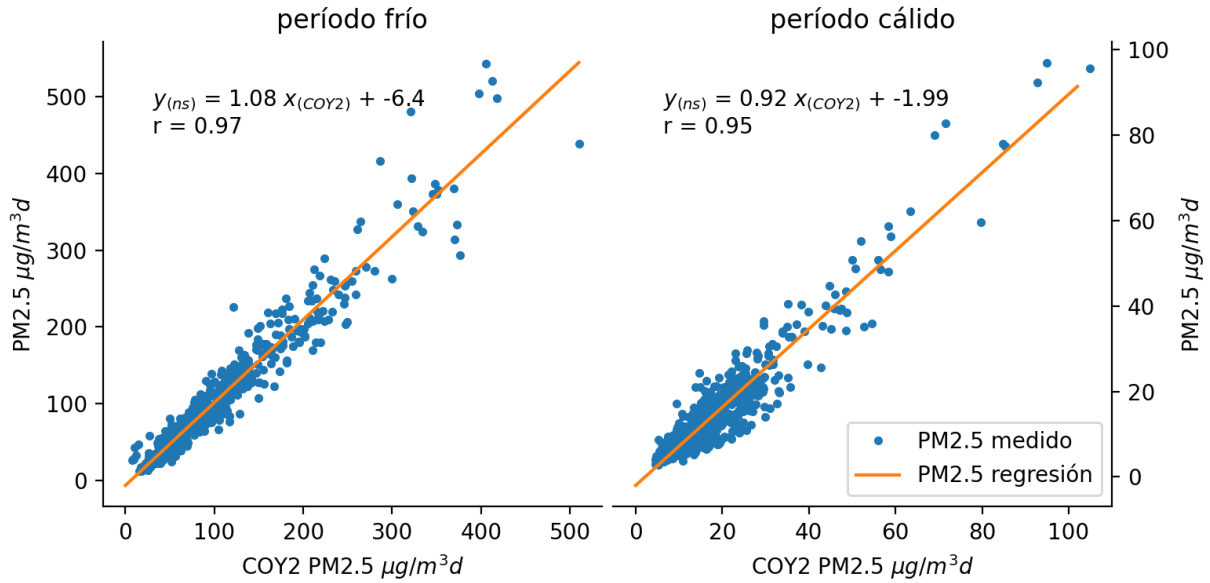


Figura 4.1: Comparación de concentraciones diarias de $MP_{2.5}$ entre las estaciones COY2 (eje X) y la nueva serie de datos (eje Y). Las relaciones se construyeron tanto para el periodo frío como el cálido. Periodo de datos diciembre 2013 a diciembre 2020. (Elaboración propia fuente de datos SINCA)

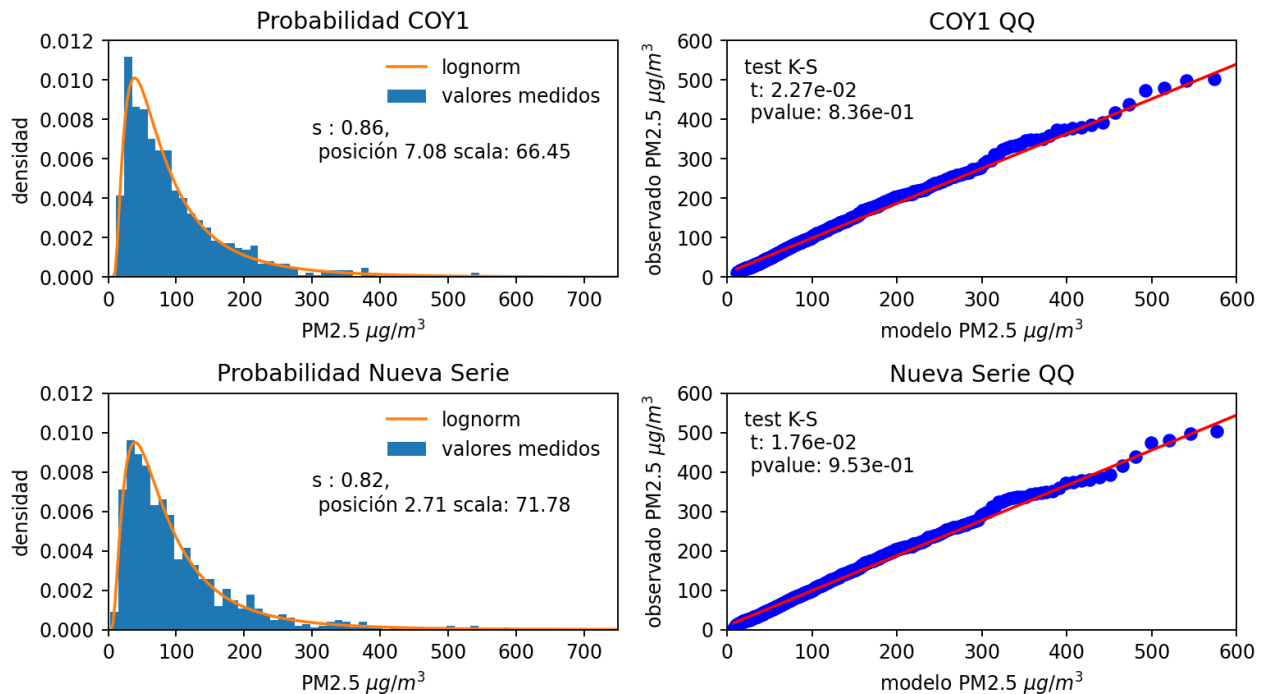


Figura 4.2: Distribución de probabilidad de $MP_{2.5}$ para COY1 y nueva serie de datos. En barras azules se grafica las probabilidades medidas y en línea naranja está el ajuste de una función log-normal, mediante el método de máxima verosimilitud. Calculado a partir de las concentraciones diarias de $MP_{2.5}$ durante el periodo de invierno 2014-2020. (Elaboración propia a partir de datos SINCA).

4.2. Caracterización de los eventos diarios de $MP_{2,5}$

A partir de las concentraciones promedio diarias (24 horas), y comparando con la normativa vigente, se determinan los días que corresponden a alerta ($\geq 80 - 119 \mu g/m^3$), preemergencia ($\geq 110 - 169 \mu g/m^3$) y emergencia ($\geq 170 \mu g/m^3$) ambiental, por material particulado fino ($MP_{2,5}$). Los días que exceden la norma se ilustran, para cada nivel, en la figura 4.3. Durante el periodo entre 2014 y 2020 se registraron 502 eventos diarios (20% de días del periodo) en donde se igualó o superó el nivel de alerta ambiental para $MP_{2,5}$ (Tabla 4.2). De ellos, 173 días (7% del periodo) correspondían al nivel de alerta, 171 días (7% del periodo) al nivel de preemergencia y 158 (6% del periodo) días al nivel de emergencia. Según estos resultados, para un año promedio se registran 72 ± 26 días con nivel igual o superior a la alerta ambiental para $MP_{2,5}$, de los cuales 23 ± 11 corresponden al nivel de emergencia ambiental por $MP_{2,5}$.

Hay que destacar que el año 2016 fue especialmente crítico: para este año, se contabilizaron 99 eventos diarios con nivel igual o superior a la alerta ambiental (28% días del año), de los cuales 44 días (12%) corresponden al nivel emergencia, 31 (9%) días al nivel preemergencia y 24 (7%) días al nivel alerta. En contraste, el año 2017 fue un año con una menor cantidad de eventos diarios (64 eventos diarios): 19 alertas (5%), 23 preemergencias (6%) y 22 emergencias (6%) (ver tabla 4.2). De igual manera a lo descrito con las concentraciones medias de $MP_{2,5}$, se constata una tendencia negativa del número de eventos diarios de emergencia y preemergencia en el período 2016 al 2020. Por ejemplo, si tomamos los 4 últimos años (2017 al 2020), se registra una diferencia de -24 eventos diarios de contaminación diaria de $MP_{2,5}$, esto quiere decir, que se pasó de 69 (19%) eventos diarios con concentraciones iguales o superiores a los $80 \mu g/m^3$ en el año 2018, a 45 (14%) en el año 2020. Esto se ilustra en la Figura 4.4. En el caso de los eventos diarios con nivel de alerta la tendencia a la disminución no es clara, e incluso en algunos años se observa un incremento del número de eventos diarios. Este resultado, podría estar directamente relacionado a que la disminución de las concentraciones estaría dándose sobre los valores (concentraciones) más altos de $MP_{2,5}$, lo que provocaría un incremento de las concentraciones medias, es decir un cambio en la distribución de probabilidades.

Tanto la tabla 4.3, como la figura 4.3 muestran que, durante el periodo frío (mayo a agosto), existe un mayor número de estos eventos diarios de contaminación por $MP_{2,5}$, esto es, superación de la norma diaria (promedio horario de 0-23 h) para $MP_{2,5}$. Además, los meses de invierno son los más críticos, siendo julio, el mes que en promedio registra el mayor número de preemergencias y emergencias del año, con 6 ± 2 y 6 ± 3 días respectivamente.

Tabla 4.2: Comparación anual del número (cantidad) y porcentaje de eventos diarios de contaminación por $MP_{2,5}$ para los años 2014 al 2020. Subdivididos en niveles de alerta ($80-119 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$), preemergencia ($110-169 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) y emergencia ($\geq 170 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) ambiental. Los datos empleados fueron a partir de la nueva serie de datos construida con COY1 y COY2 de la Red SINCA de Coyhaique.

años	$< 80 \mu g/m^3$		alerta		preemergencia		emergencia		total episodio	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
2014	277	76	23	6	37	10	28	8	88	24
2015	279	77	39	11	27	7	17	5	83	23
2016	255	72	24	7	31	9	44	12	99	28
2017	300	82	19	5	23	6	22	6	64	18
2018	292	81	25	7	19	5	25	7	69	19
2019	307	85	25	7	18	5	11	3	54	15
2020	279	86	18	6	16	5	11	3	45	14
total	1989	80	173	7	171	7	158	6	502	20

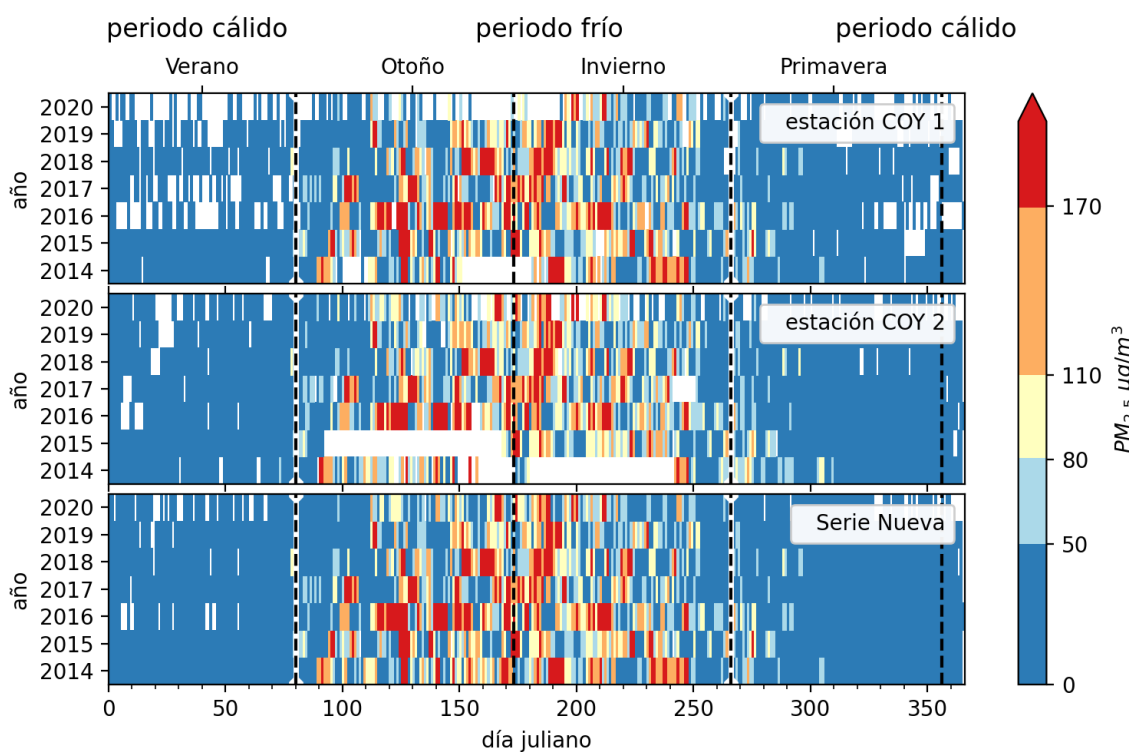


Figura 4.3: Calendario de promedios de nivel normal ($0-50 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$), contaminado ($50-80 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) ($>50 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$ límite de la norma de calidad primaria para $MP_{2,5}$ desde el 2022), alerta ($80-119 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$), preemergencia ($110-169 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) y emergencia (igual o sobre $170 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) ambiental por $MP_{2,5}$, para las estaciones COY1 (gráfica superior), COY2 (gráfica central) y nueva serie de $MP_{2,5}$ (gráfica inferior). Periodo de estudio 2014 y 2020. La paleta de color fue desarrollada por Cynthia Brewer (ver <http://colorbrewer2.org/>)

Tabla 4.3: Número de eventos diarios críticos por mes para la nueva serie de $MP_{2,5}$ estimada a partir de la nueva serie de datos de $MP_{2,5}$ calculada a partir de las estaciones COY1 y COY2 de SINCA. Periodo evaluado 2014-2020

	N° Promedio			
	$< 70 \mu g/m^3$	alerta	preemergencia	emergencia
Enero	28 ± 4	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Febrero	26 ± 2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Marzo	30 ± 2	1 ± 1	0 ± 0	0 ± 0
Abril	22 ± 5	2 ± 2	3 ± 3	2 ± 2
Mayo	18 ± 5	4 ± 2	4 ± 2	5 ± 6
Junio	13 ± 3	6 ± 2	5 ± 2	6 ± 3
Julio	13 ± 3	6 ± 2	6 ± 2	6 ± 3
Agosto	20 ± 6	4 ± 3	5 ± 4	3 ± 2
septiembre	26 ± 3	2 ± 2	1 ± 1	1 ± 1
Octubre	30 ± 1	1 ± 1	0 ± 0	0 ± 0
noviembre	29 ± 2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
diciembre	29 ± 5	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

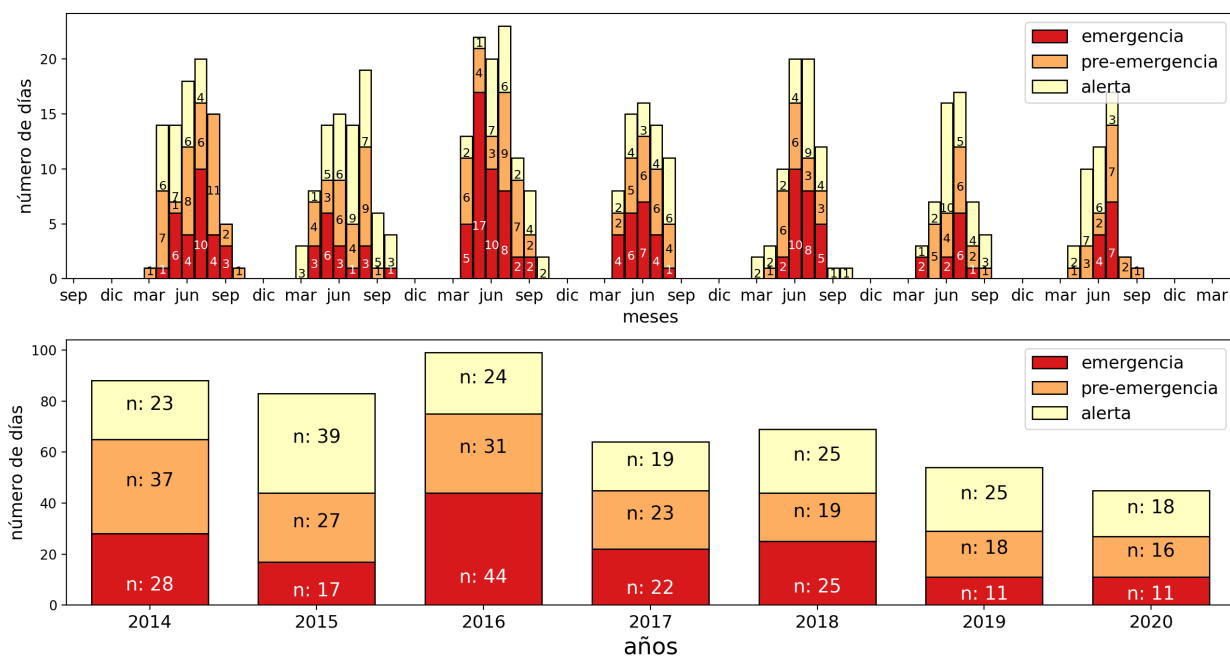


Figura 4.4: Número de eventos diarios de contaminación atmosférica por $MP_{2,5}$ mensuales (gráfica superior) y anuales (gráfica inferior). Los niveles son: alerta ($80-119 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$), preemergencia ($110-169 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) y emergencia (igual o sobre $170 \mu g/m^3 d MP_{2,5}$) para la nueva serie de $MP_{2,5}$ en Coyhaique. Periodo 2014 y 2020. La paleta de color fue desarrollada por Cynthia Brewer (ver <http://colorbrewer2.org/>)

4.3. Probabilidad de excedencia de la norma diaria de $MP_{2,5}$

Los resultados obtenidos a partir de las curvas de densidad de probabilidad *log-normal*, muestran que, durante el periodo frío, existe un 70 % de probabilidad de encontrar días contaminados por material particulado fino. Esto quiere decir, con valores medios diarios $\geq 50 \mu g/m^3$ (límite de la norma de calidad primaria para $MP_{2,5}$ desde el 2022) y 46 % de probabilidad de que suceda un evento diario que iguale o supere el valor de alerta ($\geq 80 \mu g/m^3$). La probabilidad disminuye a un 29,4 % y 17 %, respectivamente, cuando se considera el año completo (365 días). De igual manera, en el periodo frío, existe una probabilidad diaria de un 15 %, de que exista un evento diario de $MP_{2,5}$, que iguale o excedan el nivel de emergencia ambiental ($\geq 170 \mu g/m^3d$), como se ve en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Número de eventos diarios críticos por mes para la nueva serie de $MP_{2,5}$ estimada a partir de la nueva serie de datos de $MP_{2,5}$ calculada a partir de las estaciones COY1 y COY2 de SINCA. Periodo evaluado 2014-2020

Categoría	$MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3d$)	Año completo		Periodo frío	
		COY1 (%)	Nueva serie (%)	COY1 (%)	Nueva serie (%)
Contaminado	≥ 50	31,0	29,4	69,5	69,5
Alerta	≥ 80	17,6	16,8	45,7	46,4
Pre-emergencia	≥ 110	11,1	10,6	30,5	31
Emergencia	≥ 170	5,2	5,1	14,8	15

4.4. Clasificación de los episodios de contaminación

Durante el periodo 2014-2020 se calculan 151, 122 y 76 episodios que igualan o superan el nivel de alerta, preemergencia y emergencia ambiental de material particulado fino diario, respectivamente. Importante que se considere que para este trabajo se diferencia lo que es un evento diario de contaminación por $MP_{2,5}$, de lo que es un episodio de $MP_{2,5}$. Al clasificar los episodios críticos de contaminación por material particulado fino de acuerdo con su duración en días, se encuentra que los episodios más frecuentes, son los de un día de duración, en todos los niveles, esto quiere decir: emergencia, preemergencia y alerta ambiental. En el caso de los episodios con nivel de emergencia ambiental por $MP_{2,5}$, se contabilizan 39 episodios de un día de duración, como se muestra en la figura 4.5 (panel izquierdo). Luego siguen los episodios de 2 (3) días de duración con 16 (12) eventos diarios. Situación similar se observa con los niveles de preemergencia y alerta ambiental. De acuerdo con lo que se muestra en la figura 4.5, mientras mayor sea la duración sea el episodio, existe una menor posibilidad de que un episodio de contaminación atmosférica ocurra. Este comportamiento se observa, de manera general, para todos los niveles de contaminación. Solamente en los episodios de seis días de duración, en el nivel de emergencia y preemergencia, se viola levemente esta regla. Es así como se observan, para episodios con 6 días duración (ver figura 4.5), tres casos para el nivel de emergencia y siete casos en el nivel de preemergencia.

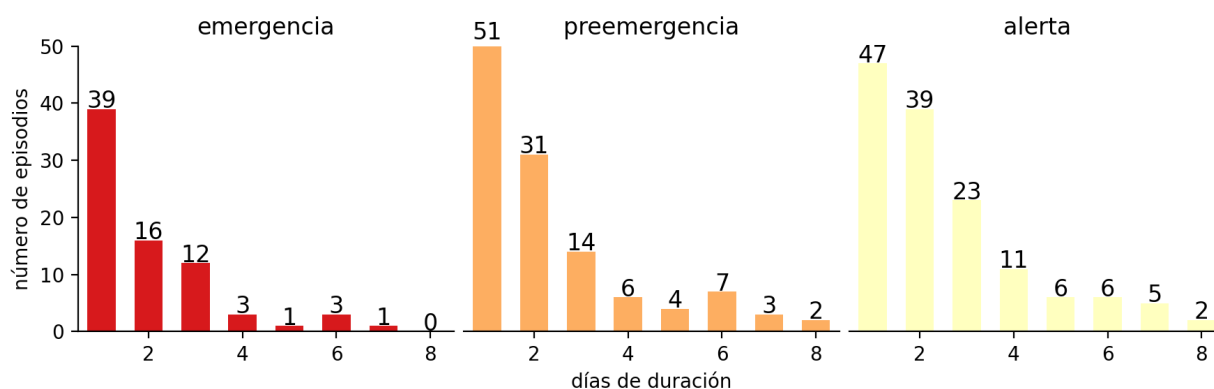


Figura 4.5: Frecuencia de episodios de contaminación ambiental diaria por $MP_{2,5}$ en Coyhaique, clasificados de acuerdo con duración y con nivel de excedencia: Emergencia ($\geq 170 \mu g/m^3$), igual o superior a preemergencia ($\geq 110 \mu g/m^3$) e igual o superior a alerta ambiental ($\geq 80 \mu g/m^3$) por $MP_{2,5}$. Periodo empleado 2014 a 2020 a partir de datos procesados del SINCA.

Es importante tener presente que los episodios iguales o superiores a 6 días de duración, se encuentran en el límite o superan la frecuencia “normal” de oscilación, para fenómenos de escala sinóptica (~ 7 días como periodo de onda). Por esta causa, es probable que este tipo de episodios puedan estar asociados a fenómenos casi estacionarios, como los que se esperaría durante episodios de estancamiento atmosférico. En tales condiciones, un sistema de alta presión migratoria se desplaza más lento que su entorno o tiende a establecerse, por algunos días, sobre un territorio determinado. Sin embargo, como se describió anteriormente, estas condiciones representan un número menor casos, por lo que su análisis estadístico pierde sentido y deben ser abordados individualmente.

El número de episodios anuales, para el periodo 2014 a 2020, según su duración e intensidad, se muestra en la figura 4.6, agrupados en niveles contaminación por $MP_{2,5}$. Lo primero que observa en la gráfica, es que, para el nivel de emergencia, y en gran medida los niveles de preemergencia, los episodios de un día duración son los más comunes de observar, en todos los años. Esto concuerda con el espectro de frecuencia descrito en la figura 4.5. En el caso de año 2016, el cual en términos de concentraciones es un año con altos niveles de contaminación por material particulado fino, se observa un incremento en el número de episodios de 3 días de duración, en los niveles de emergencia y preemergencia ambiental, con 4 episodios. Esto podría sugerir que, altos niveles anuales de contaminación por $MP_{2,5}$, estarían asociados a una mayor intensidad y duración de los episodios de contaminación y no a un incremento en la frecuencia anual de los mismos episodios.

La distribución anual de episodios de contaminación por $MP_{2,5}$, como es de esperar, tiene un máximo en los meses de invierno, como se ve en la figura 4.7. Nuevamente, los episodios de un día de duración dominan el espectro, con una mayor frecuencia relativa mensual en los niveles de emergencia y preemergencia ambiental. En promedio el mes de julio llega a tener 2 episodios de 1 día de duración, con nivel de emergencia ambiental.

En los paneles de la figura 4.8, se representan los compuestos de las concentraciones

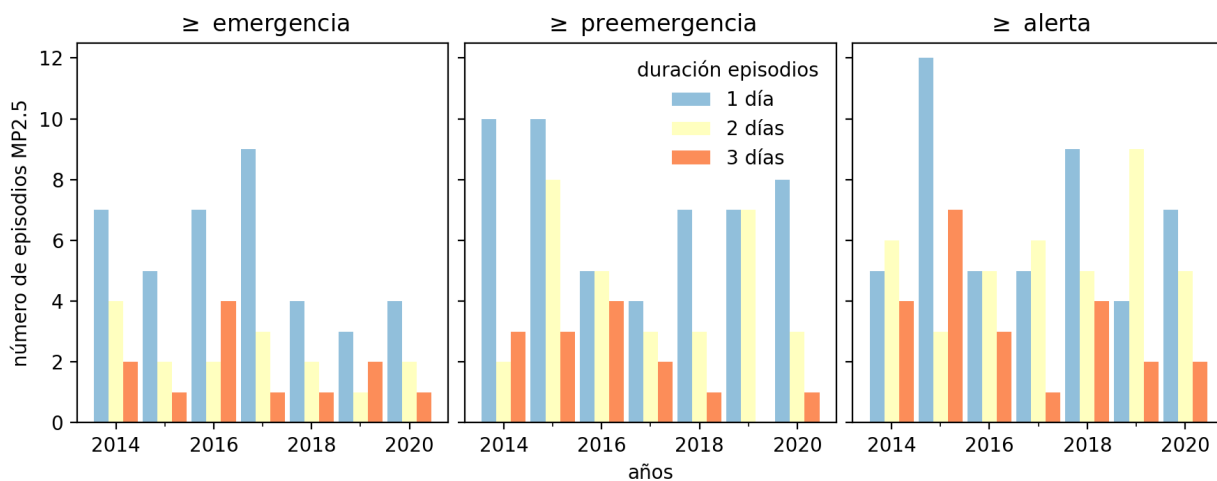


Figura 4.6: Contabilidad del número de episodios de contaminación por MP_{2,5} anual, para el periodo 2014-2020. Los episodios fueron agrupados en niveles que igualan o superan las concentraciones diarias de emergencia, preemergencia y alerta ambiental. Cada año esta subdivido en episodios de 1 2 y 3 días de duración. Paleta de colores desarrollada por Cynthia Brewer (<http://colorbrewer2.org/>)

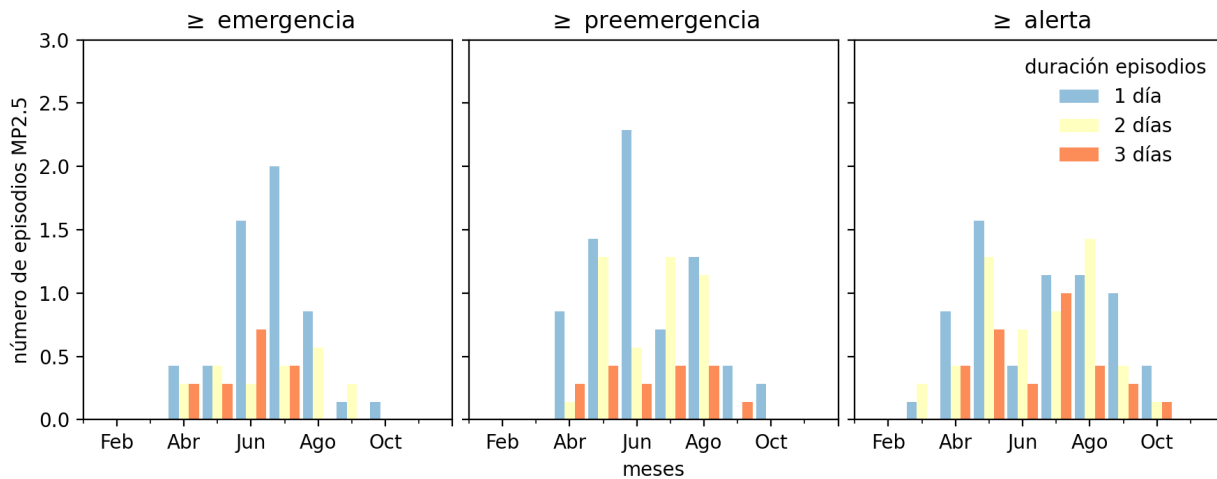


Figura 4.7: Episodios de contaminación por MP_{2,5}, para el periodo 2014-2020. Los episodios fueron agrupados en niveles que igualan o superan las concentraciones diarias de emergencia, preemergencia y alerta ambiental. Cada año esta subdivido en episodios de 1 2 y 3 días de duración. Paleta de colores desarrollada por Cynthia Brewer (<http://colorbrewer2.org/>)

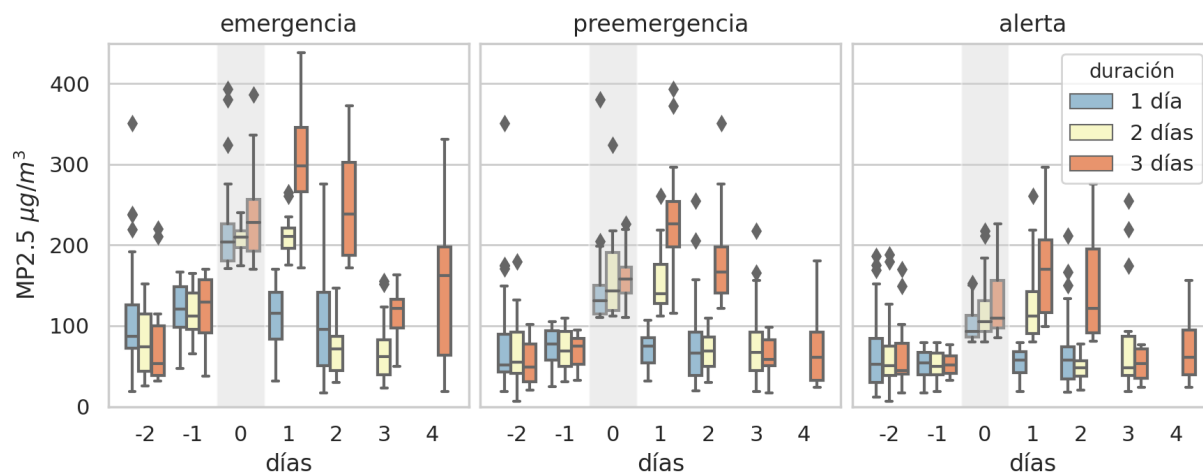


Figura 4.8: Compuesto de concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ para episodios de 1, 2, 3 días de duración y nivel contaminación. El nivel de contaminación se define como emergencia a las concentraciones de $MP_{2,5} \geq 170 \mu g/m^3$, preemergencia a las concentraciones de $MP_{2,5} \geq 110 \mu g/m^3$ y alerta ambiental a las concentraciones de $MP_{2,5} \geq 80 \mu g/m^3$. La franja gris indica el primer día de episodio (día 0). Periodo empleado 2014 a 2020 a partir de datos procesados del SINCA. Paleta de colores desarrollada por Cynthia Brewer (ver <http://colorbrewer2.org/>). Mas detalles de gráficos de caja ver Anexo figura 10.22

diarias de $MP_{2,5}$ para los niveles de emergencia (panel izquierdo), iguales o superiores a preemergencia (panel central) e iguales o superiores a alerta ambiental (panel derecho) por material particulado fino. Para cada uno de los paneles, se grafican en cajas los episodios de 1, 2, 3 días de duración, con una coloración determinada. A cada episodio, se agregó dos días antes y dos días después del inicio y final de la emergencia por $MP_{2,5}$. Es permite observar la evolución temporal del episodio, siendo 0 el día inicial del episodio, -2 y -1 los días previos y los dos últimos valores los correspondientes a los días posteriores al episodio.

Los episodios de un día de duración presentan una distribución de concentraciones, con una importante simetría, respecto del día central (día 0). Los promedios para el día 0 son $216 \pm 52 \mu g/m^3$, $142 \pm 42 \mu g/m^3$, $102 \pm 20 \mu g/m^3$, para los niveles iguales o superiores a emergencia, preemergencia y alerta ambiental por $MP_{2,5}$, respectivamente. En cambio, los episodios de 2 días de duración, tanto el día inicial (día 0) como el segundo día (día 1), presentan concentraciones similares. Los promedios para los episodios de dos días son $210 \pm 22 \mu g/m^3$, $156 \pm 43 \mu g/m^3$, $121 \pm 40 \mu g/m^3$, para los niveles iguales o superiores a emergencia, preemergencia y alerta ambiental por $MP_{2,5}$, respectivamente. Para los episodios de tres días de duración, la máxima concentración ocurre típicamente el segundo día (día 1) después de iniciarse el episodio de emergencia. En este caso, el nivel de concentración promedio alcanzada en el día 1 es de $305 \pm 73 \mu g/m^3$ y deciente a $236 \pm 78 \mu g/m^3$ y $164 \pm 55 \mu g/m^3$ para los niveles iguales o superiores a emergencia, preemergencia y alerta ambiental por $MP_{2,5}$, respectivamente. En los dos días posteriores a cada episodio, las concentraciones descienden de manera significativa, como se ve en las distintas gráficas de la figura 4.8.

Capítulo 5

Condiciones atmosféricas asociadas a la escala sinóptica que modulan los episodios con nivel de emergencia de $MP_{2,5}$ en Coyhaique

A continuación, se presenta los compuestos de los campos meteorológicos de las anomalías medias seleccionados a partir de los episodios de emergencia de $MP_{2,5}$. Los campos seleccionados fueron altura geopotencial, omega, temperatura, viento zonal y viento meridional, para los niveles de altura de 925 hPa y 500 hPa. Estos niveles equivalen aproximadamente a los 700 m s.n.m. y los 5500 m s.n.m. respectivamente. Adicionalmente, para cada uno de estos campos meteorológicos se describen los cortes verticales, entre la superficie y la tropósfera alta, esto quiere decir entre los 1000 hPa (~ 100 m s.n.m.) a 200 hPa (~ 12.000 m s.n.m.). También se realiza un análisis de la cobertura nubosa total, que integra el total de la columna de aire durante los días de episodio por $MP_{2,5}$. Al final de la sección se describirán una comparación de los resultados correspondientes a las emergencias de un día de duración, con los episodios de 2, 3 y 6 días de duración. Cabe mencionar que los episodios de emergencia de un día de duración son los más comunes, con 33 casos durante el periodo del 2014 al 2020, como se describió en el capítulo anterior y, por lo tanto, cuentan con una mayor cantidad de eventos con los cuales se puede hacer estadística.

5.1. Altura Geopotencial (hgt) durante los episodios de $MP_{2,5}$

La altura geopotencial (hgt) es una medida del espesor de la atmósfera (altura), calculada a partir de una superficie de igual presión o isobárica. Por este motivo, se asemeja a la presión atmosférica, es decir, mayor altura geopotencial “equivale” a decir mayor presión del aire y, por el contrario, menor altura geopotencial es concordante con una baja en la presión atmosférica.

Durante los días de episodio de emergencia por MP_{2,5} de un día de duración, se observa una anomalía positiva en el compuesto de altura geopotencial o sus siglas en inglés *hgt*. Como se ilustra en la figura 5.1, el centro de la anomalía de *hgt* se ubica en torno a “*Tierra el Fuego*” y “*paso Drake*”. La anomalía de *hgt* se aprecia tanto en la tropósfera baja (nivel 925 hPa), próxima al suelo, como en la tropósfera media (nivel 500 hPa), a aproximadamente 5 km de altura del suelo. Un corte vertical a 60°S muestra que la anomalía atraviesa todos los niveles de la tropósfera, es decir de 0 a ~10 km de altura, como se ilustra en la figura 5.2. La mayor magnitud de la anomalía de *hgt* ocurre en la tropósfera media y superior, esto quiere decir igual o superior al nivel de 500 hPa y con magnitudes de la anomalía iguales o superiores a los 90 m de altura geopotencial o *hgt*. La intensidad de la anomalía se incrementa a medida que nos acercamos al día del episodio de emergencia por MP_{2,5} (día 0). Durante los días analizados, existe un desplazamiento diario de la anomalía, con trayectoria oeste-este (W-E), siguiendo la orientación de la circulación general atmosférica en donde domina los vientos del oeste (W). El día -2, previo al episodio, el centro de la anomalía se ubica al sur, en el “*océano Pacífico*”, aproximadamente latitud 60° S y longitud 90 °O. Es decir, frente al “*mar de Bellingshausen*” (costas de la Antártida occidental). Su mayor intensidad está en torno a los 300 hPa. Durante el día del episodio de emergencia por MP_{2,5} (día 0) la anomalía de *hgt* se encuentra en el meridiano próximo a la ciudad de Coyhaique (72 °O), sobre el “*paso Drake*”, entre “*Tierra del Fuego*” y la “*península Antártica*”. Durante el episodio de emergencia, ocurre el máximo desarrollo espacial, vertical y horizontal, de la anomalía. Los días posteriores al episodio (+1 y +2), decae en magnitud a valores de 10 m. En estos días el desplazamiento de la anomalía de *hgt* se mantiene con dirección Nor-Oeste (N-W), hacia el océano atlántico, cerca de las “*Islas Malvinas*”. Conjuntamente, se observa un debilitamiento de la intensidad de la anomalía media positiva de *hgt*, lo que se aprecia como una disminución de altura y cobertura espacial.

Una segunda diferencia meteorológica de *hgt* frente a los campos medios, corresponde a una anomalía media negativa que se ubica frente a las costas de Chile central. Dicha anomalía negativa se observa tanto en el campo con nivel 925 hPa, como el de 500 hPa. La anomalía de *hgt* se hace más negativa, conjuntamente que avanza la anomalía positiva antes descrita. Su mayor intensidad (negativa) sucede el día del episodio de emergencia (día 0). Paralelamente, se conforma otra anomalía negativa de *hgt* ubicada más al sur, en el “*mar de Weddell*” (sector oriental de la “*península Antártica*”) (ver metodología figura 2.1 mares Antárticos). Todas las anomalías de *hgt*, se intensifican en magnitud el día del episodio de emergencia por MP_{2,5}. Estas tres anomalías de *hgt* descritas, se encuentran alineadas formando una diagonal respecto al eje de rotación terrestre. De igual forma, todas las anomalías de *hgt*, son menos intensas en los niveles cercanos a la superficie.

La distribución de campos medios observados de anomalía de *hgt* generan un gradiente de presión con orientación sur norte (S-N), levemente inclinado al oeste (W). Para alcanzar un balance geostrófico, este gradiente de presión debería ser compensado, a la altura de Coyhaique, con un debilitamiento del viento del oeste (W), o la aparición de viento del este (E).

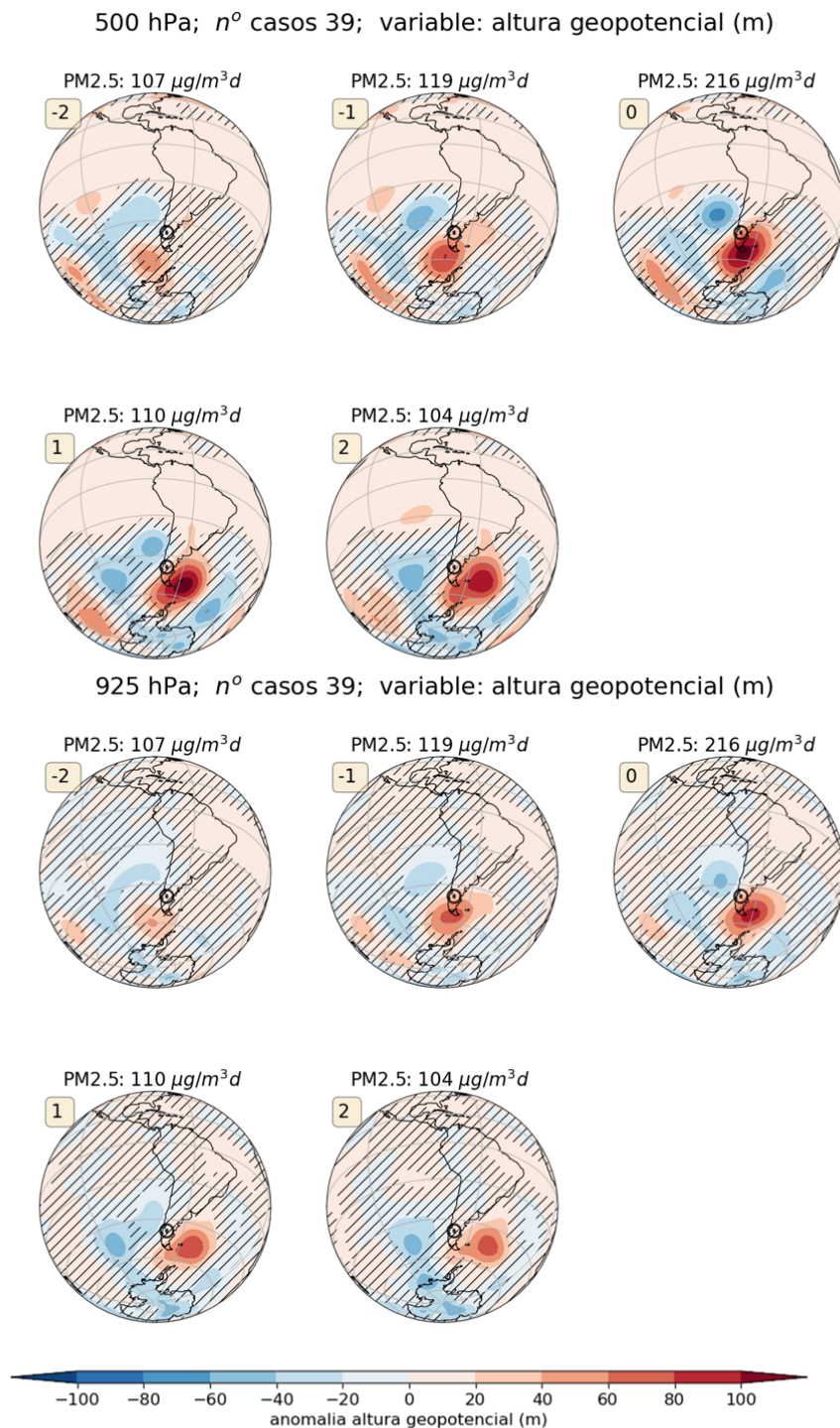


Figura 5.1: Compuesto de anomalías de altura geopotencial (hgt) diaria para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ de un día de duración. Día 0 corresponde al día de episodio de emergencia. Parte superior, se ubican los campos de nivel 500 hPa y en la parte inferior los de 925 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique, periodo 2014-2020. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1990-2020 (Kalnay et al. 1996)

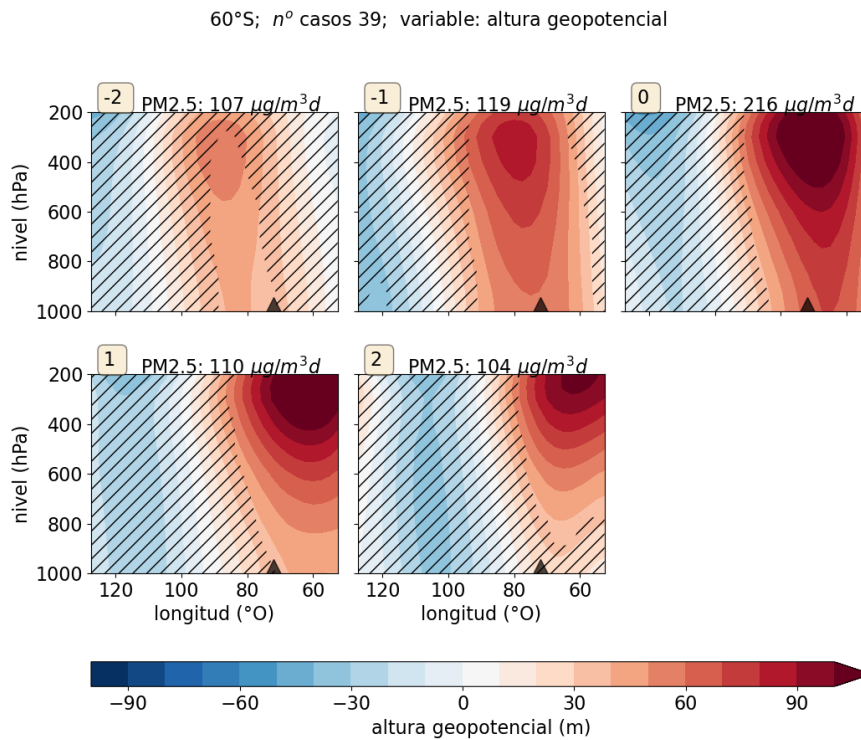


Figura 5.2: Corte vertical de los compuestos de anomalías de altura geopotencial diaria para los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ con un día de duración. Día 0 corresponde al día de episodio de emergencia. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Triángulo negro representa el meridiano en que se ubica la ciudad de Coyhaique.

