

UCH-FC  
Q. Ambiental  
M. 722  
C. 1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CONTROL DE LA  
CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN  
CIUDADES DEL SUR DE CHILE”**

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

**Químico Ambiental**

**Carolina Alejandra Molina Pavez**

Director del Seminario de Título: Dr. Manuel Leiva Guzmán

Diciembre 2016  
Santiago – Chile





## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

“EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN CIUDADES DEL SUR DE CHILE”

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

**Carolina Molina Pavez.**

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

### COMISION DE EVALUACIÓN

*Dr. Manuel Leiva Guzmán*  
**Director Seminario de Título**



---

*Dr. Richard Toro*  
**Presidente Comisión**



---

*Dr. Sebastián Tolvett*  
**Evaluador y Corrector**



---

Santiago de Chile, .....

## Biografía

Nací en Chile, el 31 de diciembre de 1992, recibida por mi familia compuesta por mi padre, madre y hermana mayor, familia a la cual posteriormente se unieron dos hermanas más. Así, crecí con el amor de mi familia, en la que incluyó a mi abuela, tías, tíos y primos, quienes me protegieron y enseñaron.

Desde mi infancia he buscado el conocimiento, ya sea de libros, televisión o adultos cercanos, la curiosidad fue pro y contra, pero siempre aprendía algo nuevo, Por eso mismo durante los años de educación básica y media (1998-2010) adquirí las herramientas básicas para crecer, aprender y descubrir lo que me dedicaría.

Ingresé el 2011 a la carrera Química Ambiental de la cual poco sabía, donde encontré desafíos y sorpresas, donde pude satisfacer mi gusto por la ciencia, especialmente la química, siendo un aporte a la sociedad a partir del conocimiento adquirido y generado.

Al terminar mis estudios de pregrado y con aún mucho por aprender, con este seminario de título se cierra un capítulo importante de mi vida.

## **Agradecimientos**

Gracias para comenzar a mi familia, a mi madre y padre por apoyarme desde pequeña a alcanzar lo que me proponía, a mis hermanas que me acompañaron, comprendieron y dieron ánimos.

A mi abuela, tíos y primos, por creer en mí, comprenderme y apoyarme siempre.

A mi team, que recorrió este camino conmigo, altos y bajos, noches de sueño y periodos de estrés, gracias la compañía y el apoyo constante, por hacer este camino más fácil, entretenido y disfrutable.

Gracias a los profesores que me formaron como profesional, al Centro de Ciencias Ambientales, especialmente a los Profesores Manuel Leiva y Richard Toro, por enseñarme y guiarme.

Finalmente, gracias a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica CONICYT/FONDECYT Regular 2016/ N°1160617.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |      |
|---|------|
| Biografía.....  | ii   |
| Agradecimientos.....  | iii  |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS.....   | iv   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | vii  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | ix   |
| LISTA DE ABREVIATURAS.....  | xi   |
| RESUMEN.....  | xiii |
| ABSTRACT.....   | xv   |
| I. INTRODUCCIÓN.....  | 1    |
| 1.1. Antecedentes Generales.....  | 1    |
| 1.1.1. Impacto de la contaminación del aire en la salud de la población.....              | 1    |
| 1.1.2. Material Particulado.....  | 2    |
| 1.1.3. Legislación Ambiental.....   | 2    |
| 1.1.4. Zonas saturadas por uso de leña.....   | 3    |
| 1.1.5. Estrategia de Descontaminación Atmosférica.....                                    | 3    |
| 1.1.6. Descripción de la institucionalidad ambiental y planes de<br>descontaminación..... | 4    |
| 1.1.7. Descripción de los PDA, contenido, principales medidas y ejes de<br>trabajo.....   | 6    |
| 1.1.8. Emisiones.....   | 8    |
| 1.1.9. Planteamiento del problema.....  | 9    |
| 1.2. Objetivos.....   | 10   |
| 1.2.1. Objetivo General.....  | 10   |
| 1.2.2. Objetivos Específicos.....   | 10   |
| II. METODOLOGÍA.....  | 11   |
| 2.1. Descripción del área de estudio.....   | 11   |

|   |    |
|---|----|
| 2.2. Obtención y análisis de información: Programas de descontaminación de las ciudades del centro sur del país, en el marco de la institucionalidad medio ambiental..... | 14 |
| 2.3. Evaluación y caracterización de la efectividad de las medidas de control de la contaminación por MP en las ciudades en estudio .....                                 | 15 |
| 2.3.1. Recambio de calefactores .....   | 15 |
| 2.3.2. Inventario de emisiones.....   | 16 |
| 2.4. Calidad de aire, cumplimiento de normas primarias de calidad de aire para material particulado en ciudades del centro-sur del país.....                              | 16 |
| 2.4.1. Obtención de datos.....  | 16 |
| 2.4.4. Evaluación normativa e índices de evaluación del PDA.....  | 18 |
| 2.4.5. Análisis de la relación entre contaminación por MP y variables meteorológicas.....   | 19 |
| 2.5. Evaluación planes de descontaminación en las ciudades del centro-sur de Chile.....   | 20 |
| III. RESULTADOS .....   | 21 |
| 3.1. Planes de Descontaminación.....  | 21 |
| 3.2. Cuantificación Recambio de calefactores.....   | 24 |
| 3.3. Emisiones .....  | 26 |
| 3.4.1. Disponibilidad de información, datos SINCA .....   | 28 |
| 3.4.2. Análisis de concentración MP, variabilidad anual, mensual, diaria y horaria .....  | 30 |
| 3.4.3. Evaluación del efecto de variables meteorológicas en variación de MP...35  |    |
| 3.4.4. Determinación superación de norma y episodios críticos. ....   | 36 |
| 3.5. Evaluación planes descontaminación por ciudad.....   | 44 |
| 3.5.1. Valle de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins .....   | 44 |
| 3.5.1.1. Rancagua.....  | 44 |
| 3.5.1.2. Rengo y San Fernando .....   | 49 |
| 3.5.2. Región del Maule .....   | 51 |
| 3.5.2.1. Talca .....  | 52 |
| 3.5.2.2. Curicó.....  | 54 |
| 3.5.3. Región del Biobío.....   | 56 |
| 3.5.3.1. Chillán y Chillán viejo.....   | 56 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 3.5.3.2. | Los Ángeles .....                                      | 58 |
| 3.5.3.3. | Coronel, Concepción, Talcahuano y Chiguayante .....    | 60 |
| 3.5.4.   | Región de la Araucanía .....                           | 63 |
| 3.5.4.1. | Temuco .....   | 64 |
| 3.5.4.2. | Padre Las Casas .....                                  | 67 |
| 3.5.5.   | Región de Los Ríos .....                               | 69 |
| 3.5.5.1. | Valdivia.....  | 69 |
| 3.5.6.   | Región de Los Lagos.....                               | 71 |
| 3.5.6.1. | Osorno .....   | 71 |
| 3.5.7.   | Región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo ..... | 73 |
| 3.5.7.1. | Coyhaique.....   | 73 |
| 3.5.8.   | Casos especiales.....                                  | 76 |
| 3.5.8.1. | Puerto Montt .....                                     | 76 |
| 3.4.8.2. | Punta Arenas .....                                     | 78 |
| V.       | DISCUSION Y COMENTARIOS FINALES .....                  | 79 |
| VI.      | . CONCLUSIÓN .....                                     | 82 |
| VIII.    | BIBLIOGRAFÍA .....                                     | 84 |
| IX.      | ANEXO .....  | 88 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| <b>Tabla 1</b>  | Medidas tomadas previa vigencia PDA en ciudades en estudio y nacional.....   | 7  |
| <b>Tabla 2</b>  | Caracterización y localización de las ciudades y estaciones en estudio.....  | 12 |
| <b>Tabla 3</b>  | Categorías de calidad de aire .....  | 19 |
| <b>Tabla 4</b>  | Número de calefactores cambiados en las ciudades estudiadas.....   | 24 |
| <b>Tabla 5</b>  | Número de parque y meta equipos a leña, % de recambio calefactores .....   | 25 |
| <b>Tabla 6</b>  | Coefficientes correlación y tendencias (%/año) para variables meteorológicas .....   | 35 |
| <b>Tabla 7</b>  | Percentiles 98 de las concentraciones de 24 horas ( $\mu\text{gm}^{-3}$ ) para cada año y ciudad del estudio.....  | 38 |
| <b>Tabla 8</b>  | Coefficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Rancagua.....             | 47 |
| <b>Tabla 9</b>  | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Rancagua.....   | 48 |
| <b>Tabla 10</b> | Coefficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Rengo y San Fernando..... | 51 |
| <b>Tabla 11</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Rengo y San Fernando.....   | 51 |
| <b>Tabla 12</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Talca.....  | 52 |
| <b>Tabla 13</b> | Diferencia porcentual con respecto a normas nacionales para Curicó.....  | 55 |
| <b>Tabla 14</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Chillán. ....   | 57 |
| <b>Tabla 15</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Los Ángeles.....  | 62 |
| <b>Tabla 16</b> | Diferencia porcentual con respecto a normas nacionales para Concepción, Coronel, Talcahuano y Chiguayante.....   | 61 |
| <b>Tabla 17</b> | Emisiones por fuentes móviles en el Gran Concepción ton/año.....   | 63 |



|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| <b>Tabla 18</b> | Coeficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Temuco.....          | 64 |
| <b>Tabla 20</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Temuco.....   | 66 |
| <b>Tabla 21</b> | Coeficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Padre Las Casas..... | 68 |
| <b>Tabla 22</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Padre Las Casas .....   | 69 |
| <b>Tabla 23</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Valdivia.....   | 70 |
| <b>Tabla 24</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Osorno.....   | 72 |
| <b>Tabla 25</b> | Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Coyhaique.....  | 75 |
| <b>Tabla 26</b> | Diferencia porcentual año con respecto a normas nacionales para Pto. Montt .....   | 77 |
| <b>Tabla 27</b> | Diferencia porcentual año con respecto a normas nacionales para Punta Arenas.....  | 78 |
| <b>Tabla 28</b> | Resumen de resultados obtenidos para MP <sub>10</sub> , para ciudades en estudio.....  | 80 |
| <b>Tabla 29</b> | Resumen de resultados obtenidos para MP <sub>2,5</sub> , para ciudades en estudio.....   | 80 |
| <b>Tabla 30</b> | Porcentaje de disponibilidad de datos para las ciudades en estudio para MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> .....   | 88 |
| <b>Tabla 31</b> | Promedios anuales para MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> (µgm <sup>-3</sup> ) para las ciudades en estudio .....  | 89 |
| <b>Tabla 32</b> | Emisiones urbanas – rurales de MP <sub>10</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.....   | 90 |
| <b>Tabla 33</b> | Emisiones urbanas – rurales de MP <sub>2,5</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.....  | 91 |
| <b>Tabla 34</b> | Días por episodio crítico alerta, preemergencia y emergencia para MP <sub>10</sub> en las ciudades en estudio.....   | 92 |
| <b>Tabla 35</b> | Días por episodio crítico alerta, preemergencia y emergencia para MP <sub>2,5</sub> en las ciudades en estudio.....  | 93 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>Figura 1</b>  | Proceso Formulación planes de descontaminación.....  | 5  |
| <b>Figura 2</b>  | Localización geográfica de ciudades en estudio.....  | 13 |
| <b>Figura 3</b>  | Línea de tiempo, formulación planes de descontaminación y medidas por MP <sub>10</sub> para ciudades y años en estudio .....   | 22 |
| <b>Figura 4</b>  | Línea de tiempo, formulación planes de descontaminación y medidas por MP <sub>2,5</sub> para ciudades y años en estudio.....   | 23 |
| <b>Figura 5</b>  | Emisiones urbanas de MP <sub>10</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.....   | 27 |
| <b>Figura 6</b>  | Emisiones urbanas de MP <sub>2,5</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.....  | 27 |
| <b>Figura 7</b>  | Serie de tiempo para concentración de MP <sub>10</sub> (izquierda) y MP <sub>2,5</sub> (derecha) en $\mu\text{gm}^{-3}$ para ciudades en estudio.....  | 29 |
| <b>Figura 8</b>  | Variación temporal concentraciones MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{gm}^{-3}$ ), promedio para todos los años de datos disponibles en RG, RN, SF, CU, TL, CLL, LA, TH, CR, mensual (izquierda), diaria (centro) y horaria (derecha)..... | 33 |
| <b>Figura 9</b>  | Variación temporal concentraciones MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{gm}^{-3}$ ), promedio para todos los años de datos disponibles en CG, CP, TM, PL, VL, OS, PM, CY, PA, mensual (izquierda), diaria (centro) y horaria (derecha).....  | 34 |
| <b>Figura 10</b> | Días sobre norma diaria para el promedio de 24 horas, para cada año y ciudad estudiados.....   | 41 |
| <b>Figura 11</b> | Horas sobre norma diaria para el promedio de 24 horas, para cada año y ciudad estudiados .....   | 42 |
| <b>Figura 12</b> | Días con ocurrencia de episodios críticos (alerta, pre emergencia y emergencias) sobre norma diaria para el promedio de 24 horas.....  | 43 |
| <b>Figura 13</b> | Tendencia para MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> años previo (a y c) y posteriores (b y d) a la aplicación del PDA, Rancagua.....   | 46 |
| <b>Figura 14</b> | Promedio tri-anual y percentil 98 para Rancagua.....   | 47 |
| <b>Figura 15</b> | Tendencia para MP <sub>10</sub> , años previo (a y c) y posteriores (b y d) a la aplicación del PDA, Rengo (arriba) y San Fernando (abajo).....  | 50 |
| <b>Figura 16</b> | Tendencia para MP <sub>10</sub> (a) y MP <sub>2,5</sub> (b) para años medidos (2013-2016), Talca.....  | 51 |
| <b>Figura 17</b> | Promedio tri-anual y percentil 98 para Talca .....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 18</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) para años medidos (2013-2016), Curicó .....                                 | 55 |
| <b>Figura 19</b> Tendencia para $MP_{10}$ y $MP_{2,5}$ , años medidos, Chillán.....  | 57 |
| <b>Figura 20</b> Promedio tri-anual y percentil 98 para Chillán.....   | 57 |
| <b>Figura 21</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) para años medidos (2013-2016), Los Ángeles.....                             | 59 |
| <b>Figura 22</b> Tendencia para $MP_{10}$ , años medidos (2012-2016), Concepción (a), Coronel (b), Talcahuano (c) y Chiguayante (d.).....  | 61 |
| <b>Figura 23</b> Tendencia para $MP_{10}$ y $MP_{2,5}$ años previo (a y c) y posteriores (b y d) a la aplicación del PDA, Temuco.....      | 65 |
| <b>Figura 24</b> Promedio tri-anual y percentil 98 para Temuco .....   | 65 |
| <b>Figura 25</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) años posteriores (2014-2016) a la aplicación del PDA, Padre Las Casas ..... | 67 |
| <b>Figura 26</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) años medidos (2014-2016), Valdivia .....                                    | 70 |
| <b>Figura 27</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) para años medidos (2013-2016), Osorno .....                                 | 71 |
| <b>Figura 28</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) para años medidos (2012-2016), Coyhaique.....                               | 73 |
| <b>Figura 29</b> Promedio tri-anual y percentil 98 para Coyhaique.....   | 74 |
| <b>Figura 30</b> Tendencia para $MP_{10}$ (a) y $MP_{2,5}$ (b) para años medidos (2013-2016), Puerto Montt.....                            | 76 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|       |   |
|-------|---|
| Aprox | Aproximadamente   |
| BNC   | Biblioteca Nacional del Congreso                          |
| CASEN | Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional       |
| CNE   | Comisión Nacional de Energía                              |
| Cor   | Correlación   |
| CG    | Chiguayante   |
| CLL   | Chillán   |
| CP    | Concepción  |
| CR    | Coronel   |
| CY    | Coyhaique   |
| CU    | Curicó  |
| DS    | Decreto Supremo   |
| DSN   | Día sobre norma   |
| EMRP  | Estaciones de monitoreo con representatividad poblacional |
| e-PAC | Participación ciudadana en normas y planes                |
| HSN   | Hora sobre norma  |
| INE   | Instituto Nacional de Estadísticas                        |
| LA    | Los Ángeles   |
| LBO   | Libertador Bernardo O'Higgins                             |
| MMA   | Ministerio de Medio Ambiente                              |
| MP    | Material particulado                                      |
| MP10  | Material Particulado 10                                   |
| MP2,5 | Material Particulado 2,5                                  |
| N°    | Número  |
| OMS   | Organización Mundial de la Salud                          |
| OS    | Osorno  |
| P98   | Percentil 98  |
| PA    | Punta Arenas  |
| PDA   | Plan de Descontaminación Atmosférica                      |
| PL    | Padre Las Casas   |
| PTA   | Promedio tri-anual  |

|         |   |
|---------|---|
| Pto.    | Puerto  |
| RETC    | Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes |
| RG      | Rancagua  |
| RN      | Rengo   |
| SECTRA  | Secretaría de Planificación de Transporte               |
| SEGPRES | Ministerio Secretaría General de la Presidencia         |
| MODEM   | Metodología para el Cálculo de Emisiones Vehiculares    |
| SF      | San Fernando  |
| TL      | Talca   |
| TH      | Talcahuano  |
| Thiel   | TheilSen  |
| TM      | Temuco  |
| VL      | Valdivia  |

## RESUMEN

El presente seminario de título busca evidenciar la efectividad que poseen los planes de descontaminación atmosférica (PDA) aplicados en 18 ciudades del sur de Chile, siendo estas Rancagua, Rengo, San Fernando, Curicó, Talca, Chillán y Chillan Viejo, Los Ángeles, Concepción, Coronel, Chiguayante, Talcahuano, Temuco y Padre Las Casas, Valdivia, Osorno, Coyhaique y como casos excepcionales Puerto Montt y Punta Arenas. Se seleccionaron estas ciudades debido a los altos índices de contaminación por material particulado (MP) presentados en los últimos años y la reciente puesta en marcha de los PDA desde el año 2005 al 2016.

Para establecer este objetivo, se realizó una búsqueda sistemática de información, donde se utilizaron operadores de búsqueda, palabras claves y criterios para evaluar la información en relación a los PDA y calidad del aire. De esta manera se seleccionaron sitios de instituciones gubernamentales tales como la Biblioteca Nacional del Congreso (BNC), Sistema de Información Nacional de Calidad de aire (SINCA), Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y Registro de Emisiones y Transferencia de contaminantes (RETC) entre otros.

Con esta información, se realiza un análisis temporal de la formulación de los PDA y la instauración del recambio de calefactores como medida cuantificable, comparando las metas establecidas en PDA con los avances a la actualidad en esta materia. Así, para ver la efectividad de estas se utiliza la entrada en vigencia de los PDA y la instauración del recambio de calefactores en las ciudades en estudio, comparando los escenarios con las medidas y PDA versus sin ellas. En ambos escenarios, se analizan el comportamiento de las concentraciones de material particulado, el número de días y horas sobre norma y el de episodios críticos, siendo estos los índices de evaluación de los PDA. Se analizaron las emisiones de material particulado por la combustión de leña domiciliaria, su variación en el periodo en estudio y la influencia de las variables meteorológicas sobre el material particulado a partir de un análisis de correlación de variables, estudiando con un análisis de tendencia lineal la variabilidad que esta ha presentado en el periodo de estudio. Cada uno de los análisis fueron realizados por medio de los programas Excel y R, haciendo uso del paquete Openair.

Los resultados obtenidos permiten establecer que la entrada en vigencia de la norma primaria de calidad de aire para  $MP_{2,5}$ , resulta un hito en los avances referidos al monitoreo y regulación de la contaminación en las ciudades del sur del Chile. A partir del año 2012 5 ciudades han sido declaradas como zona saturada por  $MP_{10}$  y 6 por  $MP_{2,5}$ , entrando en vigencia 5 nuevos PDA (Valle del Libertador Bernardo O'Higgins, Talca, Chillán y Chillán Viejo, Osorno y Coyhaique) y actualizándose el PDA de Temuco y Padre Las Casas por el cumplimiento de la mitad del periodo de aplicación. En cuanto al recambio de calefactores ciudades con PDAs más antiguos son las de mayores avances, como Temuco con un 42% en relación a la meta inicial pero sólo un 19% con la nueva meta establecida en la actualización del PDA. Aun así, las metas fijadas en los PDA son bajas, donde Osorno, Valdivia y Coyhaique son las ciudades que aspiran a recambiar un 50% del parque actual, siendo las más altas, destacando Coyhaique que alcanza un 35% del recambio realizado.

