



UNIVERSIDAD DE CHILE-FACULTAD DE CIENCIAS-ESCUELA DE CIENCIAS
AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

**“EFECTO DE LA CUARENTENA INTERPUESTA PRODUCTO DEL COVID-19 EN
LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN CALAMA,
SANTIAGO Y TEMUCO DURANTE EL 2020.”**

Seminario de Título entregado por la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de
los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental.

TATIENNE CAMILA SCOTT GARRIDO

Director de seminario de Título:

Agosto 2021

Santiago – Chile

ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA - FACULTAD DE
CIENCIAS - UNIVERSIDAD DE CHILE



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

“EFECTO DE LA CUARENTENA INTERPUESTA PRODUCTO DEL COVID-19 EN
LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN CALAMA, SANTIAGO
Y TEMUCO DURANTE EL 2020.”

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el Srta. Tatienne Camila Scott Garrido. Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico con mención Medio Ambiente.

Director Seminario de Título:

Comisión revisora y evaluadora

Presidente Comisión:

Evaluador:

Santiago de Chile,

BIOGRAFÍA



Tatienne Scott Garrido nació el 25 de agosto de 1995. Desde pequeña su madre le enseñaba química y juegos matemáticos, durante su escolaridad tomo talleres con distintos enfoques científicos por lo que desarrollo intereses en la ciencia y el medio ambiente. El año 2014 tomo su primer curso en la Universidad de Chile , Astronomía en los cursos de veranos y el 2015 entro a estudiar Química Ambiental en la misma universidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Madre y hermana por su infinita paciencia durante todo el proceso universitario. Quienes a su modo influyeron en mi para lograr llegar al final.

A mis abuelas Eliana y Marta que con su cariño y locuras lograron endulzar el proceso. Y finalmente pero no al último a mi profesor guía Carlos Manzano quien motivó mi interés hacia las ciencias atmosféricas de una manera global y no centralizada, y quien además de ser un docente dedicado se convirtió en un amigo, gracias por la paciencia y los miles de consejos. Los recursos y fondos que financiaron este proyecto fueron parte del proyecto ANID FONDECYT 11180151.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
I. Introducción.....	1
1.1 La pandemia del SARS-COV-2 del periodo 2020.....	1
1.2 Material Particulado Atmosférico.....	3
1.3 MP y COVID-19.....	5
1.4 Planteamiento del problema.....	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	8
II. Metodología.....	9
3.1 Área de estudio.....	9
3.2 Recolección de datos.....	12
3.3 Validación y procesamiento de datos.....	12
3.4 Ajuste de fecha.....	13
3.5 Estacionalidad y estimador Theil Sen.....	14
3.6 Generación promedios históricos.....	14
3.7 El año pandémico vs el año histórico.....	15
3.8 Análisis estadístico.....	15
3.9 Factores meteorológicos.....	16
III. Resultados.....	17

4.1.	Calama.....	18
4.1.a	Resumen de datos.....	18
4.1.b	Tendencia histórica.....	19
4.1.c	Definiendo el promedio histórico de MP_{10} y $MP_{2,5}$	20
4.1.d	Comparando el año 2020 con el promedio histórico.....	23
4.1.e	Factores ambientales; velocidad del viento y precipitaciones.....	25
4.1.f	Diagrama resumen.....	27
5.1	Santiago.....	28
5.1.a.	Resumen de datos.....	28
5.1.b.	Tendencia histórica.....	29
5.1.c.	Definiendo el promedio histórico de MP_{10} y $MP_{2,5}$	31
5.1.d.	Comparando el año 2020 con el promedio histórico.....	33
5.1.e.	Factores ambientales; velocidad del viento y precipitaciones.....	36
5.1.f.	Diagrama resumen.....	39
6.1	Temuco.....	40
6.1.a	Resumen de datos.....	40
6.1.b	Tendencia histórica.....	41
6.1.c	Definiendo el promedio histórico de MP_{10} y $MP_{2,5}$	43
6.1.d	Comparando el año 2020 con el promedio histórico.....	45
6.1.e	Factores ambientales; velocidad del viento y precipitaciones.....	48
6.1.f	Diagrama resumen.....	51
IV.	Discusión.....	53

V.	Conclusiones.....	68
VI.	Referencias.....	70
VII.	Anexo.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de datos, concentración $\frac{\mu g}{m^3}$ mensual por año en Calama.....	18
Tabla 2. Número de episodios por periodo y significancia, MP_{10}	24
Tabla 3. Número de episodios por periodo y significancia, $MP_{2,5}$	25
Tabla 4. Número de episodios de precipitación con más de 1 mm diario, Calama.....	26
Tabla 5. Número de episodios por periodo y significancia luego de la eliminación por precipitación, Calama MP_{10} y $MP_{2,5}$	27
Tabla 6. Resumen de datos, concentración $\frac{\mu g}{m^3}$ mensual por año ciudad de Santiago.....	29
Tabla 7. Número de episodios por periodo y significancia, Santiago MP_{10}	34
Tabla 8. Número de episodios por periodo y significancia, Santiago $MP_{2,5}$	36
Tabla 9. Resumen de episodio de precipitación superior a 1 mm diario, Santiago.....	38
Tabla 10. Número de episodios por periodo y significancia luego de la eliminación por precipitación, Santiago MP_{10} y $MP_{2,5}$	38
Tabla 11. Resumen de datos, concentración $\frac{\mu g}{m^3}$ mensual por año ciudad de Temuco....	40
Tabla 12. Número de episodios por periodo y significancia, MP_{10}	47
Tabla 13. Número de episodios por periodo y significancia, $MP_{2,5}$	48
Tabla 14. Número de episodios de precipitación con más de 1 mm diario, Temuco....	50
Tabla 15. Número de episodios por periodo y significancia luego de la eliminación por precipitación, Temuco MP_{10} y $MP_{2,5}$	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de tendencia Calama MP_{10}	19
Figura 2. Gráfico de tendencia Calama $MP_{2,5}$	20
Figura 3. Generación del promedio histórico Calama MP_{10} , secuencia de gráficos.....	21
Figura 4. Generación del promedio histórico Calama MP_{10} , secuencia de gráficos.....	22
Figura 5. Gráfico comportamiento 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Calama MP_{10}	23
Figura 6. Gráfico comportamiento 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Calama $MP_{2,5}$	24
Figura 7. Velocidad del viento histórico y promedio mensual $\left[\frac{m}{s}\right]$ del 2020, Calama.....	25
Figura 8. Dispersión de MP_{10} versus $MP_{2,5}$ por niveles de velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$, Calama.....	26
Figura 9. Diagrama del proceso Calama.....	28
Figura 10. Gráfico de tendencia Santiago MP_{10}	30
Figura 11. Gráfico de tendencia Santiago $MP_{2,5}$	31
Figura 12. Generación del promedio histórico Santiago MP_{10} , secuencia de gráficos...	32
Figura 13. Gráfico de Santiago $MP_{2,5}$, promedio histórico y límites de confianza al 95%.....	33
Figura 14. Comportamiento del 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Parque O'Higgins MP_{10}	34
Figura 15. Comportamiento del 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Parque O'Higgins $MP_{2,5}$	35

Figura 16. Velocidad del viento histórico y promedio mensual del 2020 $\left[\frac{m}{s}\right]$, Santiago.....	36
Figura 17. Dispersión de MP_{10} versus $MP_{2,5}$ por niveles de velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$, Santiago.....	37
Figura 18. Diagrama del proceso Santiago.....	39
Figura 19. Gráfico de tendencia Temuco MP_{10}	42
Figura 20. Gráfico de tendencia Temuco $MP_{2,5}$	43
Figura 21. Generación del promedio histórico Temuco MP_{10} , secuencia de gráficos.....	44
Figura 22. Generación del promedio histórico Temuco $MP_{2,5}$, secuencia de gráficos.....	45
Figura 23. Comportamiento del 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Temuco, Padre las casas, MP_{10}	46
Figura 24. Comportamiento 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Temuco estación Padre las casas, $MP_{2,5}$	47
Figura 25. Velocidad del viento histórico y promedio mensual del 2020 $\left[\frac{m}{s}\right]$, Temuco.....	49
Figura 26. Dispersión de MP_{10} versus $MP_{2,5}$ por niveles de velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$, Temuco.....	50
Figura 27. Diagrama del proceso Temuco.....	52

RESUMEN

Actualmente se está viviendo la pandemia del COVID-19 a nivel mundial y, para evitar el aumento en los contagios, se han tomado medidas estrictas de movilidad poblacional a nivel mundial. Estas medidas han causado grandes efectos ambientales, como la reaparición de especies de animales silvestres en zonas urbanas, la disminución en la contaminación de ríos y lagos transitados, y la disminución en la concentración de contaminantes atmosféricos en grandes ciudades. Es por esto que se han publicado estudios que analizan el efecto del confinamiento en contaminantes atmosféricos, encontrando diferencias en las concentraciones previas a la cuarentena y durante la cuarentena. Sin embargo, han sido limitados a cortos tiempos de estudios y muchos han sufrido la falta de análisis de las variables meteorológicas asociadas.

Este proyecto busca determinar el efecto de la cuarentena en la concentración del material particulado atmosférico fino y total respirable en tres ciudades de Chile: Calama, Santiago y Temuco. Las tres ciudades presentan concentraciones y comportamientos distintos debido a sus características geográficas, tipos de fuentes de emisión y estilo de vida de los habitantes.

El análisis se realizó día a día (promediando concentraciones horarias), luego se promediaron los mismos días de cada año (año juliano modificado) durante el periodo 2015-2019 para ser comparado con 2020. Por medio de pruebas estadísticas se determinaron los días que presentaron concentraciones significativamente distintas del promedio histórico. Adicionalmente se agregaron variables de precipitaciones y velocidad del viento; para este último se aplicó una prueba de correlación para determinar la relación entre la concentración de material particulado (MP) y la velocidad del viento. Del análisis se obtuvo el número de días por estación de monitoreo en los

que se observó un cambio significativo en la concentración de material particulado registrada, posiblemente producto del confinamiento.

La ciudad de Calama estuvo en confinamiento 105 días del 2020 de los cuales menos del 20% de estos días presentaron una disminución significativa y la mayor cantidad de episodios de aumento significativo se presentó durante la cuarentena. El estudio determinó que no existe correlación entre la concentración de MP con la velocidad de viento. Para la comuna de Santiago la concentración de $MP_{2.5}$ disminuyó el año 2020, esto se asocia a la disminución en la movilidad, pero para MP_{10} esto no ocurrió. Ambos MP muestran un comportamiento similar a lo que se presenta desde el 2015, disminución para $MP_{2.5}$ y estabilidad de la concentración de MP_{10} . Se determinó una correlación fuerte entre la velocidad del viento y $MP_{2.5}$ y moderada para MP_{10} . Finalmente, Temuco estuvo un total de 39 días en confinamiento y en general la concentración de MP diario se muestra menor al promedio histórico, esto se puede asociar principalmente al cumplimiento del plan de descontaminación de la zona, sin embargo, el periodo que presenta las mayores concentraciones de MP muestra para el 2020 una alta cantidad de datos inválidos. Para ambas fracciones de MP se determinó una correlación entre concentración y velocidad del viento. Para $MP_{2.5}$ fue de tipo fuerte y para MP_{10} moderada. Con respecto al efecto global de las cuarentenas interpuestas por el COVID-19 no es posible indicar que tuvo un efecto significativo en las concentraciones de MP de las tres ciudades estudiadas. Además, tampoco es posible determinar que las cuarentenas causaron el mismo efecto en las concentraciones de MP en todas las ciudades estudiadas, esto debido a que poseen fuentes de emisión distintas dependiendo de la región.

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic is currently active worldwide, and to avoid the spreading of infections, strict population mobility measures have taken place worldwide. These measures have caused environmental effects, such as the reappearance of animal wild species in urban areas, a decrease in the pollution of rivers, lakes with relatively high traffic, and a decrease in the concentration of atmospheric pollutants in large cities. Furthermore, studies have been published to analyze the effect of the confinement on air pollutants, finding differences in concentrations before the quarantines and during quarantines. However, they have been limited to short time periods and there is sometimes a lack of analysis of the associated meteorological variables.

This project seeks to determine the effect of the quarantines on the concentration of atmospheric particulate matter (PM) 10 and 2.5 in three cities of Chile: Calama, Santiago, and Temuco. The cities showed different atmospheric particulate matter concentration patterns and behaviors due to their distinct geographic characteristics, types of emission sources, and the general lifestyle of their inhabitants.

The analysis was carried out day by day, using one-hour averaged concentrations. The daily concentrations were again averaged for the 2015-2019 period (using a modified Julian calendar format), which was compared to 2020. The results were evaluated to determine if the differences observed were statistically different to the historical average. Additionally, precipitation and wind speed variables were also considered. A correlation test was applied to determine the relationship between PM concentration and wind speed. The number of days that were significantly to the PM historical average concentration was obtained for each monitoring station.

The city of Calama was in confinement for 105 days in 2020. Less than 20% of these days showed a significant decrease, and significant increases occurred during the quarantine. The study determined that there was no correlation between PM concentration and wind speed. For the municipality of Santiago, the concentration of $PM_{2.5}$ decreased in 2020, which was associated with the decrease in mobility, but this was not observed for PM_{10} . Both PM fractions showed a similar behavior to what has been observed since 2015: a decrease for $PM_{2.5}$ and stability of PM_{10} concentration. A strong correlation was determined between wind speed and $PM_{2.5}$ and a moderate correlation for PM_{10} . Finally, Temuco spent a total of 39 days in confinement, and in general, the daily PM concentrations were lower than the historical average. This can be mainly associated with compliance with the decontamination plan of the area. However, the period that presented the highest PM concentrations showed many days with invalid data for 2020. For both PM fractions, a correlation between concentration and wind speed was determined, which was strong for $PM_{2.5}$, and moderate for PM_{10} .

Regarding the global effect of the quarantines due to the COVID-19, a significant effect on the concentrations of MP in the three cities studied was not observed. Furthermore, it was not possible to determine that quarantines caused the same effect on MP concentrations in all the cities studied, this since they had different emission sources depending on the region.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 La pandemia del SARS-COV-2 del periodo 2020

La pandemia de COVID-19 es producto de una enfermedad infecciosa viral producida por el SARS-CoV-2. El origen del virus se sitúa en Wuhan, China. El 31 de diciembre de 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recibió la notificación de casos de neumonía sin causa clara y el 9 de enero del 2020 el Centro Chino para el Control y Prevención de Enfermedades identifica un nuevo tipo de coronavirus.

A partir de ese momento se centra la atención en la evolución de los casos. Para el 30 de enero de 2020, China contaba con 9 700 casos confirmados y 109 casos en otros países, ese día la OMS declara la situación como emergencia de salud de carácter internacional (OPS & OMS, 2020).

El primer contagiado en América fue detectado el 25 de enero en Estados Unidos, y en Chile se declara el primer caso el día 3 de marzo de 2020. Desde ahí comienza el esparcimiento de virus a lo largo del país. La primera ola presentó el pico el día 14 de junio del 2020 con un total de 6 938 casos, mientras que la segunda ola mostró 9 171 casos el día 9 abril de 2021 (Gobierno de Chile, 2021).

Los primeros meses de la pandemia la enfermedad se caracterizó como respiratoria, ya que dentro de los síntomas se pueden encontrar síndromes respiratorios, fiebre y diarrea (OMS, 2020). Sin embargo, a principios del 2021 un estudio publicado por el Instituto *Salk* de Estados Unidos clasifica la enfermedad como principalmente cardiovascular (Lei y col., 2021). Dado a que es un virus reciente y ha generado impacto a nivel mundial es que se han realizado estudios sobre cómo ha afectado el virus en distintos ámbitos de

la vida cotidiana. Inicialmente se desarrollaron investigaciones para determinar la mayor cantidad de síntomas posibles a presentar por una persona contagiada dentro de los cuales se encuentran dolor de cabeza, fiebre, neumonía, tos seca, fatiga y náuseas (Quiroz Carrillo y col., 2020). Sin embargo, un estudio comparó síntomas de personas COVID-19 positivos y casos negativos, determinando que ambos grupos presentaban síntomas similares y que los casos positivos mostraban diarreas y trastornos del gusto y olfato a diferencia de los casos negativos, considerando así estos síntomas como marcadores de COVID-19.

Para determinar la contagiosidad de una nueva enfermedad se utiliza el R_0 o número reproductivo básico, el cual es determinado por número de infectados que dejará una persona contagiada. Por ejemplo, la gripe de 1918, que dejó a 50 millones de personas muertas, contaba un R_0 de 1,4 a 2,8 (Shabir, 2020); para el COVID-19 el valor de R_0 calculado varía dependiendo del país, en el Reino Unido se calculó un R_0 de 1,5 a 3,5 y en Argentina uno de 1,4 a 2,5 al inicio de la pandemia.

Debido a que es un virus nuevo y presenta alta contagiosidad es que se han debido tomar medidas a nivel mundial para evitar el aumento de casos como el aislamiento de ciudades, cierres de fronteras o prolongadas cuarentenas. Esto ha generado grandes consecuencias sociales como el distanciamiento social y aumento de enfermedades mentales; económicos con el aumento del desempleo, disminución de las horas laborales y cierre de locales; y medioambientales como la reaparición de animales en zonas pobladas o la descontaminación de ríos con alta afluencia de barcas y que por la cuarentena debieron detenerse, entre otros (Torres & Landines, 2020).

Los estudios en relación con el COVID-19 no se limitan a determinación de sintomatología o análisis de factores de riesgos. En Italia, por ejemplo, se realizó un estudio para determinar si existe una correlación entre la contaminación atmosférica y

los índices de calidad del aire con el aumento de casos COVID-19. En este estudio se determinó que existe una relación positiva entre ambas variables, aumentando los casos cuando las concentraciones atmosféricas de material particulado (MP) son mayores (Zoran y col., 2020). En paralelo un grupo de investigadores estudiaron la vinculación entre la mortalidad en personas con COVID-19 y la contaminación del aire en distintas ciudades de Asia. Al igual que el estudio realizado en Italia, se pudo determinar que existe una correlación entre la mortalidad por COVID-19 y el aumento en concentración de MP fino; no así con el MP total respirable (Gupta y col., 2020).

1.2 Material Particulado Atmosférico (MP)

El MP es una mezcla compleja de partículas líquidas o sólidas que se encuentran en suspensión en el aire. Se estudian comúnmente tres fracciones de MP: el MP total respirable (MP_{10}) que considera partículas menores a 10 μm en diámetro aerodinámico, MP fino ($MP_{2,5}$), con partículas menores a 2,5 μm en diámetro, y MP ultrafino (MP_1) que considera partículas menores a 1 μm (Jorquera González & Rizzi Campanella, 2015). La norma primaria de calidad del aire en Chile establece como concentración anual $50 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ para MP_{10} y una concentración de 24 horas de $120 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ (BCN, 1998) y para $MP_{2,5}$ establece $20 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ como concentración anual y $50 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ como concentración de 24 horas (BCN, 2011). Para determinar estas concentraciones Chile cuenta con una red de monitoreo a nivel nacional que determina las concentraciones de las dos primeras fracciones; el Sistema de Monitoreo Nacional de Calidad del Aire (SINCA). El MP es considerado un contaminante atmosférico que puede ser nocivo para la salud, generando enfermedades principalmente respiratorias, esto debido al diámetro aerodinámico de las partículas. Estas pueden entrar al cuerpo por medio de la

respiración llegando hasta los pulmones; partículas menores a $2,5\ \mu\text{m}$ llegarían incluso a los bronquiolos terminales y alvéolos y de ahí podrían ser transportados por el torrente sanguíneo a otros órganos (Oyarzún G, 2010).

El MP tiene diversas fuentes (Tolosa, 2010), que pueden ser de carácter antropogénico o natural. Las fuentes se pueden clasificar en tres tipos: a) fuentes estacionarias de ubicación fija, que consideran las emisiones producto de la quema de combustibles externos o internas y de carácter industrial o residencial, procesos evaporativos, quema de biomasa, rellenos sanitarios e incendios forestales, b) fuentes móviles que consideran la emisión producida por fuentes en movimiento como vehículos, ya sean particulares o pequeños (en ruta) o maquinaria agrícola, de construcción o utilizada en puertos (fuera de ruta); y c) fuentes fugitivas, las cuales no están canalizadas por ductos, algunas de ellas son la resuspensión de polvo de calles, erosión eólica, polvo natural o por preparación de terreno.

La composición química del MP viene dada por la fuente de emisión de la que proviene. En Perú, por ejemplo, un análisis de las muestras de MP determinó que para el MP_{10} , la principal fuente es el suelo ya que la composición es de carácter geológico mostrando elementos como silicio, calcio, aluminio, hierro y potasio. Adicionalmente se determinó la presencia de metales como magnesio, titanio, sodio, zinc, manganeso y plomo. Los metaloides encontrados fueron silicio, arsénico y antimonio y los no metales detectados fueron azufre, cloro, fósforo, bromo y selenio. En la fracción fina se encontraron los mismos elementos, pero en una cantidad tres veces menor para metales y metaloides a diferencia de los no metales que aumentaron al doble. El elemento más abundante fue el azufre, lo que podría estar relacionado con la quema de biomasa y la combustión de Diesel (Suárez-Salas y col., 2017).

Otra característica importante para considerar es que algunas moléculas al llegar al aire sufren transformaciones, generando MP secundario. Ejemplo de esto son los óxidos de azufre y nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (COV) y semi volátiles (COSV), ya que todos pueden ser oxidados en la atmósfera. Los primeros pueden generar ácidos nítrico y sulfúrico, que a su vez pueden producir sulfato de amonio y nitrato de amonio cuando reaccionan con el amoníaco. Y los compuestos orgánicos COV y COSV pueden oxidarse para generar compuestos de mayor peso molecular (Jorquera & Villalobos, 2020).

1.3 MP y COVID-19

Dada las medidas de prevención interpuestas para evitar contagios por COVID-19, y el efecto de éstas sobre las fuentes de emisión, es que se planteó la posibilidad de una disminución en las concentraciones de MP, basadas en la reducción de la movilidad.

Esta hipótesis fue comprobada según una investigación realizada en las principales ciudades de Colombia. El estudio realizó mediciones ópticas con el satélite Terra/MODIS y pudo concluir que hubo una disminución en las concentraciones semanales de $MP_{2,5}$ en un 17% a 86%, dependiendo de la ciudad, durante el periodo de cuarentena (Arregocés y col., 2021). Esta disminución fue asociada a la reducción del tráfico vehicular y por ende a la baja movilidad.

En Malasia también se determinó una disminución en la concentración de MP fino producto del control de movilidad. Se concluyó que las concentraciones disminuyeron en hasta un 58,4%, y se lo atribuyó a una reducción en la movilidad de vehículos motorizados y a la suspensión del funcionamiento industrial (Abdullah y col., 2020).

En Chile las cuarentenas interpuestas fueron de carácter dinámico, cada región del país ha mostrado un comportamiento diferente entre ellas en torno a los contagios activos y

al número de camas disponibles en hospitales; estos son los principales factores para determinar si una comuna entra a cuarentena o no. En el país se establecieron cinco etapas de confinamiento: Paso 1 o de cuarentena, paso 2 o de transición, paso 3 o de preparación, paso 4 o de apertura inicial y paso 5 o de apertura avanzada. Las restricciones de cada uno de los pasos fueron variando durante el 2020 por lo que para realizar el trabajo se considerará como cuarentena solo el paso 1° que establece restricción de movilidad total, a excepción de actividades esenciales, como abastecimiento del hogar o trabajos indispensables para el país.