En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1990-2020

(Kalnay et al. 1996)

5.2. Omega (ω) durante los episodios de MP_{2,5}

La variable omega (ω), representa los movimientos verticales de la atmósfera, siendo de signo negativo el ascenso y de signo positivo el descenso del aire. En la troposfera media (nivel 500 hPa), para el día -2, es decir dos días antes del episodio de emergencia, se observa una anomalía positiva media de ω (descenso o subsidencia aire), frente a las costas de la Patagonia a una longitud de 80°O (ver figura 5.3 panel superior día -2). Para el mismo nivel, el día -1 ocurre el máximo desarrollo positivo (vertical y horizontal) de la anomalía ω (ver figura 5.3 día -1). En el caso del nivel 925 hPa, el día previo y durante episodio (días -1 y 0), la anomalía positiva ω , ubica su centro en la zona occidental de la Patagonia, sobre “*Océano Pacífico*”, frente a las costas de Aysén. Un rasgo llamativo durante el episodio de emergencia, es que la anomalía de ω disminuye su intensidad en los niveles medios y altos de la tropósfera, pero se intensifica positivamente en los niveles más superficiales. En particular el día 0, el desarrollo vertical de la anomalía de ω se reduce, ubicándose en torno a los 1000 hPa (superficie) y los 600 hPa (\sim 4000 m s.n.m.) (ver figura 5.4). Paralelamente y durante todo el episodio se observa una anomalía negativa de ω en el nivel 925 hPa, la que se ubica con dirección noreste de Coyhaique, cercano al “*Río de la Plata*” en Argentina. Esta anomalía negativa de ω covaría con la anomalía positiva de ω , antes descrita. Los días posteriores al episodio, es decir días +1 y +2, existe un debilitamiento de la condición anómala, especialmente en intensidad.

Es importante mencionar que durante los episodios de emergencia de MP_{2,5} se identifica una inversión del flujo ω típico (ver climatología ver Anexo figura 10.15). Esto quiere decir, que se pasa de una componente negativa de ω (ascenso) en la vertiente oriental y positiva de ω (subsidencia) occidental de la Patagonia, se invierte a una condición de anomalía positiva (subsidencia) en la vertiente oriental y una anomalía negativa de ω (ascenso) occidental. Esta condición se muestra en la figura 5.3, en el nivel 925 hPa al compararlo con la climatología en la zona próxima a la capa límite.

La configuración espacial y temporal de los campos de ω (corte vertical), en la que se observa subsidencia en zonas próximas a la capa límite y la troposfera baja (niveles inferiores a los 500 hPa). Esta condición es coherente con una disminución de la cobertura nubosa y con una modulación del desarrollo de la capa de mezcla superficial. La anomalía promedio de ω es particularmente intensa el día previo, en la costa de la Patagonia occidental y sobre el territorio de Aysén. El día del episodio (día 0), la intensificación de la subsidencia, concuerda con un calentamiento de la tropósfera baja, próxima a la capa límite. La mencionada condición, dificultaría o modularía el desarrollo vertical de capa mezcla donde se diluyen los contaminantes atmosféricos emitidos en superficie.

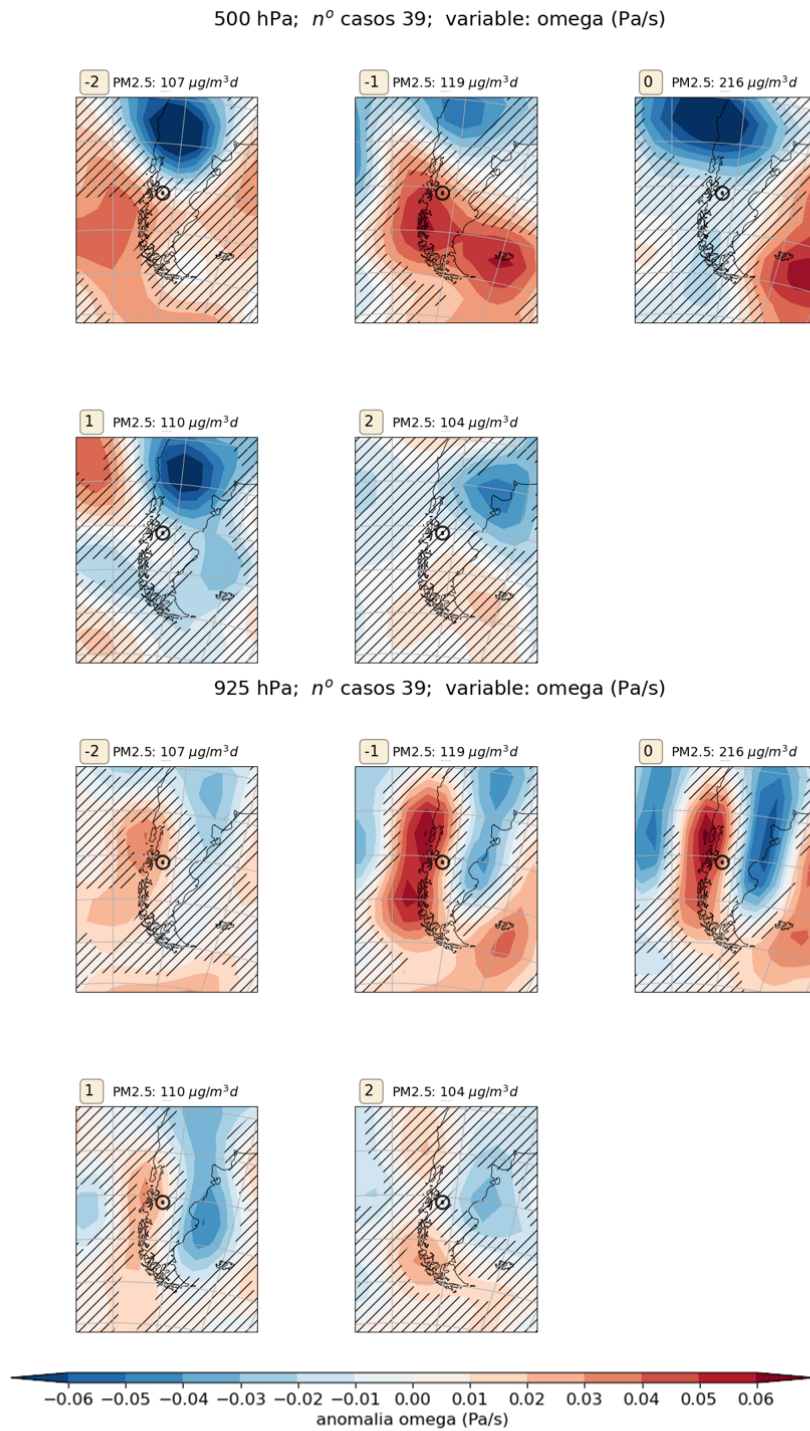


Figura 5.3: Compuesto de omega (movimiento vertical) diario para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Parte superior, se ubican los campos de nivel 500 hPa y en la parte inferior los de 925 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada panel se muestra el día del episodio y la concentración de $MP_{2,5}$ media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90% a partir de t-student.

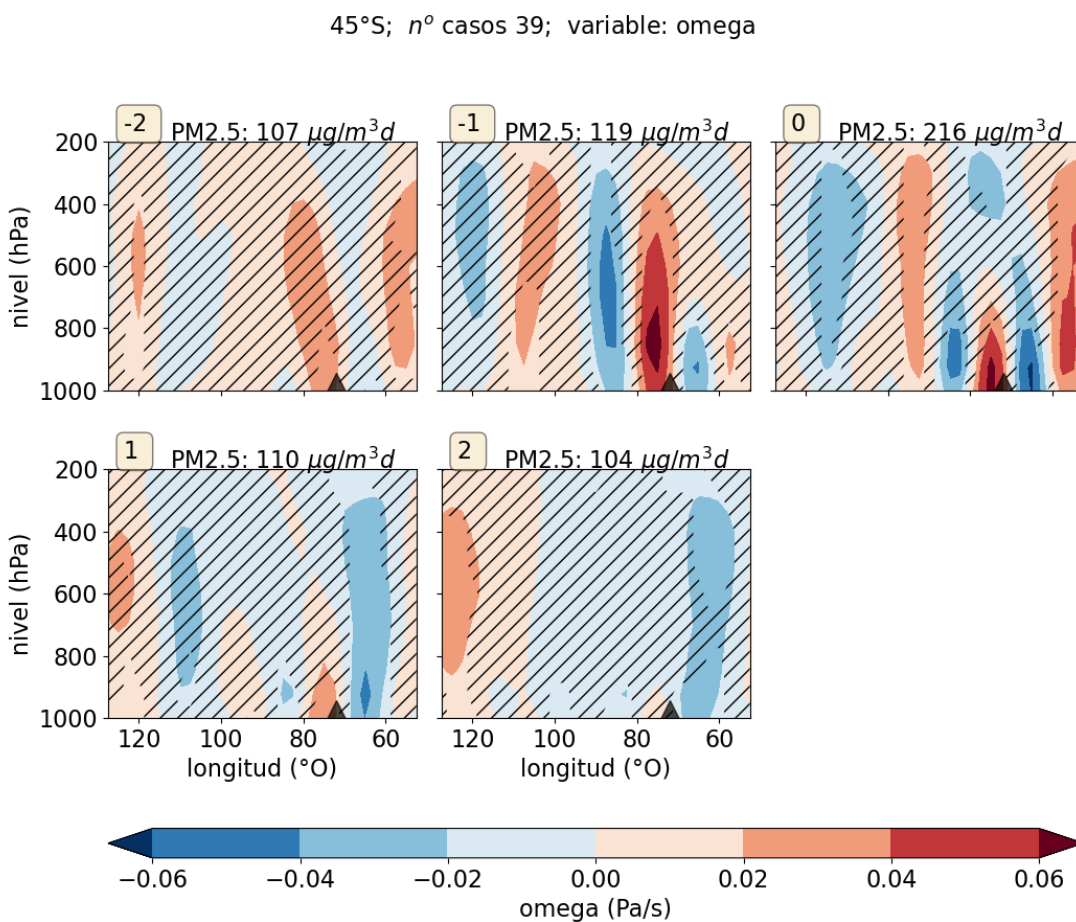


Figura 5.4: Corte vertical de los compuestos de omega (movimiento vertical) diario para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Triángulo negro representa el meridiano en que se ubica la ciudad de Coyhaique. En la parte superior izquierda de cada gráfico se grafica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90% a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1990-2020 (*Kalnay et al. 1996*)

5.3. Viento zonal (u) durante los episodios de MP_{2,5}

El viento zonal corresponde a la componente del viento que es paralelo a los paralelos terrestres. La dirección positiva del viento zonal ocurre cuando la masa de aire se mueve de oeste a este y negativa en sentido contrario. En cuanto al episodio de MP_{2,5}, los días previos, es decir día -2 y -1, se observa una anomalía media negativa de viento zonal ubicada en el “*océano Pacífico*”, frente a las costas de la Patagonia (ver figura 5.5). Conjuntamente, al oeste de las costas de Chile central y en el “*mar de Bellingshausen*” ocurre una anomalía positiva del viento zonal, esto quiere decir una aceleración del flujo normal. El día del episodio de emergencia de MP_{2,5} (día 0), el centro de la anomalía negativa de viento zonal se ubica sobre la Patagonia, en torno a Coyhaique y se aprecia de manera negativa en toda la tropósfera (ver figura 5.6) con valores menores a -4 m/s. De igual forma, en el día 0 el viento zonal se incrementa (más positivo) en la “*península Antártica*” y “*paso Drake*”. Los días posteriores al episodio (días +1 y +2) se observa un desplazamiento de la anomalía negativa de viento zonal hacia el “*océano Atlántico*” y su debilitamiento, lo que termina con el episodio.

Si bien la anomalía en torno a la ciudad de Coyhaique es negativa, dada la magnitud del viento zonal climatológico en superficie (925 hPa), la que se puede ver en el Anexo 10.11, el valor resultante del viento durante los días de episodio es cercano a la neutralidad (estancamiento) o débilmente negativo (brisa del Este). Estos valores concuerdan con el debilitamiento del viento superficial registrado por las estaciones de SINCA durante los episodios de contaminación atmosférica por MP_{2,5}, como se verá en el próximo capítulo. De igual forma, existe coherencia en la anomalía de viento zonal y el gradiente de presión observado en los campos de hgt .

A una latitud próxima a Coyhaique (45°S) y para el día -2, los cortes verticales de viento zonal medio muestran su mayor debilitamiento próximo a la estratósfera, es decir, sobre los 400 hPa. En el día 0 (día del episodio) la anomalía negativa de viento zonal presenta una mayor propagación hacia zonas inferiores de la tropósfera, como por ejemplo la capa límite planetaria. Esta situación es concordante con el debilitamiento de viento zonal observado en superficie y que está descrito en el Capítulo 6.

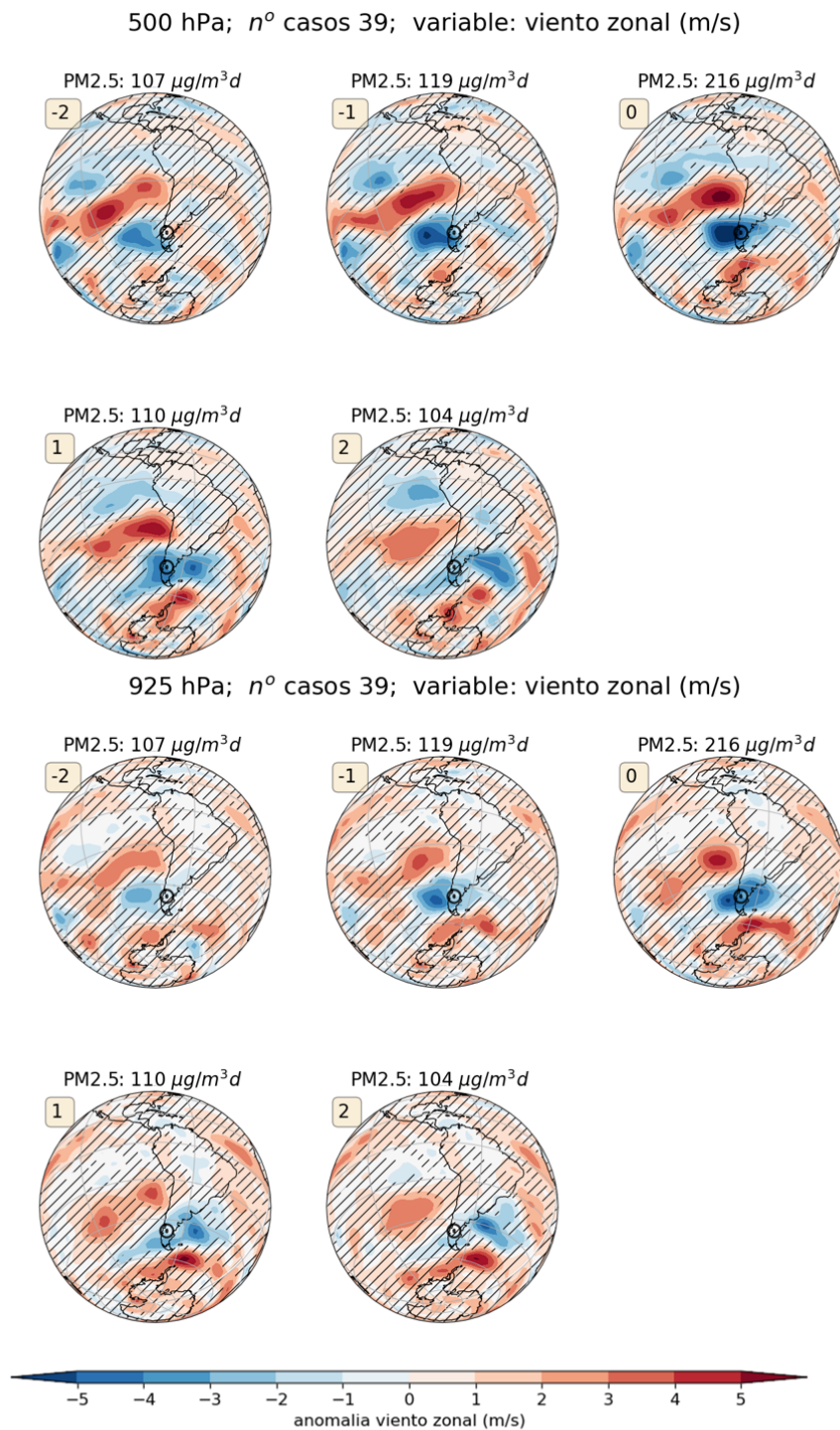


Figura 5.5: Compuesto del viento zonal diario para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Parte superior, se ubican los campos de nivel 500 hPa y en la parte inferior los de 925 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. La marca circular representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada panel se grafica el día del episodio y la concentración de $MP_{2,5}$ media calculada. El achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP-NCAR periodo 1990-2020 (*Kalnay et al 1996*)

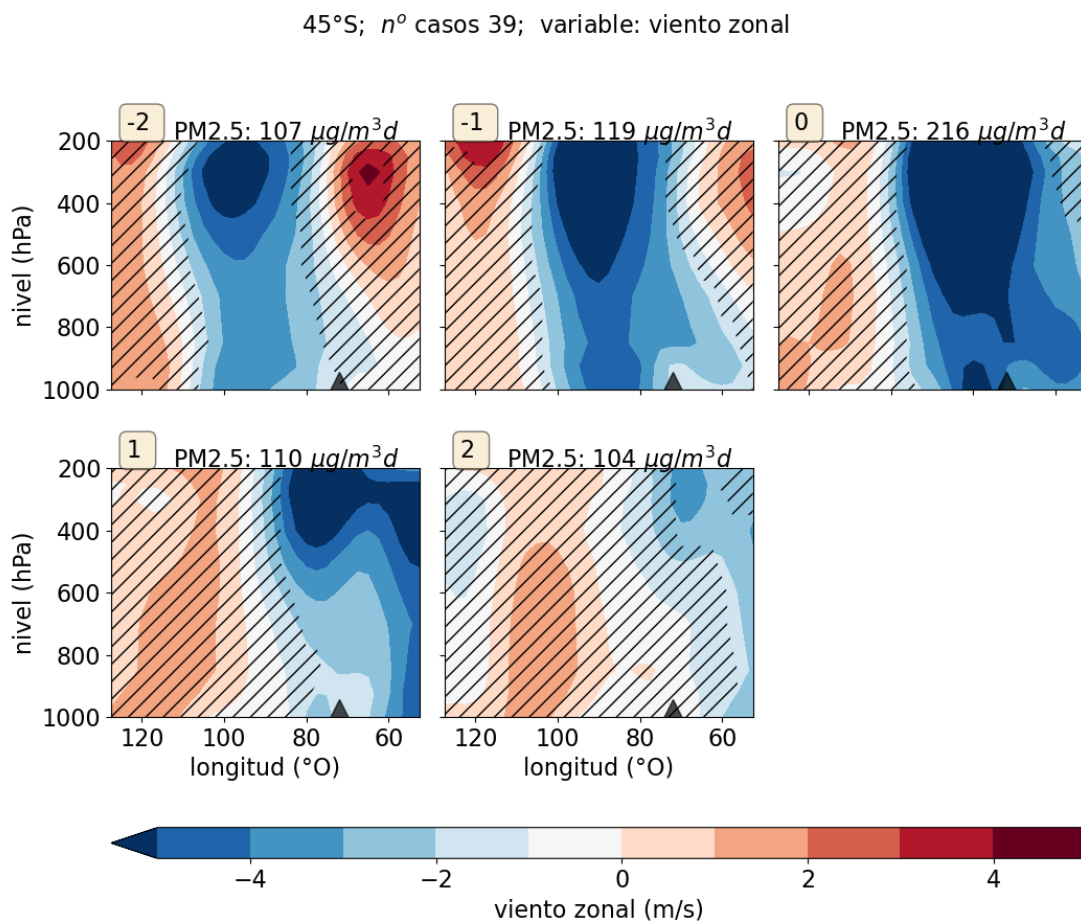


Figura 5.6: Corte vertical a 45° latitud sur, de los compuestos de viento zonal diario para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Triángulo negro representa el meridiano en que se ubica la ciudad de Coyhaique. En la parte superior izquierda de cada gráfico se muestra el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP-NCAR periodo 2013-2019 (*Kalnay et al 1996*)

5.4. Viento meridional (v) durante los episodios de MP_{2,5}

El viento meridional es la componente del flujo de aire que describe los movimientos paralelos al eje norte-sur. Se define como positivo el desplazamiento desde el sur y hacia el norte de las masas de aire. Durante los días previos al episodio de emergencia, se observa en la tropósfera media, una anomalía de viento meridional positiva en la zona del Paso Drake (60°S) y una negativa en el “*océano Pacífico Austral*” (60°S y 110°O) (ver figura 5.7 y 5.8). Esto podría asociarse con una advección de aire polar frío en el primer caso y advección de aire subtropical más cálido, en el segundo. En el día del episodio (día 0), se registra una anomalía negativa del viento zonal, cercano meridiano en el que se ubica Coyhaique (72°O) y que tiene su centro frente a las costas de Aysén, por el “*Océano Pacífico*”. Esta anomalía se extiende desde la zona central de Chile, hasta el “*mar de Bellingshausen*” en las costas de la Antártida y se observa en toda la tropósfera como se observa en la Figura 5.7. Los días posteriores al episodio (+1 y +2) la anomalía se debilita y/o vuelve poco significativa, a nivel superficial.

Los resultados observados de viento meridional concuerdan con una advección de aire frío proveniente de altas latitudes. Estas condiciones favorecen una disminución de la temperatura superficial en Coyhaique durante los días de episodio, como lo registrado por las estaciones de SINCA. De igual forma cabe mencionar que la significancia estadística de esta componente del viento es mucho que la menor la del viento zonal y, por lo tanto, con una menor relevancia al momento de definir un episodio de emergencia.

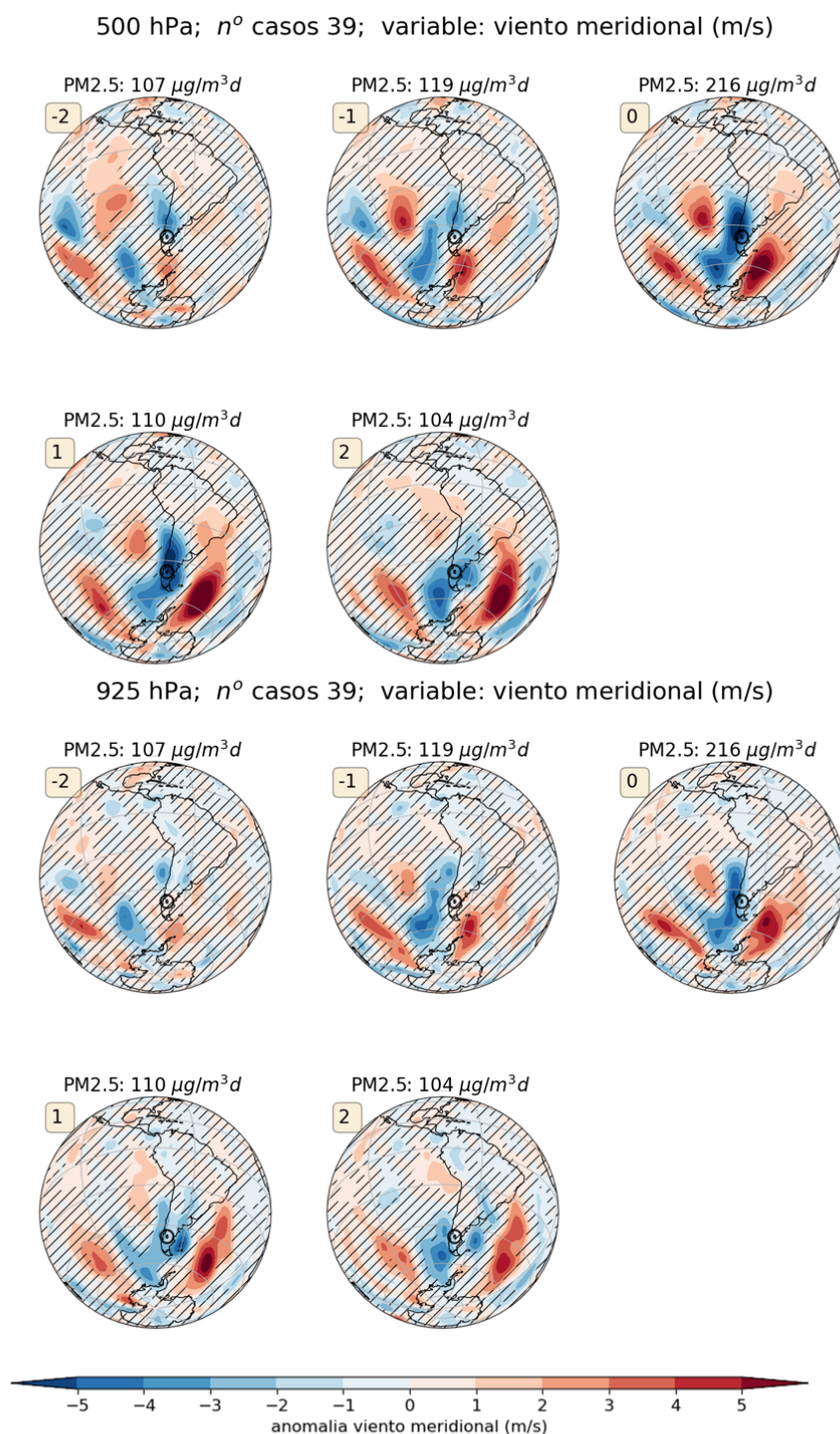


Figura 5.7: Compuesto del viento meridional diario para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Parte superior, se ubican los campos de nivel 500 hPa y en la parte inferior los de 925 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada panel se grafica el día del episodio y la concentración de $MP_{2,5}$ media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90% a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP-NCAR periodo 2013-2019 (Kalnay et al 1996)

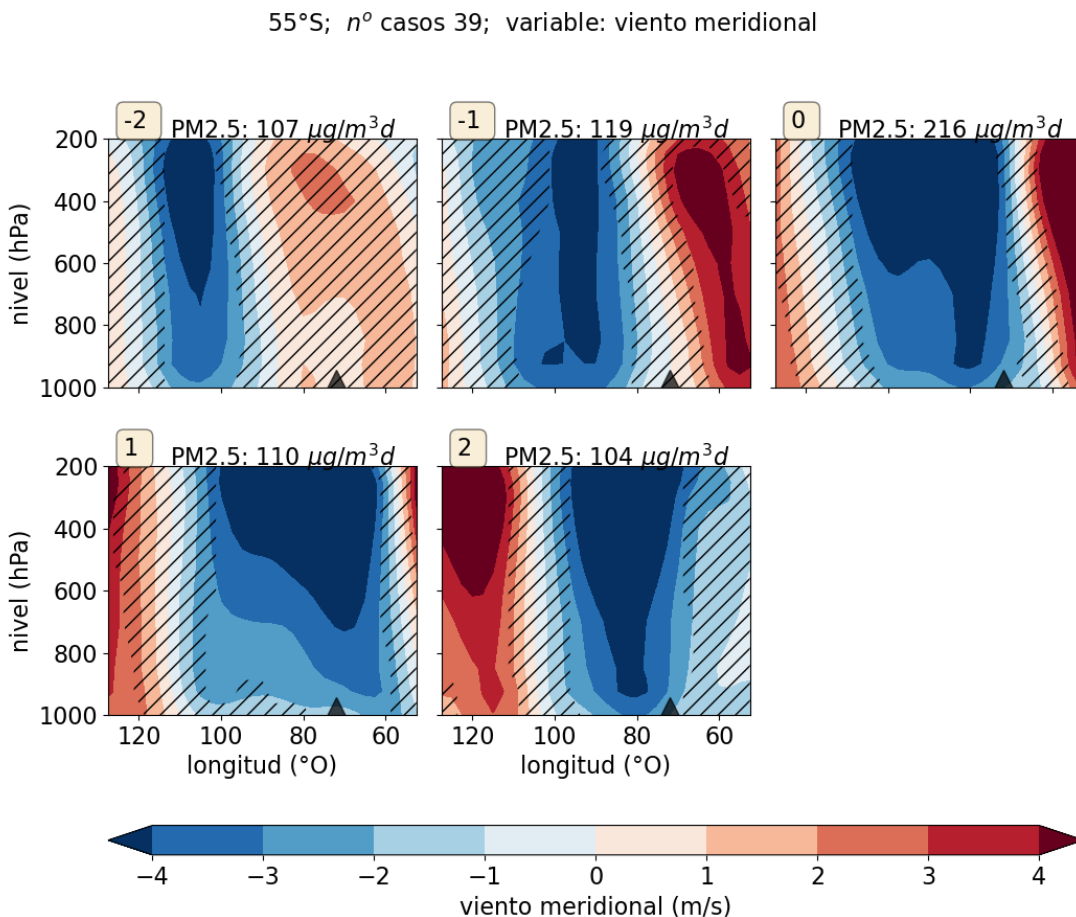


Figura 5.8: Corte vertical a 55° latitud sur, de los compuestos de viento meridional diario para los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Triángulo negro representa el meridiano en que se ubica la ciudad de Coyhaique. En la parte superior izquierda de cada gráfico se muestra el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP-NCAR periodo 1991-2020 (*Kalnay et al 1996*)

5.5. Campo de temperatura (T) durante episodios de emergencia por $MP_{2,5}$

Otra de las características significativas de los campos meteorológicos de escala sinóptica, corresponde a la formación de una anomalía positiva promedio de temperatura. El centro de la anomalía térmica se ubica en la tropósfera media (500 hPa) y se desplaza por el paralelo 55°S , aproximadamente, con dirección oeste este (W-E), como se ilustra en la figura 5.9. Cabe mencionar que, para los episodios de emergencia de un día de duración, la anomalía cálida no es perceptible en los niveles próximos a la superficie del suelo, como por ejemplo 925 hPa. Por el contrario, a nivel superficial y hasta uno aproximadamente 900 hPa, se observa una disminución media de la temperatura sobre Coyhaique (ver figura 5.11), siendo de mayor intensidad el día -1. Esta situación es coherente con una mayor estabilidad vertical de la atmósfera durante los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$. Esto quiere decir que la atmósfera es más cálida en altura y, por el contrario, es más frías en zonas próximas a la superficie del suelo.

Para describir verticalmente esta variable se realizaron dos cortes verticales, uno a 55°S figura 5.10 y el segundo corte (figura 5.11) en los 45°S . El primer corte vertical está enfocado a describir el desplazamiento de la anomalía cálida próximo a su centro. El segundo corte está orientado a describir los perfiles próximos a la latitud de Coyhaique.

En el corte vertical realizado en el paralelo 55°S (figura 5.10), como es de esperar, también muestra el paso de la anomalía cálida en altura. Particularmente el día del episodio el centro de la anomalía cálida promedio se ubica en un meridiano próximo a Coyhaique (72°O) y a un nivel 500 hPa. Para los días posteriores esta anomalía se intensifica, pero se desplaza con dirección este. El centro de la anomalía experimenta un calentamiento promedio que se estima entre los +2 y +2,5 K. En el paralelo 45°S cercano a Coyhaique, durante el día del episodio se observa un enfriamiento en superficie y un calentamiento desde los 900 hPa hacia arriba lo que indica un perfil térmico estable de la atmósfera (ver figura 5.11). Esta situación concuerda con una modulación de gran escala sobre el desarrollo de la altura de capa de mezcla, lo que inhibe su desarrollo vertical.

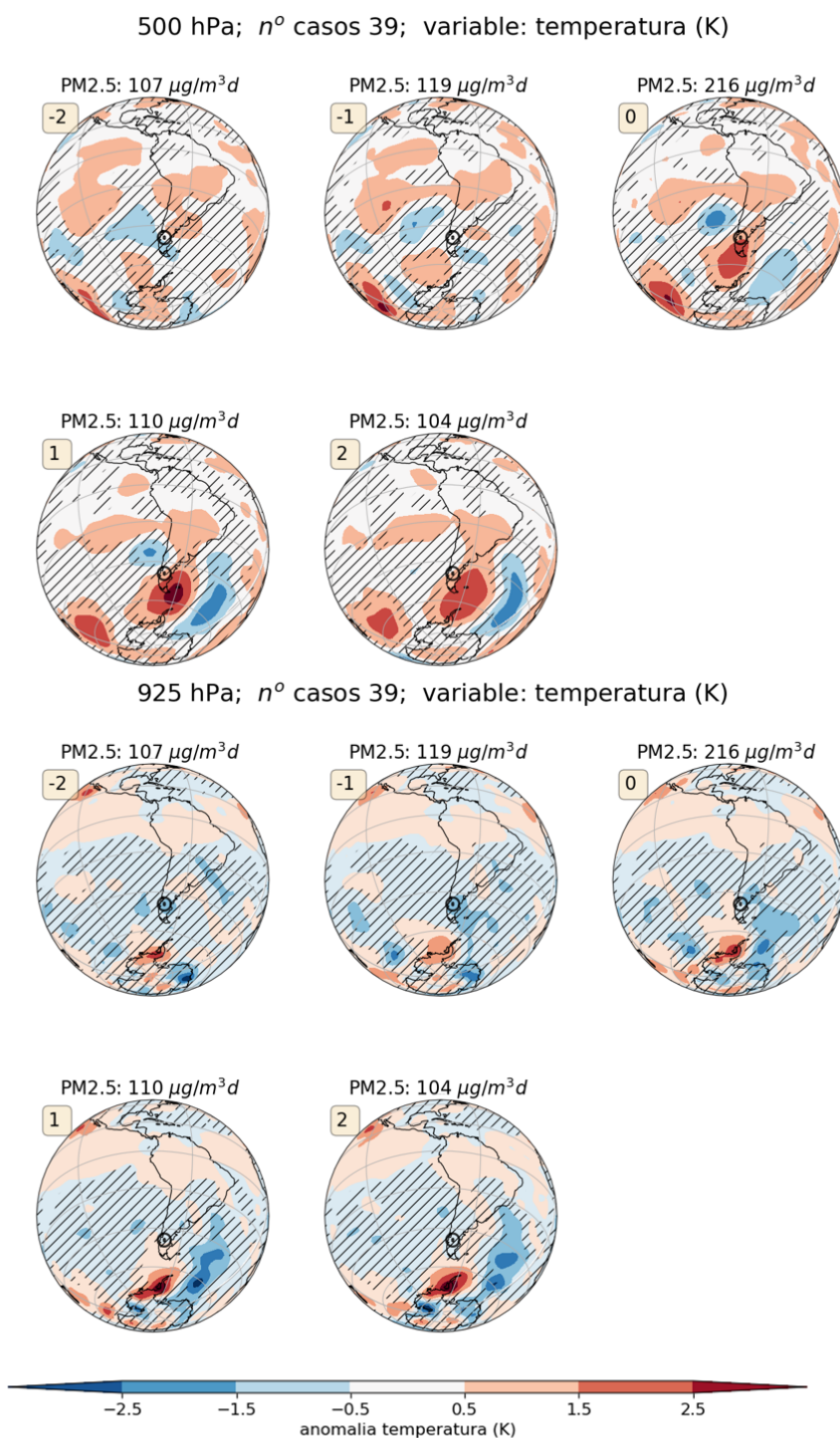


Figura 5.9: Compuesto de temperatura diaria para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Parte superior, se ubican los campos de nivel 500 hPa y en la parte inferior los de 925 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada panel se dibuja el día del episodio y la concentración de $MP_{2,5}$ media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90% a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2020 (Kalnay et al 1996)

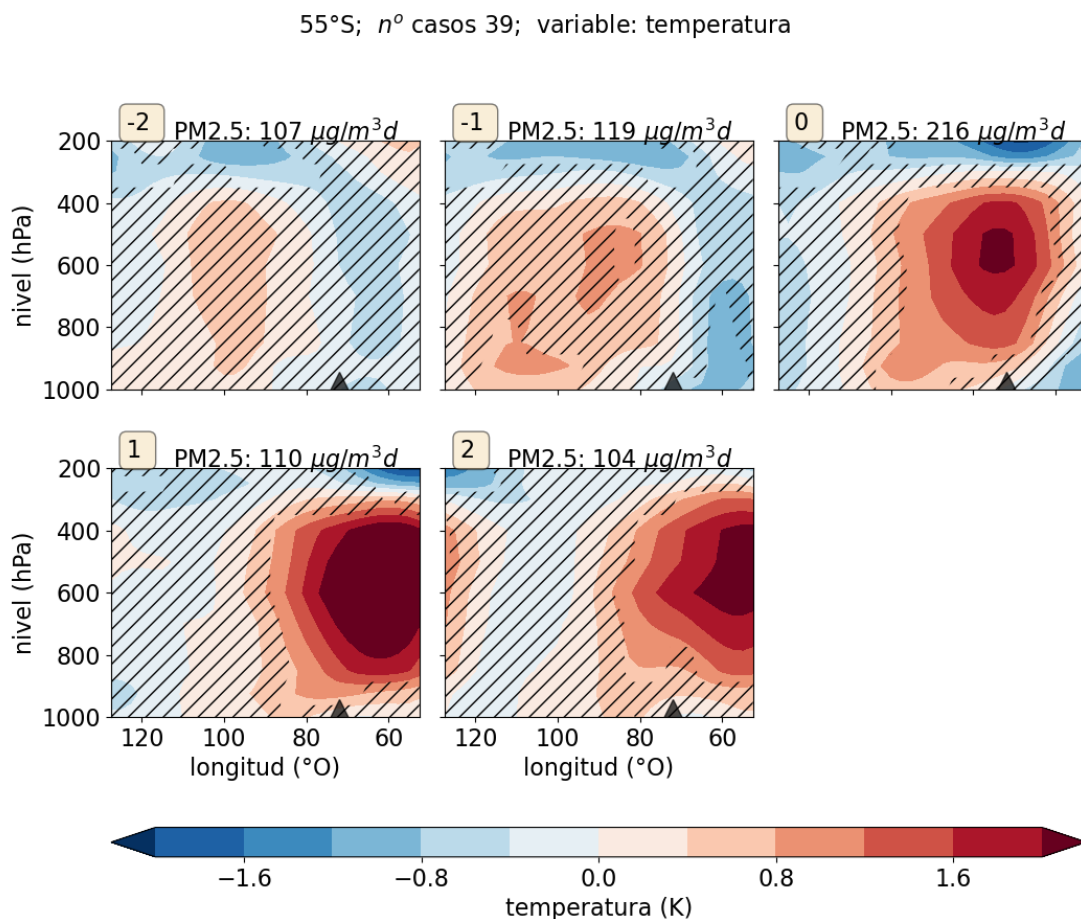


Figura 5.10: Corte vertical a 55 ° latitud sur, de los compuestos de temperatura diaria para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Triángulo negro representa el meridiano en que se ubica la ciudad de Coyhaique. En la parte superior izquierda de cada gráfico se dibuja el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2020 (*Kalnay et al 1996*)

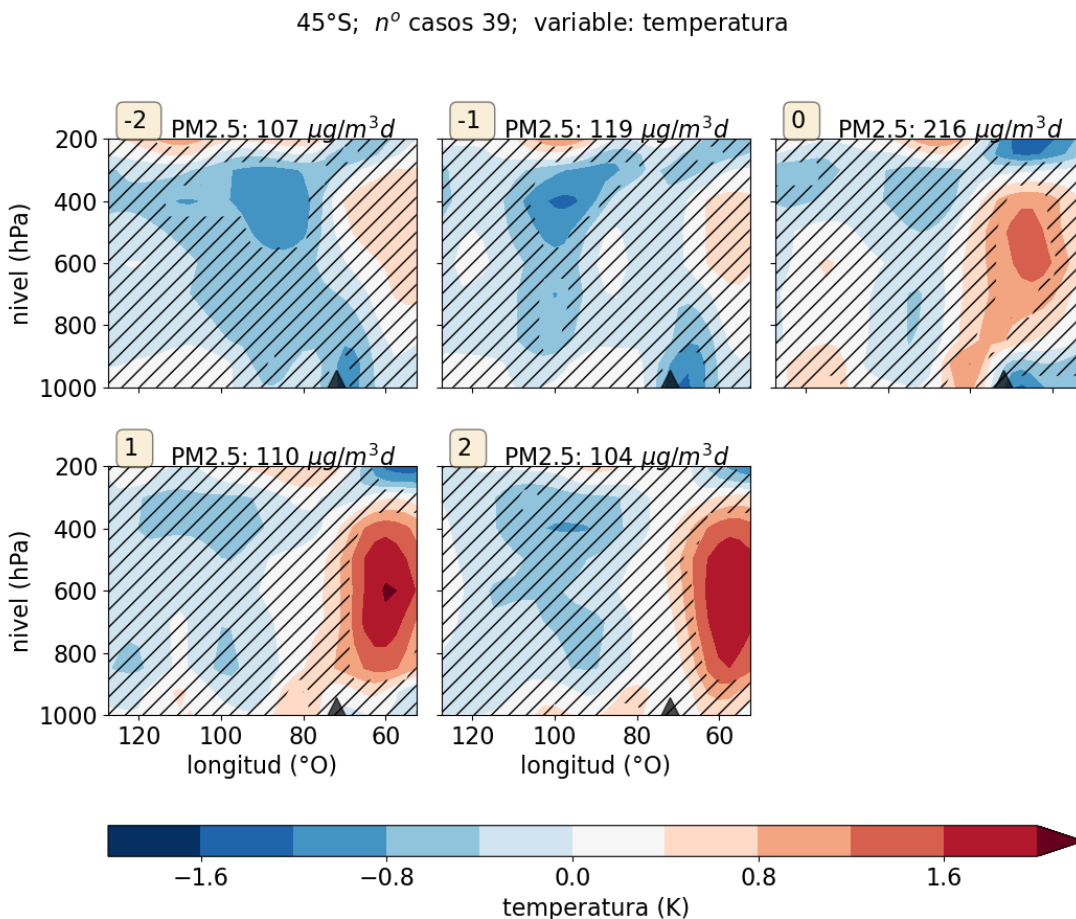


Figura 5.11: Corte vertical a 45 ° latitud sur, de los compuestos de temperatura diaria para los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ con un día de duración (día 0). Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Triángulo negro representa el meridiano en que se ubica la ciudad de Coyhaique. En la parte superior izquierda de cada gráfico se dibuja el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2020 (*Kalnay et al 1996*)

5.6. Cobertura nubosa durante los episodios de $MP_{2,5}$

Patagonia occidental es un territorio que se encuentra habitualmente cubierto de nubosidad, con un 60 a 70 % de cobertura nubosa (ver Anexo 10.11 figura 10.16). La inestabilidad asociada al cinturón de tormentas, que circunda al planeta en estas latitudes (*O’Kane et al., 2014*), es probablemente la principal causa de esta condición. En este sentido, es común observar sobre Patagonia, el paso frecuente de sistemas frontales, asociados a sistemas de baja presión y ríos atmosféricos, generando una alta inestabilidad atmosférica sobre el territorio (*Garreaud, et al., 2019*).

Sin embargo, durante los episodios de contaminación, e incluso algunos días previos, se registra una significativa disminución de la cobertura nubosa, la que se manifiesta en importantes zonas del territorio de estudio desprovistas de nubes. En efecto, los compuestos de anomalías de cobertura que se muestran en la figura 5.12 indican una disminución de la cobertura nubosa total hacia la costa del pacífico en toda la Patagonia. Esta disminución ocurre, en promedio, durante los días previos al episodio de emergencia por $MP_{2,5}$, es decir, los días -2 y -1. Simultáneamente y para todos los días del episodio se aprecia un incremento de la cobertura nubosa hacia el noreste de Coyhaique, ubicado sobre territorio argentino.

Es probable que, dada los fenómenos de subsidencia, estabilidad vertical térmica y mayores temperaturas en altura, varios de los procesos relacionados con la formación de nubes por inestabilidad convectiva estén inhibidos lo que se reflejaría en esta menor cobertura nubosa sobre el territorio de Aysén.

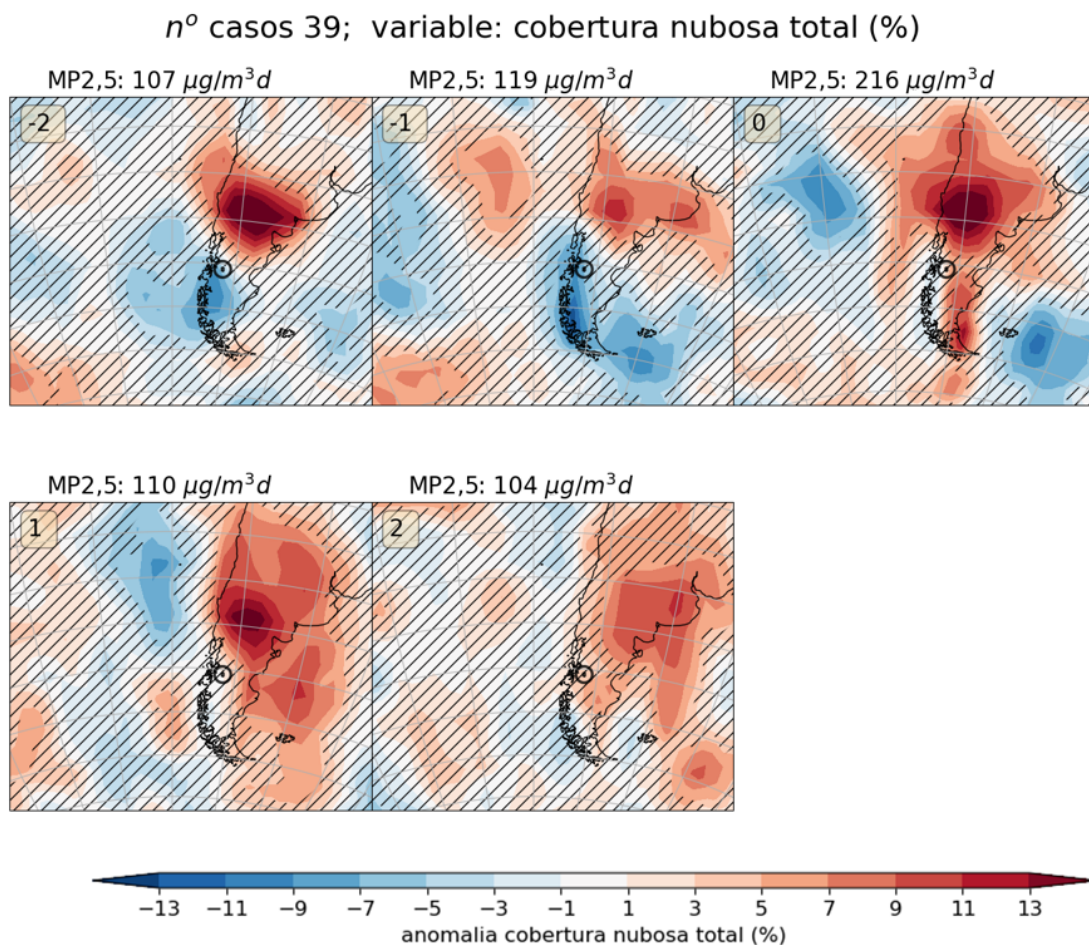


Figura 5.12: Compuesto de porcentaje de cobertura nubosa total para los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ con un día de duración (día 0) a 925 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 33 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada panel se dibuja el día del episodio y la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90% a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2020 (*Kalnay et al 1996*)

5.7. Comparación de los episodios de emergencia por MP_{2,5} de distinta duración

Las configuraciones sinópticas de los episodios clasificados en 2, 3 y 6 días de emergencia de MP_{2,5}, de forma general, muestran una forma y comportamiento que se asemeja a los episodios de emergencia de 1 día de duración. Las principales diferencias, aparte del mayor tiempo de duración del episodio, corresponde a un incremento magnitud y superficie (área) que cubre la anomalía atmosférica. En el caso de *hgt*, omega (ω) y temperatura (T), el incremento resulta de signo positivo. En el caso de la anomalía de viento, zonal y meridional, el incremento de la magnitud ocurre con signo negativo, en la mayoría de los casos, particularmente intenso en la tropósfera media. Para el siguiente análisis comparativo se utilizarán los días donde ocurre la máxima concentración diaria de MP_{2,5}, para cada tipo de episodio de acuerdo con su duración, es decir 1, 2, 3 y 6 días. En este sentido, cabe recordar que la máxima concentración del contaminante sucede en el día 0, 1, 1 y 3 para los episodios 1, 2, 3 y 6 días de duración respectivamente.