Las emisiones de MP por consumo de leña aumentan año a año, pero no de forma significativa, por lo que no es posible observar el efecto de las medidas en ellas. En cuanto a los índices de evaluación de los PDA, para evaluar las normas diarias y anuales prima la falta de datos o validez para estimarla superación de las normas. En los casos que se puede ver a lo largo del tiempo como varía, las normas están superadas en los periodos sin y con PDA, exceptuándose Rengo, San Fernando Talcahuano, Coronel, Concepción, Chiguayante, Puerto Montt y Punta Arenas para  $MP_{10}$  y para  $MP_{2,5}$  sólo Coronel, Chiguayante y Punta Arenas. Para los días sobre normas y episodios críticos se observa una disminución año a año para la mayoría de las ciudades para  $MP_{10}$  a excepción de Chillán, Los Ángeles, Valdivia, Osorno y Coyhaique. En el caso de  $MP_{2,5}$  Rancagua, Curicó y Temuco presentan una disminución de episodios críticos año a año, pero aun así todas las ciudades donde se monitorea  $MP_{2,5}$  (excepto Rengo, San Fernando, ciudades del Gran Concepción y Punta Arenas) presentan más de 50 días sobre norma y más de 30 días de episodios críticos.

Finalmente, en el análisis para cada ciudad destacan los progresos en cuanto a  $MP_{10}$ , donde las tendencias lineales van a la baja para 9 ciudades. entre las significativamente estadísticas que aumentan son Los Ángeles, Chiguayante y Valdivia, el no presentan tendencia significativa. Para  $MP_{2,5}$ , las ciudades con significancia estadística que presentan tendencias positivas son Chillán, Valdivia y Coyhaique, mientras que las negativas son Rancagua, Curicó, Temuco, Osorno y Puerto Montt.

## ABSTRACT

The current work seeks to demonstrate the effectiveness of the atmospheric decontamination plans (PDA in Spanish) applied in 18 cities in southern Chile. The cities included Rancagua, Rengo, San Fernando, Curicó, Talca, Chillán and Chillán Viejo, Los Angeles, Concepción, Coronel, Chiguayante, Talcahuano, Temuco and Padre Las Casas, Valdivia, Osorno, Coyhaique, in addition to Puerto Montt and Punta Arenas, which are treated as exceptional cases. These cities were selected because of their high rates of atmospheric particulate matter pollution (PM, or MP in Spanish) measured in recent years and the recent implementation of the PDAs from 2005 to 2016.

A systematic search of information was performed, using specific search operators, keywords and criteria to evaluate the information regarding PDAs and air quality. Databases were selected from government institutions such as the National Library of Congress (BNC), the National Air Quality Information System (SINCA), the Ministry of the Environment (MMA) and the Register of Emissions and Transfer of Pollutants (RETC), among others.

With this information, a temporal analysis was performed, regarding the PDAs formulation which included the woodstove changeout program as a quantifiable measure, to compare the initial goals established in the PDAs with the current state-of-the-problem. Thus, the implementation of the PDAs and the woodstove changeout in the cities studied were used as a reference point to compare scenarios before and after the PDAs. In both cases, the PM concentrations were analysed, along with the number of days and hours over the national air quality standard and the number of critical PM concentration episodes. These measures served as the criteria for evaluation of the PDAs. The emission of PM by firewood combustion was evaluated in the same time period and the influence of the meteorological variables on PM were evaluated using a correlation analysis of variables and a linear trend analysis. Both were performed using Excel and R software packages, using the Openair package in R.

The results obtained allowed us to establish that the implementation of the primary air quality standard for PM<sub>2.5</sub> represents a significant point in the improvement of the monitoring and regulation of atmospheric pollution in the cities of southern Chile. As of 2012, 5 cities have been declared as PM<sub>10</sub> saturated zones and 6 as PM<sub>2.5</sub> saturated



zones. The latter includes 5 new PDAs being implemented (Libertador Bernardo O'Higgins Valley, Talca, Chillán and Chillán Viejo, Osorno and Coyhaique) and one updated PDA (Temuco and Padre Las Casas). As for the woodstove changeout program, cities with older PDAs showed the greatest improvement, such as Temuco with 42% in relation to the initial target but only 19% considering the new objective established in the updated PDA. However, the objectives established as part of the PDAs are generally low, with a few cities (Osorno, Valdivia and Coyhaique) aiming to replace up to 50% of their current woodstoves, and Coyhaique currently reaching 35% of the changeout.

PM emissions from wood consumption increased year by year, but it was not statistically significantly, therefore it was not possible to observe the effect of the control measures on them. The evaluation indices of the PDAs were affected in several cities by the low quality or lack of data. Therefore, it was impossible to correctly estimate the number of days exceeding the national standards. In cities where it was possible to evaluate them, the standards were exceeded in both scenarios without and with PDAs, except for Rengo, San Fernando Talcahuano, Coronel, Concepción, Chiguayante, Puerto Montt and Punta Arenas for PM10 and Coronel, Chiguayante and Punta Arenas for PM2.5. The number of days exceeding the national standard, and the number of critical PM10 concentration episodes decreased year-by-year for most of the cities studied, except for Chillán, Los Angeles, Valdivia, Osorno and Coyhaique. In the case of PM2.5 Rancagua, Curicó and Temuco showed a decrease of critical episodes year-by-year. However, all the cities where PM2.5 was monitored (except Rengo, San Fernando, Gran Concepción and Punta Arenas) showed more than 50 days above norm and more than 30 days of critical episodes.

Finally, a time trend analysis showed a decrease in in PM10 for 9 cities. While other cities such as Los Angeles, Chiguayante and Valdivia showed an increase but it was not statistically significant. For PM2.5, Chillán, Valdivia and Coyhaique showed a significant increase, while Rancagua, Curicó, Temuco, Osorno and Puerto Montt showed a significant decrease in the PM2.5 concentrations.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes Generales

#### 1.1.1. Impacto de la contaminación del aire en la salud de la población

Año a año en los medios de comunicación es posible encontrar titulares como: “Las 23 ciudades chilenas que aparecen dentro de las más contaminadas del mundo”<sup>1</sup>, “Chile líder en contaminación: informe de la OMS nombra a Coyhaique como la ciudad con más polución en el aire de Latinoamérica”<sup>2</sup>. En respuesta a esto, las autoridades han desarrollado e implementado Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) que incluyen medidas con el fin de proteger la salud de las personas ante la contaminación, medidas que, requieren del actuar de la población, ya sea restringiendo el uso de vehículos particulares como el consumo de determinados combustibles destinados a calefacción. Esto con el fin de disminuir las emisiones de material particulado y sus precursores, reduciendo así la concentración de este en la atmósfera.

El control de las emisiones y de la concentración ambiental de material particulado (MP) al que se exponen las personas, ya sea a corto o largo plazo, se realiza con el fin de disminuir el impacto en su salud. Diferentes estudios han mostrado como la exposición a altas concentraciones de PM, se asocian al incrementando en la morbilidad y mortalidad de la población, en especial en grupos más vulnerables (infantes, adultos mayores y enfermos crónicos) (Nel y col., 2001), relacionándose con inflamación, obstrucción y daño de las vías respiratorias como de los pulmones y enfermedades cardiovasculares (Celis y col., 2004). Estudios realizados en Chile, en las ciudades de Temuco y Santiago reafirman esta situación, en donde se ha asociado positivamente la concentración de MP10 y tres causas de mortalidad, respiratorias, cardiovascular total y cardiorrespiratoria (Díaz-Robles, 2014; Sanhueza 2006; Sanhueza y col., 2009).

---

<sup>1</sup>24horas.cl <https://goo.gl/wyUcWM>. Visitada 12 de diciembre 2016.

<sup>2</sup>El mostrador <https://goo.gl/7gVqFV>. Visitada 12 de diciembre 2016.

Los efectos negativos del material particulado en la salud de las personas son consecuencia de la inhalación e ingreso del MP por las vías respiratorias y su asimilación en el organismo, donde se han propuestos diversos mecanismos de acción donde destaca el estrés oxidativo generado en las células, donde se excede la capacidad antioxidante del organismo, el cual se inflama como respuesta protectora (Araujo 2011).

### **1.1.2. Material Particulado**

El MP se define como una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. A menudo el MP se divide en partículas  $MP_{2,5}$  (partículas de diámetro aerodinámico menor a  $2,5 \mu m$ ) y  $MP_{10}$  (partículas de diámetro aerodinámico menor a  $10 \mu m$ ), siendo esta última fracción denominada como respirable (Morales, 2006). Los efectos del MP se asocian a su composición química, la cual consiste en una mezcla compleja, compuesta por elementos inorgánicos (sulfatos, nitratos, amonio, cloruros y metales) como por carbono elemental y compuestos orgánicos (Grahame, 2010).

### **1.1.3. Legislación Ambiental**

A nivel mundial, el rápido crecimiento de la población, el aumento de actividades productivas, el crecimiento del parque automotriz entre otros, han generado durante las últimas décadas un aumento en las concentraciones de material particulado en la atmósfera. Este fenómeno se ve intensificado en los centros urbanos alrededor del mundo (Mage, 1996). Es así, que para proteger la salud de las personas que habitan estas ciudades, distintos países e instituciones han establecido regulaciones, herramientas legales, normas y medidas de control y mitigación de la contaminación atmosférica. Por ejemplo, los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) siendo para  $MP_{2,5}$   $10 \mu g m^{-3}$  media anual y  $25 \mu g m^{-3}$  media de 24 horas; mientras que para  $MP_{10}$ :  $20 \mu g m^{-3}$  media anual y  $50 \mu g m^{-3}$  media de 24 horas.

Chile, no es la excepción, considerando los estándares de la OMS a nivel nacional se observan altos niveles de MP en ciudades del país, por lo cual se ha creado una legislación e institucionalidad ambiental en orden de proteger la salud de las personas (CNE, 2008) destacando los decretos 12 (DS-N°12/MMA, 2011) y 59 (DS-N°59/SEGPRES, 1998) los cuales establecen la norma primaria de calidad de aire para  $MP_{2,5}$  y  $MP_{10}$  respectivamente, su transgresión lleva a la formulación de PDAs.

#### **1.1.4. Zonas saturadas por uso de leña**

Hoy en día en Chile, 10 millones de personas (60% de la población total) se encuentran viviendo expuestas a altas concentraciones de MP (MMA, 2011), de esta manera, la superación constante de estos decretos ha llevado a declarar como zonas latentes o saturadas por estos contaminantes a Temuco, Padre Las Casas, el Gran Concepción (Concepción, Chiguayante, Coronel y Talcahuano), Valle de la Sexta Región (Rancagua, Rengo y San Fernando), Coyhaique, Osorno, Valdivia, Chillán, Talca, Curicó y Los Ángeles (MMA, 2011).

Las ciudades mencionadas anteriormente tienen en común un consumo de leña notablemente más alto que el promedio nacional (30%). De modo que el uso de leña es de 99,3% en la Undécima Región (Coyhaique), 96,3% la Décima (Osorno y Puerto Montt), 94,6% la Catorceava (Valdivia), 91,2% la Novena Región (Temuco y Padre Las Casas), 73,7% la Octava Región (Chillán, Los Ángeles y Concepción), 64,1% la Séptima Región (Curicó y Talca), 57,8% Sexta Región (Rancagua, Rengo y San Fernando) y por último la Duodécima Región (Punta Arenas) presenta sólo un 13% (CNE, 2015).

Por su parte, el sector rural de las Regiones Novena y Décima, el 100% de la población usa la leña como combustible principal (Gómez Lobo y col 2006). La combustión domiciliaria de leña resulta ser en estas ciudades la principal fuente de MP, correspondiendo hasta al 53% de las emisiones en Concepción (Sanhueza y col., 2015). Es así, como en las ciudades presentadas, las principales fuentes que emiten PM corresponden a artefactos de combustión de leña, lo cual se asocia a episodios críticos de contaminación.

#### **1.1.5. Estrategia de Descontaminación Atmosférica**

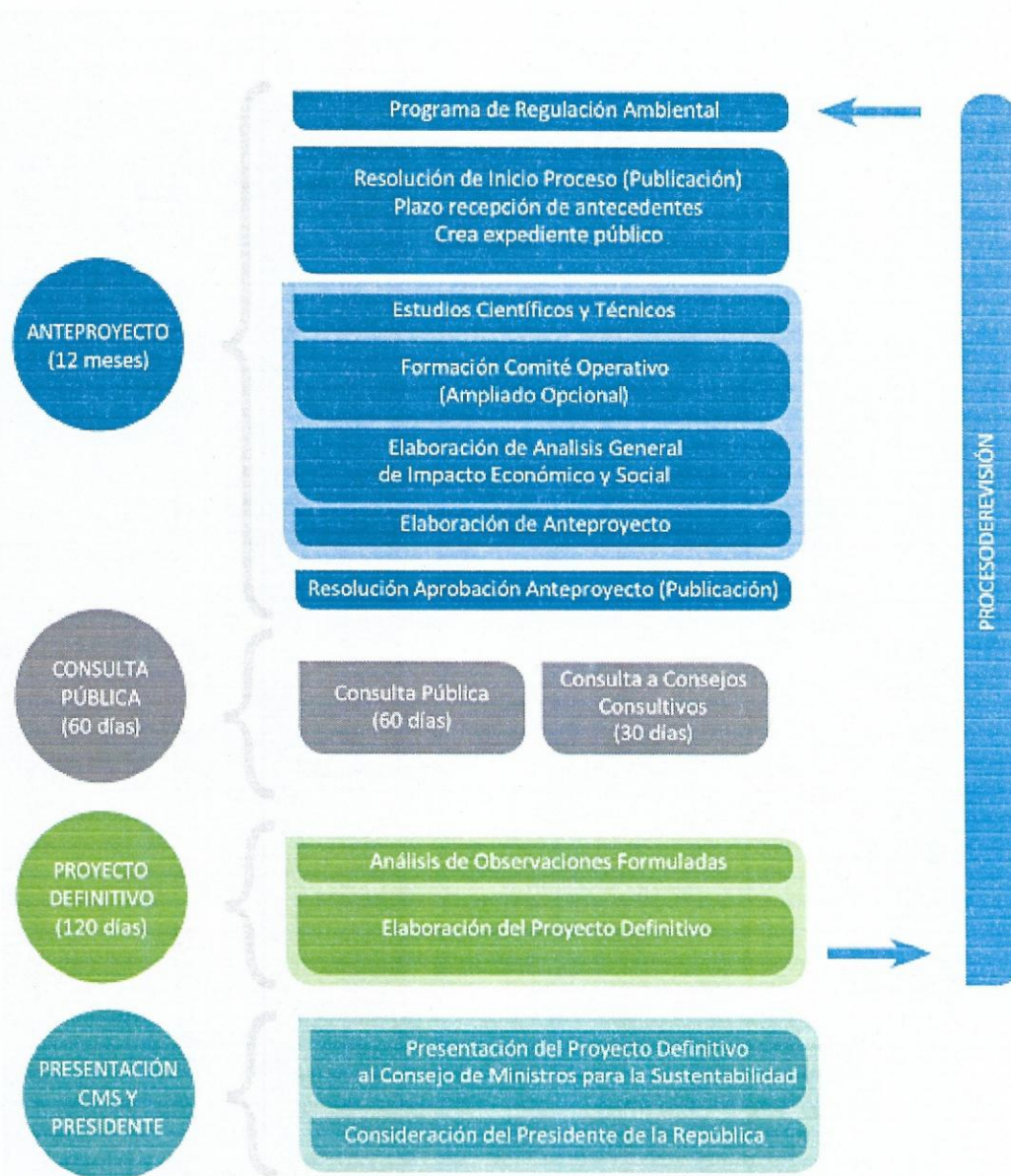
Actualmente el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) está desarrollando la Estrategia de Descontaminación Atmosférica en Chile 2014-2018. En ella, se busca afrontar esta problemática, declarándose nuevas zonas saturadas o latentes por MP y estableciéndose PDA para estas (MMA, 2014). Debido a que generar los PDAs tarda unos años, se busca implementar medidas a corto y largo plazo para aquellas localidades que aún no poseen un PDA con el fin de proteger a la población de los altos niveles a los que se exponen actualmente.

Hoy en día, 6 de los 14 PDAs vigentes para MP que son aplicados en Chile se concentran en la zona centro sur y sur del país y se busca a nivel nacional al año 2018 alcanzar 20 PDAs, abarcando más del 57% de la población y un 87% de la población expuesta a la contaminación (MMA, 2014).

#### **1.1.6. Descripción de la institucionalidad ambiental y planes de descontaminación**

La legislación ambiental atmosférica chilena inicia en 1961, con el Decreto N°144 del Ministerio de Salud, el cual establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza. Sin embargo, tardaron más de una década en establecerse nueva normativa conforme al tema. Con el desarrollo del país y con la adquisición de conocimiento, se formuló la Resolución N°1215 del Delegado del gobierno en el Servicio Nacional de Salud, el cual contenía referencias para la regulación de las partículas totales en suspensión, que sería derogada posteriormente por la publicación de la norma primaria de material particulado respirable MP<sub>10</sub> (D.S. N°59 1998, SEGPRES) seguida por la norma primaria de MP<sub>2,5</sub> (D.S. N°12 2012, MMA), lo cual implicó un gran avance frente a la legislación ambiental como a la protección de la salud de la población. Un estándar de calidad, persigue que los niveles de contaminante se encuentren bajo un umbral que considere la protección de la salud de las personas, de manera que se ha de establecer un método que permita regular las concentraciones de este, es aquí donde las estaciones de monitoreo toman un rol fundamental.

Aquellas zonas que registran valores que superan la norma, ya sea diaria por un año (percentil 98 anual) y anual por tres años consecutivos (promedio aritmético de 3 años), tienen a su población expuestas a un riesgo, por lo que, se declaran las zonas latentes y saturadas, dependiendo del grado de contaminación que presenten. A esto lo sigue la formulación de un PDA. En Chile, en 1995 se publica el primer reglamento que fija los procedimientos para generar PDA (D.S. N°94, SEGPES), el cual fue derogado el 2013 por el D.S. N°39, del MMA, donde se aprueba el reglamento para la dictación de PDA. Con la entrada en vigencia de los PDAs se busca reducir los niveles de contaminación y también disminuir los costos en salud y pérdidas de productividad asociados al deterioro de la salud de la población.



**Figura 1** Proceso Formulación planes de descontaminación.

Fuente MMA, 2014

La Figura 1, resume lo establecido en el DS N°39/2013 para la dictación del PDA mostrando los pasos seguidos para la creación de éste y los tiempos que tarda cada etapa, junto con el responsable y quienes participan del proceso. Los tiempos presentados no concuerdan con la realidad, ya que en la práctica la elaboración de un PDA tarda más, por lo que el control de la contaminación se ve retrasado.

### **1.1.7. Descripción de los PDA, contenido, principales medidas y ejes de trabajo.**

Los PDA presentan distintas medidas, algunas que buscan proteger directamente a la población de los altos niveles de contaminación como prohibir la actividad física al aire libre o incluso en interiores, como medidas también que buscan la reducción de la concentración en la atmosfera de MP, ya sea directa o indirectamente.

Con el fin de controlar la contaminación, la cual es causada principalmente por las emisiones por combustión de leña domiciliaria, debido a su alto consumo para calefacción y cocinar en las ciudades del sur de Chile y su uso inadecuado, ya sea por su alta humedad al utilizarla o a que los equipos son antiguos y poco eficientes.

Estos factores han llevado a las autoridades y mesas de trabajo en el sur del país a enfocar las políticas aplicadas en ejes estratégicos, generando así líneas de trabajo de corto, mediano y largo plazo con el fin de mejorar progresivamente con el avance de su aplicación (MMA 2015b). Así, los ejes de trabajo son:

- Edificaciones térmicamente más eficientes.
- Leña sustentable y de calidad.
- Uso de otros derivados de madera para calefacción.
- Tecnologías de calefacción más eficientes.
- Institucionalidad.
- Educación.

