



Universidad del Desarrollo

Facultad de Ingeniería

**PLANES DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN CHILE: EVALUACIÓN
DE IMPACTO, ATRIBUCIONES Y TENDENCIAS**

POR: CAROLINA MACARENA CONCHA RAMÍREZ

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo para
optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería

PROFESOR GUÍA:

PhD ZOE FLEMING

Septiembre, 2024

SANTIAGO, CHILE

© Se autoriza la reproducción de esta obra en modalidad acceso abierto para fines académicos o de investigación, siempre que se incluya la referencia bibliográfica.

© Se autoriza la reproducción de fragmentos de esta obra para fines académicos o de investigación, siempre que se incluya la referencia bibliográfica

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia por todo el apoyo que me brindan siempre, por permitirme seguir mis sueños y acompañarme en cada paso. Nada de esto sería posible sin ustedes.

A las personas que formaron parte de este proceso desde lo académico, comenzando por mi profesora guía, Zoë Fleming, quien no solo ha guiado este trabajo, sino que gran parte del desarrollo profesional que he tenido hasta ahora, entregándome la confianza para avanzar según mis propios intereses y apoyándome durante todo este proceso.

Al equipo de investigación y coordinación de postgrado de la universidad, en especial a Rocío Nettle, por ayudarme en cada etapa, desde mi entrada al magíster y a Paul Bosch, por entregarme las oportunidades necesarias para poder realizar este trabajo de la mejor manera posible. A Manuel Leiva, Camilo Menares, Kevin Basoa y Sebastián Diez, por darse un tiempo cada vez que necesite guía, ayuda o comentarios.

A mis compañeros del Centro de Innovación por darme ánimos y apoyo siempre que lo necesité, especialmente al grupo de investigación EnviroHealth, dentro del cual se enmarca este trabajo de tesis, al FONDEQUIP Mayor EQY200021 y al proyecto FONDECYT regular 1221951 por entregar financiamiento para esta investigación.

Tabla de contenido

1. Introducción	7
1.1 Chile y la contaminación atmosférica.....	10
1.1.1 Red SINCA.....	12
1.1.2 Zonas latentes, zonas saturadas y zonas de sacrificio	13
1.1.3 Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA)	15
1.1.4 Normativa	18
1.2 Estudios relacionados a calidad del aire	20
1.3 Definición del problema.....	24
1.4 Motivación de investigación.....	25
1.5 Pregunta de investigación.....	25
2. Objetivos	26
2.1 Objetivo general.....	26
2.2 Objetivos específicos	26
3. Metodología	27
3.1 Búsqueda de información y descarga de datos	27
3.2 Tratamiento de datos	28
3.3 Análisis de datos.....	28
3.4 Contextualización y agrupación de planes.....	31
4. Resultados.....	32
4.1 Principales medidas.....	33

4.1.1 Evaluación medidas respecto a registro de emisiones.....	36
4.2 Series de tiempo	39
4.3 Episodios críticos.....	42
4.4 Análisis de punto de quiebre	51
4.5 Análisis de tendencias.....	54
4.6 Comparación con sectores sin PDA.....	64
5. Discusiones	68
5.1 Implementación PDA	68
5.2 Estaciones y Red SINCA.....	70
5.3 Análisis datos y calidad del aire	71
5.4 Episodios Críticos.....	74
5.5 Datos intra-planos	74
5.6 Análisis Punto de Quiebre.....	77
5.7 Análisis de Tendencias	78
5.8 Comparación sectores sin PDA	85
6. Conclusiones.....	87
7. Referencias.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

GEC: Gestión de Episodios Críticos

MMA: Ministerio del Medio Ambiente

MP: Material Particulado

NOx: Óxidos de Nitrógeno

OMS: Organización Mundial de la Salud

PDA: Plan de Descontaminación Atmosférica

PPDA: Plan para la Prevención y/o Descontaminación Atmosférica

RM: Región Metropolitana

SINCA: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire

RESUMEN

Los altos niveles de contaminación atmosférica es una importante problemática nacional. Chile se encuentra en los primeros lugares en los rankings de ciudades más contaminadas de Latinoamérica. Como medida frente a esto, para sectores con niveles de Material Particulado (MP) sobre la normativa, el gobierno ha implementado Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), una herramienta de gestión ambiental que busca reducir los niveles de contaminación para que estos se encuentren dentro de los límites permitidos. El objetivo de esta investigación es evaluar el impacto de los PDA implementado, a partir de parámetros estadísticos y análisis de datos y, comparar los resultados obtenidos por sectores para la determinación de la eficiencia de estos. Se utilizó una metodología cuantitativa de análisis de tendencias, utilizando el estimador Theil-Sen, un análisis de episodios críticos e implementación de medidas. Los resultados muestran una disminución significativa en 79.2% y 73.9% de las estaciones analizadas, para MP_{10} y $MP_{2.5}$, respectivamente. La mayor reducción de MP_{10} se presentan en la zona centro-sur y sur, mientras que para $MP_{2.5}$ corresponden a la zona norte y centro. Se determinó que la concentración de MP_{10} y $MP_{2.5}$ ha disminuido en las zonas donde se ha aplicado un PDA, sin embargo, en la mayoría de los casos esta disminución se relaciona con medidas puntuales previas más que a la implementación del plan, además, en casos donde se ha cumplido las medidas planteadas no se ha logrado alcanzar niveles óptimos de MP.

1. Introducción

La contaminación atmosférica es una problemática actual y latente a nivel global, tanto para países desarrollados como en vías de desarrollo (Saxena y Naik, 2019). Los altos niveles de contaminación atmosférica presentes hoy en día se asocian principalmente al crecimiento poblacional y a la industrialización, lo que ha generado un aumento de emisiones de contaminantes al aire, cambiando su composición y afectando tanto a distintos ecosistemas como a la salud de las personas (Monks, 2021). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que millones de muertes al año son causadas por la exposición a contaminantes atmosféricos, con una carga de morbilidad comparable al tabaquismo, siendo reconocida como una de las mayores amenazas ambientales actuales para la salud humana (OMS, 2021). Esta problemática es relativamente reciente, la preocupación por la contaminación atmosférica comienza en el siglo XX, sin embargo, recién en el siglo XXI empieza a tomar una mayor importancia debido a que es cuando comienzan a visualizarse sus consecuencias e incrementa el conocimiento al respecto, así como también el número de contaminantes presentes (Monks, 2021).

Las fuentes de contaminación atmosférica pueden ser antropogénicas, como industriales, vehiculares, calefacción, etc., o naturales, como las erupciones volcánicas, las que se ha evidenciado que emanan concentraciones importantes de SO₂ y otros materiales a la atmósfera. Para cada país, ciudad, e incluso dentro de estas, varía la fuente predominante de contaminación, siendo necesario un

análisis caso a caso para poder conocer y evaluar el escenario presente y poder tomar medidas con la mayor información posible. Sumado a esto, también tienen un papel importante la geografía del lugar, meteorología, y otros factores que afectan la dispersión y dinámica de los contaminantes, y que deben evaluarse en conjunto con las emisiones y fuentes.

Dentro de los principales contaminantes atmosféricos se encuentran: Material Particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COVs), y ozono (O₃) (Mallik, 2019).

El MP corresponde a partículas en suspensión que se encuentran en la atmósfera, se pueden clasificar según su tipo (primario, secundario); fuente (natural, antropogénica); y tamaño, esta última corresponde a la principal clasificación utilizada para referirse al MP (Tabla I).

Tabla I Clasificación MP según tamaño

Tipo	Diámetro aerodinámico	Características
MP₁₀	< 10 µm	Respirable. Partículas capaces de entrar a nuestro sistema y generar daño a la salud. Mayoritariamente son emitidas de forma directa a la atmósfera.
MP_{2.5}	< 2.5 µm	Partículas finas. Al ser de tamaño pequeño logran entrar a los pulmones, causando daños respiratorios y cardiacos. Pueden ser emitidas de forma directa por combustión o formarse de manera secundaria en la atmósfera.
MP₁	< 1 µm	Partículas muy pequeñas. Capaces de ingresar en membranas internas del cuerpo. Son capaces de transportar gran cantidad

		de otros compuestos en su superficie, generando un daño mayor.
PUF	< 0.1 μm	Partículas Ultrafinas (PUF). Corresponden a la mayor cantidad de partículas presentes, son capaces de ingresar al sistema circulatorio.

En general, la contaminación por MP_{10} viene de emisiones directas como procesos mecánicos de re-suspensión de polvo. Por otro lado, la contaminación por $\text{MP}_{2.5}$ presenta una dinámica más compleja, determinada tanto por las emisiones urbanas de $\text{MP}_{2.5}$ a partir de fuentes directas; por las emisiones de precursores atmosféricos de $\text{MP}_{2.5}$, como amonio, NO_x , SO_2 y COV, como fuente indirecta; las condiciones meteorológicas y geofísicas, como la altura de la capa de mezcla, procesos radiativos, uso de tierra, topografía y; por contribuciones desde fuentes rurales o regionales (Jorquera, 2020). Además, las concentraciones de $\text{MP}_{2.5}$ tienden a presentar ciclos de variación anuales, dadas principalmente por los cambios en las condiciones meteorológicas a lo largo del año, lo que genera cambios en las condiciones de dispersión y en las fuentes de emisión (Jorquera, 2020).

Considerando su especiación, la composición de MP es muy diversa, variando también sus efectos en la salud. Si bien, la mayoría de los estudios analiza el MP según su tamaño, en los últimos años ha aumentado el interés por conocer la composición del MP y sus efectos. Por ejemplo, se ha evidenciado que una alta presencia de metales tóxicos en el MP induce cambios químicos que producen radicales libres, favoreciendo la oxidación de los tejidos al estar dentro de

organismos vivos (Harrison et. al, 2020), que una alta presencia de sulfatos muestra una fuerte correlación con un aumento en la tasa de mortalidad (Zhang, et. al, 2015) y que los componentes presentes en la fracción soluble del MP tienen un mayor efecto en el organismo ya que se disuelven fácilmente en los fluidos amortiguadores del sistema respiratorio (Harrison, et. al, 2020). Además, ha surgido interés por conocer el potencial oxidativo del MP, es decir, la capacidad del MP de generar especies de oxígeno reactivas (ROS) causantes de estrés oxidativo en el cuerpo humano (Molina, et. al, 2023).

1.1 Chile y la contaminación atmosférica

Actualmente en Chile se estima que más de 10 millones de personas en el país se encuentran expuestas a una concentración promedio anual de MP_{2.5} superior a la norma, sumado a esto la contaminación atmosférica es responsable de al menos 4 mil muertes prematuras a nivel nacional (MMA, 2014) y 3 mil admisiones hospitalarias, esto solo considerando efectos cardiopulmonares, por lo que los resultados podrían estar subestimados en un 50% aproximadamente (Huneus, 2020). Según el Informe de Calidad Ambiental del Aire de IQAir del año 2022, 8 ciudades de Chile se encuentran entre las 15 más contaminadas del Latinoamérica y el Caribe, ocupando el tercer lugar del ranking Quilpué (IAQAir, 2022) (Tabla II). En este mismo informe, Chile se encuentra en el puesto número 2 en la clasificación de países de Latinoamérica y el Caribe, siendo solo superado por Perú, y 43 en el ranking a nivel mundial, con una media de MP_{2.5} anual de 22,2 µg/m³ el año 2022.

Tabla II Ranking ciudades más contaminadas Latinoamérica año 2022
(Obtenida de: IAQAir, 2022)

Rango	Ciudad	País	Media MP_{2.5} año 2022 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1	San Juan de Lurigancho	Perú	41,2
2	Vitarte	Perú	40,0
3	Quilpué	Chile	39,1
4	Santa Anita	Perú	38,8
5	Coyhaique	Chile	37,7
6	Carabayllo	Perú	37,6
7	Metepéc	México	36,1
8	Villa María del Triunfo	Perú	35,0
9	Padre de las Casas	Chile	33,8
10	Villa Alemana	Chile	33,0
11	Traiguén	Chile	30,1
12	Llailay	Chile	29,0
13	Xonacatlán	México	28,5
14	El Bosque	Chile	28,3
15	Providencia	Chile	28,2

Debido a la variabilidad geográfica, meteorológica y las distintas actividades económicas que se desarrollan a lo largo del país, varían las principales fuentes y causas de contaminación atmosférica, dificultando tomar medidas macros a nivel nacional para combatir la contaminación atmosférica. En la zona norte la principal fuente de contaminación corresponde a la industria minera, en la zona central predomina el tráfico vehicular e industrias, mientras que, en la zona sur las mayores emisiones se asocian a los métodos de calefacción utilizados (Lagos et. al, 2001; Molina et. al, 2017).

1.1.1 Red SINCA

Para conocer los niveles de contaminación en Chile el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) cuenta con el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), encargado de monitorear contaminantes y meteorología a lo largo del país.

Según lo reportado por su sitio web (<http://www.sinca.mma.gob.cl>) este cuenta con 223 estaciones a lo largo del país, destacando la Región de Valparaíso (38), la Región del Biobío (35) y la Región de Antofagasta (34) con una mayor cantidad, debido principalmente a la presencia de estaciones de privados asociados a las actividades industriales realizadas (Gráfico 1).

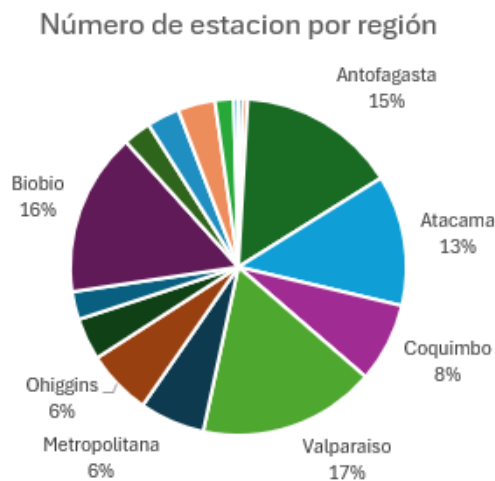


Gráfico 1 Número de estaciones por región

Respecto a contaminantes destacan las mediciones de MP₁₀ y MP_{2.5}, en 170 y 113 estaciones, respectivamente, además de SO₂, con 128 estaciones. NO₂, O₃

y CO cuentan con un menor número de estaciones, 76, 74 y, 69, respectivamente (Gráfico 2).

Número de estaciones por contaminante

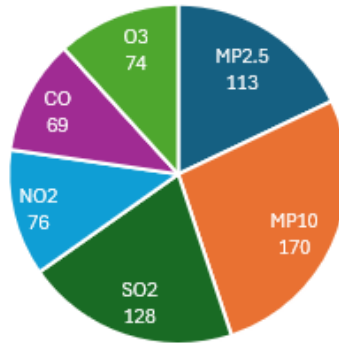


Gráfico 2 Número de estaciones por contaminante

1.1.2 Zonas latentes, zonas saturadas y zonas de sacrificio

Considerando los niveles de concentración de contaminantes presentes, el MMA ha adoptado los conceptos de zonas latentes y zonas saturadas, definida una zona latente como “*Aquella en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental*” (MMA, 2018), y una zona saturada como “*Aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas*” (MMA, 2018). Actualmente hay un total de 25 zonas declaradas saturadas y/o latentes en Chile. Las que se establecen a partir de un Decreto Supremo asociado.

Paralelamente a estos existe socialmente el concepto de Zona de Sacrificio. El documento “Zonas de sacrificio en Chile: Quintero-Puchuncaví, Coronel,

Mejillones, Tocopilla y Huasco” de la Asesoría Técnica Parlamentaria del año 2022 define una zona de sacrificio como un “*lugar o zona habitada, cuya calidad de vida y entorno medio ambiental ha sido afectada por la actividad industrial instalada*”. Estas zonas tienen una gran controversia al, por definición, sacrificar la calidad de vida y salud de las personas en pos del desarrollo industrial, yendo en contra del artículo 19 N°8 de la actual constitución chilena que otorga el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, siendo deber del estado velar por este. Actualmente, en Chile hay 5 zonas declaradas como zonas de sacrificio: Quintero-Puchuncaví, Coronel, Mejillones, Tocopilla y Huasco (Fig. 1), identificadas y definidas como tales a partir del Primer Conclave sobre Impacto Ambiental y Desarrollo Comunal del año 2014.



Fig. 1 Mapa Zonas de Sacrificio (Obtenido de: Futuro360, 2019)

1.1.3 Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA)

Asociados a los conceptos de zonas saturada y zona latente se encuentra la generación de Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA), instrumentos de gestión ambiental que buscan, a partir de la implementación de medidas y acciones específicas, reducir los niveles de contaminación en el aire. Estos se separan en Planes de Prevención Atmosférica (PPA) y Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA). Un plan de prevención corresponde a un instrumento de gestión ambiental que busca evitar la superación de una o más normas de calidad ambiental en una zona latente (D.S. 39/2013), mientras que un plan de descontaminación corresponde a un instrumento de gestión ambiental que busca reducir la presencia de contaminantes y recuperar los niveles señalados en las normas de calidad en una zona saturada (D.S. 39/2013). El MMA en su “Plan de Descontaminación Atmosférica: Estrategia 2014-2018” del año 2014 plantea un objetivo de 20 planes activos para el 2018, sin embargo, actualmente se cuenta con 16 planes vigentes en el país, el primero del año 1992 para la zona de Quintero y Puchuncaví, en la Región de Valparaíso.

Para la elaboración de los PPDA se consideran tanto parámetros ambientales, sociales y económicos. La elaboración de estos consta de 3 etapas principales: (1) elaboración de un ante proyecto de plan, considerando para esto el desarrollo de estudios científicos y análisis técnico-económicos; (2) etapa de consulta pública y; (3) elaboración del proyecto definitivo, considerando las observaciones formuladas. Paralelamente a la elaboración del ante proyecto se debe generar un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES), el que debe ser evaluado en conjunto con este (D.S. 39/2013). En general se ha

visto que el proceso de generación de planes de descontaminación es bastante extenso, con un promedio de 3 años desde que se declara una zona como saturada hasta la implementación de su plan asociado, tiempo importante considerando que son lugares donde se están superando los valores de contaminantes recomendados.

Estos planes cuentan con las medidas a tomar, evaluando las principales fuentes en cada caso. En la zona norte centrados principalmente en medidas como reducción de emisiones del área minera, mientras que en la zona centro-sur el principal enfoque es en la fiscalización en el comercio de leña, fomentando el uso de pellets y leña seca, y el reacondicionamiento de viviendas y cambios en las flotas vehiculares y calderas. En los casos necesarios los PPDA establecen las medidas a tomar en la gestión de episodios críticos, es decir, en casos de alerta, preemergencia y emergencia ambiental, además, plantean plazos de cumplimiento, fiscalización y educación ambiental. La tabla III muestra un resumen de los 16 PDA vigente actualmente a lo largo de Chile, ordenados de norte a sur. Cada plan varía respecto al contaminante considerado y a la norma establecida, la que puede ser anual o diaria. La tabla III muestra un resumen con los PDA vigentes ordenados de norte a sur.

En el caso de la zona norte, los PDA se centran en MP_{10} en concentración anual, sin embargo, al ir avanzando hacia el sur, comienza a incorporarse $MP_{2.5}$ y concentraciones diarias. En los casos de Valparaíso, Ñuble, Los Ríos y Los Lagos, su PDA considera ambos tipos de MP en concentraciones anual y diaria. Esto es causado por los distintos tipos de

fuentes, que emiten distintos tipos de contaminantes, y por las condiciones presentes que hacen que se supere una u otra norma de calidad ambiental.

Tabla III Resumen PDA

Región	PDA	Zona saturada/latente			PDA
		Contaminante	Norma	Fecha	Fecha
Antofagasta	Tocopilla	MP10	Anual	04-10-2007	12-10-2010
	Calama	MP10	Anual	30-05-2009	12-05-2022
Atacama	Huasco	MP10	Anual	23-05-2012	30-08-2017
Coquimbo	Andacollo	MP10	Diario y anual	06-04-2009	26-12-2014
Valparaíso	Concón, Quintero y Puchuncaví	MP10 MP2.5	Anual Diario	09-06-2015	27-12-2018
Metropolitana	Región Metropolitana	O3, MP10, CO, NO2	8 horas y anual	01-08-1996	24-11-2017
		MP2.5	Diario	15-11-2014	
O'Higgins	Valle Central Región de O'Higgins	MP10	Diario y anual	27-03-2009	05-01-2021
		MP2.5	Diario y anual	30-05-2018	
Maule	Talca y Maule	MP10	Diario y anual	22-06-2010	28-03-2016
	Valle Central de la Provincia de Curicó	MP10	Diario	08-03-2016	20-12-2019
Ñuble	Chillán y Chillán Viejo	MP10 MP2.5	Diario y anual	25-03-2013	28-03-2016
Biobío	Los Ángeles	MP10 MP2.5	Diario	11-06-2015	22-02-2017
	Concepción	MP10	Diario	25-07-2006	17-12-2019
		MP2.5	Diario	14-07-2015	
Araucanía	Temuco y Padre de las Casas	MP10	Diario	11-05-2005	27-02-2015
		MP2.5	Diario	06-05-2013	
Los Ríos	Valdivia	MP10 MP2.5	Diario y anual	10-06-2014	23-06-2017
Los Lagos	Osorno	MP10 MP2.5	Diario y anual	28-11-2012	28-03-2016
Aysén	Coyhaique	MP10	Diario y anual	28-11-2012	17-07-2019
		MP2.5	Diario	30-08-2016	

1.1.4 Normativa

Las normativas de calidad del aire se separan en 2 categorías: primarias y secundarias. Una norma de calidad de aire primaria se enfoca en los efectos a la salud de las personas, considerando población sensible, como asmáticos, niños y tercera edad. Por otro lado, las normas de calidad de aire secundarias se enfocan en la protección del medio ambiente, considerando en esto animales, cultivos, vegetación y construcciones (D.S. 38/2013).