En el caso de *hgt*, en todas las duraciones de episodios, la anomalía se ubica hacia el sur de Coyhaique y con su centro en torno al “*paso Drake*” (ver Figura 5.13 panel superior). También se observa que el incremento del área de la anomalía sucede hacia Península Antártica y Coyhaique, principalmente. Esto resulta particularmente notorio en los episodios de 3 días de duración. En el caso de la anomalía de *hgt* de 6 días, la expansión ocurre hacia el océano pacífico. En todos los casos la máxima intensidad esta sobre el nivel de los 500 hPa (ver Figura 5.13 inferior) y los cortes verticales también coinciden en el incremento de la anomalía a medida que la duración del episodio es mayor.

En el caso de las anomalías de ω , para todos los tipos de episodios de 1,2,3 y 6 días de duración, se observa un incremento positivo del fenómeno en las costas de Chile, centrada a la altura de la “*Isla de Chiloé*”, al noroeste de Coyhaique (ver Figura 5.14). También, se observa un incremento negativo de la anomalía de ω , en las costas argentinas, al noreste de Coyhaique. En el caso de las anomalías de ω de los episodios de 2 días de duración, a pesar de incrementar su intensidad, muestra una leve disminución del área de superficie. En cambio, los episodios de 3 días de duración son mayor de mayor magnitud, tanto en intensidad como en superficie de la anomalía de ω . En el caso particular de los episodios de 6 días de duración se observan dos centros de la anomalía, uno de los centros se ubica al noroeste de Coyhaique, a la altura de la ciudad de Valdivia, y otro, está centrado al suroeste de Coyhaique, frente a Campo de Hielos Sur. En los perfiles verticales, se aprecia un incremento de la altura en la que incide la anomalía positiva de ω cercano a Coyhaique, en particular los episodios de 3 días de duración, como se observa en los paneles inferiores de la Figura 5.14.

La anomalía de viento zonal, a diferencia de las anomalías anteriores, muestra un incremento negativo de la magnitud, en los episodios de 1,2,3 y 6 días de duración a la altura de la ciudad de Coyhaique (ver Figura 5.15). Esto quiere decir, una disminución del viento del oeste, o en los casos más extremos la inversión de la dirección (viento del este). Esta anomalía, muestra su mayor intensidad en la tropósfera media (nivel 500 hPa) y se va atenuando a medida que se acerca a la superficie. Se observa un incremento de la anomalía negativa, tanto en intensidad como en cobertura (área), a medida que los episodios son de mayor duración.

De acuerdo a esto, la máxima intensidad negativa de la anomalía de viento zonal ocurre en los episodios de 6 días de duración. Llama la atención que, en los perfiles verticales de anomalía de viento zonal, la intensidad de la anomalía sea menor al este que al oeste de Coyhaique como se muestra en la Figura 5.15, panel inferior.

Se observa una anomalía negativa de viento zonal (ver 5.16) para los episodios de 1 día de duración. Esta anomalía negativa disminuye su magnitud hasta los episodios de 3 días de duración. En el caso particular de los episodios de 6 días de duración esta anomalía es positiva, lo que podría estar indicando la advección de aire frío desde los polos.

En el caso de la temperatura se observa, a una altura de 500 hPa una anomalía positiva centrada en Paso Drake y que abarca desde la “*península Antártica*” hasta Coyhaique (ver Figura 5.17). La anomalía térmica positiva se incrementa, en tamaño e intensidad, durante los episodios de 1, 2 y 3 días de duración. En el caso de los episodios de 6 días de duración esta anomalía se ubica en el océano pacífico distante de Coyhaique, como se muestra en la Figura 5.17 panel superior.

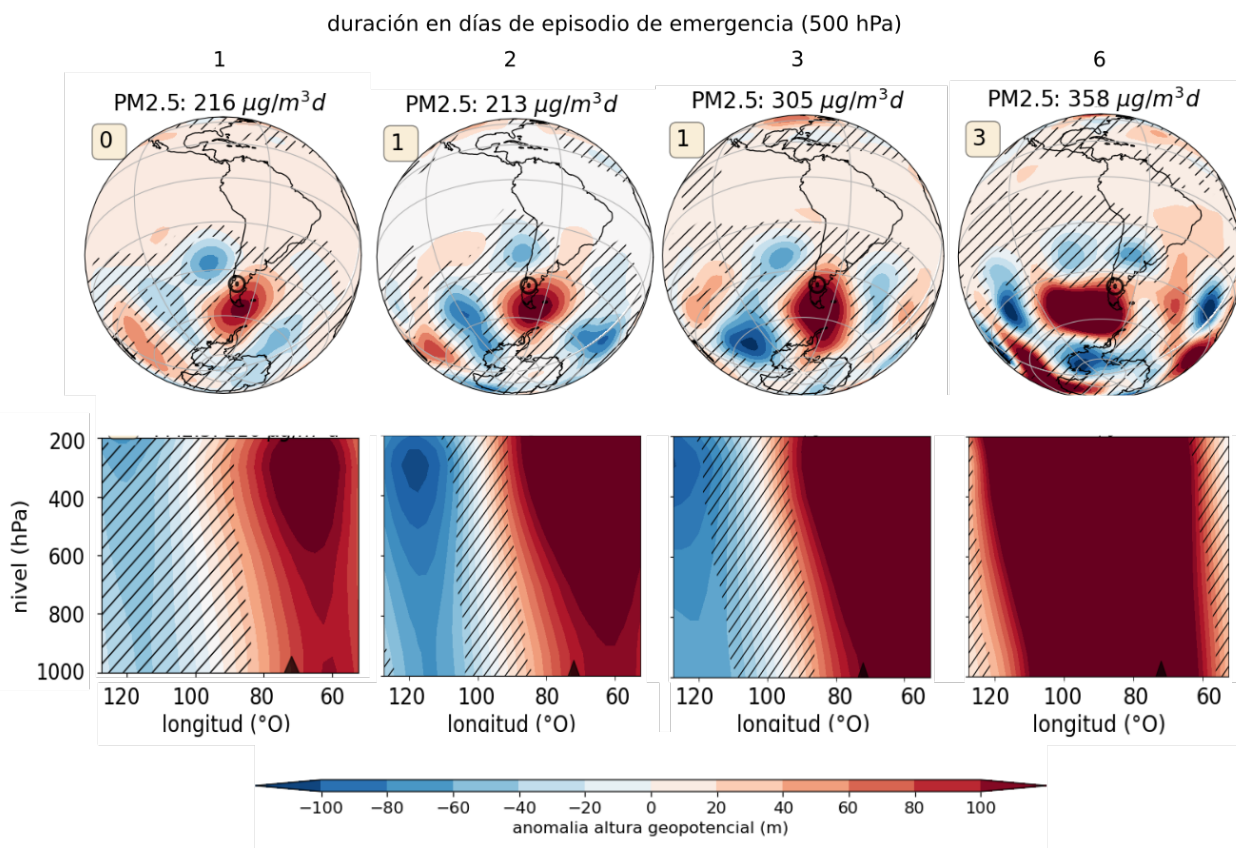


Figura 5.13: Compuesto de anomalías de altura geopotencial (hgt) diaria para los días de máxima concentración de $MP_{2,5}$, durante los episodios de emergencia de contaminación por $MP_{2,5}$ de 1,2,3 y 6 días de duración, contando de izquierda a derecha. panel superior: representa las anomalías de hgt a nivel 500 hPa y panel inferior: representa corte vertical a $55^{\circ}S$ las anomalías de hgt entre superficie y 200 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 39 casos de alerta por $MP_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique, periodo 2014-2020. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90% a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2000 (Kalnay et al 1996).

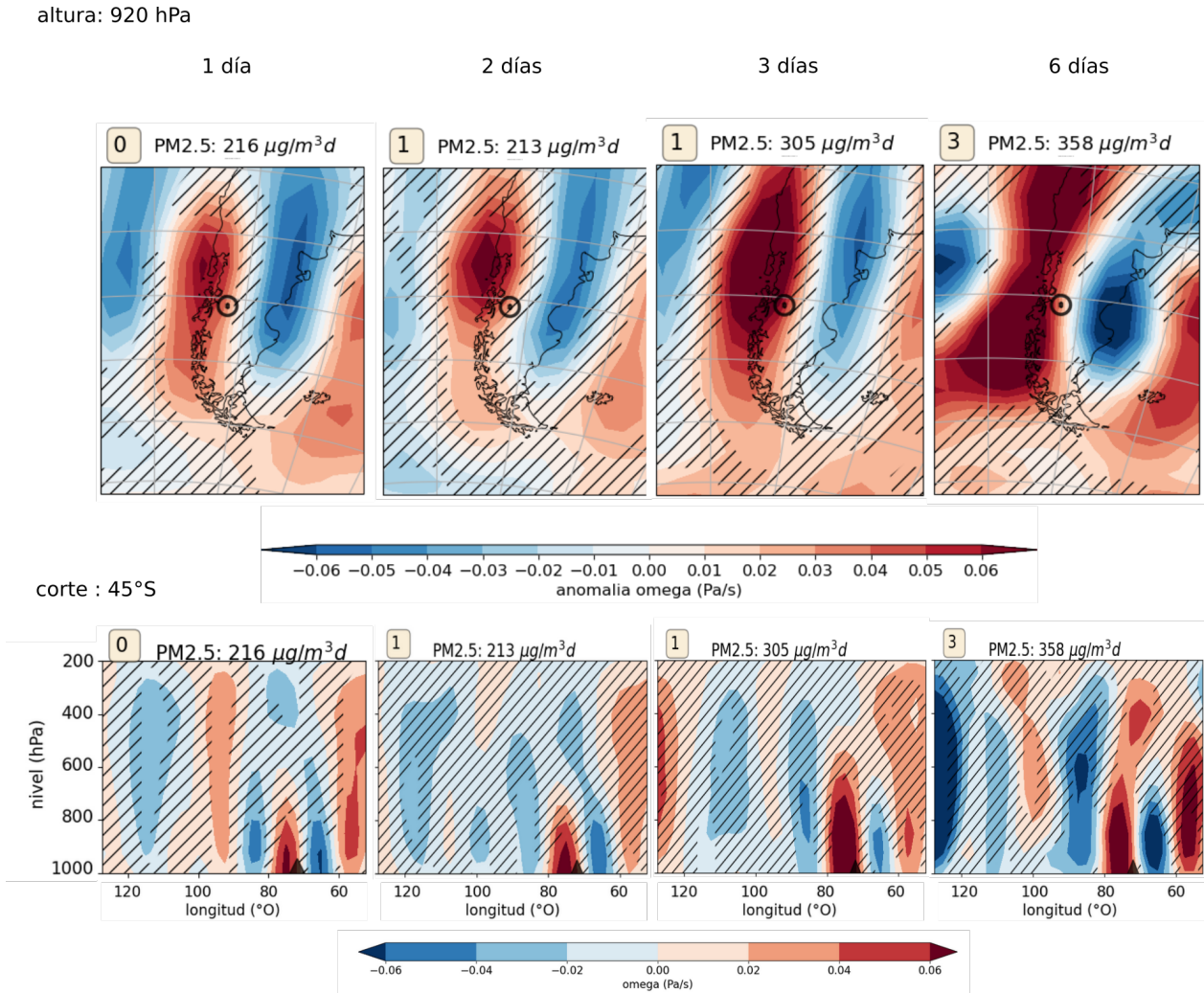


Figura 5.14: Compuesto de anomalías de omega (ω) diaria para los días de máxima concentración de $\text{MP}_{2,5}$, durante los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ de 1,2,3 y 6 días de duración, contando de izquierda a derecha. panel superior: representa las anomalías de ω a nivel 500 hPa y panel inferior: representa corte vertical a 45°S las anomalías de hgt entre superficie y 200 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 39 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique, periodo 2014-2020. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2000 (Kalnay *et al* 1996).

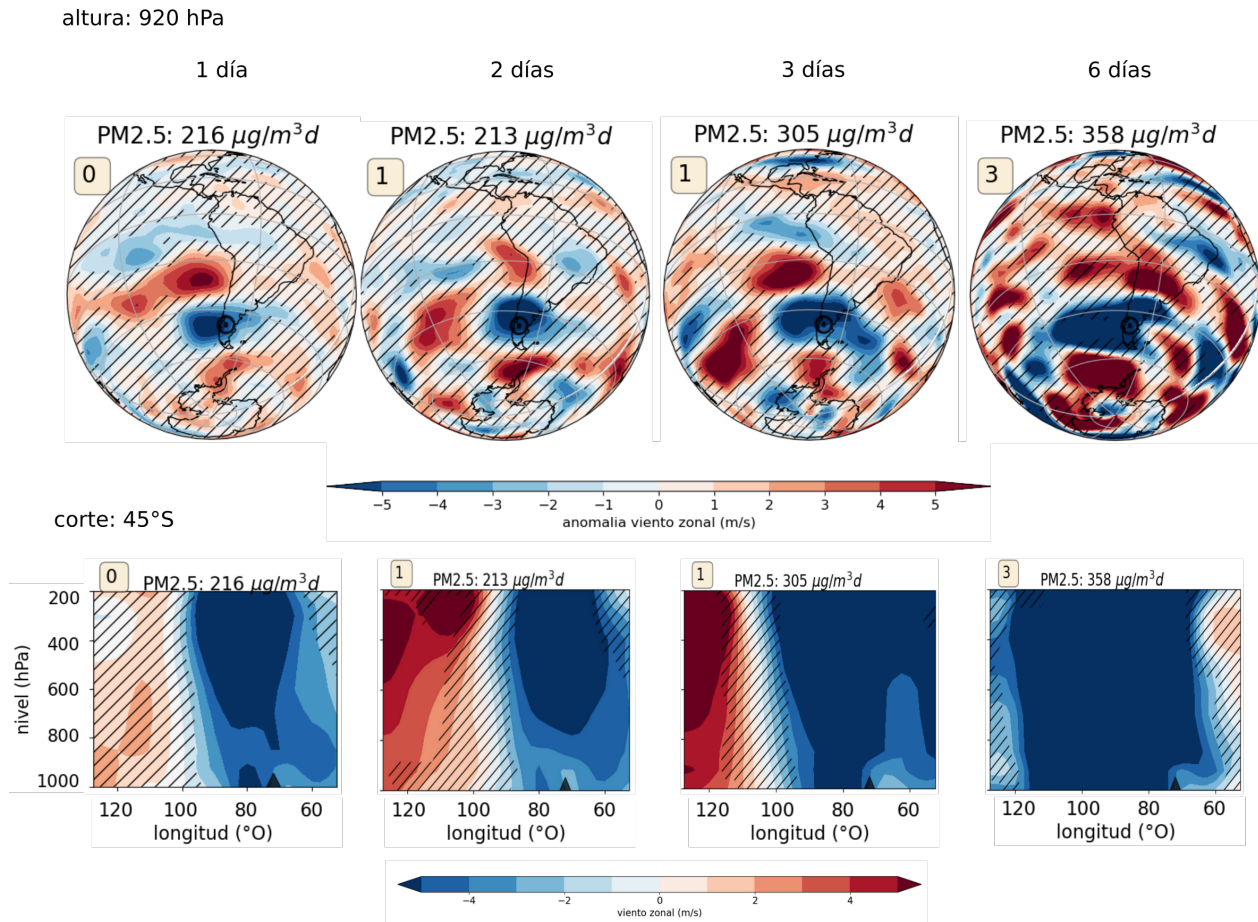


Figura 5.15: Compuesto de viento zonal diaria para los días de máxima concentración de $\text{MP}_{2,5}$, durante los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ de 1,2,3 y 6 días de duración, contando de izquierda a derecha. panel superior: representa las anomalías de viento zonal a nivel 500 hPa y panel inferior: representa corte vertical a 45°S las anomalías de hgt entre superficie y 200 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 39 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique, periodo 2014-2020. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2000 (Kalnay et al 1996).

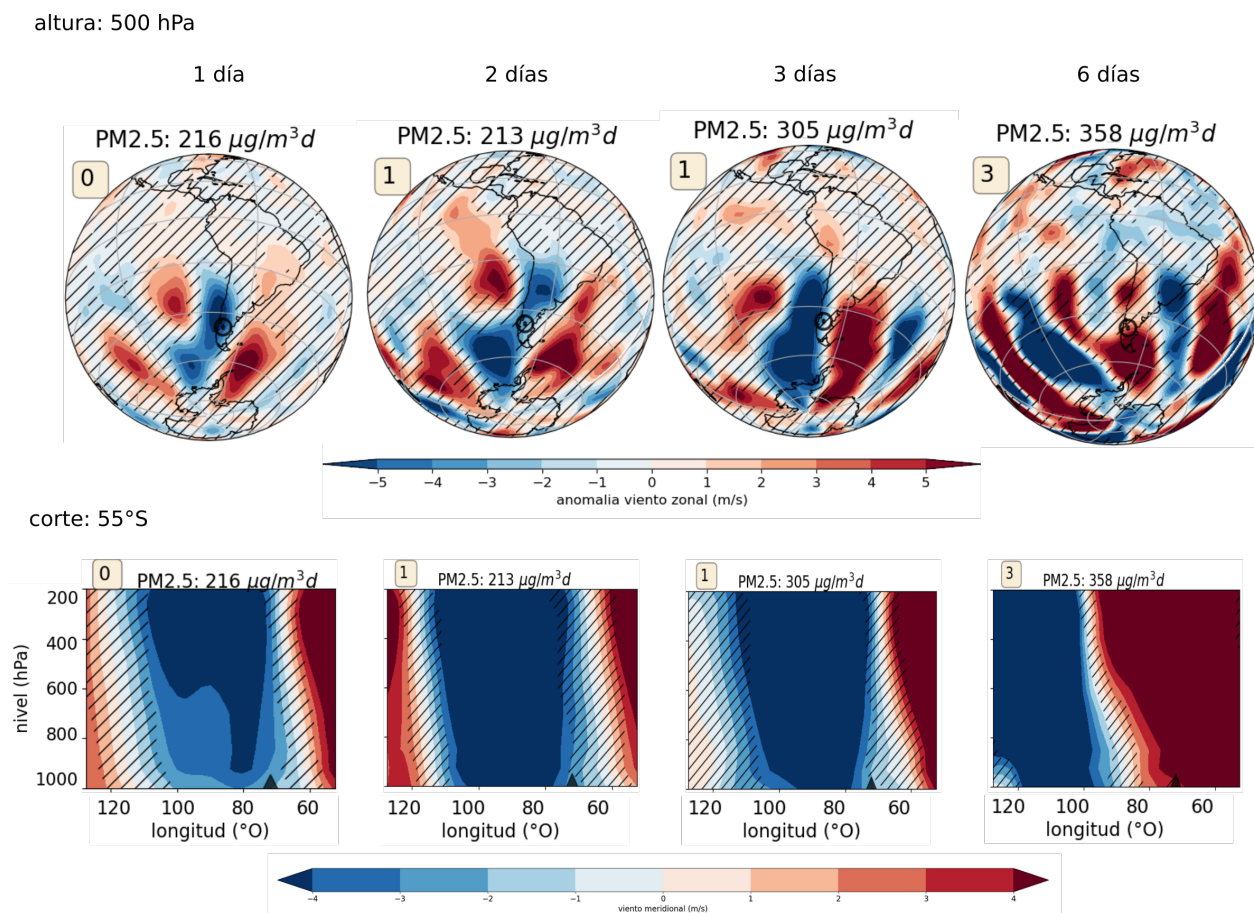


Figura 5.16: Compuesto de viento meridional diaria para los días de máxima concentración de $\text{MP}_{2,5}$, durante los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ de 1, 2, 3 y 6 días de duración, contando de izquierda a derecha. panel superior: representa las anomalías de viento meridional a nivel 500 hPa y panel inferior: representa corte vertical a 55°S las anomalías de hgt entre superficie y 200 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 39 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique, periodo 2014-2020. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2000 (Kalnay et al 1996).

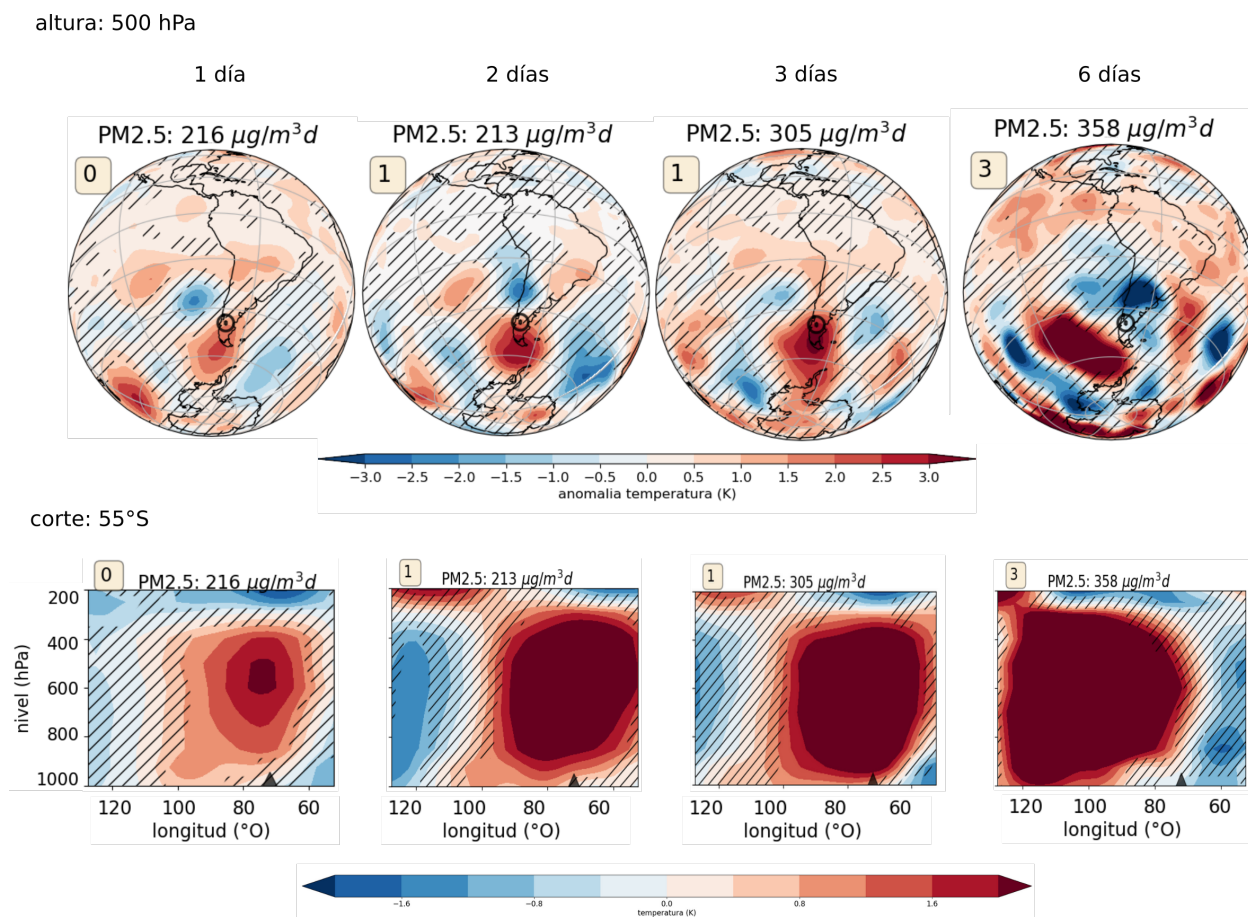


Figura 5.17: Compuesto de temperatura diaria para los días de máxima concentración de $\text{MP}_{2,5}$, durante los episodios de emergencia de contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ de 1, 2, 3 y 6 días de duración, contando de izquierda a derecha. panel superior: representa las anomalías de temperatura a nivel 500 hPa y panel inferior: representa corte vertical a 55°S las anomalías de hgt entre superficie y 200 hPa. Los compuestos fueron calculados a partir de los 39 casos de alerta por $\text{MP}_{2,5}$ medidos por la red SINCA en Coyhaique, periodo 2014-2020. Marca representa a la ciudad de Coyhaique (círculo negro con un punto). En la parte superior izquierda de cada gráfico se identifica el día del episodio y la concentración media calculada. Achurado corresponde a datos que no alcanzaron un nivel de significancia del 90 % a partir de t-student. Gráfica construida a partir de datos de modelo reanálisis NCEP- NCAR periodo 1991-2000 (Kalnay et al 1996).

Capítulo 6

Meteorología a una escala local durante episodios con nivel de emergencia por $MP_{2,5}$

El presente capítulo busca describir el comportamiento típico de las variables meteorológicas superficiales durante los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$ en la ciudad de Coyhaique. Las variables meteorológicas fueron obtenidas de las estaciones de calidad del aire de Red SINCA de la ciudad (más detalle ver Anexo 10.4). Adicionalmente, se realiza un análisis del comportamiento observado de las variables meteorológicas superficiales, con los resultados descritos en los campos meteorológicos de escala sinóptica. Por último, se presenta un modelo conceptual que caracteriza, de una manera gráfica, la configuración y la relación que existe entre la escala sinóptica y la local.

6.1. Descripción de las variables meteorológicas superficiales

La distribución de frecuencias se representan en la figura 6.1. De los datos destaca la distribución bimodal de la dirección del viento, con una primera moda dominante cercana a los 270° , es decir viento del Oeste y una segunda moda ubicada aproximadamente a los 90° , es decir viento con dirección Este. La velocidad del viento muestra una distribución fuertemente sesgada hacia magnitudes bajas, con una moda en torno a 1 m/s y decae rápidamente hasta los 10m/s. La presión atmosférica con una moda de 980 hPa y un mínimo y máximo entre 945 y 1000 hPa. La temperatura presenta una distribución que se asemeja a una normal, centrada en 5°C . Por último, la humedad relativa con una moda cercana al 80 % como su frecuencia más común.

De los compuestos mensuales de las variables meteorológicas superficiales, como humedad relativa y viento meridional indican un máximo en el periodo invernal (ver figura 6.2). Por el contrario, durante el periodo invernal la temperatura, rapidez del viento y viento zonal

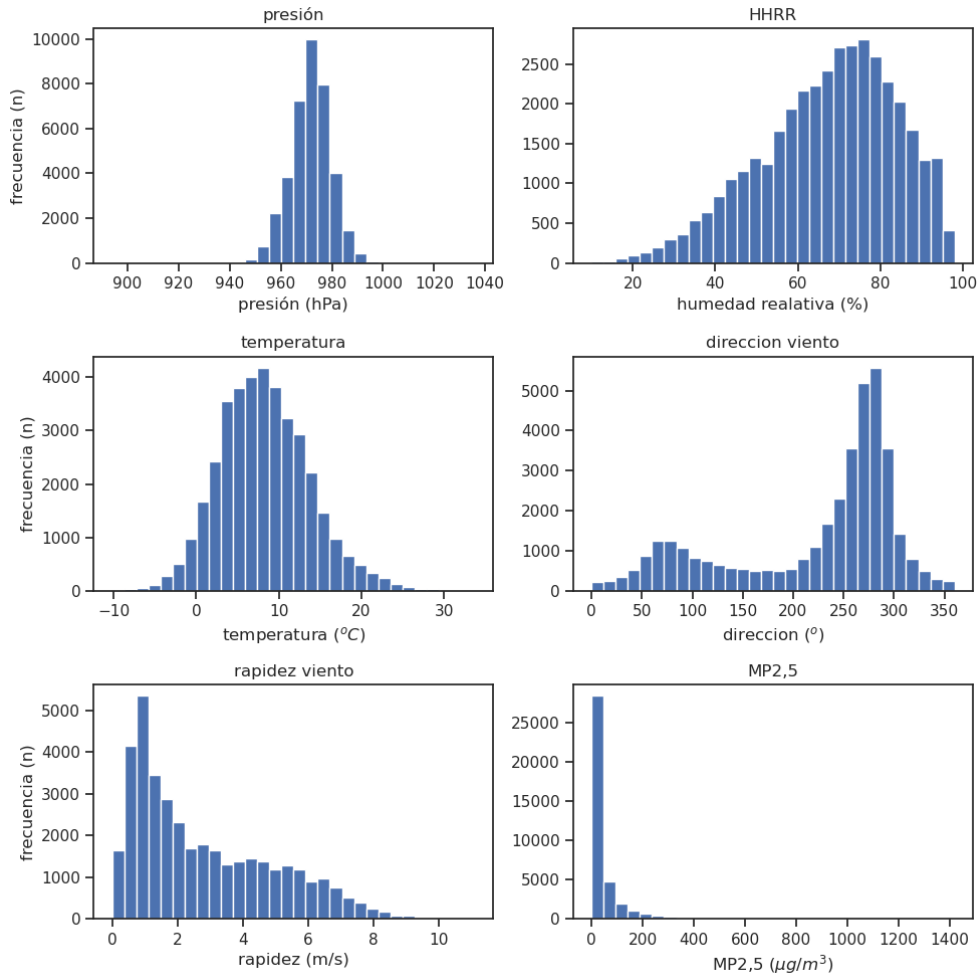


Figura 6.1: Histogramas de las variables meteorológicas medidas en la estación de calidad de aire en Coyhaique COY2, datos obtenidos de SINCA enlace.

indican un mínimo. En el caso de la presión se observa una importante variabilidad en torno a los valores medios mensuales. Todos los valores observados son coherentes con lo obtenido en los patrones sinópticos anteriormente descritos en el Capítulo 5. En el caso de los grados días y factor de ventilación, calculados a partir de un modelo local desarrollado (ver anexo 10.7), los resultados indican que las condiciones invernales son favorables con una mayor emisión de contaminantes atmosféricos asociados a la calefacción y una menor capacidad de la atmósfera para dispersar los contaminantes, respectivamente. Por último, la amplitud térmica diaria ($T_{max} - T_{min}$) es mucho mayor en verano (>10 °C) que en invierno (<8 °C).

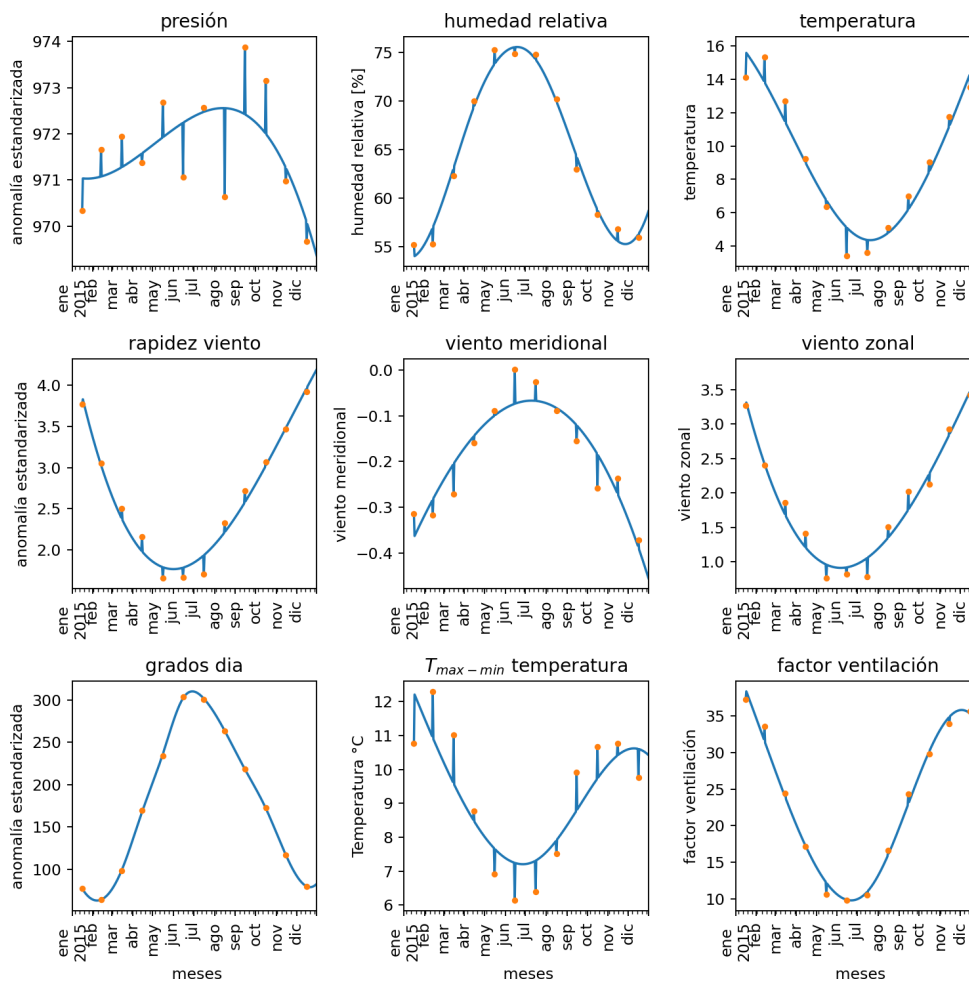


Figura 6.2: Compuesto mensual de variable meteorológicas medidas por la red SINCA, presión, humedad relativa, temperatura, rapidez del viento, viento meridional y viento zonal en Coyhaique COY2 (seis graficas superiores) y en la tercera fila inferior se presentan los compuestos mensuales de los indicadores relacionados con la contaminación atmosférica. Estos indicadores fueron construidos a partir de las variables meteorológicas superficial para el periodo 2015-2020.

6.2. Meteorología local y los episodios de emergencia

Los datos de anomalías promedio diarias estandarizadas (anomalía dividida por su desviación estándar), indican como rasgo dominante, una significativa inversión del viento zonal en superficie (viento del este), en los días de episodio de emergencia por MP_{2,5} (ver Figura 6.3). La inversión de viento zonal concuerda con lo observado a una escala sinóptica y concuerda con el patrón anómalo de *hgt*. De igual forma, se corrobora que durante los días de episodio existe una disminución significativa de la rapidez del viento, lo que fortalece la hipótesis de estancamiento atmosférico. Esta situación se observa para los episodios de 1, 2 y 3 días de duración, lo que se ve en la figura 6.3, 6.4 y 6.5, respectivamente. Cabe mencionar que las anomalías de todas las variables locales se intensifican en la medida que se incrementa el número de días de episodio de emergencia. Este comportamiento es concordante con lo observado con los campos de a una escala sinóptica.

La anomalía estandarizada de temperatura también muestra una significancia mayor a $\sim 0,8$ e indica que los días de episodio, son en promedio, días con menores temperaturas a nivel superficial. Este resultado es coherente con días fríos, que normalmente se registran durante de los episodios de emergencia. Los factores meteorológicos estimados que preceden, de acuerdo con su relevancia, son las anomalías diarias estandarizadas de: grados días; factor de ventilación y amplitud térmica. Paralelamente, los resultados indican un incremento la demanda térmica de viviendas, lo que se visualiza en la gráfica de los grados días. Esto concuerda con un mayor uso de los calefactores, por lo tanto, mayores emisiones y concentraciones de MP_{2,5} en la atmósfera local de Coyhaique. El factor de ventilación (*FV*), calculado en el anexo 10.7, es representado como el producto de la magnitud del viento con la altura de capa de mezcla. El *FV* muestra una notoria disminución durante los episodios de emergencia por MP_{2,5}, situación que está de acuerdo con una menor velocidad del viento y desarrollo de la altura de capa de mezcla superficial. Este comportamiento es posible de observar para todos los episodios de 1, 2 y 3 días de duración.

En el caso de la anomalía diaria estandarizada de presión, se observa que ocurre durante un periodo positivo de presión, pero con una clara tendencia a la disminución de la anomalía. Es decir, el episodio de MP_{2,5} comienza un día después de haber alcanzado el máximo de presión. Esto concuerda con el desplazamiento, con dirección oeste-este (W-E), que presenta la anomalía positiva de altura geopotencial presentada previamente en el de análisis sinóptico.

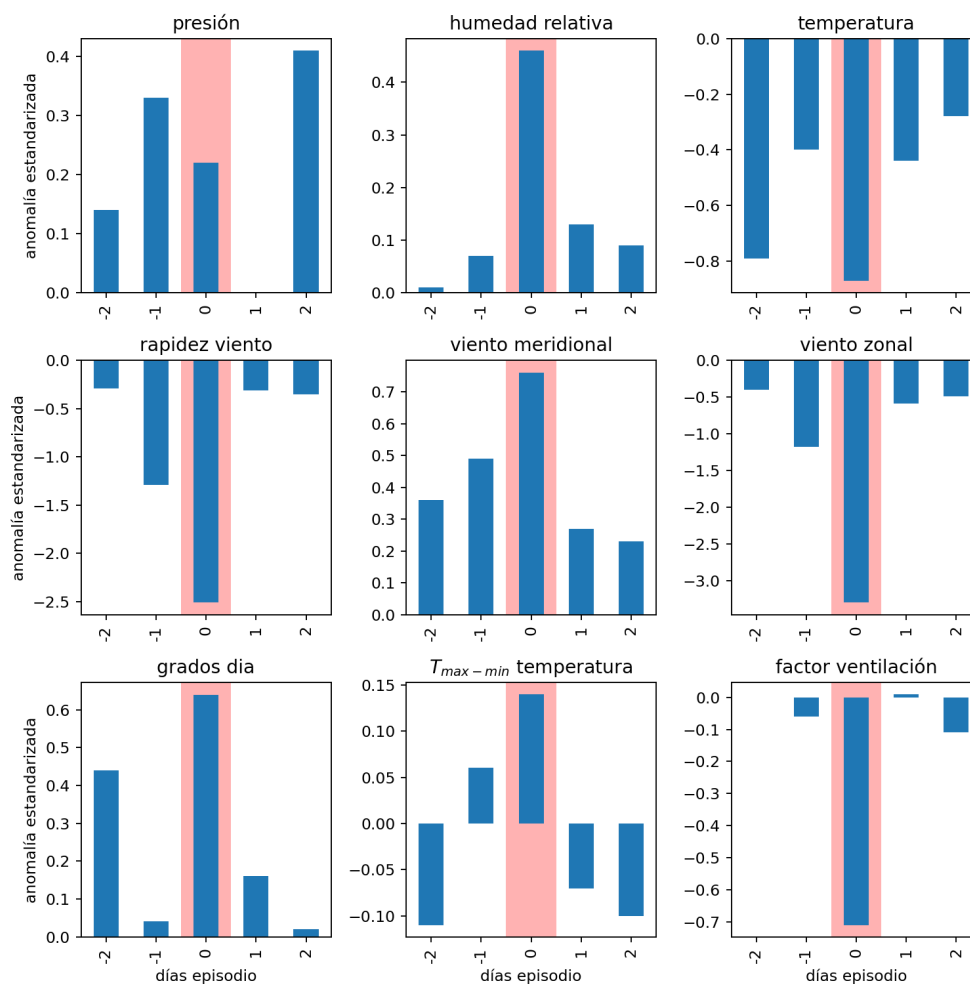


Figura 6.3: Anomalías estandarizadas (barras azules) para episodios de emergencia de un día de duración (banda roja), de las variables meteorológicas superficiales de presión, humedad relativa, temperatura, rapidez del viento medida en la estación de calidad de aire en Coyhaique COY2. Datos extraídos de SINCA

<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/XI>. Periodo 2016-2020 .

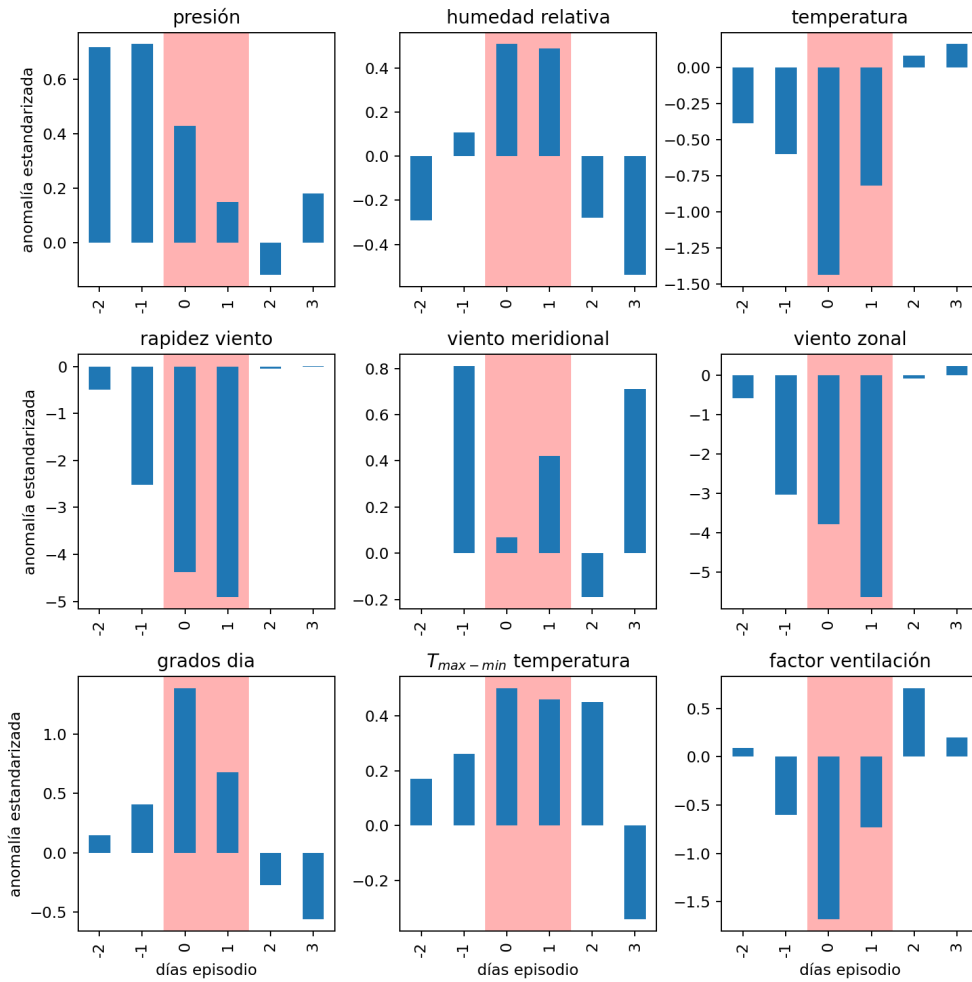


Figura 6.4: Anomalías estandarizadas (barras azules) para episodios de emergencia de dos días de duración (banda roja), de las variables meteorológicas superficiales de presión, humedad relativa, temperatura, rapidez del viento medida en la estación de calidad de aire en Coyhaique COY2. Datos extraídos de SINCA

<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/XI>. Periodo 2016-2020.