Algunos estudios ya han podido determinar que la cuarentena ha disminuido las concentraciones. En Perú por ejemplo se determinó una disminución de un 50% aproximadamente en la concentración de MP_{10} , $MP_{2,5}$ y NO_x y un aumento en la concentración de ozono en un 59%. Para hacer el análisis se realizaron promedios por periodos; el primero del 1 de febrero al 15 de marzo del 2020 (pre-cuarentena) y el segundo del 16 de marzo al 30 de abril del 2020 (cuarentena), estos periodos se compararon con un histórico del 16 de marzo al 30 abril de los años 2017 a 2019. Se utilizaron datos obtenidos del Sistema Nacional de Meteorología e Hidrología del país y datos de monitoreo espacial (Rojas y col., 2021).

Si bien es un análisis tradicional, se vuelve complejo utilizar el mismo método en Chile debido a que las cuarentenas fueron dinámicas, por lo que si se busca comparar el efecto de las cuarentenas entre comunas no podría realizarse en el mismo periodo ya que las comunas podían encontrarse en distintas fases. Cada fase tenía restricciones distintas entre ellas, en torno a movilidad y a realización de actividades.

A diferencia de la gran disminución determinada en el estudio realizado en Perú, un estudio analizó datos de Santiago de Chile y determinó que la disminución de MP_{10} , fue

del -5,2%, $MP_{2,5}$ de un -11%, NO_x de un -54%, CO y O_3 aumento su concentración en un 63%. Para el análisis se usaron promedios horarios obtenidos del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINCA) y del Instrumento de Monitoreo Troposférico Precursor Copernicus Sentinel-5 (Toro A y col., 2021). El estudio utilizó medias anuales por lo que la resolución diaria es acotada. Si bien existe normativa para esta resolución de datos, el análisis diario es más eficiente porque disminuye la dilución de datos y se pueden realizar acciones a corto plazo para hacer cumplir las normativas.

1.4 Planteamiento del problema

Debido a estos estudios es que se plantea la pregunta de si en Chile también se presentó una diferencia en las concentraciones de MP debido a las cuarentenas y otras restricciones interpuestas producto del COVID-19.

Para responder la pregunta se propone un análisis diario y comparativo de las concentraciones de material particulado de tres ciudades de Chile, una de cada macrozona del país. Para la macrozona norte se estudiará la ciudad de Calama, para la zona centro la ciudad de Santiago y para la zona Sur la ciudad de Temuco, comuna Padre las Casas. Para esto se evaluarán concentraciones del año 2020 y los cinco años previos.

2.1 Objetivo general

Determinar si la cuarentena impuesta debido a la pandemia del COVID-19 causó un efecto significativo en las concentraciones de material particulado en Santiago, Temuco y Calama.

2.2 Objetivos específicos

- Generar un promedio histórico de las concentraciones de material particulado de los últimos 5 años en las ciudades estudiadas, junto con un intervalo de confianza.
- Determinar si la concentración registrada el 2020 excedió los intervalos de confianza establecidos.
- Explorar factores meteorológicos que puedan estar asociados al comportamiento observado.
- Comparar los efectos de la cuarentena en las ciudades estudiadas.
- Análisis de bibliografía o información del comportamiento de fuentes de emisión durante el confinamiento para generar propuestas por ciudad de futuras políticas públicas de carácter ambiental.

II. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

Para realizar el estudio se eligieron tres ciudades de Chile, una por cada macrozona. Para esto la ciudad debió contar con al menos una estación de monitoreo de la red SINCA y contar con mediciones de MP y velocidad de viento. Las estaciones escogidas fueron en las ciudades de Calama estación Centro, Santiago estación Parque O'Higgins y Temuco estación Padre las Casas.

Calama: La ciudad de Calama se encuentra en la II Región de Antofagasta, se sitúa al norte de la capital regional Antofagasta y cuenta con una población de 165 731 personas. Geográficamente cuenta con una superficie de 15 596,9 Km^2 y se encuentra a 2 400 metros sobre el nivel del mar. La zona está rodeada por dos unidades ecológicas, el altiplano al oriente por sobre los 3 000 metros de altura y el desierto interior (Ilustre Municipalidad de Calama, 2009). El clima de la zona es desértico frío con precipitaciones de hasta 75 mm anuales.

La principal actividad económica (57%) (GORE Antofagasta, 2021) corresponde a la minería, dados los yacimientos cupríferos de la zona, además de nitrato, yodo, molibdeno, apatita y carbonato (SERNAGEOMIN, 2007). Otras actividades de la región corresponden a comercio y actividades empresariales e inmobiliarias.

La industria minera y el desierto de atacama son las principales fuentes de emisión de material particulado de la ciudad de Calama (González-Rojas y col., 2021). Otros estudios realizados en la región determinaron que las principales fuentes de emisión en Tocopilla para $MP_{2,5}$ corresponden en orden decreciente a sulfatos, emisiones fugitivas de manipulación y almacenamiento de fertilizantes, combustión de carbón y petróleo residual, sal marina, procesamiento de productos cupríferos y mezcla mixta de polvo;

para MP_{10} las principales fuentes corresponden a sal marina, partículas provenientes del procesamiento de cobre mezclado con polvo de suelo, sulfatos y partículas de origen fertilizante (Jorquera, 2009).

Según un estudio del Centro Nacional para el Medioambiente, en Calama la concentración de $MP_{2,5}$ fue de $15 \frac{\mu g}{m^3}$ como promedio anual para el 2013 y fueron emitidas principalmente por fundiciones, procesos industriales, termoeléctricas y otros. Con respecto al MP_{10} la concentración anual para el año 2013 fue de $47 \frac{\mu g}{m^3}$ (CENMA, 2014). Desde el 2009 Calama está declarada como zona saturada de MP_{10} .

Santiago, Santiago centro: La comuna de Santiago se encuentra en la región Metropolitana, consta de una población de 404 495 personas hasta 2017 y cuenta con una superficie de $22,4 \text{ Km}^2$ (Ilustre municipalidad de Santiago, 2015). Geográficamente la comuna se encuentra en una depresión intermedia entre dos cadenas montañosas: la cordillera de la costa al oeste y la cordillera de los Andes al este. Presenta con un clima mediterráneo con inviernos templados lluviosos y veranos secos y calurosos. Las principales actividades económicas son servicios financieros y empresariales, comercio, restaurantes y hoteles, servicios personales y transporte y telecomunicaciones (CONICYT, 2010).

Con respecto a la especiación del MP de la comuna, se determinó que la composición de $MP_{2,5}$ es variable dependiendo del periodo estacional en el que se encuentre. Para el periodo otoño-invierno se determinó que el 70% corresponde a carbono orgánico (CO) compuesto en su mayoría por humo de leña, emisiones por motor Diesel, vehículos de gasolina y gas natural y un 30% correspondiente a iones inorgánicos secundarios como sulfatos, nitrato y amonio (Villalobos y col., 2015).

La Región Metropolitana está declarada como zona saturada de ozono, material particulado respirable (MP_{10}), partículas en suspensión y monóxido de carbono desde 1996 (BCN, 1996) y zona saturada de material particulado respirable fino ($MP_{2,5}$) desde el 2014 (BCN, 2014).

El Sistema Nacional de Información Ambiental reportó como promedio trianual para la estación de Parque O'Higgins una concentración de $66 \frac{\mu g}{m^3}$, 16 puntos por sobre la norma para MP_{10} y de $28 \frac{\mu g}{m^3}$ para $MP_{2,5}$ es decir 8 puntos por sobre la norma (SINIA, 2019).

Temuco, Padre las casas: Temuco es la capital de la IX Región o región de La Araucanía, cuenta con una población de 282 415 al año 2017, se encuentra a 647 Km (Yáñez León, 2012) del sur de Santiago y a 4,9 Km de la comuna de Padre las Casas cuya población asciende a 76 126 (INE, 2019) de las cuales 45 443 viven en zona urbana y el resto en zona rural para el mismo año. Esta comuna presenta una superficie de $400,7 \text{ Km}^2$, geográficamente se encuentra en una depresión intermedia y de carácter mesopotámica dado que se encuentra entre dos ríos, al sur el río Quepe y al norte el río Cautín. Cuenta con clima mediterráneo de carácter marginal ya que el invierno es templado lluvioso (1 250 mm anuales) y el verano seco pero breve (UFRO & IDER, 2006). Las principales actividades económicas de la zona se basan en el barrio industrial, comercio al por mayor y menor, agricultura, ganadería, caza y silvicultura (Yáñez León, 2012).

Las comunas se declararon zonas saturadas de MP_{10} el año 2005 y para $MP_{2,5}$ el año 2013; el registro anual de concentración de $MP_{2,5}$ fue mayor al límite de $20 \frac{\mu g}{m^3}$ para ambas comunas para el año 2011 (MMA, 2012). La comuna tuvo una concentración trianual durante el periodo 2016 a 2018 de $60 \frac{\mu g}{m^3}$ para MP_{10} y $46 \frac{\mu g}{m^3}$ para $MP_{2,5}$.

El inventario de emisiones del 2004 realizado por CONAMA, indica que la procedencia del MP_{10} correspondía a un 7% a edificios e industria, 4,3% a quema agrícolas e incendios forestales, 1,5% a fuentes móviles y un 87,2% a residencias (quema de leña) (Yáñez León, 2012). Con respecto a la caracterización del $MP_{2,5}$, para la región de la Araucanía el principal origen corresponde a la quema de leña, seguida por fuentes areales y en menor cantidad a calderas, termoeléctricas y otros (MMA, 2012).

Según una compilación de datos realizada en el 2006 se determinó que el consumo de leña de Temuco / Padre las Casas era de entre 4,9 y 6,6 m^3 por vivienda, estableciendo que entre un 68% y 87% de la zona urbana utilizaba este método de calefacción (Gómez-Lobo y col., 2006).

Dadas estas características es que se generaron planes de descontaminación para la zona, enfocadas en la disminución y mejoramiento en la calidad de leña a utilizar.

3.2. Recolección de datos

Los datos de Material Particulado total respirable (MP_{10}) y Material Particulado Fino ($MP_{2,5}$) correspondientes al periodo entre 2015 y 2020 fueron obtenidos de la página web del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire (SINCA, 2021-a) luego de seleccionar la estación deseada. Para este análisis se utilizaron las estaciones de Calama Centro (Región de Antofagasta), Parque O'Higgins (Región Metropolitana) y Padre las Casas II (Región de la Araucanía). Los datos se descargaron en formato ".CSV".

3.3. Validación y procesamiento de datos.

Se crearon archivos independientes por cada estación y tamaño de MP, agrupándolos en hojas individuales por cada año de análisis. Se realizó la validación de datos y

generación de promedios: se consideran valores válidos si la fracción $\frac{MP_{2,5}}{MP_{10}}$, se encuentra entre el rango $[1,0]$ o si la fracción $\frac{MP_{10}}{MP_{2,5}}$ presenta valores >1 ; de no ser así se considerarán valores inválidos (NV) al igual que valores negativos o con error. Cuando un valor queda invalido el valor horario de $MP_{2,5}$ y MP_{10} fueron reemplazados por un “NV”. Para generar el promedio diario se consideran valores registrados desde las 01:00 hasta las 00:00 horas. Estos 24 datos se promedian si al menos 18 de ellos se encuentran válidos. De no ser así el día queda como invalido (NV) (SINCA, 2021-a).

Las otras columnas en cada archivo contenían información correspondiente a “Fecha” (que tiene un formato “Día/Mes/Año Hora: Minuto”), concentración horaria en $\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]$ año, mes, día del mes, hora, estación del año, día de la semana, horas de luz solar diarias, y temporada.

3.4. Ajuste de fecha.

Diversos estudios han determinado que el comportamiento de contaminantes atmosféricos varía dependiendo del día de la semana, siendo distintos los días de lunes a viernes y sábado a domingo. En Chile, las concentraciones de nitratos y ozono muestran diferencia entre días laborables y fines de semana siendo los nitratos los que presentan mayor concentración en días laborales y concentraciones de ozono más altas en fin de semana; a este comportamiento se le dio el nombre de “Efecto fin de semana” (Seguel et al., 2012).

Con el objetivo de evitar problemas asociados al efecto fin de semana, se optó por hacer promedios diarios de comparación (e.g., todos los lunes, todos los martes, etc.). Para esto se optó por usar el calendario juliano que establece como día 1 el primero de enero y como día 365 el 31 de diciembre. Sin embargo, se debió realizar una modificación, que consistió en establecer el día 1 como el primer lunes de enero para cada año, así cada

número 1 del año corresponde al mismo día de la semana (el día 1 siempre será lunes), de esta forma es posible promediar los 5 años de manera directa y con una pérdida mínima de datos por año; a esta variable se le asignó el nombre de “Día S”.

3.5. Estacionalidad y estimador Theil Sen.

Con la finalidad de determinar el comportamiento del 2020 comparado con el promedio histórico, a los datos se les redujo la estacionalidad (fenómeno que describe el comportamiento del MP según la estación del año) (Celis y col., 2007) por medio de la función Theil Sen de OpenAir (Carslaw, 2012) para visualizar la tendencia general de cada estación por tipo de MP. Esta función calcula la regresión lineal mostrando la tendencia temporal de las concentraciones de los contaminantes. Para esto se realizaron dos análisis por tipo de MP por estación, el primero utilizando los datos del periodo 2015 a 2019 y luego el periodo 2015 a 2020 y se compararon las pendientes y sus valores p .

3.6. Generación de promedios históricos.

Posterior a la validación y ajuste de fechas en Excel se calculó el promedio de 24 horas, para esto se seleccionaron los 24 datos horarios y se promediaron si había un mínimo de 18 datos válidos (SINCA, 2021-a), de no ser así el promedio quedó con un “NV”. Luego se usó el calendario juliano modificado para darle un número a cada día, y con esto generar el promedio histórico. Se promediaron los 5 años del 2015 al 2019 que tuvieran el mismo número de día. De este promedio se obtuvo los intervalos de confianza con el comando de Excel.

Posteriormente se promediaron los cinco años (2015-2019) por tipo de MP y ciudad para generar el promedio histórico, utilizando el “Día S”. Luego se calculó con esos mismos 5 datos la desviación estándar y los límites de confianza con un Alpha de 0,05.

3.7. El año pandémico vs el promedio histórico.

Para crear los gráficos del promedio de 5 años se utilizó la función Time plot de OpenAir, realizándose 3 análisis diferentes por tipo de MP y estación:

- Comparación de los 5 años por separado y promedio histórico.
- Comparación de los 5 años por separado, promedio histórico y límites de confianza (LC) del 95%.
- Comparación del promedio histórico y límites de confianza del 95%.

Todos los gráficos se presentan con líneas suavizadas (LS) las cuales representan las tendencias básicas de cada curva. Para generar la suavización se usó el comando *Smooth*, sin cálculo de dispersión de los datos respecto a la línea suavizada (comando “ci=FALSE”)(Carslaw, 2012) .

Además, para hacer más sencilla la lectura se mantienen los mismos colores por año siendo el histórico la línea roja y azul 2020. El último gráfico es con el que posteriormente se comparó el año 2020 para determinar su comportamiento en relación con el promedio de 5 años.

3.8. Análisis estadístico

Teniendo los valores calculados se procedió a realizar una tabla resumen con fecha, columnas de promedio de 24 horas de todos los años (incluido el 2020), límites de confianza y el promedio histórico.

Para determinar la significancia de la variación de las concentraciones presentadas en el 2020 se realizaron diversas pruebas estadísticas (Dietrichson, 2021). Primero se realizó una prueba de normalidad a los datos. Para esto se utilizó la prueba Shapiro-Wilk. Para los datos normales se utilizó la prueba estadística *t*. Para cada promedio de 24 horas se obtuvo un valor de *t*. Cuando un conjunto de datos no fue clasificado como normal se utilizó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon. Para las

tres pruebas utilizada se estableció un valor $p < 0,05$ para rechazar la hipótesis nula. Finalmente se contabilizaron la cantidad de veces que la concentración diaria del año 2020 obtuvo valores p entre los rangos $0,05 > \text{valor } p > 0,02$ y $0,02 > \text{valor } p$ y se generó una tabla de episodios por estación y MP.

3.9. Factores Meteorológicos

De las estaciones de monitoreo de la red SINCA se obtuvo la velocidad del viento de los años estudiados (2015-2020). Se calculó un promedio mensual para cada año (2015-2020) y se generó un diagrama de cajas agrupando los promedios mensuales del 2015 al 2019 y mostrando el promedio mensual del 2020 paralelamente en un diagrama de cajas.

Además, se generó un diagrama de dispersión de los dos MP y la velocidad del viento y se calculó la correlación por el método de *Spearman* de cada uno de los MP y la velocidad del viento.

Se usaron los datos de precipitaciones que fueron obtenidos de la Dirección General de Aguas (DGA, 2021). Para Calama se utilizó la estación que se encuentra en el Aeropuerto (código 220002). Para Santiago la estación más cercana es la ubicada en Quinta Normal cuyo código de estación es 330020 y para Temuco, Padre las Casas se utilizó la estación Manquehue (código 380013).

Se realizó una tabla resumen mensual con el número de episodios en los que precipitó más de un milímetro de agua diario, luego se procedió a eliminar de las tablas de episodios de aumento o disminución significativa los episodios ocurridos los días en que hubo lluvia y el día siguiente y se generó una nueva tabla de episodios.

Finalmente se presenta un diagrama de flujo del proceso de eliminación que se realizó para determinar cuál fue el efecto de la cuarentena por cada estación.

III. RESULTADOS

Los resultados serán presentados por estación de monitoreo, el análisis se realizó día a día, pero para resumir los resultados se presenta una tabla con las concentraciones mensuales de MP_{10} y $MP_{2,5}$, que representan la evaluación tradicional de los cambios históricos de concentraciones, en ella se adicionan su desviación estándar y coeficiente de variación.

Seguido de esto se presentan los gráficos de Theil Sen que muestran la tendencia histórica sin estacionalidad presentada durante los periodos 2015 a 2019 y 2015 a 2020 por ciudad y tipo de material.

Posteriormente se muestran los gráficos de líneas de tiempo (*Time plot*) que buscan evaluar la representatividad del promedio histórico, en ellos se grafican los cinco años estudiados. Una vez determinado el promedio histórico se procedió a comparar con el 2020.

El análisis estadístico se encuentra resumido en 2 tablas por estación que indican el número de episodios de aumento o disminución del promedio de 24 horas del año 2020 con el valor equivalente del promedio de 5 años (comparación de Días S).

Luego se muestra el comportamiento de variables meteorológicas como velocidad del viento y los días en que precipitó más de un milímetro diario y nuevamente la tabla de episodios significativos.

Finalmente se presenta un diagrama que muestra el resumen de la obtención de episodios significativos y correspondientes a períodos de cuarentena del 2020.

4.1 Calama

4.1.a. Resumen de datos.

La tabla 1 muestra los datos resumidos mensualmente comparando los 5 años usados para generar el promedio histórico vs el año pandémico. El MP_{10} mostró coeficientes de variaciones menores al 20,0%, mientras que para $MP_{2,5}$ se presentaron valores de hasta un 30,04%. El MP_{10} presentó 2 meses en los que se superó el promedio histórico (en naranja), mientras que para $MP_{2,5}$ hubo solo un mes de superación (agosto).

Tabla 1. Resumen de datos, concentración $\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]$ mensual por año ciudad de Calama.

	MP_{10}						Promedio histórico	Desviación estándar	%CV
	2015	2016	2017	2018	2019	2020			
Enero	44,19	39,82	28,69	33,03	26,31	27,27	34,41	6,71	19,50
Febrero	39,91	38,95	35,07	28,34	25,57	27,04	33,57	5,70	16,99
Marzo	39,70	34,41	34,81	34,12	28,88	28,05	34,38	3,43	9,98
Abril	38,01	35,56	33,16	30,89	28,99	27,97	33,32	3,21	9,65
Mayo	38,09	40,31	33,03	36,44	30,63	34,70	35,70	3,47	9,73
Junio	45,22	39,77	27,57	35,72	38,18	32,34	37,29	5,78	15,49
Julio	44,26	35,71	35,46	28,44	34,14	37,89	35,60	5,07	14,24
Agosto	42,93	42,73	38,37	29,81	42,22	33,46	39,21	4,99	12,73
Septiembre	40,88	44,44	37,39	33,03	31,76	32,40	37,50	4,74	12,65
Octubre	39,98	38,73	33,01	31,22	34,47	35,80	35,48	3,35	9,44
Noviembre	39,77	35,97	30,07	33,86	34,02	31,08	34,74	3,16	9,10
Diciembre	35,78	35,41	35,13	34,85	31,79	24,45	34,59	1,44	4,15
NV	16	20	23	89	76	84	-	-	-
	$MP_{2,5}$						Promedio histórico	Desviación estándar	%CV
	2015	2016	2017	2018	2019	2020			
Enero	8,29	9,01	9,23	8,52	7,42	5,39	8,49	0,63	7,45
Febrero	9,27	9,85	8,96	8,76	5,71	5,31	8,51	1,45	16,99
Marzo	9,86	9,89	10,44	11,49	5,48	5,23	9,43	2,06	21,84
Abril	8,75	10,91	8,90	8,08	5,18	4,62	8,36	1,85	22,11
Mayo	8,27	11,75	8,55	6,07	4,83	5,24	7,89	2,37	30,04
Junio	10,14	9,61	6,23	5,49	6,26	4,82	7,55	1,93	25,57
Julio	9,65	7,99	6,99	4,72	5,53	4,87	6,98	1,75	25,10
Agosto	9,04	9,11	6,89	5,22	6,47	8,24	7,35	1,52	20,64
Septiembre	8,51	9,68	7,23	5,21	5,24	5,02	7,18	1,77	24,68
Octubre	8,61	7,50	5,85	4,90	6,05	4,45	6,58	1,31	19,95
Noviembre	10,41	6,95	6,47	6,61	4,59	4,28	7,00	1,89	27,01
Diciembre	10,69	8,19	8,71	8,02	5,89	5,64	8,30	1,53	18,47
NV*	16	20	23	89	76	84	-	-	-

*NV corresponde a número de datos inválidos. Color verde, indica promedio inferior al promedio histórico y color naranja indica promedio superior al promedio histórico.

4.1.b. Tendencia Histórica.

Las tendencias para MP_{10} se muestran en la Figura 1. Durante el periodo 2015-2019 se observó una pendiente de -2,43 con un valor $p < 0,001$ y un intervalo de confianza 95% de -3,08 a -1,82 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$, lo que indica que en esta estación la concentración de MP_{10} ha disminuido significativamente durante los 5 años estudiados. Al agregar los valores del 2020 la tendencia a la baja se mantuvo, pero con el aumento de la pendiente asociada a -2,16 con valor $p < 0,001$ y un intervalo de confianza 95% de -2,6 a -1,68 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$.