En Chile, el MMA cuenta con decretos supremos que establecen las normas de calidad de aire primarias para 7 contaminantes (MP_{2.5}, MP₁₀, SO₂, NO₂, O₃, CO y Pb). En estas normas se establecen, además, los rangos establecidos para determinar alerta, preemergencia y emergencia ambiental en cada caso. Respecto a normas de calidad secundarias, solo hay una correspondiente a SO₂ y para Material Particulado Sedimentable (MPS) aplicable a la cuenca del Río Huasco, en la Región de Tarapacá (D.S. 22/2010).

La normativa entrega valores máximos permitidos 24 horas y anuales, en cada caso. La condición de superación del caso 24 horas implica que en un año calendario el percentil 98 de las concentraciones 24 horas registradas sea mayor o igual al límite permitido, actualmente se ha incorporado un nuevo criterio de superación para MP₁₀ y que busca implementar para MP_{2.5} que considera que al terminar un año calendario el número de días con mediciones por sobre la norma sea mayor a 7. En el caso de la norma anual, esta se considera superada

si el promedio aritmético de 3 años calendarios consecutivos, en cualquier estación, supere el límite máximo establecido.

La calidad del aire se separa principalmente en 5 categorías: Buena, Regular, Alerta, Pre-Emergencia y Emergencia Ambiental, teniendo cada categoría rangos de concentración. A partir del rango presente se puede conocer el estado del aire y que tan dañino están siendo los niveles de contaminación para la población, además para los episodios críticos, es decir, casos de Alerta, Pre-Emergencia y Emergencia Ambiental, se cuentan con medidas previsorias especiales a tomar para disminuir los niveles presentes.

La tabla IV muestra los niveles de concentración para cada caso considerando MP₁₀ y MP_{2.5}, según los valores entregados por los decretos supremos correspondientes (D.S. 12/2011 y D.S. 12/2022)

Tabla IV Valores Calidad del Aire

MP₁₀ [µg/m³]	MP_{2.5} [µg/m³]	Categoría
0-130	0-50	Bueno
131-179	51-79	Regular
180-229	80-109	Alerta
230-329	110-169	Preemergencia
>330	>170	Emergencia

Los valores de referencia para declarar una zona como latente y saturada corresponden a los establecidos por las normas primarias de calidad del aire chilenas. Es importante considerar que estos valores son superiores a lo

recomendado por la OMS y a lo normado en otros lugares del mundo. La tabla V muestra una comparación entre los valores de las normas chilenas de MP₁₀ y MP_{2.5} con los valores recomendados por la OMS (OMS, 2021).

Tabla III Comparación normativa chilena - OMS

	MP ₁₀ [µg/m ³]		MP _{2.5} [µg/m ³]	
	Anual	24 horas	Anual	24 horas
Chile	50	150	20	50
OMS	15	45	5	15

1.2 Estudios relacionados a calidad del aire

Diversos estudios han evidenciado una disminución en la concentración de MP₁₀ y MP_{2.5} en Santiago (Toro et. al, 2014; Barraza et. al, 2017; Gallardo et. al, 2018). Esto se ha asociado principalmente a avances tecnológicos, como convertidores catalíticos y cambios en la calidad del combustible, y a avances operativos, como nuevos sistemas de transporte (Gallardo, et. al, 2018). Sin embargo, Menares et. al (2020) menciona que, si bien se evidencia esta disminución en la concentración, la actividad fotoquímica y la generación de aerosoles secundarios presentan una tendencia al aumento, planteando que es necesario una determinación de fuentes de MP y una evaluación de su capacidad oxidativa, altamente dañina para la salud de las personas. Sumado a esto, destaca la importancia de que los valores sigan estando por sobre las normas de calidad del aire chilena y, consecuentemente, por sobre lo recomendado por la OMS.

Respecto a los instrumentos de gestión, Toro et. al (2014) postula una necesidad de fortalecer y ampliar la aplicación de políticas de control de contaminación y las estrategias de gestión de la calidad del aire, incluyendo la construcción de la planificación estratégica, el diseño de áreas urbanas sostenibles, la evaluación periódica de políticas pasadas y fortalecer la asociación con el impacto a la salud. Para esto es fundamental una buena comprensión de las principales fuentes de contaminación de aire y sus contribuciones relativas a la concentración observada (Langner, et. al, 2021), así como también estudios de especiación para poder generar mejores medidas de adaptación y mitigación (Menares, et. al, 2020).

Respecto al resto de Chile, Molina et. al (2017) analiza la distribución espacial y temporal de MP_{10} y $MP_{2.5}$ en 16 ciudades al centro-sur de Chile: Rancagua, Rengo, San Fernando, Curicó, Talca, Maule, Chillán y Chillán Viejo, Concepción, Coronel, Los Ángeles, Temuco y Padre de Las Casas, Valdivia, Osorno, Puerto Montt, Coyhaique y Punta Arenas. Al momento del estudio, 10 se encontraban consideradas como zona latente y/o saturada al momento del estudio y 2 contaban con PDA activo, correspondiente a las ciudades de Temuco y Osorno, ambos vigentes desde el 2015. Todas las ciudades estudiadas excedieron sistemáticamente los valores recomendados por la OMS y por estándares nacionales para material particulado, así como también lo hicieron los promedios anuales de $MP_{2.5}$. El límite diario de la OMS fue superado en Rancagua, Rengo, Curicó Talca, Chillán, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno, Puerto Montt y

Coyhaique en al menos 120 días del año, encontrándose entre estas las 2 ciudades con su PDA vigente. Este estudio plantea la necesidad de encontrar formas de controlar el uso de combustión a leña en los hogares del sur para minimizar los impactos al medioambiente y reducir la influencia de la combustión de leña en la salud de las personas, sin afectar su economía, lo que se encuentra considerado en los Planes de Descontaminación para Temuco y Padre de las Casas y, para la Comuna de Osorno, donde se propone una mayor normativa para fomentar el uso de leña seca; un mejoramiento de la eficiencia térmica de las viviendas y un recambio paulatino de los sistemas de calefacción a través de financiamientos sectoriales (D.S. 8/2015; D.S. 47/2015).

Por otro lado, Gonzalez-Rojas et. al (2021) evaluó la concentración de contaminantes (MP_{10} , $MP_{2.5}$, SO_2 , CO , NO_2 , O_3) y variables meteorológicas en Calama entre los años 2013 a 2016, encontrando que los valores de MP_{10} , $MP_{2.5}$ y SO_2 exceden lo recomendado por la OMS diaria y anualmente. Sumado a esto, se encontró una relación entre la concentración de contaminante y la dirección del viento, obteniendo una contribución significativa de MP_{10} y $MP_{2.5}$ desde fuentes al oeste de la ciudad, atribuyéndolo principalmente a fuentes industriales (minería local) y fuentes naturales (desierto de Atacama) en temporadas de calor, y a fuentes locales (urbanas) en las temporadas frías. Se concluye que las emisiones de MP provenientes de la extracción de cobre y las operaciones de fundición podrían ser transportadas al área urbana, causando un deterioro de la calidad del aire percibido por la población local (Gonzalez-Rojas, 2021). En el

período estudiado se observó una disminución en ambos contaminantes en -4.82%/año y -5.24/año para MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente. Calama es declarada saturada por MP₁₀ el año 2009 (D.S. 57/2009), sin embargo, su plan de descontaminación no entra en vigor hasta el año 2022. Este cuenta con medidas que buscan disminuir las emisiones de mineras. La disminución relativa para los límites de emisión de la división Chuquicamata y de la División Radomiro Tomic son de un 0.4% y un 6.8%, considerando una disminución de 35 ton/año y 1920 ton/año, respectivamente, para la División Ministro Hales la disminución es de 639 ton/año y para el tranque Talabre de 574 ton/año, contando con 4 años para lograr los objetivos en el caso de las divisiones, y 2 para el tranque Talabre (D.S. 5/2022).

Específicamente respecto a la evaluación de la implementación de PDA hay poca evidencia. Mardones y Cornejo (2020) realizaron un estudio del impacto de las disminuciones de MP₁₀ y MP_{2.5} en zonas posterior a la implementación de un plan de descontaminación, en este estudio se concluye que, para los sitios estudiados, la implementación de los PDA para MP₁₀ no tiene impacto en las concentraciones de MP₁₀, sin embargo, la implementación de PDA para MP_{2.5} si tiene un impacto en la reducción de MP₁₀ (aproximadamente en 8 µg/m³ en el promedio mensual), mas no para MP_{2.5}. Acá concluyen que los supuestos y escenarios utilizados para las evaluaciones previas a los PDA son muy optimistas en relación con su contribución actual en la mejora de calidad del aire. En este estudio se utilizó un método de diferencias en diferencias, el que consiste en obtener las diferencias

en las variables a analizar antes y después de implementar la medida, para luego, utilizando un grupo control, restar la diferencia de este grupo y así poder obtener los cambios del grupo trabajo obtenidos plenamente a la medida implementada (Angrist y Pischke, 2009). Si bien esta metodología es muy utilizada para la evaluación de políticas, en el mismo estudio plantean que, al necesitar un grupo control, los resultados no son precisos, ya que para eso se debe contar con datos de contaminantes para alguna ciudad durante el mismo período de tiempo del análisis con características similares al grupo de trabajo, es decir, con niveles iniciales similares de contaminación, clima y ubicación geográfica con el grupo de prueba, algo difícil de lograr, considerando lo mencionado previamente sobre la heterogeneidad en la distribución de estaciones de la red SINCA.

1.3 Definición del problema

Considerando lo anterior se identifican brechas en las consideraciones y en la evaluación de la implementación a posteriori de los planes de descontaminación en Chile, considerando los impactos reales que están teniendo en la disminución de contaminantes a lo largo del tiempo, lo que puede estar llevando a continuar implementando medidas que no están siendo suficiente para abordar de manera correcta la problemática, así como también una falsa solución de quedarse con la implementación de planes para solucionar el problema de la contaminación atmosférica. Este es un problema tanto para las organizaciones estatales encargadas de la implementación de dichos planes como para las personas

afectadas por la contaminación en las distintas zonas, las que no estarían viendo los resultados esperados en su calidad de vida.

1.4 Motivación de investigación

Habiendo recorrido las bases teóricas que serán fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido contribuir en el conocimiento sobre el efecto real que han tenido la implementación de los distintos PDA en Chile y evaluar si estos están generando un cambio significativo en las concentraciones de los contaminantes respectivos, así como analizar como estos pueden complementarse para poder tener un mejor efecto. Este estudio propone entonces una evaluación de estos planes utilizando una metodología de análisis de tendencia y puntos de quiebre. En este sentido, este trabajo contribuye a la comprensión de variables claves en el proceso de toma de decisiones para mejorar la gestión del aire en Chile, analizando casos de éxito y casos en que las medidas implementadas no han sido suficientes.

1.5 Pregunta de investigación

Considerando esto se plantea como pregunta de investigación: ¿Cómo ha afectado la implementación de planes de descontaminación atmosférica en la concentración de contaminantes presentes en el aire en las distintas localidades del país?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) implementados en zonas saturadas de Chile, a partir de parámetros estadísticos y análisis de datos, y comparar los resultados obtenidos por sectores (norte, centro, sur) para la determinación de la eficiencia de estos.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las zonas saturadas que cuenten con Plan de Descontaminación Atmosférica en Chile.
- Generar base de datos con toda la información disponible para contaminantes y variables meteorológicas, clasificando la información entre antes y después de la declaración de zona saturada y, antes y después de la implementación de plan de descontaminación.
- Realizar análisis de episodios críticos y calidad de aire diario y ver como ha ido evolucionando a lo largo del tiempo.
- Utilizar métodos de análisis de puntos de quiebre y análisis de tendencia para encontrar los impactos de la implementación de dichos planes.
- Comparar los resultados obtenidos para las distintas zonas saturadas por sectores de Chile y evaluar en qué casos los planes han sido más efectivos con sus posibles causas.

3. Metodología

El estudio de esta tesis se basa en un análisis cuantitativo sobre la eficiencia en la implementación de PDA en Chile. Para esto se realizó un análisis estadístico de tendencias tanto históricas como por temporalidad, un análisis de episodios críticos y, un análisis de puntos de quiebre. Además de una búsqueda de información cualitativa sobre las medidas de implementación en cada caso para poder comprender los resultados obtenidos.

3.1 Búsqueda de información y descarga de datos

Para lograr esto primero se realizó una revisión de la información en sitios específicos de planes de descontaminación atmosférica del MMA (<https://ppda.mma.gob.cl>), decretos supremos asociados a cada PDA en la página de la biblioteca del congreso (<http://www.bcn.cl/portal>), noticias y otra información relevante a la aplicación de PDA.

Recopilada a información se genera una lista con las estaciones que se encuentran en las zonas con PDA. Para estas estaciones se descargó su información histórica sobre contaminantes a través del sitio web de la red SINCA (<https://sinca.mma.gob.cl>), obteniendo una base de datos para cada plan con las estaciones presentes y las concentraciones de contaminantes.

3.2 Tratamiento de datos

A cada base de datos se realiza una limpieza y validación de la información.

Como criterios de validación se utiliza lo planteado por Menares et. al, 2020 correspondiente a:

1. $[PM_{2.5}] \leq [PM_{10}]$
2. Contar con al menos un 75% de datos horarios para el cálculo del promedio diario
3. Eliminación de valores aislados extremadamente alto (por sobre 6 veces el valor previo o posterior)

3.3 Análisis de datos

De las bases limpiadas y validadas se generaron gráficos de todas las series de tiempo para cada estación para MP_{10} y $MP_{2.5}$, a partir de los cuales se selecciona que estaciones serán consideradas para el análisis de tendencia según la cantidad de datos que contienen, utilizando como criterio contener un mínimo de 5 años continuos de mediciones y tener datos actualizados a la fecha.

Obtenidas las estaciones a considerar para cada plan se continua con un análisis de calidad del aire y episodios críticos, considerando como valores de referencia los reportados en D.S. 12/2022 y D.S.12/2011 del MMA, para MP_{10} y $MP_{2.5}$, respectivamente. Para cada estación se ve el número de días a lo largo del tiempo con calidad del aire regular, alerta, preemergencia y emergencia. Además, se analiza los días de duración de cada uno de estos episodios y como han ido variando a lo largo del tiempo. Esto como evidencia concreta de la

implementación de cada plan, donde se espera una disminución en los episodios críticos posterior al plan en cada caso.

Posteriormente se realiza un análisis de punto de quiebre. Este se realiza con la librería *strucchange* de R Studio, la que identifica cambios estructurales en series de datos a partir de prueba de fluctuación generalizada o pruebas F (Zeileis, et. al, 2002). Estas pruebas utilizan como hipótesis nula que no hay un cambio estructural en los datos y, como hipótesis alternativa, que el vector coeficiente varía en el tiempo. Además, se consideran regresores no estocásticos, es decir, no probabilísticos (Zeileis, et. al, 2002). Fueron utilizadas las funciones *breakpoints()* y *breakdates()*, la primera calcula puntos de interrupción en una regresión y a partir de estos obtiene los puntos de quiebre óptimos, mientras que la segunda es una función genérica que asocia cada punto de quiebre obtenido a una fecha en la serie de tiempo con su intervalo de confianza (Zeileis, et. al, 2022). Se utilizan como parámetros una media mensual y se considera una desestacionalidad, es decir, que no se consideren las variaciones estacionales de los datos. Este método ha sido utilizado para evaluar la implementación de leyes y normas en la calidad del aire, como por ejemplo en Carslaw, et. al, 2006, donde analiza 8 años de datos de mediciones de distintos contaminantes en una avenida principal en Londres para identificar cambios importantes en sus tendencias y lo asocia a medidas implementadas, como el cargo de tarifa por congestión y al incremento de buses con filtros de partículas. Grange y Carslaw, 2019 también utilizan esta metodología para evaluar la reducción de las

concentraciones de SO₂ y NO_x a partir de la implementación de medidas como el límite de porcentaje de sulfuros en combustibles de barcos y la implementación de zona de cargo por congestión (CCZ) y zonas de bajas emisiones (LEZ), respectivamente. En ambos estudios la metodología mostró una relación entre las fechas de aplicación de las medidas con una reducción marcada en las tendencias de los gases estudiados, pudiendo asociar dicha disminución a la medida tomada.

Las fechas encontradas por la función como puntos de quiebre se comparan con las fechas de implementación del plan para ver si hay relación entre estas.

Una vez obtenido el punto de quiebre se procede al análisis de tendencia de los datos. Para esto se utiliza la función *TheilSen()* de la librería *Openair* en *R Studio*, una función que utiliza el parámetro estadístico paramétrico Theil-Sen para obtener el valor de la tendencia, este método se ha utilizado ampliamente en estudios de evaluación de calidad del aire, debido principalmente a la robustez del método para datos *outliers*, común en datos atmosféricos, y para usarse en series de datos no normales y heterocedásticos (Font, et. al, 2016). En este método, dado un conjunto de n pares de datos x,y se calculan las pendientes entre todos los puntos, la mediana entre todas las pendientes calculadas se considera la pendiente más probable, es decir, la tendencia. En este caso se utilizó un intervalo de confianza del 95% y se obtuvieron los p-valor correspondientes, para evaluar si el valor de la pendiente es significativo o no, es decir, no es debido a causas aleatorias y si a un cambio en la tendencia de los

datos. El límite de p es de 0.1, donde un p -valor < 0.1 indica un cambio de pendiente significativo, siendo éste mayor al disminuir el valor de p . Mientras que, un p -valor ≥ 0.1 indica que el valor de la pendiente no es significativo, es decir, puede deberse a causas aleatorias y no se puede hablar de un cambio real en las tendencias (Carslaw y Ropkins, 2012).

Este análisis se realizó, en una primera etapa, para toda la serie de tiempo en todas las estaciones consideradas, evaluando el valor de la pendiente y p -valor. Además, se hizo un análisis separado de cada estación temporal para evaluar si se genera una mayor o menor disminución de las concentraciones en cada una de estas.

3.4 Contextualización y agrupación de planes

Con toda la información obtenida se busca asociaciones entre los distintos planes, especialmente entre cada macrozona, y se realiza una evaluación de cómo han afectado las medidas a lo largo del tiempo y si se aprecian tendencias similares en planes con similares medidas.

4. Resultados

La tabla VI entrega un resumen del número de estaciones de monitoreo asociadas a cada PDA, señalando cuantas cuentan con información de contaminantes, meteorológica o ambas. Es importante destacar que para el cálculo de estaciones no se considera si se encuentran actualmente en operación. Más adelante se realiza el análisis detallado para cada plan de cuantas estaciones son válidas para el estudio según tiempo y cantidad de información registrada.

Tabla VI Número estaciones asociadas por PDA (de norte a sur)

PDA	Número estaciones			
	contaminantes	meteorológica	ambos	total
Tocopilla	4	1	4	9
Calama	3	0	8	11
Huasco	6	0	5	11
Andacollo	0	0	5	5
Concón, Quintero y Puchuncaví	1	2	16	19
Región Metropolitana	3	0	11	14
Valle Central Región de O'Higgins	0	1	9	10
Talca y Maule	0	0	3	3
Valle Central Provincia de Curicó	1	0	2	3
Chillán y Chillán Viejo	2	0	3	5
Los Ángeles	0	0	3	3
Concepción	8	0	16	24
Temuco y Padre de las Casas	0	0	5	5
Valdivia	1	0	3	4
Osorno	0	0	2	2
Coyhaique	0	0	2	2

Para visualizarlo de mejor manera, la figura 2 muestra el mapa de Chile con puntos azules representando las estaciones de monitoreo y áreas rojas representando las zonas que cuentan con PDA.

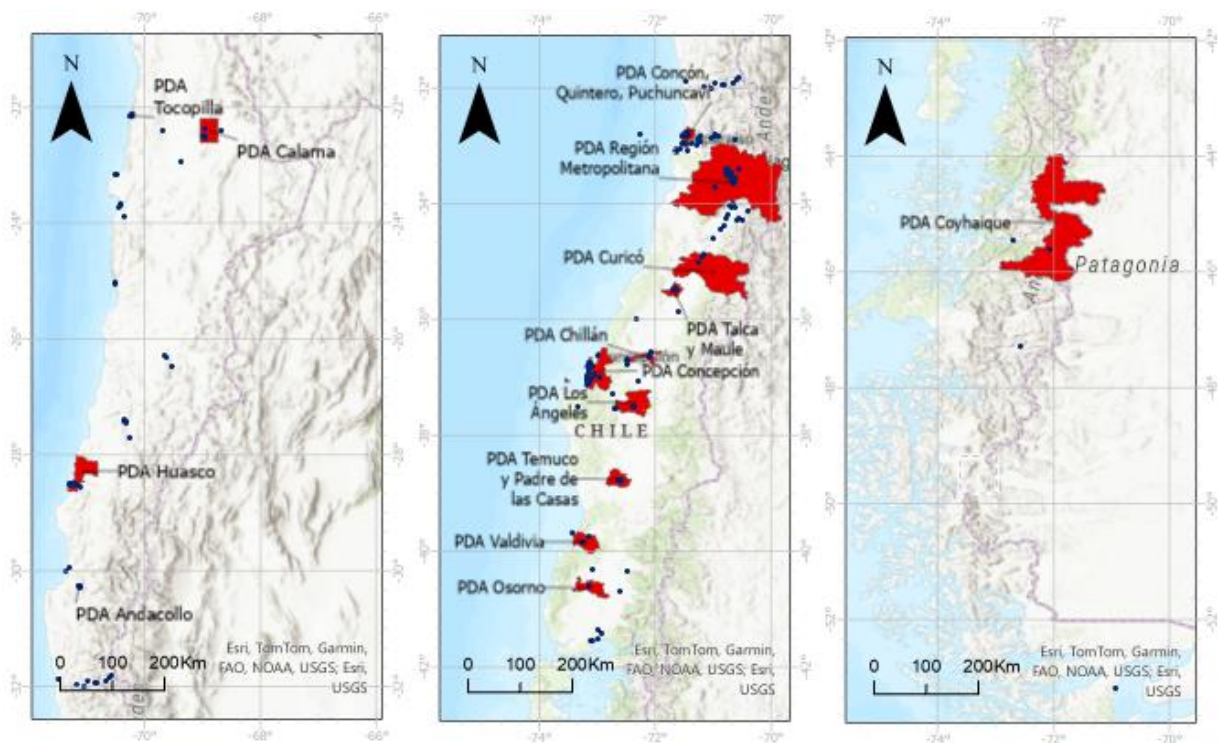


Fig. 2 Mapa estaciones monitoreo y áreas con PDA

4.1 Principales medidas

Al leer y analizar cada uno de los 16 PDA y según lo entregado por los sitios de información del MMA correspondiente, se obtuvieron las principales medidas para cada uno de estos. Estas se encuentran resumidas en la tabla VII, donde se muestra el número de planes que cuentan con dicha medida, según lo establecido por el decreto supremo respectivo.