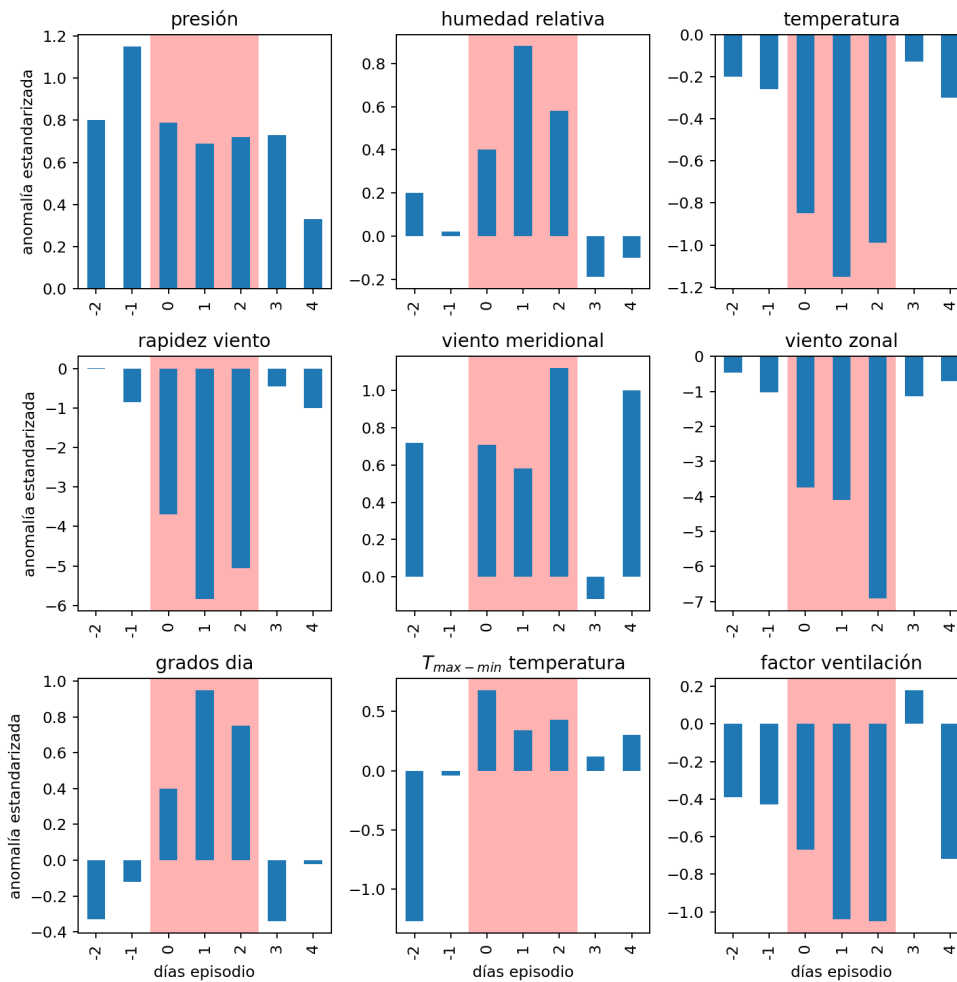


Figura 6.5: Anomalías estandarizadas (barras azules) para episodios de emergencia de tres días de duración (banda roja), de las variables meteorológicas superficiales de presión, humedad relativa, temperatura, rapidez del viento medida en la estación de calidad de aire en Coyhaique COY2. Datos extraídos de SINCA

<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/XI>. Periodo 2016-2020.

6.3. Relación escala local y la sinóptica durante episodios de emergencia de MP_{2,5}

La figura 6.6, refleja una construcción idealizada del fenómeno meteorológico de escala sinóptica y local asociado a los episodios de alta contaminación por MP_{2,5} en Coyhaique. Este esquema sintetiza gran parte de los hallazgos encontrados en este estudio, aportando un sentido físico a los factores típicos que influyen sobre la contaminación en Coyhaique por material particulado fino respirable durante un episodio. Cabe mencionar que tanto la escala sinóptica como la local, muestran coherencia en sus resultados y confirman los procesos involucrados en los niveles de emergencia por MP_{2,5} en Coyhaique. En este sentido, se reconoce como un factor común, que dinamiza el sistema atmosférico, el paso de una anomalía de altura geopotencial positiva, que se traslada de oeste a este en la troposfera media, al sur de Coyhaique y la Patagonia, Esta configuración debilita la intensidad de la componente zonal del viento y un refuerza la inversión térmica cercano al tope de la capa de mezcla, como alguno de los aspectos relevantes.

Durante el proceso atmosférico relacionado con el episodio de emergencia de MP_{2,5} se pueden distinguir al menos tres momentos o fases, uno previo al episodio, otro durante el episodio y uno con el que se finaliza el episodio de emergencia de MP_{2,5}.

El primer momento es catalogado como una etapa de transición, en el que se pasa de una condición de alerta (día -2) a una de pre-emergencia por MP_{2,5} (día -1). Es decir, un incremento neto de las concentraciones de MP_{2,5}. Se inicia con un aumento de una anomalía positiva de *hgt* centrada en una latitud en torno al *Paso Drake*, entre *Tierra del Fuego* y *Península Antártica* y a una altura típica dentro de la tropósfera media (nivel 500 hPa). El desplazamiento de la anomalía es de Oeste Este (W-E) y la duración normal es de 1 a 3 días. La anomalía de *hgt* desencadena una disminución del viento zonal, asociado a un anticiclón migratorio, próximo a la zona de Coyhaique. La disminución del viento es un factor significativo que explica, parcialmente, el incremento de las concentraciones por una menor dispersión de los contaminantes atmosféricos. De igual forma, se observa una circulación descendente (omega positiva) y una disminución de la cobertura nubosa favorecida por la subsidencia. Tanto la cobertura nubosa como la variable omega muestran un mínimo y máximo respectivamente, el día previo al inicio del episodio por MP_{2,5}. Ambos factores, omega y cobertura nubosa, inniven los movimientos convectivos, ya que favorece el enfriamiento superficial por la pérdida radiativa y el calentamiento de la atmósfera desde arriba, por compresión adiabática. A nivel superficial se observa un máximo presión, particularmente el día previo al inicio del episodio de emergencia. A escala local, estos factores se pueden sintetizar como una disminución del factor de ventilación (*FV*), que es un indicador potencial que explica la capacidad de la atmósfera local para diluir un contaminante. También durante esta etapa se experimenta tendencias (cambios) a la disminución de la temperatura y un aumento de la demanda térmica, expresada en grados días, lo que favorece un incremento de las emisiones de MP_{2,5}, producidas durante la combustión de leña utilizado para la calefacción de los hogares.

El segundo momento está caracterizado por una condición de emergencia por MP_{2,5}, es decir, concentraciones diarias iguales o superiores a los 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante este momento

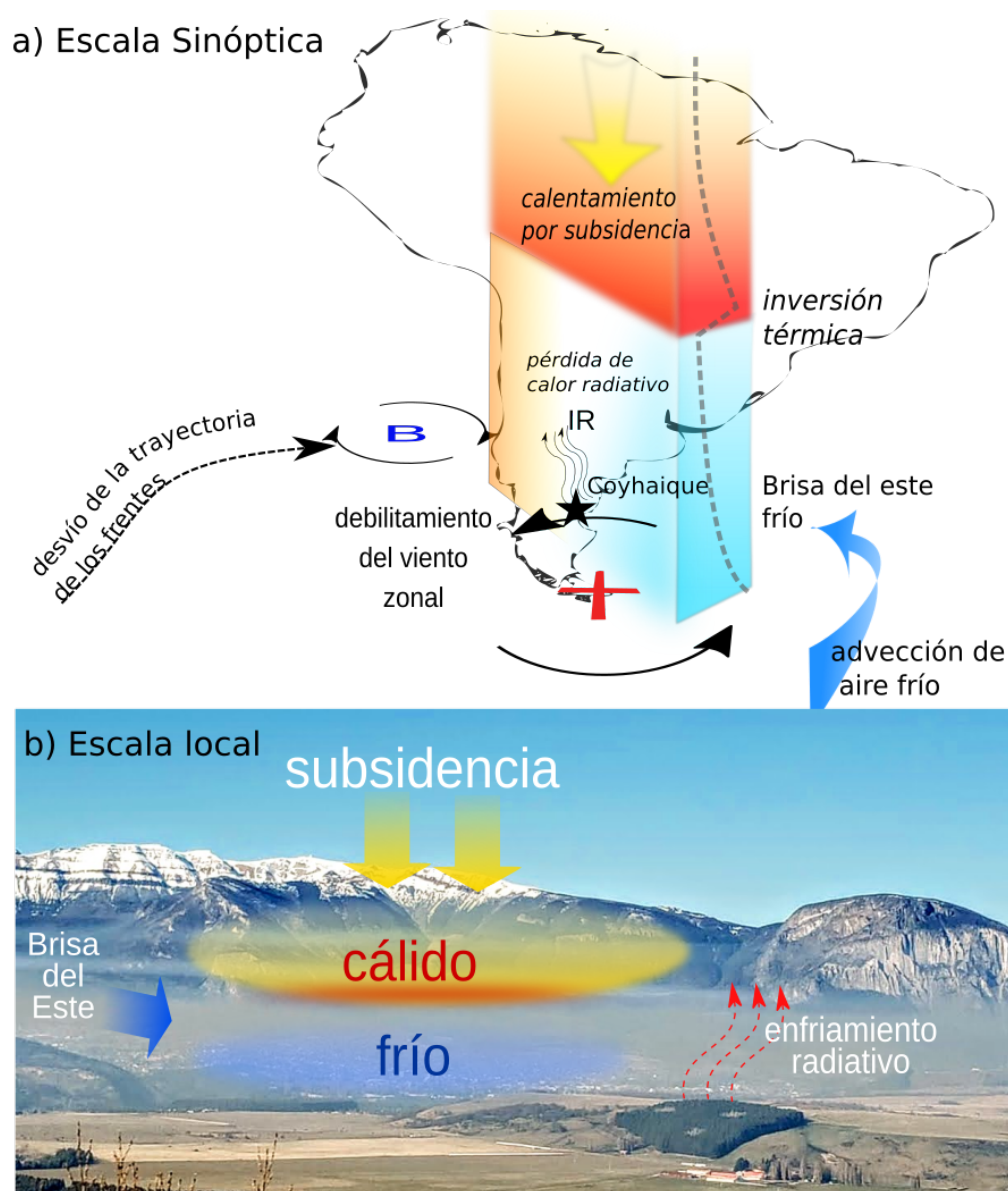


Figura 6.6: Esquema con escala sinóptica (a) de un episodio de emergencia (panel superior esquema de Sud América) y de escala local local (b) (panel inferior con fotografía de Coyhaique en día contaminado) de los procesos meteorológicos asociados a un episodio de emergencia por $MP_{2,5}$ en la ciudad de Coyhaique.

la anomalía se estabiliza al sur de Tierra del Fuego y dependiendo de la duración del episodio de emergencia permanecerá de forma estacionaria mientras dure la condición. La duración observada en este estudio va de 1 a 8 días para esta etapa, pudiéndose extender aún más en el tiempo. Durante este momento la anomalía de viento zonal es cuando se ve más débil, tanto en altura como en superficie, generando incluso una briza desde el Este. Condición es menos común para estas latitudes donde dominan los vientos de Oeste. A nivel superficial, se registran los mínimos de rapidez del viento y flujo zonal. Este factor está ligado a una disminución de la ventilación de los contaminantes y dependiendo de la duración del episodio a una condición de estancamiento atmosférico. De igual manera, las temperaturas son las menores del periodo, por lo que la demanda por calefacción experimenta un máximo. Ambos factores son fundamentales para explicar una alta emisión de los contaminantes atmosféricos producidos por la leña utilizada para la calefacción de las viviendas. De igual forma, se identifica un bajo factor de ventilación (FV), lo que sintetiza el proceso observado de altas concentraciones generado por un escaso desarrollo de la altura de capa de mezcla y baja rapidez del viento.

El tercer momento ocurre ya finalizado el episodio de emergencia por MP_{2,5}, es decir, cuando las concentraciones descienden de los $170\mu g/m^3$. Pasando en promedio a un nivel de pre-emergencia el día posterior al evento y a alerta el segundo día de haber finalizado. Durante esta fase se observa un alejamiento de la anomalía positiva de hgt hacia el océano atlántico tanto para 925 hPa como a 500 hPa. La condición anómala de viento zonal deja de ser significativa y la anomalía térmica en altura disminuye su influencia sobre los niveles superficiales. Las mediciones locales indican que el viento vuelve a su condición normal y la temperatura alcanza niveles normales a levemente superiores para la época del año. También existe una disminución de los grados día (demanda por calefacción) y la amplitud térmica diaria. Esta última condición indicaría una normalización en el desarrollo de la altura de capa de mezcla. Por último, el factor de ventilación comienza a tener valores iguales o por sobre la media lo que indicaría que se verán favorecidas las condiciones para el transporte y la dispersión de los contaminantes atmosféricos como MP_{2,5}.

En cuanto a la duración de las anomalías y concentraciones MP_{2,5}, estas muestran, en promedio, un incremento de la intensidad de los valores medios en la medida aumenta el número de días de episodio. Sin embargo, los mismos datos indican que una intensificación negativa de la anomalía de viento zonal podría también estar asociado a una mejor ventilación. Esta situación puede ocurrir durante anomalías de hgt muy intensas, lo que genera intensos vientos del Este (E), capaces de transportar y diluir los contaminantes superficiales como MP_{2,5} y bajar sus concentraciones en la atmósfera local de Coyhaique.

Capítulo 7

Análisis de un episodio de contaminación de $MP_{2,5}$ en la ciudad de Coyhaique

En esta sección se presenta un episodio de emergencia por $MP_{2,5}$ ($\geq 170 \mu g/m^3 d$) ocurrido entre el 2 al 4 de julio del 2018. Este episodio de emergencia es escogido de manera aleatoria, siendo su único requisito que su duración, pertenezca a alguno de los tipos previamente estudiados en la escala sinóptica, es decir 1, 2, 3 o 6 días de duración. El principal interés de este capítulo es mostrar que los resultados obtenidos con las anomalías de campos promedio, descritos en los capítulos anteriores, son coherente con las observaciones de un episodio en particular. Adicionalmente, se corrobora lo observado, con otras fuentes de información complementaria, como son imágenes satelitales del territorio y radiosondas lanzados en la ciudad de Punta Arenas, al sur de Coyhaique.

En particular se seleccionó un episodio de 3 días de duración con nivel de emergencia. En la figura 7.1 se grafica el episodio tanto en sus concentraciones horarias como diarias de $MP_{2,5}$. El día más crítico ocurrió el 3 de julio, en donde en dos ocasiones se alcanzó un máximo horario que superó los $800 \mu g/m^3 h$ de $MP_{2,5}$ y una concentración media diaria de $370 \mu g/m^3 d$ de $MP_{2,5}$.

7.1. Escenario meteorológico a escala sinóptica

A gran escala, en torno a latitudes medias sobre el océano pacífico, se observa una onda de altura geopotencial (hgt) en la tropósfera media y baja, que se desplaza hacia el este, como se muestra en la figura 7.2. Los mínimos y máximos de la onda están representados de manera alternada por vaguadas (región baja de la onda) y dorsales (región elevada de la onda), respectivamente. Tanto la vaguada como la dorsal tienen un eje horizontal, con orientación de norte sur (N-S), levemente inclinado (NW-SE), lo que es característico de las ondas transitorias extratropicales a medida que se mueven hacia la cordillera de los Andes (*Garreaud, 2000*). Durante el inicio del episodio se registra un incremento de la amplitud de la onda, mientras se aproxima a la costa de Chile. Existen dos mecanismos que explican este

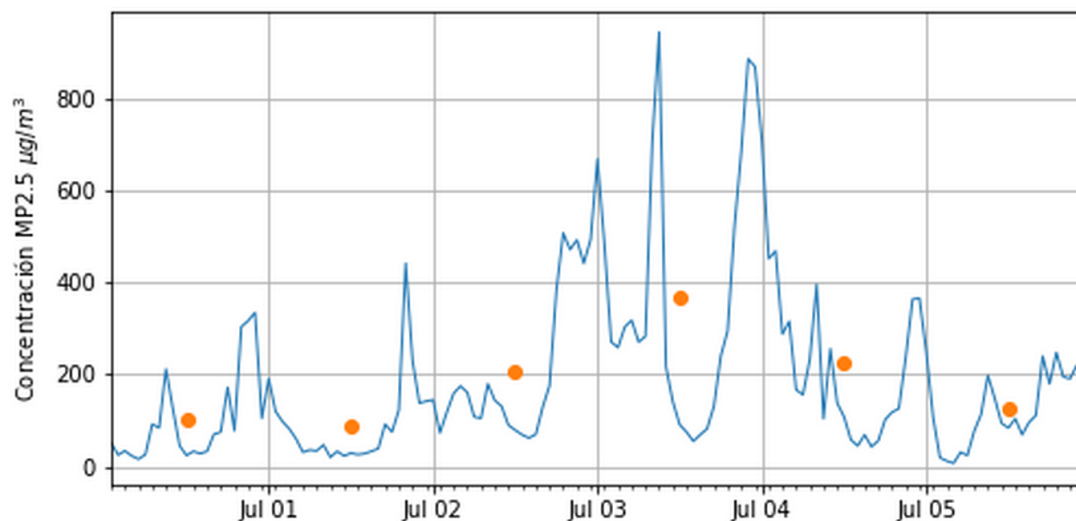


Figura 7.1: Concentraciones de $MP_{2,5}$ durante el episodio de 2-4 de julio del 2018. Concentración horaria (línea azul). Concentración diaria de 24 horas (puntos naranjas). Datos obtenidos de la estación COY1 red SINCA

incremento de la amplitud, el primero, propiciado por la superposición de ondas sinópticas con ondas planetarias cuasi estacionarias como, por ejemplo, el anticiclón del Pacífico Suroriental; y el segundo mecanismo, de tipo baroclínico provocado por la advección de aire cálido bajo el eje de la dorsal. En los días previos al episodio, días -2 y -1, se observa un estrangulamiento de la vaguada y la profundización horizontal de la dorsal hacia latitudes medias. Esto provoca una baja presión segregada frente a las costas de Chile central. Cuando se inicia el episodio de emergencia por $MP_{2,5}$, día 0, se observa un quiebre de la dorsal y la ubicación de la vaguada y la dorsal en un mismo eje longitudinal (levemente inclinado), frente a las costas de Chile. Genera una configuración semejante a un bloqueo tipo dipolo, con una alta y baja presión relativa ubicada hacia el sur y norte respectivamente. Este gradiente de fuerzas, estaría geostroficamente compensada por vientos desde el Este en superficie. Es decir, la presente configuración provoca un debilitamiento o inversión del viento zonal (flujos del Este), en un punto medio entre la baja (al norte) y la alta presión (al sur). Punto medio que se ubica en una latitud próxima a la ciudad de Coyhaique.

Concordante con lo descrito en el de Análisis Sinóptico (Capítulo 5), una forma de visualizar un episodio de emergencia es mediante de la gráfica de anomalía de altura geopotencial o hgt (ver figura 7.3). La gráfica indica la evolución de una anomalía positiva de hgt . Esta anomalía, al igual como se muestra para los episodios de un día de duración, se ubica en torno a los $40^{\circ}S$ a $60^{\circ}S$, centrado a la latitud de “Paso Drake”, entre “Magallanes” y la “Península Antártica”, con valores medios típicos superiores a los 160 m. La anomalía muestra una menor velocidad de desplazamiento, quedándose de modo casi estacionario sobre el territorio por algunos días, a partir del día 0. Esta condición se asemeja a lo descrito por *Renwick, J. A., y Revell, M. J. (1999)* para fenómenos de bloqueo atmosférico para el hemisferio sur. Esta situación también fue observada en los compuestos de anomalías de hgt , para episodios

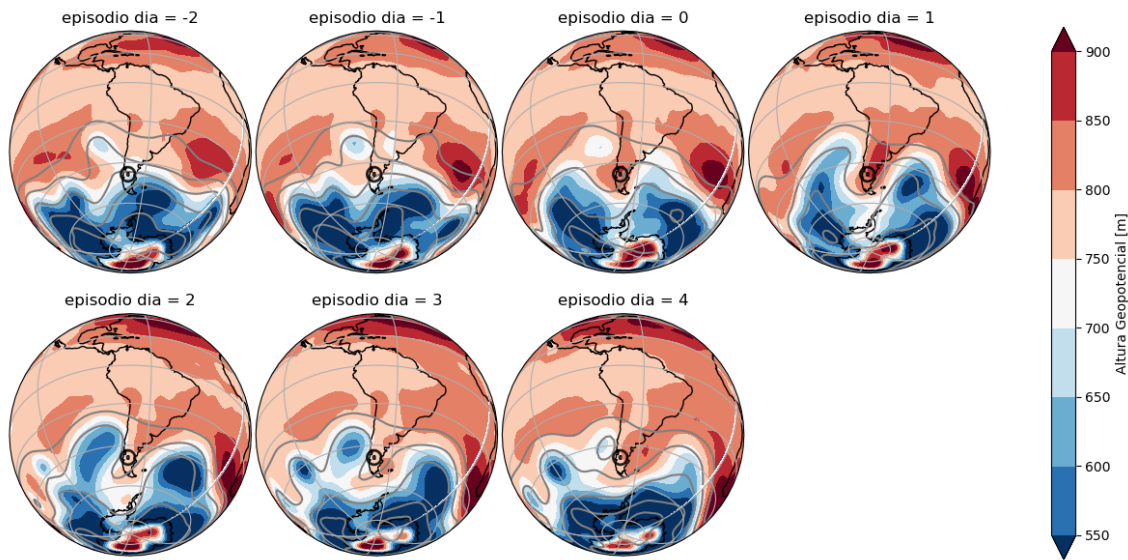


Figura 7.2: Altura geopotencial a 925hPa (colores) y en 500 hPa (líneas) para el episodio del 4 de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

de 3 y 6 días duración. La máxima concentración de $MP_{2,5}$ ocurre generalmente cuando la anomalía se ubica e intensifica en un meridiano próximo a la ciudad de Coyhaique, lo que sucede típicamente desde el día 0 del episodio, al igual que lo observado en los compuestos de anomalías de hgt .

De acuerdo con lo observado en los compuestos de viento omega (ω), figura 7.4, se aprecia una anomalía diaria ubicada a noreste de Coyhaique, próximo a la superficie (nivel 925 hPa) y que está centrada geográficamente sobre la “*Isla de Chiloé*” (Región de los Lagos, Chile). A esta altura próxima a la superficie, la anomalía de subsidencia se mantiene intensa durante todos los días del episodio. A una altura de 500hPa (troposfera media), también se observa una anomalía de ω sobre Coyhaique, que es particularmente intensa durante el día 0. Cabe mencionar que esta condición fue observada para los compuestos de anomalía de omega (ω), para los episodios de 3 días de duración revisados en el Capítulo 5 (figura 5.14).

La configuración de una baja presión centrada al norte de Coyhaique y una alta presión al sur, es concordante con los campos de hgt . Dicha configuración de presión favorece (fuerza) un debilitamiento o inversión del viento zonal de manera particularmente intensa en los niveles medios y altos de la troposfera (en la vertiente ecuatorial del alta de presión). Esta condición también afecta a las capas más superficiales de la troposfera, como es la capa límite, con una menor rapidez del viento. En el caso de la componente zonal del viento, tanto en superficie como en la tropósfera media se observa su debilitamiento (ver Figura 7.5) a una latitud próxima a la de Coyhaique y un aceleramiento de la rapidez del viento en el “*paso Drake*”, al sur de “*Magallanes*”. En cuanto al viento meridional (ver Figura 7.6), se observa en los días previos y primeros días de episodio, una anomalía positiva desde la tropósfera media y hacia la superficie. Esta anomalía favorece la advección de aire polar (frío), particularmente los días previos al episodio, al contrastarla con la climatología de viento meridional. Esta situación es concordante con el enfriamiento observado (ver Figura 7.7), en donde los días de episodio se estiman menores temperaturas en la zona de Coyhaique, principalmente en los niveles

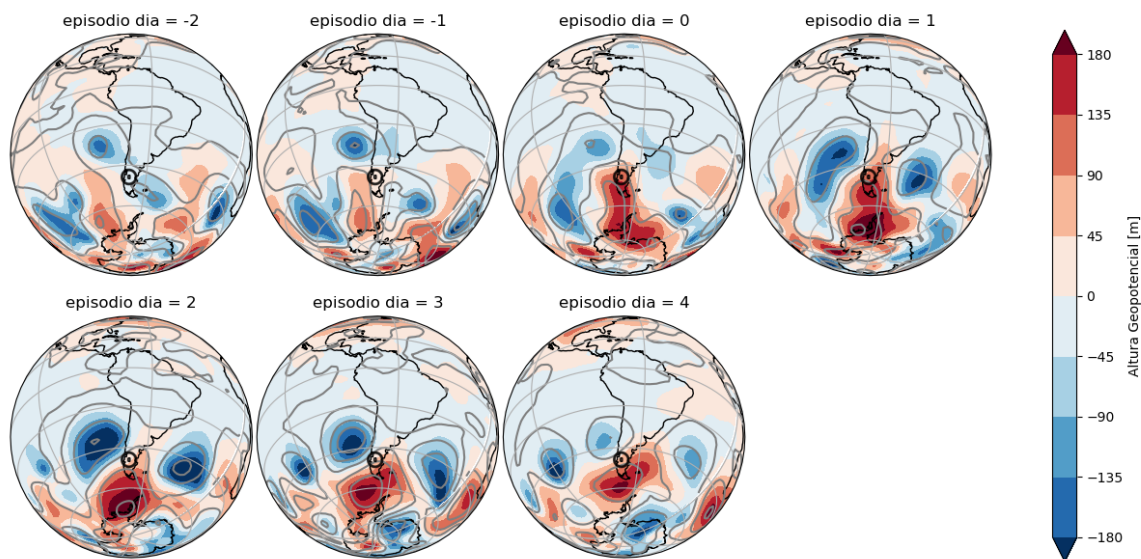


Figura 7.3: Anomalías de altura geopotencial a 925 hPa (zonas coloreadas) en 500 hPa (líneas) para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

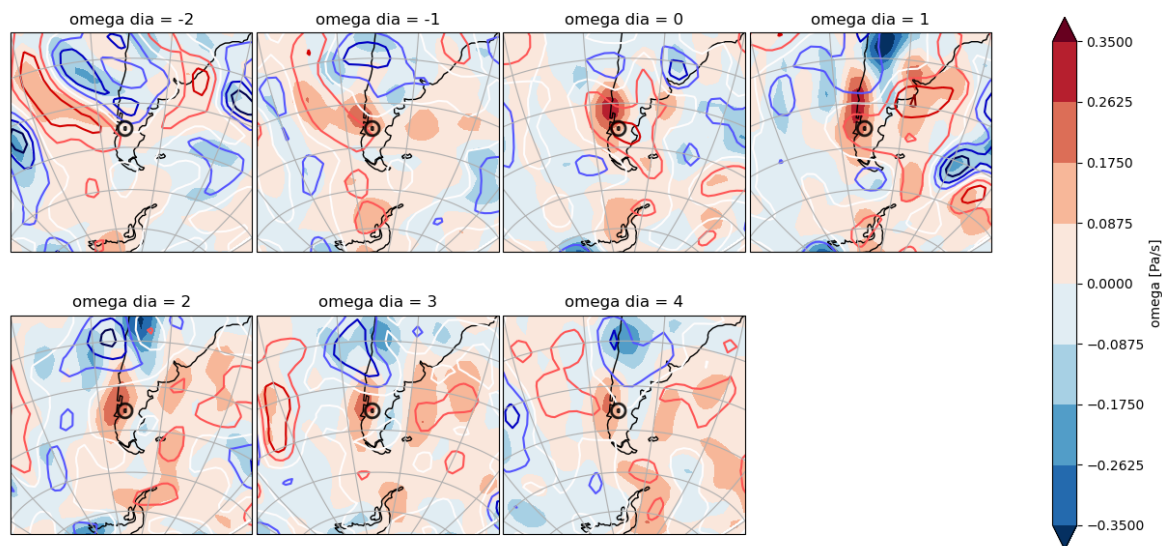


Figura 7.4: Anomalías de viento omega a 925 hPa (áreas coloreadas) en 500 hPa (líneas), para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

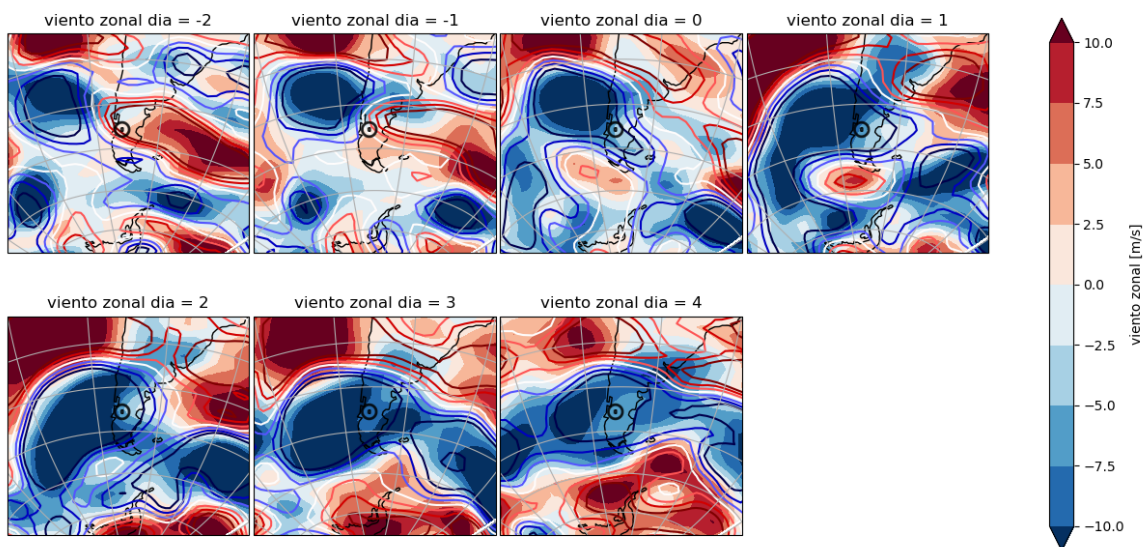


Figura 7.5: Anomalías de viento zonal a 925 hPa (áreas coloreadas) en 500 hPa (líneas), para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

atmosféricos próximos a la superficie. Situación que permanece durante todos los días del episodio y que se ilustra en la figura 7.8), con una lengua (día 0) y posterior desprendimiento (día 1) de una masa de aire frío sobre el territorio próximo a Coyhaique.

En la Figura 7.9 se ve que, durante todos los días, incluyendo los días previos al episodio, existe una disminución de la cobertura nubosa. Una menor nubosidad es coherente con un calentamiento de la atmósfera y mayor estabilidad, lo que es favorecido por una disminución de la humedad relativa y un debilitamiento de los movimientos convectivos ascendentes de aire, respectivamente. Cabe mencionar, que la menor nubosidad es un factor que genera una mayor pérdida radiativa infrarroja a nivel superficial, debido a un menor efecto invernadero.

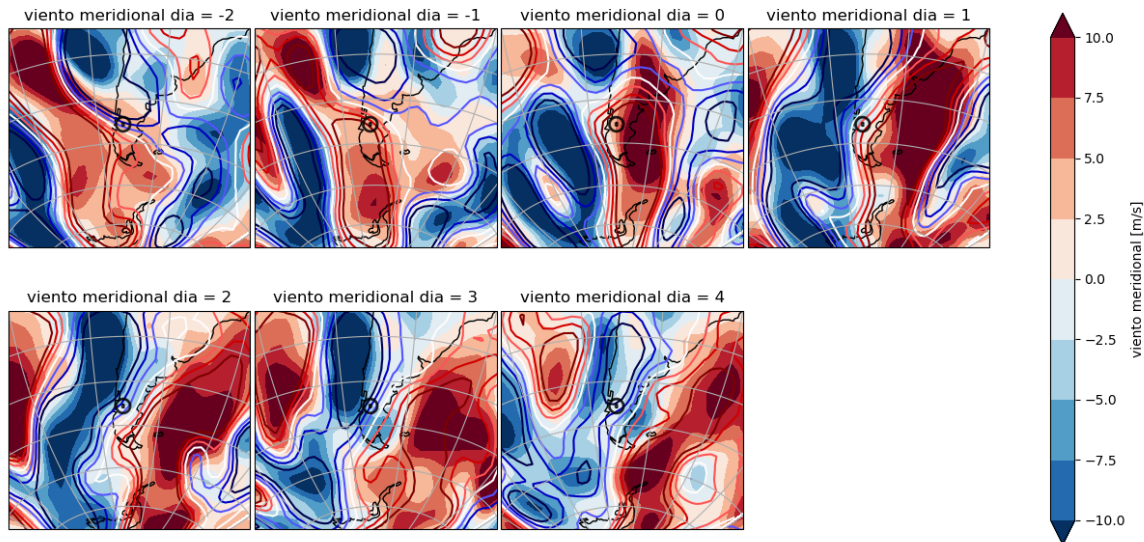


Figura 7.6: Anomalías de viento meridional a 925 hPa (áreas coloreadas) en 500 hPa (líneas), para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

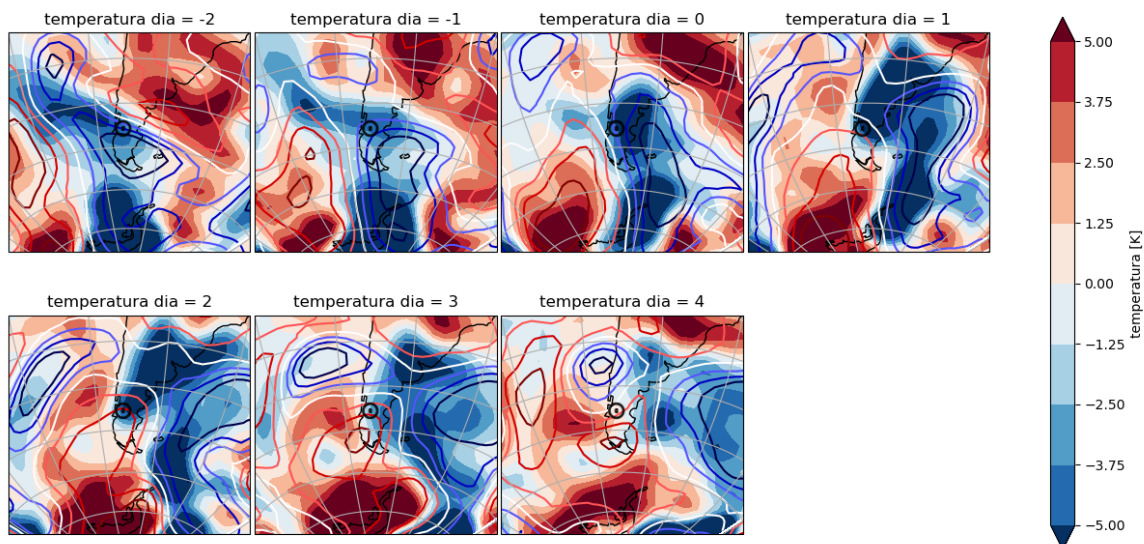


Figura 7.7: Anomalías de temperatura a 925 hPa (áreas coloreadas) en 500 hPa (líneas), para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

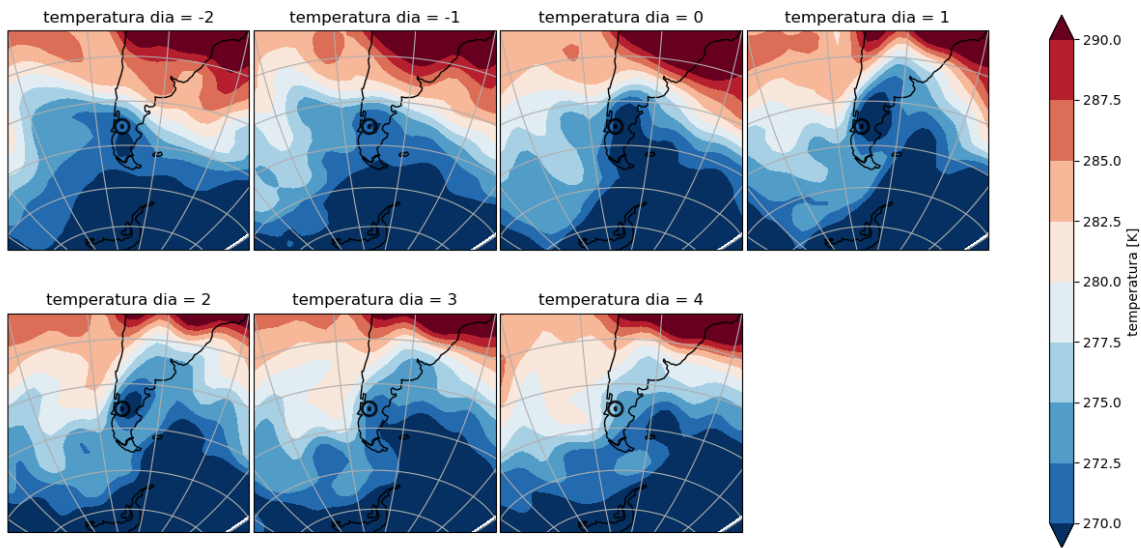


Figura 7.8: Temperatura a 925 hPa, para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

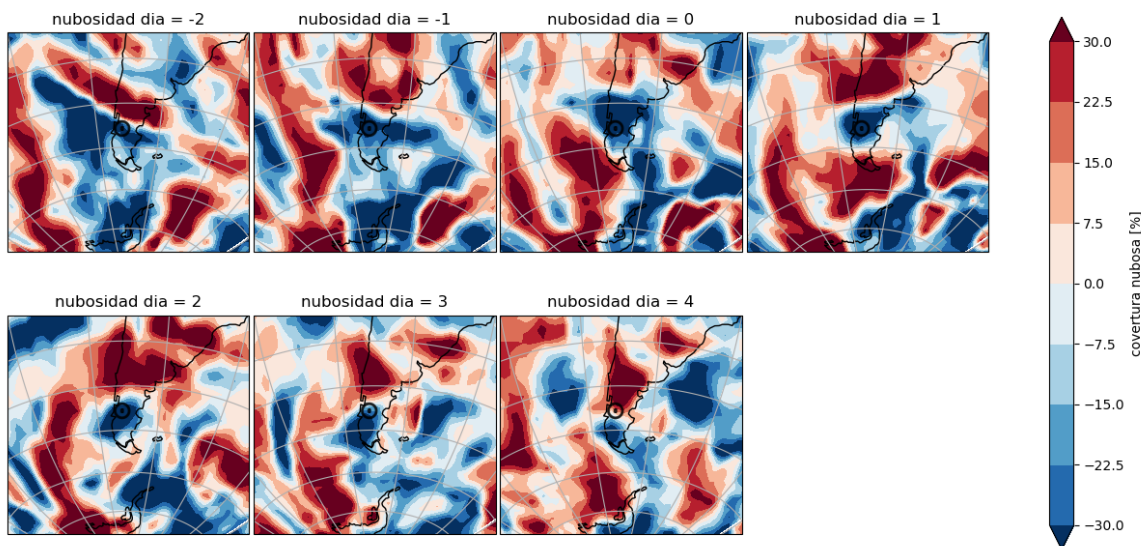


Figura 7.9: cobertura nubosa total, para el episodio del 2 (día 0) al 4 (día 3) de julio del 2018. Fuente de datos reanálisis modelo NCEP/NCAR

7.2. Variables meteorológicas superficiales medidas en Coyhaique

En superficie y desde el día 29 de junio, los datos de presión atmosférica de la estación de calidad de aire COY1 muestran un incremento en su magnitud (ver figura 7.10). El día 2 de julio, momento en que se inicia el episodio de emergencia por $MP_{2,5}$, ocurre el máximo de presión atmosférica con 990 hPa. De manera paralela, se observa una disminución de la temperatura desde el día 29 y durante todos los días del episodio. El mínimo de temperatura media diaria ocurre el día 3 de julio, en donde se mide una temperatura promedio diaria de -4°C . La mínima y máxima diaria para ese día fue de -7°C y 0°C , respectivamente. Durante el episodio destaca un aumento de la oscilación térmica diaria. Los descensos de las temperaturas durante las horas del día concuerdan con un aumento de las concentraciones de $MP_{2,5}$. Por el contrario, el aumento de la temperatura horaria durante el día es concordante con una menor concentración de $MP_{2,5}$.

En cuanto a la humedad relativa, se observa un aumento de la oscilación diaria del porcentaje de humedad relativa, durante los días de episodio. Esta variación de la humedad relativa diaria es similar, pero de manera inversa, a lo observado con la temperatura. Esto quiere decir, que cuando existe un mínimo de temperatura se registra un máximo de humedad relativa y, por el contrario, un mínimo de humedad relativa concuerda con un máximo de temperatura. Esta dependencia observada se debe a que el valor de saturación de agua de una parcela de aire depende de la temperatura, afectando con ello el valor de la humedad relativa. Esta dependencia es modelada en la ecuación de *Clausius-Capeyron* (Tejeda 2018).

El viento durante los días de episodio muestra un mayor número de horas de calma, es decir velocidades de viento iguales o inferiores a los 1,5 m/s. En particular los días 2, 3 y 4 de julio es cuando se registra una rapidez media del viento que está en torno a los 1,5 m/s. De igual manera, el viento zonal, muestra durante las horas de calma una componente negativa, es decir una brisa del este. Esta brisa del este coincide con las mayores concentraciones horarias de $MP_{2,5}$.

En superficie y desde el día 29 de junio, los datos de presión atmosférica de la estación de calidad de aire COY1 muestran un incremento en su magnitud (ver figura 7.10). El día 2 de julio, momento en que se inicia el episodio de emergencia por $MP_{2,5}$, ocurre el máximo de presión atmosférica con 990 hPa. De manera paralela, se observa una disminución de la temperatura desde el día 29 y durante todos los días del episodio. El mínimo de temperatura media diaria ocurre el día 3 de julio, en donde se mide una temperatura promedio diaria de -4°C . La mínima y máxima diaria para ese día fue de -7°C y 0°C , respectivamente. Durante el episodio destaca un aumento de la oscilación térmica diaria. Los descensos de las temperaturas durante las horas del día concuerdan con un aumento de las concentraciones de $MP_{2,5}$. Por el contrario, el aumento de la temperatura horaria durante el día es concordante con una menor concentración de $MP_{2,5}$.

En cuanto a la humedad relativa, se observa un aumento de la oscilación diaria del porcentaje de humedad relativa, durante los días de episodio. Esta variación de la humedad relativa diaria es similar, pero de manera inversa, a lo observado con la temperatura. Esto

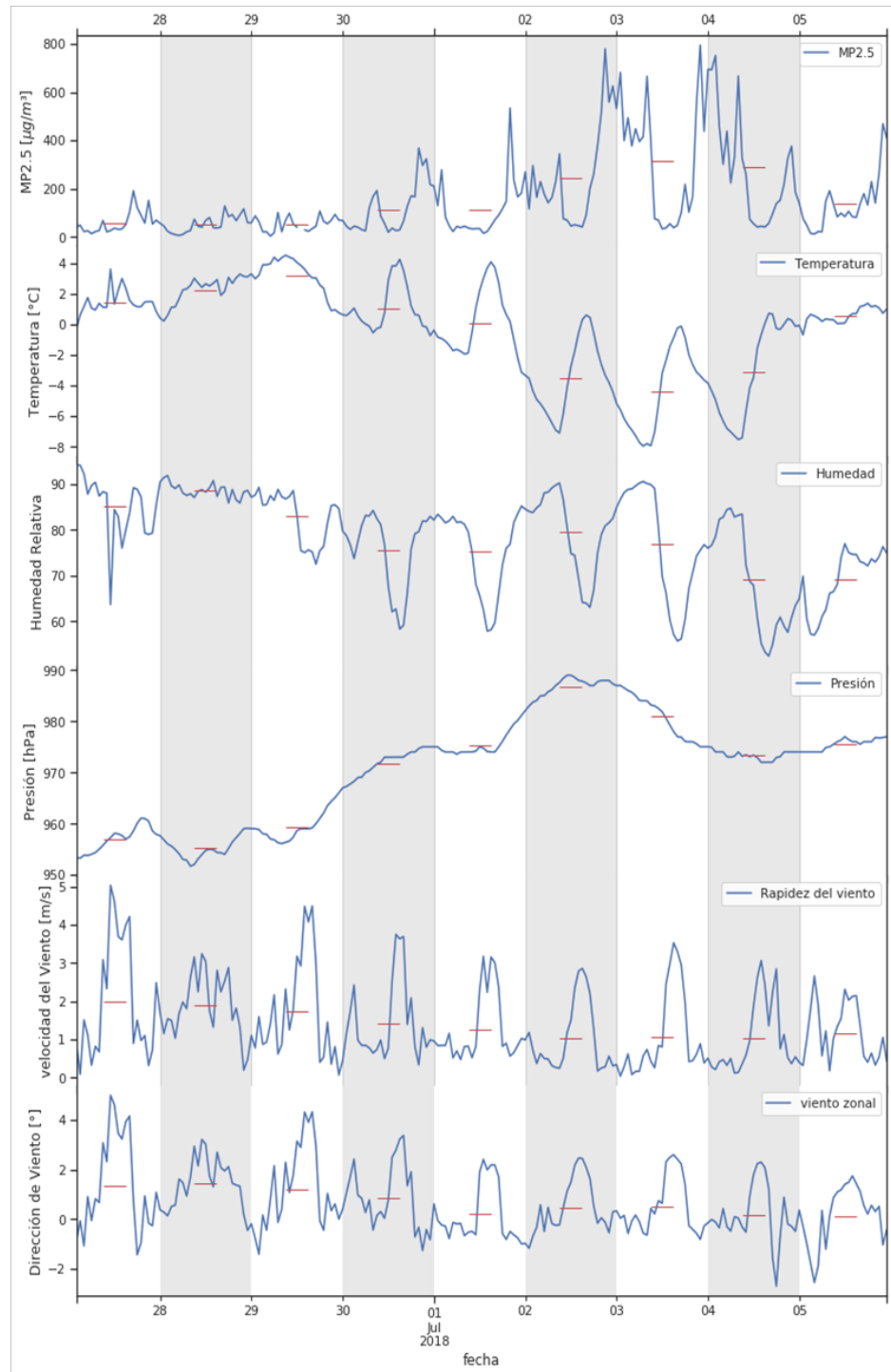


Figura 7.10: Variables meteorológicas y $MP_{2,5}$ superficiales de frecuencia horaria (línea azul) y diaria (línea roja) obtenidas de las estaciones red SINCA de Coyhaique. Periodo 27 de Junio a 6 de Julio 2018

quiere decir, que cuando existe un mínimo de temperatura se registra un máximo de humedad relativa y, por el contrario, un mínimo de humedad relativa concuerda con un máximo de temperatura. Esta dependencia observada se debe a que el valor de saturación de agua de una parcela de aire depende de la temperatura, afectando con ello el valor de la humedad relativa. Esta dependencia es modelada en la ecuación de *Clausius-Capeyron* (Tejeda 2018).