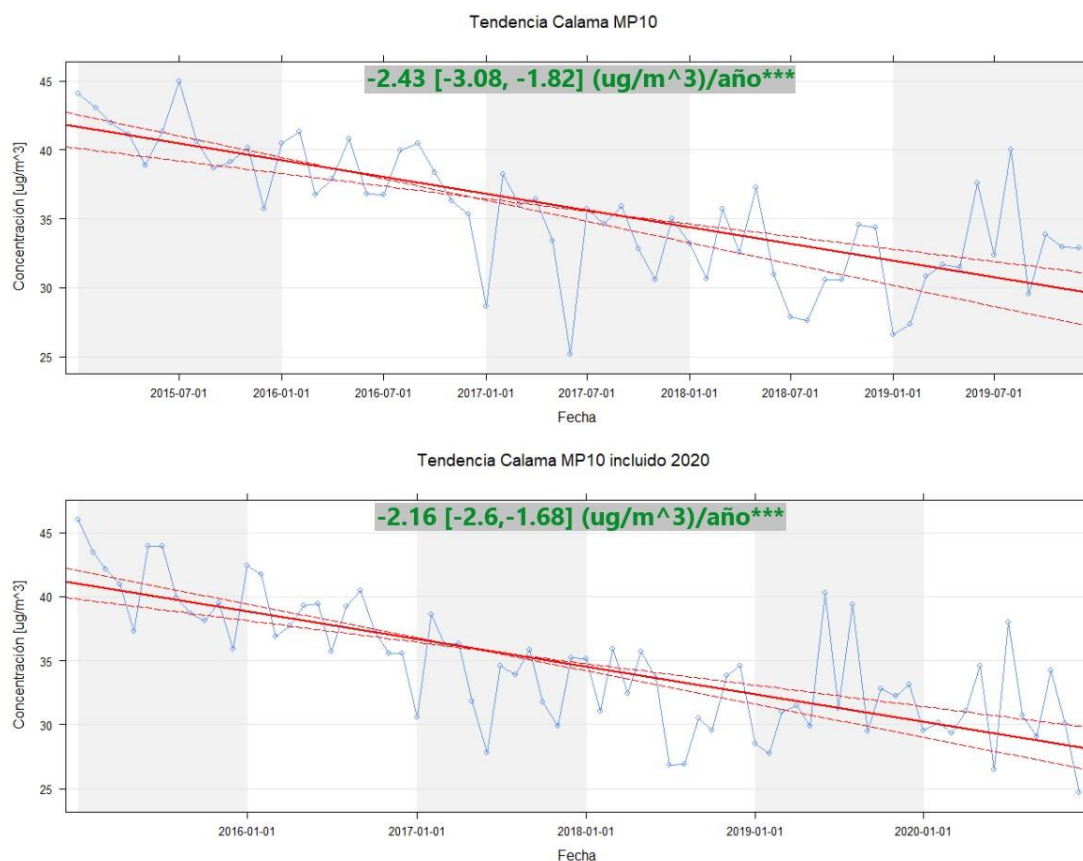


Figura 1. Gráfico de tendencia Calama MP_{10} .

Para $MP_{2,5}$ el periodo 2015-2019 (Fig. 2) presentó una pendiente de -0,94 y un valor $p < 0,001$ con un intervalo de confianza de 95% de $-1,18$ a $-0,73 \left[\frac{\mu g}{m^3} \right]$ indicando que la concentración de $MP_{2,5}$ ha disminuido durante el periodo de 5 años. Al añadir el 2020 al igual que lo ocurrido en MP_{10} , la tendencia a la disminución se mantiene y la pendiente aumentó a -0,91 con valor $p < 0,001$ variando de $-1,05$ a $-0,79 \left[\frac{\mu g}{m^3} \right]$.

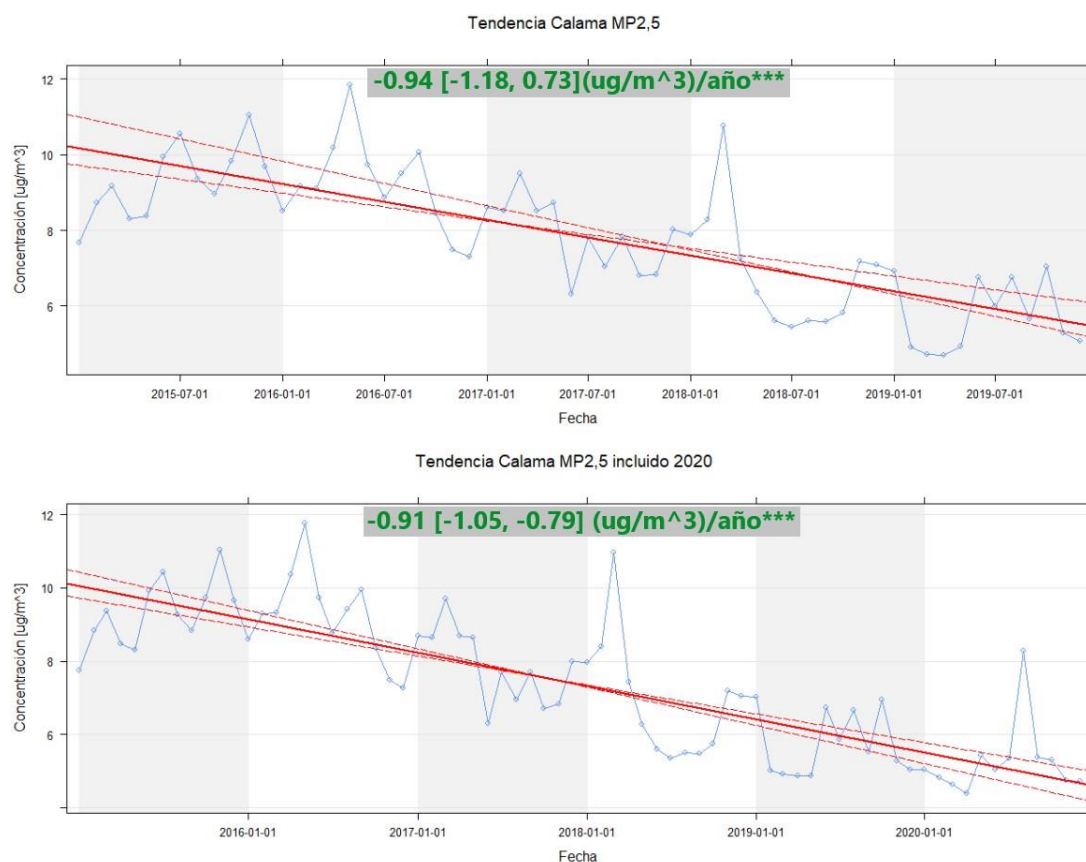


Figura 2. Gráfico de tendencia Calama $MP_{2,5}$.

4.1.c. Definiendo el promedio histórico de MP_{10} y $MP_{2,5}$

Las figuras 3 y 4 muestran el comportamiento diario del periodo 2015-2019. Las concentraciones se mantienen entre 20 y 60 $\left[\frac{\mu g}{m^3} \right]$ mayoritariamente durante todo el año con las LS entre 20 y 45 $\left[\frac{\mu g}{m^3} \right]$, para el MP_{10} (Fig. 3). La LS histórica se encuentra cerca

de todos los años estudiados, se puede observar que por ejemplo el 2015 presenta la LS en su totalidad por encima del promedio histórico mientras que el 2018 y 2019 presentan periodos que estuvieron por debajo del promedio histórico, al agregar los límites de confianza (LC) no se muestran LS por fuera de los LC.

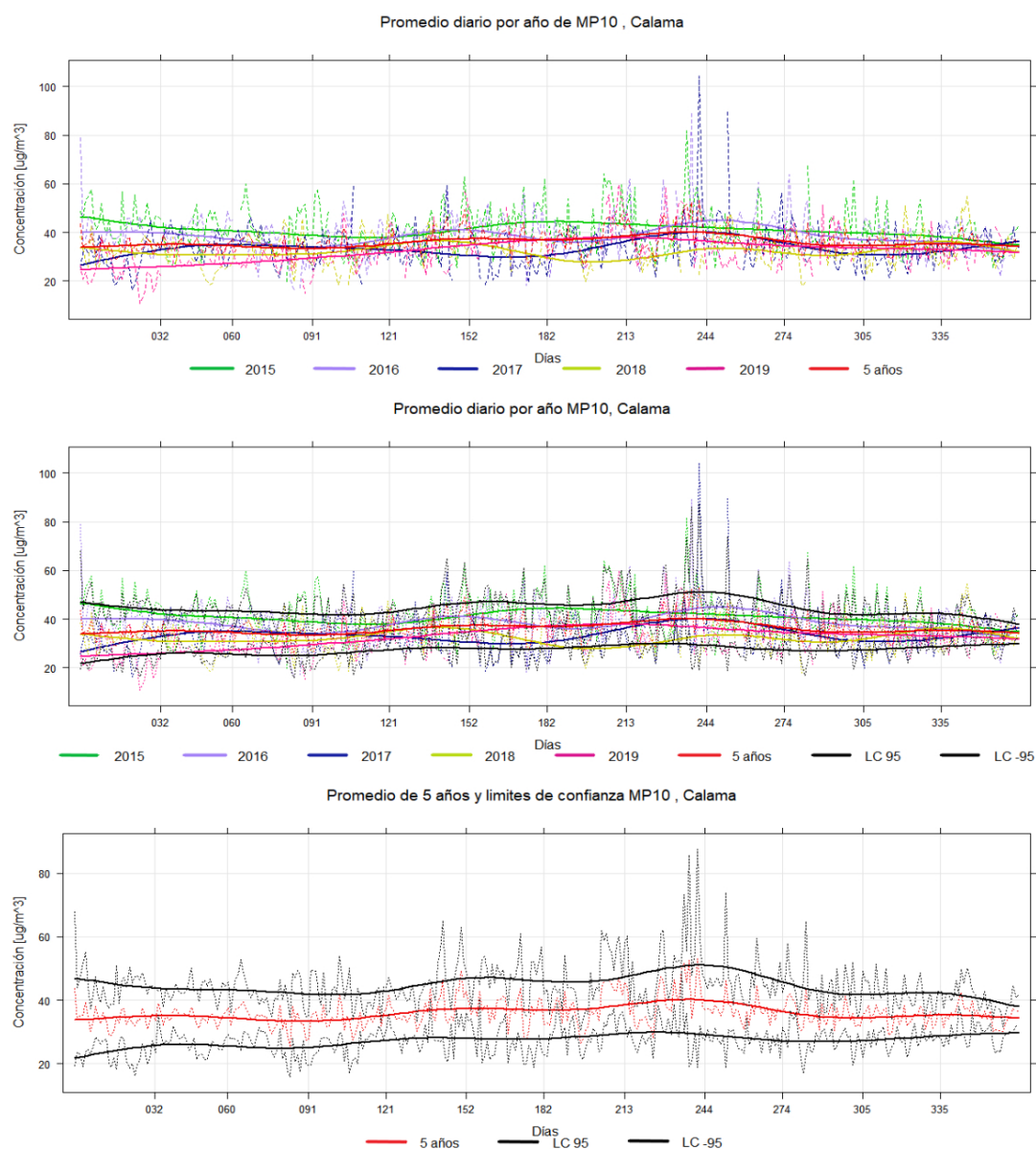


Figura 3. Generación del promedio histórico Calama MP_{10} , secuencia de gráficos.

Para $MP_{2,5}$ (Fig. 4), se presenta el mismo comportamiento de no estacionalidad y concentraciones entre los 3 y 15 $\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]$. Las LS se encuentran entre los mismos valores, en estos datos se observan LS aparentemente más alejados del promedio histórico, sin embargo, al agregar los LC el año 2015 y 2019 muestran secciones de las LS por fuera de ellos.

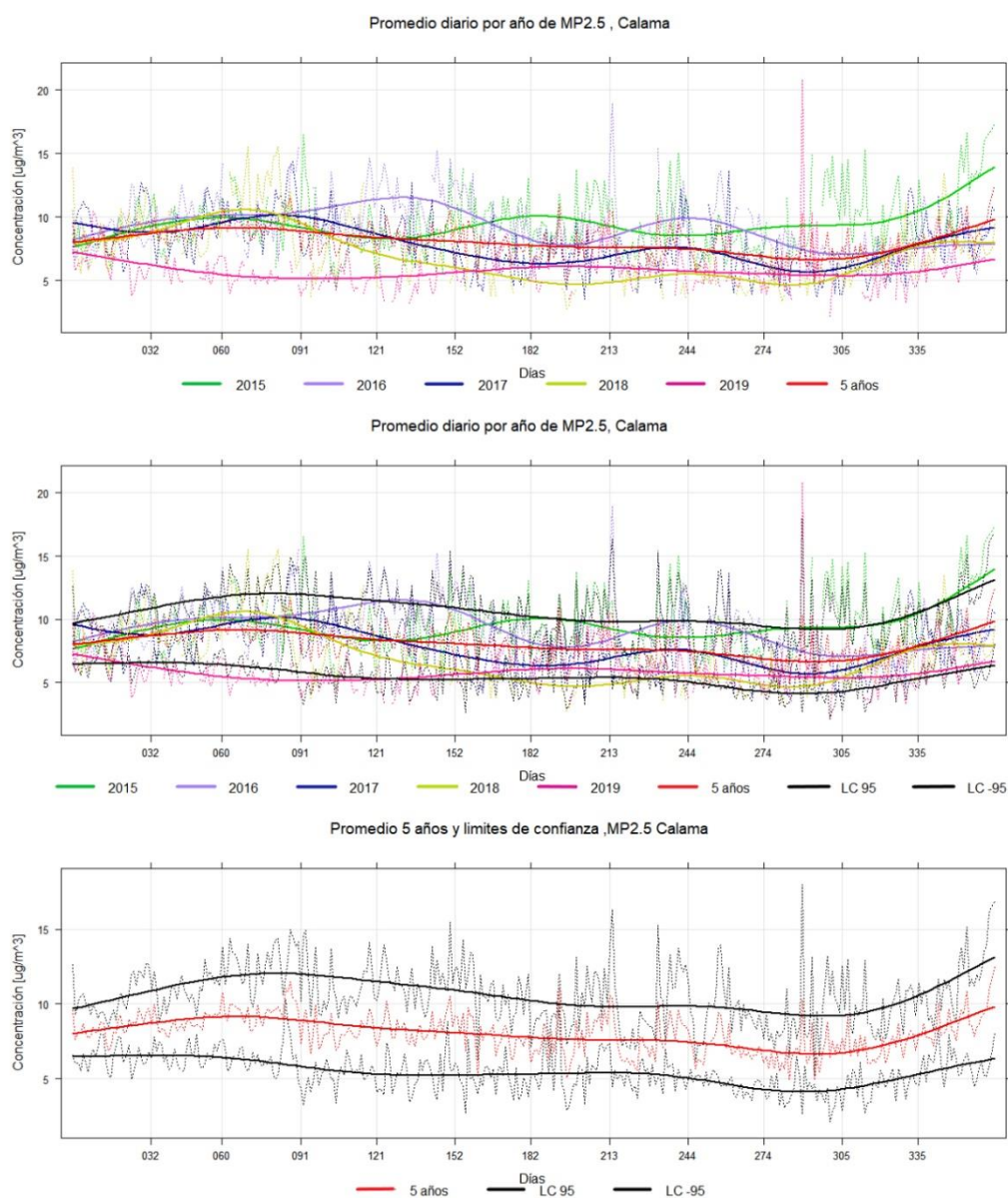


Figura 4. Generación del promedio histórico Calama $MP_{2,5}$, secuencia de gráficos.

4.1.d. Comparando el año 2020 con el promedio histórico.

La comuna de Calama se sometió a confinamiento durante un periodo en el año 2020 iniciando el 9 de junio y finalizado el 21 de septiembre.

Las figuras 5 y 6 corresponden a la comparación del año 2020 con el promedio histórico, para MP_{10} (Fig. 5) la LS del 2020 estuvo por debajo del promedio histórico en todo momento, saliendo por debajo del límite de confianza cercano al día 325 (25/11), el 2020 se acerca al histórico entre los días 120 (05/05), 190 (14 /07) y 284 (16/10).

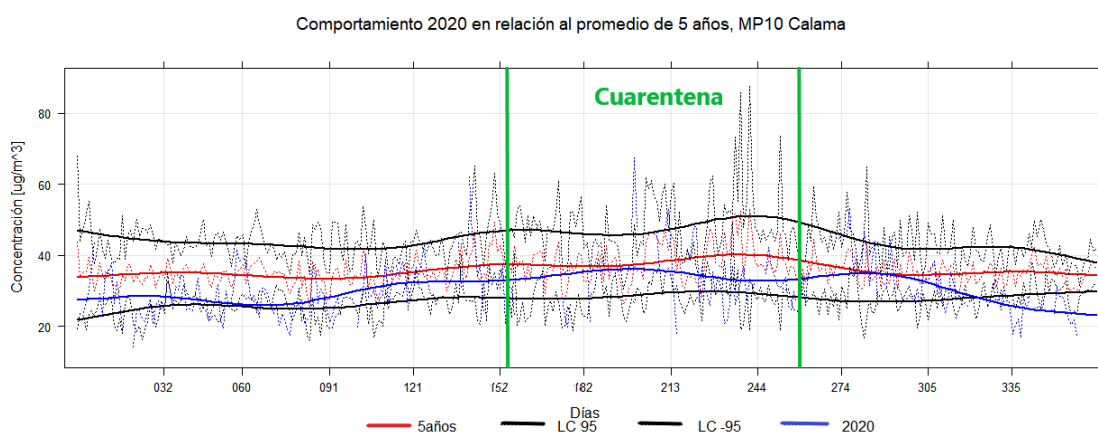


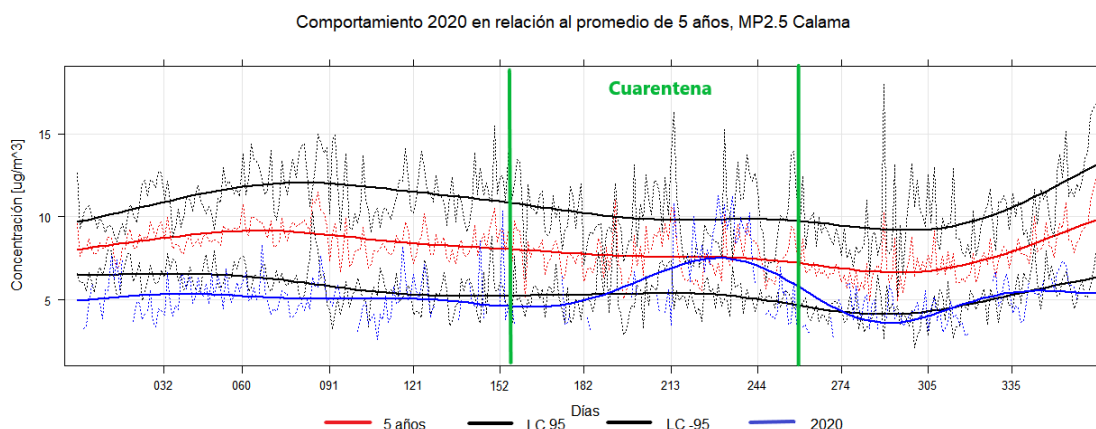
Figura 5. Gráfico comportamiento 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Calama MP_{10} .

Para MP_{10} se estudió un total de 360 días del 2020. Se observó una disminución de su concentración diaria en 2020 en un total de 219 días, mientras que 57 días superaron el promedio histórico (2015-2019), los otros 84 días presentaron concentraciones invalidas. Las concentraciones relevantes, es decir, las que presentan algún grado de significancia, se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Número de episodios por periodo y significancia, MP_{10} .

Valor p	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena	
	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$
Disminución	9	20	5	12	12	17
Aumento	2	2	1	7	0	3

En relación con el $MP_{2,5}$ (Fig. 6) el 2020 previo al periodo de cuarentena se ve la LS por debajo de la LC, dentro del periodo de cuarentena se ve un aumento en las concentraciones en los días del 200 (24/07) al 250 (12/09) aproximadamente.

**Figura 6.** Gráfico comportamiento 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Calama $MP_{2,5}$.

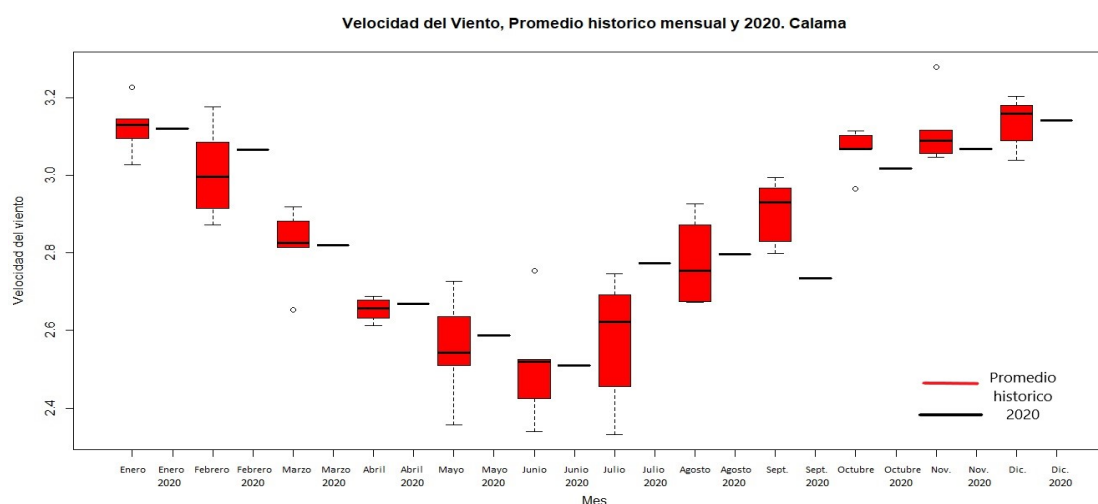
Para el $MP_{2,5}$ se estudiaron 360 días de los cuales 25 días aumentaron su concentración en comparación con el promedio, 251 presentaron disminución y 84 días fueron concentraciones invalidas. Al aplicar las pruebas de significancia (Tabla 3) se obtuvo que solo hubo días con concentraciones de aumento con valor $p \leq 0,05$ durante el periodo de cuarentena y concentraciones de disminución significativa en los tres periodos.

Tabla 3. Número de episodios por periodo y significancia, $MP_{2,5}$.

Valor p	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena	
	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$
Disminución	34	49	5	16	10	18
Aumento	0	0	2	5	0	0

4.1.e. Factores ambientales; velocidad del viento y precipitaciones.

La figura 7 muestra el comportamiento de la velocidad del viento en la estación Calama, se señalan los promedios históricos mensuales y en paralelo se expone el promedio mensual de la velocidad del viento en 2020, porcentualmente se encontraron variaciones del 0,002% al 7,92% entre el histórico y el 2020. Al aplicar la prueba de significancia se determinó que el mes de septiembre mostro una diferencia significativa (valor $p < 0,05$) con el promedio histórico.

**Figura 7.** Velocidad del viento histórico y promedio mensual $\left[\frac{m}{s}\right]$ del 2020, Calama.

La figura 8 muestra la dispersión de la concentración de los MP y la velocidad del viento, visualmente no es posible apreciar algún tipo de relación o tendencia clara, sin embargo, al realizar la prueba de correlación de *Spearman* se obtuvo que el MP_{10} si presenta una

correlación ya que el valor $p < 0,001$ y un ρ de $-0,24$ indicando que la correlación es de tipo negativa débil en relación con la velocidad del viento. Para $MP_{2,5}$ la prueba estadística indica un valor $p = 0,8$, por lo que no existe correlación con la velocidad del viento.