Tabla VII Principales medidas PDA

<i>Principales Medidas</i>	<i>Número PDA</i>
<i>Control de emisiones</i>	16
<i>Educación y difusión ambiental</i>	16
<i>Compensación de emisiones</i>	15
<i>Gestión de episodios críticos</i>	12
<i>Cambios asociados a medios de transportes</i>	11
<i>Uso y mejoramiento de la calidad de la leña</i>	10
<i>Uso y mejoramiento de artefactos de calefacción</i>	10
<i>Mejoramiento de la eficiencia térmica de viviendas</i>	10
<i>Seguimiento y vigilancia de la calidad del aire</i>	2
<i>Generación de áreas verdes y ciclovías</i>	2
<i>Prohibición de quemas</i>	1
<i>Control del levantamiento de polvo</i>	1

Las medidas de control de emisiones y, educación y difusión ambiental se encuentran señaladas en todos los PDA. La primera cuenta con distintos enfoques en cada caso, centradas en las principales fuentes respectivas. Por ejemplo, el PDA de Calama hace referencia a un control de emisiones para calderas, procesadoras de residuos industriales, específicamente para CODELCO y sus divisiones, fuentes areales (toda actividad que en conjunto afecta la calidad del aire) y de transporte. En el caso del PDA de Concón-Quintero-Puchuncaví el control de emisiones está enfocado directamente a calderas industriales, la división Ventanas de CODELCO, el complejo termoeléctrico Ventanas de AES Gener, ENAP Refinerías Aconcagua, fuentes areales, emisiones de COVs y quemas. En otros casos, como en la Región Metropolitana (RM), el control de emisiones es de manera más general, indicando

fuentes móviles, fuentes fijas, fuentes provenientes de leña y pellets y, quemas agrícolas.

Respecto a la educación y difusión ambiental, si bien se encuentra presente en todos los PDA, es abordado de forma diferente en cada uno de estos. Algunos entregan un mayor detalle de cómo se debe realizar esta que otros, en los que simplemente se nombre que se debe cumplir con dicho requerimiento.

Las medidas de “uso y mejoramiento de la calidad de leña”, “uso y mejoramiento de artefactos” y “mejoramiento de la eficiente térmica de las viviendas” se encuentran presentes en los 10 PDA de la zona sur del país, a partir del Valle Central de la Región de O’Higgins, donde hace sentido aplicar dichas medidas al ser la leña una de las principales fuentes de contaminación atmosférica en ese sector.

La compensación de emisiones se nombra en todos los PDA a excepción de Coyhaique, esto implica que se debe pagar un impuesto verde por las emisiones de contaminantes mediante proyectos de reducción de emisiones dentro de la misma zona afectada y sobre el mismo contaminante. Por otro lado, los PDA de la RM y Concepción son los únicos donde se presenta como medida la generación de áreas verdes.

Respecto a los medios de transporte urbanos, 11 de los 16 PDA presentan medidas, destaca el recambio de buses, gestión integral de transporte urbano y,

en algunos casos, ampliación o generación de ciclovías para fomentar el uso de bicicletas, así como también la pavimentación de caminos en sectores rurales.

El detalle con las principales medidas para cada PDA se encuentra en anexos.

4.1.1 Evaluación medidas respecto a registro de emisiones

En la zona norte y central una de las principales medidas es la reducción de emisiones industriales. Se analizaron los casos puntuales presentados en cada PDA a partir de lo registrado por el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) del MMA.

Para el caso del sector sur, se analizaron los resultados entregados por el RECT, se obtuvieron los siguientes gráficos para el uso de leña residencial, para MP₁₀ y MP_{2.5}, a partir del año 2005.

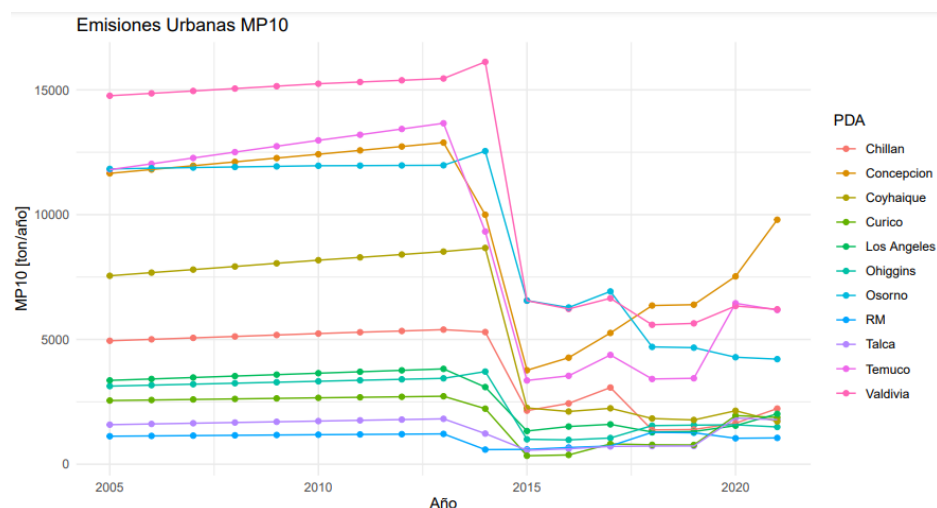


Fig. 3 Emisiones MP₁₀ por uso de leña residencial urbana

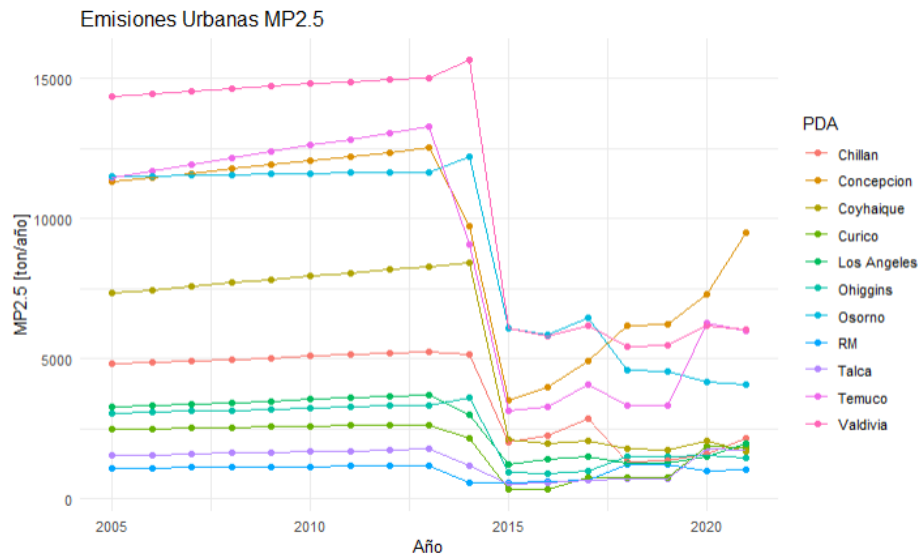


Fig. 4 Emisiones MP_{2.5} por uso de leña residencial urbana

En ambos gráficos se logra ver una disminución importante de emisiones de MP para todos los PDA a partir del año 2015, lo que coincide con la creación por parte del Ministerio de Energía de la Política de Uso de Leña y sus derivados para Calefacción (MinEnergía, 2015).

Para un mejor análisis de la medida, se obtuvieron los datos de emisiones por habitante, a partir del año 2015, considerando la población dentro de la zona abarcada por cada PDA.

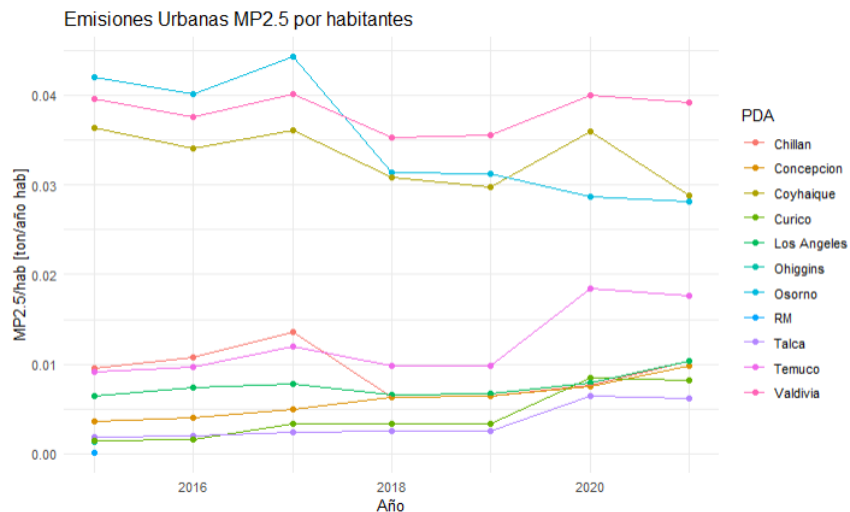


Fig. 5. Emisiones MP_{2.5} por uso de leña residencial por habitante desde 2015

En Figura 5 se ve que Valdivia, Coyhaique y Osorno tienen emisiones de MP_{2.5} más altas en comparación a los otros PDA, por lo que no se muestra relación entre las emisiones de MP con el tamaño de las ciudades. Finalmente, respecto a la entrega de subsidios para reacondicionamiento de viviendas, los valores entregados para cada PDA se resumen en la tabla VIII.

Tabla VIII Meta de subsidios por PDA y número de población

PDA	Meta subsidios	Población	Nº subsidio/hab
O'Higgins	26 000	705 576	0.037
Talca	30 000	280 298	0.107
Curicó	23 000	222 494	0.103
Chillán	20 000	209 995	0.095
Concepción	20 000	971 285	0.021
Los Ángeles	20 000	190 030	0.105
Temuco	40 000	339 664	0.118
Valdivia	18 000	154 097	0.117
Osorno	15 000	145 475	0.103
Coyhaique	7 000	57 818	0.121

4.2 Series de tiempo

Para cada PDA se graficó la serie de tiempo de MP₁₀ y MP_{2.5} en cada una de las estaciones que presentan mediciones de dichos contaminantes. A partir de los gráficos obtenidos se determinó que estaciones contaban con características que permitieran un análisis posterior, considerando los criterios establecidos en la metodología. A modo de ejemplo se muestran los gráficos de series de tiempo obtenidas para el PDA del Valle Central de la Región de O'Higgins (figura 6 y figura 7).

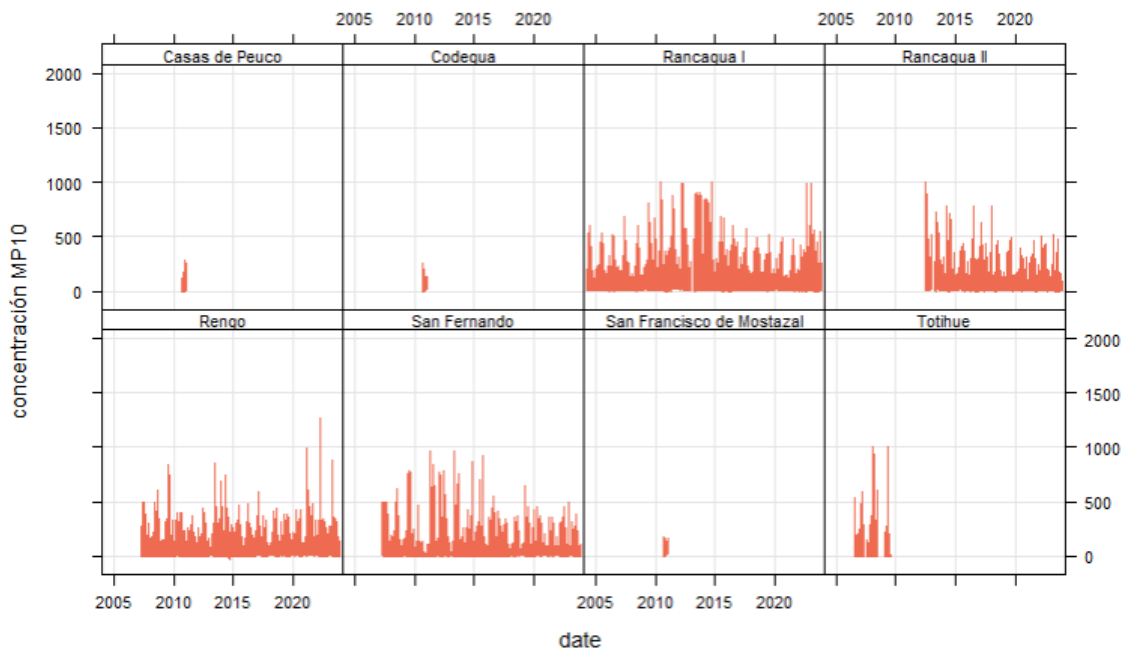


Fig. 6 Series de tiempo MP₁₀ PDA Valle Central Región de O'Higgins

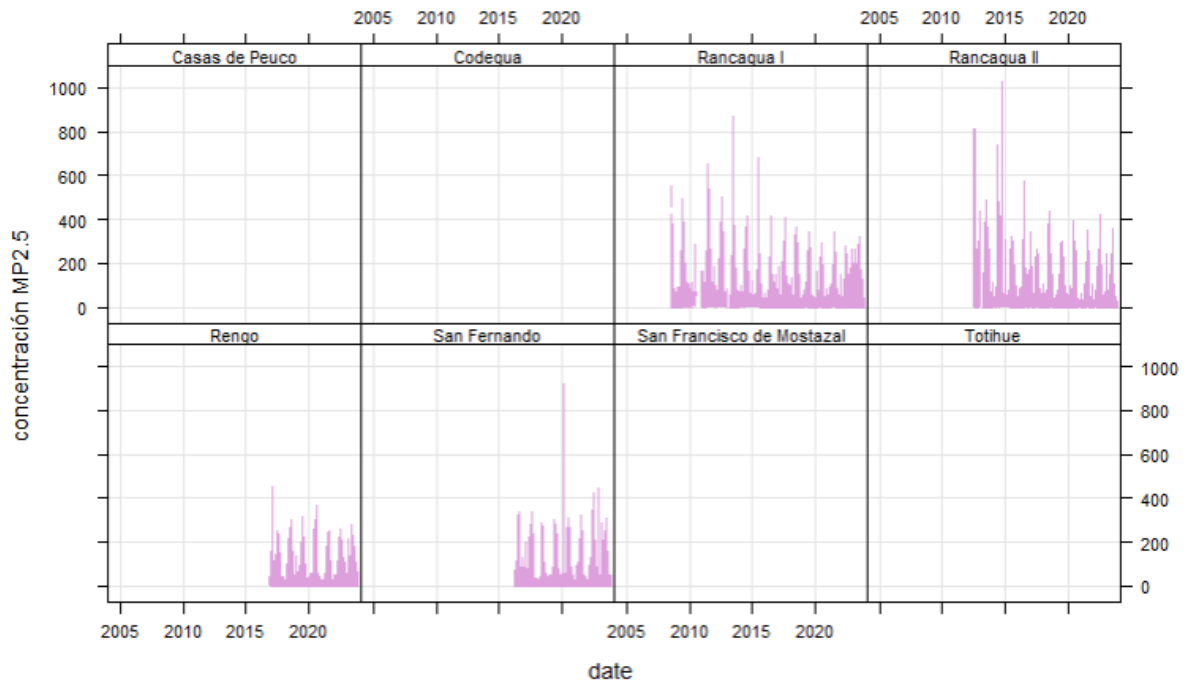


Fig. 7 Series de tiempo MP_{2.5} PDA Valle Central Región de O'Higgins

De la figura 6 y 7 se puede ver que, si bien el área que abarca el PDA del Valle Central de la Región de O'Higgins considera 8 estaciones, 4 de estas no cuentan con mediciones significativas para MP₁₀ y MP_{2.5}, correspondientes a Casas de Peuco, Codegua, San Francisco de Mostazal y Totihue. Por lo tanto, solo la mitad de estas se considerarán para los análisis posteriores.

Este mismo ejercicio se realizó para los 16 PDA vigentes. La tabla IX muestra las estaciones que cumplen con los criterios y que se utilizaron para los siguientes análisis.

Tabla IX Estaciones a considerar por PDA (de norte a sur)

PDA	MP ₁₀		MP _{2,5}	
	Número estaciones	Estaciones	Número estaciones	Estaciones
Tocopilla	2	Tres Marías	2	Tres Marías
		Gobernación		Bomberos
Calama	3	Club Deportivo 23 de Marzo	3	Club deportivo 23 de marzo
		Colegio Pedro Vergara Keller		Colegio Pedro Vergara Keller
		Estación Centro		Estación Centro
Huasco	1	21 de Mayo	2	21 de Mayo
				Huasco Sívica
Andacollo	1	Andacollo	-	-
Concón, Quintero, Puchuncaví	8	La Greda	7	La Greda
		Loncura		Loncura
		Los Maitenes		Los Maitenes
		Puchuncaví		Puchuncaví
		Quintero		Quintero
		Ventanas		Ventanas
		Sur		Concón MMA
Región Metropolitana	8	Cerro Navia	8	Cerro Navia
		El Bosque		El Bosque
		Independencia		Independencia
		La Florida		La Florida
		Las Condes		Las Condes
		Parque O'Higgins		Parque O'Higgins
		Pudahuel		Pudahuel
		Puente Alto		Puente Alto
Valle Central Región de O'Higgins	3	Rancagua I	4	Rancagua I
		Rengo		Rancagua II
		San Fernando		Rengo
				San Fernando
Talca y Maule	3	La Florida	3	La Florida
		UC Maule		UC Maule
		Universidad de Talca		Universidad de Talca
Valle Central de Curicó	1	Curicó	1	Curicó
Chillán y Chillán Viejo	2	Puren	2	Puren
		INIA Chillán		INIA Chillán
Los Ángeles	1	21 de Mayo	1	21 de Mayo

Concepción Metropolitano	11	ENAP Price	10	ENAP Price
		INDURA		INDURA
		INPESCA		INPESCA
		JUNJI		JUNJI
		Kingstone College		Kingstone College
		Liceo Polivalente		Liceo Polivalente
		Nueva Libertad		Nueva Libertad
		Puntera		Puntera
		Consultorio San Vicente		Cerro Merquín
		Lota Urbana		Hualqui
		Coronel Sur		
Temuco y Padre de las Casas	2	Las Encinas	2	Las Encinas
		Padre de las Casas 2		Padre de las Casas 2
Valdivia	1	Valdivia	1	Valdivia
Osorno	1	Osorno	1	Osorno
Coyhaique	2	Coyhaique I	2	Coyhaique I
		Coyhaique II		Coyhaique II

4.3 Episodios críticos

Un segundo análisis que considerar fue el número de episodios con mala calidad del aire, analizando como estos varían a lo largo del tiempo en cada sector con PDA, tanto en cantidad como en duración.

A modo de ejemplo se muestran los resultados obtenidos correspondientes al PDA de Temuco y Padre de las Casas para el cual, según lo establecido en la tabla IX, se considera la estación Las Encinas, tanto para MP₁₀ como para MP_{2.5}.

En las figuras 8 y 9 se muestra, según la escala de colores de contaminación de aire de SINCA, como se encontraban los valores de la calidad de aire diaria respecto a concentración de MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente. El eje x muestra el día juliano y el eje y, el año correspondiente. Las líneas negras marcan las

divisiones entre estaciones. Los valores blancos corresponden a los días sin información.