El viento durante los días de episodio muestra un mayor número de horas de calma, es decir velocidades de viento iguales o inferiores a los 1,5 m/s. En particular los días 2, 3 y 4 de julio es cuando se registra una rapidez media del viento que está en torno a los 1,5 m/s. De igual manera, el viento zonal, muestra durante las horas de calma una componente negativa, es decir una brisa del este. Esta brisa del este coincide con las mayores concentraciones horarias de $MP_{2,5}$.

7.3. Nubosidad a partir de datos satelitales

Durante los días previos al episodio, se registra una significativa disminución de la cobertura nubosa. Esta condición se manifiesta en importantes zonas del territorio de estudio desprovistas de nubes, como se ve en las imágenes satelitales (ver figura 7.11), correspondientes al periodo que va desde el 30 de junio al 5 de julio del 2018. En efecto, ya desde el día -2 se comienza a registrar una disminución de la nubosidad, la que se intensifica durante los días del episodio. De forma particular, del día 2 al 4 de julio (días del episodio de emergencia por $MP_{2,5}$), las nubes experimentan un desplazamiento con dirección hacia el oeste, en una zona que cubre, a lo menos, todo el territorio de Aysén. Este desplazamiento muestra también la inversión del viento zonal, lo que deja significativas zonas del océano Pacífico, frente a las costas de Aysén, desprovistas de una cobertura nubosa.

Esta configuración de menor nubosidad, concuerda con lo observado en los compuestos calculados del reanálisis del *NCEP-NCAR*, presentadas previamente. De acuerdo con lo descrito, durante los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$ existe una anomalía positiva del espesor de la tropósfera ubicada al extremo sur de la Patagonia y Antártida Chilena, que fuerza las condiciones meteorológicas descritas y desencadena una serie de procesos atmosféricos que llevan a una menor cobertura nubosa. En particular, la ausencia de nubes en una zona importante de Patagonia está acorde con la circulación de subsidencia antes mencionada (viento ω). En efecto, estos flujos descendentes de aire generan, a gran escala, un calentamiento troposférico, situación que inhibe la formación de nubes sobre los 1000 m de altura (capa límite). De igual manera, la anomalía de *hgt* presenta un lento desplazamiento, propio de los fenómenos intensos de alta presión, lo que se manifiesta como un bloqueo y estancamiento atmosférico. Este bloqueo de la atmósfera, también se puede también corroborar, en el caso de Patagonia Occidental, a través de la desviación de las zonas con nubosidad, hacia latitudes más bajas, como lo es el centro y sur de Chile. Dicha trayectoria de la nubosidad está acorde con el movimiento de los sistemas de baja presión hacia el norte del territorio, observado en figuras de *hgt* y en la presente imagen satelital. Por último, las imágenes satelitales entregan información térmica de la superficie del territorio. En estas figuras se observa un enfriamiento del suelo, favorecido por mayor pérdida radiativa infrarroja que genera la ausencia de cobertura nubosa. Esta condición está acorde con las menores temperaturas superficiales y temperatu-

ras mínimas registradas al amanecer, por las estaciones de la red SINCA, durante los días de episodio. Este enfriamiento bajo ciertas condiciones de humedad y estabilidad favorece la formación de neblina en el fondo de los valles. Generalmente, la formación de neblina se observa durante las horas de mínima temperatura, es decir al amanecer, y comúnmente desaparece en la medida que avanza el día y aumenta la radiación.

7.4. Datos de radiosonda para el episodio de emergencia por MP_{2,5}

Con el objetivo de corroborar que la condición de estabilidad y circulación vertical observada en Coyhaique y validar con datos medidos lo descrito por los reanálisis y datos satelitales, se optó por analizar los datos obtenidos por la radiosonda que es lanzado en la ciudad de Punta Arenas. Este radiosondeo registra perfiles verticales diarios de temperatura, humedad relativa y viento. En la figura 7.12 se muestran una serie de diagramas termodinámicos meteorológicos que representan los datos de las radiosondas diarias, entre el 1 y 6 julio del 2018, realizados en la ciudad de Punta Arenas, Región de Magallanes. Punta Arenas se ubica a ~850 km distante, al sur de Coyhaique.

De la figura se observa que el 1 de julio la dirección suroeste domina en todos los niveles de altura y el perfil de temperatura no muestra inversión térmica dentro de la tropósfera, condición que puede vincularse con la entrada de la dorsal. A partir del 2 de julio, se comienzan a ver los primeros indicios de perfiles verticales térmicos con características estables, en la tropósfera baja, es decir, bajo los 2000 m de altura y un cierto debilitamiento del viento zonal. El día 3 de julio, se identifica de manera más clara una inversión térmica superficial, la que se inicia en el suelo y alcanza los ~1500 metros de altura. De igual forma, el día 3 de julio se observa un debilitamiento del viento zonal, sin embargo, este sigue manteniendo un componente del oeste. El perfil vertical de humedad presenta un descenso de sus valores desde la superficie hasta los 4000 m de altura, lo que explica la baja o nula condición de nubosidad. El día 4 de julio se observa una inversión del perfil de viento zonal en la tropósfera baja, es decir, viento del este, desde el suelo y hasta aproximadamente los 1500 m de altura. Sin embargo, para la misma fecha se observa un quiebre de la inversión térmica en superficie y hasta los 1000 m de altura, probablemente favorecido por una nubosidad baja. Esta condición se mantiene durante los días 5 y 6 de julio.

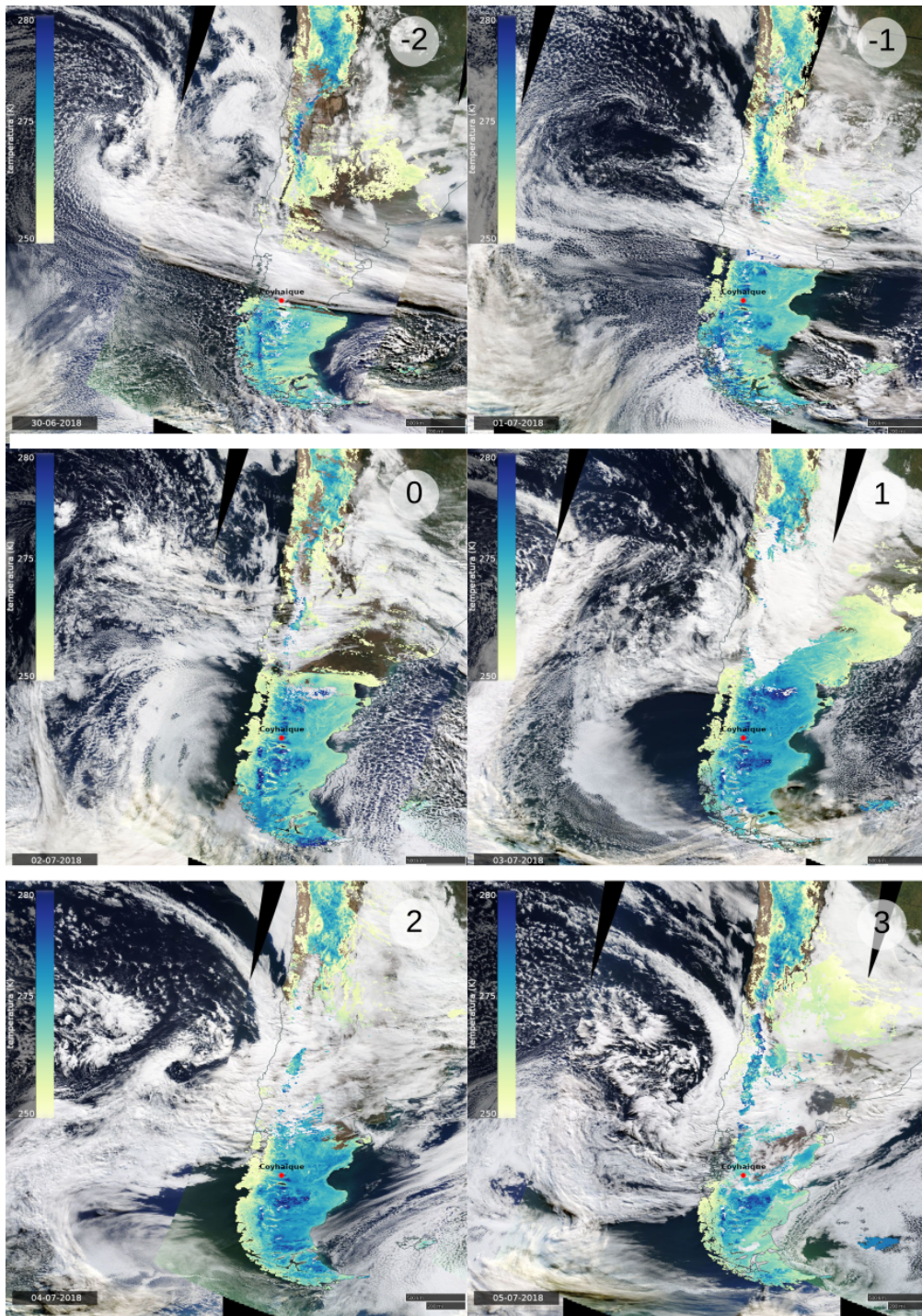


Figura 7.11: Imágenes satelitales MODIS canal visible (cobertura nubosa) e infrarrojo (superficie de suelo) Referencias: NASA Earth Observations - Land Surface Temperature; ICESS - MODIS Land Surface Temperature Group; MODIS - ATBD MOD11; LP DAAC - MYD11L2; LP DAAC - MOD11L2. link: <https://go.nasa.gov/2GWSMsv>. Periodo: 30/06/2018 - 05/07/2018

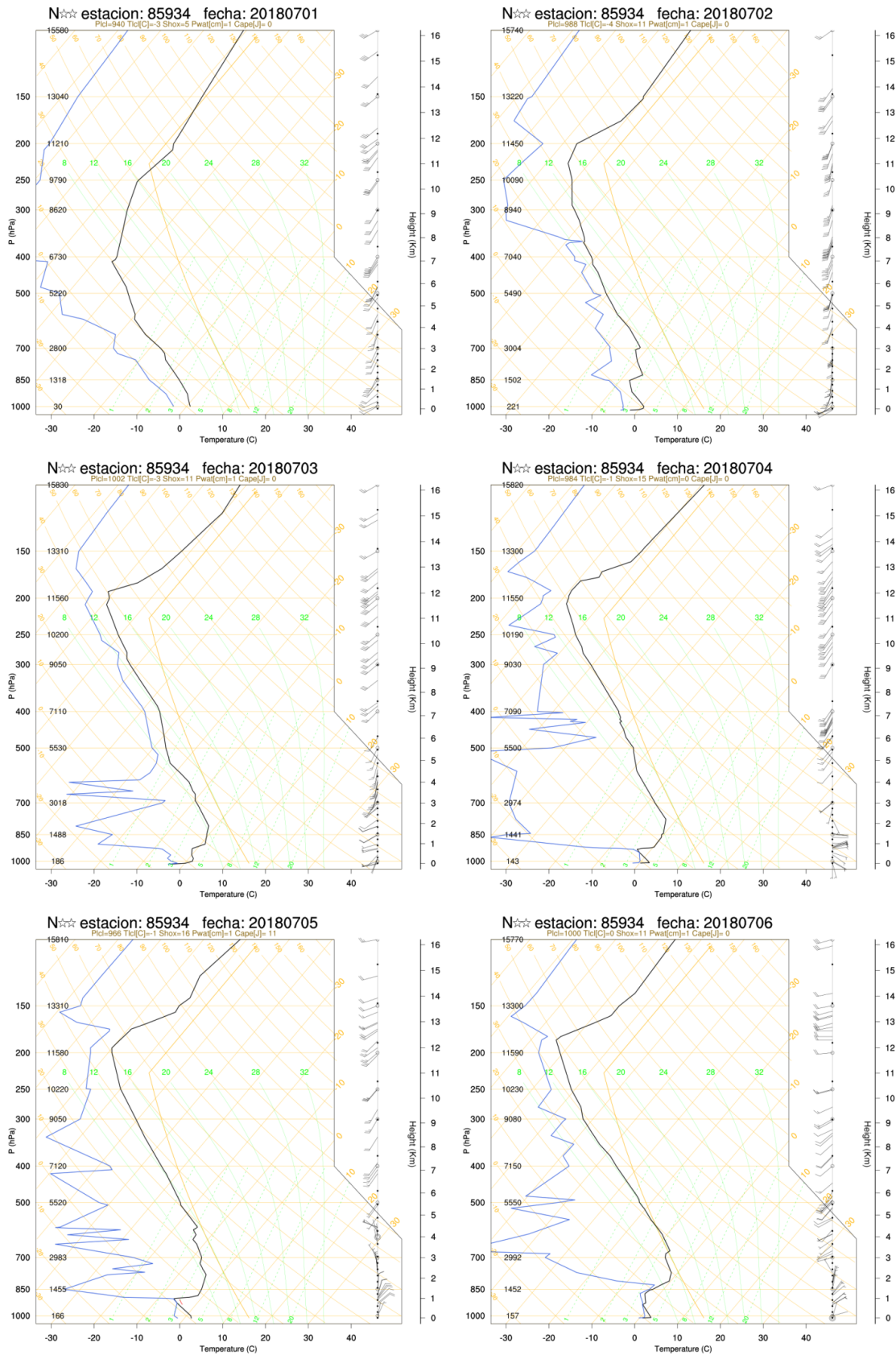


Figura 7.12: Perfiles verticales de temperatura (línea negra), humedad (línea azul) y viento (barbas) obtenidos a partir de la radiosonda de Punta Arenas desde el 1 al 6 de julio del 2016. Fuente de datos: Estación Dirección Meteorológica de Chile (DMC) N°85934

Capítulo 8

Discusión y conclusiones

Las variables meteorológicas de escala sinóptica durante los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$, se caracterizan en promedio, por la presencia de una significativa anomalía positiva de hgt ubicada al sur de Coyhaique. Paralelamente, se observa un debilitamiento del anticiclón del Pacífico Suroriental frente a las costas de la zona central de Chile, asociado a una baja presión o vaguada en altura. El centro de la anomalía positiva normalmente se ubica entre los 50 y 60 grados de latitud sur, lugar próximo al “*paso Drake*” y “*Tierra del Fuego*”. Esta anomalía positiva se desplaza con dirección oeste este (W-E), a medida que evoluciona el episodio. El día más crítico de contaminación ocurre durante la máxima intensidad de la anomalía, con valores iguales o superiores a los 100 m de hgt a un nivel de 500 hPa (troposfera media) y su centro se emplaza a una longitud próxima a la de Coyhaique. La condición descrita también se observa próximo a la superficie (925 hPa), con una intensidad menor. Los antecedentes indican una relación directa entre la intensidad de la anomalía media con la magnitud del episodio de contaminación por $MP_{2,5}$. La visualización de la configuración sinóptica en valores absolutos, puede ser descrita como el desplazamiento, con dirección oeste este (W-E), de un anticiclón migratorio en superficie, asociado a una profundización de una dorsal cálida en la troposfera media, con eje N-S, levemente inclinada.

Esta configuración sinóptica desfavorable para la dispersión de contaminantes, es la que fuerza una serie de procesos atmosféricos que influyen directa o indirectamente con los altos niveles de Material Particulado Fino medidos en superficie de la ciudad de Coyhaique durante un episodio emergencia. Dentro de los factores más significativos está disminución o inversión del viento zonal, calentamiento de la tropósfera media y baja, incremento de flujos de subsidencia, menor cobertura de nubosidad, bajas temperaturas e inversión térmica próximo a la superficie. De igual forma, a una escala local se observa la disminución media del viento zonal y menores temperaturas como rasgos meteorológicos característicos de los episodios de emergencia por $MP_{2,5}$ en Coyhaique.

Dentro de los aspectos más llamativos que presenta la configuración sinóptica, está la disminución o inversión de la componente zonal del viento a la latitud de Coyhaique. Esta condición está forzada por un gradiente de presión atípico, es decir, al sur de Coyhaique se ubica una significativa anomalía positiva de hgt (alta presión) y al norte se observa una anomalía negativa de hgt (baja presión). Esta configuración, por un balance geostrófico,

entre la fuerza de roce y presión genera vientos con dirección Este. La mayor expresión de este fenómeno sucede a una altura próxima al límite superior de la troposfera, e influencia de manera directa sobre niveles inferiores de la troposfera, como por ejemplo la capa límite planetaria. En días de emergencia por $MP_{2,5}$, se observa la disminución o inversión del viento zonal superficial. Esta condición es poco favorable para la advección y/o dispersión del $MP_{2,5}$ dentro de la capa de mezcla superficial. De esta forma, durante los días con episodio de emergencia, se experimenta en Coyhaique, un debilitamiento de la rapidez del viento dentro de la capa límite, lo que favorece el incremento de la concentración del $MP_{2,5}$. En cuanto al viento meridional, tiene un nivel de significación menor que la componente zonal. No obstante, los días previos al episodio de contaminación se registra, en algunos casos, un valor positivo (viento sur) de la componente meridional del viento, lo que indicaría la advección de masas de aire frío, o polar, hacia el territorio de Patagonia. Esto refuerza un escenario local de bajas temperaturas, previo a los episodios de contaminación por $MP_{2,5}$. El día de inicio del episodio, esta condición se invierte, lo que es coherente con la entrada de aire cálido a toda la troposfera, ayudando al calentamiento de la troposfera media y a la permanencia de la anomalía positiva de hgt en el territorio.

Desde el inicio del episodio se observa advección cálida en la dorsal y flujos descendentes de aire (subsistencia). Tanto la subsistencia (viento omega (ω) positivo) como la advección cálida, son coherentes con un calentamiento de la tropósfera media, que se propaga hacia la tropósfera baja, afectado negativamente el desarrollo de la capa límite, la formación de nubosidad, entre otros aspectos. Ambos factores pueden explicar la anomalía cálida en altura. Esta condición genera perfiles termodinámicos más estables, centrados aproximadamente tropósfera media (~ 500 hPa). De esta forma, el día previo y durante el episodio de emergencia se registra una disminución de la cobertura nubosa, factor importante que colabora a la pérdida radiativa nocturna desde la superficie del suelo. Dicha condición generalmente se expresa con un descenso de la temperatura mínima del aire que está más próxima al suelo, propagándose hacia arriba dentro de la capa límite. Esta situación profundiza la inversión térmica nocturna local, afectado también a un descenso de la temperatura media diaria que se registra en Coyhaique. A este descenso de la temperatura se le puede asociar un incremento de la demanda térmica, expresada en un aumento de los grados días requeridos para calefaccionar. Este factor es una forzante que incrementa las emisiones de $MP_{2,5}$ asociada a la calefacción en las viviendas de Coyhaique. Si bien existe una fundamental y lógica dependencia entre temperatura y emisiones de $MP_{2,5}$, esta relación no ha sido medida de manera directa en Coyhaique.

Paralelamente, en el tope de la capa límite se registra inversión térmica, la que está asociada a fenómenos de subsistencia. Dicha inversión, inhibe y/o modula el desarrollo vertical de la zona en que mezclan los contaminantes emitidos desde la superficie. Es así como, la inversión de la temperatura limita los movimientos convectivos superficiales (turbulencia) y con ello el volumen afectivo en que se diluyen los contaminantes atmosféricos, como el $MP_{2,5}$, dentro de la capa de mezcla urbana. En este sentido el rápido incremento temperatura diaria y mayor amplitud térmica diaria, registrado por las estaciones meteorológicas, es reflejo de la menor altura de la capa de mezcla durante los días de episodio (*Stull, 1988, Garreaud y Rutllant (2002)*).

En síntesis, durante los episodios emergencia influenciados por una anomalía positiva

de hgt , observamos condiciones favorables para la emisión de contaminantes atmosféricos asociados a la calefacción por leña ($MP_{2,5}$) y una disminución del factor de ventilación en la cuenca próxima a Coyhaique. Es decir, una disminución de los factores asociados a la dispersión de los contaminantes, como lo es vientos débiles y menor desarrollo de la altura de la capa de mezcla. Expresado de otra manera, viento y temperatura son el puente entre los procesos de escala sinóptica (ΔES) y los episodios de contaminación atmosférica en Coyhaique por $MP_{2,5}$. Todos estos vínculos los podemos ejemplificar en el siguiente esquema:

$$\Delta ES \rightarrow \Delta(T, V) \rightarrow \Delta(E, FV) \rightarrow \Delta([MP2,5]) \quad (8.1)$$

El primer término ΔES representa fenómenos como “estancamiento atmosférico”, “sistemas frontales de baja presión”, “dorsales”, “altas o bajas segregadas”, etc., que afectan positiva o negativamente las concentraciones de $MP_{2,5}$. Dichos fenómenos meteorológicos de escala sinóptica son representados a partir de campos como hgt , temperatura, viento, viento omega (ω), entre otros. Estos campos sinópticos fuerzan y/o modulan la meteorología local superficial, afectando a los procesos locales involucrados en los episodios de $MP_{2,5}$ como la temperatura y el viento en el caso de Coyhaique. Estos procesos, en el caso particular de este trabajo, afectan las emisiones de $MP_{2,5}$ (E) y el factor de ventilación (FV).

Coherente con los antecedentes antes descritos, se observa un ciclo estacional en donde los más altos de $MP_{2,5}$ ocurren durante el periodo frío. Es decir, momento del año en que los promedios de la temperatura y la rapidez del viento son menores. En efecto, las concentraciones promedio de COY1 (COY2), para los años 2014-2020, son de $102 \pm 86 \mu g/m^3$ ($101 \pm 74 \mu g/m^3$) y $14 \pm 12 \mu g/m^3$ ($16 \pm 11 \mu g/m^3$) de $MP_{2,5}$ para el periodo frío y cálido respectivamente. Para el periodo frío el percentil 98 es de $260 \mu g/m^3 d$ ($234 \mu g/m^3 d$) de $MP_{2,5}$ para COY1 (COY2). En promedio julio es el mes más crítico con $117 \pm 95 \mu g/m^3 d$ $MP_{2,5}$.

Durante el periodo 2014-2016 se registraron 502 (20 % del total de los días del periodo) eventos diarios críticos por $MP_{2,5}$. De ellos 173 (7 % de los días del periodo) corresponde a alertas, 171 (7 % de los días de los días del periodo) a preemergencia y 158 (6 % de los días de los días del periodo) a emergencias. Esto quiere decir que un 20 % de los días se encuentra con algún grado crítico de contaminación por $MP_{2,5}$, de acuerdo con la norma chilena, y 6 % de los días corresponden al nivel de emergencia para este contaminante. Estos eventos diarios, en su mayoría, ocurren en el periodo de otoño invierno. El mes de julio es el que tiene el mayor número de eventos diarios críticos de $MP_{2,5}$. En promedio se registran para el mes de julio, 6 ± 2 (19 %), 6 ± 2 (19 %) y 6 ± 3 (19 %) días de alerta, preemergencia y emergencia ambiental para $MP_{2,5}$ respectivamente. Esto quiere decir que, en promedio, más de la mitad (58 %) de los días en el mes de julio registran una condición crítica del aire y un 19 % está bajo el nivel de emergencia.

El año 2016 es el año más crítico en cuanto al número de eventos diarios. Para este año se registran 99 días (27 %) en donde se supera la normativa diaria: 44 (12 %) emergencias, 31 (8 %) preemergencias y 24 (7 %) alertas ambientales por $MP_{2,5}$. Desde el 2016 al 2020 se observa una tendencia a la disminución del número anual de eventos diarios críticos totales, siendo 99 (año 2016), 64 (año 2017), 69 (año 2018), 54 (año 2019) y 45 (año 2020) los eventos diarios totales anuales, respectivamente. En el caso de los eventos diarios con nivel

emergencias también se observa un comportamiento similar, es decir 44, 22, 25, 11, 11 como número de eventos diarios con nivel de emergencia para $MP_{2,5}$ desde 2016 al 2020. Para el periodo frío, existe un 70 % de probabilidad de encontrar días que exceden la norma primaria diaria de material particulado fino. Y un 15 %, de observar concentraciones de $MP_{2,5}$, que igualan o exceden el nivel de emergencia ambiental, es decir concentraciones $\geq 170 \mu g/m^3 d$.

Durante los años 2014-2020 se contabilizan 151, 122 y 76 episodios de contaminación por material particulado fino que igualan o superan el nivel de alerta ($\geq 80 \mu g/m^3 d$), preemergencia ($\geq 110 \mu g/m^3 d$) y emergencia ($\geq 170 \mu g/m^3 d$) por $MP_{2,5}$ respectivamente. Para este estudio, entiéndase como episodios al conjunto de eventos diarios temporalmente consecutivos de contaminación por $MP_{2,5}$, que igualan o superan la norma diaria de concentración para $MP_{2,5}$. La duración de los episodios presentados varía entre 1 a 8 días consecutivos, no descartándose episodios de mayor duración. En particular, los episodios más frecuentes, en todos los niveles críticos de contaminación, son los de un día de duración. Para el periodo de estudio (2014-2020), se registraron 47 episodios con nivel de emergencia; 51 episodios con preemergencia y 39 episodios con nivel emergencia, con un día de duración. Se observa un rápido decaimiento de la frecuencia de los episodios a medida que se incrementa la duración de estos, para todos los niveles de contaminación. Dentro de un año promedio (valores mensuales), la mayor frecuencia de episodios con nivel de emergencia sucede en el mes de julio, con promedios de 2 y 0,75 episodios, para 1 y 3 días de duración, respectivamente.

Para el periodo 2016 y 2020 se observa una tendencia a la disminución de las concentraciones a medida que tiempo avanza. Esta situación se puede ilustrar con la razón de cambio temporal anual de las medianas, de $-3 \pm 3 \mu g/m^3$ año ($-2 \pm 1 \mu g/m^3$ año) para la estación COY1 (COY2). De igual forma, se estima una aceleración de la magnitud de la tendencia, en la medida que se analizan percentiles más altos. Esto quiere decir, que la tendencia es mucho más marcada en los rangos de concentraciones más altas. Por ejemplo, en el percentil 75 la tendencia es de $-8 \pm 8 \mu g/m^3 d$ año ($-4 \pm 5 \mu g/m^3$ año) y cambia a $-39 \pm 15 \mu g/m^3$ año ($-25 \pm 12 \mu g/m^3$ año) en el percentil 98, para la estación COY1 (COY2). De mantenerse este comportamiento en el futuro permitiría alcanzar concentraciones en norma en un plazo de 7 ± 3 (7 ± 1) años para el promedio anual en COY1 (COY2) de $20 \mu g/m^3$ de $MP_{2,5}$ y de 9 ± 2 (12 ± 3) años para el percentil 98 de $50 \mu g/m^3$ de $MP_{2,5}$. De acuerdo con esto, existe concordancia con la reducción de emisiones de material particulado fino generada por un incremento de las medidas propuestas en PDA, como lo son el recambio de calefactores y la aislación de vivienda. Es importante tener presente que, esta situación no significa que no existirán días contaminados y que las medidas implementadas en la actualidad, aún son incipientes para tener concentraciones que puedan cumplir la normativa chilena.

Los resultados meteorológicos de escala sinóptica, encontrados en el presente estudio muestran importantes similitudes con una de las variantes de las configuraciones sinópticas descritas por *Garreaud y Rutllant (2002)*, para los episodios de contaminación atmosférica en Santiago. Esta condición corresponde al paso de una marcada dorsal cálida en altura, asociada a un intenso anticiclón migratorio en superficie al sur de Santiago. En este tipo de episodios se observa un intenso calentamiento en el tope de la inversión térmica y una baja costera muy profunda. El máximo flujo de dirección este sucede con el paso de una segregada en altura al norte de Santiago. Este tipo de fenómenos está asociado a los episodios más críticos observados en la ciudad de Santiago. Por otra parte, las principales diferencias

observadas con los episodios típicos observados para la cuenca de Santiago, es la ausencia de una vaguada costera que se mueva de norte a sur por las cosas frente a Coyhaique y la disminución de la temperatura media durante los días en que dura el episodio de contaminación. Si bien el trabajo nos busca validar estas últimas afirmaciones se puede plantear que la ausencia de la vaguada costera podría deberse a la menor altura de la cordillera de los Andes, que actúa como una importante barrera de los flujos del Oeste y la disminución de la temperatura media podría estar asociada a la menor radiación solar que llega a estas latitudes durante el periodo invernal en comparación a Santiago.

Capítulo 9

Bibliografía

Atkins RS, Donovan CT. (1996). Wood Products in the Waste Stream: Characterization and Combustion Emissions. Center CT, editor.

Anenberg SC, Achakulwisut P, Brauer M, Moran D, Apte JS, Henze DK. (2019). Particulate matter-attributable mortality y relationships with carbon dioxide in 250 urban areas worldwide. *Sci Rep* 9(1): 11552.
doi: 10.1038/s41598-019-48057-9

Appelhans T, Sturman A, Zawar-Reza P. (2013). Synoptic y climatological controls of particulate matter pollution in a Southern Hemisphere coastal city. *Int J Climatol* 33(2): 463-479. doi: 10.1002/joc.3439

Araya B, (2011) Crónicas de Coyhaique. Ediciones Ñire Negro ISBN: 978-956-8967-01-07

Aw J, Kleeman MJ. (2003). Evaluating the first-order effect of intraannual temperature variability on urban air pollution. *J Geophys Res Atmos* 108(12): 4365.
doi:10.1029/2002jd002688

Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266-272. <https://doi.org/10.1038/nclimate2491>

Barría RM, Calvo M, Pino P. (2016). Contaminación intradomiciliaria por material particulado fino (MP_{2,5}) en hogares de recién nacidos. *Rev Chil Pediatr* 87(5): 343-350. Sociedad Chilena de Pediatría. doi: 10.1016/j.rchipe.2016.04.007

BCN, Biblioteca del Congreso Nacional. (2018). Guía legal sobre: Elección democrática de gobernadores regionales. Página internet. Última actualización: (26-03-2018)
<https://www.bcn.cl/leyfacil/recurso/eleccion-democratica-de-gobernadores-regionales>

Beck HE, Zimmermann NE, McVicar TR, Vergopolan N, Berg A, Wood EF. (2018). Present y future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* 5(1): 180214. doi: 10.1038/sdata.2018.214

Beekmann M, Prévôt ASH, Drewnick F, Sciare J, Pandis SN, Denier Van Der Gon HAC, Crippa M, Freutel F, Poulain L, Gherzi V, et al. (2015). In situ, satellite measurement y model evidence on the dominant regional contribution to fine particulate matter levels in the Paris megacity. *Atmos Chem Phys* 15(16): 9577-9591. doi: 10.5194/acp-15-9577-2015

Bellouin, N., Boucher, O., Haywood, J. et al. Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements. *Nature* 438, 1138-1141 (2005).
<https://doi.org/10.1038/nature04348>

Billi M, Amigo C, Calvo R, Urquiza A. (2018). Economía de la Pobreza Energética ¿Por qué y cómo garantizar un acceso universal y equitativo a la energía. *Econ y Política* 5(2): 35-65. doi: 10.15691./07194714.2018.006

Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Wolf, J., Bruce, N. G., Mehta, S., Prüss-Ustün, A., ... Smith, K. R. (2013). Solid fuel use for household cooking: Country y regional estimates for 1980-2010. *Environmental Health Perspectives*, 121(7), 784-790.
<https://doi.org/10.1289/ehp.1205987>

Boucher O, Randall D, Artaxo P, Bretherton C, Feingold G, Forster P, Kerminen V-M, Kondo Y, Liao H, Lohmann U, et al. (2013). Clouds y aerosols. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change, editor. Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 571-658. doi: 10.1017/CBO9781107415324.016

Bressi, M., Sciare, J., Gherzi, V., Bonnaire, N., Nicolas, J. B., Petit, J. E., ... Féron, A. (2013). A one-year comprehensive chemical characterisation of fine aerosol (PM_{2.5}) at urban, suburban y rural background sites in the region of Paris (France). *Atmospheric Chemistry y Physics*, 13(15), 7825-7844. <https://doi.org/10.5194/acp-13-7825-2013>

Campbell-Lendruma, Diarmid y Prüss-Ustüna, Annette. (2019). Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. World Health Organization. Europe, Regional Office for. doi: <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.18.224295>

Cash BA, Lee S. (2000). Dynamical processes of block evolution. *J Atmos Sci* 57(19): 3202-3218. doi: 10.1175/1520-0469(2000)057<3202:DPOBE>2.0.CO;2

Castellan, Gibert (1987) *Fisicoquímica Segunda Edición en Español*. Universidad de Maryland, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, Libro

Cao, J., Chow, J. C., Lee, F. S. C., & Watson, J. G. (2013). Evolution of PM_{2.5} measurements and standards in the U.S. And future perspectives for China. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(4), 1197-1211. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.11.0302>

Chapra, Canale (2015), *Metodos Numericos para Ingenieros*, Septima Edición, Mac Graw Hill. ISBN: 978-607-15-1294-9

Chelani AB. (2017). Study of Local and Regional Influence on MP_{2,5} Concentration during Odd-Even Rule in Delhi Using Causal Analysis. *Aerosol Air Qual Res*17(5): 1190-1203. doi:

10.4209/aaqr.2016.06.0267

Chow, J. C. (1995). Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 45(5), 320-382. <https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467369>

Chowdhury S, Dey S, Smith KR. (2018). Ambient PM2.5 exposure y expected premature mortality to 2100 in India under climate change scenarios. *Nat Commun* 9(1): 318. doi: 10.1038/s41467-017-02755-y

Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Frostad J, Estep K, Balakrishnan K, Brunekreef B, Dandona L, Dandona R, et al. (2017). Estimates y 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 389(10082): 1907-1918. doi: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6

Comrie AC. (1994). A synoptic climatology of rural ozone pollution at three forest sites in Pennsylvania. *Atmos Environ* 28(9): 1601-1614. doi: 10.1016/1352-2310(94)90306-9

Collaud Coen M, Weingartner E, Furger M, Nyeki S, Prévôt ASH, Steinbacher M, Baltensperger U. (2011). Aerosol climatology y planetary boundary influence at the Jungfraujoch analyzed by synoptic weather types. *Atmos Chem Phys* 11(12): 5931-5944. doi: 10.5194/acp-11-5931-2011

Conama PP, Aysén R De, Ibáñez C. (2009). “ANÁLISIS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN COYHAIQUE” Informe Final v2/R2. Preparado Por: EnviroModeling Ltda.

Cooper, O. R., Moody, J. L., Parrish, D. D., Trainer, M., Ryerson, T. B., Holloway, J. S., Evans, M. J. (2001). Trace gas signatures of the airstreams within North Atlantic cyclones: Case studies from the North Atlantic Regional Experiment (NARE 97) aircraft intensive. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D6), 5437-5456. doi:10.1029/2000jd900574

Creara Consultores. (2013). Análisis Energético De Viviendas Para Ciudades Del Centro Y Sur De Chile Y Sistematización en La Información Asociada a La Leña.

Davis RE. (1991). A synoptic climatological analysis of winter visibility trends in the mid-eastern United States. *Atmos Environ Part B, Urban Atmos* 25(2): 165-175. doi: 10.1016/0957-1272(91)90052-G

Davis RE, Kalkstein LS. (1990). Development of an automated spatial synoptic climatological classification. *Int J Climatol* 10(8): 769-794. doi: 10.1002/joc.3370100802

Daly, C., Conklin, D. R., & Unsworth, M. H. (2010). Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts. *International Journal of Climatology*, 30(12), 1857-1864. <https://doi.org/10.1002/joc.2007>

Davis RE, Kalkstein LS. (1990). Development of an automated spatial synoptic climatological classification. *Int J Climatol* 10(8): 769-794. doi: 10.1002/joc.3370100802

Davis, R. E., & Kalkstein, L. S. (1990). Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations. *Physical Geography*, 11(4), 320-342. <https://doi.org/10.1080/02723646.1990.10642410>

Dawson, J. P., Bloomer, B. J., Winner, D. A., & Weaver, C. P. (2014). Understanding the meteorological drivers of U.S. particulate matter concentrations in a changing climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*. American Meteorological Society. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00181>.

Díaz-Robles LA, Fu JS, Vergara-Fernández A, Etcharren P, Schiappacasse LN, Reed GD, Silva MP. (2014). Health risks caused by short term exposure to ultrafine particles generated by residential wood combustion: A case study of Temuco, Chile. *Environ Int* 66: 174-181. doi: 10.1016/j.envint.2014.01.017

Dirgawati, M., Heyworth, J. S., Wheeler, A. J., McCaul, K. A., Blake, D., Boeyen, J., ... Hinwood, A. (2016). Development of Land Use Regression models for particulate matter y associated components in a low air pollutant concentration airshed. *Atmospheric Environment*, 144, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.013>.

Dolske, D. A., & Gatz, D. F. (1985). A field intercomparison of methods for the measurement of particle y gas dry deposition (Illinois). *Journal of Geophysical Research*, 90(D1), 2076-2084. <https://doi.org/10.1029/jd090id01p02076>

Dorling SR, Davies TD, Pierce CE. (1992). Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-Method and applications. *Atmos Environ Part A, Gen Top* 26(14): 2575-2581. doi: 10.1016/0960-1686(92)90110-7

EPA, Environmental Protection Agency. (1991). 40 CFR Part 81 Designations y Classifications for Initial PM-10 Nonattainment Areas Federal Register Notice; Federal Register / Vol. 56, No. 51 / Friday, March 15, 1991 / Rules y Regulations/ pag. 11101; 40 CFR Part 81 [AD-FRL-3913] <https://www3.epa.gov/airquality/greenbook/frn/5611101.pdf>

EPA, Environmental Protection Agency. (2005). 40 CFR Part 81 Air Quality Designations y Classifications for the Fine Particles (PM2.5) National Ambient Air Quality Standards; Final Rule; Part II; Federal Register / Vol. 70, No. 3 / Wednesday, January 5, 2005 / Rules y Regulations; 40 CFR Part 81 [OAR-2003-0061; FRL-7856-1] RIN-2060-AM04 <https://www.govinfo.gov/link/fr/70/944>

Errigo, Isabella M., Benjamin W. Abbott, Daniel L. Mendoza, Logan Mitchell, Sayedeh S. Sayedi, Jeffrey Glenn, Kerry E. Kelly, John D. Beard, Samuel Bratsman, Thom Carter, Robert A. Chaney, Andrew Follett, Andrew Freeman, Rebecca J. Frei, Mitchell Greenhalgh, Heather A. Holmes, Peter D. Howe, James D. Johnston, Leslie Lange, Randal Martin, Audrey Stacey, Trang Tran, and Derrek Wilson. (2020). "Human Health and Economic Costs of Air Pollution in Utah: An Expert Assessment" *Atmosphere* 11, no. 11: 1238. <https://doi.org/10.3390/atmos11111238>

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2).

<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Figueruelo, J., y Marino, M. (2004). Química física del ambiente y de los procesos medioambientales. Igarss 2014 (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Fiore AM, Naik V, Leibensperger EM. (2015). Air quality y climate connections. *J Air Waste Manag Assoc* 65(6): 645-685. doi: 10.1080/10962247.2015.1040526

García, G. A., Arias, M. A., Ruiz, C. H., Montero, C. V., y Contreras, R. S. (2010). Patrones de crecimiento urbano en la Patagonia chilena: El caso de la ciudad de Coyhaique. *Revista de Geografía Norte Grande*, (46), 85-104. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022010000200005>

Garreaud, R. D. (2000). Intraseasonal variability of moisture and rainfall over the South American Altiplano. *Monthly Weather Review*, 128(9), 3337-3346. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<3337:IVOMAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<3337:IVOMAR>2.0.CO;2)

Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>

Garreaud R, Lopez P, Minvielle M, Rojas M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *J Clim* 26(1): 215-230. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00001.1

Garreaud RD. (2018). Record-breaking climate anomalies lead to severe drought y environmental disruption in western Patagonia in 2016. *Clim Res* 74(3): 217-229. doi: 10.3354/cr01505

Garreaud, René D. (2019). análisis Incendios en Aysén; Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia http://dgf.uchile.cl/rene/DIV/Incendio_aysen_Feb2019.pdf

Garreaud R y Rutllant (Nov. 2002). Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago. Capítulo , Episodios críticos de Contaminación atmosférica en Santiago. Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA.

Guerrero, F., Yáñez, K., Vidal, V., & Cereceda-Balic, F. (2019). Effects of wood moisture on emission factors for PM2.5, particle numbers y particulate-phase PAHs from Eucalyptus globulus combustion using a controlled combustion chamber for emissions. *Science of the Total Environment*, 648, 737-744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.057>

Gore Aysén, Gobierno Regional de Aysén. (2009). Estrategia Regional de Desarrollo de Aysén. Documento. https://www.goreaysen.cl/controls/neochannels/neo_ch112/neoch112.aspx

Greene JS, Kalkstein LS, Ye H, Smoyer K. (1999). Relationships between synoptic climatology y atmospheric pollution at 4 US cities. *Theor Appl Climatol* 62(3-4): 163-174. doi: 10.1007/s007040050081

Grimm Hans, Eatough Delbert J. (2009). Aerosol Measurement: The Use of Optical Light Scattering for the Determination of Particulate Size Distribution, y Particulate Mass, Inclu-

ding the Semi-Volatile Fraction. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 59(1): 101-107. doi: 10.3155/1047-3289.59.1.101.

url: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3155/1047-3289.59.1.101>

Grimm. (2010). *Mobile Dust Monitor ENVIRON CHECK 180 User's Guide*; Grimm: München, Germany. web: <https://www.grimm-aerosol.com/>

Hanne, Maria Angeles. (2016). *Cumplimiento de Norma de Calidad del Aire por MP_{2,5}, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Coyhaique. Informe técnico: Superintendencia del Medio Ambiente, Gobierno de Chile*

web: http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/bc1_Folio_1_al_20.pdf

Hakim, Z. Q., Beig, G., Reka, S., Romshoo, S. A., & Rashid, I. (2018). Winter Burst of Pristine Kashmir Valley Air. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20601-z>

Heintzenberg Iost, Raes Frank, Schwartz Stephen E.. 2002, (2002) *Libro: Atmospheric Chemistry in a Changing World, Chapter 4, Tropospheric Aerosols*, p 124. Editorial Springer. Editores Brasseur et al., ISBN: 9783642623967

Holzworth GC. (1967). Mixing Depths, Wind Speeds y Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States. *J Appl Meteorol* 6(6): 1039-1044. doi: 10.1175/1520-0450(1967)006<1039:mdwsaa>2.0.co;2

Horton, D. E., Harshvardhan, & Duffenbaugh, N. S. (2012). Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044034>

Horton, D. E., Skinner, C. B., Singh, D., & Duffenbaugh, N. S. (2014). Occurrence y persistence of future atmospheric stagnation events. *Nature Climate Change*, 4(8), 698-703. <https://doi.org/10.1038/nclimate2272>

Hoskins, B. J., y James, I. N. (2013). *Fluid Dynamics of the Midlatitude Atmosphere. Fluid Dynamics of the Midlatitude Atmosphere* (pp. 1-408). wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118526002>

Hou P, Wu S. (2016). Long-term Changes in Extreme Air Pollution Meteorology y the Implications for Air Quality. *Sci Rep* 6(1): 23792. MACMILLAN BUILDING, 4 CRINAN ST, LONDON N1 9XW, ENGLAND: NATURE PUBLISHING GROUP. doi: 10.1038/srep23792

Huang, X., Ding, A., Liu, L., Liu, Q., Ding, K., Niu, X., Nie, W., Xu, Z., Chi, X., Wang, M., Sun, J., Guo, W., y Fu, (2016): Effects of aerosol' radiation interaction on precipitation during biomass-burning season in East China, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 10063-10082, <https://doi.org/10.5194/acp-16-10063-2016> .