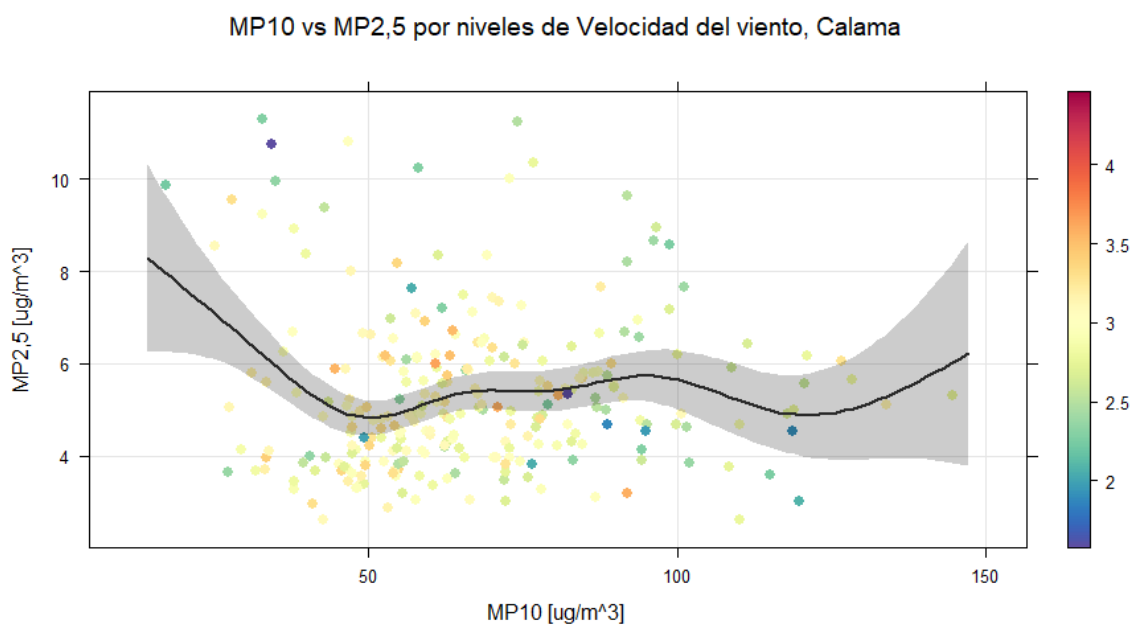


Figura 8. Dispersión de MP_{10} versus $MP_{2,5}$ por niveles de velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$, Calama.

Luego, se obtuvo el número de días con precipitaciones, la tabla 4 muestra los datos por mes.

Tabla 4. Número de episodios de precipitación con más de 1 mm diario, Calama.

N de Episodios	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
2015	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2017	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2018	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2019	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0

Con respecto a los episodios significativos, para MP_{10} se descartaron 3 días que presentaron precipitaciones superiores a 1 mm y para $MP_{2,5}$ se descartaron 5 días (Tabla 5).

Tabla 5. Número de episodios por periodo y significancia luego de la eliminación por precipitación, Calama MP_{10} y $MP_{2,5}$.

Valor p	MP_{10}					
	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena	
	$0,02 < P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$	$0,02 < P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$	$0,02 < P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$
Disminución	9	19	5	10	12	17
Aumento	2	2	1	7	0	3
	$MP_{2,5}$					
	$0,02 < P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$	$0,02 < P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$	$0,02 < P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$
Disminución	33	47	5	16	10	18
Aumento	0	0	2	3	0	0

4.1.f. Diagrama resumen

En la estación de Calama se analizaron un total de 360 días del año 2020, de los cuales 105 la ciudad se encontró en cuarentena, al hacer todos los análisis descritos (Fig.9) se pudo determinar que la cuarentena disminuyó la concentración de MP_{10} en 15 días, es decir un 14,3% de los días de confinamiento mostraron una disminución significativa en sus concentraciones, lo que corresponde a un 4,2% de la totalidad de días del 2020. Con respecto al aumento hubo 8 días del confinamiento que presentaron un aumento, lo que corresponde al 7,6% de los días de cuarentena y un 2,2% del año total.

Para $MP_{2,5}$ la concentración disminuyó en 21 de los días de confinamiento (20,0%) lo que equivale a un 5,8% de los días evaluados del 2020. Con respecto al aumento de concentración, 5 días fueron significativos es decir un 4,8% de los días de confinamiento presentaron un aumento significativo lo que equivale además a un 1,4% del total de días estudiados para el 2020.

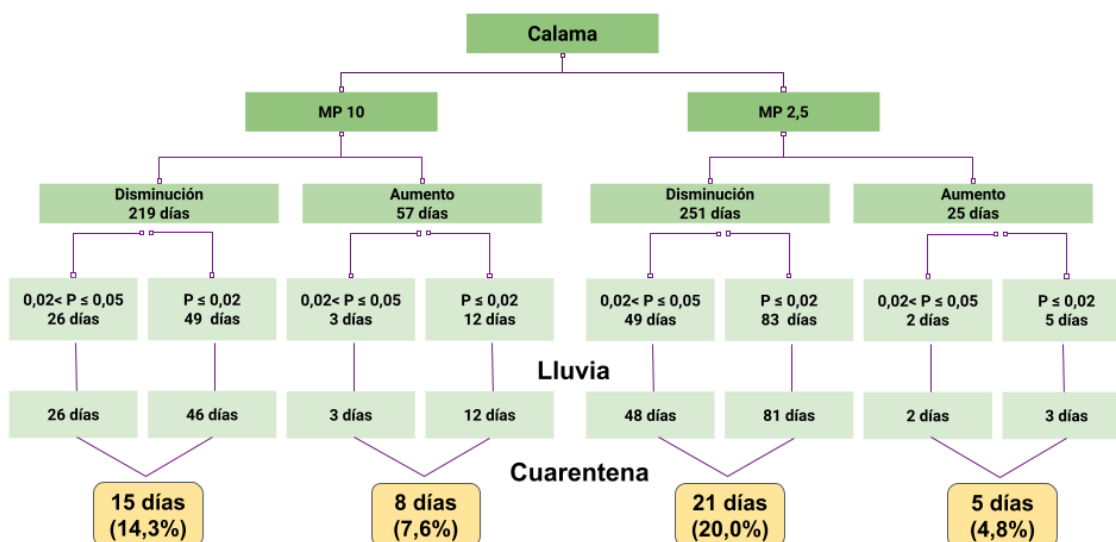


Figura 9. Diagrama del proceso Calama; inicialmente se señalan los días en que se superó o disminuyó el promedio diario en comparación con el histórico, al bajar un nivel se muestra el número de días en que la diferencia con el histórico fue significativa, luego los días significativos posterior al descarte de los días en que precipito más de 1 milímetro de agua y finalmente los días significativos que ocurrieron en cuarentena (Fase 1) y la equivalencia porcentual con relación al mismo periodo.

5.1 Santiago, Parque O'Higgins

5.1.a. Resumen de datos.

La tabla 6 señala que para el MP_{10} la concentración mensual superó a la histórica en 5 meses y los coeficientes de variación van de 4,16% a 19,19%, en cambio para el $MP_{2,5}$ todos los meses estuvieron por debajo del promedio histórico y presentaron coeficientes de variación de 2,48% a 32,98%.

Tabla 6. Resumen de datos, concentración $\frac{\mu g}{m^3}$ mensual por año ciudad de Santiago.

<i>MP₁₀</i>									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Promedio histórico	Desviación estándar	%CV
Enero	56,76	51,71	78,06	53,43	57,28	63,03	59,45	9,53	16,03
Febrero	60,93	57,83	54,78	55,80	54,64	67,06	56,79	2,36	4,16
Marzo	94,61	90,05	68,69	93,63	60,16	71,33	81,43	14,22	17,47
Abril	92,40	65,94	68,79	86,88	88,75	80,93	80,55	10,95	13,59
Mayo	106,50	73,29	66,21	102,17	91,37	87,07	87,91	15,78	17,95
Junio	122,67	88,29	82,00	89,21	99,74	72,25	96,38	14,32	14,86
Julio	101,54	80,65	93,07	62,86	113,11	92,30	90,24	17,32	19,19
Agosto	63,59	73,66	66,24	71,65	91,48	59,35	73,32	9,77	13,33
Septiembre	57,31	75,14	57,40	60,17	63,20	55,20	62,64	6,61	10,56
Octubre	41,63	43,79	43,13	44,74	56,23	55,42	45,90	5,26	11,46
Noviembre	46,23	51,04	47,07	44,53	60,68	49,45	49,91	5,79	11,61
Diciembre	54,59	52,15	51,06	47,17	57,67	51,87	52,53	3,51	6,69
NV	10	12	14	20	14	14	-	-	-
<i>MP_{2,5}</i>									
Enero	20,53	15,13	33,86	14,98	19,95	14,93	20,89	6,89	32,98
Febrero	23,42	15,08	16,82	16,70	21,54	16,38	18,71	3,19	17,06
Marzo	23,92	24,45	17,44	18,04	17,74	17,71	20,32	3,17	15,58
Abril	35,66	26,94	19,75	23,63	30,27	20,96	27,25	5,46	20,05
Mayo	52,05	42,14	36,14	34,80	29,97	29,90	39,02	7,58	19,43
Junio	57,67	55,35	45,14	48,03	40,13	29,31	49,26	6,48	13,15
Julio	57,58	44,80	47,86	40,53	50,67	38,55	48,29	5,74	11,88
Agosto	32,43	36,06	34,27	39,16	31,83	27,12	34,75	2,66	7,64
Septiembre	26,15	27,94	26,61	25,47	18,43	20,40	24,92	3,35	13,43
Octubre	15,95	16,47	15,83	15,25	15,68	14,68	15,84	0,39	2,48
Noviembre	16,75	15,93	14,31	15,11	13,30	11,82	15,08	1,21	8,00
Diciembre	16,24	20,99	14,31	17,82	13,05	10,77	16,48	2,78	16,86
NV*	10	12	14	20	14	14	-	-	-

*NV corresponde a número de datos inválidos. Color verde, indica promedio inferior al promedio histórico y color naranja indica promedio superior al promedio histórico.

5.1.b. Tendencia histórica.

Con respecto a la figura Theil Sen, para el MP_{10} en el periodo 2015-2019 (Fig. 10) se muestra una tendencia con pendiente positiva de 0,62 con un valor $p > 0,05$ y un intervalo de confianza 95% de -0,89 a 2,37 $\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]$ dado a que esta variación pasa por cero es que no es significativo ni se puede determinar una tendencia. Este comportamiento se

presenta de igual manera al agregar el 2020 a los datos, disminuyendo la pendiente a 0,18 con un valor $p > 0,05$ y un intervalo de confianza 95% de -1,2 a 1,6 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$.

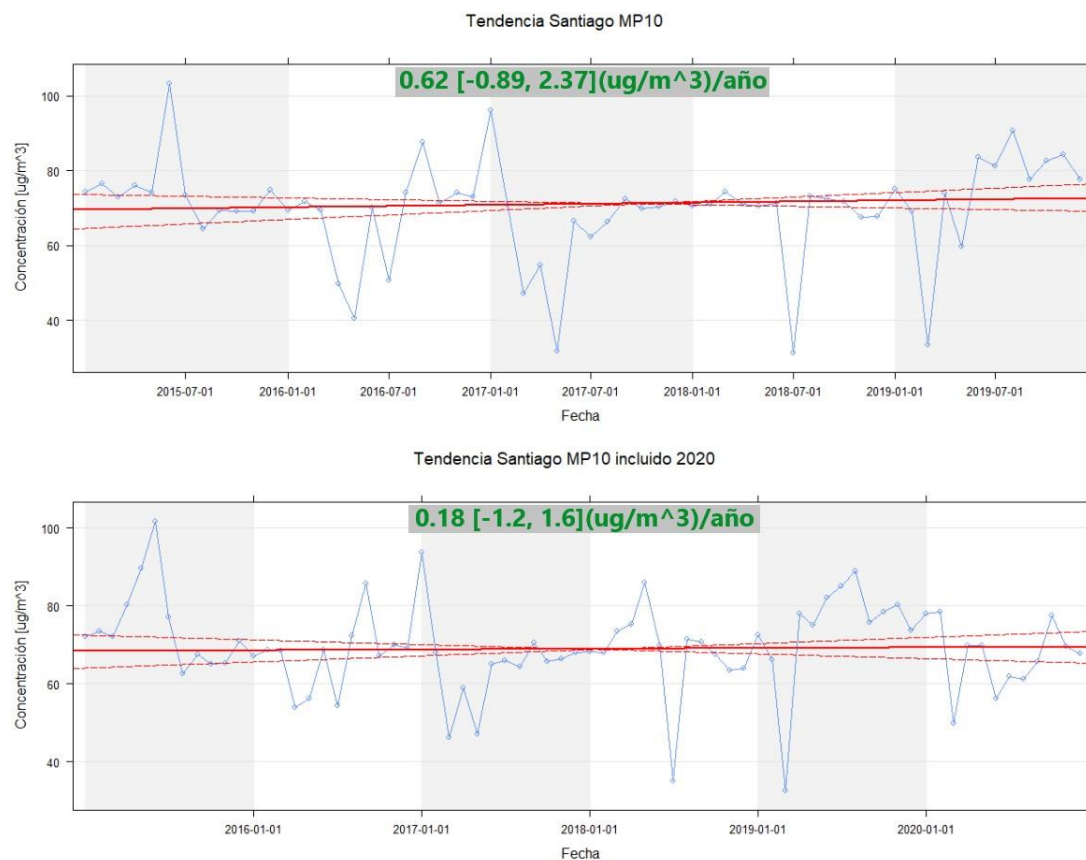


Figura 10. Gráfico de tendencia Santiago MP_{10} .

Para el $MP_{2,5}$ en el periodo 2015-2019 (Fig. 11) la pendiente es negativa de -1,35 con un valor $p < 0,01$ y un intervalo de confianza 95% de -2,18 a -0,47 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$, indicando que la concentración ha disminuido durante los 5 años estudiados. Al agregar el 2020 la pendiente se vuelve más negativa con una magnitud de -1,47 con valor $p < 0,001$ y un intervalo de confianza 95% de -1,99 a -1,07 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$, manteniendo la tendencia a la disminución.

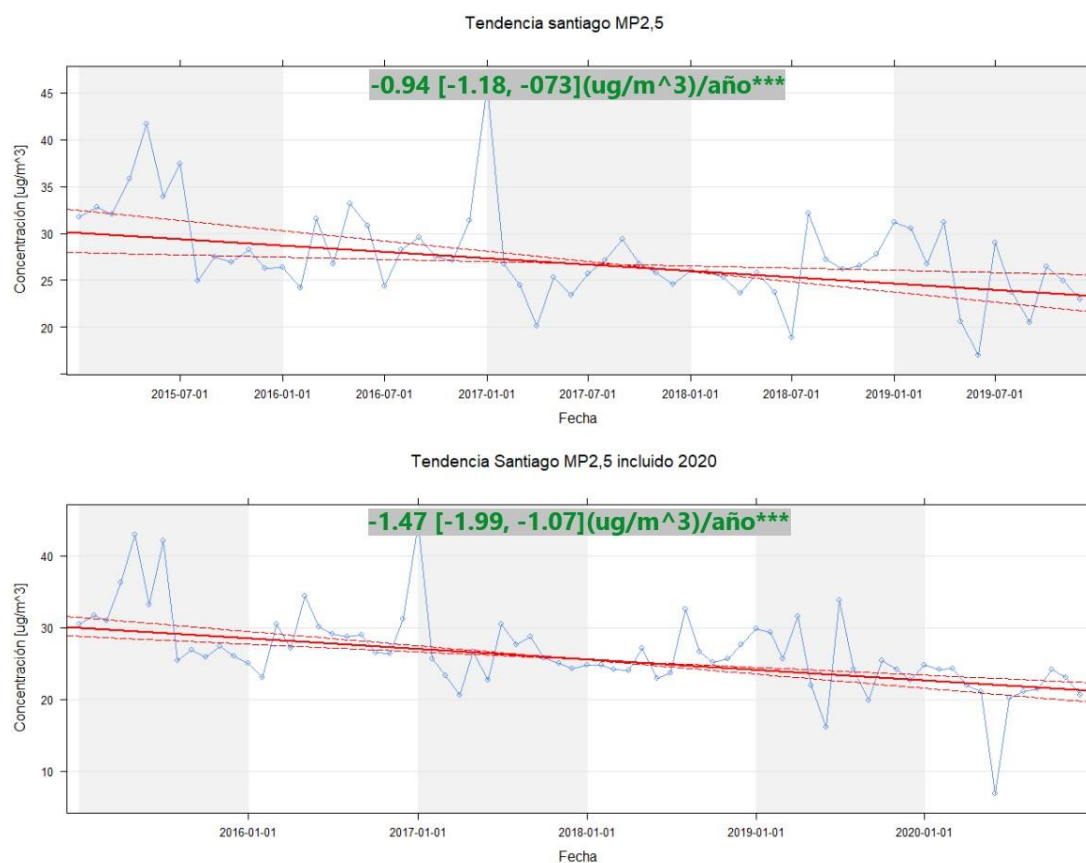


Figura 11. Gráfico de tendencia Santiago $MP_{2,5}$.

5.1.c. Definiendo el promedio histórico.

La figura 12 corresponde a concentraciones diarias de MP_{10} y muestran estacionalidad, aumentando las concentraciones durante el periodo invernal. Las LS se sitúan entre los 40 y 120 $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ mientras que las concentraciones de 24 horas fluctúan entre 1 y 250 $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$, al agregar los límites de confianza todas las LS se encuentran dentro de estos límites.

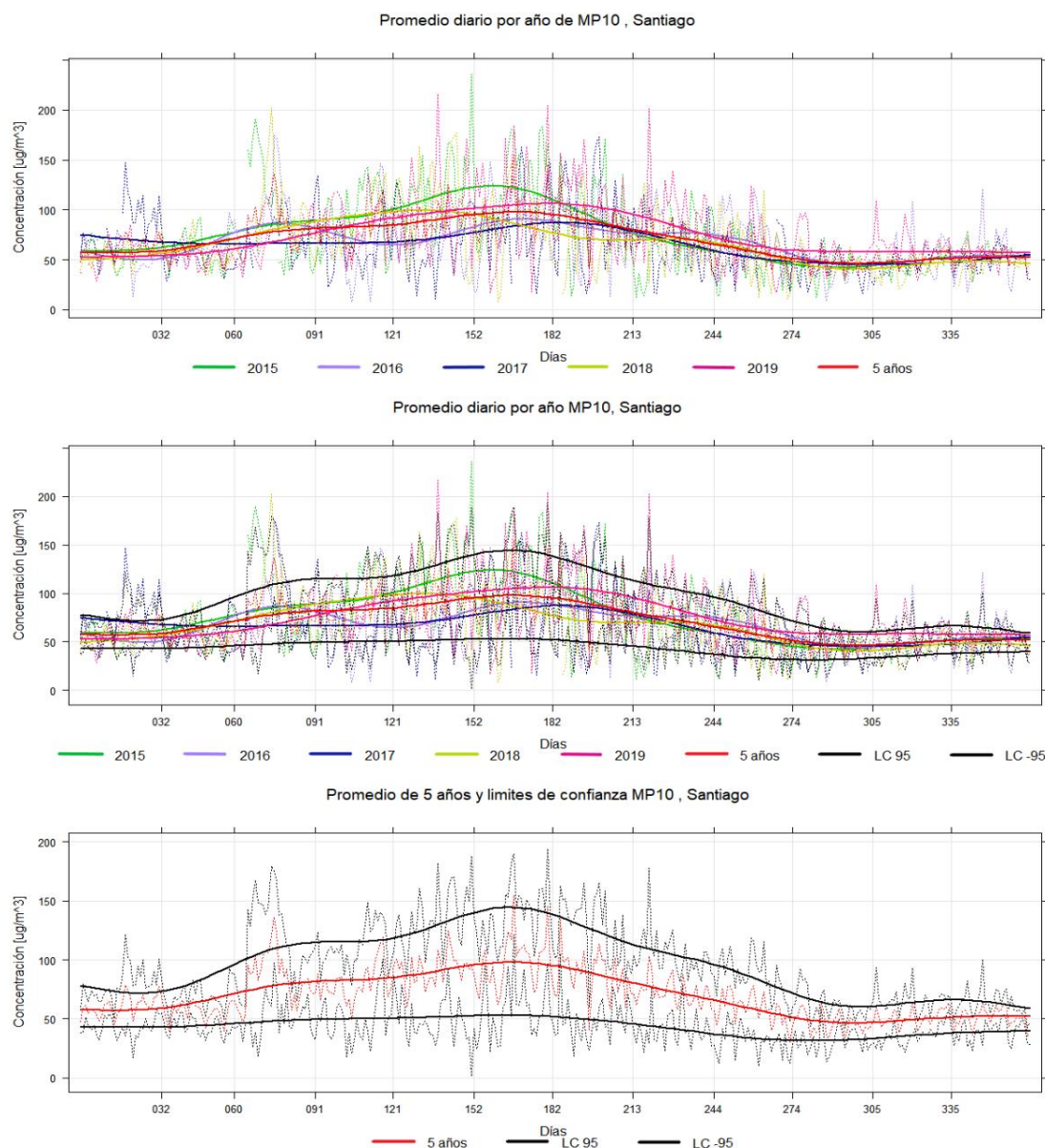


Figura 12. Generación del promedio histórico Santiago MP_{10} , secuencia de gráficos.

La figura 13 corresponde a concentraciones diarias de $MP_{2,5}$, estas muestran una estacionalidad más pronunciada que las de MP_{10} . El $MP_{2,5}$ muestra LS con concentraciones entre 15 y 60 $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ y concentraciones de 24 horas entre 1 y 100 $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$. Al adicionar los límites de confianza todas las LS se encuentran dentro de ellos.

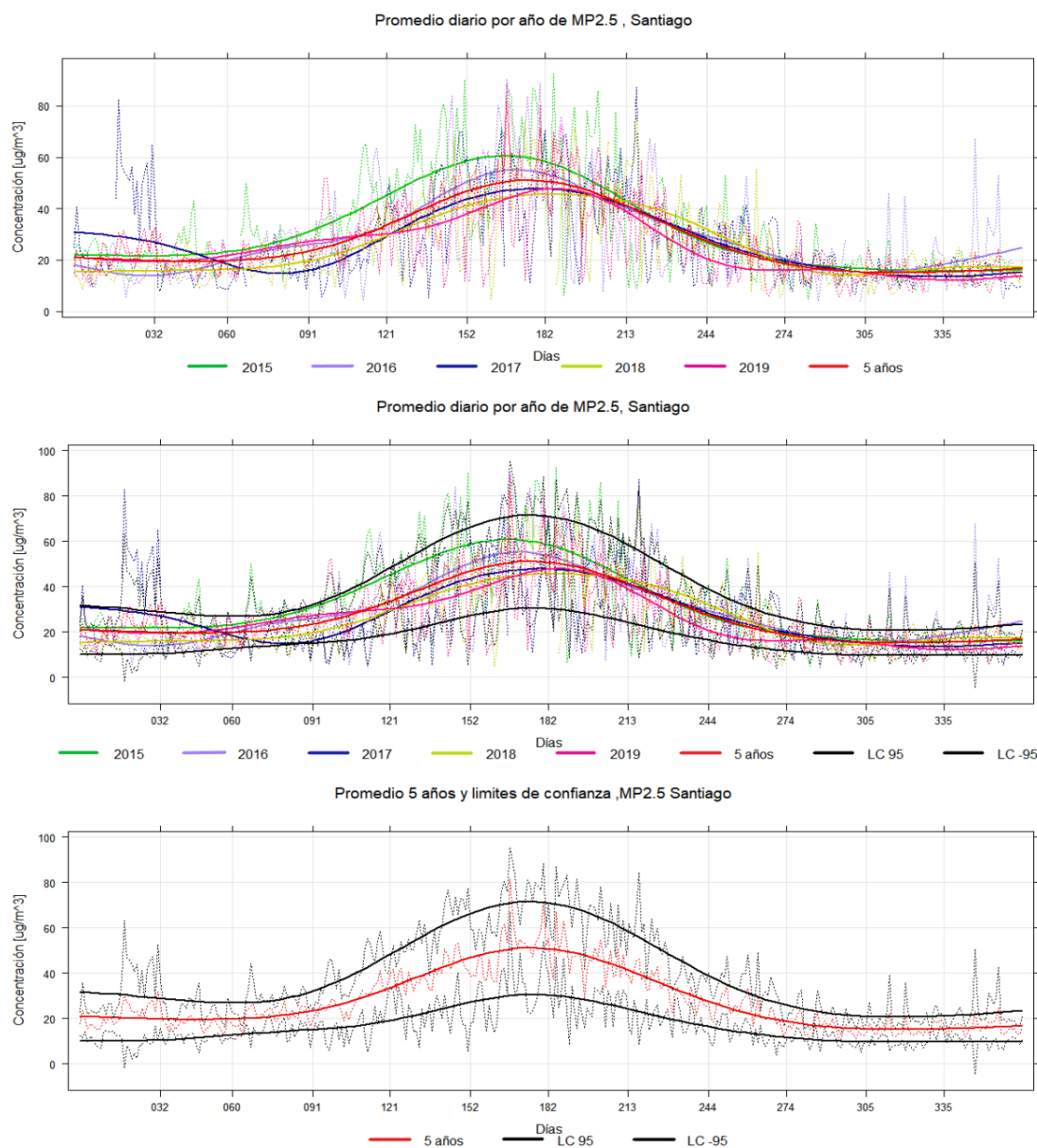


Figura 13. Gráfico de Santiago $MP_{2.5}$, promedio histórico y límites de confianza al 95%.