Estos ejes facilitan la resolución de los problemas específicos que generan la problemática en las que estas ciudades se encuentran hoy. Pero, tal como ocurre con la declaración de zonas saturadas e implementación de PDAs, el énfasis puesto en ellos es reciente, por lo que faltan años de trabajo para ver cambios contundentes, no sólo porque el tiempo que llevan implementándose es corto, sino que son muchas aristas involucradas (incluso fuera de las mencionadas) que influyen en las concentraciones de MP atmosférico. Esto se refleja en ciudades como Temuco que con 5 años de implementación aún se encuentra sobre norma diaria y anual y al menos 10 días de episodios críticos durante los meses de invierno.

Ahora, dentro de las normas en vigencia y medidas aplicadas destacan:

**Tabla 1** Medidas tomadas previa vigencia PDA en ciudades en estudio y nacional.

| <b>Instrumentos</b>     | <b>Eje</b>                                 | <b>Medida</b>   | <b>Año</b>     |
|-------------------------|--|---|----------------|
| Comando y control       | Calefactores                               | Norma de emisión artefactos que combustonan leña u otros combustibles de biomasa (DS N° 39/2011, MMA)   | 2012           |
|                         | Leña                                       | Normas técnicas de calidad y derivados de la leña (NCH 2907-2005 NCH 3246-2011)   | 2005, 2011     |
|                         | Vivienda                                   | Reglamentación sobre aislamiento térmica  | 2007           |
| Instrumentos económicos | Calefactores                               | Recambio de calefactores (piloto) en CP; TM y PL, CY; OS, CLL, VL   | 2010;2011;2012 |
|                         |  | Etiquetado de eficiencia y emisiones en calefactores  | 2013           |
|                         | Leña                                       | Fomento a PYMES para creación centros de acopio y secado de leña, entrega subsidio (mediante concurso SERCOTEC)   | 2011, 2012     |
|                         |  | Sistema voluntario de certificación de leña   | 2009           |
|                         | Vivienda                                   | Subsidios para mejoramiento térmico de las viviendas, Programa de Protección al Patrimonio Familiar. Permite reacondicionar térmicamente viviendas sociales | 2007           |
|                         | Educación y sensibilización a la población | Líneas del Fondo de Protección Ambiental para educación sobre problemas de contaminación por quema de leña  | 2013           |
| Acuerdos voluntarios    | Leña                                       | Acuerdo de Producción Limpia entre comerciantes de leña de los principales centros de consumo del sur de Chile.   | 2010           |

Modificada de (MMA 2013)



Dentro de todas las medidas aplicadas el recambio de calefactores como el reacondicionamiento de viviendas son considerados medidas cuantificables, es decir, es posible contabilizar la cantidad de beneficiarios y el avance que la medida ha tenido desde su aplicación con sólo contar, comparando la situación inicial con la actual. Sin embargo, no es posible encontrar la cantidad de viviendas subvencionadas que han sido reacondicionadas y, al solicitar la información de ambas medidas sólo se obtuvo respuesta por el recambio de calefactores, datos que son analizados en la sección de resultados del presente seminario.

#### **1.1.8. Emisiones**

Con la nueva institucionalidad ambiental, se estableció como herramienta de gestión el acceso a la información ambiental. Es así como surgen páginas web como la del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) donde es posible encontrar las emisiones de diversas fuentes, móviles, fijas, industriales o domiciliarias, para cada región del país de diversos contaminantes en el aire.

El Instituto Nacional de Estadística (INE) por medio de encuestas realizadas al sector industrial (público y privado) traspasa su información al RETC, el cual publica los resultados agrupados por actividad económica. Para las fuentes móviles, la Secretaría de Planificación y Transporte (SECTRA) desarrolló e implementó en 27 ciudades del país la Metodología para el Cálculo de Emisiones Vehiculares (MODEM), donde los resultados se incorporan en el RETC.

En cuanto a la validación de estos datos, el RECT toma como información oficial aquella entregada, ya que considera cada fuente emisora es competente en sus atribuciones, por lo que respeta los criterios técnicos aplicados por cada uno. Para las emisiones de fuentes residenciales por combustión de leña, los resultados obtenidos se basan en un cálculo realizado por el RECT, donde considera el nivel de actividad, el tipo de combustión, la composición del combustible (humedad, especie vegetal) y los equipos utilizados en la ciudad y su distribución. Así, se establecen valores correspondientes a factores de emisión a los equipos utilizados en estas ciudades para cocina y calefacción que utilizan leña. Sabiendo esto, junto a la proporción y número de equipos en la ciudad y el consumo de leña determinado por informes demográficos y socioeconómicos, se estiman las emisiones residenciales por MP.

La causa principal de la contaminación se da en torno del uso de leña, por su uso indebido, asociado al alto porcentaje de humedad que posee esta al momento de combustionar. Son variados los factores que determinan la composición de la leña, definido en su proceso productivo completo, desde su extracción hasta su venta o comercio, lo cual no mejora al momento de encontrarse en manos de los usuarios, ya que no es siempre almacenado de manera adecuada o es usada en equipos eficientes.

Estos factores determinan la cantidad de emisiones de material particulado en ambas fracciones por quema de este combustible, las cuales afectan la concentración final del contaminante en la atmósfera.

### **1.1.9. Planteamiento del problema**

El año 2005, corresponde al año en el cual se declaró la primera zona saturada por MP para una ciudad en el sur del país (Temuco), donde, su PDA entro en vigencia el año 2009 y con ello se inició la implementación de medidas en las demás ciudades del sur del país, asociadas principalmente a consumo de leña. Resulta complejo evaluar la efectividad de estas medidas, es decir, las medidas son las correspondientes al problema y con ellas se está obteniendo el resultado esperado. Esto por las diversas variables que influyen como la disponibilidad de datos que permiten establecer el progreso o retroceso año a año.

Pese a la generación de PDA's y medidas hay opiniones críticas a las políticas empleadas "...Deberían ser mucho más agresivos, van a pasar algunos años para seguir trabajando..."<sup>3</sup> son declaraciones dadas por el alcalde de Temuco, Miguel Becker, a Radio Digital FM durante el mes de junio de 2016, con respecto a las medidas tomadas frente a la contaminación y los episodios críticos consecutivos para material particulado ocurridos en esta ciudad, declaraciones que dejan en evidencia la necesidad de la aplicación de PDA's más exigentes, que permitan obtener resultados efectivos en un plazo menor. De esta manera, las medidas de mejora de calidad del aire han sido criticadas tanto por las autoridades locales como por la comunidad, ya que no mostrarían los efectos esperados en las ciudades donde han sido aplicadas (MMA, 2014), por lo que se busca establecer cuáles son los progresos que se han dado en la calidad de aire de estas ciudades.

---

<sup>3</sup>Lignum.cl <https://goo.gl/UzT3l6>. Visitada 15 Agosto 2016.

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar la efectividad de los PDAs y de las medidas para reducir la contaminación aplicadas desde el año 2005 a la actualidad, aplicadas por el MMA y gobiernos locales en ciudades del sur de Chile declaradas como zonas saturadas (Rancagua, Rengo, San Fernando, Curicó, Talca, Chillán y Chillán Viejo, Gran Concepción, Coronel, Los Ángeles, Temuco y Padre Las Casas, Valdivia, Osorno, Coyhaique).

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar el acceso, disponibilidad y validez de información respecto de los programas de descontaminación de las ciudades del centro sur del país, en el marco de la institucionalidad medio ambiental.
- Definir, caracterizar y evaluar las medidas de control y prevención de la contaminación por material particulado en las ciudades del centro-sur del país.
- Caracterizar la calidad del aire (a partir de las concentraciones de MP) y cumplimiento de normas de calidad del aire nacionales para material particulado en ciudades del centro-sur del país desde el año 2005 al 2016.
- Analizar el efecto de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento) en la calidad del aire por MP en ciudades en estudio.
- Evaluar mediante una visión crítica la efectividad de los PDAs en las ciudades del centro-sur de Chile, definiendo índices que relacionan los niveles de MP con la aplicación de medidas para el control de la contaminación por material particulado.

## II. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos propuestos y evaluar las herramientas de gestión aplicadas en cada uno de las ciudades se propusieron y siguieron los siguientes pasos metodológicos.

### 2.1. Descripción del área de estudio

El Centro-Sur de Chile abarca desde la Región del Libertador Bernardo O'Higgins hasta la Región de Magallanes. El análisis se realiza considerando las ciudades que al menos cumplan con una de las siguientes condiciones: i) cuenten con al menos una estación de monitores de calidad de aire que registre horariamente las concentraciones de MP (una o ambas fracciones), ii) registre episodios de contaminación y/o iii) cuente con un PDA por MP vigente o en elaboración. Teniendo éstas condiciones en consideración en la Figura 2 se muestran las ciudades que serán incluidas en el estudio. Estas son 18 ciudades que consideran en conjunto 25 estaciones de monitoreo de calidad del aire. En la Tabla 2 se muestran algunas características de estas estaciones tales como ubicación, superficie, estaciones de monitoreo, clima, viviendas y población.

Las ciudades consideradas son:

- Región del Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua, Rengo, San Fernando.
- Región del Maule: Curicó, Talca
- Región del Biobío: Chillán y Chillán Viejo, Gran Concepción, Coronel, Los Ángeles,
- Región de la Araucanía: Temuco y Padre Las Casas,
- Región de los Ríos: Valdivia,
- Región de los Lagos: Osorno, Puerto Montt
- Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo: Coyhaique
- Región de Magallanes y la Antártica Chilena: Punta Arenas

**Tabla 2** Caracterización y localización de las ciudades y estaciones en estudio.

| Región   | Ciudad          | ID  | Ubicación (Lat; Lon)            | Altitud (m.s.n.m.) | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Estaciones                         | Relieve                                     | Clima   | Población 2002 | Viviendas 2002 |
|--|-----------------|-----|---------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|---|---|----------------|----------------|
| Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins | Rancagua        | RG  | 34° 10' 00" S;<br>70° 45' 00" W | 572                | 50,36                         | Rancagua I y II                    | Depresión intermedia                        | Templado cálido con lluvias invernales                                  | 206.971        | 58.722         |
|  | Rengo           | RN  | 34° 25' 00" S;<br>70° 52' 00" W | 570                | 9,28                          | Rengo                              |   |   | 30.891         | 9.143          |
|  | San Fernando    | SF  | 34° 35' 00" S;<br>70° 59' 00" W | 340                | 12,37                         | San Fernando                       |   |   | 49.519         | 15.218         |
| Región del Maule                               | Curicó          | CU  | 34° 59' 00" S;<br>71° 14' 00" W | 228                | 20,5                          | Curicó                             | Depresión intermedia                        | Templado cálido con lluvias invernales                                  | 93.447         | 27.417         |
|  | Talca           | TL  | 35° 26' 00" S;<br>71° 40' 00" W | 102                | 46,04                         | U.C. Maule, La Florida, U. Talca   |   |   | 189.505        | 56.792         |
| Región del Biobío                              | Chillán         | CLL | 36° 36' 00" S;<br>72° 07' 00" W | 124                | 41,03                         | INIA Chillán, Purén                | Depresión intermedia                        | Templado cálido con lluvias invernales                                  | 146.701        | 42.210         |
|  | Los Ángeles     | LA  | 37° 28' 00" S;<br>72° 21' 00" W | 140                | 27,35                         | Cesfam Los Ángeles, 21 de Mayo     |   |   | 117.972        | 31.839         |
|  | Concepción      | CP  | 36° 49' 41" S;<br>73° 03' 05" W | 15                 | 55,95                         | Kingston College                   | Farellón costero y/o planicie fluvio marina | Templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica       | 212.003        | 60.181         |
|  | Chiguayante     | CG  | 36° 55' 00" S;<br>73° 1' 00" W  | 30                 | 33,97                         | Punteras                           |   |   | 81.238         | 22.228         |
|  | Coronel         | CR  | 37° 01' 00" S;<br>73° 13' 00" W | 20                 | 24,52                         | Cerro Merquín                      |   |   | 91.469         | 25.276         |
|  | Talcahuano      | TH  | 36° 43' 00" S;<br>73° 7' 00" W  | 15                 | 50,65                         | Estación Consultorio – San Vicente |   |   | 161.692        | 41.709         |
| Región de La Araucanía                         | Temuco          | TM  | 38° 45' 00" S;<br>72° 40' 00" W | 112                | 61,73                         | Museo Ferroviario, Las Encinas     | Depresión intermedia                        | Templado frío lluvioso con influencia mediterránea                      | 227.086        | 61.738         |
|  | Padre Las Casas | PL  | 38° 46' 00" S;<br>72° 36' 00" W | 116                | 7,13                          | Padre Las Casa                     |   |   | 33.697         | 9.344          |
| Región de Los Ríos                             | Valdivia        | VL  | 39° 48' 50" S;<br>73° 14' 45" W | 9                  | 42,39                         | Valdivia                           | Depresión intermedia                        | Templado frío lluvioso con influencia mediterránea                      | 127.750        | 35.217         |
| Región de Los Lagos                            | Osorno          | OS  | 40° 34' 21" S;<br>73° 08' 07" W | 35                 | 31,82                         | Osorno                             | Depresión intermedia                        | Templado frío lluvioso con influencia mediterránea                      | 132.245        | 37.641         |
|  | Pto. Montt      | PM  | 41° 28' 00" S;<br>72° 56' 00" W | 27                 | 39,58                         | Mirasol                            |   | Templado cálido con lluvias invernales                                  | 153.118        | 40.955         |
| Región Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo | Coyhaique       | CY  | 45° 34' 00" S;<br>72° 04' 00" W | 302                | 18,27                         | Coyhaique I y II                   | Depresión intermedia                        | Tundra por efecto de la altura Templado frío lluvioso sin estación seca | 44.850         | 13.234         |
| Región de Magallanes y de la Antártica Chilena | Punta Arenas    | PA  | 53° 10' 00" S;<br>70° 56' 00" W | 25                 | 39,03                         | Punta Arenas                       | Planicie de la estepa fría magallánica      | Templado frío lluvioso sin estación seca                                | 116.005        | 57.845         |

Fuente: Elaboración Propia.

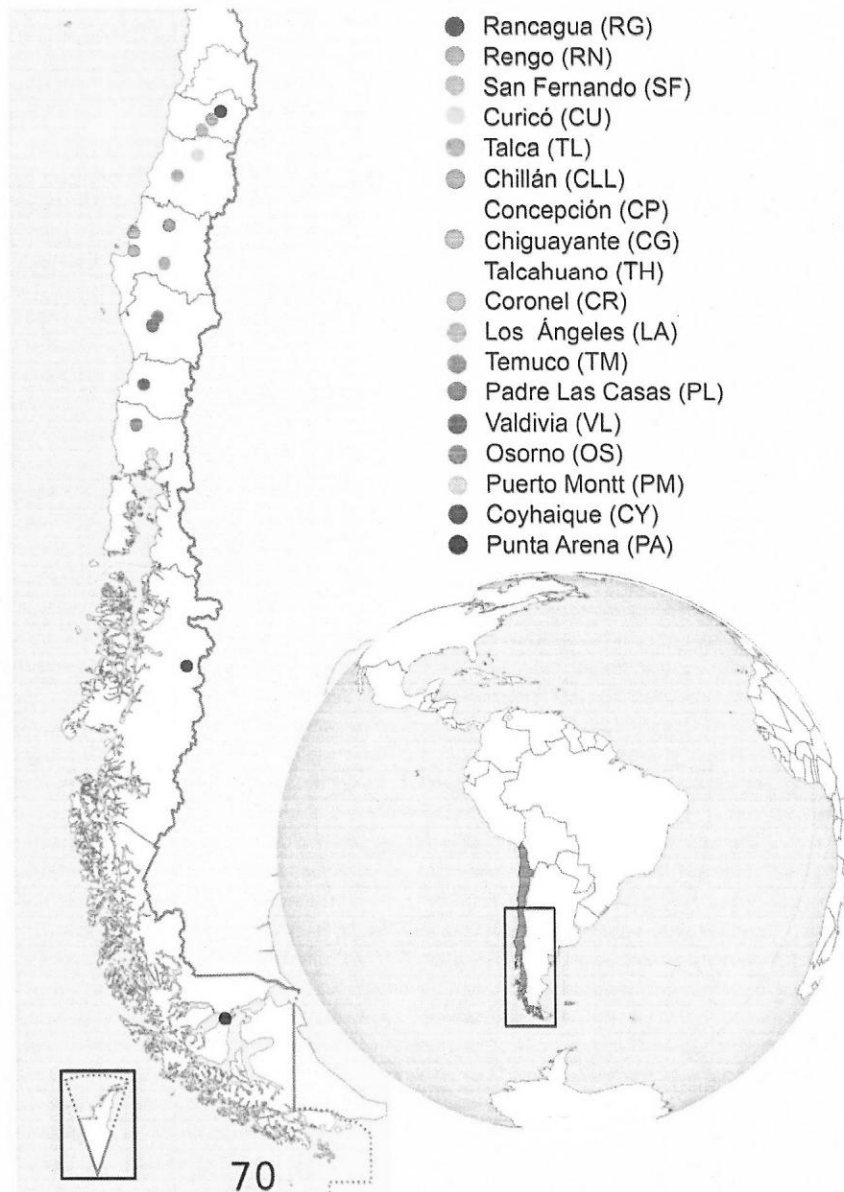


Figura 2 Localización geográfica de ciudades en estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## **2.2. Obtención y análisis de información: Programas de descontaminación de las ciudades del centro sur del país, en el marco de la institucionalidad medio ambiental.**

Con el fin de recopilar la información necesaria se realizó una búsqueda en los recursos públicos disponibles, principalmente páginas web, pertenecientes al gobierno, dentro de las cuales destacan:

- Biblioteca Nacional del Congreso ([www.bcn.cl](http://www.bcn.cl))
- Ministerio del Medio Ambiente y sitios asociados ([www.mma.gob.cl](http://www.mma.gob.cl))
- Municipalidades de ciudades en estudio ("nombreciudad".cl)
- Repositorio Académico Universidad de Chile ([www.repositorio.uchile.cl](http://www.repositorio.uchile.cl))
- Tesis electrónicas universidades chilena ([www.tesischilenas.cl](http://www.tesischilenas.cl))

Para realizar la búsqueda en los sitios web mencionados, se emplearon diversas estrategias que consistieron en: uso de palabras claves, uso de operadores Booleanos (and, or, not) y uso de operadores de proximidad, truncación y calificadores (+,-,\*, etc).

Luego de realizada la búsqueda, se procedió a revisar cada documento e información contenida en ellos, se evaluó su utilidad para los propósitos del estudio. Además de evaluar los siguientes criterios: Autoría, quién es el autor o qué organismo provee la información, si existe un medio de contacto; Características de la información, citas, exactitud, discrepancias, completitud; Características del sitio que sustenta la información, se encuentra actualizado y Público al que va dirigida la información.

Conforme la búsqueda en relación al tema, se consideró para cada documento: Información acotada a los años y ciudades consideradas en el estudio; Material particulado respirable  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  e información relacionada a declaración de zonas saturadas, elaboración de planes de descontaminación, planes en vigencia y medidas aplicadas.

A modo de ejemplo se tienen los PDAs, tesis que estudian el consumo y mercado de leña o herramientas legales aplicadas para control, seminarios o presentaciones de MMA, presentando análisis de los PDA o calidad de aire.

### **2.3. Evaluación y caracterización de la efectividad de las medidas de control de la contaminación por MP en las ciudades en estudio**

Las medidas de control de la contaminación por MP en los PDA son principalmente las siguientes: recambio y modernización de calefactores y control de emisiones de otras fuentes emisoras de MP. A continuación, se realiza una breve descripción de cada una de ellas y como serán abordadas en el presente estudio.

#### **2.3.1. Recambio de calefactores**

Los calefactores a leña como las principales fuentes emisoras de MP, son importantes en términos de reducción de las emisiones de MP, puesto que emiten miles de toneladas de MP al año a la atmosfera, directamente en sectores habitados. De allí que mejorar la tecnología y eficiencia de la combustión de la leña para calefacción y cocina puede significar en importantes mejoras en la calidad de aire.

La autoridad ha considerado realizar recambios de calefactores como una medida para reducir la contaminación por MP. El recambio de calefactores corresponde a una medida cuantificable (en términos del número de calefactores reemplazados), que ha sido aplicada en diferentes ciudades con o sin PDA. Este programa consiste en la subvención de un equipo calefactor por parte del gobierno para la población de las ciudades afectadas, el cual busca renovar los artefactos que utilizan leña por otros nuevos más eficientes, con un factor de emisión más bajo y mayor potencia.