Huang, Q., Cai, X., Wang, J., Song, Y., & Zhu, T. (2018). Climatological study of the Boundary-layer air Stagnation Index for China y its relationship with air pollution. *Atmospheric Chemistry y Physics*, 18(10), 7573-7593. <https://doi.org/10.5194/acp-18-7573-2018>

Huneus, N., Urquiza A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., Álamos, N., Amigo, C., Arrieta, D., Basoa, K., Billi, M., Blanco, G., Boisier, J.P., Calvo, R., Casielles, I., Castro, M., Chahuán, J., Christie, D., Cordero, L., Correa, V., Cortés, J., Fleming, Z., Gajardo, N., Gallardo, L., Gómez, L., Insunza, X., Iriarte, P., Labraña, J., Lambert, F., Muñoz, A., Opazo, M., O’Ryan, R., Osses, A., Plass, M., Rivas, M., Salinas, S., Santander, S., Seguel, R., Smith, P., Tolvett, S (2020). El aire que respiramos: pasado, presente y futuro - Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009), 102 pp. Disponible en www.cr2.cl/contaminacion/

Jacob DJ, Winner DA. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmos Environ* 43(1): 51-63. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Donahue, N. M., Prevot, A. S. H., Zhang, Q., Kroll, J. H.,... Worsnop, D. R. (2009). Evolution of organic aerosols in the atmosphere. *Science*, 326(5959), 1525-1529. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc* 77(3): 437-471. American Meteorological Society . doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Kerr, G. H., & Waugh, D. W. (2018). Connections between summer air pollution y stagnation. *Environmental Research Letters*, 13(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad2e2>

Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J., and Schöpp, W. (2017): Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8681-8723, <https://doi.org/10.5194/acp-17-8681-2017>

Kodros, J. K., Volckens, J., Jathar, S. H., & Pierce, J. R. (2018). Ambient particulate matter size distributions drive regional y global variability in particle deposition in the respiratory tract. *GeoHealth*, 2, 298-312. <https://doi.org/10.1029/2018GH000145>

Kroll, J. H., & Seinfeld, J. H. (2008, May). Chemistry of secondary organic aerosol: Formation y evolution of low-volatility organics in the atmosphere. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.003>

Leibensperger, E. M., Mickley, L. J., y Jacob, D. J. (2008). Sensitivity of US air quality to mid-latitude cyclone frequency y implications of 1980-2006 climate change, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7075-7086, <https://doi.org/10.5194/acp-8-7075-2008>

Li, Q. (2005). North American pollution outflow y the trapping of convectively lifted pollution by upper-level anticyclone. *Journal of Geophysical Research*, 110(D10). doi:10.1029/2004jd005039

Li, L., Qian, J., Ou, C. Q., Zhou, Y. X., Guo, C., & Guo, Y. (2014). Spatial y temporal analysis of Air Pollution Index y its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011. *Environmental Pollution*, 190, 75-81.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.03.020>

Li R, Wang Z, Cui L, Fu H, Zhang L, Kong L, Chen W, Chen J. (2019). Air pollution characteristics in China during 2015-2016: Spatiotemporal variations and key meteorological factors. *Sci Total Environ* 648: 902-915. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.181

Li, Y. R., Xiao, C. C., Li, J., Tang, J., Geng, X. Y., Cui, L. J., & Zhai, J. X. (2018). Association between air pollution y upper respiratory tract infection in hospital outpatients aged 0-14 years in Hefei, China: a time series study. *Public Health*, 156, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.12.006>

Liu M, Bi J, Ma Z. (2017). Visibility-Based PM_{2.5} Concentrations in China: 1957-1964 y 1973-2014. *Environ Sci Technol* 51(22): 13161-13169. American Chemical Society. doi: 10.1021/acs.est.7b03468

Lu, W., y S. Zhong (2014), A numerical study of a persistent cold air pool episode in the Salt Lake Valley, Utah, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1733-1752, doi:10.1002/2013JD020410

Neira, M., & Prüss-Ustün, A. (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease. *Toxicology Letters*, 259, S1. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.07.028>

Macias ES, Husar RB. (1976). Atmospheric particulate mass measurement with beta attenuation mass monitor. *Environ Sci Technol* 10(9): 904-907. American Chemical Society. doi: 10.1021/es60120a015

Mazzeo A, Huneeus N, Ordoñez C, Orfanoz-Cheuquelaf A, Menut L, Mailler S, Valari M, Denier van der Gon H, Gallardo L, Muñoz R, et al. (2018). Impact of residential combustion and transport emissions on air pollution in Santiago during winter. *Atmos Environ* 190: 195-208. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.06.043

Mallet M, Dulac F, Formenti P, Nabat P, Sciare J, Roberts G, Pelon J, Ancellet G, Tanré D, Parol F, et al. 2016. Overview of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment/Aerosol Direct Radiative Forcing on the Mediterranean Climate (ChArMEx/ADRIMED) summer 2013 campaign. *Atmos Chem Phys* 16(2): 455-504. doi: 10.5194/acp-16-455-2016

Mariraj Mohan, S. (2016, January 1). An overview of particulate dry deposition: measuring methods, deposition velocity y controlling factors. *International Journal of Environmental Science y Technology*. Center for Environmental y Energy Research y Studies. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0898-7>

Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, et al. 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels y related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to. Ipcc - Sr15*. Available at a <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> .

Myung, I. J. (2003). Tutorial on maximum likelihood estimation. *Journal of Mathematical*

Psychology, 47(1), 90-100. [https://doi.org/10.1016/S0022-2496\(02\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2496(02)00028-7)

MMA (2018). Plan de Descontaminación de Coyhaique MP_{2,5}. Coyhaique.

MMA, Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Episodios de Emergencia en Coyhaique disminuyen en un 38 % respecto del año anterior. Información web <https://mma.gob.cl/episodios-de-emergencia-en-coyhaique-disminuyen-en-un-38-respecto-del-ano-anterior/> Publicado el 4 octubre, 2019

Molina C, Toro A R, Morales S RG., Manzano C, Leiva-Guzmán MA. (2017). Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards. *Air Qual Atmos Heal* 10(5): 653-667. doi: 10.1007/s11869-017-0459-y

MORI, Market Opinion Research International. (2015). Estudio de Caracterización de artefactos de calefacción residencial para Coyhaique. Estudio realizado para el MMA

Neira, M., & Prüss-Ustün, A. (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease. *Toxicology Letters*, 259, S1. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.07.028>

Oanh, N. T. K. (2012). Integrated air quality management: Asian case studies. *Integrated Air Quality Management: Asian Case Studies* (pp. 1-395). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12235>

O’Kane TJ, Matear RJ, Chamberlain MA, Oliver ECJ, Holbrook NJ. (2014). Storm tracks in the Southern Hemisphere subtropical oceans. *J Geophys Res C Ocean* 119(9): 6078-6100. doi: 10.1002/2014JC009990

OMS. Organización Mundial de La Salud (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Organización Mundial de La Salud, 25. Retrieved from http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/

OMS (2021); WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Osses, M, Nicolás Alamos, Kevin Basoa, Juan Pablo Boisier, Rubén Calvo, Nicolás Hueneus, Luis Gómez, Raúl O’Ryan y Sebastián Tolvett (2021). Sección 1: Principales fuentes de emisión en Chile. Libro *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro - Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², (ANID/FONDAP/15110009), 102 pp. Disponible en <http://www.cr2.cl/contaminacion/> (Capítulo de Libro)

Pasch, A. N., MacDonald, C. P., Gilliam, R. C., Knoderer, C. A., & Roberts, P. T. (2011). Meteorological characteristics associated with PM_{2.5} air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7026-7035. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.065>

Pendergrass DC, Shen L, Jacob DJ, Mickley LJ.(2019). Predicting the Impact of Climate Change on Severe Wintertime Particulate Pollution Events in Beijing Using Extreme Value Theory. *Geophys Res Lett* 46(3): 1824-1830. doi: 10.1029/2018GL080102

Petroff, A., & Zhang, L. (2010). Development y validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models. *Geoscientific Model Development*, 3(2), 753-769. <https://doi.org/10.5194/gmd-3-753-2010>

Pozo D, Marín JC, Raga GB, Arévalo J, Baumgardner D, Córdova AM, Mora J. (2019). Synoptic y local circulations associated with events of high particulate pollution in Valparaiso, Chile. *Atmos Environ* 196(October 2018): 164-178. Elsevier. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.10.006

Qu, W., Wang, J., Zhang, X., Wang, Y., Gao, S., Zhao, C., ... Huang, F. (2018). Effect of weakened diurnal evolution of atmospheric boundary layer to air pollution over eastern China associated to aerosol, cloud - ABL feedback. *Atmospheric Environment*, 185, 168-179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.014>

Renwick, J. A., & Revell, M. J. (1999). Blocking over the South Pacific and Rossby wave propagation. *Monthly Weather Review*, 127(10), 2233-2247. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2233:BOTSPA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2233:BOTSPA>2.0.CO;2)

Rijala H.B., Yoshidab H, N, Umemiya; (2010). Seasonal and regional differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular houses; *Building and Environment*; Volume 45, Issue 12, December 2010, Pages 2743-2753; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.002>

Ruiz PA, Toro C, Cáceres J, López G, Oyola P, Koutrakis P. (2010). Effect of gas y kerosene space heaters on indoor air quality: A study I n homes of Santiago, Chile. *J Air Waste Manag Assoc* 60(1): 98-108. doi: 10.3155/1047-3289.60.1.98

Rutllant, J., & Garreaud, R. (1995). Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: Towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34(3), 223-244. <https://doi.org/10.1007/BF00554796>

Sergio Sáez, Roger Walther, Georg Welzel, Pamela Cárdenas, Andreas Meyer Primavesi. (2015). Asesoría para el Análisis del Mercado de Leña y establecimiento de un Modelo de Negocios para un Centro de Acopio y Secado de Leña en la ciudad de Coyhaique. Informe Final. Ministerio de Energía. Consultor EBP.

<https://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/544/22>.

%20Modelo %20de %20Negocios %20para %20un %20Centro %20de %20Acopio %20y %20Secado %20de %20Lena %20en %20 %20Coyhaique.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Saide PE, Mena-Carrasco M, Tolvett S, Hernandez P, Carmichael GR. (2016). Air quality forecasting for winter-time PM2.5 episodes occurring in multiple cities in central y southern Chile. *J Geophys Res* 121(1): 558-575. doi: 10.1002/2015JD023949

Saukko, E., Lambe, A. T., Massoli, P., Koop, T., Wright, J. P., Croasdale, D. R., ...

Virtanen, A. (2012). Humidity-dependent phase state of SOA particles from biogenic y anthropogenic precursors. *Atmospheric Chemistry y Physics*, 12(16), 7517-7529. <https://doi.org/10.5194/acp-12-7517-2012>

Schueftan A, Sommerhoff J, González AD. (2016). Firewood demand y energy policy in south-central Chile. *Energy Sustain Dev* 33: 26-35. doi: 10.1016/j.esd.2016.04.004

Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., Cowl, C. T., De Matteis, S., Jung, S. H., Mortimer, K., ... Wuebbles, D. J. (2019, February 1). Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies? Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. *Chest*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042>

Seinfeld JH, Pandis S. (1998). *Atmospheric Chemistry y Physics: From Air Pollution to Climate Change. Environment: Science y Policy for Sustainable Development. (Vol. 40)*. doi: 10.1080/00139157.1999.10544295

Shahgedanova M, Burt TP, Davies TD. (1998). Synoptic climatology of air pollution in Moscow. *Theor Appl Climatol* 61(1-2): 85-102. doi: 10.1007/s007040050054

Shindell DT, Faluvegi G, Rotstayn L, Milly G. (2015). Spatial patterns of radiative forcing y surface temperature response. *J Geophys Res Atmos* 120(11): 5385-5403. doi: 10.1002/2014JD022752

Shiraiwa, M., & Seinfeld, J. H. (2012). Equilibration timescale of atmospheric secondary organic aerosol partitioning. *Geophysical Research Letters*, 39(24). <https://doi.org/10.1029/2012GL054008>

Silva J, Rodriguez M, Carrasco I, Meyes M, Manríquez N. (2017). Actualización de Inventario de Emisiones para la Zona Saturada de Coyhaique. Coyhaique. Available at http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2017/proyectos/Folio_155_a_164.pdf

Silva RA, West JJ, Lamarque JF, Shindell DT, Collins WJ, Faluvegi G, Folberth GA, Horowitz LW, Nagashima T, Naik V, et al. 2017. Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change. *Nat Clim Chang* 7(9): 647-651. doi: 10.1038/nclimate3354

Sinha J, Kumar N. (2019). Mortality and Air Pollution Effects of Air Quality Interventions in Delhi and Beijing. *Front Environ Sci*7. doi: 10.3389/fenvs.2019.00015

Singh A, Bloss WJ, Pope FD. (2017). 60 years of UK visibility measurements: impact of meteorology y atmospheric pollutants on visibility. *Atmos Chem Phys* 17(3): 2085-2101. Copernicus Publications. doi: 10.5194/acp-17-2085-2017

Squizzato, S., Masiol, M., Agostini, C., Visin, F., Formenton, G., Harrison, R. M., & Rampazzo, G. (2016). Factors, origin y sources affecting PM1 concentrations y composition at an urban background site. *Atmospheric Research*, 180, 262-273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.002>

Stocker Thomas F., Qin Dahe, Plattner GK, Tignor MMB, Allen Simon K., Boschung

Judith, Nauels Alexander, Xia Yu, Bex Vincent, Midgley Pauline M. (2013). Climate change (2013) the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker T.F., Qin D., Plattner G-K, Tignor M, Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., editors. Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781107415324

Stull RB. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. An introduction to boundary layer meteorology. doi: 10.1007/978-94-009-3027-8

Tai, A. P. K., Mickley, L. J., & Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) y meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3976-3984. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>

Tai, A. P. K., Mickley, L. J., Jacob, D. J., Leibensperger, E. M., Zhang, L., Fisher, J. A., & Pye, H. O. T. (2012). Meteorological modes of variability for fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality in the United States: Implications for PM_{2.5} sensitivity to climate change. *Atmospheric Chemistry y Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3131-2012>

Tejeda, Adalberto (2018). LA HUMEDAD EN LA ATMÓSFERA Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. Universidad de Colima. ISBN: 978-607-8549-50-4. descarga pdf

Tie, X., Zhang, Q., He, H., Cao, J., Han, S., Gao, Y., Jia, X. C. (2015). A budget analysis of the formation of haze in Beijing. *Atmospheric Environment*, 100, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.038>

Toro A R, Campos C, Molina C, Morales S RGE, Leiva-Guzmán MA. (2015). Accuracy y reliability of Chile's National Air Quality Information System for measuring particulate matter: Beta attenuation monitoring issue. *Environ Int* 82: 101-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.02.009>

Toro A R, Kvakic M, Klai ZB, Kora in D, Morales S RGE, Leiva G MA. (2019). Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environ Pollut* 244: 705-714. doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.067

Triantafyllou AG. (2001). PM₁₀ pollution episodes as a function of synoptic climatology in a mountainous industrial area. *Environ Pollut* 112(3): 491-500. doi: 10.1016/S0269-7491(00)00131-7

Trivelli P. (2016). ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DE PRECIOS DE ARRIENDO RESIDENCIAL PARA LAS CAPITALES REGIONALES. Gran Concepción. Coyhaique. Available at http://www.minvu.cl/opensite_20070411164455.aspx

UNTEC, F. para la T. T. (2015). Informe Final Ciudad de Coyhaique Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo eventos de contaminación atmosférica en la ciudad de Coyhaique en la región de Aysén y propuesta de diseño de red de monitoreo para el seguimiento y potencial (p. 56).

Ulriksen P, Aceituno P, Fuenzalida H, Rutllant J, Santibañez F. 1979. Caracterización Climática. In: *Perspectiva de Desarrollo de Los Recursos de La Región Aisén Del General Carlos Ibañez Del Campo*. Coyhaique. p. 94.

Viale M, Garreaud R. (2015). Orographic effects of the subtropical y extratropical andes on upwind precipitating clouds. *J Geophys Res* 120(10): 4962-4974. John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/2014JD023014

Vicente ED, Alves CA. (2018). An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmos Res* 199: 159-185. Elsevier. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.08.027

Villalobos AM, Barraza F, Jorquera H, Schauer JJ. (2017). Wood burning pollution in southern Chile: PM_{2.5} source apportionment using CMB y molecular markers. *Environ Pollut* 225: 514-523. doi: 10.1016/j.envpol.2017.02.069

Virtanen, A., Joutsensaari, J., Koop, T., Kannosto, J., Yli-Pirilä, P., Leskinen, J., ... Laaksonen, A. (2010). An amorphous solid state of biogenic secondary organic aerosol particles. *Nature*, 467(7317), 824-827. <https://doi.org/10.1038/nature09455>

Wang, J. X. L., & Angell, J. K. (1999). Air Stagnation Climatology for the United States. NOAA Technical Report, (1) <https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/atlas.pdf> .

Wang, Y., Khalizov, A., Levy, M., & Zhang, R. (2013, December). New Directions: Light absorbing aerosols y their atmospheric impacts. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.034>

Wang H, Xu J, Zhang M, Yang Y, Shen X, Wang Y, Chen D, Guo J. (2014). A study of the meteorological causes of a prolonged y severe haze episode in January 2013 over central-eastern China. *Atmos Environ* 98: 146-157. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.053

Wang HJ, Chen HP. (2016). Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: Roles of climate change. *Atmos Chem Phys* 16(6): 4205-4211. doi: 10.5194/acp-16-4205-2016

Wang X, Dickinson RRE, Su L, Zhou C, Wang K. (2018). PM_{2.5} pollution in China and how it has been exacerbated by terrain and meteorological conditions. *Bull Am Meteorol Soc* 99(1): 105-120. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0301.1

Watson, J. G., Chow, J. C., Lowenthal, D. H., Stolzenburg, M. R., Kreisberg, N. M., & Hering, S. V. (2002). Particle size relationships at the Fresno Supersite. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 52(7), 822-827. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470817>

Wei P, Cheng S, Li J, Su F. (2011). Impact of boundary-layer anticyclonic weather system on regional air quality. *Atmos Environ* 45(14): 2453-2463. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.045

Wesely, M. L., & Hicks, B. B. (2000). A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2261-2282. <https://doi.org/10.1016/S1352->

2310(99)00467-7

Westervelt DM, Conley AJ, Fiore AM, Lamarque JF, Shindell DT, Previdi M, Mascioli NR, Faluvegi G, Correa G, Horowitz LW. 2018. Connecting regional aerosol emissions reductions to local y remote precipitation responses. *Atmos Chem Phys* 18(16): 12461-12475. doi: 10.5194/acp-18-12461-2018

Whiteman, C. D., Hoch, S. W., Horel, J. D., & Charland, A. (2014). Relationship between particulate air pollution y meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. *Atmospheric Environment*, 94, 742-753. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.012>

WHO, World Health Organization. (2005). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide y sulfur dioxide, Global update 2005, Summary of risk assessment. doi: 10.1016/0004-6981(88)90109-6. <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>

WHO, World Health Organisation. (2013). Copenhagen, Denmark. Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP , http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf

WHO b, World Health Organization. (2016). Health risk assessment of air pollution - general principles. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2016. World Health Organization. Europe, Regional Office for. doi: 10.15171/EHEMJ.2016.06

WHO, World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. ISBN 9789241511353

WHO b, World Health Organization. (2019). Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. World Health Organization. Europe, Regional Office for. doi: <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.18.224295>

Wilcox, E. M., Thomas, R. M., Praveen, P. S., Pistone, K., Bender, F. A. M., & Ramathan, V. (2016). Black carbon solar absorption suppresses turbulence in the atmospheric boundary layer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(42), 11794-11799. <https://doi.org/10.1073/pnas.1525746113>

Xing, J., Wang, J., Mathur, R., Pleim, J., Wang, S., Hogrefe, C., ... Hao, J. (2016). Unexpected Benefits of Reducing Aerosol Cooling Effects. *Environmental Science y Technology*, 50(14), 7527-7534. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00767>

Xue D, Liu Q. (2014). Relationship between air pollutants y visibility in Shanghai during 2006-2010. *Appl Mech Mater* 675-677(2): 314-317. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.675-677.314

Yang, Q., Yuan, Q., Li, T., Shen, H., & Zhang, L. (2017). The relationships between PM2.5 y meteorological factors in China: Seasonal y regional variations. *International Journal of Environmental Research y Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121510>

Zhang, L., Brook, J. R., & Vet, R. (2003). A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmospheric Chemistry y Physics*, 3(6), 2067-2082. <https://doi.org/10.5194/acp-3-2067-2003>

Zhang R, Wang G, Guo S, Zamora ML, Ying Q, Lin Y, Wang W, Hu M, Wang Y. (2015). Formation of Urban Fine Particulate Matter. *Chem Rev* 115(10): 3803-3855. doi: 10.1021/acs.chemrev.5b00067

Zhang, S. P., Han, L. J., Zhou, W. Q., & Zheng, X. X. (2016). Relationships between fine particulate matter (PM_{2.5}) y meteorological factors in winter at typical Chinese. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, 36(24), 7897-7907. <https://doi.org/10.5846/stxb201505020901>

Zhang, Z., Hoek, G., Chang, L. yun, Chan, T. C., Guo, C., Chuang, Y. C., ... Lao, X. Q. (2018). Particulate matter air pollution, physical activity y systemic inflammation in Taiwanese adults. *International Journal of Hygiene y Environmental Health*, 221(1), 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.10.001>

Zhao S, Yu Y, Yin D, Qin D, He J, Li J, Dong L. (2018). Two winter PM_{2.5} pollution types and the causes in the city clusters of Sichuan Basin, Western China. *Sci Total Environ* 636: 1228-1240. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.393

Zhu, J., Liao, H., & Li, J. (2012). Increases in aerosol concentrations over eastern China due to the decadal-scale weakening of the East Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 39(9). <https://doi.org/10.1029/2012GL051428>

Capítulo 10

Anexos

10.1. Demografía y actividad económica de la ciudad de Coyhaique

Coyhaique fue fundada en 1929 con el nombre de Baquedano (Araya, 2011). El municipio se crea en 1948 y en 1974 se la designa como capital de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (Decreto Ley N° 1.230 de 1975, <http://bcn.cl/1vklo>). Cuenta con una población residente de 57.818 habitantes, lo que representa 56 % de la población total de la región (INE 2017). La superficie urbana actualmente construida se estima en 8km^2 (estimación propia basada en una imagen satelital). Desde la década de los ochenta y noventa ha experimentado un rápido proceso de urbanización (García et al., 2010), el que se ve reflejado en el incremento en número y densidad de su población, a tasas mayores que el resto de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (Región XI), como se ilustra en la Tabla 10.1 y discute (Trivelli, 2016). En la Figura 10.1 es posible interpretar el crecimiento urbano (en cuanto a superficie y densidad) entre los años 1984 y 2016.

Tabla 10.1: Crecimiento urbano de la Ciudad de Coyhaique (período 1948-2002): (fuente: García et al., 2010), superficie estimación propia, población fuente: INE <http://www.ine.cl/>

Año	Superficie urbana km^2	Población hab	Densidad hab/km^2	Población Regional hab	Urbano %
1948	1,468	8000	5450	26262	30,5
1984	4,682	29163	6229	66361	43,9
2002	5,819	50041	7731	91492	49,2
2018	8,022	56291	7717	98427	57,2

El número de individuos por hogar ha presentado una disminución progresiva desde 1982, pasó de 4,4 personas por hogar en 1982 a 2,6 en 2018 (Ver Tabla 10.2). La distribución de densidad habitacional en Coyhaique no es homogénea y varía según el período histórico de construcción. De esta manera, en el casco antiguo de la ciudad (zona centro) existen terrenos de 600 a 800 m² con densidades que fluctúan entre 1 a 50 viviendas por cuadra. En cambio, en



Figura 10.1: Ciudad de Coyhaique año 1984 año 2016 Fuente: imagen procesada a partir de NASA Programa Lysat, Lysat 4 (1984-1993), Lysat 5 TM (1984-2012), Lysat 8 OLI (2013-2016), de U.S. Geological Survey, Sioux Falls. (Farr et al. 2007).

la zona alta de la ciudad (periferia al sur y este), se observan densidades entre los 26 a sobre 100 viviendas por cuadra. Esta alta densidad se debe a las políticas estatales de viviendas sociales en las últimas décadas y a la construcción en los patios de las mismas casas (*García et al., 2010*).

Tabla 10.2: Crecimiento urbano de la Ciudad de Coyhaique (período 1948-2002): (fuente: *García et al., 2010*), superficie estimación propia, población fuente: INE <http://www.ine.cl/>

Año	Número de viviendas número	Tamaño medio de hogares hab/casa
1982	6974	4,4
1992	8735	3,9
2002	13234	3,6
2012	18633	3,3
2016	23670	2,6

De acuerdo con datos del Banco Central en 2015 ¹, el nivel de industrialización de Coyhaique es bajo y está conformado principalmente por micro y pequeñas empresas (Las principales actividades económicas son comercio con 1.446 empresas, seguida por la construcción (536 empresas), ganadería, caza y silvicultura (465 empresas). En cuanto al número de trabajadores por actividad económica, la construcción es el que genera mayor empleo (3.603 trabajadores), le siguen las actividades inmobiliarias y de alquiler (3.089 trabajadores) y el comercio (2.612 trabajadores). Cabe destacar que la actividad asociada a la leña constituye un importante sector económico para Coyhaique y otras ciudades del centro y sur de Chile, donde prevalecen condiciones de pobreza energética (*Billi et al., 2018*).

¹(<https://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/Coihaique>)

10.2. Marco jurídico y administrativo de la zona de estudio

Tanto el Gobierno Local (Municipio y Gobierno Regional) como algunas SEREMIS (Medio Ambiente, Salud, Vivienda, Energía, etc.) tienen competencias ambientales directas en el manejo y gestión de la calidad del aire. En el Plan de Descontaminación Ambiental, la SEREMI de Medio Ambiente coordina una mesa de seguimiento abocada a abordar los procesos de descontaminación de la ciudad, siendo la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) el ente fiscalizador.

Normativa de calidad del aire en Chile Las normativas de calidad del aire en Chile nacen de las garantías constitucionales establecidas en los artículos N°8 y N°19 de la Constitución Política de la República de Chile, como el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación y el derecho a la vida y la integridad física de las personas (<http://bcn.cl/1uva9>). En lo particular, el objetivo de la norma primaria de calidad ambiental para MP_{2,5} es proteger la salud de la población de los efectos agudos y crónicos de dicho contaminante, con un nivel de riesgo aceptable (Artículo N° 1 D.S N° 12/2011 del MMA de La República de Chile, <http://bcn.cl/1uyym>).

Esta norma establece, entre otros, los niveles de superación de la norma (anual y de 24 horas) y los niveles de situación de emergencia (Ver Tabla 10.3) para promedios de 24 horas. De acuerdo a la norma, los límites que determinan las situaciones de emergencia ambiental consideran un aumento relativo de la mortalidad diaria respecto del valor de la norma de un 3 % para situaciones de alerta, de un 6 % para situaciones de preemergencia y de un 12 % para emergencia (<http://bcn.cl/1uyym>).

Tabla 10.3: Niveles diarios promedio que originan situación de emergencia ambiental por MP_{2,5} (fuente: <http://bcn.cl/1uyym>)

Contaminante	Nivel Superación Norma	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia	*
	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	
MP ₁₀ (1)	150 *	195-239	240-329	≥ 330	
MP _{2,5} (2)	50 *	80-109	110-169	≥ 170	

límite de la norma de calidad primaria del aire considerado como valor bueno

De acuerdo con el artículo 5 de la Norma de MP_{2,5}, las concentraciones pueden ser obtenidas utilizando un pronóstico de la calidad del aire o de la constatación de la concentración de MP_{2,5} en las estaciones de calidad del aire calificadas como “Estación de Monitoreo con Representatividad de Población” (EMRP). Los datos deben ser reportados de acuerdo con lo establecido en el “Reglamento de Estaciones de Contaminantes Atmosféricos” (D.S. N°61/2008 modificado por el D.S. N°30/2009 del Ministerio de Salud, de la República de Chile). Para la medición de concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos, la norma establece que se deberán emplear instrumentos que estén incluidos en la lista de métodos denominados de referencia o equivalentes publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA).

Los Planes de Descontaminación Ambiental (PDA) en Chile están establecidos en el párrafo 6 de la Ley N° 19.300 de Bases del Medio Ambiente y sus modificaciones (<http://bcn.cl/1ux38>). Estos permiten a la autoridad ambiental coordinar acciones y tomar medidas especiales (acciones de fiscalización, restricciones ambientales, normativas ambientales locales, etc.), las que están orientadas a restituir la calidad del aire a valores ambientales seguros para la población en un plazo establecido. En noviembre de 2012, con los antecedentes técnicos establecidos por ley, se declaró Coyhaique como una zona saturada por MP respirable (MP_{10}), (D.S. N° 33/2012 del MMA, de la República de Chile). A partir de esto, en el año 2015 se aprobó el Plan de Descontaminación de Coyhaique para MP_{10} (D.S. N°46/2015 del MMA, de la República de Chile). Posteriormente, en el año 2016 la ciudad fue declarada mediante decreto supremo como zona saturada para $PM_{2.5}$ (D.S. N°15/2016 del MMA, <http://bcn.cl/208ym>). Esto último permitió dar comienzo al anteproyecto para el Plan de Descontaminación de Coyhaique y su Zona Circundante (R.E. N° 718/2017 del MMA), el cual fue aprobado y promulgado en 2019. El PDA de Coyhaique cuenta con cuatro estrategias básicas: el reacondicionamiento térmico de viviendas para disminuir la demanda energética de la población; cambios en la tecnología de calefacción por sistemas de baja emisión; mejoramiento de la calidad de la leña y educación ambiental. La meta del plan es alcanzar los estándares de calidad establecidos por la norma Chilena para MP. Esto quiere decir lograr una reducción del 77 % para la norma diaria de $MP_{2.5}$, 50 % para la norma diaria de MP_{10} y de un 38 % para la norma anual de MP_{10} . Conjuntamente el PDA cuenta con un plan operacional de gestión de episodio críticos por MP_{10} y $MP_{2.5}$ el que contempla en líneas generales, el seguimiento y pronóstico de la calidad del aire para ambos contaminantes, plan comunicacional y medidas de prevención y mitigación durante el episodio

En particular durante los días de emergencia, las medidas más significativas establecidas por el plan son: Prohibición el uso de más de un artefacto a leña por vivienda y la emisión de humos visibles de artefactos a leña durante las 24 horas, en las zonas territoriales previamente definidas. Se prohíbe el funcionamiento de calderas industriales y de calefacción existentes, con emisiones mayores o iguales a $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ de material particulado. Al cabo de 5 años desde su publicación el plan será revisado.

10.3. Filtrado de datos de material particulado

En Chile, la información ambiental recogida en estaciones de monitoreo de calidad del aire es de dominio público y se compila bajo el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA, <http://sinca.mma.gob.cl/>). Esta es la fuente principal de información que se usó en este trabajo y aquí se presenta cómo dichos datos fueron sometidos a un control de calidad y análisis estadístico para el propósito de poder identificar con ellos eventos extremos -emergencia de acuerdo con la legislación chilena (<http://bcn.cl/1uyym>)- por material particulado completamente respirable en la ciudad de Coyhaique, en la Patagonia chilena.

En las estaciones de monitoreo se miden, entre otras trazas normadas en la legislación ambiental vigente, las concentraciones de material particulado fino, es decir, de diámetro aerodinámico menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$ ($MP_{2.5}$) y grueso, es decir, de diámetro aerodinámico menor o igual a $10 \mu\text{m}$ (MP_{10}). En particular, la ciudad de Coyhaique cuenta con dos esta-

ciones: Coyhaique I (COY1, 45° 34' 48.0" S 72° 3' 40.23" O, 333 m.s.n.m.) y Coyhaique II (COY2, 45° 34' 43.82" S 72° 3' 1.22" O, 255 m.s.n.m.). Estas estaciones están equipadas con instrumentos de atenuación Beta MET-ONE 120 (<https://metone.com>) para la medición de cada una de las fracciones de material particulado de acuerdo con la descripción disponible en el sitio internet de SINCA. Cada estación cuenta con sistemas de control y aseguramiento de la calidad de la medición y de la información, tales como control de velocidad de flujo de aire, detección automática de fugas, cero instrumental, entre otros. Semanalmente se realizan verificaciones que consideran, entre otros, búsqueda de entradas nulas, duplicidad de información e identificación de datos anómalos, entre otros (Toro A. et al., 2015). La información registrada por los monitores es enviada cada una hora, de manera automática, a los servidores centrales, donde son revisados por operadores de SINCA. Dicha verificación genera tres tipos de categorías de datos:

Registros validados: corresponde aquellos datos que fueron revisados y presentan concordancia con los criterios de validación de operación de SINCA.

Registros preliminares: son la información que se encuentra en proceso de validación o que aún no ha sido validada.

Registros no validados: son los datos que habiéndose revisado no pasaron los criterios de validación, por ejemplo, valores erráticos o inexistentes por cortes de energía, valores correspondientes a calibraciones y no a mediciones, valores no representativos debido a la presencia de fuentes ocasionales, etc.

Filtrado de datos

El proceso de validación antes descrito, no obstante, no asegura plenamente la calidad de los datos provistos por SINCA. (Toro A. et al., 2015) describen problemas tanto en el procedimiento de aseguramiento de calidad, como en la calidad de los datos presentados. Entre las situaciones más relevantes se encuentran: saturación de los monitores de atenuación Beta, producto de concentraciones de MP por sobre el rango de medición; series de datos incompletos o inexactos, procedimientos de validación que no aseguran una adecuada auditoría. Por este motivo y, con el interés de realizar una descripción básica de la información, identificar problemas evidentes o ausencia en las series de datos, se realizaron pruebas de control de calidad de los datos extraídos del sitio web de SINCA, con fecha 8 de enero del 2021.

Los criterios empleados para el filtrado de datos horarios contemplaron:

Inspección visual: Se visualizan las series de tiempo de concentración horaria de material particulado (MP) disponibles en SINCA, tanto no validados, preliminares como validados, con el fin de detectar valores fuera de rango de medición del instrumento (<https://metone.com>), duplicidad y ausencia de datos por períodos de días. También se grafica la distribución de frecuencia de los datos.

Eliminación de datos no validados: Estos correspondieron a los datos marcados como no validados por los operados del SINCA

Control de límite de detección: se eliminaron los valores inferiores a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir,

registros que tenían una concentración inferior a la precisión del instrumento. Cabe mencionar que este valor de corte es superior en un $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al límite de detección del equipo utilizado. Esto se hace con el fin de contar con datos que se ubiquen en el margen seguro de operación del monitor.

Restricción física ($\text{MP}_{2,5}$ menor o igual a MP_{10}): La concentración MP_{10} es siempre mayor que la $\text{MP}_{2,5}$, ya que el $\text{MP}_{2,5}$ está contabilizado dentro la fracción MP_{10} .

El efecto de aplicar estos filtros se discute en lo que sigue.

Tabla 10.4: Resumen estadístico de datos de $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} para las estación COY1 antes y después de aplicar el filtro de datos con los tipos de datos validados (val), preliminares (pre), no validados (nva) y nueva serie (C); \bar{C} : concentración promedio.

variable	tipo	n total	Concentraciones MP $\mu\text{g}/\text{m}^3$					periodo		datos	
			\bar{C}	mediana	std	min	max	inicial	final	% p	% n
$\text{MP}_{2,5}$	val	58849	54	19	100	1	1688	13/03/01	19/12/31	98	85
$\text{MP}_{2,5}$	pre	9466	35	12	68	0	1132	13/02/28	21/02/05	14	14
$\text{MP}_{2,5}$	nva	621	16	1	86	-305	1000	13/03/01	21/02/05	1	1
$\text{MP}_{2,5}$	C	68315	52	18	96	0	1688	21/02/05	21/02/05	98	99
MP_{10}	val	59030	73	39	106	1	1830	12/11/09	19/12/31	94	85
MP_{10}	pre	9495	44	22	69	1	1019	12/11/20	21/02/05	13	14
MP_{10}	nva	897	83	10	225	-204	995	13/03/01	21/02/05	1	1
MP_{10}	C	68525	69	37	103	1	1830	21/02/05	21/02/05	95	99
MP_{10}	fil	54180	71	38	106	2	1830	13/12/01	20/12/30	87	87

10.3.1. Inspección visual

A partir de la inspección visual ilustrada en la Fig 10.2, se constata que el periodo de medición de $\text{MP}_{2,5}$ se inicia en marzo del 2013 en la estación COY1 y en septiembre del 2013 para COY2 (Ver tabla 1). Ambas estaciones se encuentran operativas a la fecha (diciembre 2021). Los registros horarios validados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) representan un 84 y un 80 % de los datos horarios posibles para las estaciones COY1 y COY2 respectivamente. Los registros preliminares corresponden a un 15 % (16 %) de los datos del período en COY1 (COY2). Los datos no válidos corresponden al 1 % (3 %) de la estación COY1 (COY2). A la fecha, y como es de esperar, la mayoría de los valores preliminares se ubican en el último año (2019) y los validados están entre el periodo 2013 y 2018 (Fig. Anexo I-1). En COY2 se observan datos faltantes en el primer semestre del año 2015, lo que equivale al 58 % de los datos posibles para ese semestre. En esta estación, existe una duplicidad de datos entre julio y agosto del 2014, los cuales fueron eliminados de la serie de datos a analizar (Fig. Anexo I-2).

La eliminación de los registros no validados reduce en un 1 % (3 %) la población de datos de COY1 (COY2). Los resultados del análisis de frecuencia muestran una distribución no normal de los registros (Fig. Anexo I-3). Los datos presentan más bien una distribución log-normal. Es decir, la mayor frecuencia se encuentra en las concentraciones más bajas y las

concentraciones altas son poco frecuentes. Por ejemplo, el 47 % de los datos se encuentra bajo los $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en COY1. Esta característica es más marcada en el $\text{MP}_{2,5}$ que en el MP_{10} .

De acuerdo con lo observado en los histogramas (Fig. Anexo I-3), la concentración de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ en COY1 presenta una mayor frecuencia que las concentraciones levemente superiores e inferiores. Esto también ocurre para el MP_{10} . Esta situación se puede vincular a que el instrumento estaba configurado en el rango de medición de 0 a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es decir, concentraciones superiores a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ saturaron el equipo, por lo que no se podía seguir registrando concentraciones superiores a este valor. En contraste, la estación COY2 no se observa este problema.

10.3.2. Eliminación de datos no validados

Al aplicar este filtro, se constata que los datos no validados de concentraciones horarias corresponden al 1 % (3 %) de los datos medidos en COY1 (COY2). Estos no fueron considerados para el análisis, siguiendo la recomendación SINCA.

10.3.3. Límite de detección

El control por límite de detección adoptado elimina un 4 % y 10 % (1 % y 4 %) de los datos preliminares y validados de la estación COY1 (COY2) (Ver Tabla Anexo I-1). Este filtro se aplica a concentraciones inferiores a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

10.3.4. Restricción física

La restricción física impone que las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ deben ser a lo más iguales a las de MP_{10} . Al aplicarla, se extrae el 6 % (3 %) de los datos horarios de la estación COY1 (COY2). La Fig. 10.5 muestra la razón entre $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} para datos sin filtrar y filtrados. En ella se ve que la eliminación de los registros, de razón superior a uno, afecta principalmente a los años 2013, 2014 y 2019.

10.3.5. Resumen

Tras aplicar los filtros antes descritos, se consiguen las series de tiempo mostradas en la Fig. Anexo I-5 y la distribución de frecuencia de valores en la Fig. Anexo I-6. La restricción física de $\text{MP}_{2,5}$, menor o igual a MP_{10} elimina principalmente altas concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$. Por este motivo, para el presente estudio, esta restricción es más significativa que las otras aplicadas. En la Tabla 2 se muestran algunos indicadores estadísticos, de los registros de $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} , antes y después de aplicar los filtros.

Después del filtrado se observa un 13 % (13 %) de ausencia de datos para el periodo entre

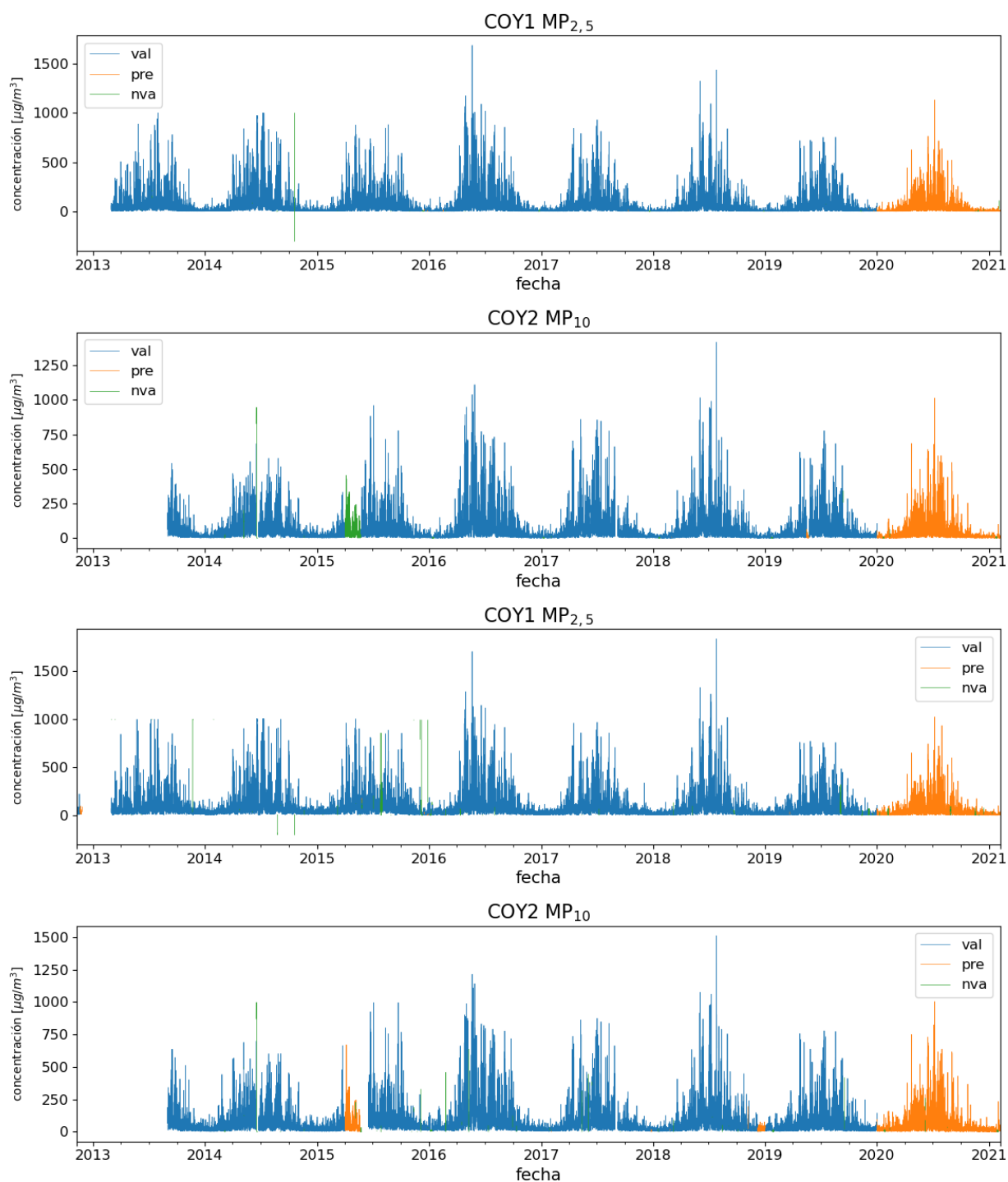


Figura 10.2: Series de tiempo descargadas sin aplicación de filtros de las concentraciones horarias de material particulado en las estaciones COY1 y COY2. $MP_{2,5}$ dos paneles superiores) y MP_{10} en los dos paneles inferiores) tras la aplicación de filtro de datos. leyenda, val: datos validados por MMA, pre: datos preliminares y nva datos no validados

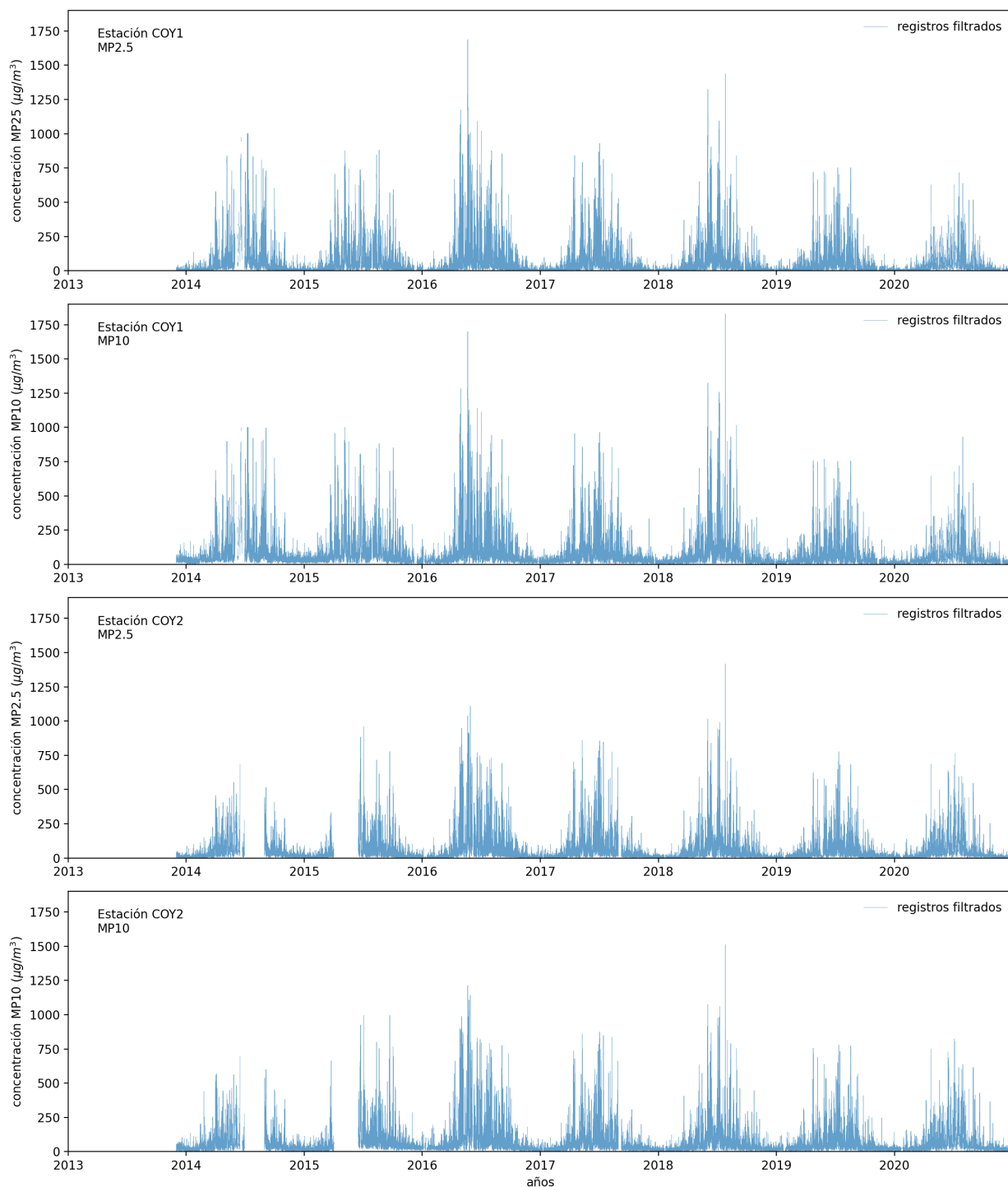


Figura 10.3: Series de tiempo con la aplicación de filtro de datos sobre las concentraciones horarias de material particulado en las estaciones COY1 y COY2. MP_{2,5} dos paneles superiores) y y MP₁₀ en los dos paneles inferiores) tras la aplicación de filtro de datos. val