5.1.d. Comparando año 2020 con el promedio histórico.

La estación de Parque O'Higgins se encuentra en la comuna de Santiago, la cual estuvo en confinamiento desde el 26 de marzo al 17 de agosto. Al comparar el 2020 con el

promedio histórico se puede determinar que el comportamiento del MP_{10} para esta estación se acerca en varias ocasiones a la LS del promedio histórico y en ocasiones está sobre él (Fig.14).

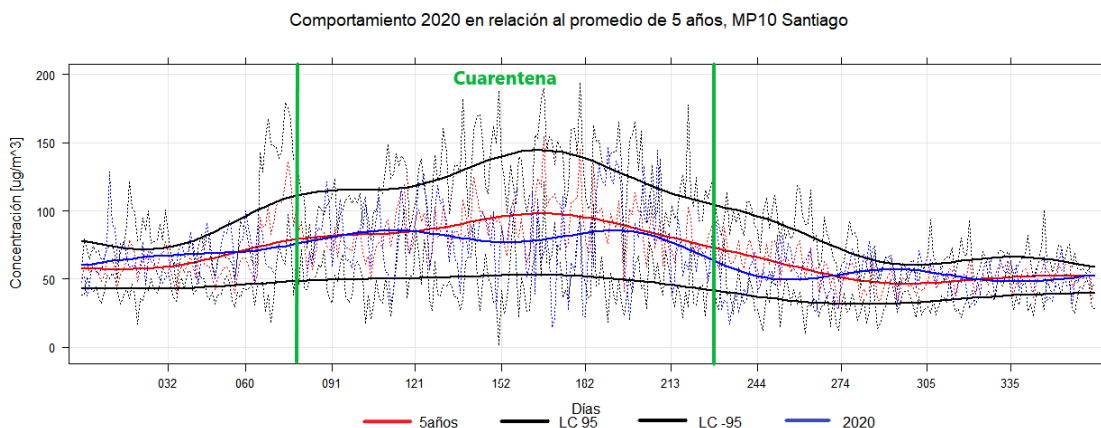


Figura 14. Comportamiento del 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Parque O'Higgins MP_{10} .

Para el año 2020 se estudiaron 360 días, de los cuales 164 presentaron disminución de la concentración de MP_{10} en comparación con el promedio de 5 años y 182 días en que se superó este promedio, los otros 14 días presentaron concentraciones invalidas. La tabla 7 señala el número de episodios significativos en comparación con el promedio histórico.

Tabla 7. Número de episodios por periodo y significancia, Santiago MP_{10} .

Valor p	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena	
	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$
Disminución	1	3	6	7	9	9
Aumento	7	16	6	6	6	9

Al comparar las concentraciones de $MP_{2,5}$ presentadas el 2020 con el histórico (Fig.15) la LS del 2020 se mantiene por debajo de la del promedio histórico en todo momento, el grafico muestra la alta estacionalidad que tiene esta estación ya que las mayores concentraciones se presentan en la temporada de invierno y varían hasta en $80 \frac{\mu g}{m^3}$ en comparación con concentraciones presentadas entre octubre y febrero. La LS del 2020 se encuentra sobre los $20 \frac{\mu g}{m^3}$ entre los días 91(06/04) y 214(07/08). En ambos MP la LS se mantiene dentro de las líneas de los límites de confianza.

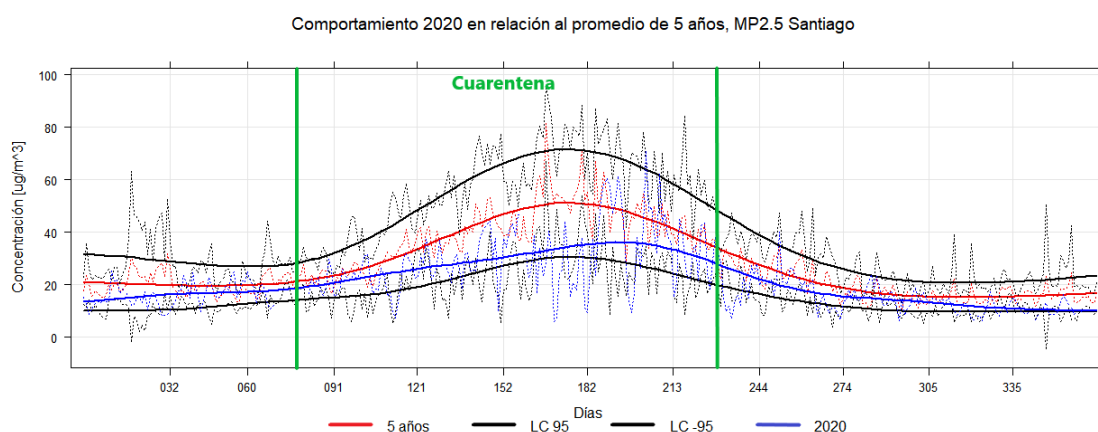


Figura 15. Comportamiento del 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Parque O'Higgins $MP_{2,5}$.

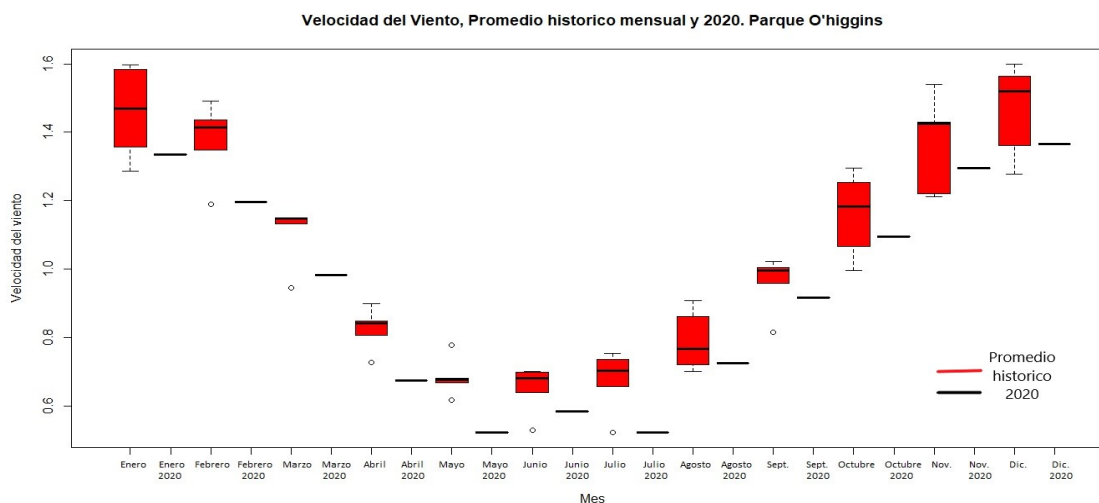
Para el $MP_{2,5}$ de los 360 días evaluados, 79 días superaron el promedio, 267 disminuyeron en comparación con él y 14 días presentaron concentraciones invalidas; la tabla 8 muestra el número de episodios relevantes para este MP en Santiago.

Tabla 8. Número de episodios por periodo y significancia, Santiago $MP_{2,5}$.

Valor p	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena	
	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$
Disminución	3	3	13	17	16	14
Aumento	1	6	2	2	1	2

5.1.e. Factores ambientales; velocidad del viento y precipitaciones.

La figura 16 muestra el comportamiento de la velocidad del viento en la estación Parque O'Higgins, se señalan los promedios históricos mensuales y en paralelo se expone el promedio mensual de la velocidad del viento en 2020, porcentualmente se encontraron variaciones del 4,56% al 23,50% entre el histórico y el 2020. Si bien la estación presenta variación, el año 2020 se comporta de manera similar al histórico y mantiene valores dentro de los ya presentados anteriormente. Al aplicar la prueba estadística se determinó que los meses de febrero, abril, mayo y julio presentaron diferencia significativa en relación con el histórico.

**Figura 16.** Velocidad del viento histórico y promedio mensual del 2020 $[\frac{m}{s}]$, Santiago.

La figura 17 muestra la dispersión de la concentración de los MP y la velocidad del viento, visualmente es posible apreciar una tendencia. Se observa que por sobre la línea de suavizado de encuentran mayoritariamente puntos con baja velocidad del viento y por debajo de ella, puntos con mayor velocidad del viento, por lo que se puede interpretar que cuando existe una menor velocidad del viento el MP está compuesto principalmente por $MP_{2,5}$, y por el contrario a mayores velocidades del viento el MP se encuentra formado mayoritariamente por MP_{10} . Además, la tendencia general pareciera indicar que a mayor velocidad del viento menores concentraciones de MP y viceversa. Al realizar la prueba de correlación de *Spearman* se obtuvo que el MP_{10} presenta una correlación ya que presenta un valor $p < 0,001$ y un ρ de -0,54 indicando que la correlación es de tipo negativa moderada en relación con la velocidad del viento. Para $MP_{2,5}$ la prueba estadística indica el mismo valor p y un ρ de -0,73 indicando una correlación negativa fuerte.

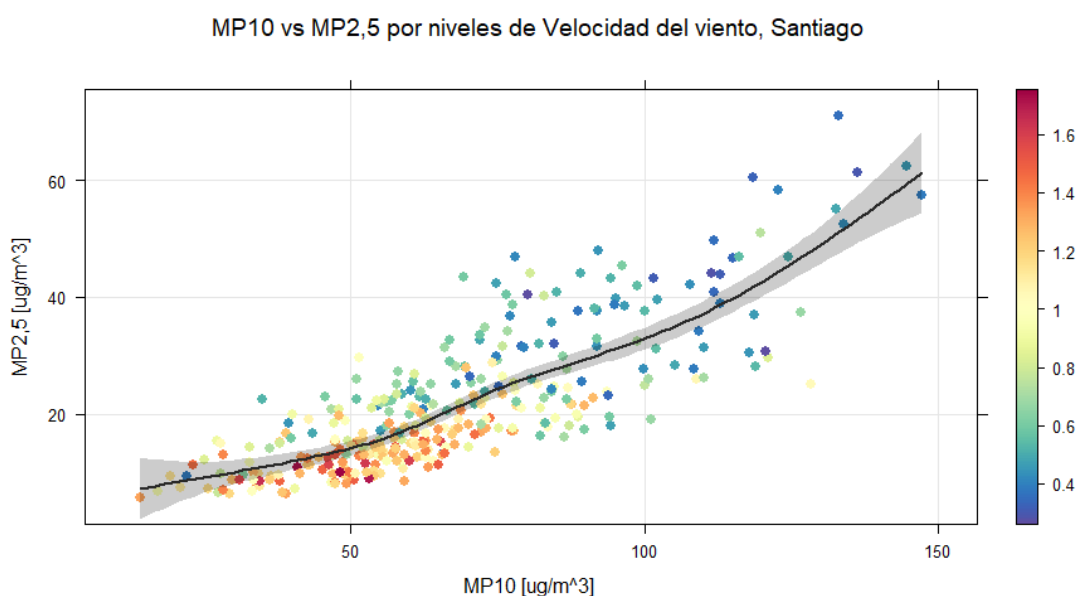


Figura 17. Dispersión de MP_{10} versus $MP_{2,5}$ por niveles de velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$, Santiago.

La tabla 9 muestra los episodios de precipitaciones relevantes para Santiago, para el 2020 se presentaron un total de 20, todos en el periodo abril a agosto. El mes de junio presentó el mayor número de episodios en comparación con los 5 años previos para el mismo mes o en comparación con cualquier otro.

Tabla 9. Resumen de episodio de precipitación superior a 1 mm diario, Santiago.

N de Episodios	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
2015	0	1	2	0	1	0	4	6	3	4	1	0
2016	1	0	0	9	4	3	5	0	0	2	0	3
2017	0	0	0	2	7	5	4	5	2	1	0	0
2018	0	0	1	0	1	4	4	1	3	1	0	1
2019	0	0	1	0	2	5	2	0	3	1	0	0
2020	0	0	0	2	2	10	4	2	0	0	0	0

Con respecto a los episodios significativos, para MP_{10} se descartaron 7 días que presentaron precipitaciones superiores a 1 mm y para $MP_{2,5}$ se descartaron 12 días (Tabla10).

Tabla 10. Número de episodios por periodo y significancia luego de la eliminación por precipitación, Santiago MP_{10} y $MP_{2,5}$.

Valor p	Pre cuarentena		MP_{10} Cuarentena		Post cuarentena	
	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$
Disminución	1	3	4	5	8	8
Aumento	7	16	5	6	6	9
			$MP_{2,5}$			
	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$	$0,02 < p \leq 0,05$	$p \leq 0,02$
Disminución	3	3	9	11	16	12
Aumento	1	6	2	2	1	2

5.1.f. Diagrama resumen.

La comuna de Santiago estuvo un total de 145 días en confinamiento de los cuales para MP_{10} , 9 días presentaron una disminución significativa, lo que corresponde al 6,2% de los días en cuarentena y a un 2,5% del total de días del año 2020 (Fig. 18). Además, se presentaron 11 días en los que hubo un aumento significativo, lo que equivale a 7,6% de los días en cuarentena y al 3,1% de los días estudiados del 2020.

Con respecto al $MP_{2,5}$, 20 de los 145 días de confinamiento presentaron disminución en la concentración, esto equivale a un 13,8% de los días en cuarentena y a un 5,6% del total de datos del 2020, además se determinó que 4 días presentaron un aumento significativo durante el confinamiento lo que equivale a 2,8% o a un 1,1% de los datos 2020.

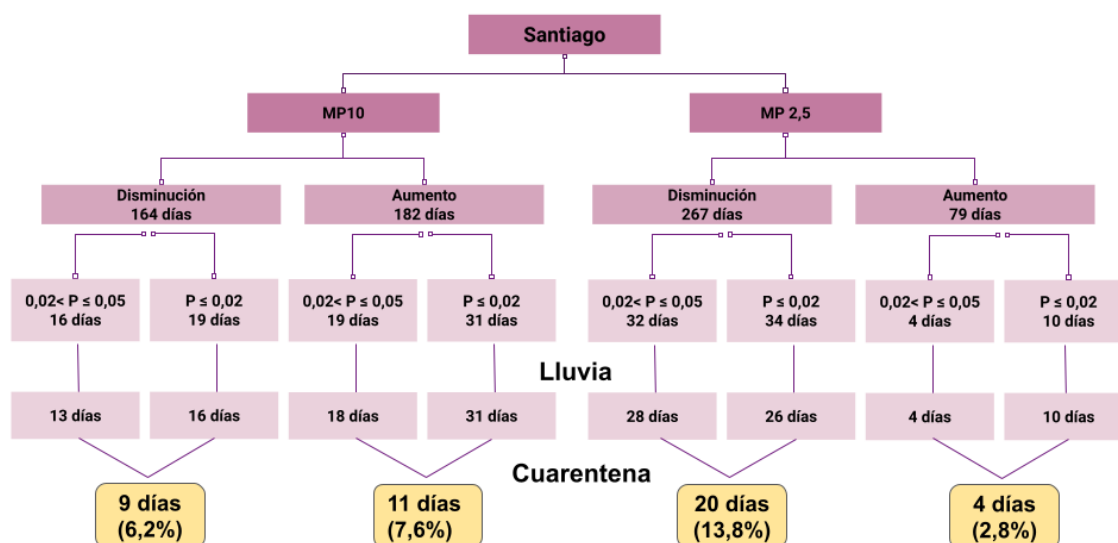


Figura 18. Diagrama del proceso Santiago; inicialmente se señalan los días que en que se superó o disminuyó el promedio diario en comparación con el histórico, al bajar un nivel se muestra el número de días en que la diferencia con el histórico fue significativa,

luego los días significativos posterior al descarte de los días en que precipito más de 1 milímetro de agua y finalmente los días significativos que ocurrieron en cuarentena (Fase 1) y la equivalencia porcentual con relación al mismo periodo.

6.1 Temuco, Padre las casas.

6.1.a. Resumen de datos.

La tabla 11 muestra los datos resumidos mensualmente, el MP_{10} tiene coeficientes de variación menores al 28% y para $MP_{2,5}$ se presentan valores menores a un 27%, con respecto a los promedios mensuales del 2020 en relación con el promedio mensual histórico, MP_{10} presentó un mes en que se superó el promedio histórico y para $MP_{2,5}$ no hubo superación.

Tabla 11. Resumen de datos, concentración $[\frac{\mu g}{m^3}]$ mensual por año ciudad de Temuco.

MP_{10}									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Promedio histórico	Desviación estándar	%CV
Enero	32,57	26,79	18,37	22,36	19,96	19,20	24,01	5,13	21,38
Febrero	-	24,92	19,06	21,57	32,59	21,46	24,53	5,10	20,77
Marzo	44,62	40,23	30,80	29,42	30,86	22,41	35,19	6,09	17,31
Abril	77,67	72,58	51,40	72,91	48,59	40,98	64,63	12,12	18,75
Mayo	98,51	120,80	88,83	108,24	79,36	54,44	99,15	14,49	14,62
Junio	94,23	151,30	97,63	113,07	64,53	45,47	104,15	28,33	27,20
Julio	81,65	98,67	109,09	116,61	81,81	70,66	97,57	14,13	14,49
Agosto	71,85	81,77	82,41	115,76	87,99	59,99	87,96	14,84	16,88
Septiembre	70,57	63,16	69,41	60,44	44,09	55,53	61,53	9,51	15,45
Octubre	33,62	33,16	29,05	41,48	33,82	34,89	34,22	4,03	11,76
Noviembre	25,91	26,01	27,75	25,47	24,28	23,79	25,89	1,12	4,31
Diciembre	21,72	18,72	22,51	24,52	19,31	20,05	21,35	2,13	9,96
NV	57	8	10	15	15	122	-	-	-
$MP_{2,5}$									
Enero	6,56	5,23	7,24	4,44	6,28	5,85	5,95	1,00	16,73
Febrero	-	7,93	5,95	7,09	10,37	6,26	7,83	1,63	20,76
Marzo	10,32	16,41	14,44	15,39	12,90	9,50	13,89	2,13	15,31
Abril	41,05	59,13	37,88	65,00	38,30	31,29	48,27	11,46	23,75

Mayo	86,03	104,25	76,59	96,65	73,50	48,33	87,41	11,68	13,36
Junio	83,63	134,61	89,39	101,31	59,10	39,87	93,61	24,69	26,38
Julio	70,71	91,15	100,55	103,67	77,69	62,74	88,75	12,77	14,39
Agosto	61,59	72,59	70,72	96,57	81,06	52,37	76,51	11,78	15,40
Septiembre	59,11	47,83	47,98	44,68	38,01	45,04	47,52	6,83	14,37
Octubre	21,74	25,87	17,07	27,41	23,63	22,71	23,14	3,60	15,55
Noviembre	10,33	14,07	10,20	12,81	11,45	10,50	11,77	1,49	12,62
Diciembre	5,47	8,48	5,19	7,83	6,72	6,35	6,74	1,28	19,05
NV*	57	8	10	15	15	122	-	-	-

*NV corresponde a número de datos inválidos. Color verde, indica promedio inferior al promedio histórico y color naranja indica promedio superior al promedio histórico.

6.1.b. Tendencia histórica.

La tendencia del periodo 2015-2019 para el MP_{10} (Fig. 19) muestra una pendiente negativa de valor -1,41 con valor $p > 0,05$ y un intervalo de confianza 95% de -3,55 a 0,31 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$ a pesar de la pendiente, esta pasa por cero, por lo que no se puede determinar una tendencia. Al agregar el 2020 la pendiente se vuelve más negativa -2,78 con valor $p < 0,001$ y un intervalo de confianza 95% de -4,75 a -1,18 $\left[\frac{ug}{m^3}\right]$, al no pasar por cero indica que la tendencia es a la disminución.

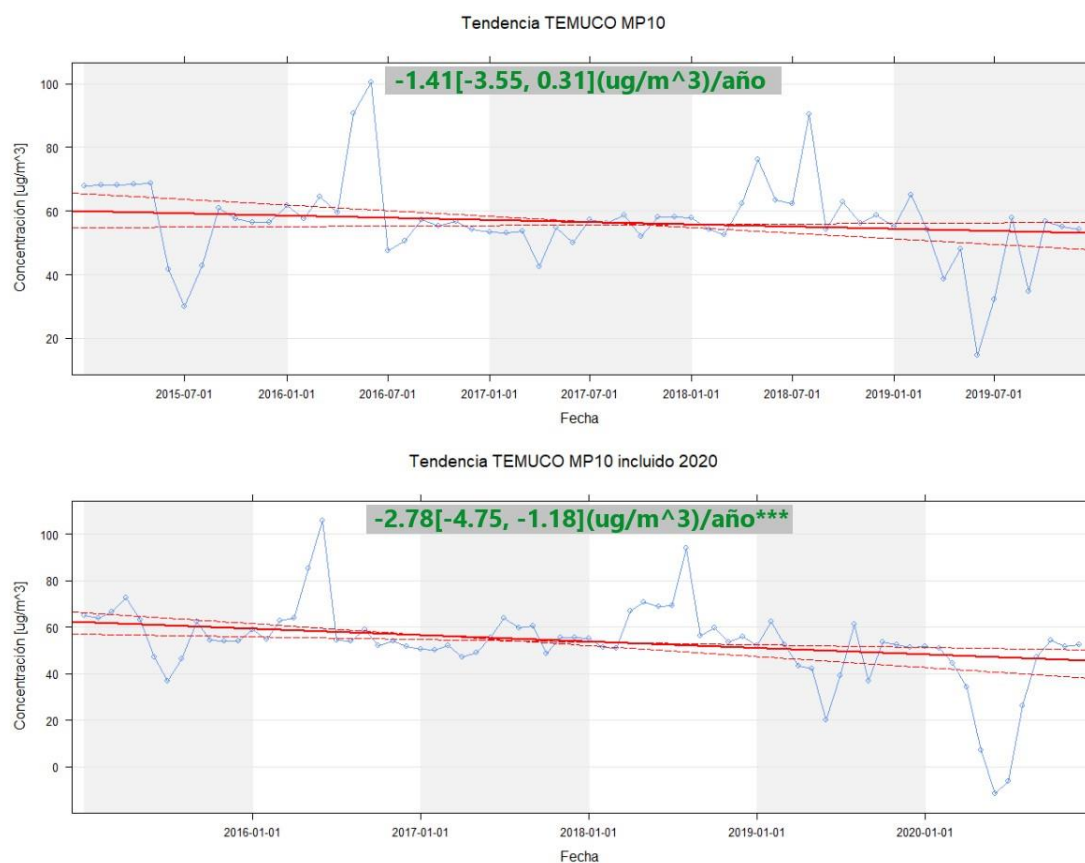


Figura 19. Gráfico de tendencia Temuco MP_{10} .