Para evaluar esta medida se procedió a realizar una búsqueda sistemática de información. Esto permitió recolectar información referente a la cantidad de calefactores recambiados y nóminas de seleccionados para la subvención por región y/o ciudad.

Se revisaron los avances en este campo, comparando el parque de calefactores actual, con las metas propuestas por los PDAs.



### **2.3.2. Inventario de emisiones.**

Los inventarios de emisiones de MP, describen y definen la procedencia y cantidades de MP en un periodo de tiempo en un lugar. Permiten establecer responsables de emisión de PM y por ende focalizar los esfuerzos para reducir las emisiones de las fuentes más importantes.

Se utilizaron datos del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), el cual estima los valores de emisión por combustión de leña domiciliaria, a partir de los factores de emisión para las fuentes locales, en función del nivel de actividad, el tipo de combustión, la composición del combustible (humedad) y los equipos utilizados en la ciudad, su distribución y con ello el nivel de consumo de leña obtenido de la encuesta CASEN y proyecciones del INE extrapolados para los años de interés con el fin de definir la población año a año (MMA 2015a).

## **2.4. Calidad de aire, cumplimiento de normas primarias de calidad de aire para material particulado en ciudades del centro-sur del país**

### **2.4.1. Obtención de datos**

Los datos de las concentraciones de MP y variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) son obtenidos de la página web del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), del Ministerio de Medio Ambiente. Se seleccionaron aquellas estaciones de carácter público, ubicadas en zonas urbanas, que corresponden a estaciones de monitoreo con representatividad poblacional (EMRP), es decir evalúan la exposición de la población frente a estos contaminantes.

Es así como se estudiaron un total de 25 estaciones de monitoreo, ubicadas en 18 ciudades del sur de Chile. donde dos ciudades cuentan con tres estaciones de monitoreo (Talca y Temuco-Padre las Casas); cuatro ciudades cuentan con dos estaciones de monitoreo (Rancagua, Chillan y Chillan Viejo, Los Ángeles y Coyhaique) y las nueve ciudades restantes sólo cuentan con una estación de monitoreo en el área urbana (Tabla 2). Los datos extraídos incluyen desde enero de 2005, cuando es posible o cuando inician las mediciones para cada estación hasta julio del 2016.

### 2.4.2. Validación de datos

Estos datos, han sido validados, con el fin de retirar aquellos datos erróneos, que puedan alterar los resultados reales de cada ciudad, generando una evaluación equivocada.

Los criterios de validación son:

#### **Material Particulado:**

- La proporción  $PM_{2,5}/PM_{10}$  no debe ser mayor a uno.
- No debe haber valores negativos.
- Valores discontinuos o incoherentes.

#### **Variables Meteorológicas:**

- Valores negativos para humedad y vientos.
- Valores mayores a 100 para humedad relativa.
- Valores mayores a 360 para dirección del viento.
- Valores discontinuos o incoherentes (extremos).

Luego de validar los datos de la red SINCA, fue necesario calcular y luego determinar el porcentaje de datos disponible con el fin de establecer la validez de la normativa. Esto se realiza para asegurar que los datos recopilados de la red SINCA son representativos de lo que ocurre en la zona en estudio. De manera que para que la evaluación posterior sea válida se requiere que:

- Los promedios móviles de 24 horas han de ser calculados con al menos 18 horas de mediciones.
- Los promedios anuales deben ser calculados con el 75% de los datos horarios de un año y con más de 8 meses de datos válidos.
- Promedio tri- anuales calculado con 3 años válidos.

### **2.4.3. Análisis estadístico y variabilidad temporal**

Los datos recopilados se ordenaron en una planilla de cálculo de Excel 2016 a partir del cual se realizó un análisis estadístico descriptivo. Se generaron gráficos que evidencian la variación temporal del MP u otros comportamientos, empleando el programa R, con el paquete de herramientas de código abierto OpenAir (Carslaw y Ropkins, 2012), que contiene funciones específicas de análisis de calidad de aire.

### **2.4.4. Evaluación normativa e índices de evaluación del PDA**

Así, se utilizaron los siguientes criterios para determinar, si las normas primarias de MP se encuentran superadas o sobrepasadas:

- 1) Norma diaria ( $MP_{10}$ :  $150 \mu\text{gm}^{-3}$  y  $MP_{2,5}$   $50 \mu\text{gm}^{-3}$ ): Percentil 98 de los máximos diarios del promedio móvil de 24 horas de un año calendario sobre valores establecidos por la norma.
- 2) Norma anual ( $MP_{10}$ :  $50 \mu\text{gm}^{-3}$  y  $MP_{2,5}$ :  $20 \mu\text{gm}^{-3}$ ): Promedio aritmético de tres años calendario por sobre la norma.

En cuanto a los índices de evaluación del PDA se definen:

- 1) Horas sobre norma: Promedio de 24 horas de las concentraciones horarias de MP sobre norma diaria.
- 2) Días sobre norma: Día que registre al menos una hora sobre norma.
- 3) Promedio aritmético anual sobre norma anual
- 4) Episodios críticos: La normativa nacional establece las siguientes categorías de calidad de aire, a partir de las cuales se definen y calculan los episodios críticos, viendo si el promedio móvil de 24 horas de las concentraciones horarias de MP está en alguno de estos intervalos (Tabla 3).

**Tabla 3** Categorías de calidad de aire.

| Calidad del Aire | PM <sub>10</sub> (µgm <sup>-3</sup> ) | PM <sub>2,5</sub> (µgm <sup>-3</sup> ) |
|------------------|---------------------------------------|--|
| Bueno            | 0-149                                 | 0-50                                   |
| Regular          | 150-194                               | 51-79                                  |
| Alerta           | 195-239                               | 80-109                                 |
| Preemergencia    | 240-329                               | 110-169                                |
| Emergencia       | 330 o superior                        | 170 o superior                         |

Construido a partir de DS N°12, MMA y DS N°59, SEGPRES.

#### **2.4.5. Análisis de la relación entre contaminación por MP y variables meteorológicas**

Las condiciones meteorológicas resultan ser un factor influyente en la contaminación local. Para cada ciudad, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, para la totalidad de datos medidos, para establecer el efecto que tiene cada variable sobre el MP.

También, se calcularon las tendencias para estas tres variables meteorológicas, con el fin de establecer la variación que ha tenido año a año. Para ello se utilizó el programa R, gracias al paquete de Openair y su función TheilSen,

La función TheilSen es un estimador de tendencia lineal, que calcula la pendiente entre pares de datos, obteniendo la media de estas para generar una recta de regresión lineal, correspondiente a la estimación de TheilSen in (Toro A. y col, 2014). El valor de pendiente entregado corresponde a la tendencia de la variable meteorológica en el periodo estudiado. Este análisis, es una buena medida para evaluar el cambio temporal de las variables en el tiempo, ya que no considera los outliers y entrega un valor p (de 0,1 a 0,0001) e intervalos de confianza al 95%, que le dan al resultado obtenido certeza estadística. Además posee la opción deseason, con la cual se elimina la estacionalidad de los datos.



## **2.5. Evaluación planes de descontaminación en las ciudades del centro-sur de Chile.**

Este estudio, resulta complejo debido a la amplia gama de variables que pueden influir en la concentración del MP, volviéndose difícil distinguir el efecto positivo o negativo individual de cada una, de manera que inicialmente se realizó el análisis de tendencia TheilSen (al igual que variables meteorológicas), comparando las concentraciones de las series de tiempo en antes y después de la aplicación de medidas del PDA, lo cual también permite establecer proyecciones de los años venideros.

Ya que los PDA se proyectan a 10 años de aplicación resulta importante analizar los avances y retrocesos que se tienen desde la declaración de la zona saturada. El año en el que se superan las normas, gatillando la declaración de la zona saturada corresponde al año de referencia para la elaboración del PDA, siendo el inicio de la toma de acciones para la reducción de la contaminación en estas ciudades.

Considerando que las medidas son aplicadas conforme a los valores normados, con el fin de proteger a las personas, la meta de los PDAs es alcanzar un valor bajo el establecido en la legislación, por lo que se calculó la diferencia porcentual de lo registrado año a año (P98 y promedio tri-anual) con respecto a los valores normados y de referencia para la formulación del PDA, definiéndose con posterioridad como año de ref.. Esto también fue representado gráficamente, donde es posible por medio de la concentración notar si hay o no mejoras en los niveles de calidad de aire y si hay o no superación de la norma.

### III. RESULTADOS

Con la finalidad de comprender de mejor manera el desarrollo de la formulación y aplicación de los PDAs y la influencia que estos han tenido en la contaminación atmosférica de estas ciudades, se analizarán los resultados por tópicos, desde una escala general comparativa hasta el análisis individual de cada ciudad.

#### 3.1. Planes de Descontaminación

A lo largo del tiempo se pueden considerar diferentes hitos en el desarrollo de los PDAs en lo que respecta al  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En la Figura 3 y 4 se muestran aquellos sucesos que llevaron al desarrollo de los PDA de cada ciudad y fracción de MP.

Para  $PM_{10}$ , es posible observar en la Figura 3 que las primeras medidas se toman en el año 2005, con el decreto N°35 que decreta como zona saturada a Temuco. De las 18 ciudades en estudio, 14 han sido declaradas como zonas saturadas y 9 cuentan con un PDA. En la Figura 4, de forma similar se presentan los hitos para el desarrollo de PDAs para  $PM_{2.5}$ . En este caso, esta línea inicia el 2012, con la promulgación de la norma primaria de  $PM_{2.5}$ . 10 de las 18 ciudades han sido declaradas zonas saturadas, pero sólo 2 poseen un PDA, para a partículas finas.

En las figuras de ambas fracciones (Figuras 3 y 4) es posible observar que, durante los últimos años, la fundación del Ministerio de Medio Ambiente el 2010 y principalmente la entrada en vigencia de la norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable  $MP_{2.5}$  en el 2012, se genera un aumento en la regulación, declarándose más zonas saturadas, ya no solo por  $MP_{10}$ , sino que también por  $PM_{2.5}$ , el cual en los PDAs ya elaborados o en proceso de elaboración no lo contemplan. Las ciudades en las que el PDA es gestionado con mayor rapidez son Coyhaique para  $MP_{10}$  y Temuco para  $MP_{2.5}$  (3 años aproximadamente), cabe destacar que Temuco realizaba la actualización de su PDA, por lo que se incluyó en la mesa de trabajo la gestión de esta fracción, de manera que se realizó con mayor rapidez ya que las medidas a aplicar son prácticamente las mismas, pero con mayor exigencia. Destaca que ciudades más al sur como Chillán, Temuco y Osorno son las que actualmente cuenta con PDA para  $MP_{2.5}$  vigente, siendo las que se asocian a un mayor consumo y emisión de leña y en consecuencia  $MP_{2.5}$ .

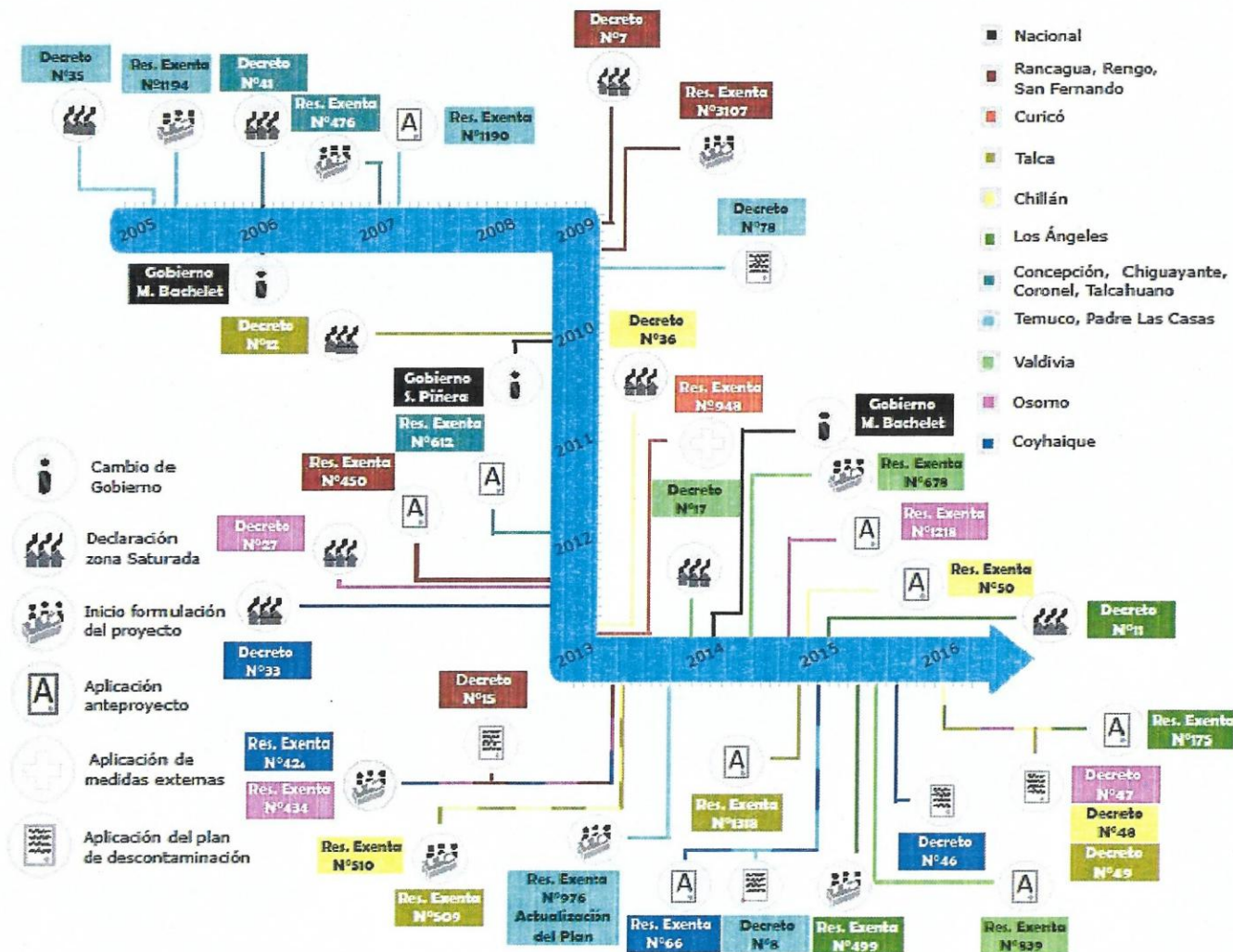
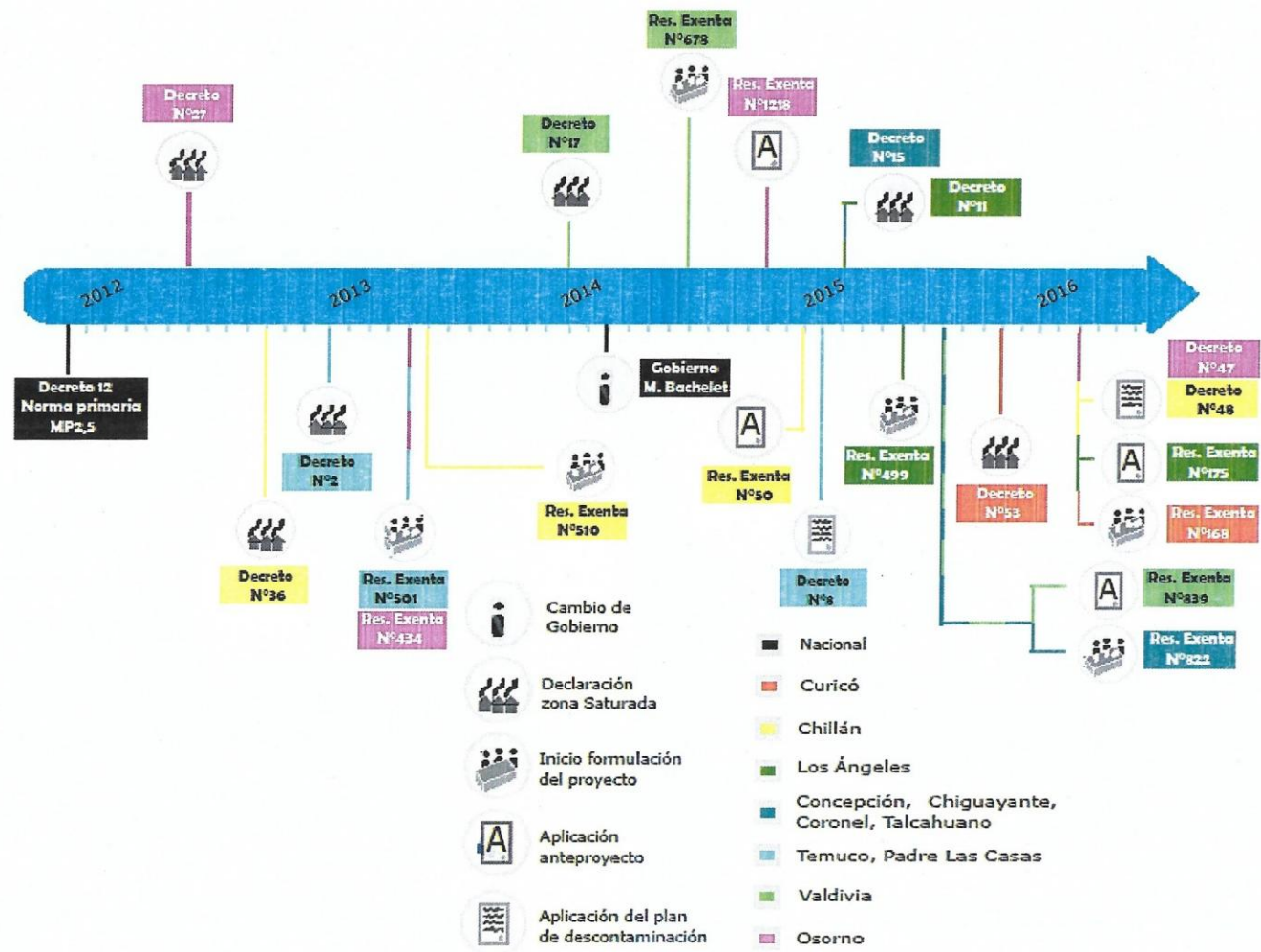


Figura 3 Línea de tiempo, formulación planes de descontaminación y medidas por MP<sub>10</sub> para ciudades y años en estudio. Fuente elaboración propia a partir de datos BNC.



**Figura 4** Línea de tiempo, formulación planes de descontaminación y medidas por MP<sub>2,5</sub> para ciudades y años en estudio. Fuente elaboración propia a partir de datos BNC.



Entre de las ciudades analizadas, Concepción, Chiguayante, Coronel y Talcahuano, fueron declaradas como zonas saturadas durante el año 2006 por MP<sub>10</sub>, presentándose el anteproyecto del PDA a finales del 2011, pero desde esa fecha se detuvo el proceso, esto debido a que luego de la entrada en vigencia de la norma primaria de MP<sub>2,5</sub> las autoridades locales decidieron reformular el PDA considerando ambas fracciones en él, a pesar de esto fue durante el 2015 cuando se declaró como zona saturada por material particulado fino, tres años luego de la implementación de la norma de MP<sub>2,5</sub> (superación de norma por tres años consecutivos) y diez años desde la declaración como zona saturada por MP<sub>10</sub>, esto quiere decir que por 10 años la población de estas ciudades se ha visto expuesta a altos niveles de contaminación, donde las medidas han sido escasas e inefectivas. Lo mismo se da en Rancagua, donde se espera a la actualización del PDA como en Temuco para incluir la gestión y control del MP<sub>2,5</sub>, a pesar de saber que la norma está saturada.

### 3.2. Cuantificación Recambio de calefactores

La aplicación del recambio de calefactores, es una medida dirigida directamente a la emisión de MP, lo cual implicaría una baja significativa en la concentración de material particulado en la atmósfera.

En la Tabla 4 se presenta el número de calefactores cambiado para aquellas ciudades en las que se ha aplicado, ya sea como parte del PDA o como una medida previa. Estos datos pueden no representar realmente el total de los calefactores renovados, ya que se realizó con informes que no incluían todos los años y nóminas de seleccionados, por lo que poseen una incerteza asociada.