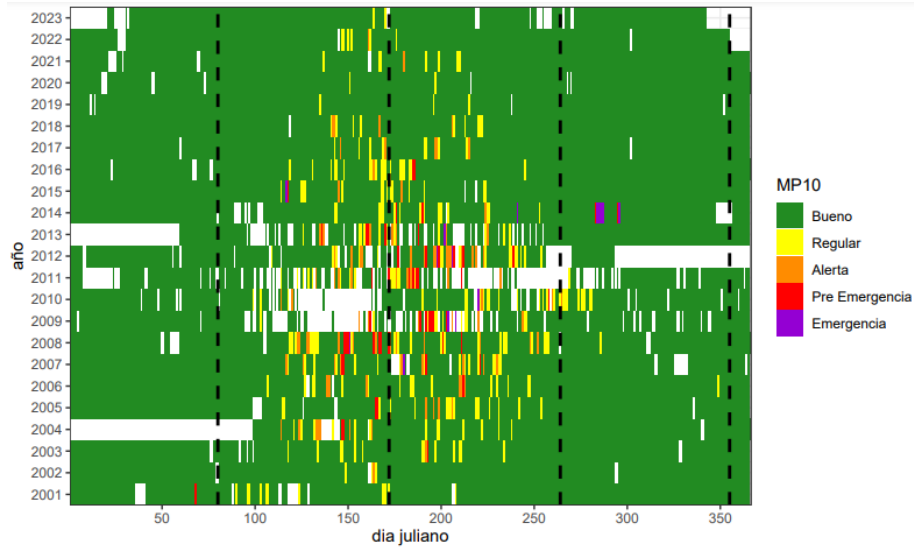


Fig. 8 Estado calidad del aire respecto a MP₁₀ – Estación Las Encinas – PDA Temuco y Padre de las Casas

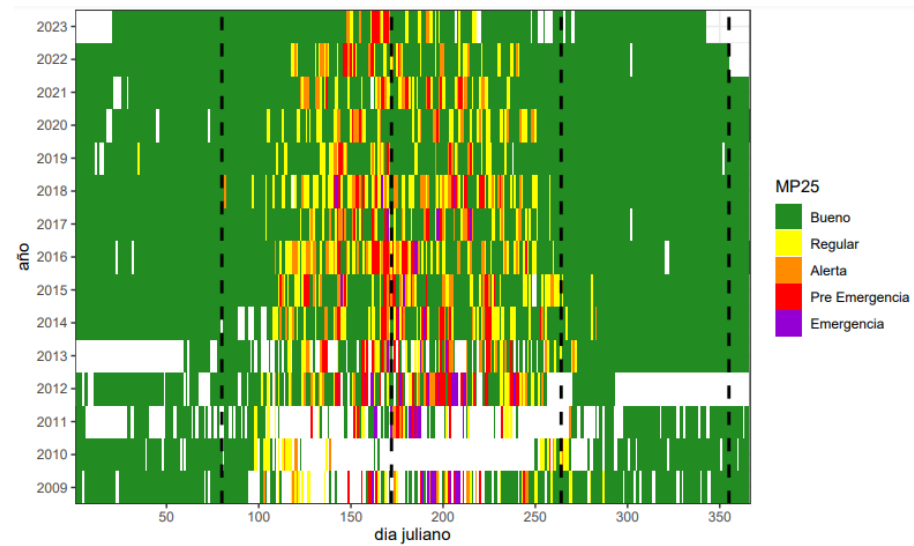


Fig. 9 Estado calidad del aire respecto a MP₁₀ – Estación Las Encinas – PDA Temuco y Padre de las Casas

En el caso ejemplo se puede notar diferencias entre la calidad del aire respecto a MP_{10} en comparación con $MP_{2.5}$ para una misma estación. Algo similar ocurre para todas las estaciones. Además, la concentración de días con calidad de aire de alerta, preemergencia o emergencia ambiental se encuentra en las épocas de otoño e invierno, lo que de igual forma es similar en el resto de las estaciones, sobre todo en las zonas centro y sur.

A simple vista se logra apreciar disminución en el tiempo del número de episodios en la Estación Las Encinas, especialmente para episodios de emergencia, tanto para MP_{10} como para $MP_{2.5}$. Para poder evaluar esto de mejor manera se obtuvo las figuras 10 y 11, las que indican el número de días por tipo de calidad del aire, considerando regular; alerta; preemergencia y; emergencia, para MP_{10} y $MP_{2.5}$, respectivamente, por año.

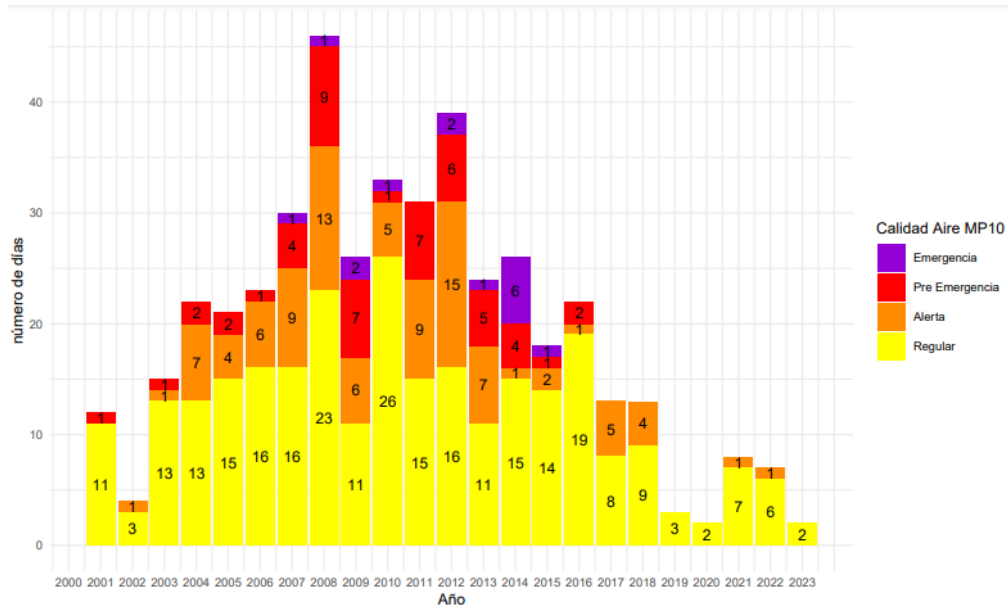


Fig. 10 Número de días críticos MP₁₀ – Estación Las Encinas – PDA Temuco y Padre de las Casas

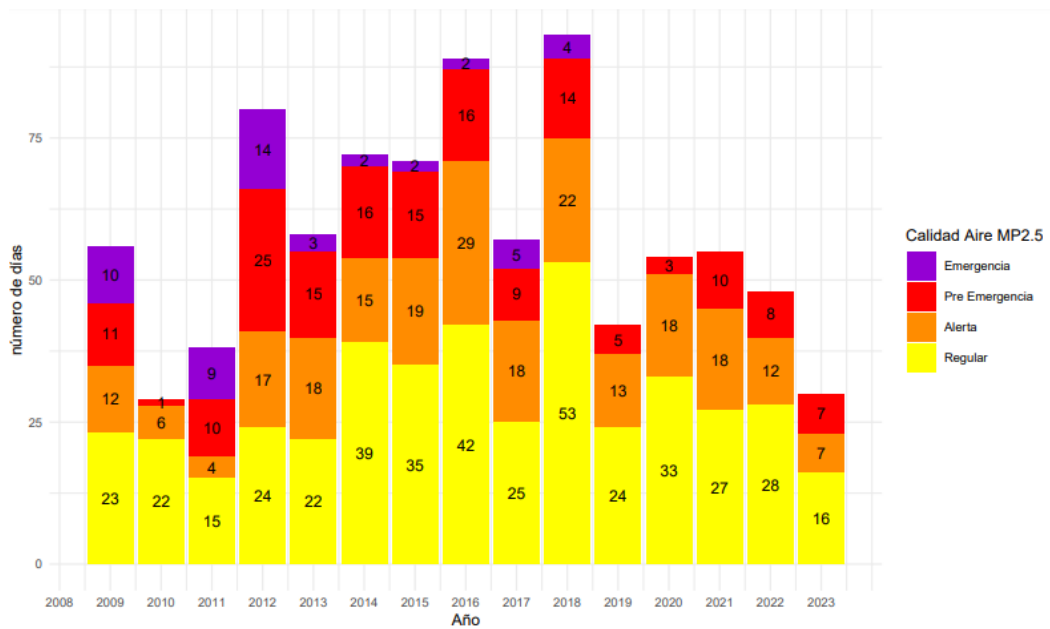


Fig. 11 Número de días críticos MP_{2.5} – Estación Las Encinas – PDA Temuco y Padre de las Casas

Para esta estación en particular se puede apreciar una disminución en los episodios críticos en el tiempo, sobre todo respecto a MP₁₀, a partir del año 2012. A partir del año 2015, que es cuando comienza la implementación del PDA de Temuco y Padre de las Casas, se aprecia de igual forma una disminución, presentándose solo episodios de alerta y preemergencia posterior a este año. Para el caso de MP_{2.5} la principal disminución del número de episodios se aprecia a partir del año 2019, posterior a este año no se presentan episodios de emergencia ambiental, como era la tendencia los años anteriores.

Otro factor importante que considerar es la duración de los episodios. Las figuras 12 y 13 muestran la duración de días consecutivos de episodios de preemergencia y/o de emergencia ambiental, para MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente.

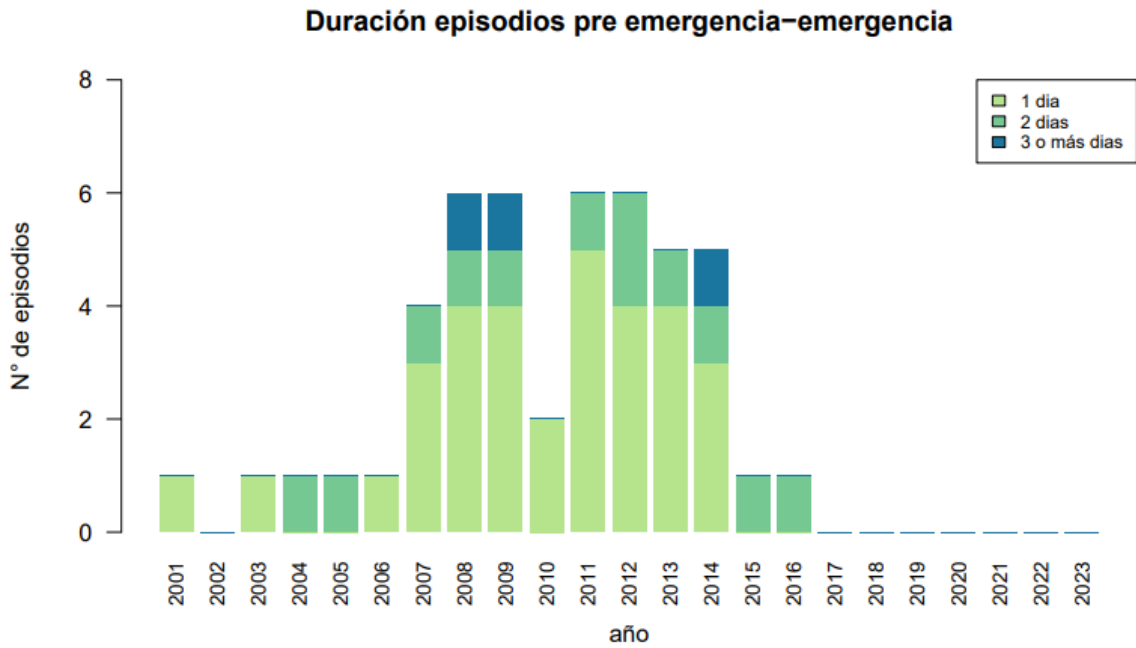


Fig. 12 Duración episodios preemergencia y emergencia MP₁₀ – Estación Las Encinas– PDA Temuco y Padre de las Casas

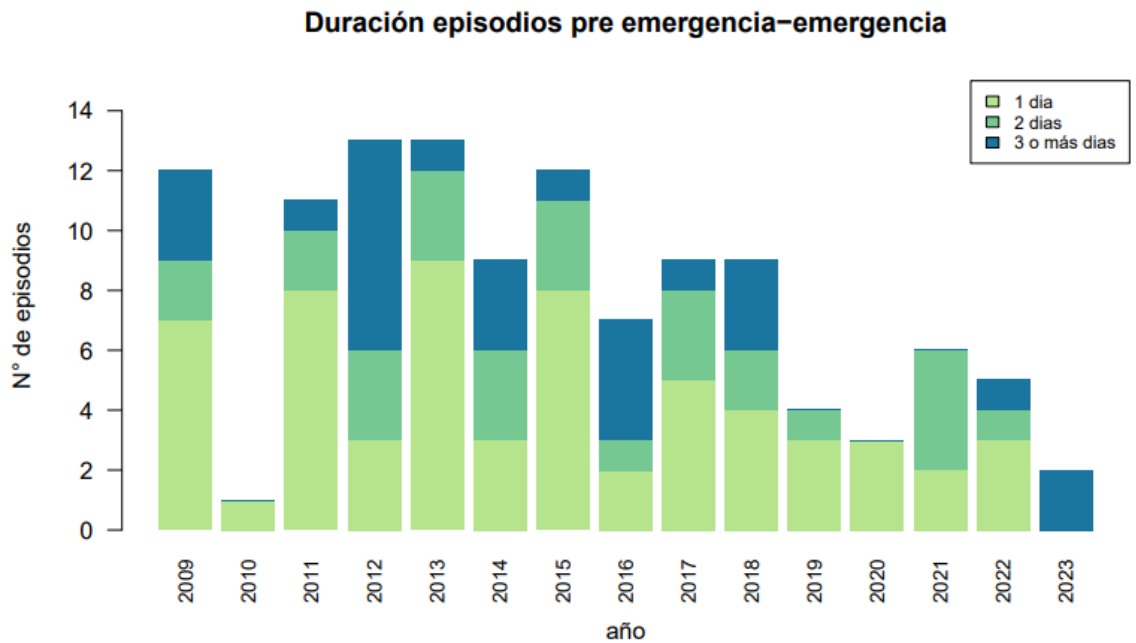


Fig. 13 Duración episodios preemergencia y emergencia MP_{2.5} – Estación Las Encinas– PDA Temuco y Padre de las Casas

En general se aprecia que la duración de los episodios para MP_{2.5} es más prolongada que para MP₁₀ en la estación Las Encinas, en el último caso la mayoría de los episodios dura 1 día, mientras que para MP_{2.5} hay mayor variación de tiempo. En la figura 12 se ve que no se presentó episodios de preemergencia ni de emergencia a partir de ese año. Si bien, para MP_{2.5} se evidencia una disminución en el número de episodios en la figura 11, la figura 13 no muestra cambios proporcionales respecto a la disminución de estos.

Las figuras 14 y 15 muestran algo similar, esta vez se ve representado en el eje y el número de días totales de duración de cada episodio, donde se aprecia de mejor forma que la duración de los episodios para MP_{2.5} es mayor, por ejemplo, el año 2012 muestra 30 días de episodios por MP_{2.5}, mientras que solo 8 días respecto a MP₁₀.

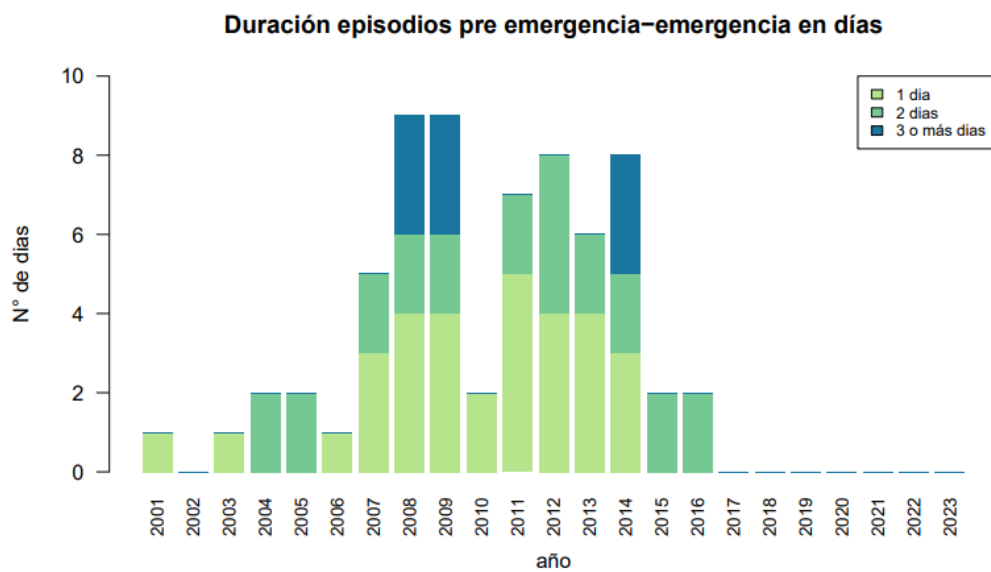


Fig. 14 Número de días totales por episodio preemergencia y de emergencia por MP₁₀ – Estación Las Encinas– PDA Temuco y Padre de las Casas

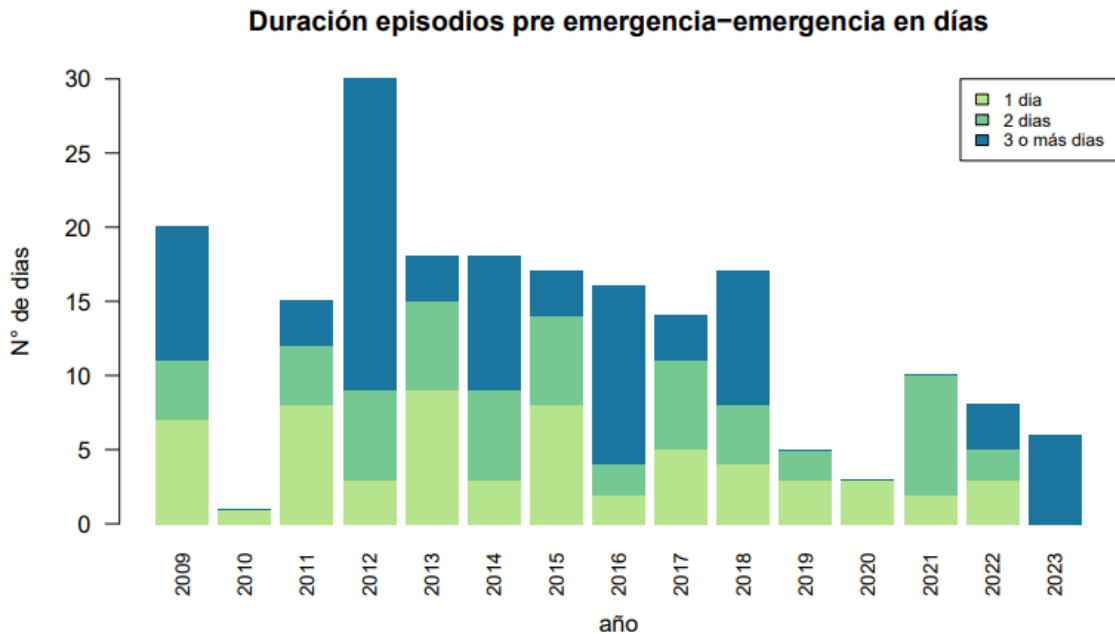


Fig. 15 Número de días totales por episodio preemergencia y de emergencia por MP_{2.5} – Estación Las Encinas– PDA Temuco y Padre de las Casas

Los gráficos mostrados se obtuvieron para el total de estaciones presentes en la tabla IX, los que se encuentran en el anexo.

Los gráficos 3 y 4 son un resumen de los resultados obtenidos para todos los PDA para MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente. En este caso se sumaron el total de días de calidad de aire regular, alerta, preemergencia y emergencia por año, considerando la estación con mayor número de casos.

Episodios Regular-Criticos-Malos-Emergencia MP10

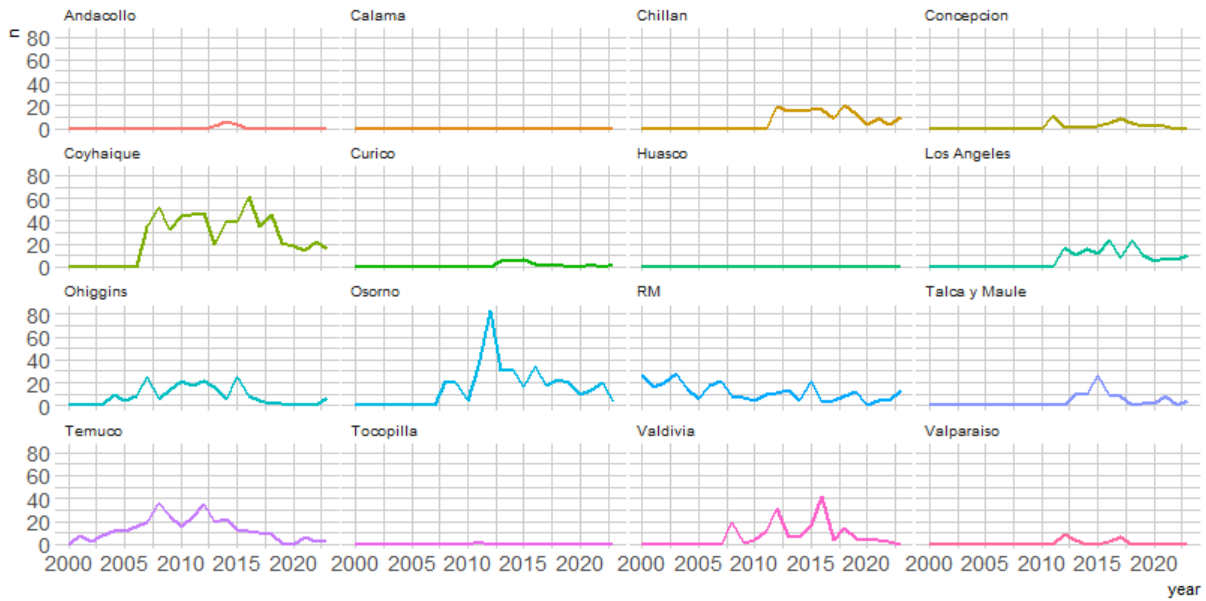


Gráfico 3 Resumen episodios MP₁₀ en todas las zonas con PDA (utilizando estación con mayor número de casos)

Episodios Regular-Criticos-Malos-Emergencia MP2.5

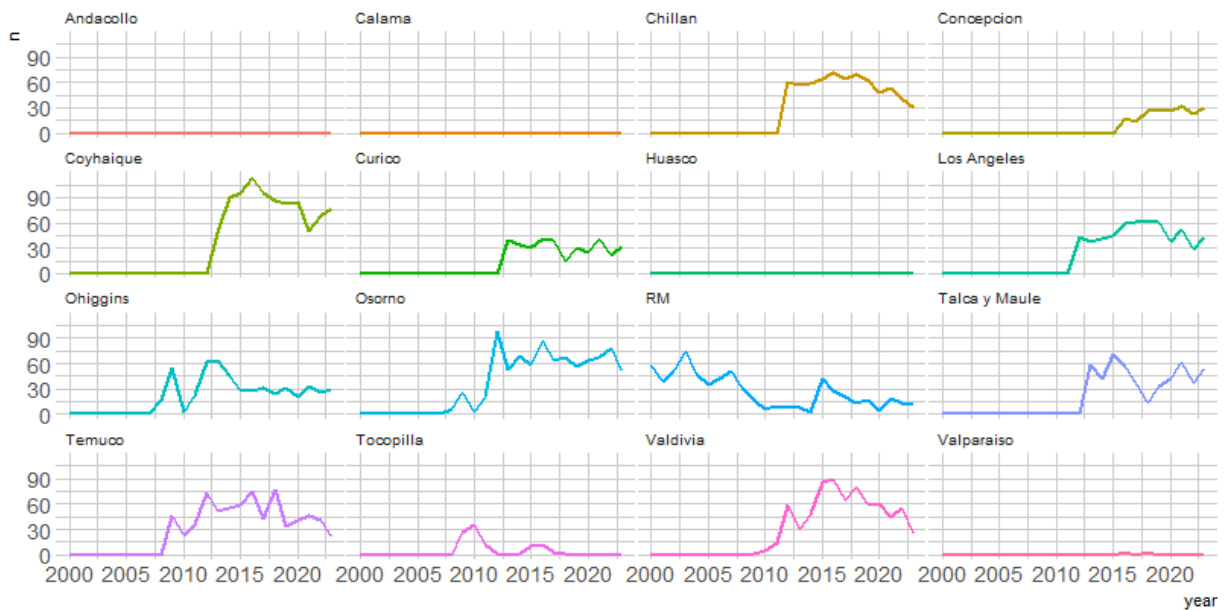


Gráfico 4 Resumen episodios MP_{2.5} en todas las zonas con PDA (utilizando estación con mayor número de casos)

A modo general se puede apreciar que el número de episodios asociados a MP_{2.5} es mayor a los asociados a MP₁₀ para todos los PDA.