Para el $MP_{2,5}$ en el periodo 2015-2019 (Fig. 20) se obtuvo una pendiente positiva de 0,21 con valor no significativo de $p > 0,05$ y un intervalo de confianza de 95% de -0,84 a $1,13 \left[\frac{\text{ug}}{\text{m}^3} \right]$. Al agregar el 2020 la pendiente se volvió negativa -0,65 con valor $p < 0,1$ y un intervalo de confianza 95% de -2 a $0,09 \left[\frac{\text{ug}}{\text{m}^3} \right]$; como la recta pasa por cero no es posible establecer una tendencia en ninguno de los dos periodos.

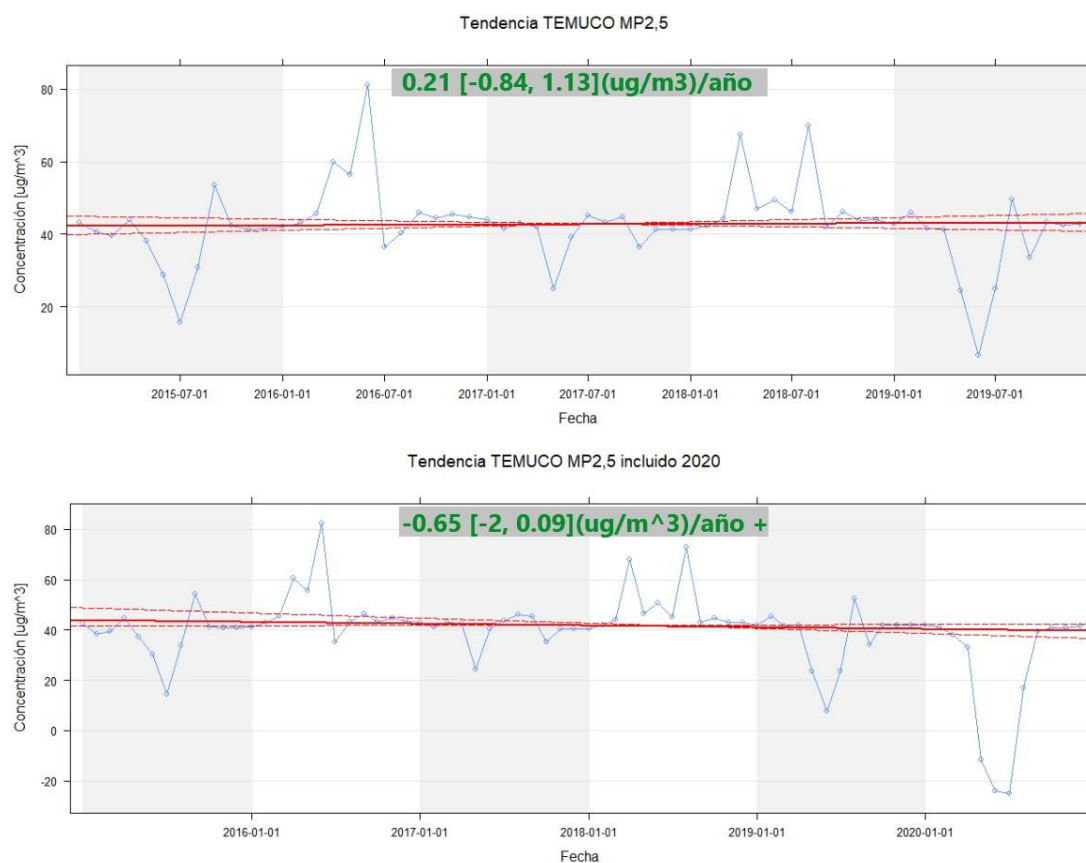


Figura 20. Gráfico de tendencia Temuco $MP_{2,5}$.

6.1.c. Definiendo el promedio histórico de MP_{10} y $MP_{2,5}$.

La estación Padre las Casas presenta una estacionalidad más pronunciada que lo ocurrido en Santiago, la estación aumenta sus concentraciones durante el periodo otoño-invierno, este comportamiento se presenta en ambos tipos de MP.

El MP_{10} (Fig. 21) muestra las LS desde el 5 al 150 $\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right]$ y concentraciones diarias entre 1 y 400 $\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right]$. Al agregar los LC todas las líneas de tendencias se encuentran dentro de ellos.

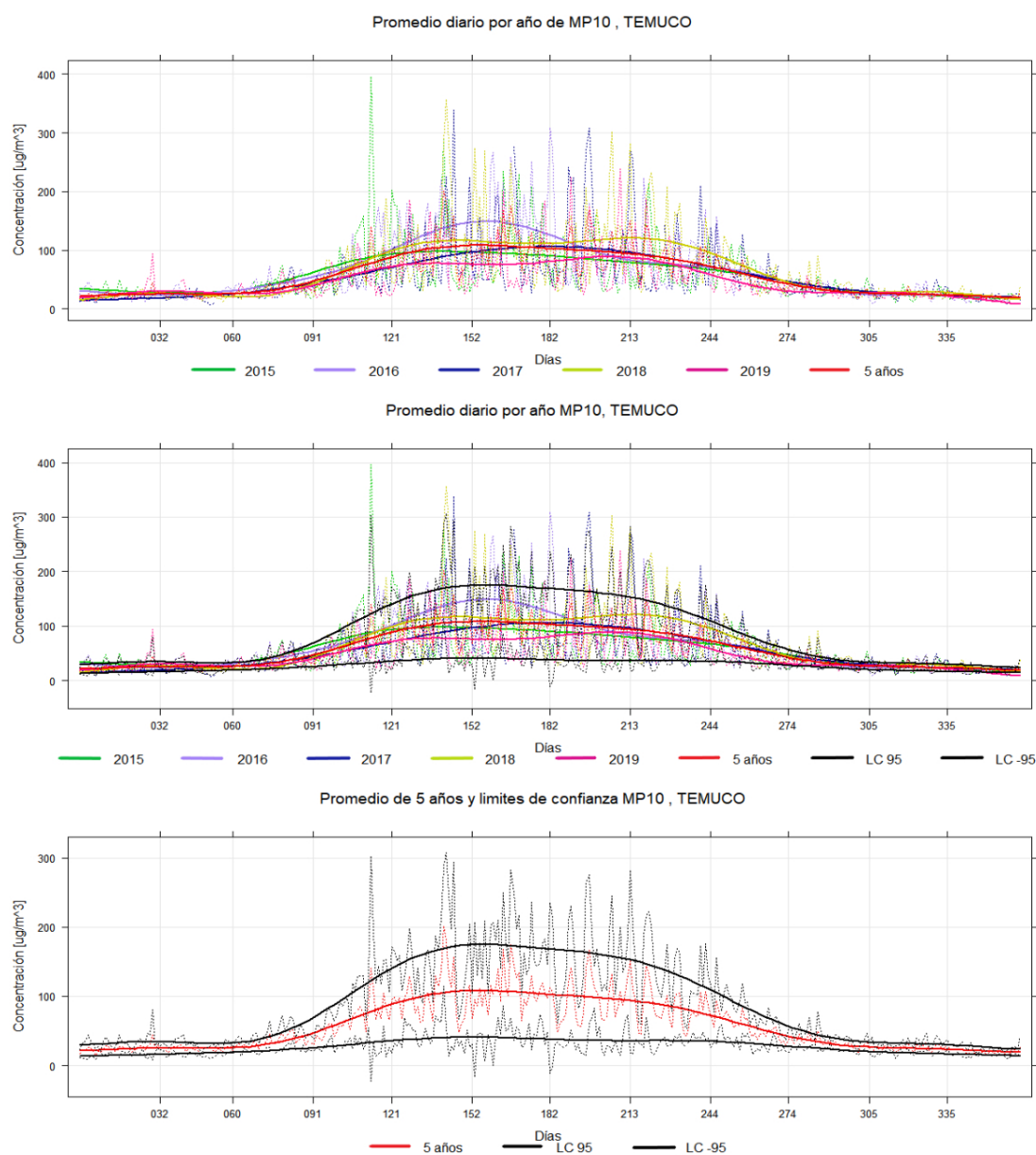


Figura 21. Generación del promedio histórico Temuco PM_{10} , secuencia de gráficos.

Para $\text{PM}_{2,5}$ (Fig. 20) se muestran concentraciones similares a las de PM_{10} , situando las LS entre valores desde 5 a $120 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]$ y concentraciones diarias entre 1 y $320 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]$. Al agregar los límites de confianza todas las LS se encuentran dentro de ellos.

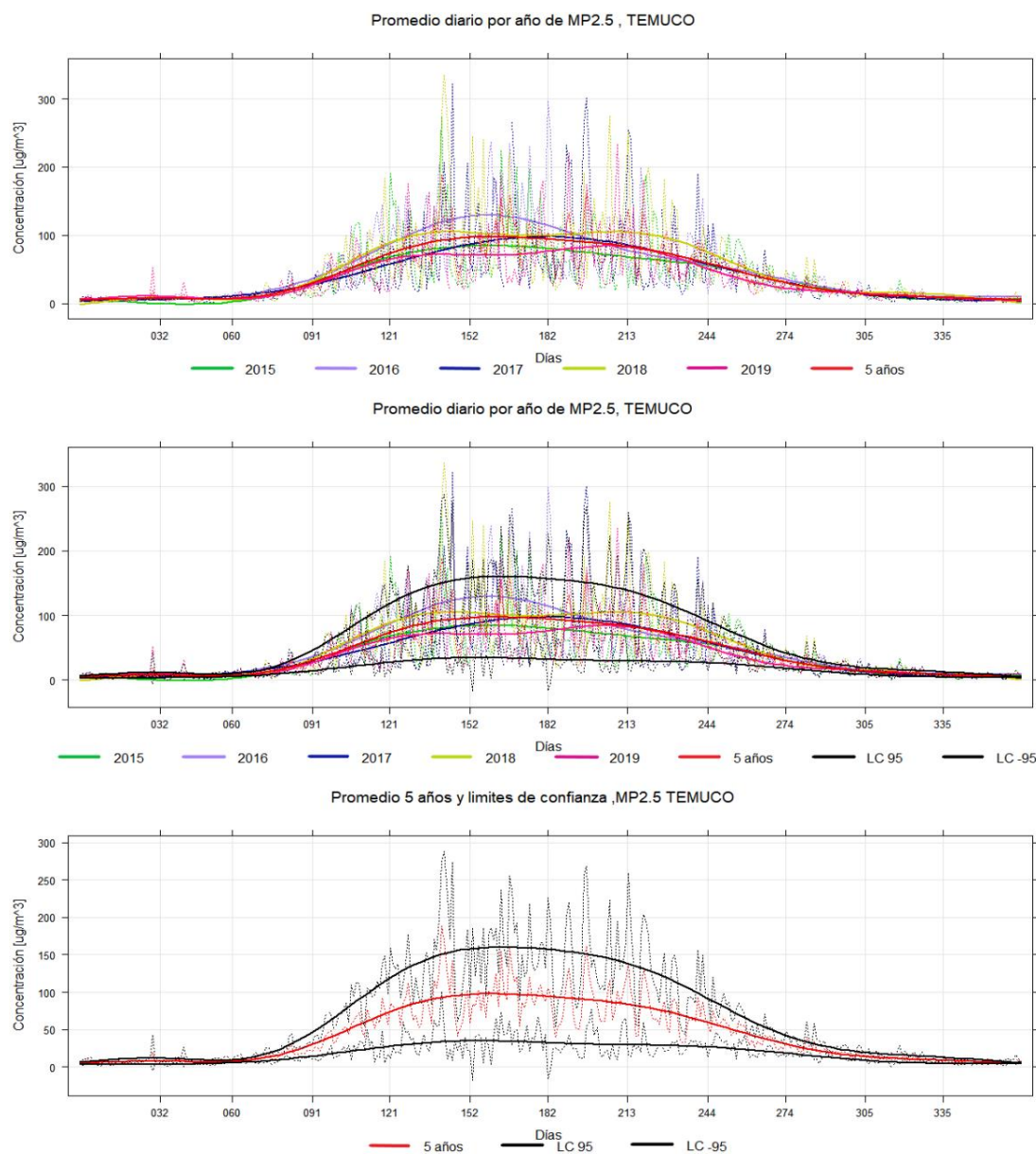


Figura 22. Generación del promedio histórico Temuco $\text{PM}_{2.5}$, secuencia de gráficos.

6.1.d. Comparando año 2020 con el promedio histórico

La ciudad de Temuco, y específicamente la comuna de Padre las Casas se sometió a confinamiento en dos periodos del 2020, la primera cuarentena comenzó el 28 de marzo

y terminó el 16 de abril, el segundo periodo comenzó el 31 de octubre y finalizó el 21 de diciembre.

Esta estación presenta concentraciones altas por un mayor periodo al que presentan las otras, esto hace que ambos gráficos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ muestren un comportamiento más achatado.

Para MP_{10} (Fig. 23) la LS del año 2020 se sitúa por debajo del promedio histórico en todo momento y sale del LC inferior entre los días 125 (10/05) y 182 (06/07) aproximadamente.

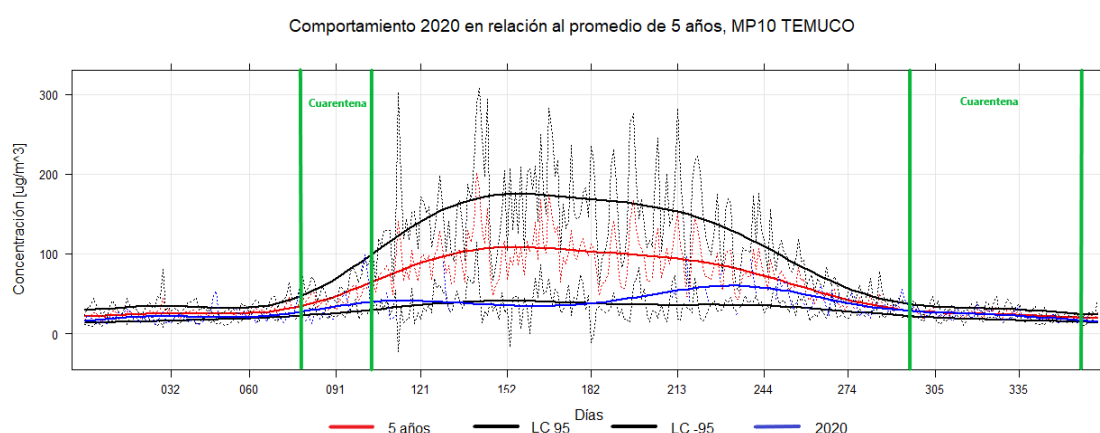


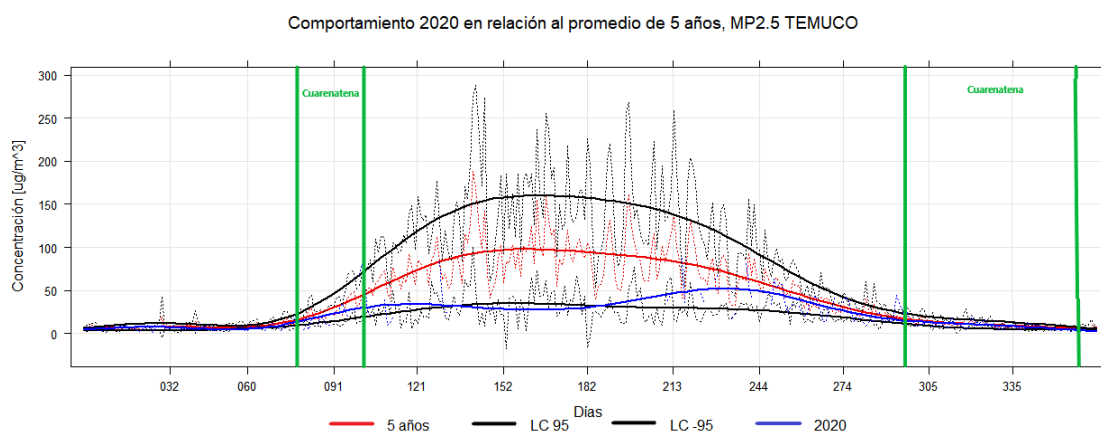
Figura 23. Comportamiento del 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Temuco, Padre las casas, MP_{10} .

Para el año 2020 se analizaron 360 días; para el MP_{10} , se registró un aumento en 73 días, 165 mostraron disminución y 122 días presentaron concentración invalida, la tabla 12 muestra el número y tipo de episodios que tuvo la comuna presentando mayoritariamente episodios de disminución significativa.

Tabla 12. Número de episodios por periodo y significancia, MP_{10} .

	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena		Cuarentena		Post Cuarentena	
Valor p	0,02	$p \leq 0,02$	0,02	$p \leq 0,02$	0,02	$p \leq 0,02$	0,02	$p \leq 0,02$	0,02	$p \leq 0,02$
	$< p \leq 0,05$		$< p \leq 0,05$		$< p \leq 0,05$		$< p \leq 0,05$		$< p \leq 0,05$	
Disminución	5	13	4	3	13	8	4	4	2	2
Aumento	1	3	2	0	1	7	1	2	0	0

Para $MP_{2,5}$ se observa un comportamiento similar al de MP_{10} , en que las concentraciones disminuyen entre los días 121 (06/05) y 182 (06/07), y de la misma forma los periodos de cuarentena se mantienen dentro de los límites de confianza (Fig. 24).

**Figura 24.** Comportamiento 2020 en relación con el promedio de 5 años y límites de confianza, Temuco estación Padre las casas, $MP_{2,5}$.

Para $MP_{2,5}$ de los 360 días se registraron 159 días con disminución en comparación con el promedio de 5 años, un aumento en 79 días y 122 días con concentraciones invalidas, al igual que para MP_{10} hubo más días con disminución significativa que con aumento significativo y se presentaron principalmente durante los periodos de pre cuarentena y post cuarentena (Tabla 13).

Tabla 13. Número de episodios por periodo y significancia, $MP_{2,5}$.

	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena		Cuarentena		Post Cuarentena	
Valor p	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$
	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02
	0,05		0,05		0,05		0,05		0,05	
Disminución	1	14	1	1	10	13	4	4	2	2
Aumento	2	5	2	1	1	7	2	4	0	0

6.1.e. Factores ambientales; velocidad del viento y precipitaciones.

Las velocidades del viento en Temuco (Fig. 25) a diferencia de las otras estaciones presentan un comportamiento relativamente constante durante todo el año presentando velocidades de viento entre 1,5 y 2,0 $\frac{m}{s}$, con respecto al 2020 este año presentó una variación de entre 0,56% a un 36,76%, la máxima variación se encuentra en el mes de junio donde el promedio histórico corresponde a 1,7 $\frac{m}{s}$ y el año 2020 a 2,3 $\frac{m}{s}$. Al aplicar la prueba de significancia se determinó que solo el mes de mayo presento una diferencia significativa con un valor $p < 0,05$.

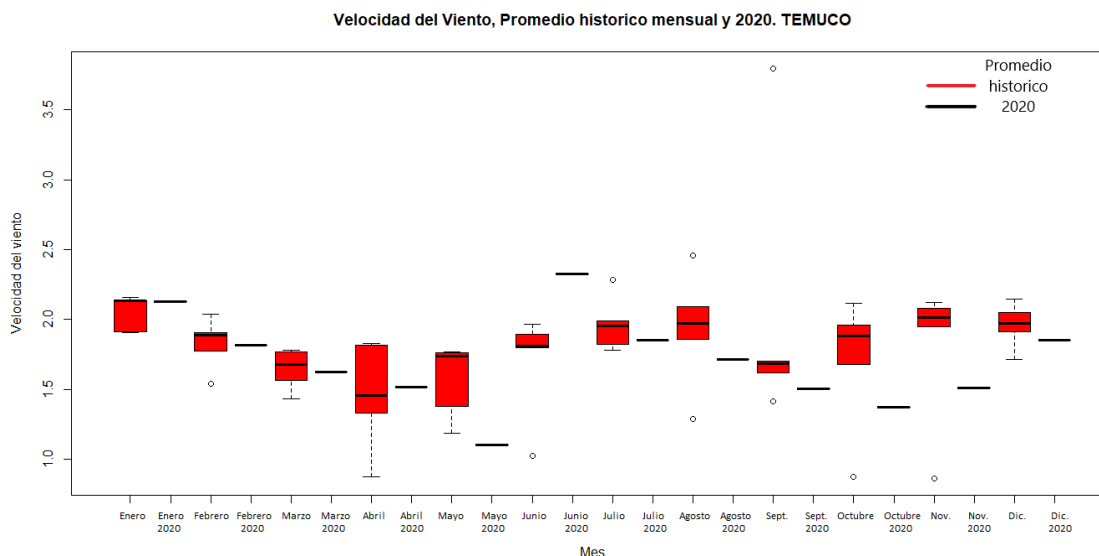


Figura 25. Velocidad del viento histórico y promedio mensual del 2020 [$\frac{m}{s}$], Temuco.

La figura 26 muestra la dispersión de la concentración de los MP y la velocidad del viento, visualmente es posible apreciar una tendencia, al realizar la prueba de correlación de *Spearman* se obtuvo que ambos MP presentan correlación con la velocidad del viento. Para el MP_{10} se obtuvo un valor $p < 0,001$ y un ρ de -0,39 indicando que la correlación es de tipo negativa. Para $MP_{2,5}$ la prueba estadística indica un valor $p < 0,001$ y un ρ de -0,55 indicando una correlación negativa fuerte.

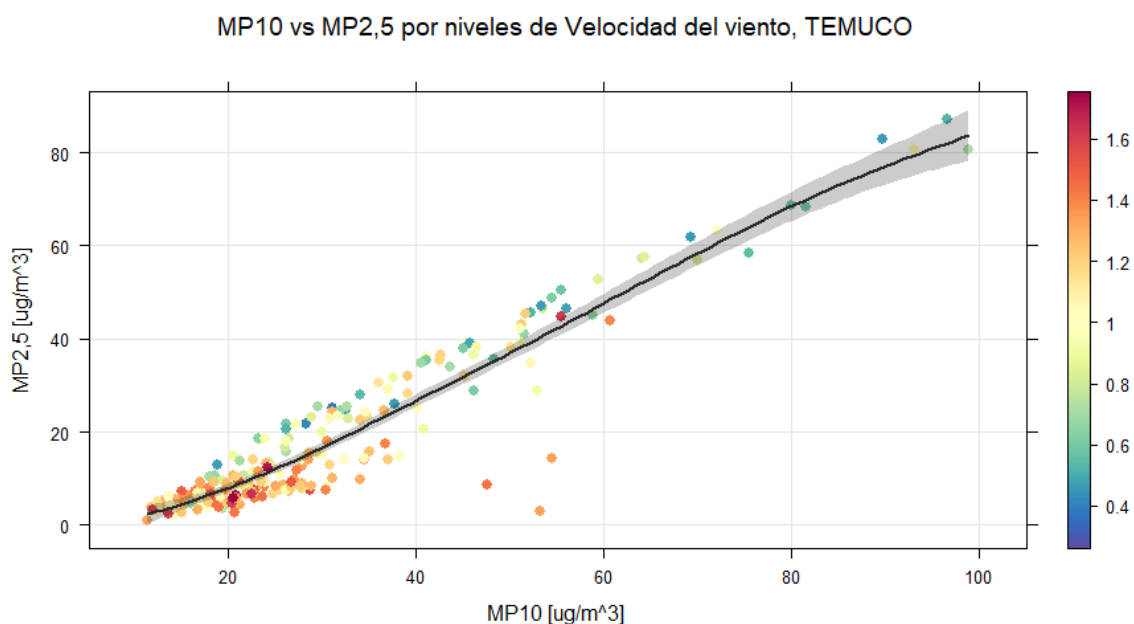


Figura 26. Dispersión de MP_{10} versus $MP_{2,5}$ por niveles de velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$, Temuco.