**Tabla 4** Número de calefactores cambiados en las ciudades estudiadas.

| Año          | Valle LBO    | CU         | TL         | CLL        | Gran CP      | TM y PL      | VL         | OS         | CY           |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
| 2010         | -            | -          | -          | -          | 1.000        | -            | -          | -          | -            |
| 2011         | -            | -          | -          | -          | -            | -            | -          | -          | 300          |
| 2012         | -            | 547        | -          | 500        | -            | 519          | 500        | 500        | 1.700        |
| 2013         | 504          | -          | -          | -          | -            | 1.026        | -          | -          | 1.447        |
| 2014         | -            | -          | -          | -          | -            | 1.459        | -          | -          | -            |
| 2015         | 744          | -          | 356        | -          | -            | 574          | -          | -          | -            |
| 2016         | 180          | -          | 350        | -          | -            | 1.459        | -          | 2000*      | -            |
| <b>Total</b> | <b>1.428</b> | <b>547</b> | <b>706</b> | <b>500</b> | <b>1.000</b> | <b>5.037</b> | <b>500</b> | <b>500</b> | <b>3.447</b> |

-Sin datos. \*Estimado a recambiar ese año.

Elaboración propia de datos de (MMA 2013), solicitudes por Ley de Transparencia y nóminas MMA.

La información presentada en la Tabla 4, fue solicitada a los gobiernos locales, por medio de la ley de transparencia desde la página web del MMA, donde se obtuvo la información de las Regiones Libertador Bernardo O'Higgins, Maule y Araucanía, para aquellas ciudades que contaban un PDA vigente previos al 2016 (Rancagua, Rengo, San Fernando, Talca, Temuco y Padre Las Casas), es decir, aunque en Curicó es una ciudad declarada como saturada y se haya aplicado un plan piloto y las bases para la postulación al recambio estén desde el año 2012, por no poseer aún un PDA vigente no se obtuvo un registro de calefactores cambiados.

La Tabla 5 muestra en resumen la realidad del parque de calefactores, con las proyecciones de los PDA en relación porcentual a los resultados de la Tabla 4. Gracias a estos valores es posible comparar la realidad actual con las proyecciones esperadas en los PDA.

**Tabla 5** Número de parque y meta equipos a leña, % de recambio calefactores.

| PDA       | Parque actual | Meta de PDA | Recambiado | % A recambiar | % Recambiado | % Por recambiar |
|-----------|---------------|-------------|------------|---------------|--------------|-----------------|
| Valle LBO | 130.000       | 12.000      | 1.428      | 9,2           | 12           | 88              |
| TL        | 35.114        | 13.000      | 706        | 37            | 5,4          | 95              |
| CLL       | 49.176        | 10.000      | 500        | 20            | 5,0          | 95              |
| TM y PL   | 74.440        | 12.000      | 5.037      | 16            | <b>42</b>    | 58              |
| *         |               | 27.000      | 5.037      | 36            | <b>19</b>    | 81              |
| VL        | 44.125        | 26.000      | 500        | 59            | 1,9          | 98              |
| OS        | 49.756        | 25.000      | 500        | 50,           | 2,0          | 98              |
| CY        | 23.000        | 10.000      | 3.447      | 44            | <b>35</b>    | 66              |

\*Actualización PDA Temuco y Padre Las Casas. Fuente: Elaboración propia, de datos Tabla 4.

Los PDA buscan alcanzar su meta a los 10 años desde su entrada en vigencia, por lo que Temuco, que se encuentra en su sexto año de aplicación de PDA, es el que presenta el mayor porcentaje de recambio, estando realmente cerca de la meta a alcanzar. Sin embargo, durante la actualización del PDA al quinto año de aplicación se estipuló una nueva cifra como meta, siendo más del doble que la cifra inicial, volviéndose complejo alcanzar para la siguiente mitad de tiempo propuesto la nueva meta establecida. A parte de Temuco, el Valle de LBO es el segundo PDA más antiguo en estudio y presenta sólo un 12% recambiado en relación a la meta, faltando aún 88% por recambiar.

Coyhaique es la segunda ciudad que presenta un mayor recambio alcanzando un 35%, siendo una de las ciudades con recambio previa a la vigencia del PDA siendo incluso más alto que ciudades como Talca o Chillán donde el PDA entró en vigencia el mismo año. Ciudades con PDAs más nuevos o recientes como Valdivia (en construcción) u Osorno, son más enfáticos, pretendiendo alcanzar más de un 50% de recambio del parque actual luego de 10 años de PDA, se debe considerar que iniciaron su recambio de calefactores un par de años antes a la entrada en vigencia del PDA, por lo que esta tarea está adelantada en cierto modo. Considerando que el recambio máximo que se aspira a alcanzar es un 50% y el máximo alcanzado es del 35%, por lo que se espera que los efectos en la calidad de aire sean bajos.

### **3.3. Emisiones**

Los resultados correspondientes a las emisiones estimadas por ciudad a partir de los datos disponibles del servicio de RETC son presentados a continuación.

Las Figuras 5 y 6 (y Tablas 32 y 33, ver Anexo) corresponden a las emisiones urbanas por ciudad en estudio desde el 2005-2014 para  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  respectivamente. Los resultados presentados para las emisiones de material particulado, no son prometedores, como es de esperar a partir de los resultados de la Tabla 5. Desde el año 2005 hasta el año 2013 se observa un aumento constante para todas las ciudades en las emisiones por combustión residencial de leña, a excepción de las ciudades de la provincia de Concepción donde la disminución se observa a partir del año 2013.

Destaca también la diferencia entre las emisiones urbanas y rurales (Tablas 32 y 33, ver Anexo), donde las primeras resultan ser más altas, lo cual se explica por el mayor número de personas en las ciudades. También, es posible observar que la diferencia entre las emisiones de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  es baja (por ejemplo, Rancagua 2014, 2.100 ton/año de  $MP_{10}$  y 1.900 ton/año de  $MP_{2,5}$ ), lo cual implica que la proporción de  $MP_{2,5}$  es alta en la composición de  $MP_{10}$ .

Así, son diversos los factores que determinan las emisiones de este contaminante hacia la atmósfera, ya sea desde factores incontrolables por las autoridades como variables meteorológicas o fallas en el control del mercado de leña, tanto como su venta (leña mayor a 25% de humedad) o uso por los usuarios en equipos ineficientes, como hogares de pobrísimo aislamiento térmico.

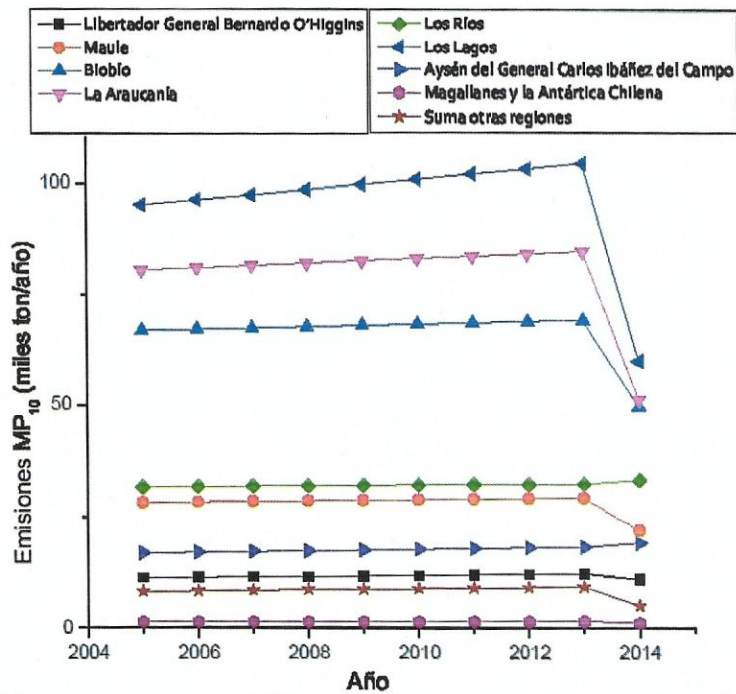


Figura 5 Emisiones urbanas de MP<sub>10</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.

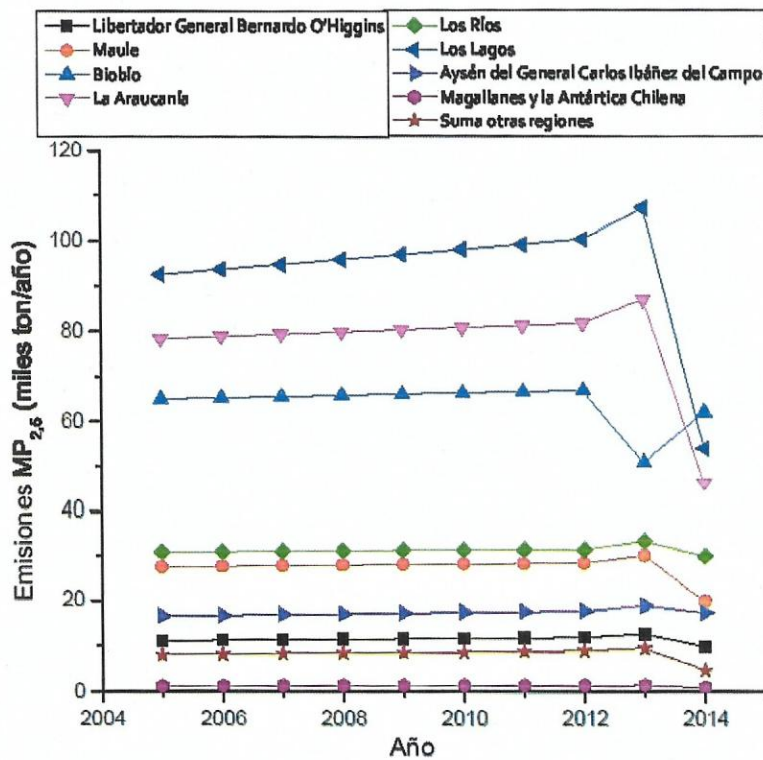


Figura 6 Emisiones urbanas de MP<sub>2,5</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.

### **3.4. Caracterización de la calidad de aire en las ciudades de estudio.**

Los datos obtenidos desde la red de monitoreo de calidad de aire (SINCA) en las ciudades estudiadas resultan ser de gran importancia al momento de analizar la efectividad de los PDAs aplicados en ellas, sin embargo, se ha de considerar que los valores obtenidos corresponden a concentración de contaminante por lo que ven afectados por diversos factores donde los factores meteorológicos en la zona pueden tener una influencia en su variabilidad. A pesar de eso, las normas actuales rigen en base a la exposición de la población ante una concentración del contaminante por un tiempo de exposición, siendo éste en la legislación chilena diario a anual. Es por ello que, aunque gran parte de las medidas aplicadas en estas regiones se enfocan en la disminución de emisiones de MP (resultados presentados previamente), es esperable que las concentraciones de MP en cada ciudad, disminuyan efectivamente de 2 a 10% según la ciudad al año, hasta llegar a valores bajo norma, siendo el peor OS con 50%.

#### **3.4.1. Disponibilidad de información, datos SINCA**

Es así, como los datos recopilados permiten generar las siguientes gráficas, en las que se observa la variabilidad temporal del MP en sus dos fracciones. En la Figura 7, se observa el comportamiento de las fracciones de MP en los años de estudio, donde destaca la disponibilidad de datos, identificándose aquellas ciudades con estaciones de monitoreo operando con mayor tiempo, siendo Rancagua y Temuco (desde 2005), las cuales, son las primeras ciudades en declararse como zonas saturadas y poseer un PDA en las ciudades del sur del país, a estas ciudades las siguen RN, SF y CY (desde 2007), luego CLL, VL y OS (desde 2008), CP (del 2009), TH y CG (2011), , CU, LA y PL (2012), TL y PM (2013) y CR y PA (2014).

La promulgación de la norma primaria de  $MP_{2,5}$  condujo a la necesidad de monitorear este contaminante, lo cual se observa que aumenta entre el 2012 y 2013 (inicio de monitoreo para CU, TL, LA, PL, PM, CY, PA), donde RG, CLL, TM, VL y OS contaban con monitoreo previo este evento (2008), aun así, ciudades como Rengo, San Fernando y las ciudades de la provincia de Concepción no cuentan con una medición de este contaminante siendo estas últimas zonas saturadas por esta fracción. También, en la figura es posible notar que CLL, no posee datos por un año (2011), incluso considerando que posee 2 estaciones de monitoreo, donde en ambas no hay registros.

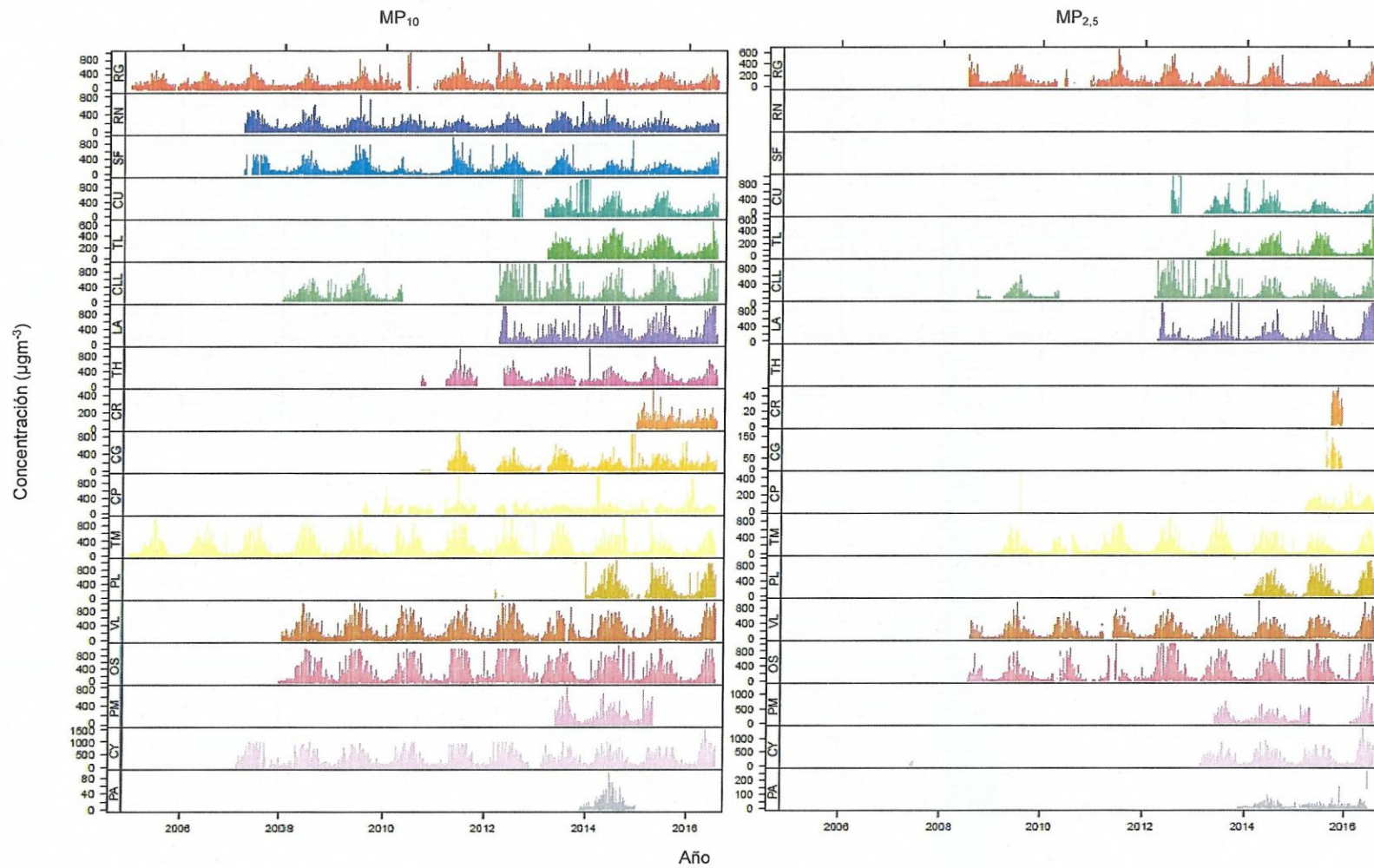


Figura 7 Serie de tiempo para concentración de  $MP_{10}$  (izquierda) y  $MP_{2.5}$  (derecha) en  $\mu\text{gm}^{-3}$  para ciudades en estudio.

Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SINCA

Al observar las series de tiempo (Figura 7) se observan durante la obtención de datos diversas fallas o errores. Para algunas estaciones con mediciones continuas al revisar los datos en línea en diferentes periodos de tiempo se tuvieron cuatro sucesos, datos que inicialmente no aparecían posteriormente, datos válidos que dejaban de estar en línea, datos que cambiaban para una misma hora y la subestimación de concentraciones frente a el uso de atenuadores beta que poseen un límite de detección de  $1000 \mu\text{g m}^{-3}$  (Toro A. y col. 2015). Es por ello que los datos extraídos de las estaciones de monitoreo son validados nuevamente sobre la ya realizada por los operadores del SINCA, con el fin de tener certeza que los resultados obtenidos de ellas sean de confianza.

#### **3.4.2. Análisis de concentración MP, variabilidad anual, mensual, diaria y horaria.**

Uno de los parametros más importantes considerados para evaluar la norma de calidad primaria por materia particulado corresponde a los promedios anuales. Estos, corresponden a los datos presentados en la Tabla 31 (ver Anexo), la cual presenta los resultados para los datos descargados del SINCA, de manera que, difieren ligeramente de los valores registrados o entregados en los documentos del MMA, esto debido a que se realizó una validación diferente. A esto se suma a que los valores presentados son el promedio de las estaciones presentes en cada ciudad, mientras que en los PDAs se presentan los resultados por estación lo cual influirá en el resultado final. Se ha de mencionar que, estos promedios deben ser calculados con el 75% de los datos horarios de un año y con más de 8 meses de datos válidos (Tabla 30, ver Anexo, disponibilidad porcentual de datos), de manera que aquellos años en los que se presenta el símbolo \* califican como no válidos, al no cumplirse las consideraciones anteriores. Destaca notoriamente la presencia de estos años que no son válidos, lo cual impide calcular el promedio tri-anual que es requerido por normativa para evaluar si la norma anual para MP en ambas fracciones se encuentra superada, de manera que esta es una causa por la cual no es posible establecer zonas saturadas con mayor efectividad y rapidez.

Con respecto a los promedios obtenidos, destacan ciudades de la provincia de Concepción (CG, CR, CP y TH) las cuales fueron declaradas como zonas saturadas por  $MP_{10}$  el año 2006, presentan monitoreo en línea desde 2009-2010, donde aproximadamente el 50% de los años de medición de esas estaciones no cumplen con los parámetros de validez (años con \*), por lo que estos años son inválidos para la evaluación de norma. No son sólo estas ciudades las que reflejan las deficiencias del sistema de monitoreo nacional si no que todas presentan al menos un año inválido, ya sea para una de las fracciones de MP o para ambas.

Generalmente los años en estas condiciones corresponden al primer año de mediciones, o año piloto, en el cual se instalan los equipos y establecen los programas de medición de estos contaminantes, así como también se sistematizan los softwares y se capacita el personal, con el fin de operar estas estaciones. Es probable que estos años piloto, no inicien durante el mes de enero, si no que midan desde cuando el sistema sea operable, por lo que es común que no cumplan con la normativa establecida. Pero, hay estaciones que incluso luego de su primer año de operación aun presentan fallas y deficiencias operativas, donde un 25% o más de los datos no fueron medidos o son erróneos, lo cual genera un impacto en los resultados finales. Además, en estas ciudades las condiciones meteorológicas definen la variabilidad por temporadas la concentración de contaminante, por lo que perder datos de una de estas temporadas generará un impacto considerable en el promedio obtenido.