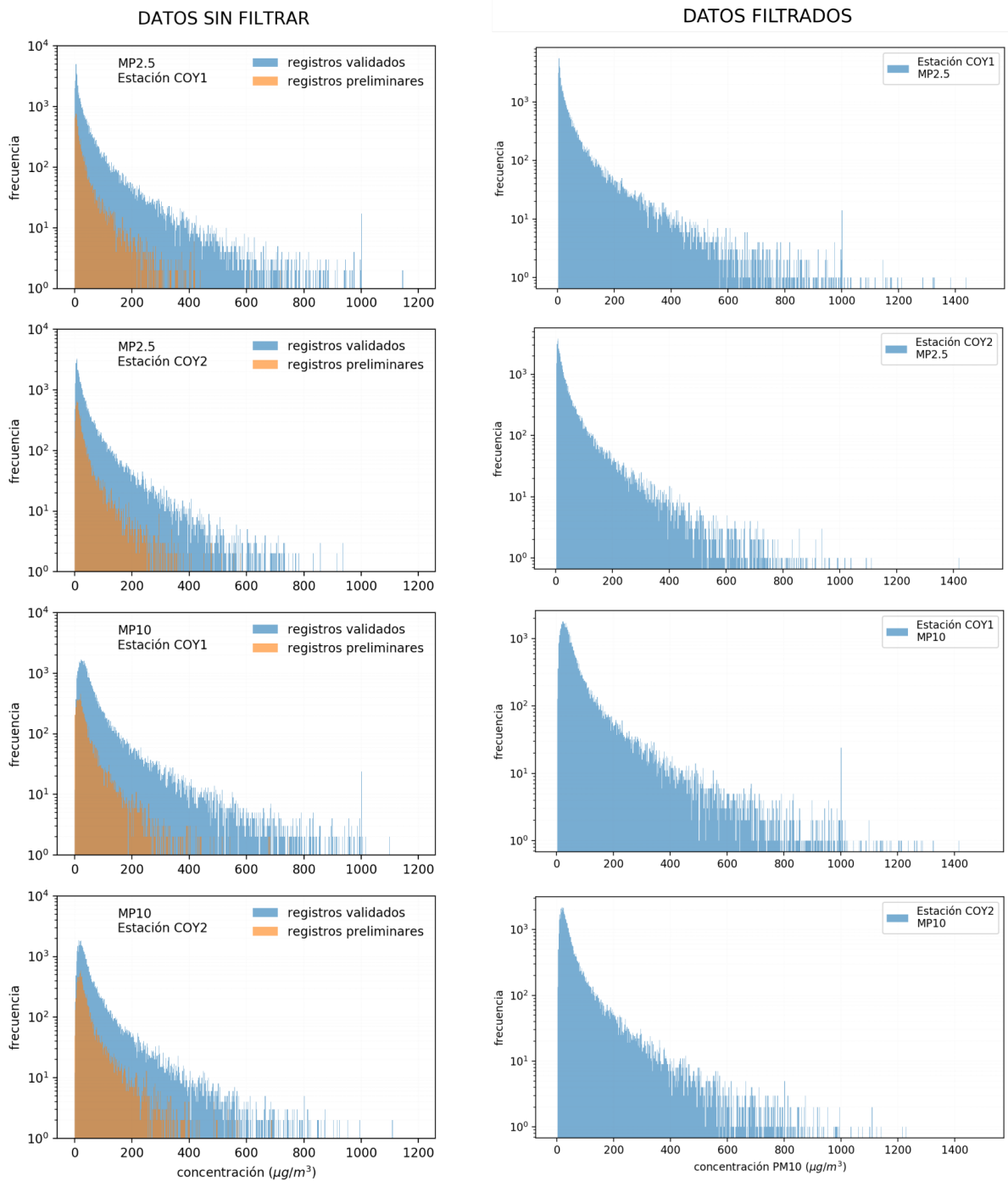


Figura 10.4: Histogramas de frecuencias para MP_{2,5} (dos filas superiores) y MP₁₀ (las dos filas inferiores). Lado izquierdo corresponde a datos sin filtrar y lado derecho tras la aplicación de filtro de datos. Período de registro marzo 2013 al diciembre 2019

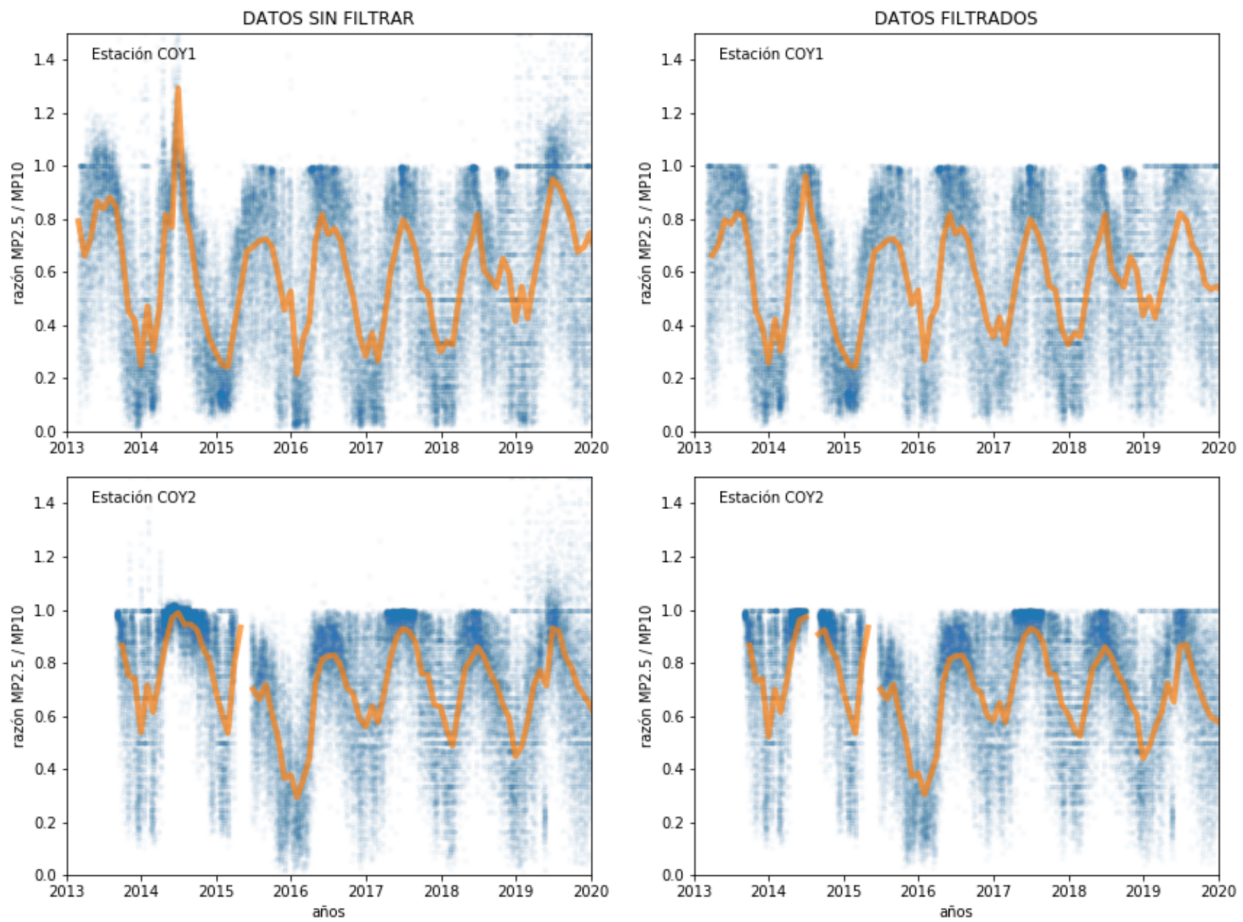


Figura 10.5: Razón entre $MP_{2,5}$ y MP_{10} en COY1 (paneles superiores) y en COY2 (paneles inferiores) para datos sin filtrar (paneles a la izquierda) y filtrados (paneles a la derecha)

marzo de 2013 y diciembre de 2019 (abril 2013 y diciembre 2019) en la estación COY1 (COY2) (Tabla Anexo I-2 y Tabla Anexo I-3). El filtrado no afecta la concentración media en COY1 disminuye en algo en COY2. Esta situación se asocia a la remoción de las concentraciones inferiores a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En términos generales, producto del filtrado no se aprecian variaciones significativas de la concentración promedio o desviación estándar de la información. Tampoco existen cambios significativos en la distribución log-normal de los datos. En términos de número de datos, COY1 es la estación que registra la mayor cantidad de registros.

Tabla 10.5: Resumen estadístico de datos de $\text{MP}_{2,5}$ para las estaciones COY1 y COY2 antes y después de aplicar el filtro de datos.

	Concentraciones $\text{MP}_{2,5}$				periodo		datos	
	máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	mínimo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	promedio $\mu\text{g}/\text{m}^3$	mediana $\mu\text{g}/\text{m}^3$	inicial aa/mm/dd	final aa/mm/dd	datos N	faltantes %
COY1								
· prefiltrado	1688	0	52	18	13/02/28	21/02/05	68315	2
filtrado	1688	2	52	18	13/12/01	20/12/30	54180	13
COY2								
prefiltrado	1418	1	50	21	13/09/01	21/02/05	62310	4
filtrado	1418	2	49	21	13/12/01	20/12/31	54212	13

10.4. Tablas variables meteorológicas medidas en la red SINCA

Tabla 10.6: Variables meteorológicas, instrumentos y períodos de medición en la estación de calidad de aire en Coyhaique COY1, fuente:
<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/XI>.

Variable meteorológica	frecuencia almacenamiento	alturamedición	Método de medición	rango operación **	Equipo sensor	/	Período de funcionamiento
Velocidad del viento (m/s)	horaria	10 m	anemómetro; 3 copela	0.22 - 60 m/s resolución <0.1 m/s	MET 010C	ONE	24-12-2009 30-09-2021
Dirección del viento (grados)	horario	10 m	veleta	electrica 0 a 357° r precisión ± 0.1 °	MET 020C	ONE	24-12-2009 30-09-2021
Temperatura (°C)	horario	10 m	termistor	-30 a 50 °C precisión ± 0.15°C	MET 83D	ONE	21-05-2013 30-09-2021
Temperatura (°C)	horario	2 m	termistor	-30 a 50 °C precisión ± 0.15°C	MET 83D	ONE	24-12-2009 31-12-2014
Humedad relativa del aire (%)	horario	3 m	película polímero capacitor	0-100 %HR precisión ± 2 % HR	MET 83D	ONE	21-05-2013 30-09-2021
Humedad relativa del aire (%)	horario	2 m	película polímero capacitor	0-100 %HR precisión ± 2 % HR	MET 83D	ONE	24-12-2009 31-12-2014
Radiación global (W/m ²)	horario	3m	piranómetro	rango trabajo 400 to 1100 nm	LI-COR 200X	LI-	21-05-2013 03-07-2017

Tabla 10.7: Variables meteorológicas, instrumentos y períodos de medición en la estación de calidad de aire en Coyhaique COY2. Fuente:

<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/XI>.

Variable meteorológica	frecuencia almacenamiento	altura medición	Método de medición	rango operación **	Equipo sensor	/	Período de funcionamiento
Variable meteorológica	frecuencia almacenamiento	altura medición	Método de medición	rango operación**	Equipo Sensor	/	Período de funcionamiento
Presión atmosférica (hPa)	horario	3m	pizométrico	800 hPa -1100 hPa precisión ± 0.50 hPa	LSI LAS-TEM DQA201		12-08-2015 30-03-2020
Velocidad del viento (m/s)	horaria	10 m	anemómetro; 3 copela; optocoupler reed rele	0.3 - 75 m/s resolución 0.06 m/s	LASTEM DNA802		01-10-2013 30-03-2020
Dirección del viento (grados)	horario	10 m	veleta; efecto hall	electrica 0 a 360° r precisión 3 ° límite 0.15 m/s	LASTEM DNA810		01-10-2013 30-03-2020
Temperatura (°C)	horario	10 m	termistor Pt100 1/3 DIN B (Class AA EN 60751)	-40 a 60 °C precisión $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	LASTEM DNA875		01-10-2013 30-03-2020
Humedad relativa del aire (%)	horario	3 m	capacitor	0-100% HR precisión $\pm 1\%$ HR	LASTEM DMA875		01-10-2013 30-03-2020
Radiación global (W/m ²)	horario	-	-	-	LSI LAS-TEM DPA153		sin datos
Precipitaciones (mm)	horario	-	-	-	LASTEM DAQ131-C		sin datos

10.5. Gráfica material particulado en Coyhaique

En la figura 10.6 se presenta un infografía de la contaminación en Coyhaique por Material particulado Fino $MP_{2,5}$

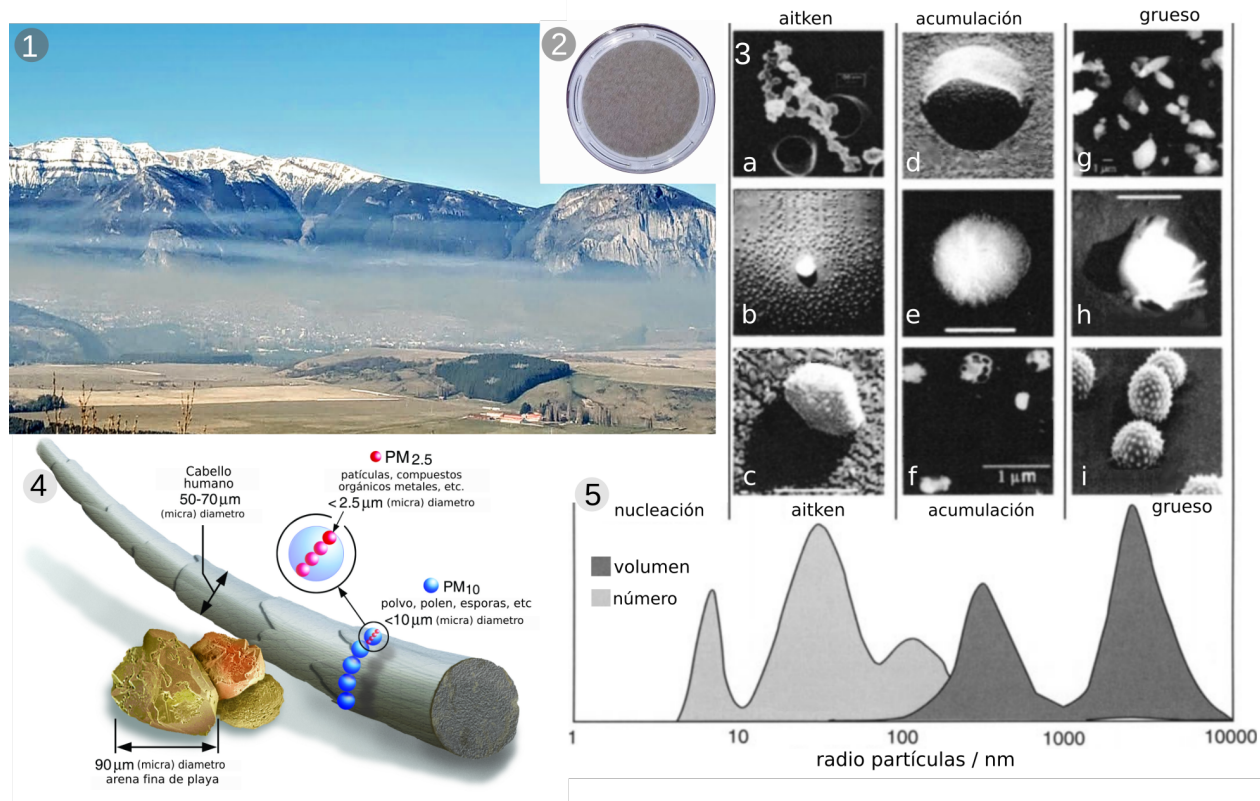


Figura 10.6: **Panel 1:** Coyhaique día contaminado (fuente: CIEP) **panel 2:** filtro 24 horas de $MP_{2,5}$ día contaminado en Coyhaique septiembre 2019 (fuente: Lab. Eco-climático, CIEP- Fac. Ciencias U. de Chile); **panel 3:** ejemplos de distintas partículas categorizadas en función de su modo y tamaño: a) hollín b) ácido sulfúrico c) cristal orgánico d) sulfato de amonio e) orgánico marino f) humo biomasa g) polvo h) sal marina i) polen; **panel 4:** izquierda: diferencia de tamaño a escala de los principales tipos de partículas, comparándolas con un cabello humano (adaptado desde: <https://www.epa.gov/>); **panel 5:** derecho inferior: curvas de número y volumen de partículas categorizados por su modo y tamaño adaptado de (Heintzenberg *et al.* 2002)

10.6. Resumen estadístico de las concentraciones de $MP_{2,5}$ de la red SINCA

Tabla 10.8: Resumen estadístico de las concentraciones de $MP_{2,5}$ de la red SINCA de la estación de calidad del aire COY1 (tabla superior) y COY2 (tabla inferior) agrupadas mensualmente. Periodo 2014 -2020.

Mes	n. ^o	COY1 Concentraciones $MP_{2,5}$						
		promedio	mínimo	0.25	0.50	0.75	0.98	máximo
Enero	151	8 ± 4	2	5	7	10	21	30
Febrero	130	10 ± 5	3	6	9	14	24	29
Marzo	172	23 ± 18	4	12	17	27	88	117
Abril	189	64 ± 65	7	24	40	75	234	393
Mayo	191	99 ± 92	12	40	66	129	379	520
Junio	154	113 ± 94	13	49	89	151	373	543
Julio	193	117 ± 95	16	54	89	141	396	592
Agosto	210	79 ± 55	11	34	65	111	218	266
Septiembre	186	47 ± 38	8	23	35	60	178	240
Octubre	211	28 ± 21	6	15	21	33	84	185
Noviembre	179	13 ± 9	3	8	11	17	34	78
Diciembre	178	9 ± 4	3	6	8	11	20	28

Mes	n. ^o	COY2 Concentraciones $MP_{2,5}$						
		promedio	mínimo	0.25	0.50	0.75	0.98	máximo
Enero	182	10 ± 4	4	7	9	12	22	30
Febrero	184	12 ± 5	4	9	11	16	26	29
Marzo	208	24 ± 16	4	14	20	29	71	104
Abril	177	62 ± 55	11	28	42	77	233	291
Mayo	166	101 ± 82	7	46	76	127	350	417
Junio	156	115 ± 84	18	59	88	151	349	510
Julio	172	111 ± 72	23	58	93	140	328	372
Agosto	174	78 ± 47	17	44	66	102	213	235
Septiembre	194	50 ± 34	13	27	39	61	167	191
Octubre	209	31 ± 20	9	17	25	39	86	154
Noviembre	200	16 ± 9	5	10	14	19	35	85
Diciembre	229	12 ± 4	4	9	11	14	27	30

10.7. Modelo para la determinación de las concentraciones de MP_{2,5}

Para poder modelar episodios de MP_{2,5} diarios, en esta sección nos enfocaremos, por una parte, en encontrar aquellos procesos que estabilizan la atmósfera baja desde el punto de vista mecánico y termodinámico, y por otra parte, asociar aquellas variables meteorológicas implicadas en la demanda térmica de las viviendas y que están correlacionadas con las emisiones de material particulado de MP_{2,5}. El principio general con el que se trabajará, será con el modelo de caja y los parámetros meteorológicos medidos por la Red SINCA. El modelo de caja, corresponde a una solución estacionaria aproximada, de la ecuación de continuidad y que ha mostrado ser de utilidad en zonas urbanas. Básicamente, una versión del modelo de caja indica que la evolución de la concentración (C) de un contaminante en la atmósfera, dependerá proporcionalmente de las emisiones de dicho contaminante (E) y es inversamente proporcional al factor de ventilación (uL). El factor de ventilación, por su parte, puede ser representado como el producto de la velocidad del viento (u), por la altura de capa de mezcla (L). De esta manera la ecuación nos queda como:

$$C = \frac{E}{uL} \quad (10.1)$$

Sin embargo, las variables descritas por este modelo, como E y L , no son conocidas a priori, por lo que se buscará, mediante el uso de principios físicos conocidos, encontrar ecuaciones equivalentes que permitan aproximar de una manera física, estas variables.

10.7.1. Determinación de las emisiones

Dado que el fuego es empleado para la calefacción, es razonable esperar que las emisiones de una vivienda estén relacionadas con la demanda térmica o demanda de calor (Q) de una vivienda. Para ello, utilizaremos la primera ley de la termodinámica (*Castellan, 1987*) y supondremos que la demanda de calor necesaria para una vivienda, en ausencia de trabajo (W), será proporcional a la diferencia de temperatura que experimenta el interior de la vivienda con su entorno:

$$Q = c_p \rho \Delta T \quad (10.2)$$

En el caso casa, la temperatura interior se asumirá como la temperatura de confort térmico T_c , la que en este trabajo se definirá en 16.2°C. Cabe mencionar que esta temperatura se obtuvo a partir del ajuste iterativo del promedio de las concentraciones modeladas y medidas, hasta que las medias se igualaran. Los términos como c_p corresponderá a calor específico de la vivienda y ρ la densidad media de la vivienda. Cabe mencionar que el valor obtenido está dentro de la temperatura de confort en viviendas ubicadas en latitudes medias (*Rijal 2010*). Por otra parte, T_h corresponde a la temperatura horaria ambiental exterior, la que varía a lo

largo de un día. Esta ecuación solo se utilizará cuando $T_h \leq T_c$, ya que, en caso contrario se asume que no será necesario la calefacción de la vivienda mediante el uso de calefactores a leña. De esta forma nos queda la demanda térmica horaria de una vivienda como:

$$Q_{vh} = \bar{k}_v(T_c - T_h) \quad (10.3)$$

Por lo tanto, para un día cualquiera del año, la demanda térmica será:

$$Q_{vh} = \bar{k}_v \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.4)$$

Donde h son las horas del día y k_y será un factor de proporcionalidad medio de las viviendas en Coyhaique. Este factor de proporcionalidad estará asociado a la materialidad de la aislación térmica, metros cuadrados, de la construcción, etc. Por otra parte, la generación de calor por la leña (Q_{ld}), será igual a la entalpia de combustión media (ΔH) de la leña o poder calorífico, por la masa de leña (m_d) que se consume, en este caso, en un día:

$$Q_{ld} = \Delta \bar{H}_v m_d \quad (10.5)$$

Igualando $Q_{ld} = Q_{vd}$, es decir, a la cantidad de energía requerida por la vivienda, por la cantidad de energía generada por un día de leña, nos queda:

$$\Delta \bar{H}_v m_d = \bar{k}_v \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.6)$$

Dado que en la práctica se ocupa principalmente un tipo de combustible en la ciudad, leña del árbol Lengua o Ñirre en su defecto se asume una proporción constante en el tiempo, y que sus valores medios de humedad y poder energético deberían ser en promedio constante ($\Delta \bar{H}_v$ aproximadamente igual a constante), diremos que, en el caso de una vivienda media, la cantidad de leña diaria consumida será:

$$\bar{m}_d = \bar{k}_{vH} \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.7)$$

Si esta situación es ampliada a Coyhaique o cualquier otra ciudad la cantidad de leña consumida será igual a la masa de leña consumida por vivienda por la cantidad de viviendas (N) que consumen leña como calefacción. Sabemos que el caso de Coyhaique es próximo a la totalidad de las viviendas.

$$N\bar{m}_d = N\bar{k}_{vH} \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.8)$$

Y asumiendo que la combustión de leña se relaciona directamente con un constante de emisión (e), a través de un factor de proporción constante (k_e) y su masa de leña ocupada, tenemos:

$$e = k_e m_d \quad (10.9)$$

$$Ne = k_e N \bar{k}_{vH} \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.10)$$

Agrupando las constantes y asumiendo que la emisión global E de Coyhaique, es Ne , nos queda:

$$E = K \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.11)$$

Por último, evaluando la emisión E en el modelo caja antes descrito, nos queda, que la concentración diaria C_d se puede describir como:

$$C_d = \frac{1}{uL} K \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.12)$$

En donde K , para términos del presente trabajo se asumirá como una constante para todo $T_h \leq T_c$.

10.7.2. Determinación de altura mezcla

En una zona de libre convección asociada al efecto boyante, los fenómenos de subsidencia atmosférica de gran escala generan estabilidad térmica vertical cercana a la superficie. Esta estabilidad térmica, a su vez, limita el desarrollo máximo de la altura de capa de mezcla superficial, generando con ello, un bajo nivel de ventilación atmosférica y un mayor calentamiento del aire, ubicado en la zona de mezcla superficial. En efecto, en ciudades como Santiago y Coyhaique, se ha observado que, en días despejados de subsidencia, existe también un incremento diario de la amplitud y la contaminación atmosférica.

Bajo ciertas condiciones, el crecimiento de la capa de mezcla está relacionado con la amplitud térmica superficial, flujos turbulentos de calor ($\overline{\omega'\theta'}$) y el perfil térmico. A partir de un modelo simple de capa de mezcla es posible encontrar la siguiente relación (*Garra, 1992*):

$$\Gamma \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\overline{\omega'\theta'}}{H} \quad (10.13)$$

En estas condiciones, es razonable suponer, que el perfil de estabilidad térmica vertical (*Gamma*) afecta, de manera proporcional a la amplitud térmica diaria (*AT*). De igual forma está inversamente relacionado con la altura de capa de mezcla *H*. Entiéndase *AT* como la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria:

$$AT = T_{max} - T_{min} \quad (10.14)$$

Y geoméricamente podemos aproximar el perfil térmico como una relación entre la amplitud térmica y la altura de capa de mezcla *H*, nos queda:

$$\Gamma \approx \frac{AT}{H} \quad (10.15)$$

Reemplazando el perfil térmico, por la expresión recién descrita y despejando nos queda:

$$\frac{AT}{H} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\overline{\omega'\theta'}}{H} \quad (10.16)$$

$$AT\partial H = \overline{\omega'\theta'}\partial t \quad (10.17)$$

Integrando, con $L_o = 0$ y $\overline{\omega'\theta'} = 0$, ambos valores esperables en superficie nos queda que *L* es :

$$\int_{L_o}^L \partial H = \frac{1}{H} \int_0^t \overline{\omega'\theta'} \partial t \quad (10.18)$$

$$L = \frac{\overline{\omega'\theta'}}{AT} \quad (10.19)$$

Definimos de manera arbitraria como constante los flujos medios verticales turbulentos de calor, pensando que pueda existir cierta homogeneidad entre días de invierno, por lo que nos queda:

$$L = \frac{k}{AT} \quad (10.20)$$

La ecuación de *L*, si bien es extremadamente sencilla rescata el hecho que es mucho más rápido calentar un volumen reducido de aire, es decir, cuando la inversión térmica está más cercana al suelo, que un volumen más grande, cuando la inversión térmica se encuentra a mayor altura.

De esta forma y ocupando el modelo de caja, podemos obtener una ecuación simple que permite tener una aproximación a la concentración diaria de un contaminante atmosférico

como $MP_{2,5}$. Reordenando los términos:

$$C_d = K \frac{(T_{max} - T_{min})}{u} \sum_{h=0}^{23} (T_c - T_h) \quad (10.21)$$

Esta expresión matemática describe la variabilidad diaria de la concentración de $MP_{2,5}$ en Coyhaique, utilizando únicamente temperatura y velocidad de viento como variables de entrada. De igual forma, permite tener una aproximación parcializada del efecto que tiene el tiempo de gran escala sobre la atmósfera local y sobre las emisiones de $MP_{2,5}$, pudiendo evaluar cada una de ellas. De esta manera la ecuación obtenida el parámetro K fue ajustado, mediante el modelo de optimización estadística de mínimos cuadrados. Los parámetros de entradas fueron la concentración diaria medidas de $MP_{2,5}$ (como variable dependiente) y los valores de temperatura horaria y viento diario, como se describe a continuación.

10.7.3. Ajuste del modelo y resultados

Para el entrenamiento del modelo se utilizaron 100 días de datos, los que correspondía a variables como $MP_{2,5}$, temperatura y velocidad de viento de las estaciones de superficie de COY1 y COY2 para el periodo entre 2016 y 2020. Los días fueron escogidos aleatoriamente, sin embargo, se buscó que el muestreo fuera representativo de todo el rango de concentraciones, mediante una selección segmentada de los datos. Esto quiere decir, se seleccionaron de manera aleatoria, un número similar de datos en bajas, medias y altas concentraciones de $MP_{2,5}$ promedio diario medidos por las estaciones de la red SINCA en Coyhaique. Con esta selección, se evita que el modelo sobre ajuste las concentraciones más bajas ($< 50g/m^3d$), ya que ahí es donde existe el mayor número de datos y subestime las altas concentraciones, en donde estamos interesados en modelar.

Para la obtención de la concentración de $MP_{2,5}$ diaria, se ocuparon las variables de temperatura y viento, a las que se le aplicó la ecuación antes descrita. Los resultados graficados en la figura 5.1 muestran una buena correlación lineal de $r = 0.92$ en el caso de la Nueva Serie de datos y un error cuadrático medio en torno a los $50 \mu g/m^3d$. COY2. De igual forma, se observa una covariación similar entre las series modeladas y medida de $MP_{2,5}$. En este sentido en la figura 5.2, se presenta el mes de mayo del 2016, en donde se observa una importante similitud entre la serie modelada y la medida de $MP_{2,5}$ para Coyhaique.

Los resultados del modelo muestran con los datos de viento y temperatura es posible explicar una parte significativa de la variabilidad del material particulado fino en Coyhaique.

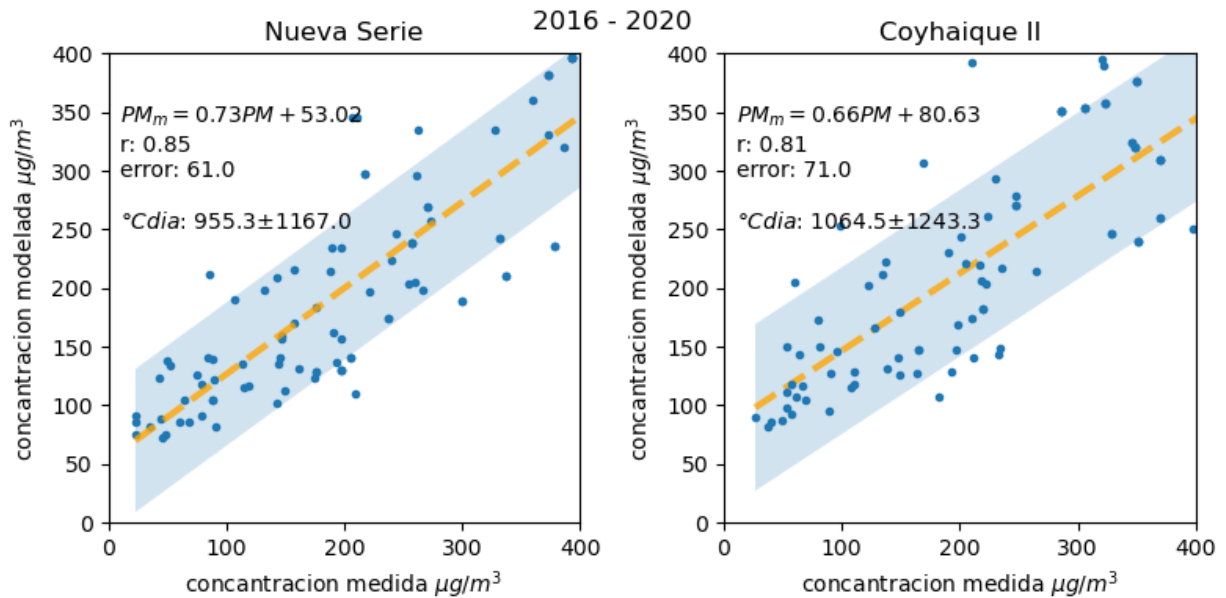


Figura 10.7: Curvas de calibración entre las mediciones de $MP_{2,5}$ diarios medidos por las estaciones de calidad del aire de SINCA en Coyhaique y los datos ajustados por el modelo desarrollado. Panel izquierdo muestra la serie construida a partir de COY1 y panel izquierdo los datos médicos por COY2.

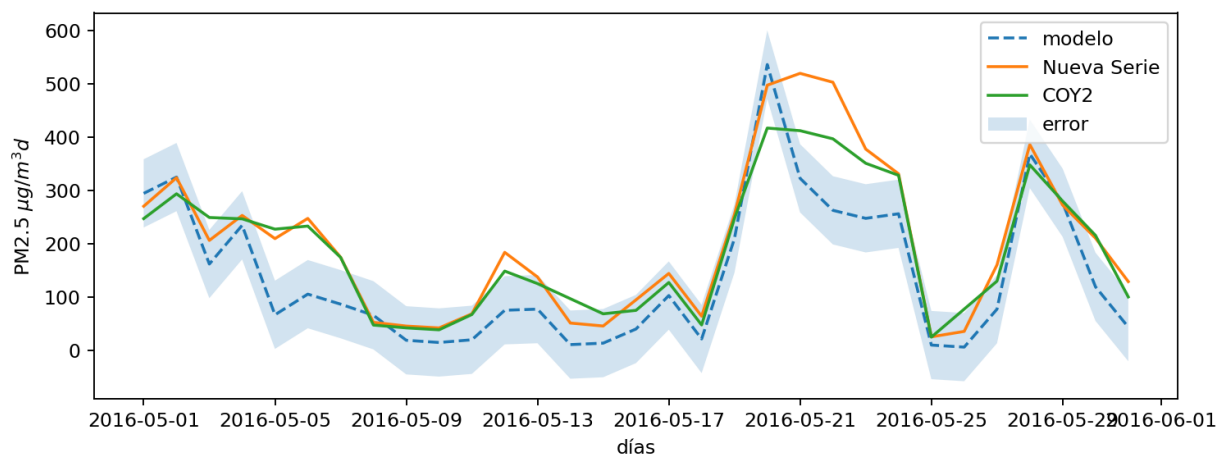


Figura 10.8: Serie de tiempo con la concentración diaria de $MP_{2,5}$ medida en COY2 de SINCA, nueva serie y modelada, durante el mes de mayo del 2016. [Link](#)

10.8. Modelo de dispersión y variables meteorológicas locales

El modelo de dispersión de $MP_{2,5}$ implementado en el presente trabajo, permite hacer una estimación, de manera individual, del impacto que tienen algunos de los principales procesos locales involucrados en la contaminación atmosférica de Coyhaique. Esto quiere decir, emisiones y factor de ventilación. Para ello emplea variables meteorológicas medidas por la Red SINCA, como son viento y temperatura superficial.

Los resultados muestran una buena correlación, $r = 0,95$, entre la concentración entregada por el modelo y los datos medidos por la red SINCA, para los días 26 junio al 5 de julio (ver figura 10.9 y 10.10). De igual forma, se observa que la mejor correlación entre los datos monitoreados y el modelo está en la relación entre $MP_{2,5}$ medido y la fracción de modelo enfocada en la emisión de contaminante. Dicha relación tiene un coeficiente de correlación de $r = 0,97$. Esto se puede interpretar como que una parte significativa de la variabilidad medida de las concentraciones de $MP_{2,5}$ es explicada, a partir de la demanda térmica de las viviendas. Esta demanda a su vez está construida a partir de la variable construida grados-días (ver Anexo 10.7). En segundo término, y no menos importante está el factor de ventilación el que obtiene un $r = -0,91$ con la concentración de $MP_{2,5}$ medida. La máxima concentración medida por COY2 no es reproducida, se puede deber a que el modelo fue ajustado con la serie de la estación COY1, que es muy similar a la nueva serie y a que el modelo no considera el aporte que puede producir la recirculación de contaminantes de días anteriores.

10.8.1. Análisis de tendencia de $MP_{2,5}$ medidos y modelado

Si consideramos que el modelo de caja expuesto resuelve adecuadamente las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ vinculadas al requerimiento energético para la calefacción (temperatura) y variables asociadas al factor de ventilación (viento y altura de capa de mezcla). Podríamos decir, que la diferencia entre la concentración medida (C_{medido}) y la concentración modelada ($C_{modelada}$), debería reflejar el cambio de concentración que no logar modelar, al que denominaremos incertidumbre (I).

$$C_{medido} = C_{modelada} + I \quad (10.22)$$

Esta incertidumbre, puede ser descrita como una combinación de dos factores dominantes, en primer lugar, aquellas forzantes meteorológicas no considerados por el modelo, como por ejemplo, algunas tipos de bajas segregadas, días contaminados con neblina superficial, etc. y en segundo lugar, aquellos cambios de emisión, introducidos por acciones humanas, como son, implementación de políticas públicas enfocadas a la descontaminación (PDA), cambios culturales en el uso de la leña, crecimiento de la población, etc. Por este motivo, definiremos la incertidumbre como una combinación de factores tecnológicos y aquellas condiciones meteorológicas no modeladas.

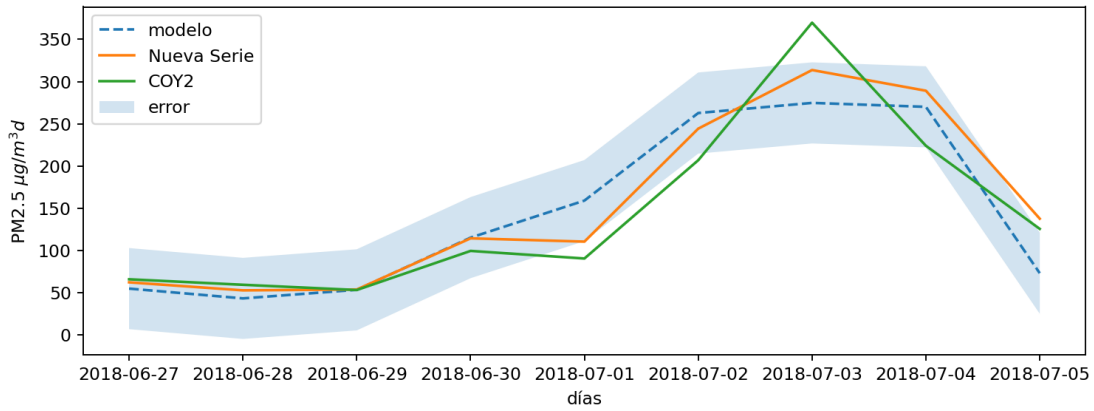


Figura 10.9: Concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ de COY2 (línea verde), nueva serie calculada a partir de COY1 y complementada con datos de COY2 (línea naranja) y el modelo que emplea datos de viento y temperatura superficial de la estación SINCA de Coyhaique para el episodio de contaminación atmosférica del 2-4 de julio del 2018.

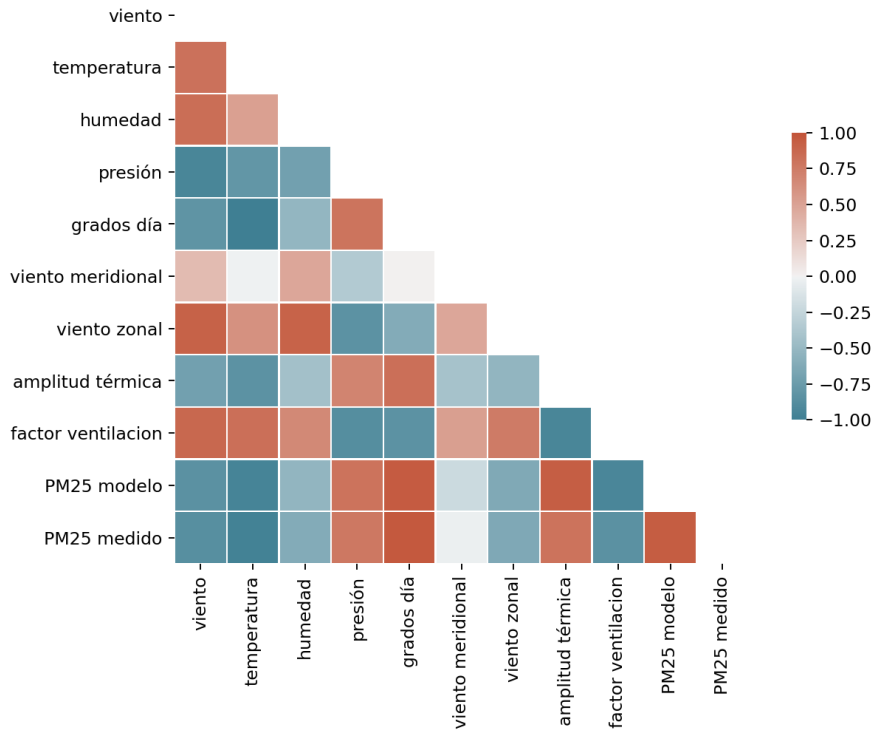


Figura 10.10: Matriz de correlación de las variables medidas, estimadas con los valores entregados por el modelo y la concentración de $MP_{2,5}$ medida en la red SINCA de Coyhaique para los días 26 junio al 5 de julio.

$$I = C_{tecnológicos} + C_{no\,modelado} \quad (10.23)$$

Por lo tanto, podemos escribir la diferencia entre lo medido y modelado, como la suma de factores asociados acciones humanas (tecnológicos) y los vinculados a factores atmosféricos que no aborda el modelo:

$$C_{medido} - C_{medido} = C_{tecnológicos} + C_{no\,modelado} \quad (10.24)$$

La figura 5.3 muestra la diferencia de concentración anual entre lo medido y lo modelado para los años 2014 al 2020. De acuerdo al razonamiento expuesto, esta figura debería reflejar la suma de los factores, tecnológicos y los no modelados. Dado que las políticas más intensas asociadas al PDA comenzaron el 2016 podemos decir que este año y los previos, la incertidumbre de la concentración debería estar casi exclusivamente asociada a los factores meteorológicos no considerados por el modelo. En efecto, la figura 10.11 se puede observar que la concentración anual de $MP_{2,5}$, no explicada por el modelo, para los años 2015, 2016 y 2017, está en torno a los $20 \mu g/m^3$ año. Esta magnitud, es aproximadamente un tercio de la concentración total observada en Coyhaique. De igual forma, se aprecia una tendencia sistemática poco probable, pero no significativa, de disminución de la concentración media anual de $MP_{2,5}$. Esta tendencia se puede asociar a factores que, de acuerdo a lo expuesto, deberían vincularse al impacto de la implementación del PDA, enfocadas a la disminución de las concentraciones en Coyhaique. En este sentido podemos nombrar recambio de calefactores, aislación térmica de las viviendas, cambio de combustibles, etc. Esta disminución se encuentra en torno a los $5 \mu g/m^3$ año de las concentraciones medias y sigue una tendencia a la baja.

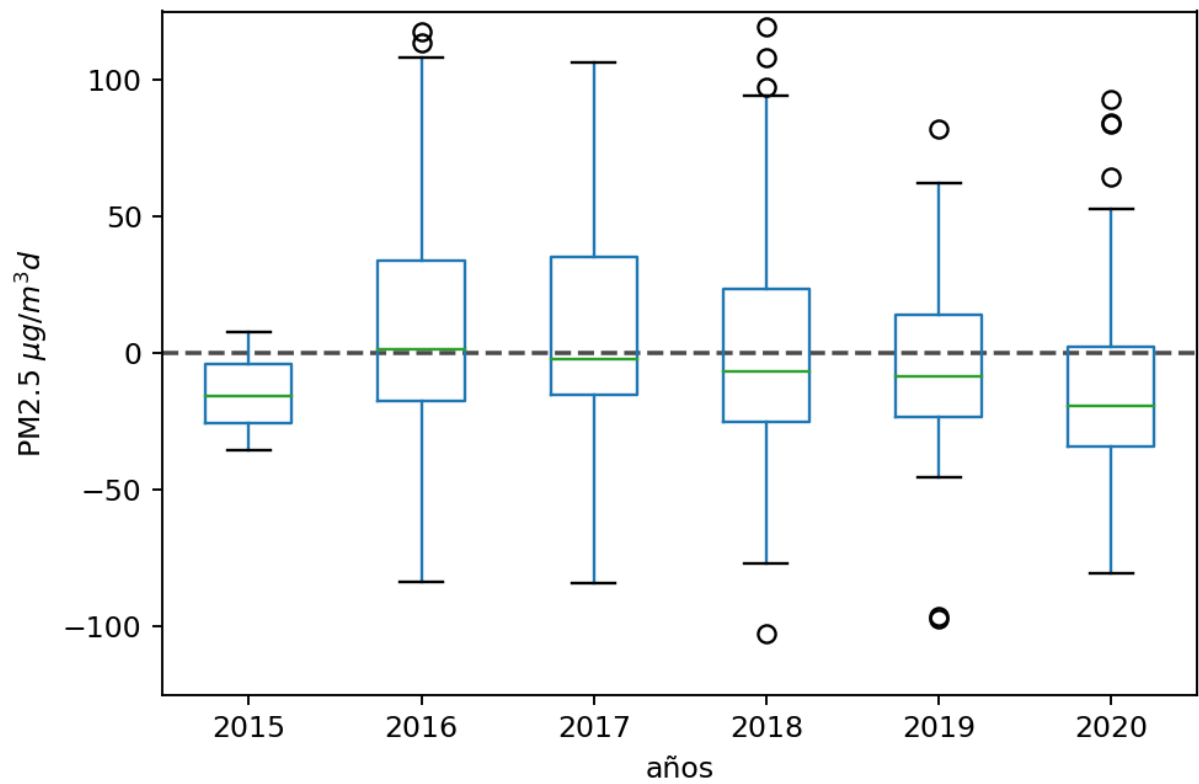


Figura 10.11: Diferencia anual entre las concentraciones de MP_{2,5} medidas y modelas en la ciudad de Coyhaique utilizado como base los datos de SINCA, periodo 2015-2020. Mas detalles de gráficos de caja ver Anexo figura 10.22

10.9. Concentraciones de $MP_{2,5}$ en un Escenario de Cambio Climático

No es claro el futuro de las concentraciones de $MP_{2,5}$ en Coyhaique en un escenario de Cambio Climático. Los antecedentes presentados por el IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>) proyectan un incremento de la temperatura y menor velocidad de los vientos. Ambos son factores meteorológicos que, de acuerdo a lo expuesto, producen efectos opuestos sobre las emisiones y concentraciones atmosféricas del $MP_{2,5}$. Esto debido a que, en un escenario de $2^{\circ}C$ al 2050 se estima una reducción de $-224.3^{\circ}C/d$ de la demanda térmica, factor que está directamente relacionado a las emisiones de $MP_{2,5}$, producido por la calefacción de las viviendas. De igual forma un incremento de los días de estancamiento descrito por *Horton et al., (2012)* provocaría un incremento del número de episodios y/o duración de los episodios. De igual forma, las mismas simulaciones globales del clima presentados en los informes entregados por el IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>) indican para el territorio debería experimentar una disminución de la rapidez del viento media estimada en -0.4 m/s, en un escenario SSP5-8.5 al 2050.