Para los PDA de Coyhaique, Osorno, RM, O'Higgins y Temuco se aprecia una disminución del número total de días con mala calidad del aire tanto para MP₁₀ como para MP_{2.5}, no siendo tan notorio para Concepción, Los Ángeles, Talca, Curicó y Chillán, sectores ubicados en la zona centro-sur. Además, se destaca que para Andacollo, Calama, Huasco y Valparaíso no cuentan con ningún día con mala calidad del aire para MP_{2.5} en su período de medición, lo que coincide con ser los casos en que los PDA se presentan para concentraciones anuales, por lo que en sus concentraciones diarias no se espera obtener mala calidad.

4.4 Análisis de punto de quiebre

Para cada estación se analizó el punto de quiebre detectado por la librería de *R Studio strucchange*. El gráfico 5 muestra los resultados para MP₁₀ para cada estación donde fue posible realizar el análisis. Con un punto azul se marca el momento determinado como punto de quiebre en los datos, la línea roja indica el año en que entra en vigor el PDA en cada zona, mientras que la línea verde indica el año en que comenzó a monitorear la primera estación asociada a dicho PDA.

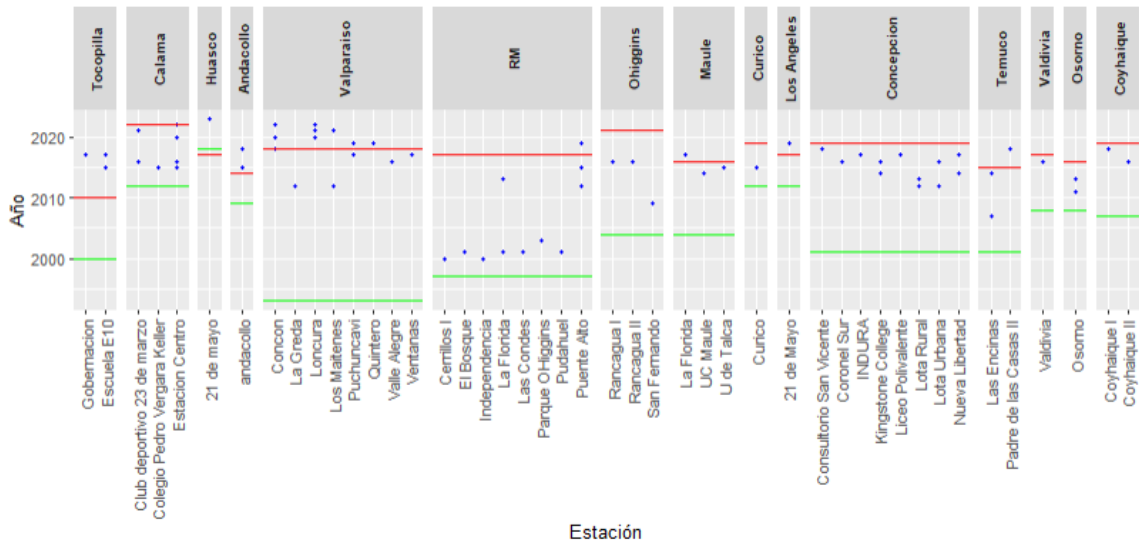


Gráfico 5 Resumen resultados punto de quiebre MP₁₀

En general, se nota que para estaciones pertenecientes a un mismo PDA los puntos de quiebre se encuentran cercanos entre sí, con diferencias de 2 a 3 años. Hay que considerar que en algunas estaciones fue posible encontrar más de 1 punto de quiebre, como el caso de la estación Escuela E-10 en Tocopilla, Loncura en Valparaíso y, La Florida y Puente Alto en la Región Metropolitana.

Desde Concepción al sur los puntos azules se encuentran por debajo de la fecha de aplicación del PDA, a excepción de 1 estación en Temuco. Lo mismo ocurre como tendencia en los PDA de Calama, Región Metropolitana, O'Higgins y Curicó.

Para los PDA de Tocopilla, Huasco y Andacollo, los puntos se encuentran por sobre la fecha de aplicación del PDA, mientras que en el caso de Valparaíso y

Maule hay variaciones entre estaciones respecto al punto de quiebre con relación a la fecha de implementación del PDA.

El gráfico 6 muestra lo mismo para MP_{2.5}, en este caso, debido a la menor disponibilidad de datos y al mínimo de datos necesarios para el análisis se obtuvieron resultados en un menor número de estaciones.

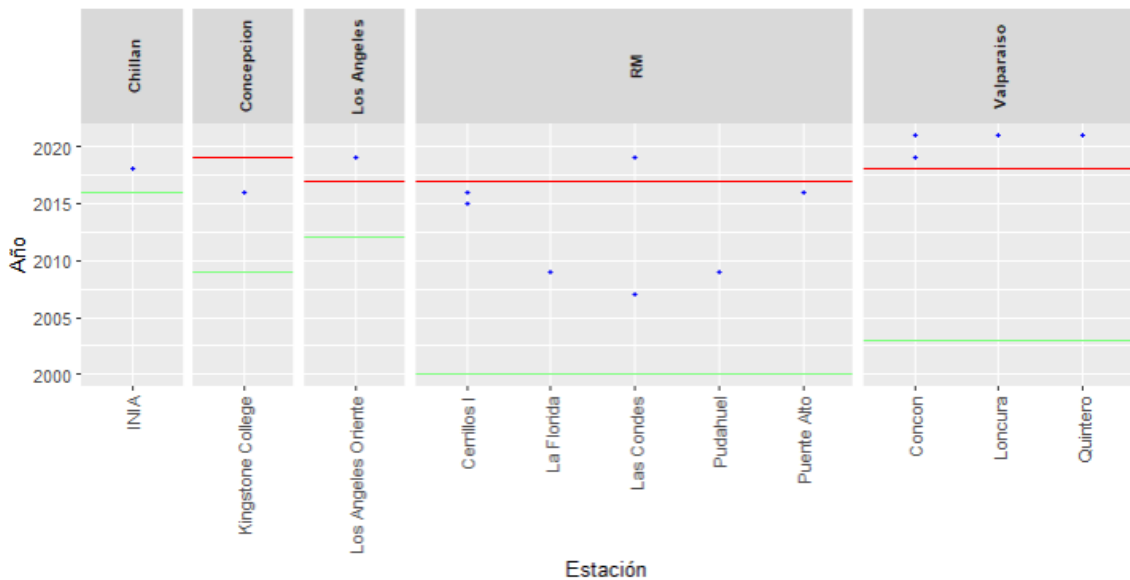


Gráfico 6 Resumen resultados punto de quiebre MP_{2.5} - Calama

Las estaciones de la RM muestran, al igual que para MP₁₀, una disminución en la tendencia previa a la fecha de aplicación del PDA. Por otro lado, en Valparaíso se observa lo contrario, donde todas las estaciones que fue posible analizar muestran un punto de quiebre posterior a la implementación del PDA, es importante señalar que estas estaciones mostraron el mismo comportamiento para MP₁₀. Lo mismo ocurre en el caso de Los Ángeles, donde tanto para MP₁₀

y MP_{2.5} el punto de quiebre se encontró posterior a la implementación del plan, aunque en este caso el análisis fue a distintas estaciones.

Los gráficos detallados para cada estación se encuentran en anexos.

4.5 Análisis de tendencias

Para cada estación se obtuvo su tendencia general en el tiempo, la tendencia estacional y la tendencia del percentil 95, para MP₁₀ y/o MP_{2.5}, según corresponda. En cada caso se obtuvo el valor de la pendiente y el p-valor, con el objetivo de evaluar si los resultados obtenidos son o no significativos.

A modo de ejemplo se muestran los gráficos obtenidos para la estación Colegio Pedro Vergara Keller en Calama. En cada caso la línea roja representa la pendiente media, considerada como la tendencia y las líneas punteadas el rango de las pendientes encontradas. El número en verde en la parte superior del gráfico indica el valor de la pendiente encontrada con su rango. Los asteriscos representan que tan representativo es el valor encontrado según el p-valor, un asterisco indica p-valor < 0.05 y tres asteriscos un p-valor < 0.001. La figura 16 muestra la tendencia general para los promedios mensuales de la serie de tiempo de la estación, desde 2012 a 2023, para MP₁₀. En todo ese tiempo los datos muestran una tendencia decreciente con un p-valor < 0.001, es decir, es representativa la tendencia encontrada.

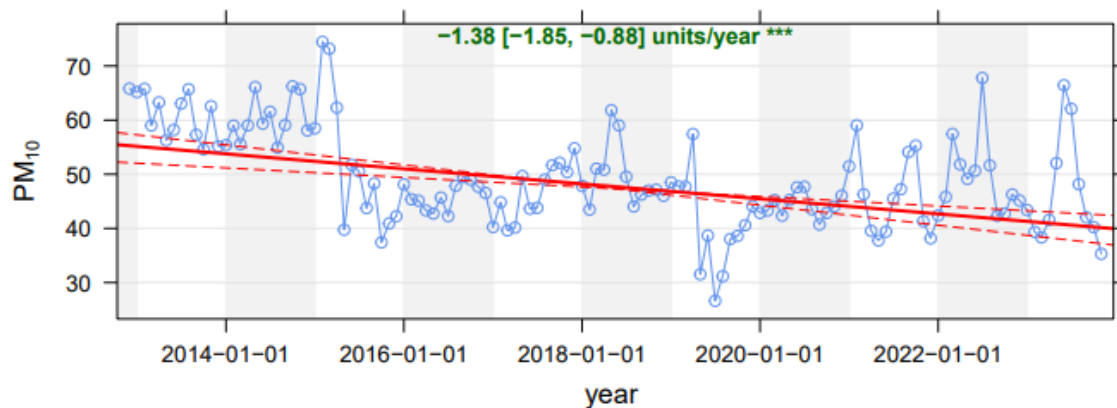


Fig. 16 Gráfico tendencia Estación Colegio Pedro Vergara Keller – MP₁₀ - Calama

La figura 17 corresponde al mismo período, del año 2012 al 2023, separado por tiempo estacional. En este el valor de la pendiente obtenida en cada caso es similar, siendo menor en verano (-1.65^{***}) y mayor en invierno (-0.57^{***}). Para todas las estaciones el valor de pendiente encontrado es significativo según el p-valor.

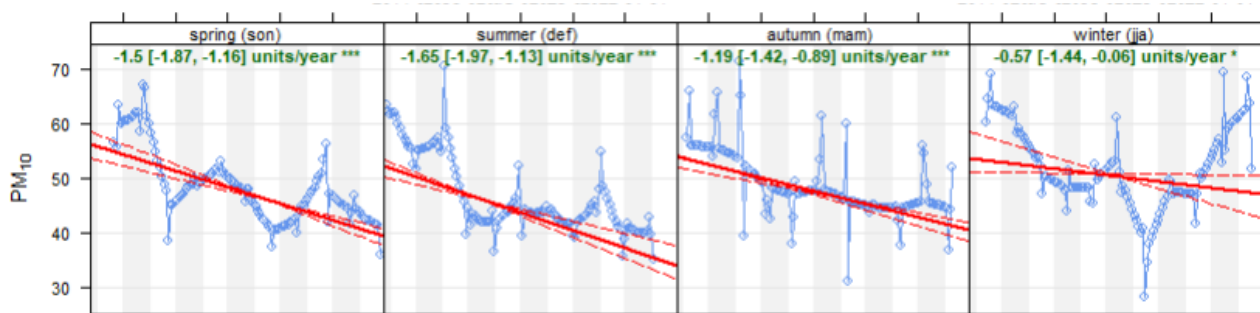


Fig. 17 Gráfico tendencia estacional Estación Colegio Pedro Vergara Keller – MP₁₀ - Calama

La figura 18 muestra los resultados de toda la serie de tiempo para el valor del percentil 95. En este caso el valor de la pendiente es de -2.22 y el p-valor es <

0.01, por lo que los datos son considerados significativos, representando una disminución en los valores de percentil 95. El valor de la pendiente en este caso es menor al valor encontrado para los valores medios, es decir, la disminución del percentil 95 es más pronunciada que para los valores promedios, durante la serie de tiempo, para la Estación Colegio Pedro Vergara Keller.

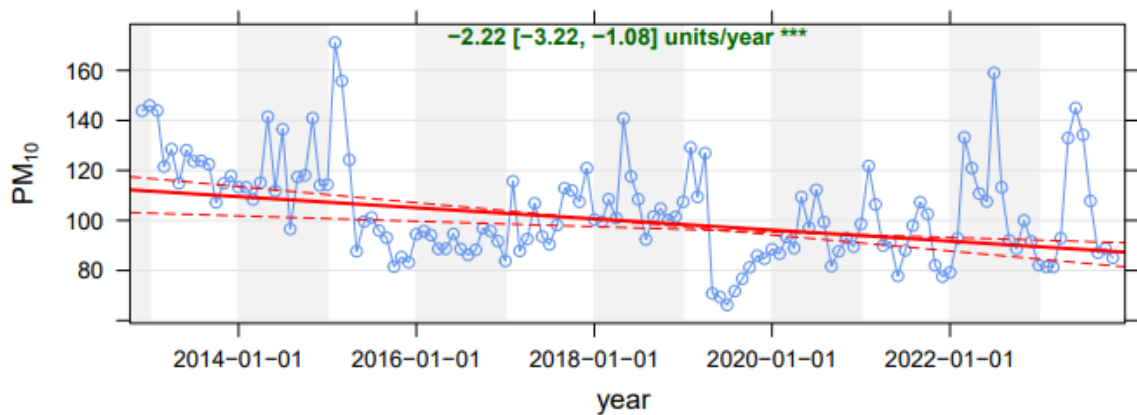


Fig. 18 Gráfico tendencia percentil 95 Estación Colegio Pedro Vergara Keller – MP₁₀ - Calama

Los mismos resultados fueron obtenidos para MP_{2.5}. Las figuras 19, 20 y 21 muestran los gráficos de la tendencia general para los promedios mensuales, tendencia estacional y, tendencia del percentil 95, respectivamente.

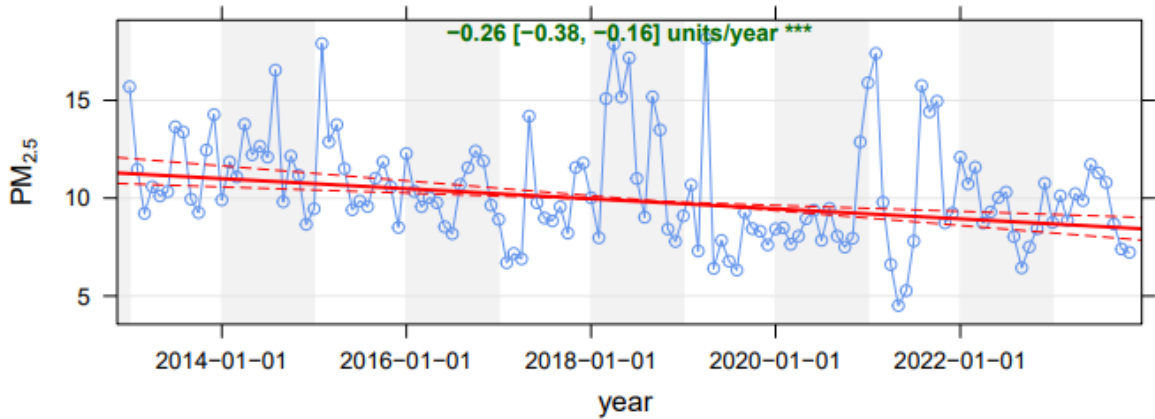


Fig. 19 Gráfico tendencia Estación Colegio Pedro Vergara Keller – MP_{2.5} - Calama

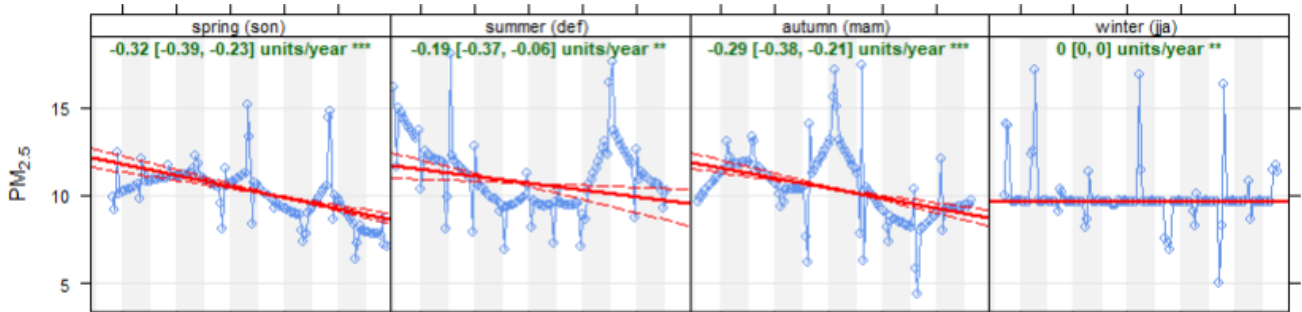


Fig. 20 Gráfico tendencia estacional Estación Colegio Pedro Vergara Keller – MP_{2.5} - Calama

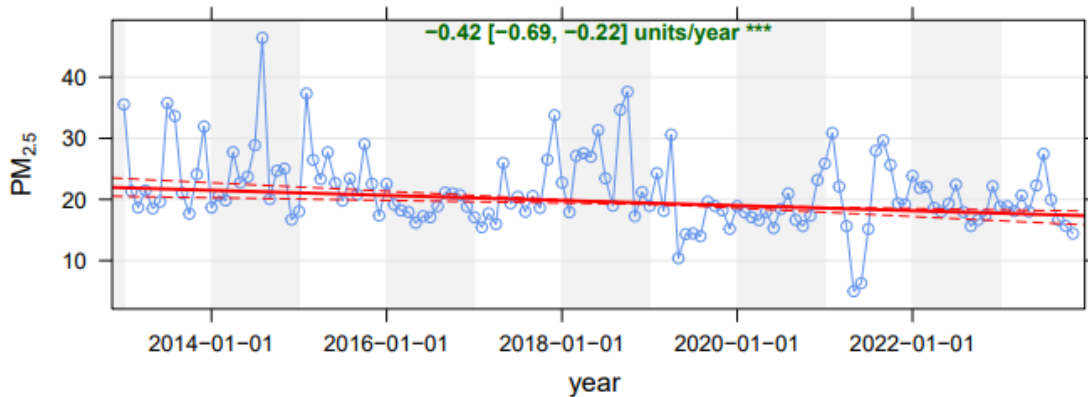


Fig. 21 Gráfico tendencia percentil 95 Estación Colegio Pedro Vergara Keller – MP_{2.5} - Calama

Al igual que para MP₁₀, se muestra una tendencia decreciente tanto en los valores medios como en el percentil 95, la que es significativa a partir del p-valor obtenido. Sin embargo, para ambos casos la disminución fue menor que para MP₁₀. En el caso estacional, también se evidencia una tendencia significativa decreciente para cada estación temporal. En este caso el menor valor de pendiente se presenta para los datos de primavera y, el mayor valor, en invierno. La disminución mostrada para los valores de percentil 95, de igual forma, fue mayor a lo mostrado para los valores medios.