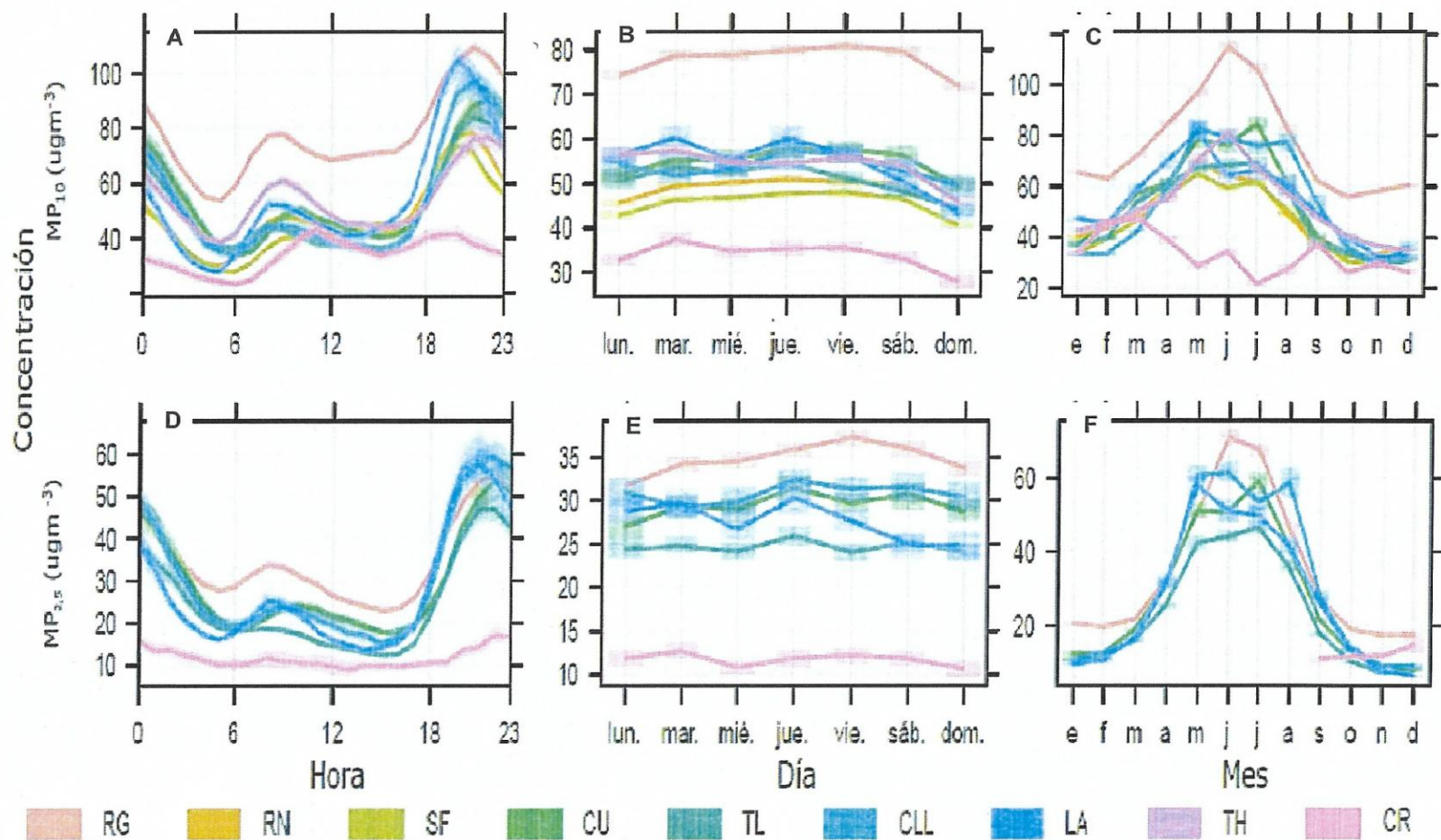
Los fenómenos de contaminación en las ciudades del sur del país como es sabido se asocian fuertemente a las emisiones por combustión de leña por lo que las concentraciones más altas de MP (principalmente  $MP_{2,5}$ ) se verán durante la temporada fría, tal como se presenta en las Figuras 8 y 9, que presenta la variabilidad temporal de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  mensual, diaria y horaria. Donde Figuras 8 y 9 A y D, muestran que el incremento inicia en los meses marzo-abril hasta septiembre-octubre, para todas las ciudades en estudio. Se observa que la concentración de  $MP_{2,5}$ , abarca una mayor cantidad de meses que el  $MP_{10}$ , por lo que esta posee fuentes propias, que se diferencia del  $MP_{10}$  e incrementan en invierno.



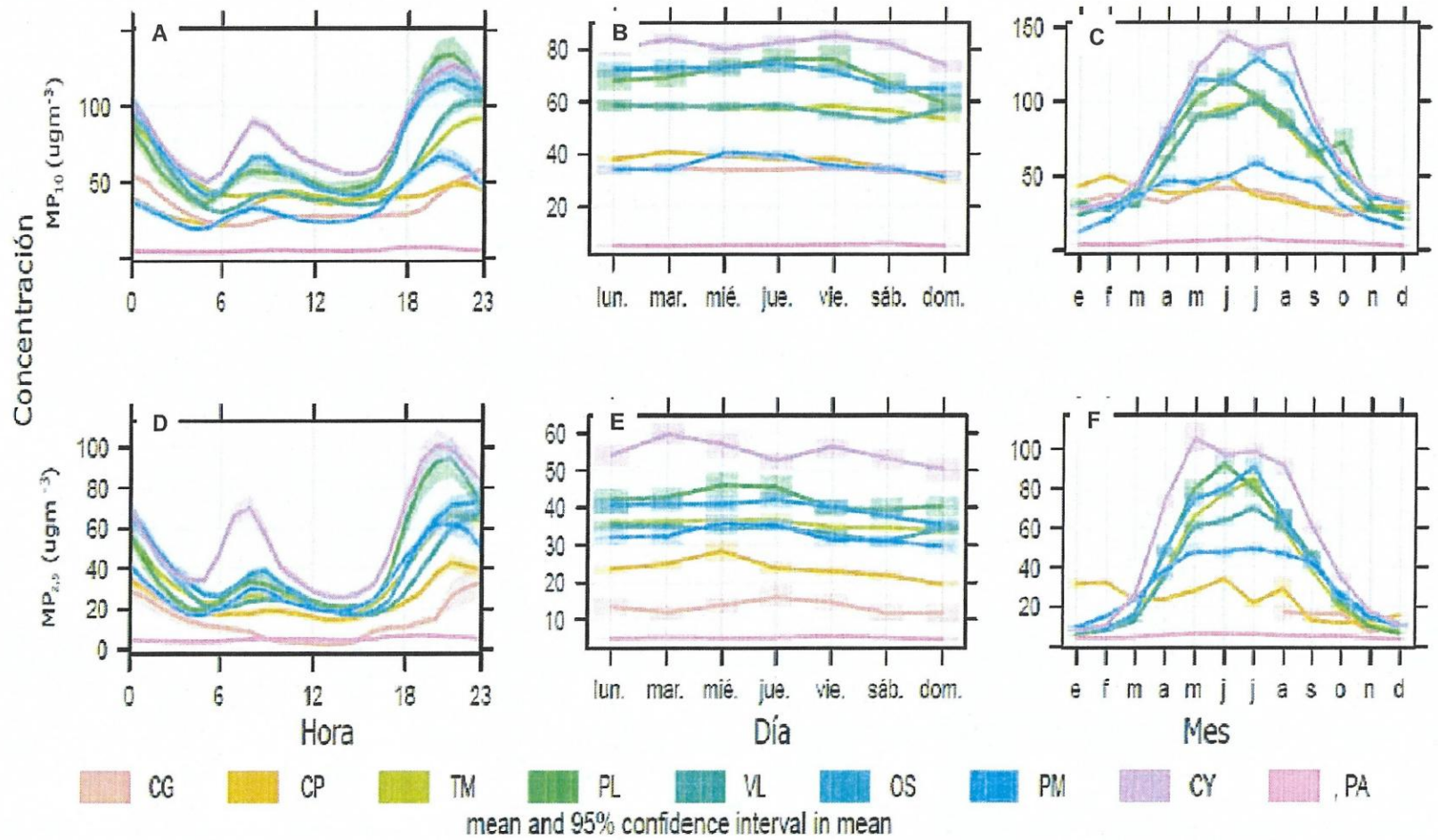
Semanalmente (Figuras 8 y 9, B y E), se observa que las concentraciones no presentan una variabilidad amplia (desviación estándar, sombra en líneas Figura 8) , se mantiene constante prácticamente durante toda la semana, pero disminuye levemente durante los fines de semana, esto se explicaría por la disminución del tránsito vehicular, por no ser días laborales, mas es baja la diferencia con los días de mayor tránsito lo cual gráfica, que el aporte generado por las fuentes móviles en este caso generan un aporte poco significativo comparado a la calefacción residencial por leña.

Esto se verifica nuevamente con la variación horaria de ambas fracciones (Figuras 8 y 9 C y F), ya que las concentraciones máximas se focalizan en la noche entre 19:00 y 02:00 horas, donde intensifican las emisiones por ser las horas de menores temperaturas como en las que los ciudadanos se encuentran en sus hogares. Se observa también máximos en la mañana (7:00-10:00) que se pueden dar por las mismas razones ya mencionadas o como ocurre en ciudades como Santiago, por el tránsito por inicio de las jornadas laborales. En estas figuras es posible comparar también las concentraciones promedio de las ciudades estudiadas, comparando aquellas que se rigen por un PDA con las que no o las que lo poseen por mayor tiempo de vigencia con las de menor.

Se ha de considerar que, no todas las ciudades poseen las mismas concentraciones anuales por las que fueron declaradas como saturadas, pero sí que superan las normas primarias, siendo el valor de referencia para todas. Coyhaique es la ciudad que presenta los promedios más altos en relación a las demás ciudades en ambas fracciones en todos los casos, sobre  $80 \mu\text{gm}^{-3}$  (para  $\text{MP}_{10}$  y  $\text{MP}_{2,5}$ ).



mean and 95% confidence interval in mean  
**Figura 8** Variación temporal concentraciones  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ), promedio para todos los años de datos disponibles en RG, RN, SF, CU, TL, CLL, LA, TH, CR, mensual (izquierda), diaria (centro) y horaria (derecha).  
 Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SINCA.



**Figura 9** Variación temporal concentraciones  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  ( $\mu g m^{-3}$ ), promedio para todos los años de datos disponibles en CG, CP, TM, PL, VL, OS, PM, CY, PA, mensual (izquierda), diaria (centro) y horaria (derecha).

Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SINCA

### 3.4.3. Evaluación del efecto de variables meteorológicas en variación de MP.

Considerando que, las emisiones de material particulado están definidas por calefacción y el consumo de leña, conocer la temperatura y humedad relativa ambiental permite establecer si las emisiones serán mayores, como por otro lado modifican las condiciones de estabilidad atmosférica, que a su vez determinan la altura y presencia de las capas de inversión térmica que impiden la dispersión del MP.

Con los datos disponibles de las estaciones de monitoreo se construyó la Tabla 6, que presenta la correlación de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento con las concentraciones de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> y un análisis de tendencia TheilSen para las 3 variables meteorológicas ya mencionadas.

**Tabla 6** Coeficientes correlación y tendencias (%/año) para variables meteorológicas.

| ciudad | Temperatura                            |                   | Humedad Relativa                       |                      | Velocidad del viento                   |                       |
|--------|--|-------------------|--|----------------------|--|-----------------------|
|        | COR                                    | THEIL             | COR                                    | THEIL                | COR                                    | THEIL                 |
|        | (MP <sub>10</sub> /MP <sub>2,5</sub> ) | %/año             | (MP <sub>10</sub> /MP <sub>2,5</sub> ) | %/año                | (MP <sub>10</sub> /MP <sub>2,5</sub> ) | %/año                 |
| RG     | -0,21/-0,41                            | -1,0 [-3,2, 2,4]  | 0,07/0,31                              | 2,2 [0,3, 4,5]*      | -0,17/-0,25                            | -0,4 [-1,4, 0,6]      |
| RN     | -0,03/-                                | 3,8 [-2,4, 9,1]   | -0,05/-                                | 1,6 [-6,7, 4,9]      | -0,16/-                                | 101 [-5,0, -87,1]     |
| SF     | -0,06/-                                | -0,05 [-0,7, 0,7] | 0,06/-                                 | -0,3 [-1,3, 0,7]     | 0,06/-                                 | 0,7 [0,04, 1,3]*      |
| CU     | -0,10/-0,13                            | 4,3 [1,4, 9,5]**  | 0,11/0,14                              | -3,3 [-4,7, -1,6]*** | -0,40/-0,40                            | 4,3 [-0,2, 8,5]*      |
| TL     | -0,22/-0,38                            | 4,2 [1,4, 10]*    | 0,20/0,27                              | -2,2 [-6,1, 0,9]     | -0,36/-0,39                            | -4,6 [-7,8, 10,3]     |
| CLL    | -0,18/-0,26                            | -19 [-54, 84]     | 0,15/0,22                              | 11 [-33, 38]         | -0,08/-0,09                            | -16 [-26, 2,3]*       |
| LA     | -0,04/-0,24                            | 1,4 [-0,02, 3]*   | -0,01/0,20                             | -3,6 [-4,5, -2,6]*** | -0,18/-0,27                            | 11 [5,3, 16,2]***     |
| CP     | 0,05/0,09                              | 1,5 [0,7, 2,5]*** | -0,17/0,10                             | -1,1 [-1,5, -0,7]*** | 0,05/-0,04                             | -0,9 [-4,4, 3,5]      |
| TM     | -0,34/-0,40                            | 1,5 [0,9, 2,1]*** | 0,16/0,23                              | 2,7 [1,5, 4,2]***    | -0,18/-0,15                            | -0,88 [-1,4, -0,2]*   |
| PL     | -0,29/-0,37                            | 3,3 [1,0, 5,6]*   | 0,21/0,28                              | -0,4 [-1,4, 0,3]     | -0,30/-0,31                            | 5,74 [0,7, 10]*       |
| VL     | -0,35/-0,41                            | 1,4 [0,1, 3,0]*   | 0,26/0,29                              | -5,8 [-6,9, -4,2]*** | -0,32/-0,33                            | -4,44 [-5,1, -3,8]*** |
| OS     | -0,33/-0,38                            | 1,1 [0,3, 2,0]**  | 0,25/0,27                              | -4,6 [-5,5, -3,9]*** | -0,30/-0,32                            | -4,05 [-4,7, -3,3]*** |
| PM     | -0,30/0,29                             | 13,6 [9,4, 16]*** | 0,08/0,12                              | -0,6 [-1,5, 0,5]     | -0,38/-0,33                            | -17 [-23, -12]***     |
| CY     | -0,42/-0,45                            | 3,0 [0,7, 5,49]** | 0,13/0,22                              | -2,9 [-3,5, -2,2]*** | -0,21/-0,29                            | 5,3 [2,4, 9,23]***    |

$p < 0.001 = ***$ ,  $p < 0.01 = **$ ,  $p < 0.05 = *$  y  $p < 0.1 = +$ .

Así, con el análisis de tendencia y los coeficientes de correlación presentados en la Tabla 6, fue posible establecer la relación que se da en cada ciudad entre las variables meteorológicas y el MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, donde para todas las fracciones predomina una relación inversa para la temperatura y velocidad del viento, dándose con mayor

intensidad para las partículas finas, destacando para velocidad del viento CU -0,4 y TL -0,39 y para temperatura RG y VL con -0,41, CY con -0,45, como los valores más altos, pero aun así son muy bajos para establecer una asociación.

Por su parte, la humedad relativa en la mayoría de los casos corresponde a valores positivos, esto indica que la humedad relativa al aumentar lo hace con el material participado, esto es explicable por la formación de material particulado secundario, el cual se forma en la atmosfera y usa como núcleos de condensación partículas o gotas de agua, lo cual aumenta la concentración de material particulado, principalmente fino.

Aunque los coeficientes de correlación sean bajos, las tendencias obtenidas presentan significancia estadística ( $p < 0,1$  al  $0,001$ ) en casi todas las ciudades para las tres variables meteorológicas analizadas.

En el caso de la temperatura se observa un aumento en el periodo de estudio dejando en evidencia el cambio climático que afecta actualmente al planeta, tendiendo a un 1% al año en OS como mínima ( $p < 0,01$ ) a un 14% al año como máximo en PM ( $p < 0,001$ ), siendo distintas entre sí para ser ciudades de la misma región. Entre CLL y VL hay un aumento del 1,4 al 3%, mientras que CU y TL aumenta 4% por año. Finalmente, las ciudades de la Región del LBO, no presentan una tendencia significativa.

Con el aumento de temperatura, la atmósfera se seca, disminuyendo la humedad relativa, observándose esto en las tendencias obtenidas entre un 2 a un 6% por año en el periodo de estudio dándose con mayor intensidad en CY, OS, VL, TM, LA y CU con más de un 3%. Finalmente, para la velocidad del viento es variable por ciudad, RN, TM, OS, VL y PM disminuye, mientras que para CY, PL, LA, SF aumenta ( $p < 0,1$ ).

#### **3.4.4. Determinación superación de norma y episodios críticos.**

En la metodología, se presentaron los criterios ante los cuales se definen las superaciones de la norma, 2 de ellas (percentil 98 para norma diaria y promedio tri-anual) requerían datos de al menos un año, mientras que para determinar las horas y días sobre norma y días de episodios críticos se requieren datos horarios de al menos un día (aplicado sobre promedio móvil de 24 horas). Es así, como la norma puede ser evaluada en distintos periodos de tiempo, siendo todos ellos indicadores de la efectividad de los PDA.

#### 3.4.4.1. Evaluación normativa a largo plazo

Inicialmente, se evalúa la norma anual de ambas fracciones, por lo que se han de estimar los promedios tri-anales, que se calculan con los promedios anuales válidos de la Tabla 31 (ver Anexo). Son pocas las ciudades en las que es posible calcular para varios años de medición este valor, por lo que para fines comparativos se calcula el del periodo 2014-2016, ya que existen más datos válidos. Nuevamente CY, presenta valores extremadamente altos de P98,  $83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para  $\text{MP}_{10}$  y  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$   $\text{MP}_{2,5}$  valores muy por sobre la norma. Otras ciudades por sobre norma son RG, CU, PL, TL, VL, OS, LA con ambas fracciones, mientras que RN, SF, CR, CG y PA, se encuentran por debajo la norma, donde la mayoría mide  $\text{MP}_{10}$ , PM y CP fueron las únicas ciudades en las que no fue posible determinar un promedio en ni una de las fracciones, por lo que se requieren de mejoras, en la sistematización de las estaciones de monitoreo.

En cuanto a la norma diaria, calculada con el percentil 98 de un año de mediciones, en la Tabla 7 se presentan los valores para cada ciudad y años de datos disponibles. En consideración a lo anterior, 8 de las 18 ciudades estudiadas presentan percentiles 98 por sobre los  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  durante los últimos 3 años para  $\text{MP}_{10}$ , destacando Rancagua y Temuco ( $176$  y  $197 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en promedios, respectivamente) que poseen PDAs más antiguos, aunque es posible observar una disminución en los valores año a año aún se encuentran sobre la norma diaria para  $\text{MP}_{10}$ . En cuanto al  $\text{MP}_{2,5}$ , resulta inquietante observar que para todas las ciudades que presentan mediciones (a excepción de Coronel y Chiguayante, año piloto y Punta Arenas, caso especial), el percentil 98 anual, (P98) es mayor que la norma diaria de  $\text{MP}_{2,5}$  ( $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), donde se duplica o hasta triplica su valor, encontrándose que ciudades que actualmente no se encuentran como zonas saturadas por esta fracción y están contaminadas por ella (RG  $98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , TL  $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM  $126 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , CY  $309 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Aquellas que se encuentran más al sur, presentan una mayor gravedad en sus resultados, donde TM  $146 (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ , VL ( $152 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), OS ( $215 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) y CY (presentado anteriormente) son los mayores afectados. Nuevamente, se vuelve necesario recalcar, la escasa información de material particulado fino, donde a pesar que su norma fue establecida el año 2012, aún hay ciudades y estaciones EMRP, que no poseen en línea y/o equipos que midan esta fracción, las cuales pueden estar expuestas a altas concentraciones, perjudiciales para la salud de las personas.