Padre las casas es una comuna con una gran cantidad de episodios de precipitación en comparación con las otras estaciones; volumétricamente supera los 800 milímetros anuales. La tabla 14 muestra el número de episodios de precipitación en la zona por mes, junio del 2020 corresponde al mes con más episodios de precipitación superiores a 1 milímetro diario de los últimos seis años.

Tabla 14. Número de episodios de precipitación con más de 1 mm diario, Temuco.

N de Episodios	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
2015	0	0	1	6	15	17	19	18	14	8	4	4
2016	2	3	1	8	10	6	18	17	4	10	3	8
2017	4	5	5	9	11	14	9	22	8	13	6	6
2018	2	3	11	11	13	15	9	12	14	11	12	4
2019	2	3	4	4	11	17	16	9	8	6	6	4
2020	2	3	3	5	12	23	18	12	10	7	3	5

Con respecto a los episodios significativos, para MP_{10} se descartaron 21 días que presentaron precipitaciones superiores a 1 mm y para $MP_{2,5}$ se descartaron 28 días (Tabla 15).

Tabla 15. Número de episodios por periodo y significancia luego de la eliminación por precipitación, Temuco MP_{10} y $MP_{2,5}$.

Valor p	MP_{10}									
	Pre cuarentena		Cuarentena		Post cuarentena		Cuarentena		Post Cuarentena	
	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$	0,02	$p \leq$
	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02	$< p \leq$	0,02
Disminución	3	13	3	1	7	2	4	4	2	2
Aumento	1	3	0	0	1	3	1	2	0	0
	$MP_{2,5}$									
	1	12	1	0	4	6	4	4	2	2
	2	3	1	0	1	2	1	2	0	0

6.1.f. Diagrama resumen.

Para la estación Padre las Casas se analizaron un total de 360 días del año 2020, de los cuales 39 la ciudad se encontró en cuarentena, al hacer todos los análisis definidos (Fig. 27) se pudo determinar que la cuarentena disminuyó la concentración de MP_{10} en 12 días, lo que corresponde al 30,8% de los días de confinamiento y representando un 3,3% de la totalidad de días del 2020, con respecto al aumento hubo 3 días del confinamiento que presentaron un aumento, lo que corresponde al 7,7% de los días de cuarentena y un 0,8% del año total.

Para $MP_{2,5}$ la concentración disminuyó en 9 de los días de confinamiento (23,1%) o a un 2,5% de los días evaluados del 2020, con respecto al aumento de concentración, 4 días

fueron significativos es decir un 10,3% de los días de confinamiento presentaron un aumento significativo lo que equivale además a un 1,1% del total de días estudiados para el 2020.

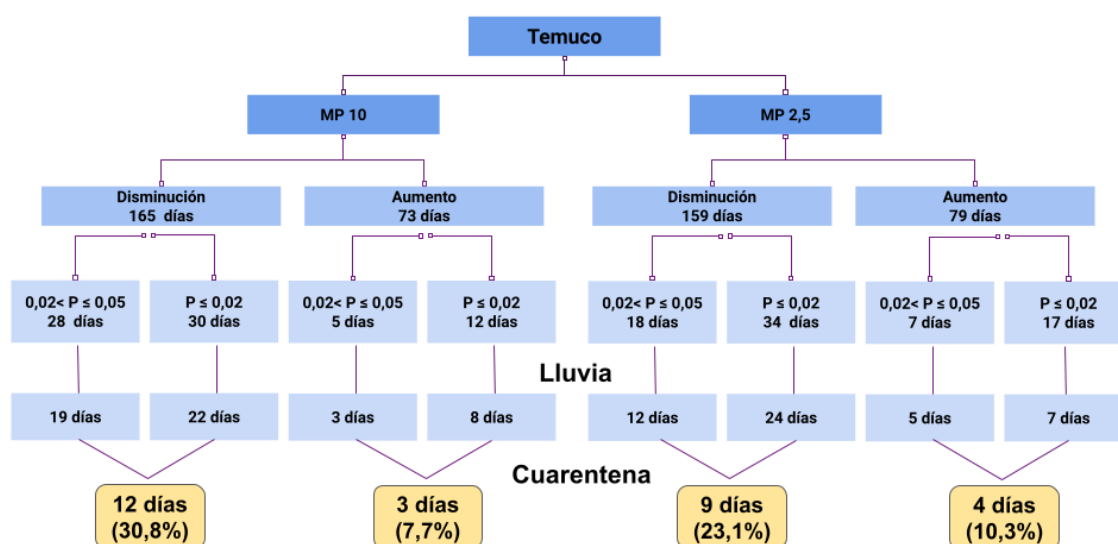


Figura 27. Diagrama del proceso Temuco; inicialmente se señalan los días que en que se superó o disminuyó el promedio diario en comparación con el histórico, al bajar un nivel se muestra el número de días en que la diferencia con el histórico fue significativa, luego los días significativos posterior al descarte de los días en que precipito más de 1 milímetro de agua y finalmente los días significativos que ocurrieron en cuarentena (Fase 1) y la equivalencia porcentual con relación al mismo periodo.

IV. DISCUSIÓN

Calama

Analizando exclusivamente las tablas resúmenes se puede interpretar que las concentraciones anuales de $MP_{2,5}$ y MP_{10} disminuyeron en relación con el promedio histórico calculado, ya que en esta estación de monitoreo se superó el histórico únicamente en un mes para el $MP_{2,5}$ (agosto) y en 2 meses para MP_{10} (Julio y octubre).

Sin embargo, analizar un promedio mensual no es muy relevante para establecer el efecto de las cuarentenas en la calidad de aire, ya que las cuarentenas en Chile fueron de carácter dinámico. Por lo tanto, su duración era indeterminada y podía abordar unos pocos días hasta meses. El análisis a escala mensual, entonces, no permite determinar el real efecto de la cuarentena. Además de estos factores, el promedio mensual tiene otras características que no permiten un análisis eficiente: contiene datos de días semanales como de fines de semana, y durante el mes puede haber gran diferencia diaria en torno a la velocidad el viento y los episodios de precipitaciones que afectarán directamente la concentración del MP atmosférico debido a su transporte y deposición húmeda (Jorquera & Villalobos, 2020).

Al analizar los datos diarios de los últimos cinco años por cada estación de monitoreo y por tipo de MP utilizando el estimador Theil Sen se puede observar que la tendencia en Calama para ambos MP hasta el 2019 muestra una disminución sostenida en las concentraciones y que al agregar el año 2020 ambas pendientes sufren un incremento, por lo que existe la posibilidad que la disminución atribuida para esta estación durante el

2020 sea parte del proceso de disminución histórico que se ha presentado al menos desde el 2015.

Las líneas de tiempo obtenidas con la función Time plot para la estación de Calama permiten visualizar la representatividad del promedio histórico, porcentualmente los años varían en relación con el histórico en un 1,6% a 26,8%. Las figuras obtenidas muestran la importancia de haber generado un promedio histórico y no haber utilizado el año anterior (2019) para hacer la comparación directa, esto ya que gráficamente pareciera que el 2019 tuvo concentraciones menores durante los primeros meses en comparación con los 4 años previos, sin embargo al analizar los episodios de precipitación se puede observar que hubo 5 días entre enero y febrero en los que llovió producto del invierno altiplánico, si se analiza la tabla 1 se puede observar que estos meses la concentración obtenida fue menor a todos los años previos.

La estación no presenta una estacionalidad marcada; si bien otros contaminantes y el MP han mostrado una ligera estacionalidad en años previos (González-Rojas y col., 2021); en este análisis no es posible diferenciarlo en las líneas de tiempo.

Al comparar el año 2020 con el promedio histórico y los LC, la LS anual sigue indicando que la concentración disminuyó en comparación al histórico, para MP_{10} se ve la LS del 2020 por debajo de la histórica, pero en algunos días esta se va acercando. Para $MP_{2,5}$ se muestra un comportamiento diferente, previo al periodo de cuarentena la tendencia se encontraba por debajo del LC y luego al entrar en cuarentena se muestra un aumento en las concentraciones y la tendencia 2020 sube abruptamente acercándose al promedio histórico

Al realizar el análisis diario, se puede determinar que para MP_{10} hubo una disminución en la concentración en 219 días, y para $MP_{2,5}$ 251, de un total de 360 días estudiados. Al aplicar la prueba de significancia fue posible determinar que, de esos días, 75 fueron significativos para MP_{10} (valor $p < 0,05$) y 132 para $MP_{2,5}$ (valor $p < 0,05$). Con respecto al aumento, estos fueron de 57 y 25 para MP_{10} y $MP_{2,5}$ de los cuales presentan significancia 15 días y 7 respectivamente (valor $p < 0,05$). Al igual como lo muestran los gráficos del 2020 en comparación con el histórico, la mayor cantidad de episodios de disminución significativa se presentaron previos a la cuarentena y la mayor cantidad de episodios de aumento significativos ocurrieron durante el periodo de cuarentena; a tal punto que para $MP_{2,5}$ solo hubo episodios de aumento significativo durante los días de confinamiento.

Con respecto a las variables ambientales, la velocidad del viento en Calama no se encontraron variaciones mayores a un 8%; sin embargo, al realizar una prueba estadística de significancia se determinó que septiembre del 2020 presentó una disminución significativa en torno a la velocidad del viento. Los demás meses no tuvieron diferencia significativa.

Calama posee fuentes naturales de emisión, dentro de las más relevantes se encuentra el desierto de atacama. Por lo que ráfagas de viento pueden levantar polvo del desierto a la atmosfera, como esto depende de la dirección y velocidad del viento, el levantamiento no es igual en cada ocasión, aumentando las concentraciones de MP en cantidades variables en cada ocasión.

Dado que estamos hablando de partículas, con masa y diámetro aerodinámico conocido (MP_{10} y $MP_{2,5}$), estas debieran sufrir efecto en relación con la velocidad del viento. Sin embargo, al realizar el grafico de dispersión no se visualiza una tendencia, luego al

realizar la correlación de Spearman se determinó que existía una correlación negativa débil para MP_{10} (valor $p < 0,001$ y $\rho = -0,23$), en cambio para $MP_{2,5}$ se determinó que no existe correlación (valor $p = 0,8$).

Al considerar los días de precipitación se descartaron 3 datos en MP_{10} y 5 en $MP_{2,5}$. Finalmente, al descartar los días de lluvia de los episodios relevantes, nos deja observar de manera más sencilla y con menos variables de por medio el efecto real de la cuarentena en la concentración de MP. Para ambos MP la disminución fue menor al 6% de los 360 días estudiados en esta estación de monitoreo, y menos del 3% de estos días presentaron aumento significativo en su concentración diaria.

La composición del material particulado en la ciudad de Calama es de amplia discusión yendo desde algunos que afirman que el 95% corresponde a fuentes industriales mineras (Stehlík y col., 2018) hasta otros que indican que el 23% corresponde a fuentes naturales (Salvador y col., 2016). El inventario de emisiones realizado en la ciudad determinó que el material particulado está formado por un 69% de MP_{10} cuyas principales fuentes de emisión corresponden a polvo de calle, erosión eólica, transporte procesamiento y extracción de minerales. La contribución natural corresponde a un 22% además un 12% del total de MP_{10} corresponde a emisión directa de vehículos. Adicionalmente el inventario asegura el 99% del MP_{10} y el 99,5% del $MP_{2,5}$ proviene de la industria minera (de distintas fuentes) (Dictuc, 2018). Este informe además determina que el $MP_{2,5}$ de carácter natural es despreciable por lo que el origen de todas estas partículas proviene de emisiones antropogénicas. La mayor contribución corresponde a emisiones de la industria minera y fuentes móviles.

La movilidad de la ciudad de Calama disminuyó en un 20% a 37% (ISCI, 2021) durante el periodo de cuarentena por lo que el transporte y el uso de vehículos también debió disminuir afectando así a la resuspensión de sedimentos y a la emisión directa de los vehículos. Esta medida sumada a las medidas de reducción de aforo y que la principal actividad económica de la zona corresponde a la industria minera podría suponer que la disminución de las concentraciones fueron producto de la disminución en la productividad de las faenas sin embargo la comisión chilena de cobre muestra que la producción durante los meses de cuarentena no se vio afectada manteniendo los niveles normales de producción a pesar de la reducción de personal (Cochilco, 2020).

Otro aspecto para considerar y que no es menor es la disminución sostenida que se ha presentado desde el 2015, por lo que lo más probable es que estos episodios de significancia y más específicamente de disminución (que son los que se presentan en mayor cantidad durante todo el año) correspondan a la tendencia presentada en los últimos 5 años.

La ciudad no cuenta con plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA) a pesar de haberse declarado zona saturada de MP_{10} , desde esa fecha se ha intentado realizar la normativa, pero aún no se concreta (BCN, 2017a). Sin embargo, hay decretos que buscan regularizar y evitar desastres ambientales en la industria de cobre como lo es la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes de emisiones de arsénico (Decreto 28) (Nacional, 2013).

Si bien la ciudad no cuenta con PPDA para la zona de Calama, si cuenta con PPDA el área circundante de la fundición de Chuquicamata desde el 2001, el cual se enfoca en

MP respirable (MP_{10}) y anhídrido sulfuroso. Las medidas se centran en el control de emisiones generadas por la fundición y sus botaderos (Nacional, 2001).

Los datos obtenidos complementados a los valores en la reducción de la movilidad de Calama indica que la contribución de vehículos livianos es mínima en comparación con otras fuentes e indicando que la proporción de emisión de las fuentes descritas en el inventario de emisiones del 2006 siguen manteniéndose (Dictuc, 2018).

Bajo estas características es que el PPDA de la zona debiera centrarse en la disminución de la emisión de la industria del cobre, aplicando técnicas para disminuir las fuentes fugitivas y gases de chimeneas incluyendo la fracción fina del MP.

Santiago

La estación Parque O'Higgins muestra que, considerando los promedios mensuales para MP_{10} , en 5 meses se superó el promedio histórico. En cambio, para $MP_{2,5}$, todos los meses presentaron disminución en relación con el histórico por lo que analizando sólo estos datos es posible decir que para $MP_{2,5}$ el 2020 sufrió una disminución en sus concentraciones. Para MP_{10} es más complejo y no se puede asumir un único comportamiento dado que presenta meses con aumentos y disminución.

Si analizamos la tendencia histórica mostrada por el estimador Theil Sen se puede observar que al menos desde el 2015 se viene presentando una disminución para las concentraciones de $MP_{2,5}$. Al agregar el 2020 se mantiene la tendencia y disminuye en magnitud un 0,12. En relación con el MP_{10} la tabla resumen señala exactamente el comportamiento de las concentraciones ya que históricamente no es posible determinar una tendencia debido a que la pendiente pasa por cero y no tiene significancia

estadística; además a diferencia de lo ocurrido en $MP_{2,5}$, para MP_{10} la pendiente disminuye en magnitud en 0,44.

Los gráficos que muestran la representatividad del promedio histórico indican, a diferencia de lo sucedido en Calama, que dentro de los LC se encuentran todas las LS y no se escapan en ningún momento. Principalmente debido a la mayor amplitud del LC calculado, producto de la alta variabilidad de los datos durante los meses de invierno. Porcentualmente los años varían en relación con el histórico en un 1,8% a un 12% para $MP_{2,5}$ y entre un 3,3% a un 8,21% para MP_{10} .

Al comparar el 2020 con el histórico el MP_{10} muestra el entrecruzamiento de las LS del histórico con el 2020, corroborado una vez más que no es posible establecer un comportamiento fijo. A diferencia de lo que ocurre con $MP_{2,5}$ en el que la tendencia del 2020 está en todo momento por debajo del histórico y dentro de los LC.

Al hacer el análisis diario y a diferencia de las demás estaciones, los días que sufrieron aumento en la concentración de MP_{10} superaron a los días que muestran disminución (183 y 164 días respectivamente). Por el contrario, para $MP_{2,5}$ se presentaron 258 días en que disminuyó la concentración y 79 en los que aumentó.

Al hacer la prueba de significancia para MP_{10} se determinó una disminución significativa en 35 días (valor $p < 0,05$) y 50 días un aumento significativo. Para $MP_{2,5}$ 70 días mostraron disminución significativa (valor $p < 0,05$) y 16 aumento significativo (valor $p < 0,05$); para MP_{10} la mayor cantidad de días de disminución se presentaron en el periodo de post cuarentena, en cambio los periodos de aumento ocurrieron en mayor cantidad previo al confinamiento. Para $MP_{2,5}$ el periodo de disminución con mayor

número de eventos se presentó en cuarentena y episodios de aumento previo a confinamiento.

Con respecto a las variables meteorológicas, la velocidad del viento mensual tuvo variaciones mayores al 20% en los meses de mayo y junio los cuales sufrieron una disminución en el promedio. Al realizar la prueba estadística se pudo determinar que esta disminución fue significativa (valor $p < 0,05$) para estos meses y para febrero y abril. Esta diferencia y la correlación existente entre el viento y ambos MP sugeriría que la concentración de estos meses debió aumentar dado a la disminución del transporte de las partículas por la disminución de la velocidad del viento. Sin embargo, al comparar con la tabla resumen, mayo y junio presentan una concentración mensual menor a la histórica para ambos MP a diferencia de febrero y abril que presentaron concentraciones mensuales de MP_{10} mayores a las históricas y concentraciones de $MP_{2,5}$ menores a la histórica.

El año 2020 presentó 20 episodios de precipitaciones con más de 1 mm diario de agua lluvia lo que se tradujo en el descarte de 7 datos en MP_{10} y 12 días en $MP_{2,5}$, siendo la mayoría del periodo de cuarentena.

Finalmente, al hacer el filtro de los días en que se estuvo en confinamiento y fueron significativos se determinó que un 2,5% de los 360 días estudiados presentaron una disminución significativa en la concentración de MP_{10} y un 3,1% presentó aumento significativo. Para él $MP_{2,5}$ de los mismos 360 días un 5,6% presentó disminución significativa y un 1,1% presentó aumento significativo; todos estos corresponden a días en fase 1. Como ya se venía demostrando el porcentaje de aumento de concentración diaria se presentó en más días que la disminución para MP_{10} . Determinando que dentro

de los valores establecidos de significancia; la cuarentena no tuvo un mayor efecto en las concentraciones diarias de MP_{10} en esta estación.

Según el inventario de emisiones realizado el 2014 (USACH, 2014) la principal fuente de emisión para ambos MP corresponde a transporte (43,7 % para MP_{10} y 41,0% para $MP_{2,5}$) seguido por emisiones residenciales (33,3 % para MP_{10} y 35,5% para $MP_{2,5}$). Dado que la movilidad en Santiago durante la fase 1 de cuarentena disminuyó en un 32% a 42% (ISCI, 2021) se esperaría que ambos MP mostraran una disminución similar en sus concentraciones diarias. Sin embargo, esto no ocurre y el comportamiento de ambos MP es distinto entre ellos mostrando mayoritariamente aumentos en relación con el histórico para el MP_{10} y disminuciones en relación con el histórico para el $MP_{2,5}$. Esto sugiere que la estimación del inventario de emisiones no es correcta ya que ambos MP debieron disminuir proporcionalmente su concentración debido a la disminución de la movilidad.

Históricamente la concentración de MP_{10} nos indica que no se mantiene en una tendencia clara (figuras Theil Sen) y que al comparar exclusivamente el 2019 con el 2020 el año pandémico sí presentó una disminución general. Sin embargo, al compararla con otros años esta diferencia no es mayor a lo anteriormente visto por lo que no sería posible asociar esta disminución a la cuarentena.

Este análisis pone en duda la efectividad del inventario de emisiones existente para la RM ya que, dado que la movilidad bajó y que la primera cuarentena de Santiago incluyó la suspensión del funcionamiento de empresas constructoras, sólo nos quedaría como fuente principal y activa las emisiones residenciales. De ser éstas las únicas fuentes se podría haber notado una disminución en la concentración de MP_{10} . Por lo que se plantea

la pregunta ¿Existe otra fuente de MP_{10} que no ha sido determinada por este inventario de emisiones?

Ya que para el $MP_{2,5}$ sí se mostró mayoritariamente una disminución en las concentraciones se puede relacionar con la disminución de la movilidad. Sin embargo, durante cuarentena no se vio una disminución significativa en más del 20% de los días de confinamiento y esto se puede deber a que otra de las fuentes principales para este MP es de carácter residenciales, como la cuarentena se presentó en el periodo marzo a agosto (otoño- invierno) se tuvo como fuentes de emisión activas la combustión de leña y combustibles para la calefacción de los hogares.

Esta disminución no se puede atribuir exclusivamente a la cuarentena ya que como se muestra en la tendencia histórica la disminución se viene presentando al menos desde el 2015 sin embargo y a diferencia de lo ocurrido en MP_{10} se muestra una depresión notoria que no se había presentado antes. Esta tendencia a la disminución se puede deber a la ejecución del plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana (BCN, 2017b). Las principales medidas de este plan corresponden al control de emisiones asociadas a fuentes móviles y fijas además de la regulación para el control de quema de leña y sus derivados, control de quema agrícola, control del levantamiento de polvo y la compensación de emisiones. Para esta estación fue posible cruzar los datos con los informes diarios del Ministerio de Salud (MINSAL) y las concentraciones de $MP_{2,5}$, se obtuvo que existe una correlación fuerte y positiva (valor $p < 0,001$ y $p = 0,58$) entre la concentración de $MP_{2,5}$ y los internados en la unidad de cuidados intensivos de la red hospitalaria (UCI) de la RM (Fig. 1, Anexo 1), es decir a mayores concentraciones de $MP_{2,5}$ se internaron más pacientes un UCI. Para el MP_{10}

se determinó una correlación positiva débil (valor $p < 0,001$ y $p = 0,33$) con los pacientes UCI.

Temuco

Para esta estación se muestra solo un mes que superó el promedio histórico para MP_{10} (octubre) y para $MP_{2,5}$ no se muestra superación del histórico, por lo que con estos datos se puede determinar que hubo una disminución de las concentraciones en el 2020. Sin embargo, pareciera ser una disminución sostenida, y no producto de la cuarentena o la pandemia ya que en Chile estas comenzaron en marzo y los meses previos muestran la misma disminución que los demás meses al igual como se presenta en Calama.

Al realizar los gráficos Theil Sen se ve una diferencia en el comportamiento de ambas pendientes, ambas la de MP_{10} y $MP_{2,5}$ son negativas al agregar el 2020, el MP_{10} disminuye la pendiente en una magnitud de 1,37 y $MP_{2,5}$ en 0,44, y en las dos se ve una gran curva de depresión. La curva del MP_{10} se vuelve significativa en relación con el periodo histórico, sin embargo, a pesar de que $MP_{2,5}$ también sufrió una gran curva de disminución no logra dar el nivel de significancia como lo hace MP_{10} .

Las líneas de tiempo obtenidas con la función Time Plot de MP_{10} en comparación con $MP_{2,5}$ se muestran dentro de escalas similares, entre 1 y $400 \frac{\mu g}{m^3}$, mostrando una mayor densidad en los $100 \frac{\mu g}{m^3}$. En algunas ocasiones los valores diarios de MP_{10} y $MP_{2,5}$ se encuentran muy cercanos entre ellos, mostrando que de manera relativa existe mayor presencia de partículas con diámetro aerodinámico menores a $2,5 \mu m$ que de MP con tamaño de partícula entre $2,5 \mu m$ y $10 \mu m$. Este comportamiento puede indicar una mayor cantidad de fuentes de emisión de $MP_{2,5}$ como la leña y que no se vieron afectadas

por el confinamiento. Además, estos gráficos muestran una gran variabilidad en los datos, generando así límites de confianza más amplios que para las otras estaciones.