Los gráficos obtenidos para cada estación se encuentran en el anexo.

Las tablas X y XI muestran un resumen para el número de estaciones analizadas por tendencia, con el número de estaciones que presenta una tendencia significativa de decrecimiento y crecimiento y el porcentaje asociado, para MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente.

Tabla X Resumen tendencias estaciones MP10

PDA	Estaciones totales	Estaciones decrecientes	Estaciones crecientes	Porcentaje decreciente
Tocopilla	2	2	0	100%
Calama	3	2	0	66.7%
Huasco	1	0	0	0%
Andacollo	1	1	0	100%
Concón, Quintero, Puchuncaví	8	5	1	62.5%
RM	8	8	0	100%
Valle Central Región de O'Higgins	4	3	0	75%
Talca	3	3	0	100%
Curicó	1	1	0	100%
Chillán y Chillán Viejo	1	1	0	100%
Los Ángeles	1	1	0	100%
Concepción	11	7	0	63.6%

Temuco y Padre de las Casas	2	2	0	100%
Valdivia	1	1	0	100%
Osorno	1	1	0	100%
Coyhaique	2	2	0	100%

Tabla XI Resumen tendencia estaciones MP2.5

PDA	Estaciones totales	Estaciones decrecientes	Estaciones crecientes	Porcentaje decreciente
Tocopilla	2	2	0	100%
Calama	3	3	0	100%
Huasco	2	2	0	100%
Andacollo	-	-	-	-
Concón, Quintero, Puchuncaví	7	4	0	57.1%
RM	8	8	0	100%
Valle Central Región de O'Higgins	4	2	0	50%
Talca	3	3	0	100%
Curicó	1	1	0	100%
Chillán y Chillán Viejo	1	1	0	100%
Los Ángeles	1	1	0	100%
Concepción	10	4	1	40%
Temuco y Padre de las Casas	2	2	0	100%
Valdivia	1	0	0	0%
Osorno	1	1	0	100%
Coyhaique	2	2	0	100%

Los PDA de Tocopilla, Región Metropolitana, Talca, Curicó, Chillán, Los Ángeles, Temuco y Padre de las Casas y, Coyhaique muestra en un 100% de sus estaciones analizadas una tendencia decreciente significativa tanto para MP₁₀ y MP_{2.5}. Andacollo muestra un 100% de estaciones con tendencia decreciente significativa para MP₁₀, sin embargo, para MP_{2.5} no cuenta con estaciones que cumplieran características para analizarse.

El PDA de Concón, Quintero y Puchuncaví muestra el menor porcentaje para MP₁₀ con un 62.5% de estaciones con tendencia decreciente, seguido de

Concepción con un 63.6% y Calama con un 66.7%. Para MP_{2.5} el menor porcentaje de estaciones lo presenta Concepción con un 40%, seguido del Valle Central de la Región de O'Higgins con un 50% y Concón, Quintero y Puchuncaví con un 63.6%. Solo una estación en Concepción muestra una tendencia creciente significativa para MP_{2.5}, mientras que el resto del porcentaje corresponden a estaciones que no muestran tendencias significativas.

En el caso de Valdivia y Osorno, solo se analizó una estación, la que mostró una tendencia decreciente significativa para MP₁₀, mas no para MP_{2.5}. En el caso del PDA de Huasco ocurre lo contrario, mostrando en un 100% una tendencia decreciente para MP_{2.5} y un 0% para MP₁₀.

Llama la atención que los PDA con mayor cantidad de estaciones analizadas tienen a mostrar un menor porcentaje, donde mayor número de estaciones permite obtener una mejor representación de lo que ocurre.

En general, para el caso de MP₁₀, un mayor número de PDA muestra mayores porcentajes de estaciones con disminución de valores en comparación a MP_{2.5}.

Además, en el caso de MP₁₀ las estaciones al centro-sur muestran mayores porcentajes de disminución en comparación con las estaciones de la zona norte.

Para el caso de MP_{2.5} las estaciones del norte y del sur muestran los mayores porcentajes, mientras que las estaciones de la zona central presentan un mayor porcentaje de disminución.

La tabla XII muestra una comparación de los valores de pendiente encontrados para los valores promedios y percentil 95. En este caso solo se muestran las

estaciones que encontraron un p-valor menos a 0.05, es decir, que el valor de la tendencia encontrado puede considerar significativo.

Tabla XII Comparación pendientes promedios con percentil 95 para MP₁₀ y MP_{2.5}

PDA	Estación	MP10		MP2.5	
		promedios	P95	promedios	P95
Tocopilla	Gobernación	-1.78***	-2.42***	-	-
	Bomberos	-	-	-1.18***	-2.29***
	Tres Marías	-3.31***	-5.54***	-1.23***	-2.22***
Calama	Club Deportivo 23 de marzo	-0.07	0.45	-0.09***	-0.37***
	Colegio Pedro Vergara Keller	-1.38***	-2.22***	-0.26***	-0.42***
	Estación Centro	-2.13***	-3.4***	-0.62***	-1.20***
Huasco	21 de mayo	-1.29	-1.21	-1.15***	-2.14***
	Huasco Sívica	-	-	-0.43***	-0.81***
Andacollo	Andacollo	-1.65***	-2.77***	-	-
Concón Quintero Puchuncaví	La Greda	-0.44**	-1.04***	-0.10	-0.05
	Loncura	-0.71***	-1.18**	-0.64***	-1.16***
	Los Maitenes	-0.23*	-0.59*	-0.09+	-0.28*
	Puchuncaví	0.64*	1.89**	-0.10	-0.08
	Valle Alegre	-0.56*	-1.37**	-	-
	Ventanas	-0.54*	-0.93*	0.03	-0.05
	Concon MMA	-	-	-0.55***	-0.76***
	Quintero	-0.21	0.29	-0.31+	-1.25***
RM	Cerro Navia	-0.66***	-2.19***	-0.22***	-1.03***
	El Bosque	-0.65***	-2.12***	-0.27***	-0.86***
	Independencia	-0.58***	-1.64***	-0.22*	-0.32
	La Florida	-1.17***	-2.83***	-0.6***	-1.35***
	Las Condes	-0.50***	-1.46***	-0.43***	-0.96***
	Parque O'Higgins	-0.60***	-1.77***	-0.62***	-1.49***
	Pudahuel	-1.04***	-3.04***	-0.45***	-1.14***
	Puente Alto	-0.60***	-1.77***	-0.63***	-1.49***
Valle Central Región de O'Higgins	Rancagua I	-1.09***	-2.14***	-1.05***	-2.48***
	Rancagua II	-3.61***	-7.09***	-0.67***	-2.29***
	San Fernando	-0.54***	-1.45***	0.26	0.28
Talca y Maule	La Florida	-2.19***	-5.60***	-0.55***	-1.64***
	UC Maule	-0.82***	-2.89***	-0.56***	-1.82***
	Universidad de Talca	-1.04***	-2.58***	-0.54***	-1.38***
Curicó	Curicó	-1.66***	-3.92***	-0.66***	-1.59***
Chillán y Chillán Viejo	Purén	-1.19***	-2.89***	-0.61***	-1.68***
	INIA Chillán	-1.69***	-4.77***	-1.24***	-3.20***

Los Ángeles	21 de mayo	-1.87***	-3.98***	-0.46***	-1.06*
Concepción Metropolitano	Consultorio San Vicente	-1.72***	-3.22***	-	-
	Coronel Sur	-1.60***	-3.34***	-	-
	INDURA	-1.16***	-3.24***	-0.31*	-0.94+
	INPESCA	-0.65***	-1.30*	-0.27+	1.08*
	JUNJI	-0.51**	-1.63**	0.70***	1.27*
	Kingstone College	-1.20***	-3.11***	-0.95***	-2.27***
	Liceo Polivalente	-0.23*	-0.42	-0.17	0.61+
Temuco y Padre de las Casas	Las Encinas	-0.68***	-2.47***	-0.98***	-3.22***
	Padre de las Casas 2	-1.76***	-4.80***	-1.07*	-1.96***
Valdivia	Valdivia	-1.28***	-3.75***	-0.17	-0.24
Osorno	Osorno	-2.39***	-7.93***	-0.40*	-0.74
Coyhaique	Coyhaique I	-2.43***	-6.46***	-1.43***	-5.87***
	Coyhaique II	-2.79***	-6.65***	-2.07***	-5.91***

(*** = $p < 0.001$; ** = $p < 0.01$; * = $p < 0.05$; + = $p < 0.1$)

A partir de la tabla XII se puede ver que en la mayoría de los casos las tendencias presentadas son negativas, tanto para los valores promedio como para percentil 95, es decir, se muestra una disminución estadísticamente significativa en los valores de MP_{10} y $MP_{2.5}$.

La disminución de los valores del percentil 95 fueron mayores a la observada para el promedio de los datos, tanto para MP_{10} como para $MP_{2.5}$, con las únicas excepciones en la estación Puchuncaví del PDA de Concón, Quintero y Puchuncaví y, las estaciones INPESCA y JUNJI del PDA de Concepción Metropolitano.

Las mayores diferencias entre ambos valores de tendencias lo presentan las dos estaciones del PDA de Coyhaique. En ambos casos el valor de la pendiente de los datos de percentil 95 son aproximadamente 3 veces lo obtenido para los valores promedios para $MP_{2.5}$ y MP_{10} .

De forma complementaria las figuras 22 y 23 muestran los promedios de los valores de tendencia obtenidos por PDA, para MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente.

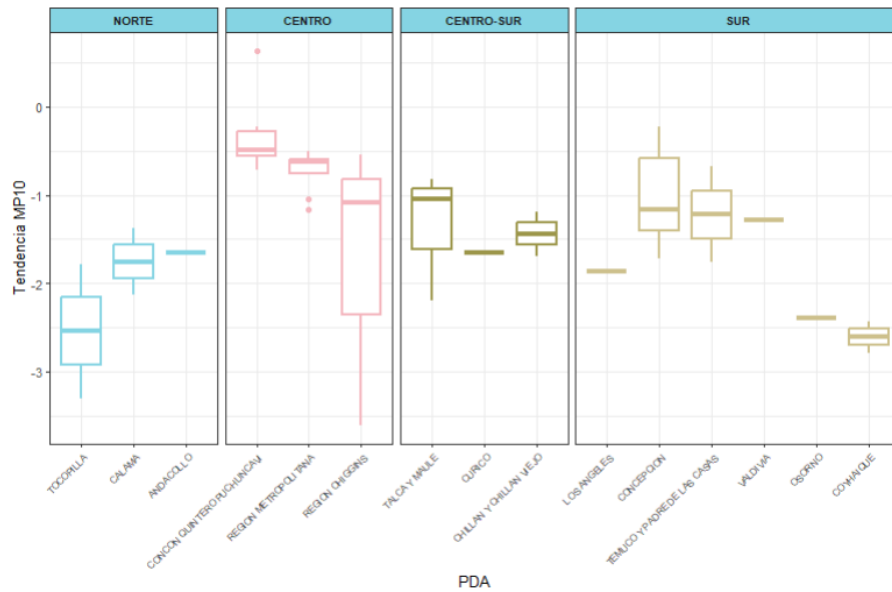


Figura 22 Resumen tendencias por PDA MP₁₀

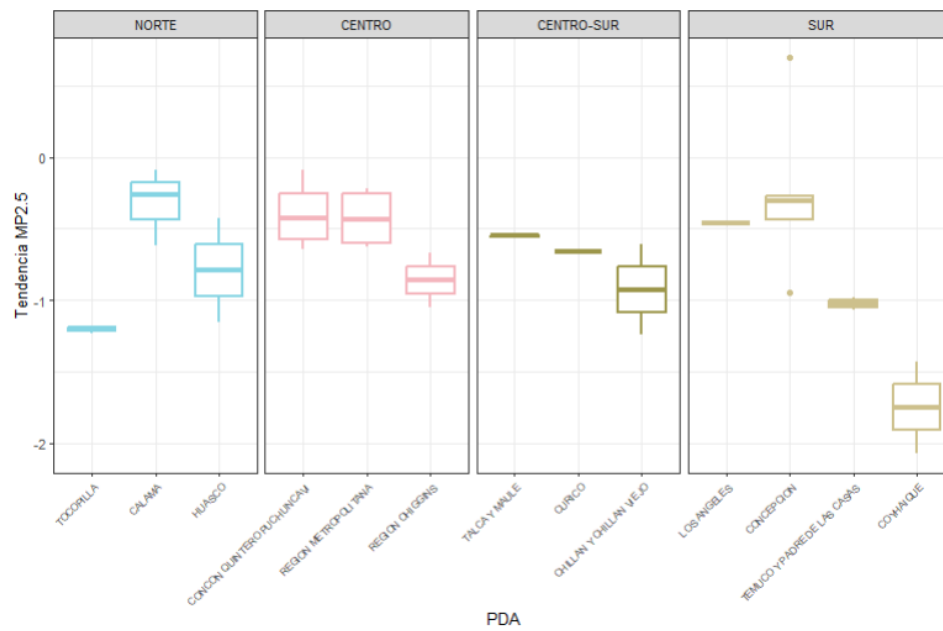


Figura 23 Resumen tendencias por PDA MP_{2.5}

En ambos gráficos el eje y representa el valor de la tendencia, donde entre más negativo sea el valor, significa que se ha mostrado una mayor disminución en los niveles de contaminante. El eje x representa los distintos planes, separados por zona. Acá se representa la tendencia a disminuir la concentración en todos los PDA, por otro lado, se logra apreciar las diferencias entre los distintos planes, sobre todo en el caso de la zona sur, donde los PDA de Coyhaique y Osorno muestran una tendencia negativa mayor. Además, se muestra la alta variabilidad que presentan las estaciones dentro de algunos casos, llamando la atención el caso del PDA del Valle Central de la Región de O'Higgins para MP₁₀, lo que no se observa de igual manera para MP_{2.5}, en este último caso la Estación San Fernando no presenta resultados significativos, por lo que no fue considerada para el análisis, no así en el caso de MP₁₀, siendo un indicio de una alta variabilidad entre distintas ciudades de un mismo plan.

4.6 Comparación con sectores sin PDA

Para cada una de las 4 zonas (norte, centro, centro-sur y sur), se seleccionó 1 sector cercano que no cuente con un PDA y presente características climáticas y geográficas para hacer una comparación entre las tendencias.

Para la zona norte se eligió la Estación Antofagasta, ubicada en la ciudad y región del mismo nombre, para hacer una comparación con los resultados obtenidos para el PDA de Tocopilla. Ambos sectores se encuentran en la zona costera de la Región de Antofagasta, sin embargo, se debe considerar que ambas ciudades son diferentes en cuanto a superficie y a población total.

Para la zona centro se escogió la ciudad de Viña de Mar para hacer una comparación con los resultados obtenidos para el PDA de Concón-Quintero-Puchuncaví, encontrándose aproximadamente 18 kilómetros al sur desde el fin de la zona de aplicación del plan, siendo ambas zonas costeras de la Región de Valparaíso.

Para el sector centro-sur se realizará una comparación del PDA de Osorno con una estación ubicada en la ciudad de Puerto Montt, ambas ciudades son parte de la Región de Los Lagos, la primera ubicada más al norte y en el interior, mientras que la segunda se encuentra en una zona costera.

Por último, para la zona sur la comparación se realizará entre el PDA de Coyhaique con la estación vialidad, ubicada en Puerto Aysén, localidad que actualmente se encuentra en proceso de elaboración de PDA, a partir de ser declarada zona saturada por MP_{2.5} diario el año 2022 (D.S. 37/2021).

El resumen de los resultados de la comparación para los valores obtenidos de tendencia promedios y tendencia de percentil 95 se muestran en la tabla XIII. Las estaciones Mirasol y Vialidad solo contaban con información de MP_{2.5}, por lo que solo se realizó el análisis de este.

Tabla XIII Resumen comparación estaciones con y sin PDA

	Antofagasta		Tocopilla	
	MP ₁₀	MP _{2.5}	MP ₁₀	MP _{2.5}
Promedios	-0,90***	-0.07	-3,31***	-1,23***
P95	-1,36***	-0,38***	-5,54***	-2,22***
	Viña del Mar		Concón, Quintero, Puchuncaví	
	MP ₁₀	MP _{2.5}	MP ₁₀	MP _{2.5}
Promedios	-0,84***	-0,59***	-0,71***	-0,64***
P95	-1,75***	-1,22***	-1,18***	-1,16***
	Mirasol		Osorno	
	MP ₁₀	MP _{2.5}	MP ₁₀	MP _{2.5}
Promedios	-	-0,86***	-2,39***	-0.40*
P95	-	-2.19**	-7,93***	-0.74
	Vialidad		Coyhaique	
	MP ₁₀	MP _{2.5}	MP ₁₀	MP _{2.5}
Promedios	-	-1,05***	-2,43***	-1,43***
P95	-	-4,31***	-6,46***	-5,87***

Para el caso de las estaciones en el norte se presenta una diferencia entre ambas estaciones analizadas. En el caso de presentar un PDA la disminución de concentraciones tanto para MP₁₀ como MP_{2.5} fue considerablemente mayor, en los valores promedios y percentil 95, siendo aproximadamente 4 veces mayor la disminución del valor promedio y del percentil 95 para MP₁₀ en el caso con PDA y 5 veces en el caso del percentil 95 para MP_{2.5}.

En el caso del sector central (Viña del mar y Quintero), para MP₁₀ se presenta una mayor disminución en la zona sin PDA. Para MP_{2.5} los valores entre ambas estaciones son similares entre sí, siendo mayor la disminución en el caso del PDA para los valores promedios, pero menor para el percentil 95.

Para la Región de Los Lagos (Mirasol y Osorno) solo fue posible realizar el análisis para el valor promedio de MP_{2.5}, ya que la estación a comparar solo

contaba con información de MP_{2.5}, en este caso la disminución fue 2 veces mayor en el caso sin PDA. También puede sugerir que de todas formas en Mirasol se estén realizando esfuerzos por disminuir su contaminación.

Para la zona sur (Vialidad y Coyhaique), si bien los valores del sector con PDA son menores, representando una mayor disminución en las concentraciones, los resultados obtenidos son similares a los del sector sin PDA.

5. Discusiones

5.1 Implementación PDA

Los resultados respecto a las fechas de implementación de PDA muestran un desfase importante entre que una zona es declarada saturada y la fecha en la que llega a poner inicio al plan, con un promedio de 3,27 años de desfase. Esto implica que, durante el tiempo entre un evento y otro, la población residente en las zonas declaradas saturadas posiblemente siga expuesta a niveles de contaminación riesgosos. Los PDA con menor desfase presentan una diferencia de 2 años, correspondiente a Temuco y Los Ángeles, mientras que el mayor desfase lo presenta el plan de Talca y Maule, de 6 años, seguido de los PDA de Huasco y Andacollo.

Estos desfases se deben a diferentes razones en cada caso. Destaca el caso del PDA de Calama donde después de años de polémicas este comenzó a entrar en vigor el año 2022, 13 años después de haber sido Calama declarada zona saturada en MP_{2.5}, sin embargo, en junio del año 2023 el Primer Tribunal ordenó al MMA la anulación del decreto supremo asociado al plan debido principalmente a los reclamos de agrupaciones, las que acusaban poca representatividad entre las estaciones utilizadas para los estudios y las estaciones consideradas en la zona que abarca el PDA (Primer Tribunal Ambiental, 2023). Debido a esto se comenzaron nuevos estudios de monitoreo para generar una nueva versión del PDA que representara en su totalidad a la población de Calama. Actualmente, el nuevo PDA para Calama se encuentra todavía en proceso, sin embargo, el MMA

ha aprobado la implementación de medidas provisionales y complementarias provisionales (MMA, 2024). Entre dichas medidas se encuentra una disminución de emisiones directamente en las fuentes de emisión, principalmente en las faenas de CODELCO, más exigentes que en el documento oficial y, mejoras en el entorno urbano y rural, como barrido y lavado de calles, estabilización de sitios eriazos y creación de pulmones verdes, entre otras (Res. 204/2024 MMA).

Por otro lado, actualmente también hay demoras en la generación de nuevos PDA además de reclamos por parte de la ciudadanía frente a la similitud de los nuevos planes que se están gestando con los ya existentes, donde no se han encontrado conformes con los resultados. Por ejemplo, en el sector sur del país, actualmente se encuentra en gestión un PDA para la macrozona norte de la Región de Los Lagos, abarcando Osorno, San Pablo, Purránque, Río Negro y Puerto Octay, en la provincia de Osorno, y Frutillar, Llanquihue, Puerto Varas y Puerto Montt, en la provincia de Llanquihue, sin embargo, este plan no ha estado exento de críticas, ya que la Red Ambiental Ciudadana de Osorno ha hecho el reclamo de que el anteproyecto es bastante similar al PDA presente en Osorno al que consideran un plan fallido, ya que para la población, no ha logrado disminuir la contaminación de forma considerable en la zona (González, 2024). Lo que además se justifica con seguir encontrándose Osorno entre las ciudades más contaminadas del país, incluso estando entre los 5 primeros lugares el año 2022, 6 años posterior a la implementación del PDA. Esto además se puede corroborar con la información obtenida, sobre todo considerando MP_{2.5}, donde en

los últimos años un número considerable de días del período otoño-invierno se mantiene como casos de episodios críticos, incluso presentándose 11 días de emergencia ambiental los años 2021 y 2022 y, 4 días de emergencia el año 2023. Las tendencias obtenidas para Osorno muestran una disminución de -0.4 unidades/año para MP2.5, con escasa variación entre el escenario previo al PDA (-0.17 unidades/año) y posterior a este (-0.55 unidades/año). Para MP10 se presentan mejores resultados con una disminución de -2.39 unidades/año.