Un ejercicio simple, empleando el modelo descrito en el anexo 10.7 nos permite estimar que frente a condiciones de reducción de viento (-0.4 m/s) e incremento de temperatura en $2^{\circ}C$, se observa una disminución leve de las concentraciones medias de $MP_{2,5}$. Sin embargo, durante episodios de emergencia de $MP_{2,5}$ existiría un aumento (máximos diarios) más significativo de las concentraciones $MP_{2,5}$ (ver figura 10.12). Por ejemplo un máximo diario de $MP_{2,5}$ que actualmente esta en torno a los $\sim 400\mu g/m^3d$ en un escenario de cambio climático podría pasar a los $\sim 800\mu g/m^3d$. Si a este resultado le sumamos que existiría un incremento en ~ 9 días de los episodios de estancamiento atmosférico, estimado por *Horton et al., (2012)*, se observaría en un escenario de cambio climático un incremento neto en días con niveles críticos para la población.

Es importante notar que en este ejercicio se evaluó con la misma variabilidad de las variables meteorológicas observadas en la actualidad. Sólo se cambiaron las condiciones medias de las variables de viento y temperatura. Tampoco se considero un cambio de tecnología de combustión o aislación térmica, ni el número de las fuentes de emisión.

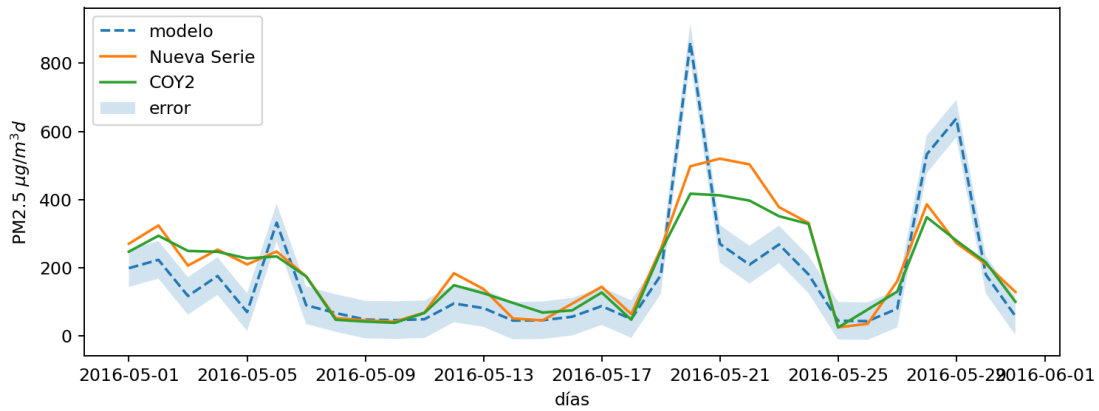


Figura 10.12: línea verde y naranja: concentraciones observadas actuales diarias de $MP_{2,5}$ y concentraciones futuras modeladas bajo un escenario de cambio climático ($2^{\circ}C$ y -0.4 m/s) proyectado en el territorio de Coyhaique Datos $MP_{2,5}$ IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

10.10. Discusión del modelo de $MP_{2,5}$

Utilizando el modelo de difusión de $MP_{2,5}$ construido para la ciudad de Coyhaique en el presente trabajo y las variables medidas por la red SINCA en Coyhaique, se encuentra que los parámetros atmosféricos más significativos que determinan la variabilidad de las concentraciones diarias en la ciudad son la rapidez del viento y la temperatura superficial. Dichas variables fueron re-escritas, con una justificación física, permitiendo estimar la concentración diaria (Cd) de material particulado fino, en función del factor de ventilación que afecta la ciudad y las emisiones diarias residenciales de $MP_{2,5}$:

En este caso K es una constante de proporcionalidad, ajustada mediante un modelo lineal entre la concentración medida y modelada. El segundo término de la ecuación representa la variabilidad asociada al inverso del factor de ventilación. Factor definido como el producto entre la altura de capa de mezcla y la velocidad del viento. Y el tercer término de la ecuación corresponde a la variabilidad asociada a las emisiones de $MP_{2,5}$ que ocurren en Coyhaique y que están vinculadas con la demanda térmica de las viviendas. En general, el modelo al ser sometido a prueba presenta una buena correlación lineal, con valores que están por sobre el 0.82, e incluso llegado a r de 0.92, dependiendo de la muestra escogida para el ajuste. La magnitud normalizada de los factores asociados a los términos muestra que la concentración de $MP_{2,5}$ está determinado en primer orden, por las emisiones de material particulado fino, y en segundo orden, por el factor de ventilación. No obstante, ambos factores presentan una alta correlación, con valores de r iguales o superiores a 0,9.

Dentro de los resultados significativos encontrados a partir del modelo, se encuentra que se mantiene una tendencia a la baja de las concentraciones anuales de $MP_{2,5}$. Los resultados indican que el inicio de esta tendencia a la baja de las concentraciones es el año 2017. Para el periodo 2016-2020, la tendencia a la disminución observada está en torno a los $5\mu g/m^3$ año, lo cual refuerza la estimación inicial de $-3\pm 3\mu g/m^3$ año. Sin embargo, la lógica indica (principio de Pareto) que para mantener la misma tasa anual de reducción de concentración de $MP_{2,5}$,

se deberá incurrir en un esfuerzo cada vez mayor. Esto, debido a que inicialmente se tiende a implementar las medidas más sencillas, dejando las más complejas para el futuro.

Dentro de los problemas observados del modelo (incertidumbres), se encuentra una subestimación de las concentraciones máximas de $MP_{2,5}$ durante los días de episodios. Esta subestimación puede estar asociada a que el modelo no cuenta con algún parámetro que le permita evaluar la recirculación que se puede generar durante un fenómeno de estancamiento atmosférico.

10.11. Test de funciones de distribución de probabilidad para las concentraciones de $MP_{2,5}$ en Coyhaique

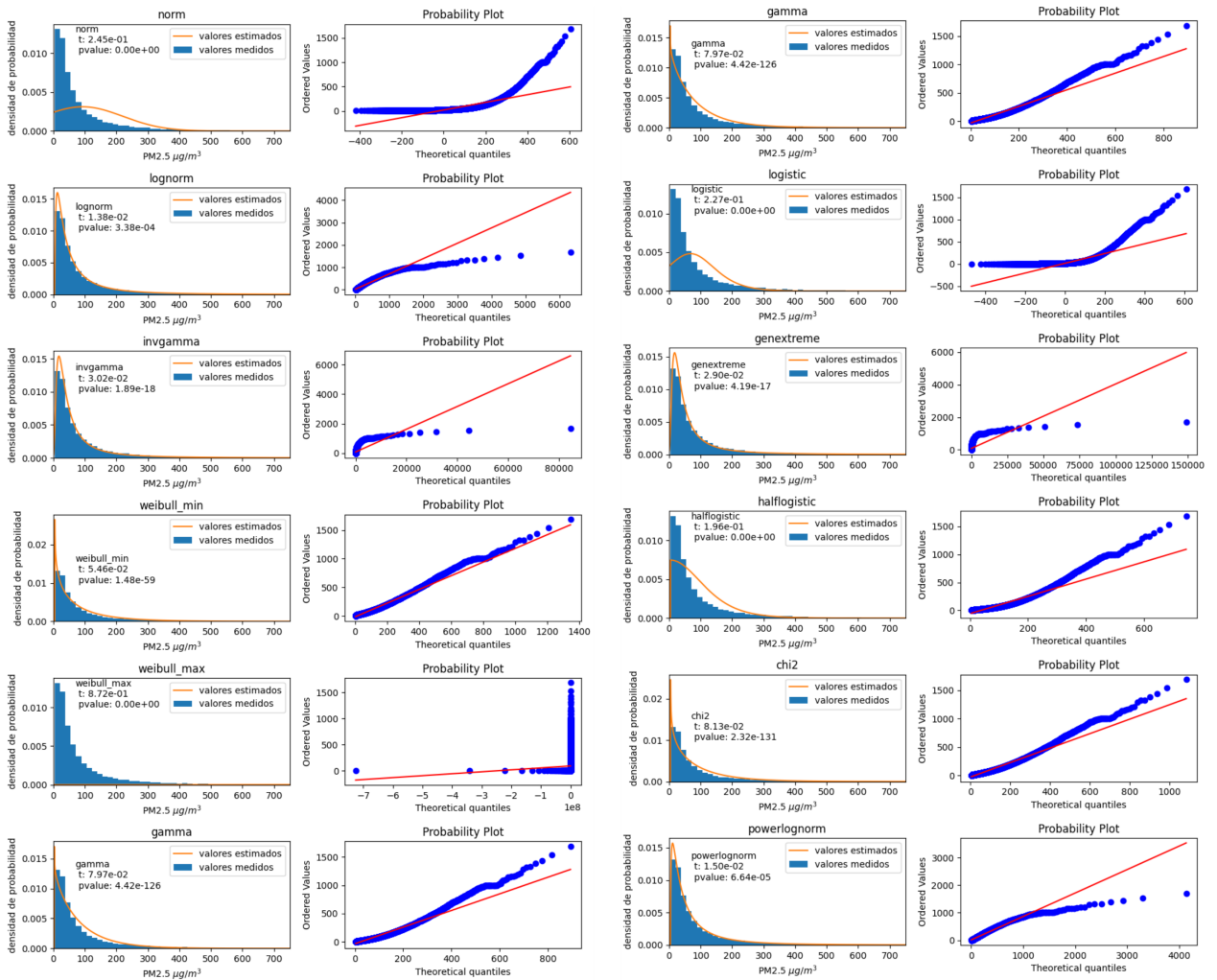


Figura 10.13: Curvas de distribución de probabilidad de MP_{2,5} de Coyhaique ajustada mediante el método de máxima verosimilitud MV y grafica QQplot. . Calculado a partir de las concentraciones diarias de MP_{2,5} durante el periodo 2013-2020. (Elaboración propia a partir de datos SINCA).

10.12. Cambios y proyecciones de MP_{2,5} en Coyhaique

Tabla 10.9: Resumen estadístico de los parámetros de la regresión lineal para MP_{2,5}.

Pendiente = $\frac{dC}{dt}$, residuo C_o , y coeficiente de correlación: r , de las concentraciones anuales de MP_{2,5} para el periodo 2014 -2020, para los percentiles desde 0.5 a 0.98. Cf corresponde a una proyección del tiempo en años que toma alcanzar una concentración promedio anual de 20 $\mu g/m^3$ y 50 $\mu g/m^3$ d MP_{2,5}. COY1 (tabla superior) y COY2 (tabla inferior). Datos obtenidos de la red SINCA.

percentil	MP _{2,5} COY1		Proyección en años		r
	$\frac{dC}{dt}$ $\mu g/m^3$ año	C_o $\mu g/m^3$ año	Cf= 20 $\mu g/m^3$ años	Cf= 50 $\mu g/m^3$ años	
0.50	-3±3	37±16	7±3	-	0.76
0.65	-5±5	65±23	10±4	2±2	0.86
0.70	-6±6	78±30	10±5	4±1	0.80
0.75	-8±8	97±41	11±6	6±1	0.80
0.80	-10±9	117 ± 45	12 ± 6	8 ± 3	0.62
0.85	-14±11	153 ± 57	10 ± 4	8 ± 2	0.79
0.90	-23±8	216 ± 39	9 ± 1	7 ± 1	0.90
0.95	-30±8	301 ± 41	9 ± 1	8 ± 1	0.74
0.98	-39±15	404 ± 76	10 ± 2	9 ± 2	0.44

percentil	MP _{2,5} COY2		Proyección en años		r
	$\frac{dC}{dt}$ $\mu g/m^3$ año	C_o $\mu g/m^3$ año	Cf= 20 $\mu g/m^3$ años	Cf= 50 $\mu g/m^3$ años	
0.50	-2±1	36±3	7± 1		0.86
0.65	-3±2	54±12	15± 9	1± 4	0.46
0.70	-3±3	64±16	18± 14	4± 1	0.52
0.75	-4±5	76±24	24± 25	9± 5	0.36
0.80	-6±5	102±26	15± 9	9± 4	0.63
0.85	-9±4	133±21	13± 4	10± 2	0.68
0.90	-14±7	177±35	12± 4	10± 2	0.78
0.95	-22±7	268±35	11± 2	10± 2	0.64
0.98	-25±12	333±59	13± 4	12± 3	0.42

10.13. Climatologías de Campos Meteorológicos NCEP-NCAR

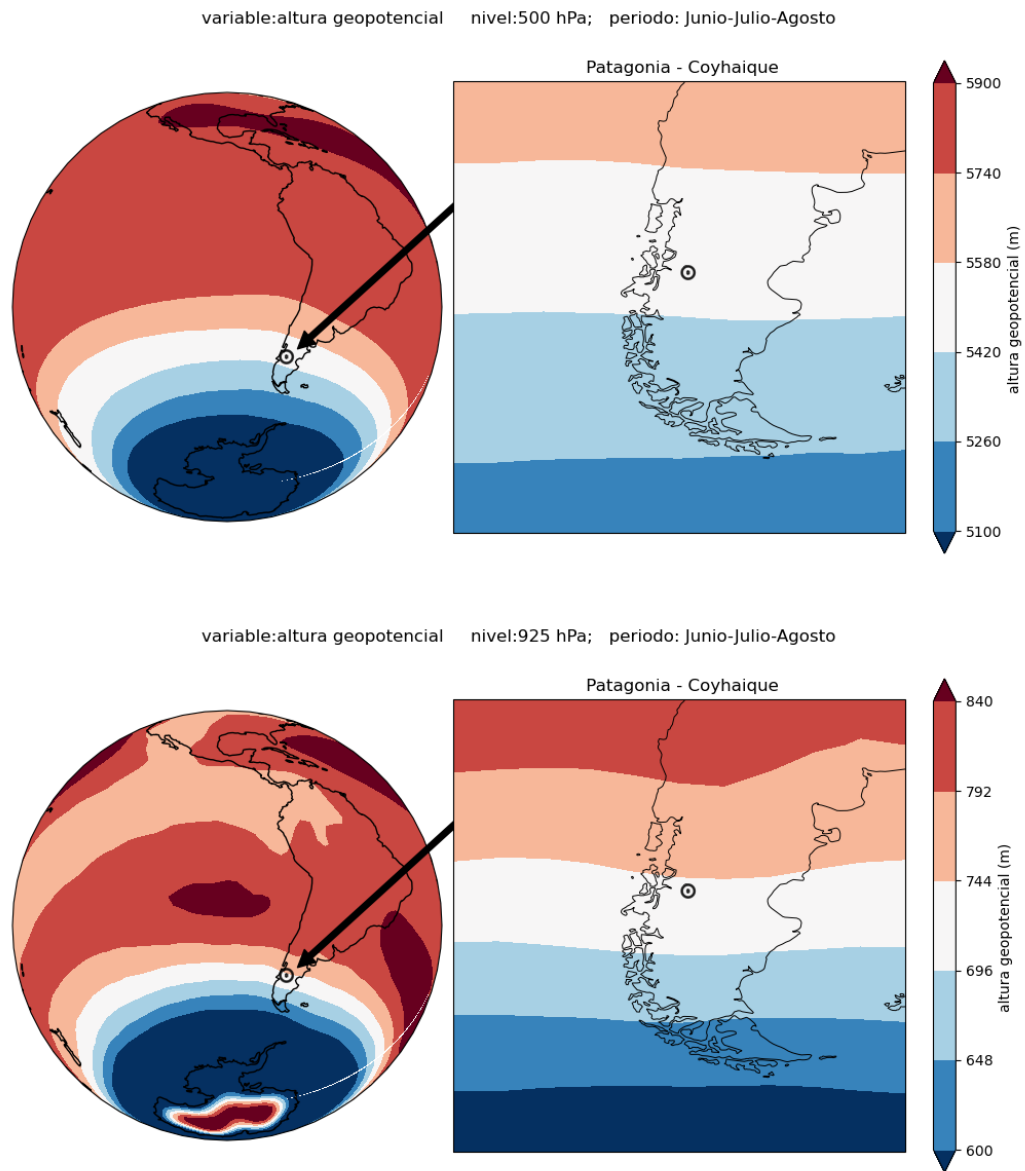


Figura 10.14: Climatología de altura geopotencial (en hPa) a partir de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Panel superior 500 hPa, panel inferior 925 hPa; período 1991-2020. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

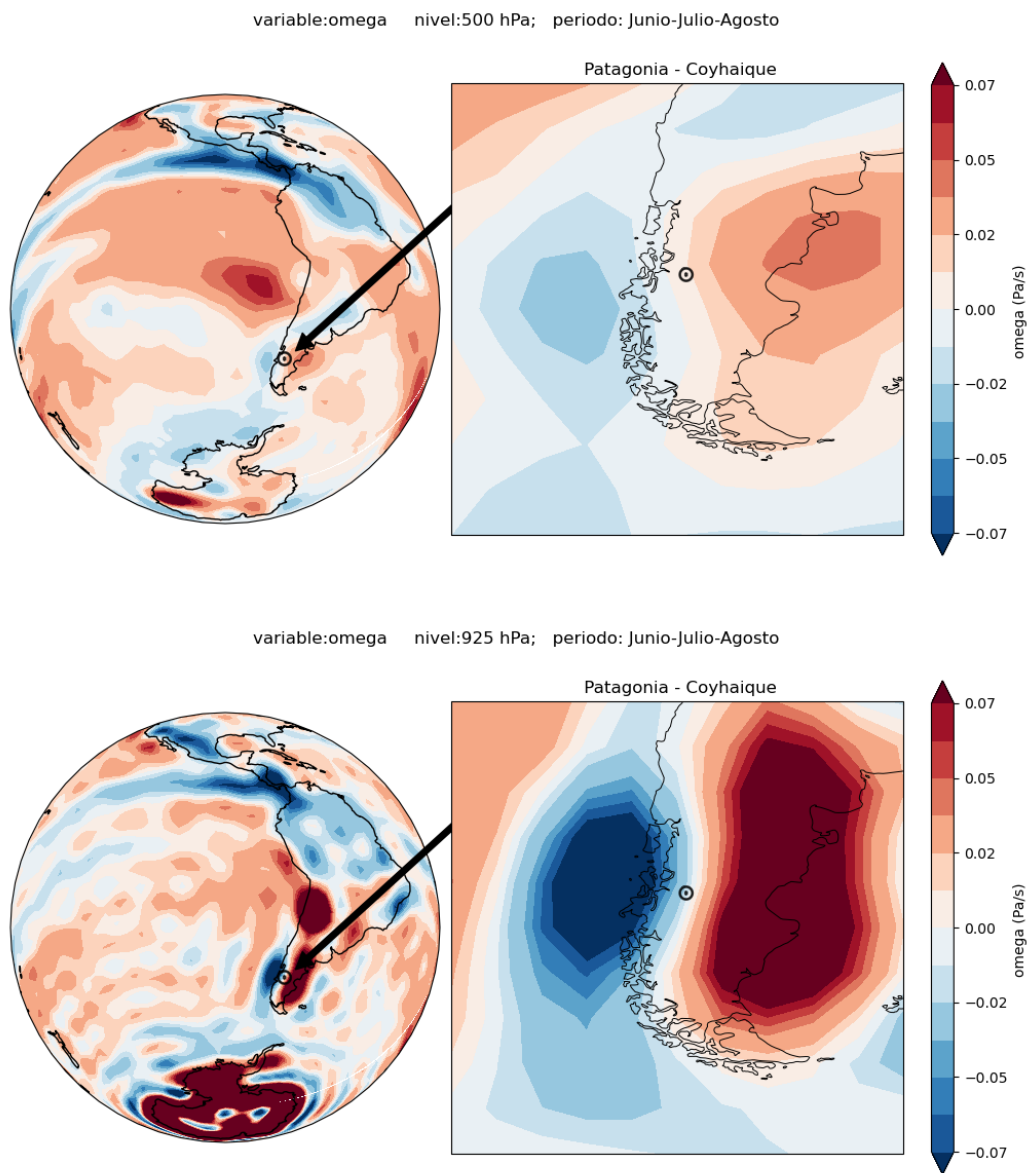


Figura 10.15: Climatología de omega (en Pa/s) a partir de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Panel superior 500 hPa, panel inferior 925 hPa; período 1991-2020.
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

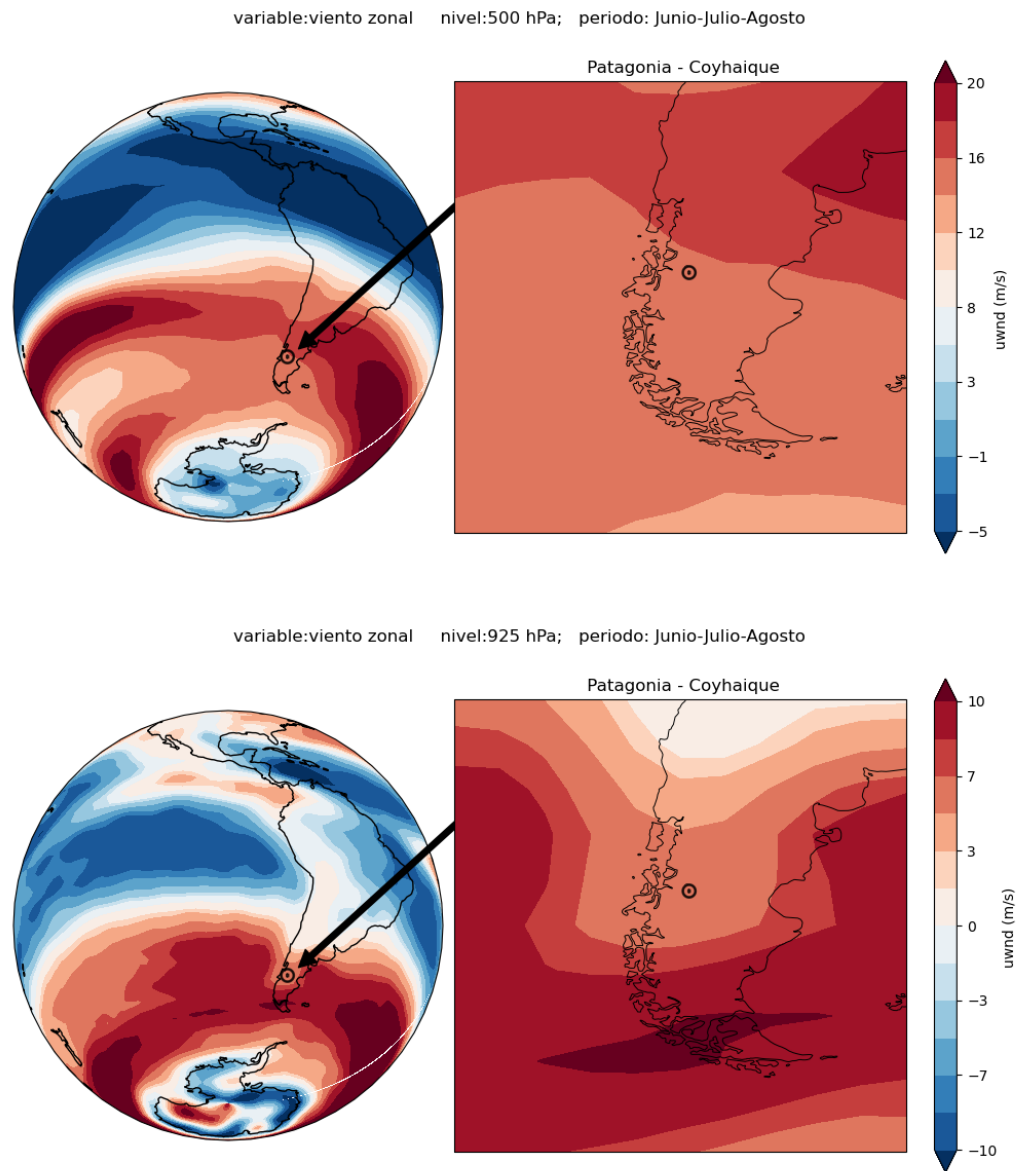


Figura 10.16: Climatología de viento zonal (m/s) a partir de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Panel superior nivel 500 hPa, panel inferior nivel 925 hPa; período 1991-2020.
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

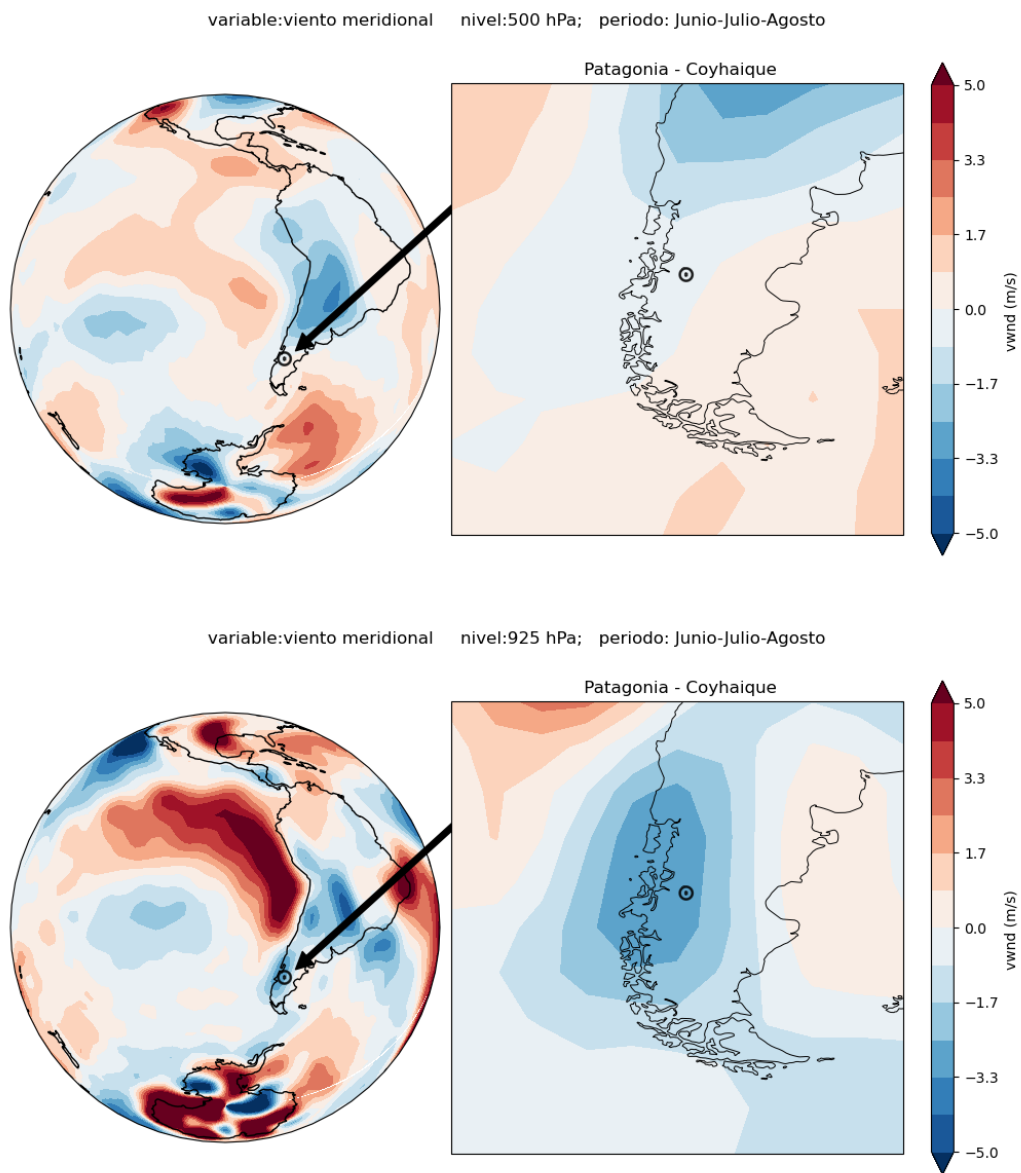


Figura 10.17: Climatología de viento meridional (m/s) a partir de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Panel superior 500 hPa, panel inferior 925 hPa; período 1991-2020.
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

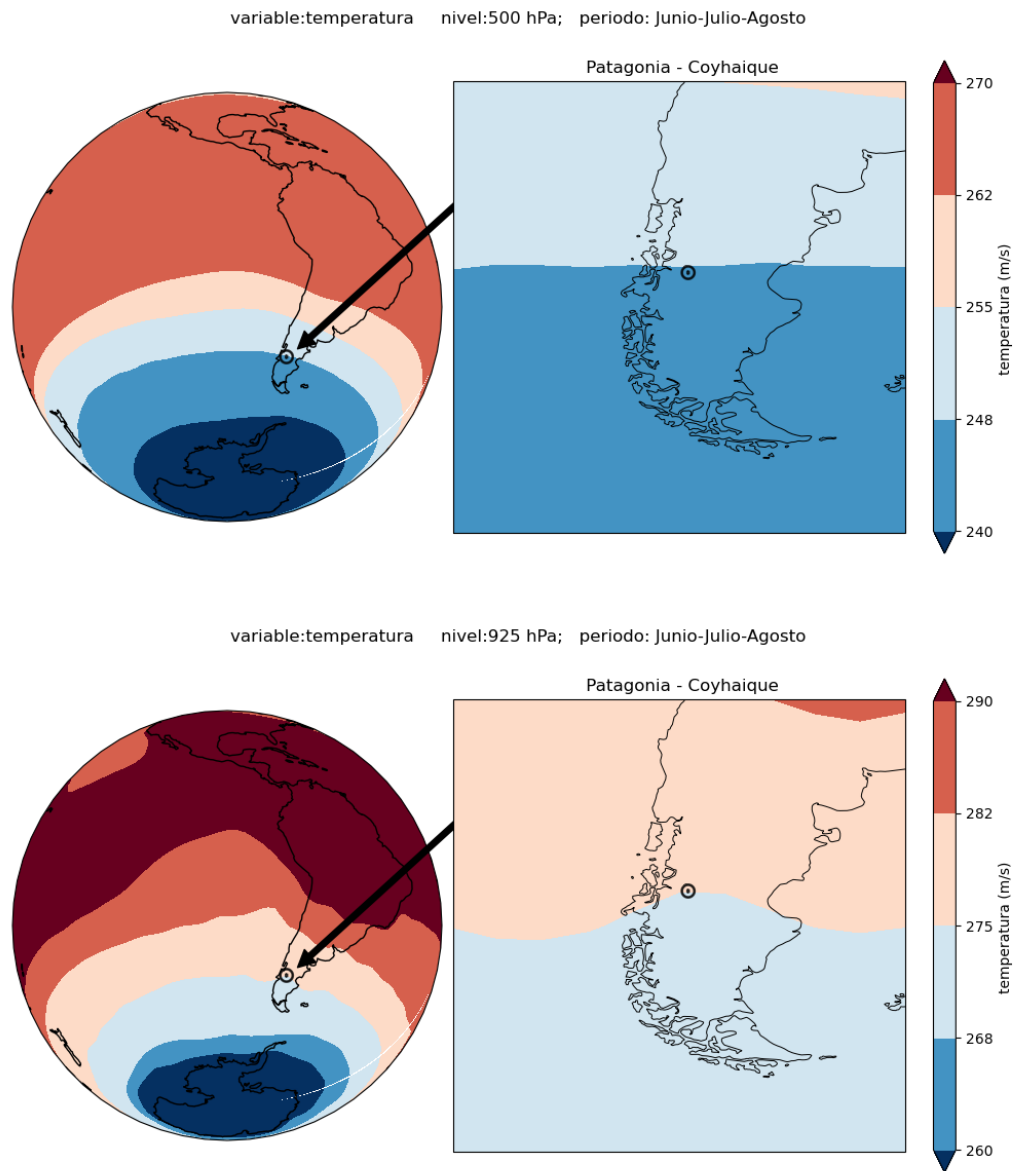


Figura 10.18: Climatología de temperatura (K) a partir de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Panel superior nivel 500 hPa, panel inferior nivel 925 hPa; periodo 1991-2020.
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

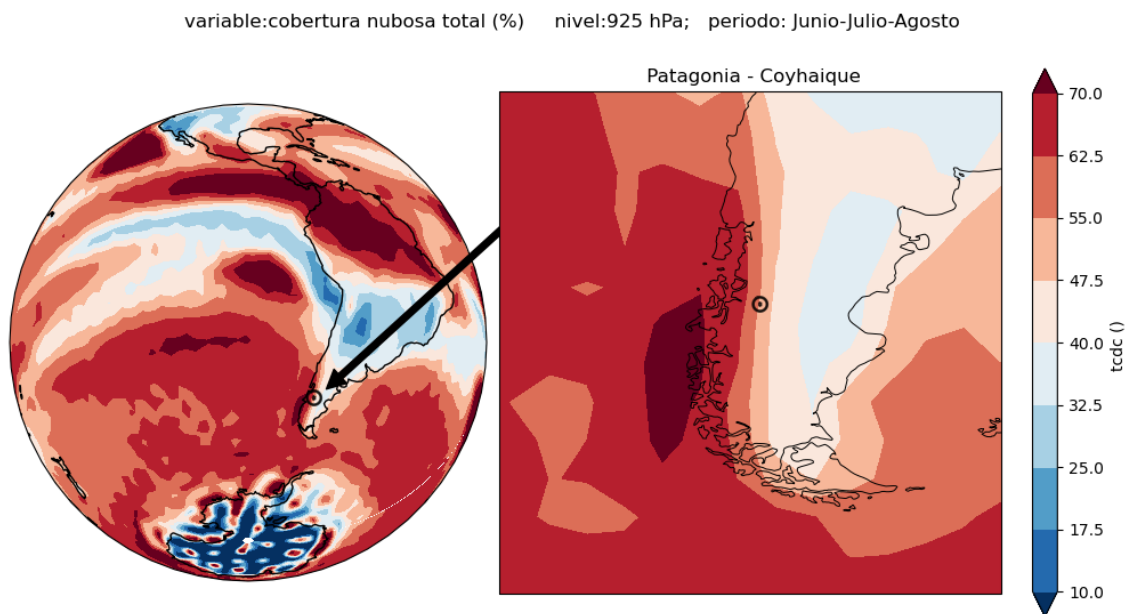


Figura 10.19: Climatología del porcentaje cobertura nubosa total a partir de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Panel superior nivel ; período 1991-2020. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

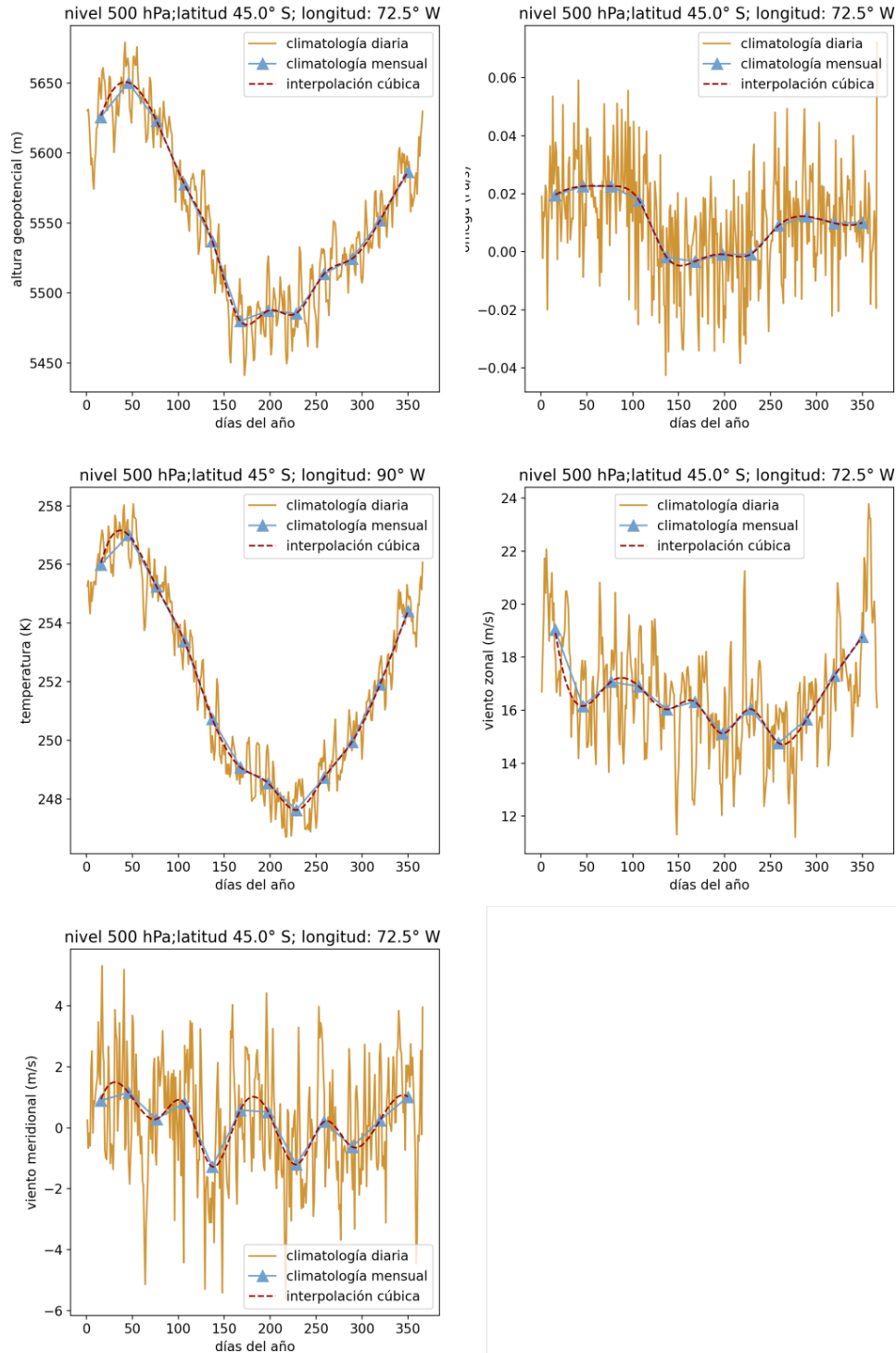


Figura 10.20: Ejemplo de Climatología a nivel 500 hPa para un punto en el espacio de las distintas variables altura geopotencial, omega, temperatura, viento zonal y viento longitudinal. Línea café: Climatología diaria 30 años, periodo 1991 al 2020; Triángulo azul: climatología mensual; Línea segmentada roja: interpolación cúbica de la climatología mensual. Construido a partir datos reanálisis NCEP-NCAR periodo 1991-2000.

<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

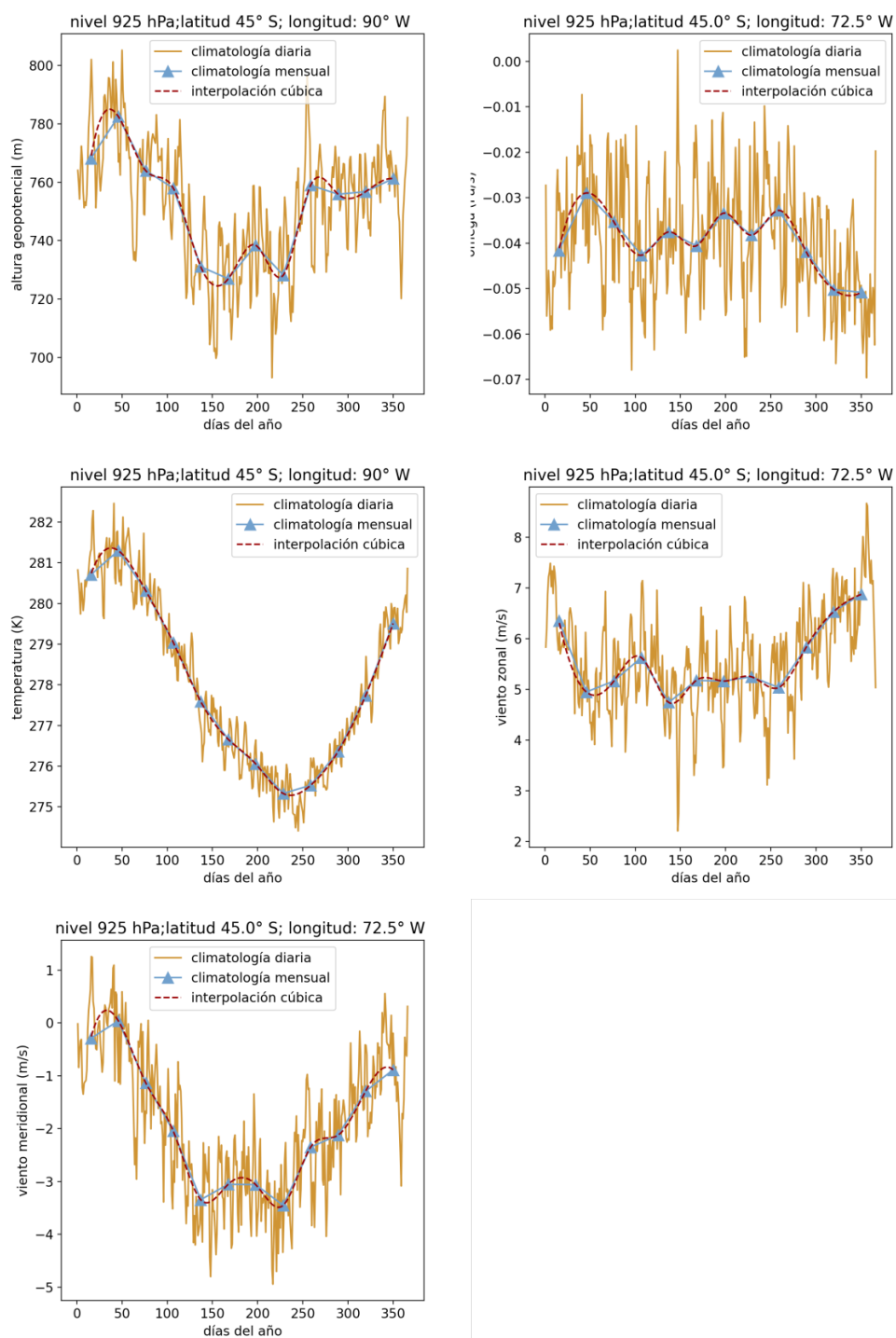


Figura 10.21: Ejemplo de Climatología a nivel 925 hPa para un punto en el espacio de las distintas variables altura geopotencial, omega, temperatura, viento zonal y viento longitudinal. Línea café: Climatología diaria 30 años, periodo 1991 al 2020; Triángulo azul: climatología mensual; Línea segmentada roja: interpolación cúbica de la climatología mensual. Construido a partir datos reanálisis NCEP-NCAR periodo 1991-2000.

<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

10.14. Gráficos tipo caja y violín

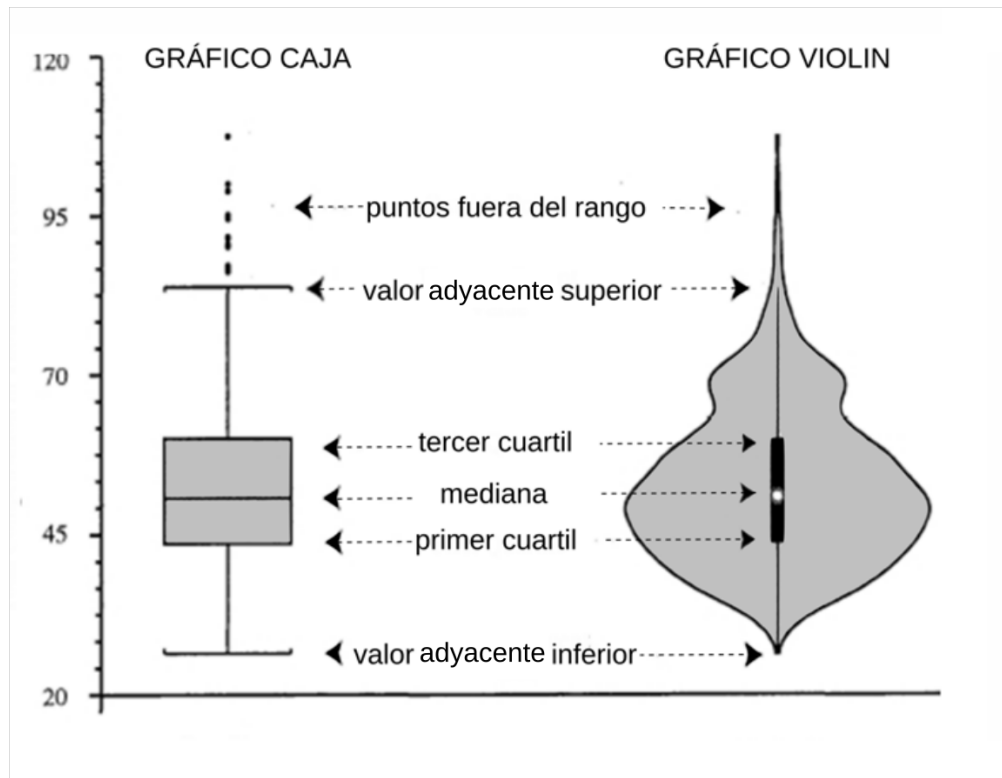


Figura 10.22: Ejemplo para la interpretación de los gráficos de caja Adaptado a partir de fuente: <https://towardsdatascience.com/violin-plots-explained-fb1d115e023d>