**Tabla 7** Percentiles 98 de las concentraciones de 24 horas ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para cada año y ciudad de estudio.

|   | Año  | RG    | RN   | SF   | CU   | TL    | CLL   | LA   | TH    | CR    | CG    | CP    | TM    | PL    | VL     | OS    | PM   | CY   | PA    |
|---|--|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|-------|
|   | MP <sub>10</sub><br>( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) | 2005  | 155  | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -     | -     | -     | -     | 167   | -      | -     | -    | -    | -     |
| 2006  |  | 159   | -    | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -     | -     | -     | 186   | -     | -      | -     | -    | -    | -     |
| 2007  |  | 188   | 176* | 149* | -    | -     | *     | -    | -     | -     | -     | -     | 216   | -     | -      | -     | -    | 442* | -     |
| 2008  |  | 158   | 122  | 129  | -    | -     | 131   | -    | -     | -     | -     | -     | 252   | -     | 217*   | 212   | -    | 324  | -     |
| 2009  |  | 166   | 122  | 153  | -    | -     | 169   | -    | -     | -     | -     | 49,0* | 239   | -     | 89,4*  | 362*  | -    | 299  | -     |
| 2010  |  | 357*  | 102  | 95,5 | -    | -     | 137*  | -    | 71,2* | -     | 20,4* | 76,7  | 169   | -     | 160,9* | 172*  | -    | 407  | -     |
| 2011  |  | 182*  | 103  | 158  | -    | -     | -     | -    | 296*  | -     | 137*  | 130*  | 241   | -     | 206*   | 342*  | -    | 353* | -     |
| 2012  |  | 209   | 110  | 131  | -    | -     | 268*  | 201* | 151*  | -     | 68,4* | 77,3* | 236   | 91,0* | 222    | 549   | -    | 387  | -     |
| 2013  |  | 177   | 121  | 117  | 144* | 132   | 204   | 235  | 121   | -     | 80,1  | 72,2  | 232   | -     | 145    | 281*  | 150* | 171* | 3,10* |
| 2014  |  | 186   | 107  | 103  | 141  | 140   | 170   | 199  | 112   | -     | 72,9  | 74,7  | 233   | 250   | 157    | 260   | 97,9 | 243  | 13,1  |
| 2015  |  | 179   | 98,7 | 107  | 147  | 138   | 180   | 191  | 124   | 95,2  | 98,1  | 91,9* | 190   | 238   | 179    | 247   | 123* | 264  | 14,1  |
| 2016  |  | 162   | 92,6 | 119  | 140  | 129   | 190   | 203  | 141   | 86,9  | 79,5  | 114   | 169   | 230   | 227    | 240   | -    | 352  | -     |
| MP <sub>2,5</sub><br>( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) | Año  | RG    | RN   | SF   | CU   | TL    | CLL   | LA   | TH    | CR    | CG    | CP    | TM    | PL    | VL     | OS    | PM   | CY   | PA    |
|   | 2005   | -     | -    | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -    | -    | -     |
|   | 2006   | -     | -    | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -    | -    | -     |
|   | 2007   | -     | -    | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -    | -    | 34,0* |
|   | 2008   | 102*  | -    | -    | -    | -     | 29,9* | -    | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 48,4*  | 44,5* | -    | -    | -     |
|   | 2009   | 115   | -    | -    | -    | -     | 121*  | -    | -     | -     | -     | 389*  | 180   | -     | 54,0*  | 196*  | -    | -    | -     |
|   | 2010   | 55,3* | -    | -    | -    | -     | 84,0* | -    | -     | -     | -     | -     | 84,8* | -     | 76,5*  | 32,4* | -    | -    | -     |
|   | 2011   | 91,5* | -    | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -     | -     | -     | 198*  | -     | 147*   | 161*  | -    | -    | -     |
|   | 2012   | 144   | -    | -    | -    | -     | 205*  | 147* | -     | -     | -     | -     | 187   | 45,9* | 151    | 346   | -    | -    | -     |
|   | 2013   | 124   | -    | -    | 117* | 69,3* | 173   | 84,0 | -     | -     | -     | -     | 180   | -     | 111    | 170*  | 143* | 126* | 3,1   |
|   | 2014   | 116   | -    | -    | 95,4 | 85,3  | 113   | 116  | -     | -     | -     | -     | 142   | 149,0 | 104    | 166   | 94,8 | 211  | 13,1  |
|   | 2015   | 102   | -    | -    | 87,1 | 88,7  | 114   | 127  | -     | 22,5* | 27,7* | 51,5* | 138   | 173,0 | 125    | 183   | 109* | 216  | 11,5  |
| 2016  | 98,1   | -     | -    | 77,8 | 90,1 | 120   | 162   | -    | -     | -     | 57,9  | 145   | 201,3 | 152   | 215    | 126   | 309  | 11,4 |       |

\*Valor calculado con 75% de los datos.

-Sin mediciones para este año.

Valores ennegrecidos, sobre norma.

### 3.3.4.2. Evaluación normativa a corto plazo

Como se mencionó, el cálculo de los días sobre norma resulta ser uno de los indicadores principales considerados por los PDAs para evaluar su efectividad, es por ello que a continuación se presentan los días y horas sobre norma contados para los años en estudio. Cabe destacar nuevamente que los resultados pueden no coincidir con el resultado presentado en documentos oficiales del gobierno, siendo por la diferencia dada por cambios en el tratamiento y validación de los datos. A partir de comparaciones se encontró que los datos del presente estudio son mayores que los oficiales lo general, por lo que se puede interpretar de distintas formas, pero para fines de este estudio se consideraran los calculados en este análisis.

Comparando por ciudades el número de días sobre norma, presentado para los años de estudio y ciudades en la Figura 10, en los últimos años de cada ciudad se observa una disminución de estos, principalmente en ciudades con PDAs aplicados durante un periodo más largo (TM y RG), en aquellas donde los PDAs son más recientes se ve una baja menos pronunciada y más variada para los últimos años. Destacan por sobre las demás Chillán, Los Ángeles, Valdivia y Coyhaique, donde aumentan los días para los últimos años. Comparando los resultados de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  se observa claramente que a fracción fina supera con creces los valores de la fracción gruesa, donde  $MP_{10}$  alcanza en promedio los 50 días sobre norma mientras que el  $MP_{2,5}$  supera en casi todas las ciudades los 80 días, siendo las ciudades de TM, PL, VL, OS Y CY con peores índices. Con respecto al comportamiento de  $MP_{2,5}$ , es similar a la fracción ya vista, pero difiere en su disminución, la cual varía en menor cantidad.

Esto se repite para las horas sobre norma por año, presentado en la Figura 11, donde, discrepa de los resultados diarios ya que la variabilidad de año y año es mucho menor o menos significativa, esto es debido a que el método utilizado para contar los días sobre norma diaria, considera la superación como la presencia de una hora sobre la norma diaria, por lo que con sólo un valor horario sobre norma se considerara el día como superado. Es así como un día puede contar con muchas horas con superación, por lo que la disminución se ve atenuada durante aquel periodo, donde las concentraciones son altas teniéndose un mayor número de horas sobre la norma considerada.

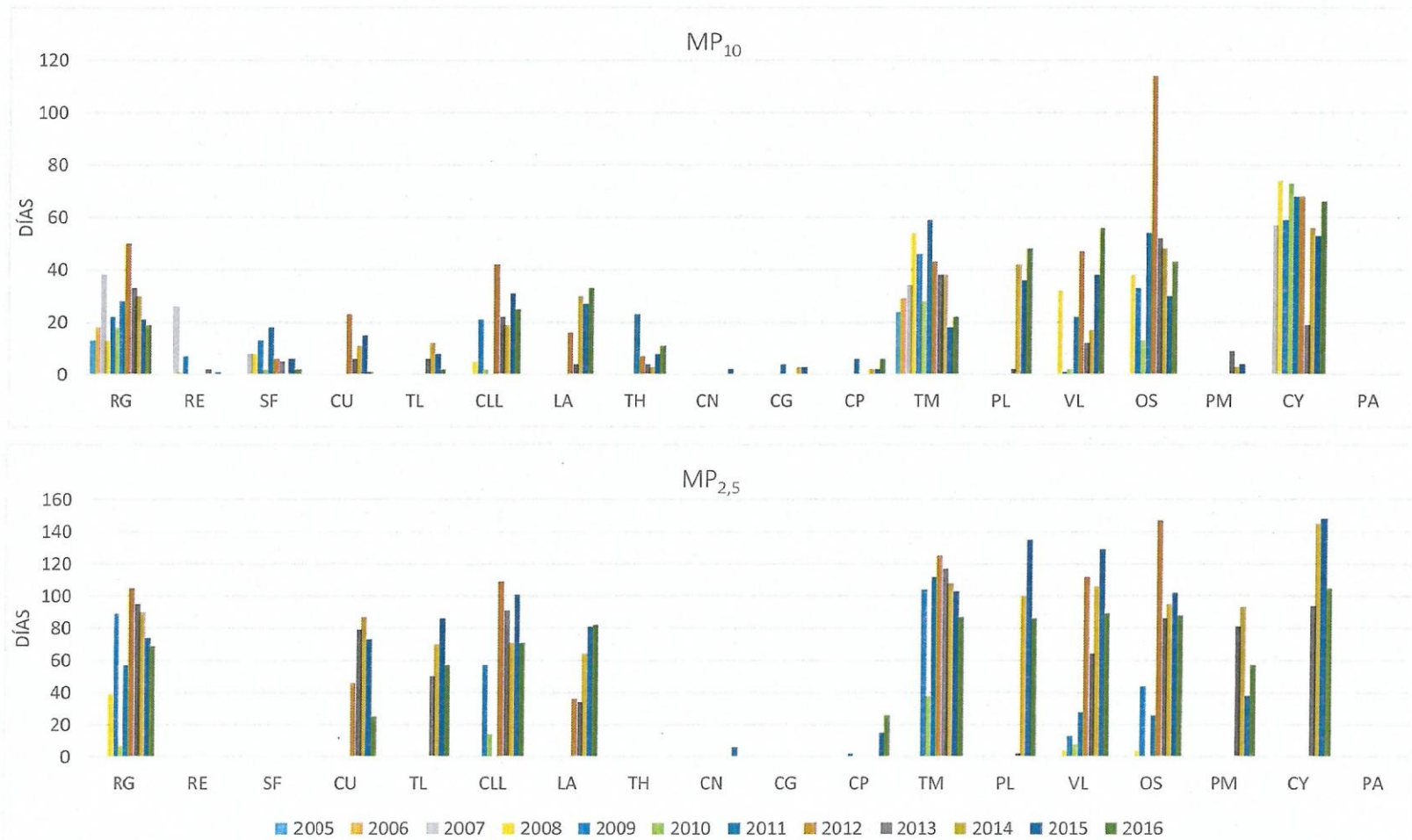


Para los días de episodios críticos por año y ciudad presentados en la Figura 12, destaca claramente la diferencia entre  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ , donde este último supera por más de 20 días al anterior, encontrándose en aumento para todas las ciudades del sur desde Los Ángeles.

Analizando estos resultados de la Figura 12, pero por tipo de episodios ya sea alerta, preemergencia y emergencia (ver Tabla 34 y Tabla 35 del Anexo), se tiene para  $MP_{10}$  una disminución y escasos episodios extremos (emergencias y preemergencias) para las ciudades ubicadas más al centro del país, mientras que PL, VL, OS y CY resultan preocupantes, ya que estos episodios han aumentado año a año, registrando más de 20 alertas y 10 preemergencias al año, presentando incluso emergencias.

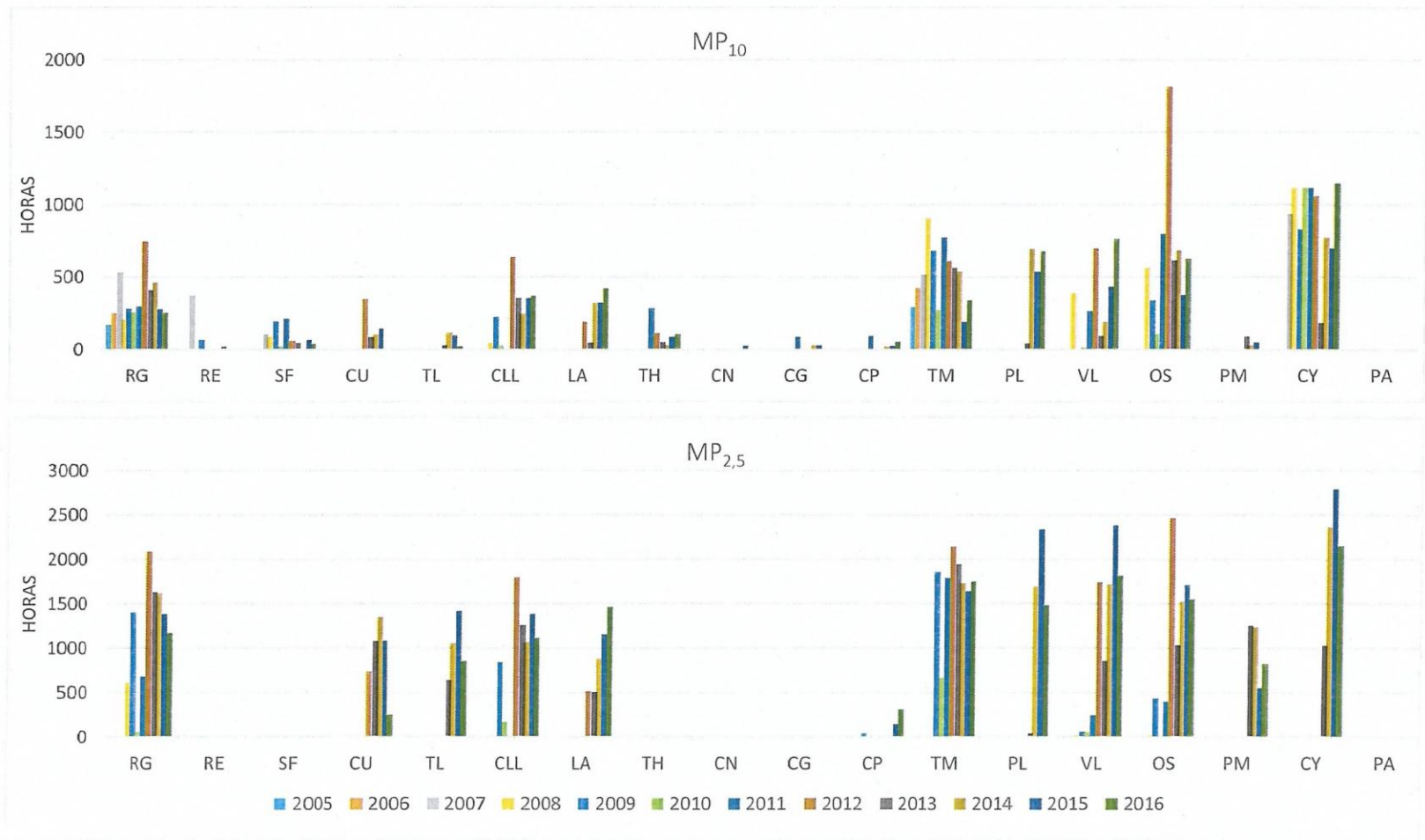
En el caso del  $MP_{2,5}$  todas las ciudades presentan para el año 2016 más de 10 días de alerta, donde las ciudades anteriores más TM y PM, resultan ser alarmantes ya que no sólo registran gran número de días de alerta (más de 30), sino que de preemergencia (PM 16, TM 36, VL 46, OS 47, PL 53 y CY 58 días) y emergencia también (destacan TM 9, VL 10, OS y PL 25, CY 51). Esto resulta ser uno de los mayores puntos a destacar, ya que refleja que la población de Coyhaique está casi un 15% de los días del año expuesta al máximo nivel de contaminación normado ( $170 \mu\text{g m}^{-3}$  como concentración horaria) pudiendo incluso ser mayor.

Se ha de considerar que las concentraciones horarias de MP, definidas por los índices de evaluación de los PDA, días y horas sobre norma y episodios críticos, son situaciones extremas de contaminación, siendo más certera para evaluar la exposición directa de la población a la contaminación que los criterios de evaluación de la norma, la cual a largo plazo, muestra un escenario general de la contaminación en estas ciudades.



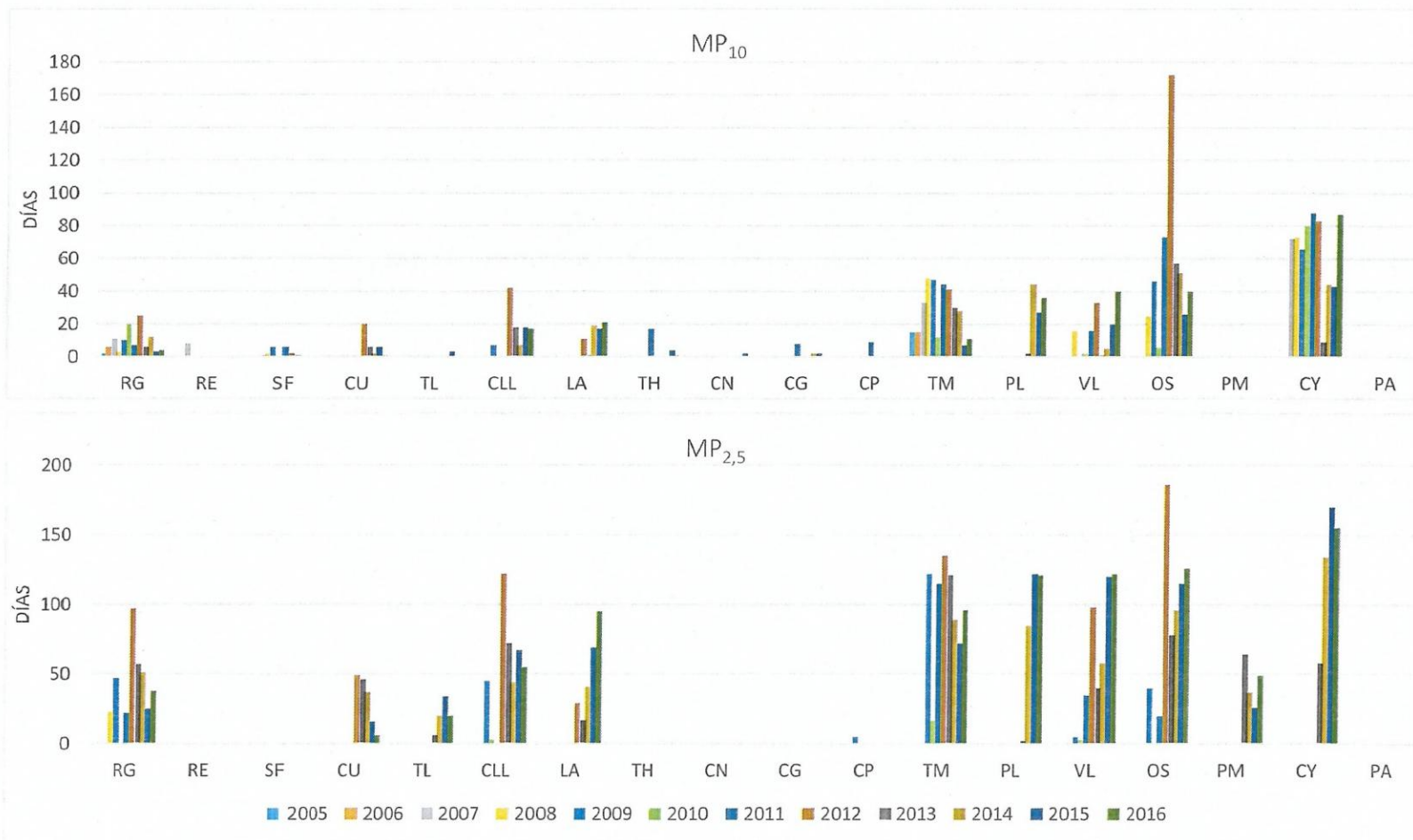
**Figura 10** Días sobre norma diaria para el promedio de 24 horas, para cada año y ciudad estudiados.

Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SINCA.



**Figura 11** Horas sobre norma diaria para el promedio de 24 horas, para cada año y ciudad estudiados.

Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SINCA.



**Figura 12** Días con ocurrencia de episodios críticos (alerta, pre emergencia y emergencias) sobre norma diaria para el promedio de 24 horas.

Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SINCA.

### **3.5. Evaluación planes descontaminación por ciudad.**

Los resultados presentados durante la sección anterior corresponden a análisis general de las ciudades estudiadas, a continuación, se procede a exhibir resultados específicos correspondientes a las ciudades en estudio.