5.2 Estaciones y Red SINCA

Respecto a las estaciones de monitoreo y la red SINCA, se evidencia la heterogeneidad en la distribución de estas, donde ciertas regiones presentan una alta concentración de estaciones mientras que otras presentan solo unas pocas. Las estaciones disponibles se reducen aún más al ver que del total de estaciones un porcentaje menor realmente cuenta con datos considerables de serie de tiempo para poder realizar un análisis y seguimiento de la información. Esto coincide con lo encontrado por Toro et. al (2015) quien además crítica que la información entregada es incompleta e inexacta; que falta información sobre los sistemas de medición utilizados para cuantificar contaminantes; coordenadas incorrectas de algunas estaciones; vacíos en el registro de datos; clasificación de la mayor parte de la información como “pre-eliminar”, es decir, que solo ha pasado por un proceso de validación por parte del operador de red, no siendo verificado si la información es representativa y puede ser utilizada para evaluar las normas de calidad del aire y; falta de procedimientos operativos estándar de validación y

de auditorías de aseguramiento y control de calidad de las mediciones, algo que también se pudo evidenciar en el presente trabajo, al tener que utilizar criterios de validación propios para los datos ya que en otro caso disminuía considerablemente el número de datos disponibles. Algo similar plante a su vez Manzano et. al (2020), donde se coincide con la poca representatividad que presentan las estaciones de monitoreo en algunos sectores. Este artículo también muestra distintas problemáticas en la gestión de calidad de aire en Chile, como que se presenta un enfoque limitado de contaminantes, centrado principalmente en MP₁₀ y MP_{2.5}.

Sumado a esto, las estaciones de monitoreo de la red se centran en puntos específicos, presentándose muchas estaciones en algunas ciudades mientras que otras no cuentan con estaciones. Por ejemplo, la Región de Antofagasta cuenta con 34 estaciones de monitoreo, la mayoría de estas ubicadas en las comunas de Tocopilla (9) y Calama (11), mientras que la Región de Aysén y la Araucanía cuentan solo con 4 y 6 estaciones en total, respectivamente. Esto genera un vacío en la obtención de los datos para declarar una zona latente o saturada, donde muchos sectores podrían estar quedando fuera de esta categoría al no haber registros de su calidad del aire.

5.3 Análisis datos y calidad del aire

Del análisis de calidad de aire diaria es necesario destacar las diferencias observadas entre las distintas zonas.

En la zona norte predomina la superación de la norma a nivel anual, mas no así en el caso diario, mientras que la zona centro-sur y sur del país si presenta concentraciones por sobre los promedios diarios, lo que además ocurren principalmente en la época de otoño-invierno, donde se lleva a cabo el plan de gestión de episodios críticos, correspondientes a medidas inmediatas para disminuir los altos niveles de MP.

Los sectores con PDA de la zona norte no presentan días con calidad del aire mala en toda la serie de tiempo para MP₁₀ y MP_{2.5}, a excepción de Tocopilla, donde en algunos años se observan episodios.

Esto se justifica considerando las condiciones climáticas y geográficas de esta zona, donde al presentar menores temperaturas, especialmente en las épocas de otoño-invierno generan un mayor uso de fuente calefactoras en esta zona, lo que se ha demostrado ser la principal fuente de MP_{2.5} en dicho sector (Molina et. al, 2023), además de generarse procesos de inversión térmica, lo que genera poca movilidad atmosférica (García, et. al, 2012), algo que no es común en la zona norte del país, debido a su clima y mayores temperaturas.

Si evaluamos la topografía, en general las ciudades de la zona centro y sur se encuentra en el valle central, presentando una menor dinámica y mayor estabilidad atmosférica, lo que fomenta la concentración de contaminantes (Yavuz, 2023), a diferencia de la mayor movilidad presente en sectores costeros, como el caso de Tocopilla y de Concón-Quintero-Puchuncaví, donde las

corrientes de viento asociadas a su ubicación geográfica fomentan la dispersión de contaminantes (Nicholson, 2009).

En el caso anual, en la zona norte niveles de MP_{10} se encontraban por sobre la norma los primeros años de monitoreo, algo que se logró reducir en el caso de Tocopilla, Calama y Andacollo. Para el caso de Huasco, los niveles anteriores se presentan bajo lo normado, sin embargo, el año 2023 estos crecen superando la norma anual, siendo necesario un estudio en detalle para ver si corresponde a un error en el monitoreo o si se puede atribuir a otros factores.

A modo general se puede apreciar que el número de episodios asociados a $MP_{2.5}$ es mayor a los asociados a MP_{10} para todos los PDA. Del análisis de episodios críticos para la zona centro-sur y sur se nota una mayor presencia de días de mala calidad de aire respecto a $MP_{2.5}$, tanto en frecuencia como en duración.

En la zona centro-sur y sur las principales fuentes de contaminación se encuentran asociadas a procesos de combustión, ya sea industriales, vehiculares o para calefacción, fuentes con alta proporción de $MP_{2.5}$ y sus precursores, lo que justifica las diferencias observadas para los episodios críticos.

Respecto a las variaciones entre PDA, Coyhaique y Osorno son los que presentan mayor cantidad de días con mala calidad del aire, tanto para MP_{10} como para $MP_{2.5}$, con un promedio de 17.8 y 11.5 días, respectivamente para MP_{10} y, de 63.3 y 65.0 días para $MP_{2.5}$, considerando desde el año 2020. Esto

coincide con los planes más australes, que presentan además una mayor emisión de MP_{2.5} por uso de leña residencial por habitante.

5.4 Episodios Críticos

A modo general, en todos los PDA se observa una disminución en el número de episodios críticos, tanto respecto a MP₁₀ como a MP_{2.5}, lo que concuerda con lo presentado por el MMA en su cuenta pública del año 2024, donde se destaca la disminución en días de preemergencia y emergencia ambiental en la mayoría de las ciudades al centro sur del país, a excepción de Concepción que no ha presentado disminución en el número de episodios críticos desde el comienzo del plan (MMA, 2024). Esta disminución es más notoria en algunos casos, como Valdivia y Temuco y Chillán, donde se aprecia una disminución considerable, lo que no es tan notorio en casos como Los Ángeles y Coyhaique. Además, se siguen presentando un número importante de días con preemergencia y emergencia en las ciudades del sur, como el caso de Coyhaique que el año 2023 presentó 50 días con alerta y preemergencia.

5.5 Datos intra-planes

Siguiendo con los episodios críticos, es posible observar además notorias diferencias entre estaciones de un mismo PDA. Esto se representa en la figura 24, donde se muestran el número de episodios críticos para las estaciones Valdivia y Valdivia 2, del PDA de Valdivia. De los resultados se muestra que tanto para MP₁₀ como para MP_{2.5} Valdivia 2 presenta un número de episodios considerablemente menor a lo observado en la estación Valdivia. La figura 25

muestra un mapa de la ciudad de Valdivia con la ubicación de ambas estaciones. La diferencia entre los valores encontrados se puede justificar debido a que la estación Valdivia 1 se encuentra en una zona de la ciudad central, mientras que la estación Valdivia 2 se encuentra en la Isla Taja, al lado de lo que es la Universidad Austral de Chile, por lo tanto, corresponde a una zona con menor tráfico vehicular y más aislada.

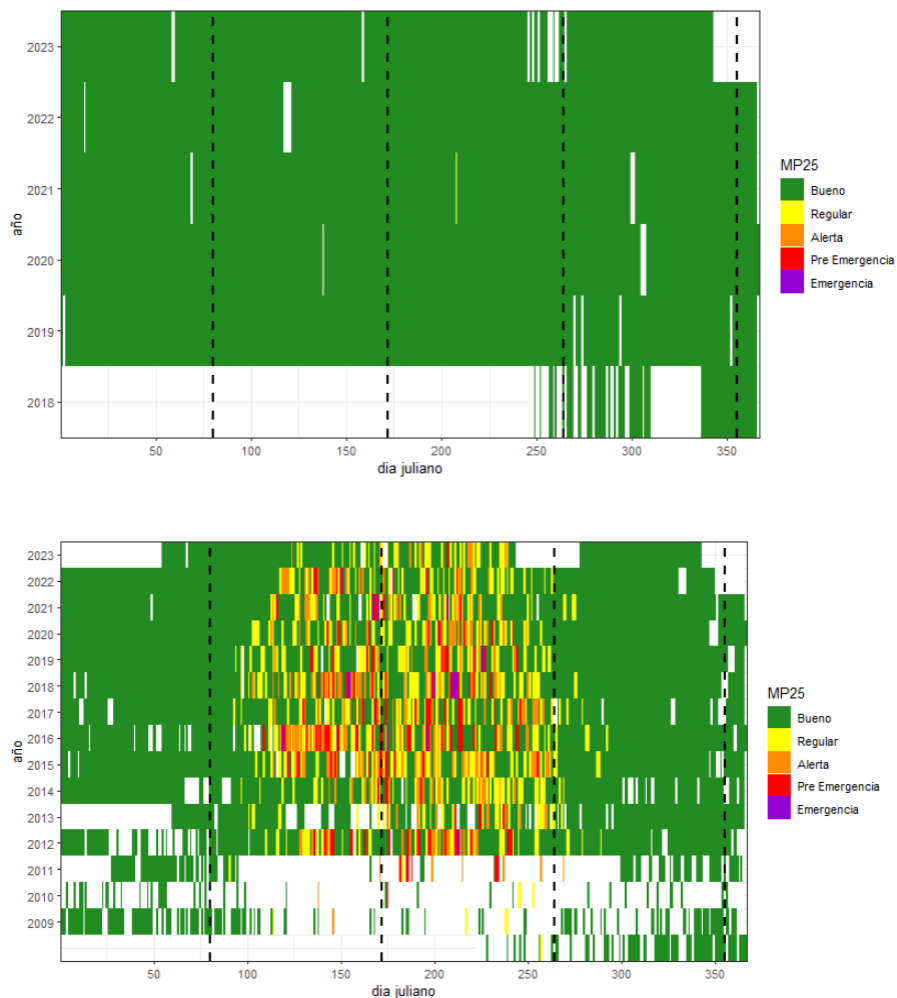


Fig. 24 Episodios críticos MP_{2.5} estación Valdivia 2 (arriba) y Valdivia (abajo)

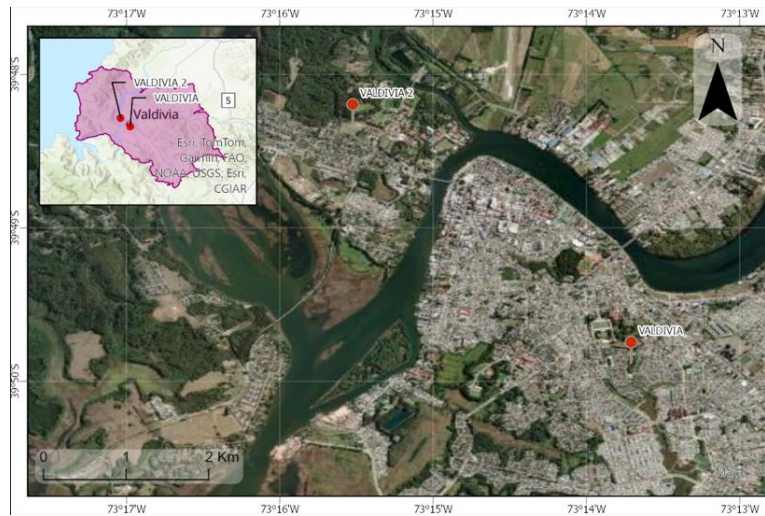


Fig. 25 Mapa Valdivia – Estaciones Valdivia y Valdivia 2

Esto refleja la importancia de contar con distintas estaciones de monitoreo para la obtención de resultados representativos, que permitan identificar además puntos con mayores y menores niveles de contaminación dentro de un mismo lugar y facilitar el estudio de impactos y aplicación de medidas.

La figura 26 muestra de manera similar lo obtenido para las estaciones de la RM. En ambos casos el mapa de color ilustra el número de episodios para el año 2023, donde se puede ver las diferencias entre lo observado en cada punto.

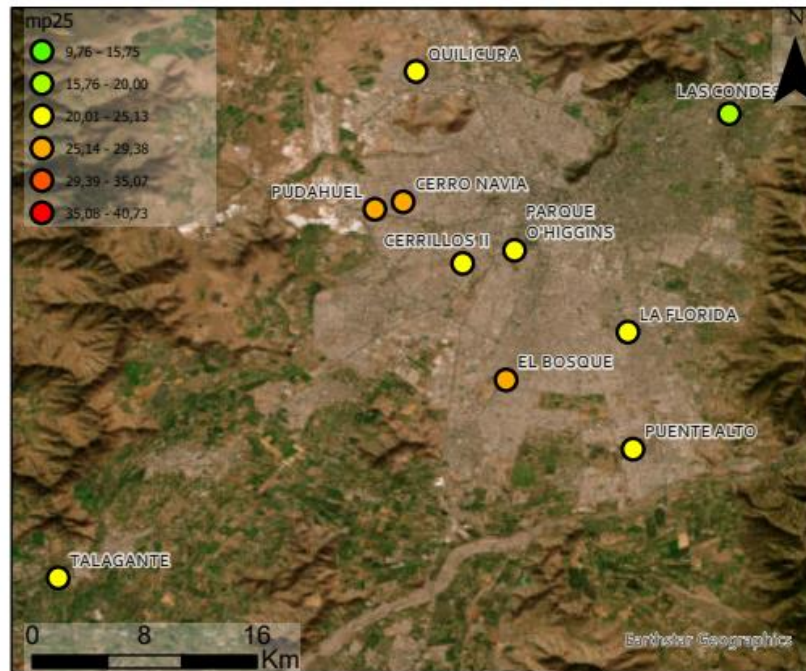


Fig. 26 Promedio MP_{2.5} anuales por estación en Santiago - RM

5.6 Análisis Punto de Quiebre

A partir del análisis de punto de quiebre se pudo identificar que estos en algunos casos se presenta antes de la implementación del PDA, mientras que en otros se presenta después, también hay casos en que en algunas estaciones se presenta antes y otras después. Para el caso en que el punto de quiebre se detecta antes se infiere que este se deba a la implementación de otras medidas, por ejemplo, en el caso de la RM el punto de quiebre encontrado para la mayoría de las estaciones se encuentra cercano al año 2000, asociado a la implementación de medidas tomadas como cambio de combustibles, cambios en flota vehicular y Transantiago, coincidiendo con lo postulado por Gallardo (2018) y Jorquera (2021). El primer caso evalúa el rol de la movilidad y desarrollo con los niveles de contaminación en Santiago, donde concluye que medidas

tecnológicas y operacionales adaptadas a partir de los años 90 muestran un efecto en decrecer las concentraciones de MP₁₀, el segundo caso analiza las tendencias de 3 estaciones en la RM (Parque O'higgins, Las Condes y Pudahuel) y asocia la disminución de los valores de MP a fuentes móviles, ya que la mayor disminución la observa en sitios con mayor movilidad.

Por otro lado, para los PDA ubicados en la zona sur, las fechas encontradas de punto de quiebre se encuentran, en la mayoría de los casos, cercanas al año 2015, lo que coincide con la implementación de la Política de Uso de Leña y sus derivados para Calefacción, implementada por el Ministerio de Energía el año 2014. Esto se logra apreciar además en la disminución que se observa en las emisiones por uso de leña residencial en la zona sur a partir de ese año.

5.7 Análisis de Tendencias

Respecto a la evaluación de los PDA se encontró que, en la zona norte, en los PDA de Tocopilla, Calama y Andacollo se presenta una disminución en la concentración de MP₁₀, para el caso de Huasco ninguna estación mostró una disminución estadísticamente significativa. Esta tendencia fue de orden similar en los 3 casos, incluso considerando las polémicas asociadas al PDA de Calama, y a que este no ha logrado implementarse de forma adecuada. La menor disminución se observa en Andacollo (-1.65 unidades/año) y la mayor en Tocopilla (-3.31 unidades/año). Si bien, los 4 PDA consideran solo MP₁₀, en Tocopilla, Calama y Huasco se aprecia una disminución significativa

estadísticamente en los niveles de MP_{2.5}, pero de menores proporciones en comparación a MP₁₀.

Para la zona centro se evaluarán los PDA de la RM, Valparaíso y O'Higgins, los 3 casos cuentan con un PDA para MP₁₀ y MP_{2.5}, en concentraciones diarias y anuales.

Los resultados más positivos los presenta la RM, donde todas sus estaciones presentaron una disminución significativa estadísticamente para ambos contaminantes, los que oscilan en entre -0.6 a -1.17 unidades/año para MP₁₀ y, -0.27 a -0.62 unidades/año para MP_{2.5}. Al igual que en el caso anterior, MP₁₀ presenta mayores niveles de disminución en comparación a MP_{2.5}, a excepción de algunas estaciones, como Parque O'Higgins, donde la tendencia de MP₁₀ (-0.60 unidades/año) es menor a la de MP_{2.5} (-0.62 unidades/año). En la mayoría de los casos en que fue posible realizar el análisis, las tendencias obtenidas después de la implementación del PDA presenta mayores valores a la obtenida los años antes a la implementación del PDA.

Para el caso de Concón-Quintero-Puchuncaví hay una mayor variación en las tendencias obtenidas. Para MP₁₀ un 62.5% de las estaciones presenta una disminución significativa estadísticamente, número que disminuye a un 57.1% para MP_{2.5}. Los valores obtenidos son en promedio menores a lo obtenido para las estaciones en la RM para ambos tipos de MP, considerando que hay 1 año de diferencia entre ambos PDA se puede inferir que las medidas implementadas

para Concón-Quintero-Puchuncaví no han tenido la misma efectividad a las implementadas en la RM. Se puede asociar a una falta de fiscalización en las acciones en la Región de Valparaíso y una baja regulación de que efectivamente las industrias estén disminuyendo sus emisiones, como el caso de ENAP, donde el PDA específicamente menciona que debe reducir sus emisiones, sin embargo, el año 2022 se multó a dicha institución por duplicar sus valores (Aparicio, 2023; SMA, 2023).

Analizando el PDA de la Región de O'Higgins, en este caso un 75% de las estaciones mostraron una disminución significativa en los niveles de MP₁₀ y un 50% lo hizo para MP_{2.5}. La mayor disminución se presenta en las estaciones ubicadas en la ciudad de Rancagua, en comparación a las estaciones ubicadas en ciudades más pequeñas, algo similar es encontrado por Jorquera (2021), donde asocia la mayor disminución de niveles en esta región a cambios en fuentes móviles y transporte, lo que se aprecia de mayor manera en ciudades más grandes, considerando que el número de cambios de calefactores y acondicionamiento de viviendas es bajo para poder notar cambios significativos. Llama la atención que la estación Rancagua 1 presenta una disminución similar entre MP₁₀ (-1.09 unidades/año) y MP_{2.5} (-1.05 unidades/año), mientras que la estación Rancagua 2 presenta valores diferentes entre ambos, -3.61 unidades/año para MP₁₀ y -0.67 unidades/año para MP_{2.5}. Si bien, el PDA de O'Higgins es el más reciente de los analizados en la zona centro, es el sector que

presenta valores promedio de disminución mayores en comparación a Concón-Quintero-Puchuncaví y RM, algo que es sobre todo notorio para MP_{2.5}.

En la zona centro-sur se analiza los PDA de Talca y Maule, Curicó y, Chillán y Chillán Viejo. Los 3 PDA consideran MP₁₀ diario y, Curicó y Chillán considera además MP_{2.5}. En los 3 casos las tendencias encontradas presentan una disminución significativa en el 100% de las estaciones analizadas, tanto para MP₁₀ como para MP_{2.5}. En promedio la mayor disminución de MP₁₀ se presenta en el PDA de Chillán, seguido de Talca y, en último lugar, Curicó. Respecto a MP_{2.5}, Chillán presenta la mayor disminución, está vez seguido de Curicó y, luego, Talca. Llama la atención en los 3 casos la tendencia posterior a la implementación del PDA muestra menores niveles a lo presentado antes del PDA. Respecto a los episodios críticos, Talca muestra valores importantes de días con mala calidad de aire respecto a MP_{2.5}, además de altos niveles de concentración diarios y anual, por lo que hace falta una actualización del PDA respecto a este contaminante. Aun presentado la mayor disminución en sus tendencias en esta zona, el año 2024 la ciudad de Chillán se encuentra todavía entre las 10 ciudades más contaminadas de Chile (Chacana, 2024), incluso siendo la Ñuble la región que obtuvo más subsidios para acondicionamiento térmico de viviendas y eficiencia energética el año 2021, con un total de 4123 subsidios (Prensa Canal 21, 2023), por lo que, incluso presentando buenas estadísticas de disminución de contaminación y efectuando las medidas planteadas, parece no ser suficiente para obtener valores óptimos de MP.

Finalmente, respecto a los planes de la zona sur (Los Ángeles, Concepción, Temuco, Valdivia, Osorno y Coyhaique) se debe mencionar que todos consideran reducir emisiones de MP_{10} y $MP_{2.5}$. Para ambos contaminantes los mejores niveles de disminución se presentan en Coyhaique, donde, si bien se presentan los mayores valores de emisiones de $MP_{2.5}$ y MP_{10} por emisiones de leña residencial urbana por habitante, es donde se ha visto la mayor disminución en estas considerando desde el año 2015, donde en los otros casos la mayoría de las emisiones por habitante ha ido aumentando. El caso de Osorno es bastante particular, ya que respecto a MP_{10} se encuentra en segundo lugar de mejor tendencia (-2.39 unidades/año), sin embargo, esto no se refleja en los resultados obtenidos para $MP_{2.5}$ (-0.4 unidades/año). En ambas localidades los niveles siguen estando por sobre la normativa tanto en concentración diaria y anual, el caso de Coyhaique es concordante con lo encontrado en Solís, et. al. (2022) donde se analiza los niveles de MP_{10} y $MP_{2.5}$ en Coyhaique durante un período de 7 años (2014-2020), llegando a la conclusión de que si bien ambos niveles han disminuido, se siguen reportando niveles por sobre la norma y comparables a megaciudades, además acá muestra que la mayor razón $MP_{2.5}/MP_{10}$ se presenta en los meses de otoño-invierno, haciendo relación con que la mayor fuente proveniente de la combustión de leña durante el período de invierno.