Al comparar el 2020 con el histórico ambos MP tienen un comportamiento similar, en todo momento se encuentran por debajo de la tendencia histórica, pero además sufren una disminución, posicionando la LS por debajo del LC, ambos en el mismo periodo, durante los días del 114 (29/04) al 208 (01/08) que corresponden a 94 días consecutivos. Un total de 84 de ellos se encuentran inválidos, y los otros poseen valores por debajo del histórico, esto prueba una vez más la poca eficiencia de un promedio de periodos largos como el mensual, ya que al existir algunos datos es posible hacer un promedio, pero no representaría la realidad. Al evaluar el promedio histórico con los años que lo conforman por separado se determinó que el histórico se aleja entre un 0,5% a 10,8% anualmente para MP_{10} y entre un 7,1% a 14,9% para $MP_{2,5}$. Esta falta de datos se puede deber a que las estaciones detienen sus mediciones cuando hay una construcción cerca o algún equipo no se encuentra útil. El método de medición de MP es por atenuación beta con el monitor de partículas BAM modelo 1020 (SINCA, 2021-b), el cual puede funcionar sin supervisión, por lo que la falta de datos durante ese periodo no se puede asociar a la no concurrencia de analistas a la estación. Otro factor, aunque poco probable es que el monitor pierda resolución a altas concentraciones de MP, se hace esta conjetura debido a que cuando se solicitó la aprobación del método se realizaron campañas en sectores donde las concentraciones no sobrepasaron los $100 \frac{\mu g}{m^3}$ (Gobeli y col., 2008) y dado que anteriormente se han presentado concentraciones horarias mayores a $600 \frac{\mu g}{m^3}$, podría ser una opción.

Al evaluar estadísticamente se pudo determinar que los periodos que más presentaron episodios de disminución fueron previos y post de la primera cuarentena, esto se pudo deber primero a que las cuarentenas fueron muy breves y se encuentran fuera del periodo con mayores concentraciones de MP registrados históricamente (periodo invernal que corresponde a “post cuarentena”).

La velocidad del viento presentada en el 2020 muestra el mismo comportamiento que para los años anteriores, mostrando valores más constantes durante todo el año a diferencia de las otras estaciones que presentan una disminución en el promedio mensual durante el periodo otoño-invierno. A pesar de esto el mes de mayo sufrió una disminución significativa en comparación a los otros años. Sin embargo, la concentración mensual (mayo) de ambos MP estuvo por debajo del histórico y de los 5 años previos.

Con respecto a las precipitaciones, esta ciudad es la que presenta mayor cantidad de agua lluvia que las otras estaciones, es por esto que para esta estación no se consideró un total de 23 datos significativos para MP_{10} y 27 para $MP_{2,5}$ ya que estos días presentaron más de 1 mm de precipitaciones.

Porcentualmente esta estación es la que presenta un mayor efecto en la concentración diaria durante el periodo de cuarentena. Al hacer el análisis con respecto al año completo se determinó que un 3,3% de los 360 días analizados presentaron una disminución significativa en el MP_{10} y un 0,8% de estos días presentaron un aumento significativo. Para $MP_{2,5}$ la disminución significativa corresponde a un 2,5% de los días y el aumento significativo a un 1,1%. Todos estos días corresponden a fase 1.

Las principales fuentes de emisión para MP corresponde a fuentes aéreas y más específicamente a combustión de leña con un aporte porcentual de 72,3% MP_{10} y de 77,0% para $MP_{2,5}$. Para MP_{10} la siguiente fuente con mayor contribución corresponde a fuentes fugitivas proveniente de polvo resuspendido y construcción con un aporte total del 25,0%, esta fuente aporta el 3,5% del $MP_{2,5}$. Las fuentes móviles en ruta contribuyen el 2,3% para cada MP (SICAM, 2018).

Dado que la movilidad disminuyó entre un 43% a 48% para la primera cuarentena y un 17% a 27% en el segundo confinamiento (ISCI, 2021), este tipo de fuente (transporte) debió disminuir sus emisiones y contribuir al comportamiento presentado en esta estación. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente los datos presentan una especie de dilución de las concentraciones ya que se presentaron 122 datos inválidos de los 360 estudiados, esto sumado a que en los meses con mayores “NV” (abril, mayo, junio, julio y agosto) presentaron algunos datos y mayoritariamente por debajo del histórico, es que las interpolaciones realizadas por las funciones Theil Sen y Time Plot pueden no mostrar el comportamiento real del 2020.

Al estudiar solo los datos válidos, se presentan en general episodios de disminución en la concentración diaria en comparación con el histórico. Esta disminución no se le puede atribuir exclusivamente a la disminución de la movilidad, ya que como se determinó en el inventario de emisiones, la mayor fuente corresponde a la combustión por leña, la cual no fue afectada por la cuarentena ya que no fue parte de ninguna medida gubernamental. Por esta razón es que esta disminución se puede asociar al cumplimiento del PPDA de la zona, el cual tiene medidas que incluyen mejoramiento de

la calidad de la leña, mejoramiento de la eficiencia térmica de viviendas, control de emisiones de fuentes fijas y móviles entre otros.

Para finalizar un factor meteorológico que no se consideró dentro del estudio fue la sequia que afecta a Chile (Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2015).

La falta de precipitaciones disminuye el transporte del MP del aire al suelo por lo que la concentración de MP atmosférico debiera aumentar, sin embargo, eso no sucedió, pero es una posibilidad que tal vez en un periodo sin sequia la disminución de la concentración fuera mayor.

Con la sequía la humedad relativa debiera ser menor y si eso pasa la capa de inversión debiera estar más baja y por lo tanto la concentración de MP también debiera aumentar por que disminuye el transporte vertical.

La sequía se viene presentando desde hace más de 10 años en Chile (Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2015), por lo que los datos utilizados como históricos presentan ese factor en el comportamiento por lo que el análisis no se encontraría sesgado bajo esa característica.

V. CONCLUSIÓN

Para la ciudad de Calama no es posible determinar que la cuarentena fue la causante exclusiva de la disminución en las concentraciones diarias de MP ya que los días de cuarentena que presentaron una disminución en sus concentraciones diarias no superan el 20%.

Dado que la principal fuente de emisión de la ciudad de Calama corresponde a la industria minera es que se plantea un mejoramiento a en las políticas públicas, comenzando por la promulgación de un plan de descontaminación atmosférica de la zona de Calama y no exclusivamente para Chuquicamata y sus alrededores. Este plan de descontaminación debiera tener como objetivo principal el control de emisiones de la industria minera enfocándose en el polvo fugitivo ya que es de gran impacto debido a las ráfagas de viento de la zona.

Para la comuna de Santiago se puede concluir que el confinamiento y con esto la reducción de la movilidad sí habría ayudado a la disminución del material particulado 2,5 no así para el MP_{10} . Además, ya que la tendencia para $MP_{2,5}$ se viene viendo desde al menos el 2015 se puede indicar que el PPDA para la región metropolitana está logrando el objetivo de reducir y controlar las emisiones. A futuro el inventario de emisiones debiera centrarse en determinar con mayor exactitud las principales fuentes de MP_{10} con la finalidad de mejorar el plan de descontaminación ya que como se ha visto desde el 2015 las concentraciones de este tipo de MP no han sufrido cambio.

Para la ciudad de Temuco comuna Padre las Casas se presentó mayoritariamente una disminución en la concentración diario de MP en comparación con el promedio histórico, parte de esta disminución podría ser asociada a la disminución de emisiones de fuentes móviles. Pero dado que la principal fuente de emisión es la combustión a leña esta disminución también se puede asociar al cumplimiento del PPDA de la zona.

En el futuro se debiera implementar algún tipo de plan de gestión para disminuir el uso de leña como medio de calefacción para mejorar la calidad del aire de en la ciudad. Esto se podría hacer por medio de motivación a la población a realizar el cambio de artefactos de calefacción utilizados en las viviendas a través de bono de calefacción o compensación a quienes cambian su método de calefacción.

VI. REFERENCIAS

1. Abdullah, S., Mansor, A. A., Napi, N. N. L. M., Mansor, W. N. W., Ahmed, A. N., Ismail, M., & Ramly, Z. T. A. (2020). Air quality status during 2020 Malaysia Movement Control Order (MCO) due to 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) pandemic. *Science of The Total Environment*, 729, 139022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139022>
2. Arregocés, H. A., Rojano, R., & Restrepo, G. (2021). Impact of lockdown on particulate matter concentrations in Colombia during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 764, 142874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.14287>
3. BCN, Biblioteca del Congreso. (2011, mayo 9). *Decreto 12 | ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE MP 2,5*. <https://Www.Bcn.Cl/Leychile/Navegar?IdNorma=1025202>. <https://www.bcn.cl/leychile>
4. BCN, Biblioteca del Congreso. (1996, agosto 1). *DECRETO 131 | DECLARA ZONA SATURADA POR OZONO, MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE, PARTICULAS EN SUSPENSION Y MONOXIDO DE CARBONO, Y ZONA LATENTE POR DIOXIDO DE NITROGENO, AL AREA QUE INDICA*. [Www.Bcn.Cl/Leychile. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=9768](https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=9768)
5. BCN, Biblioteca del Congreso. (1998, mayo 25). *DECRETO 59 | ESTABLECE NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE MP10, EN ESPECIAL DE LOS VALORES QUE DEFINEN SITUACIONES DE EMERGENCIA*. [Www.Bcn.Cl/Leychile. https://www.bcn.cl/leychile](https://www.bcn.cl/leychile)
6. BCN, Biblioteca del Congreso. (2001, octubre 4). *DECRETO 206 | ESTABLECE NUEVO PLAN DE DESCONTAMINACION PARA LA ZONA CIRCUNDANTE A LA FUNDICION CHUQUICAMATA DE LA DIVISION CHUQUICAMATA DE CODELCO CHILE*. [Www.Bcn.Cl/Leychile. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=190194&idParte=0](https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=190194&idParte=0)
7. BCN, Biblioteca del Congreso. (2013, diciembre 12). *DECRETO 28 | ESTABLECE NORMA DE EMISIÓN PARA FUNDICIONES DE COBRE Y FUENTES EMISORAS*

DE ARSÉNICO. Www.Bcn.Cl/Leychile.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1057059>

8. BCN, Biblioteca del Congreso. (2014, noviembre 15). *DECRETO 67 | DECLARA ZONA SATURADA POR MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE MP2,5, COMO CONCENTRACIÓN DE 24 HORAS, A LA REGIÓN METROPOLITANA*. Www.Bcn.Cl/Leychile.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1069387&idParte=0>
9. BCN, Biblioteca del Congreso. (2017a, julio 11). *RESOLUCIÓN 497 | EXENTA PONE TÉRMINO AL PROCESO QUE SE INDICA Y DA NUEVO INICIO AL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA CIUDAD DE CALAMA Y SU ÁREA CIRCUNDANTE*. Www.Bcn.Cl/Leychile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1105049>
10. BCN, Biblioteca del Congreso. (2017b, noviembre 24). *DECRETO 31 | ESTABLECE PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO*. Www.Bcn.Cl/Leychile.
11. Carslaw, D. (2012). *The openair manual open-source tools for analysing air pollution data*.
12. Celis, J. E., Morales, J. R., Zaror, C. A., & Carvacho, O. F. (2007). Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán (Chile). *Información tecnológica*, 18(3), 49-58.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000300007>
13. CENMA, C. N. del M. A. (2014). *Evaluación de la calidad del Aire en la Región de Antofagasta*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/03/Informe-calidad-del-aire-diciembre-2014.pdf>
14. Cochilco, C. C. del C. (s. f.). *Inventarios Mundiales de Cobre | Cochilco*. Recuperado 4 de agosto de 2021, de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Inventarios-Mundiales-de-Cobre-.aspx>
15. CONICYT, Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. (2010). *Diagnóstico de las capacidades y oportunidades de desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación*. <https://www.conicyt.cl/regional/files/2013/06/Metropolitana.pdf>
16. DGA, Dirección General de Aguas. (2021). Recuperado 4 de agosto de 2021, de <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>

17. Dictuc, greenlab. (2018). *Antecedentes para la elaborar el plan de descontaminación Atmosférica de la ciudad de Calama y su área circundante.*
18. Dietrichson, A. (2021). *Métodos Cuantitativos.*
<https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/>
19. Gobeli, D., Schloesser, H., & Pottberg, T. (2008). *Met One Instruments BAM-1020 Beta Attenuation Mass Monitor US-EPA PM2.5 Federal Equivalent Method Field Test Results.*
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.584.2489&rep=rep1&type=pdf>
20. Gobierno de Chile. (2021). *Gob.cl—Cifras Oficiales.* Gobierno de Chile.
<https://www.gob.cl/coronavirus/cifrasoficiales/>
21. Gómez-Lobo, A., Luis Lima, J., Hill, C., & Meneses, M. (2006). *Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile.* http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-50791_informe_final.pdf
22. González-Rojas, C. H., Leiva-Guzmán, M., Manzano, C. A., Morales S., R. G. E., & Araya, R. T. (2021). Short-term air pollution events in the Atacama desert, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 103010.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103010>
23. GORE Antofagasta, Gobierno Regional, Región de Antofagasta (2021). *Aspectos Económicos.* Recuperado 7 de agosto de 2021, de
<http://goreantofagasta.cl/goreantofagasta/site/artic/20160926/pags/20160926095739.html>
24. Ilustre Municipalidad de Calama. (2009). *Plan de Desarrollo Comunal 2010-2017.*
25. Ilustre municipalidad de Santiago. (2015). *Plan local de Cambio Climático.*
<http://www.munistgo.info/medioambiente/wp-content/uploads/2016/10/PLCC-Santiago.pdf>
26. INE, Instituto Nacional de Estadística. (2019). *Compendio Estadístico, Región de la Araucanía 2017-2018.* https://regiones.ine.cl/documentos/default-source/region-ix/estadisticas-r9/publicaciones-anuales-enfoques-y-minutas/compendios-estad%C3%ADsticos/presentaci%C3%B3n-compendio-2019.pdf?sfvrsn=ade369f0_2

27. ISCI, Instituto Sistema Complejos de Ingeniería (2021). Visor Movilidad. *Covidanalytics*. Recuperado 4 de agosto de 2021, de <https://covidanalytics.isci.cl/movilidad/visor-movilidad/>
28. Jorquera González, H., & Rizzi Campanella, L. I. (2015). *Introducción a la contaminación atmosférica*.
29. Jorquera, H. (2009). Source apportionment of PM₁₀ and PM_(2.5) at Tocopilla, Chile (22 degrees 05' S, 70 degrees 12' W). *Environmental Monitoring and Assessment*, 153(1-4), 235-251. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0352-0>
30. Jorquera, H., & Villalobos, A. M. (2020). Combining Cluster Analysis of Air Pollution and Meteorological Data with Receptor Model Results for Ambient PM_{2.5} and PM₁₀. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8455. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228455>
31. Lei, Y., Zhang, J., Schiavon, C. R., He, M., Chen, L., Shen, H., Zhang, Y., Yin, Q., Cho, Y., Andrade, L., Shadel, G. S., Hepokoski, M., Lei, T., Wang, H., Zhang, J., Yuan, J. X.-J., Malhotra, A., Manor, U., Wang, S., ... Shyy, J. Y.-J. (2021). SARS-CoV-2 Spike Protein Impairs Endothelial Function via Downregulation of ACE 2. *Circulation Research*, 128(9), 1323-1326. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.121.318902>
32. MMA, M. del medio ambiente. (2012). *Informe sobre calidad del aire en Chile y regiones de Chile*.
33. OPS, Organización Panamericana de la Salud, & OMS, Organización Mundial de la Salud. (2020). *Actualización Epidemiológica. Nuevo coronavirus (COVID-19)*. https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&alias=51758-14-de-febrero-de-2020-nuevo-coronavirus-covid-19-actualizacion-epidemiologica-1&category_slug=2020-alertas-epidemiologicas&Itemid=270&lang=es
34. Organización Mundial de la Salud. (2020). *Preguntas y respuestas sobre la enfermedad por coronavirus (COVID-19)*. Recuperado 23 de noviembre de 2020, de <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public/q-a-coronaviruses>
35. Oyarzún G, M. (2010). Air pollution an its effects on health. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26(1), 16-25. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482010000100004>

36. Quiroz Carrillo, C. G., Pareja Cruz, A., Valencia Ayala, E., Enriquez Valencia, Y. P., De Leon Delgado, J., Aguilar Ramirez, P., Quiroz Carrillo, C. G., Pareja Cruz, A., Valencia Ayala, E., Enriquez Valencia, Y. P., De Leon Delgado, J., & Aguilar Ramirez, P. (2020). Un nuevo coronavirus, una nueva enfermedad: COVID-19. *Horizonte Médico (Lima)*, 20(2). <https://doi.org/10.24265/horizmed.2020.v20n2.11>
37. Rojas, J. P., Urdanivia, F. R., Garay, R. A., García, A. J., Enciso, C., Medina, E. A., Toro, R. A., Manzano, C., & Leiva-Guzmán, M. A. (2021). Effects of COVID-19 pandemic control measures on air pollution in Lima metropolitan area, Peru in South America. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(6), 925-933. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-00990-3>
38. Salvador, A., Arasa, R., & Codina, B. (2016). Aeolian Dust Forecast in Arid and Semiarid Regions of Peru and Chile and Their Contribution over Particulate Matter Concentration. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04(01), 128. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.41015>
39. Sarricolea, P., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2015). *Vista de Sequías en Chile central a partir de diferentes índices en el período 1981-2010*. <https://revistas.uchile.cl/index.php/IG/article/view/41178/42715>
40. Seguel, R. J., Morales S., R. G. E., & Leiva G., M. A. (2012). Ozone weekend effect in Santiago, Chile. *Environmental Pollution*, 162, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.019>
41. SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. (2007). *Anuario de la Minería de Chile*. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/Anuarios/anuario_2007.pdf
42. Shabir, O. (2020, junio 8). *¿Cuál es R0?* News-Medical.Net. [https://www.news-medical.net/health/What-is-R0-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/health/What-is-R0-(Spanish).aspx)
43. SICAM, Ingeniería, (2018). *Actualización del Inventario de emisiones Atmosféricas para las comunas de Temuco y Padre las Casas, año base 2017*. http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=3b3f2447-86a8-41b2-a234-3e55b6c7b4d3&fname=Informe%20Final_Actualizaci%C3%B3n%20Inv%20Emis%20Tco%20y%20PLC_Vfinal.pdf&access=public
44. SINCA, Sistema Nacional de Calidad del Aire. (2021-a). *Estado de calidad del aire en línea*. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Recuperado 4 de agosto de 2021, de <https://sinca.mma.gob.cl/mapainteractivo/index.html>

45. SINCA, Sistema Nacional de Calidad del Aire. (2021-b). *Preguntas frecuentes— Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire*. Recuperado 4 de agosto de 2021, de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/faq>
46. SINIA, Sistema Nacional de Información Ambiental. (2019). *Estado del medio ambiente, Calidad del Aire*. Recuperado 4 de agosto de 2021, de <http://sistemaintegrador.mma.gob.cl/mma-centralizador-publico/indicador/vistaIndicador.jsf?id=4BCF9A6C-077D-9CDF-96E0-0760CD7EA71B&subtema=3>
47. Stehlík, M., Economou, P., Papić, L., Aronov, J., Nicolis, O., Antoch, J., Cézová, E., & Kiseľák, J. (2018). Statistical testing of availability for mining technological systems with air quality constraints. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 34(3), 278-292. <https://doi.org/10.1002/asmb.2337>
48. Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendeزú, Y., & Pomalaya, J. (2017). Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(2), 187-199.
49. Tolosa, D. S. S. (2010). *DISPERSIÓN DEL MP10 EN TEMUCO: CONSTRUCCIÓN DEL ESCENARIO BASE Y ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA AMBIENTAL*. 184.
50. Toro A, R., Catalán, F., Urdanivia, F. R., Rojas, J. P., Manzano, C. A., Seguel, R., Gallardo, L., Osses, M., Pantoja, N., & Leiva-Guzman, M. A. (2021). Air pollution and COVID-19 lockdown in a large South American city: Santiago Metropolitan Area, Chile. *Urban Climate*, 36, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100803>
51. Torres, C. Y., & Landines, M. L. (2020). *Causas, Efectos y Oportunidades Socioeconómicas Derivadas del Coronavirus COVID-19*. 21.
52. UFRO, Universidad de la Frontera, & IDER, Instituto de Desarrollo Local y Regional. (2006). *Plan de Desarrollo Comunal de Padre las Casas*. <http://www.padrelascasas.cl/plc/INFORME%20FINAL%20PLADECO%20PLC.pdf>
53. USACH, Universidad de Santiago de Chile. (2014). *Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana*. http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-56914_Inf_Inventarios_FINAL.pdf

54. Villalobos, A. M., Barraza, F., Jorquera, H., & Schauer, J. J. (2015). Chemical speciation and source apportionment of fine particulate matter in Santiago, Chile, 2013. *Science of The Total Environment*, 512-513, 133-142.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.006>
55. Yáñez León, S. A. (2012). *Contaminación por uso de leña en las comunas de Temuco y Padre las Casas. Análisis comparativo de políticas públicas utilizadas a nivel Internacional*. Universidad de la Frontera.

VII. ANEXO 1

MP10 vs MP2,5 por niveles de Pacientes UCI, Santiago

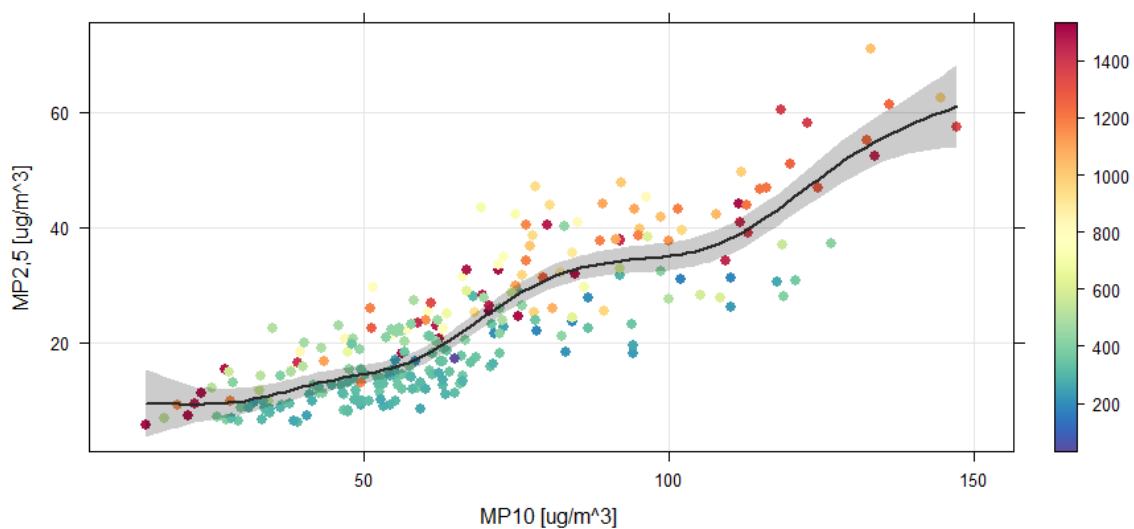


Figura 1. Diagrama de dispersión de MP_{10} y $\text{MP}_{2,5}$ por niveles de internación de pacientes en el área de Unidad de Cuidados Intensivos en la red hospitalario de la región Metropolitana.