Las tendencias de disminución menor se presentan en Temuco, tanto para MP_{10} (-0.68 unidades/año) como para $MP_{2.5}$ (-0.98 unidades/año), al ver los resultados de emisiones por uso de leña residencial por habitante, se puede observar que

en Temuco esta ha aumentado considerablemente desde el año 2015, además, considerando las tendencias de $MP_{2.5}$, los niveles previos a la implementación del PDA mostraban una mayor disminución (-1.02 unidades/año) en comparación a lo observado después (-0.44 unidades/año), siendo necesario hacer una evaluación más detallada en la implementación de medidas en este PDA, sobre todo considerando que Temuco es el primer sitio donde comienza a implementarse las medidas de recambio de calefactores y acondicionamiento térmico de viviendas (Jorquera, 2021).

En el caso de Concepción se dificulta un análisis particular ya que los resultados varían mucho entre cada estación, lo que se ve representado con un 63% de estaciones que muestran disminución significativa en los niveles de MP_{10} y un 40% para $MP_{2.5}$. Las estaciones que presentan una menor disminución en sus niveles corresponden en su mayoría a estaciones ubicadas en la zona sur abarcada por el PDA, en Coronel y Lota, la primera considera Zona de Sacrificio principalmente por la presencia de las centrales termoeléctricas (Matamala y Crovetto, 2021).

Los resultados del sur coinciden con lo encontrado por Molina (2017), quien hizo un análisis de PDA en ciudades del centro-sur y sur, encontrando que, si bien algunas ciudades muestran una disminución en sus niveles de contaminación, siguen presentando valores por sobre lo normado, además de la misma forma encontró que hay estaciones y ciudades que no muestran una disminución que

sea estadísticamente significativa. Hay que considerar que este estudio se realizó el año 2017, donde los PDA llevaban un menor tiempo de implementación, sin embargo, los resultados no varían en comparación a lo obtenido en este estudio con datos hasta el 2023, 6 años posterior.

Por otro lado, Mardones y Cornejo (2020) señalan que los PDA de MP_{2.5} tienen un mayor efecto en las emisiones de MP₁₀, mientras que los planes solo de MP₁₀ no muestran un efecto en la disminución de las concentraciones, resultado que también concuerda con lo encontrado en este estudio, donde los valores de disminución de MP₁₀ son mayores frente a los obtenidos para MP_{2.5}, además, los lugares que cuentan con PDA que considera MP_{2.5} muestran mejores resultados para MP₁₀, sin embargo, no se ve diferencia entre los niveles de MP_{2.5} para los PDA que los consideran frente a los que no lo hacen.

Finalmente, al comparar las tendencias obtenidas para los valores promedios con la del percentil 95, se logra apreciar que la disminución en los niveles del percentil 95 es mayor en comparación a los valores promedio, esto indica que los PDA muestran una mayor efectividad en la disminución en el número de eventos extremos de contaminación más que en los valores medios, algo que se evidencia con la disminución de números de episodios críticos en la mayoría de las estaciones analizadas, sin embargo, al mismo tiempo, los valores promedio se siguen encontrando por sobre lo normado, sobre todo en las estaciones en la

zona centro-sur y sur del país, siendo necesario reevaluar y plantar nuevas medidas que logren hacer frente a estos valores.

5.8 Comparación sectores sin PDA

De la comparación entre sectores con y sin PDA, es necesario comentar que fue difícil encontrar estaciones similares geográficas y climáticas en todas las zonas para poder hacer un análisis efectivo, que además cuenten con cantidad de datos considerable para realizar los análisis estadísticos correspondientes. Especialmente en el caso de la zona sur, donde hay una menor densidad de estaciones y la mayoría se concentra en sectores industriales que ya cuentan con PDA. Una representación de esto fue la comparación del PDA de Osorno, donde se buscó una estación en Puerto Montt que contara con información suficiente para el análisis, sin embargo, aun considerando el área superficial de esta ciudad (1673 km²) y su población (245 902 hab.), solo 1 de las estaciones presentes en la comuna de Puerto Montt se encuentra en la ciudad, correspondiente a la estación Mirasol, la que solo cuenta con 2 años de mediciones de MP₁₀, desde 2013 a 2015, por lo que no se logró realizar dicho análisis.

En la comparación de Tocopilla con Antofagasta, se logra ver que la disminución en valores promedio de MP₁₀ es considerablemente mayor para el caso de Tocopilla (con PDA), lo mismo ocurre para los valores de percentil 95 tanto en MP₁₀ como MP_{2.5}, por lo que si se aprecia una diferencia al presentar PDA.

En la comparación de la zona central, los valores entre caso con y sin PDA son similares entre sí, incluso siendo levemente mayores para la estación de Viña del Mar (sin PDA) en comparación a lo obtenido para Concón-Quintero-Puchuncaví, donde el último solo presenta una mayor disminución para los valores promedio de MP_{2.5}. En este caso no se aprecia diferencia al contar con PDA, ni en los niveles promedio ni en los niveles de percentil 95. Esto va de la mano con lo mencionado anteriormente sobre la efectividad del cumplimiento de las medidas adoptadas por el plan, especialmente en la reducción de emisiones por parte de las industrias presentes.

En el caso de la comparación de la zona sur, según lo mencionado anteriormente, no se logró hacer una comparación para el caso de Osorno, ya que no se encontró ningún lugar similar con estaciones válidas para hacer una comparación, lo que indica una falta de estaciones en la zona, donde puede ser que este faltando información sobre ciertos lugares sin poder conocer sus niveles de contaminación respecto a MP.

Finalmente, para la comparación de Coyhaique (con PDA) con Vialidad (sin PDA), solo fue posible obtener resultados estadísticamente significativos para MP_{2.5}, en este caso los valores obtenidos para Coyhaique muestran una mayor disminución, sin embargo, los valores varían tanto para el caso promedio como percentil 95 en un 26% aproximadamente, donde de igual forma se presenta un mejor escenario en el caso con PDA.

6. Conclusiones

El trabajo presentado establece que el impacto de los PDA implementados en zonas saturadas en Chile muestra diferencias de eficiencia en cada sector. En ese sentido, la mayor efectividad se muestra en los PDA de la zona norte, enfocados principalmente en las concentraciones de MP₁₀ anuales, lo que se comprueba en la disminución en sus tendencias, que los niveles han disminuido por bajo la normativa anual y a partir de la comparación con sectores similares sin PDA, donde los resultados obtenidos en cada caso muestran una mayor disminución en las concentraciones para el sector con PDA. No obstante, debido al tipo de actividades realizadas en el sector, principalmente minera, es de vital importancia considerar estudios composicionales del MP para evaluar la presencia de metales y su potencial oxidativo, los que pueden llegar a ser especialmente tóxicos y peligrosos para la salud de la población.

En el caso de la zona central hay disminuciones importantes en la región Metropolitana, asociados principalmente a cambios en sistemas de transporte, y disminuciones en Rancagua. El peor escenario se obtuvo para el PDA de Concón-Quintero-Puchuncaví, asociado al sector industrial. Se concluye que esto se debe a una mala implementación y fiscalización sobre las medidas propuestas, donde estas no se han cumplido efectivamente, ya que las estadísticas obtenidas para este PDA son considerablemente inferiores a las de los otros del sector, además, no se notaron diferencias al hacer la comparación con un sector sin PDA. Se concluye, además, una diferencia en los avances entre

sectores rurales y urbanos en la zona central, siendo necesario un reenfoque de las medidas para que contribuyan en la disminución de niveles en ambos casos.

Finalmente, para las zonas centro-sur y sur se aprecian grandes disminuciones en las concentraciones de contaminantes y en los días de episodios críticos, sin embargo, preocupa que, a pesar de eso, los niveles actuales siguen estando por sobre la normativa, siendo más notorio en lugares como Osorno y Coyhaique, donde a pesar de presentar las mayores tendencias a disminuir sus niveles son los 2 lugares que siguen presentando los peores niveles de calidad del aire, incluso el último presentando la mayor disminución en el uso de leña por habitante. A partir de eso se puede concluir que en la zona sur las medidas propuestas por los planes no son suficientes para solucionar los problemas.

En ese sentido el trabajo contribuye a conocer de mejor manera los reales impactos que de la implementación de los PDA y se espera aportar en mejoras necesarias para que estos puedan ser efectivos y cumplir su objetivo de reducir los niveles de concentración de contaminantes. Se plantea la necesidad de trabajos futuros específicos en cada caso, sobre todo respecto al cumplimiento en la implementación de medidas y su efectividad, para poder conocer las causas de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Se debe considerar que la variabilidad entre los datos obtenidos por las distintas estaciones de un mismo plan mostró importantes diferencias, estando expuestas a distintos niveles de contaminación según su ubicación, siendo un desafío

obtener datos representativos, sobre todo en sectores con poca densidad de estaciones de monitoreo activas.

Por último, es importante mencionar que, si bien el presente estudio tiene como foco analizar la eficiencia de los PDA, es necesario abordar el problema de diferentes aristas, considerando todos los factores que afectan a que estos se lleven a cabo de manera óptima, efectividad de medidas individuales, factores económicos asociados a cada una de estas, comportamientos y percepciones sociales respecto al tema y compromiso de estos en que se lleven a cabo las medidas.

7. Referencias

- Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2009). *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion*. Princeton university press.
- Aparicio, E. (2023, 25 de abril). ENAP duplicó el máximo permitido de contaminación atmosférica en 2022 en Quintero y Puchuncaví. El Mostrador.
- Asesoría Técnica Parlamentaria. (2023). Zonas de sacrificio en Chile: Quintero-Puchuncaví, Coronel, Mejillones, Tocopilla y Huasco. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. República de Chile. Santiago, Chile.
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A. M., & Gallardo, L. (2017). Temporal evolution of main ambient PM 2. 5 sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(16), 10093-10107.
- Carslaw, D. C., Ropkins, K., & Bell, M. C. (2006). Change-point detection of gaseous and particulate traffic-related pollutants at a roadside location. *Environmental science & technology*, 40(22), 6912-6918.
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61.
- Chacana, D. (2024, 22 de marzo). Chillán sale del top 10 entre las ciudades más contaminadas. La Discusión. Decreto Supremo 131/1996. (1996). Declara Zona Saturada por Ozono, Material Particulado Respirable, Partículas en Suspensión y Monóxido de Carbono, y Zona Latente por Dióxido de Nitrógeno, al área que indica. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 35/2005. (2005). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración de 24 horas, a las comunas de Temuco y Padre de las Casas. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 41/2006. (2006). Declara Zona Latente por Material Particulado Respirable MP10, la Zona Geográfica Comprendida por las Comunas de Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén y Talcahuano. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 50/2007. (2007). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración anual, a la zona circundante a la ciudad de Tocopilla. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 7/2009. (2009). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración anual y de 24 horas el Valle Central de la VI Región. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 8/2009. (2009). Zona Declarada Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración de 24 horas, y como concentración anual a la localidad de Andacollo y sectores aledaños, definidos por el polígono que se indica. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 57/2009. (2009). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, a la Ciudad de Calama y su área Circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 12/2010. (2010). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, a las comunas de Talca y Maule. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 22/2010. (2010). Establece Norma de Calidad Secundaria de Aire para Anhídrido Sulfuroso (SO₂). Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 70/2010. (2010). Establece Plan de Descontaminación Atmosférico para la ciudad de Tocopilla y su zona circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 12/2011. (2011). Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP2,5. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 27/2012. (2012). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración diaria y anual, y por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración diaria y anual, a la comuna de Osorno. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 33/2012. (2012). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración diaria y anual, a la ciudad de Coyhaique y su zona circundante, en conformidad al polígono que se indica. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 40/2012. (2012). Declara Zona Latente por Material Particulado Respirable MP10, como concentración anual, a la localidad de Huasco y su zona circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 2/2013. (2013). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración diaria, a las comunas de Temuco y Padre de las Casas. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 36/2013. (2013). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10 y por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, ambas como concentraciones diarias, y Declara zona Latente por Material Particulado Respirable MP10, como concentración anual, a las Comunas de Chillán y Chillán Viejo. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 38/2013. (2013). Aprueba Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 39/2013. (2013). Aprueba Reglamento para la Dictación de Planes de Prevención y de Descontaminación. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 17/2014. (2014). Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración diaria y anual, y por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración diaria, a la comuna de Valdivia. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 59/2014. (2014). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la Localidad de Andacollo y Sectores Aledaños. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 67/2014. (2014). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración de 24 horas, a la Región Metropolitana. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 10/2015. (2015). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración anual y Latente como concentración diaria, y zona latente por Material Particulado Respirable MP10, como concentración anual, a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 11/2015. (2015). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5 y por Material Particulado Respirable MP10, ambas como concentración diaria, a la Comuna de Los Ángeles. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 15/2015. (2015). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración diaria, a las Comunas de Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén y Talcahuano. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 41/2015. (2015). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica por MP2.5 para las comunas de Temuco y Padre de las Casas y de Actualización

del Plan de Descontaminación por MP10 para las mismas comunas. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 15/2016. (2016). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración de 24 horas, a la ciudad de Coyhaique y su zona circundante, en conformidad al polígono que se indica. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 47/2016. (2016). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la comuna de Osorno. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 48/2016. (2016). Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Chillán y Chillán Viejo. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 49/2016. (2016). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Talca y Maule. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 53/2016. (2016). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración de 24 horas, al Valle Central de la Provincia de Curicó. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 25/2017. (2017). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la Comuna de Valdivia. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 31/2017. (2017). Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 38/2017. (2017). Establece Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la Localidad de Huasco y su zona circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 42/2017. (2017). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la Comuna de Los Ángeles. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 6/2018. (2018). Establece Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concepción Metropolitano. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 42/2018. (2018). Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5, como concentración anual y de 24 horas al Valle Central de la Región de O'Higgins. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 7/2019. (2019). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 44/2019. (2019). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la Provincia de Curicó. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 90/2019. (2010). Modifica Decreto 49, de 2015, del Ministerio del Medio Ambiente, Plan de Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Talca y Maule, en el sentido que indica. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 105/2019. (2019). Aprueba Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 12/2021. (2021). Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Respirable MP10. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 5/2022. (2022). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la Ciudad de Calama y su Área Circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 43/2021. (2021). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Decreto Supremo 37/2021. (2021). Declara Zona Saturada por Material Particulado MP2.5 como concentración de 24 horas, a la Ciudad de Puerto Aysén y su área Circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.

Font, A., & Fuller, G. W. (2016). Did policies to abate atmospheric emissions from traffic have a positive effect in London?. *Environmental pollution*, 218, 463-474.

- Gallardo, L., Barraza, F., Ceballos, A., Galleguillos, M., Huneus, N., Lambert, F., ... & Véliz, K. D. (2018). Evolution of air quality in Santiago: The role of mobility and lessons from the science-policy interface. *Elem Sci Anth*, 6, 38.
- García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S., & Pérez, A. (2012). LAS INVERSIONES TÉRMICAS Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (MÉXICO). *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (58), 9-29.
- González, A., (2024, 12 de marzo). Alertan que Plan de Descontaminación para macrozona norte de Los Lagos es similar a fallido PDA Osorno. *Biobío Chile*.
- González-Rojas, C. H., Leiva-Guzmán, M., Manzano, C. A., & Araya, R. T. (2021). Short-term air pollution events in the Atacama desert, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 103010.
- Grange, S. K., & Carslaw, D. C. (2019). Using meteorological normalisation to detect interventions in air quality time series. *Science of the Total Environment*, 653, 578-588.
- Harrison, R. M. (2020). Airborne particulate matter. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2183), 20190319.
- Huneus, N., Urquiza, A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., ... & Tolvett, S. (2020). El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. *Santiago de Chile: Center for Climate and Resilience Research*.
- IQAir. (2022). Informe de la Calidad del Aire en el Mundo

- Jorquera, H. (2020). Ambient particulate matter in Santiago, Chile: 1989–2018: A tale of two size fractions. *Journal of environmental management*, 258, 110035.
- Jorquera, H. (2021). Air quality management in Chile: Effectiveness of PM_{2.5} regulations. *Urban Climate*, 35, 100764.
- Lagos, G. E., Blanco, H., Torres, V., & Bustos, B. (2001). Minería y minerales de Chile en la transición hacia el desarrollo sustentable MMSD-Chile.
- Langner, J., Gidhagen, L., Bergström, R., Gramsch, E., Oyola, P., Reyes, F., ... & Aguilera, C. (2020). Model-simulated source contributions to PM_{2.5} in Santiago and the central region of Chile. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(5), 1111-1126.
- Mallik, C., Mahapatra, P. S., Kumar, P., Panda, S., Boopathy, R., Das, T., & Lal, S. (2019). Influence of regional emissions on SO₂ concentrations over Bhubaneswar, a capital city in eastern India downwind of the Indian SO₂ hotspots. *Atmospheric Environment*, 209, 220-232.
- Manzano, C. A., Jácome, M., Syn, T., Molina, C., Toro Araya, R., & Leiva-Guzmán, M. A. (2021). Local air quality issues and research priorities through the lenses of Chilean experts: An ontological analysis. *Integrated environmental assessment and management*, 17(1), 273-281.
- Mardones, C., & Cornejo, N. (2020). Ex-post evaluation of environmental decontamination plans on air quality in Chilean cities. *Journal of environmental management*, 256, 109929.

- Matamala, O. L., & Crovetto, G. D. (2021). Reconociendo “riesgos invisibles” en una “zona de sacrificio”:: el caso de la organización Trabajadores Unidos Contra el Asbesto (TUCA) de la comuna de Coronel, Chile. *Papeles de Trabajo. Centro de Estudios Interdisciplinarios en Etnolingüística y Antropología Socio-Cultural*, (41), 59-94.
- Menares, C., Gallardo, L., Kanakidou, M., Seguel, R., & Huneus, N. (2020). Increasing trends (2001–2018) in photochemical activity and secondary aerosols in Santiago, Chile. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 72(1), 1-18.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente). (2014). Planes de Descontaminación Atmosférica: Estrategia 2014-2018.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente). (2018). Guía de Calidad del Aire y Educación Ambiental.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente). (2024). Documento Cuenta Pública Participativa.
- Molina, C., Toro A, R., Morales S, R. G., Manzano, C., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 653-667.
- Molina, C., Manzano, C. A., & Toro, R. (2023). The oxidative potential of airborne particulate matter in two urban areas of Chile: more than meets the eye. *Environment International*, 173, 107866.
- Monks, P. S., Ravishankara, A. R., von Schneidmesser, E., & Sommariva, R. (2021). Opinion: Papers that shaped tropospheric chemistry. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2021, 1-63.

- Nicholson, K. W. (2009). The dispersion, deposition and resuspension of atmospheric contamination in the outdoor urban environment. *Radioactivity in the Environment*, 15, 21-53.
- OMS. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Osses, A., Gallardo, L., & Faundez, T. (2013). Analysis and evolution of air quality monitoring networks using combined statistical information indexes. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 65(1), 19822.
- Prensa Canal 21 (2024, 6 de mayo). Ñuble recibió la mayor cantidad de subsidios a nivel país para acondicionamiento térmico y eficiencia energética de viviendas. Canal 21.
- Primer Tribunal Ambiental. (2023). Reclamación R-65-2022.
- Res. Ext. 204/2024. (2024). Aprueba Medidas Provisionales en Conformidad con el Artículo 43 Bis de la Ley N°19300 y Medidas Complementarias para la Zona Saturada de la ciudad de Calama y su área Circundante. Ministerio del Medio Ambiente. República de Chile. Santiago, Chile.
- Saxena, P., & Naik, V. (Eds.). (2019). *Air pollution: sources, impacts and controls*. CAB International.
- Solís, R., Toro, R., Gomez, L., Vélez-Pereira, A. M., López, M., Fleming, Z. L., ... & Leiva, M. (2022). Long-term airborne particle pollution assessment in the city of Coyhaique, Patagonia, Chile. *Urban Climate*, 43, 101144.

- SMA (Superintendencia del Medio Ambiente). (2024, 5 de julio). SMA multa a ENAP Refinerías por incumplimiento al Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de Concón, Quintero y Puchuncaví. Portal SMA. Gobierno de Chile.
- Toro, R., Canales, M., & Gonzalez-Rojas, C. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment*, 79, 115-123.
- Toro, R., Campos, C., Molina, C., & Leiva-Guzmán, M. A. (2015). Accuracy and reliability of Chile's National Air Quality Information System for measuring particulate matter: Beta attenuation monitoring issue. *Environment International*, 82, 101-109.
- Yavuz, V. (2023). An analysis of atmospheric stability indices and parameters under air pollution conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8), 934.
- Zeileis, A., Leisch, F., Hornik, K., & Kleiber, C. (2002). strucchange: An R package for testing for structural change in linear regression models. *Journal of statistical software*, 7, 1-38.
- Zeileis, A., Kleiber, C., Krämer, W., & Hornik, K. (2003). Testing and dating of structural changes in practice. *Computational Statistics & Data Analysis*, 44(1-2), 109-123.
- Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., ... & Wang, Y. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical reviews*, 115(10), 3803-3855.