#### **3.5.1. Valle de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins**

En este caso, el PDA presentado abarca el valle de la región del Libertador Bernardo O'Higgins y busca disminuir los valores de MP<sub>10</sub>, donde las ciudades estudiadas corresponden a Rancagua, Rengo y San Fernando. Cabe destacar que estas no son las únicas ciudades dentro de la región donde se aplica el PDA, sino que son las únicas ciudades en ella que cuentan con estaciones de monitoreo de representatividad poblacional con datos públicos y en línea. Esto, representa una falla para la evaluación de PDA, como también para la evaluación real de lo que ocurre en la Región, ya que las ciudades consideradas como referencia para la formulación de PDA son San Francisco de Mostazal, Codegua, Casas de Peuco y Rancagua, las cuales se ubican al norte de la región, mientras que las ciudades estudiadas se ubican al sur de ésta. Así, los factores que determinan la contaminación pueden ser distintos, considerando que esta Región se caracteriza por sus actividades mineras, donde una ciudad más cercana a estas se vería más afectada que una más lejana. También depende de las condiciones meteorológicas de la ciudad, principalmente la velocidad y dirección del viento, pudiendo generarse un fenómeno de transporte. Es así como la única ciudad considerada en ambos procesos es Rancagua la cual será más representativa con lo que ha ocurrido en la Región desde antes de la aplicación del PDA hasta el día de hoy. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las ciudades estudiadas de esta región.

##### **3.5.1.1. Rancagua**

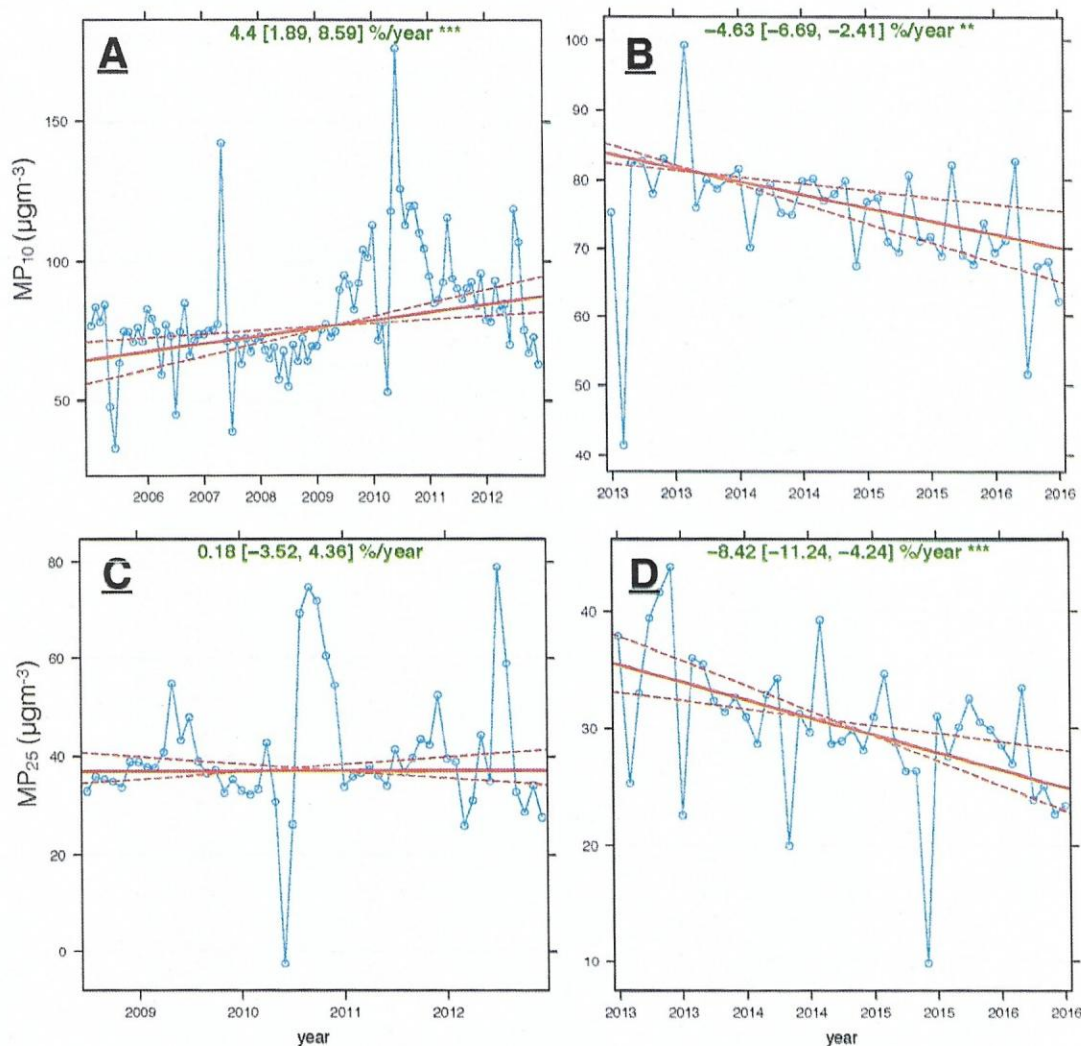
Las estaciones de monitoreo presentaron, para esta ciudad, los percentiles 98 y promedio tri-anales más altos con respecto a las otras estaciones de la región, para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, por lo que corresponde al peor escenario, tomándose de ella la concentración base para toda la Región. Rancagua es la única ciudad de esta región que cuenta con monitoreo de MP<sub>2,5</sub>, por lo que se vuelve importante estudiar si éste

contaminante se encuentra por sobre los niveles normativos, haciendo necesario decretar esta zona como saturada y tomando medidas más adecuadas a este contaminante.

A partir de los datos validados se presenta una estimación de las tendencias (Figura 13), en donde se separa temporalmente la concentración de MP, en ambas fracciones registradas, para los periodos previo (2005-2012) y posterior al PDA (2013-2016). Los resultados indican que las concentraciones presentan un alza estadísticamente significativa para  $MP_{10}$  (4,4% por año,  $p < 0,001$ ), donde la línea de tendencia se ubica por sobre la norma anual ( $50 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Al observar el periodo posterior a la aplicación del PDA de descontaminación regional (desde el 2013) se tiene una disminución estadísticamente significativa (4,63% por año,  $p < 0,01$ ), la cual al observar al gráfico anterior inicia el año 2012 luego de que las concentraciones se elevaran para los años 2010 y 2011 alcanzando los  $100 \mu\text{g m}^{-3}$ , desde ese momento hasta julio del 2016, las concentraciones han decaído, mas, aún están sobre la norma anual.

Para  $MP_{2,5}$  durante el periodo 2005-2012, la concentración es prácticamente constante en todos los años ( $40 \mu\text{g m}^{-3}$ ), pero con ello se define la superación de norma, mas esta, aún no estaba promulgada para aquellos años. Posterior al 2013, nuevamente se observa una disminución de  $MP_{2,5}$  de un 8% por año ( $p < 0,001$ ), lo cual refleja que las medidas aplicadas para  $MP_{10}$  benefician la disminución de  $MP_{2,5}$ , debiéndose a que el 50% del  $MP_{10}$  corresponde a  $MP_{2,5}$ .

Esto implicaría que, si se proyecta la tendencia del periodo 2013-2016 a la concentración del año 2016 de la Figura 12 de  $MP_{10}$  ( $70 \mu\text{g m}^{-3}$ ), el valor de la norma anual estaría siendo alcanzado en aproximadamente cuatro años, es decir el 2020, de manera que el PDA llegaría a su meta dentro del tiempo previsto para la aplicación del PDA (10 años). Para  $MP_{2,5}$ , las concentraciones son bajas en comparación a las otras ciudades, por lo que considerando  $25 \mu\text{g m}^{-3}$  hoy en día y la tendencia presentada, en casi un año la concentración atmosférica de este contaminante estaría bajo norma, en términos de concentraciones anuales, no realmente según el protocolo de superación.



**Figura 13** Tendencia para  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  años previo (a y c) y posteriores (b y d) a la aplicación del PDA, Rancagua.

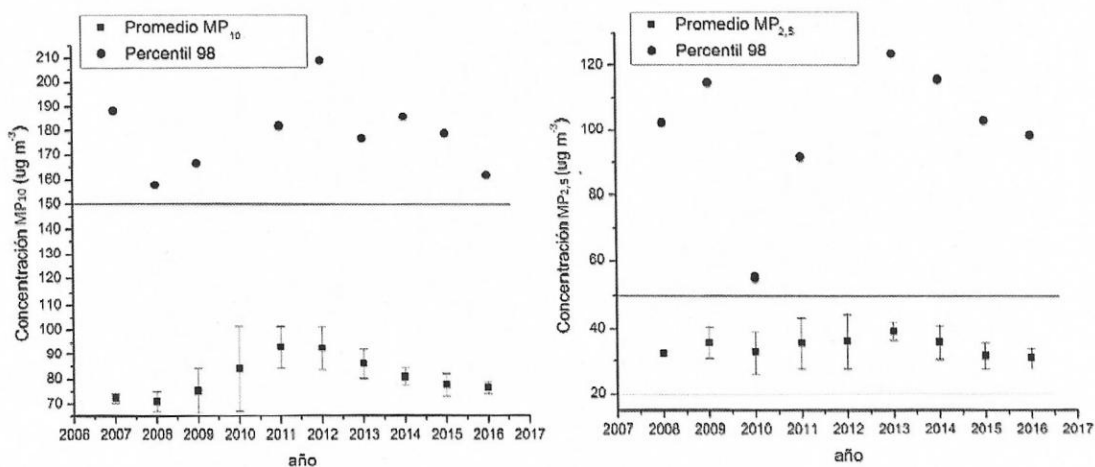
Con el fin de observar el efecto directo del recambio de calefactores sobre los indicadores de evaluación de PDA de descontaminación se estimaron los coeficientes de correlación de Pearson entre el recambio de calefactores, concentraciones de MP, emisiones de MP y los índices de evaluación del PDA (días y horas sobre norma y episodios críticos). En la Tabla 8 se muestran coeficientes obtenidos, donde, es posible establecer que existe una correlación inversa entre el recambio de calefactores y la concentración de MP en ambas fracciones, alcanzando y superando un coeficiente de correlación de 0,5, lo cual prueba que el recambio de calefactores es una medida que en esta ciudad ha dado resultados para la disminución de las concentraciones.

Por su parte, los días sobre norma (DSN), horas sobre norma (HSN) y episodios críticos, presentan una correlación proporcional y baja (aprox. 0,2, Tabla 8), a diferencia del coeficiente de concentración. Esto se explica ya que los valores de concentración corresponden a un promedio de los datos horarios de todo un año, donde se atenúan los valores extremos dando valores más bajos que los registrados durante los días de superación de norma o episodios críticos. Así es como difiere de los DSN, HSN y ep. críticos, que se dan por altas concentraciones horarias, que no se ven reflejadas en el promedio de concentración, pudiendo aumentar año a año, ya que se ven influenciados por fenómenos a corto plazo.

Para las emisiones no fue posible estimar la correlación debido a que no se tenían los datos suficientes de emisiones para realizarlo, pero es probable que se obtuvieran resultados similares a la asociación con la concentración, ya que esta medida ataca directamente las emisiones de MP en la atmósfera.

**Tabla 8** Coeficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Rancagua.

| Fracción          | Concentración | DSN  | HSN  | Ep. Críticos |
|-------------------|---------------|------|------|--------------|
| MP <sub>10</sub>  | -0,48         | 0,22 | 0,24 | 0,22         |
| MP <sub>2,5</sub> | -0,68         | 0,26 | 0,24 | 0,26         |



**Figura 14** Promedio tri-anual y percentil 98 para Rancagua.



**Tabla 9** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Rancagua.

| Año  | %MP <sub>10</sub> ref (186-78 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>2,5</sub> (50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub> (150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|---|-------|---|------|---|------|
|      | P98   | PTA   | P98   | PTA  | P98   | PTA  |
| 2008 | -15,2   | -9,10 |   | -    | 5,10  | 41,7 |
| 2009 | -10,5   | -3,80 | 129   | -    | 11,0  | 50,1 |
| 2010 | -   | -     | -   | -    | -   | -    |
| 2011 | -   | -     | -   | -    | -   | -    |
| 2012 | 12,3  | -     | 188   | -    | 39,2  | -    |
| 2013 | -5,10   | -     | 147   | -    | 17,7  | -    |
| 2014 | -0,30   | 3,70  | 131   | 78,3 | 23,7  | 61,7 |
| 2015 | -4,00   | -0,60 | 106   | 57,2 | 19,1  | 55,1 |
| 2016 | -13,1   | -2,20 | 96,2  | 54,3 | 7,70  | 52,5 |

-Años no válidos o sin monitoreo.

En la Figura 14 como en la Tabla 9, se presenta la evaluación de las normas primarias para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, donde la figura considera años inválidos y la tabla sólo datos válidos, con el fin de comparar la diferencia, verificando representativos de la realidad en ambos casos y, además, completar la información faltante. Para MP<sub>10</sub> tanto el promedio tri-anual como el percentil 98 se encuentran por sobre la norma en todos los años de estudio, donde los años no válidos corresponden a los más altos en ambos parámetros, con las mayores variaciones estándares, por lo que es posible que los datos válidamente medidos para este año sean principalmente para la temporada fría en la cual las concentraciones de estos contaminantes aumentan.

Revisando la diferencia porcentual con las normas es posible ver que las concentraciones en relación al año de referencia del PDA son menores, esto debido a que el porcentaje presentado corresponden a valores negativos, lo cual indica que para el año 2016 el percentil 98 de MP<sub>10</sub> ha disminuido un 13,1% y el promedio tri-anual un 2,2%, siendo esto progresivo año a año, donde el 2014 se tuvo un pequeño retroceso, mas, esto no se ha repetido nuevamente. Se tienen mejoras respecto al año referencia, a cuando se declara la zona saturada, reflejándose los mismo para la evaluación de la norma, sin embargo, estos resultados presentan que la norma aún está superada para MP<sub>2,5</sub> un 54% y 96% para la norma anual y diaria, mientras que para MP<sub>10</sub> un 53% y 8% respectivamente.

Considerando las condiciones meteorológicas, en la Tabla 6 se tiene que tanto la temperatura como la velocidad del viento para los análisis de tendencia han disminuido menos de un 1% por año (sin ser un resultado estadísticamente positivo), mientras que la humedad ha aumentado un 2,2% por año ( $p > 0,01$ ), valor que resulta ser bajo a pesar de todo, sin influir en las concentraciones de este contaminante en el aire de manera considerable, según sus bajos coeficientes de correlación.

### **3.5.1.2. Rengo y San Fernando**

Como se mencionó anteriormente, estas ciudades no estaban consideradas en la formulación del PDA, pero están definidas en condición de saturación dentro del área de descontaminación del Valle del Libertado Bernardo O'Higgins, vigente desde el 2013 y segundo, son de las ciudades en este estudio que no presentan monitoreo de  $MP_{2,5}$ , sólo con  $MP_{10}$  (desde 2007), por lo que se no hay forma de asegurar que estas ciudades se encuentran o no sobre la norma de esta fracción y sólo se puede analizar la efectividad sobre el  $MP_{10}$ .

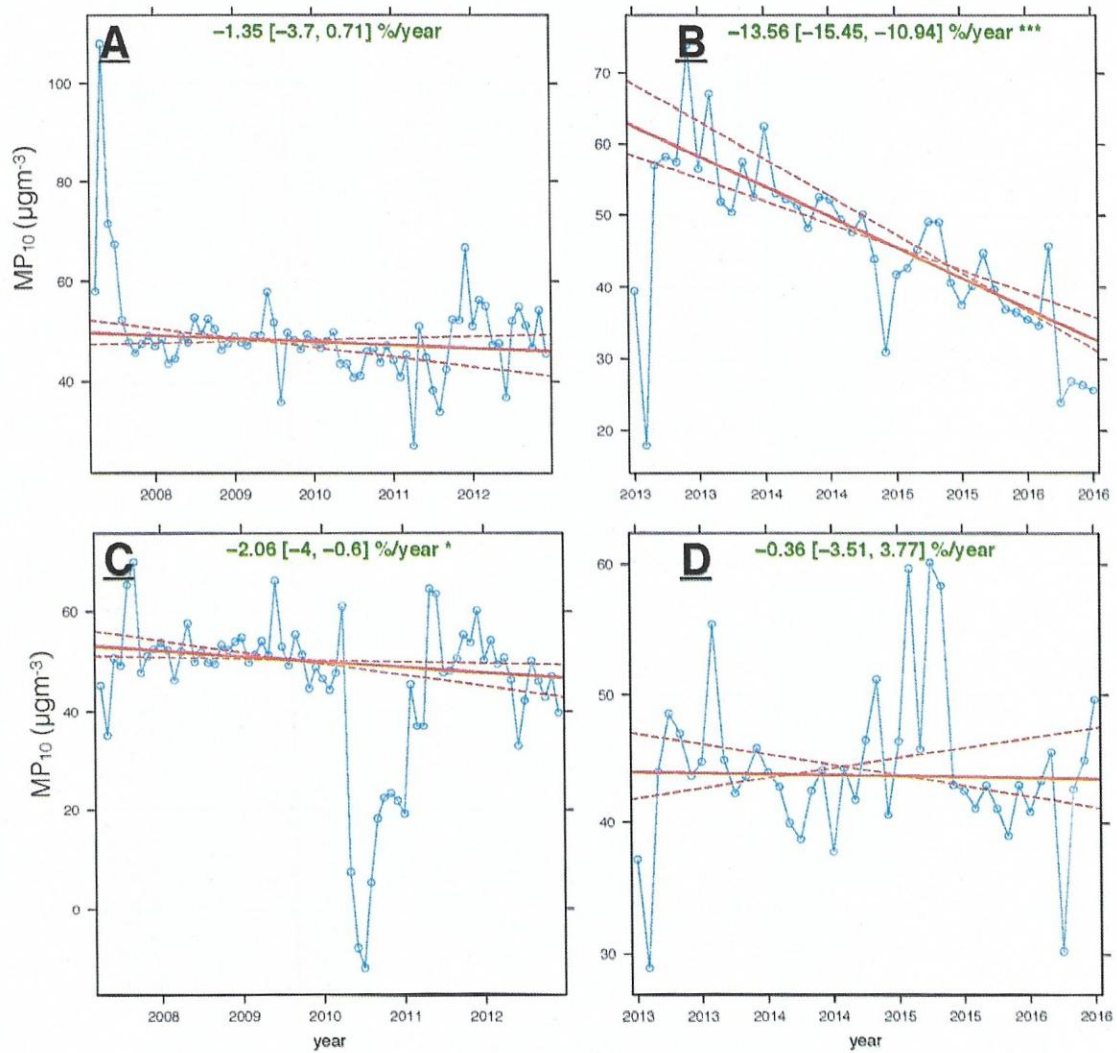
Observando la Figura 15, muestra las tendencias para estas ciudades, donde, se observa que ambas ciudades durante el primer periodo están en promedio en el valor de la norma, disminuyendo entre un 1,4 y 2% por año sus concentraciones (RN no significativo estadísticamente,  $p < 0,05$  para SF), con intervalos de confianza prácticamente en los negativos.

La Figura 15, también presenta el caso del periodo post-PDA, RN, que inicialmente presentaba las variaciones más bajas, presenta una disminución por año del 13,6% ( $p < 0,001$ ) estando bajo norma desde el año 2015, con ello se ha de considerar que el intervalo de confianza va desde 15,5 a 11 %, por lo que en cualquier caso el escenario es favorable a la descontaminación en esta ciudad. En cuanto a SF no se tiene certeza estadística que permita establecer la tendencia de esta ciudad.

La Tabla 10, presenta los resultados para la correlación de los índices de evaluación del PDA y el número de calefactores cambiados, donde, sólo en SF es posible observar que el recambio de calefactores genera una disminución significativa en las concentraciones. En ambos casos destacan los días sobre norma, donde hay una correlación de más del 50%, de manera que los episodios críticos son situaciones que se escapan a la efectividad del recambio de calefactores o medidas tomadas.

**Tabla 10** Coeficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Rengo y San Fernando.

| Ciudad | Concentración | DSN  | HSN  | Ep. Críticos |
|--------|---------------|------|------|--------------|
| RN     | 0,22          | 0,57 | 0,27 | 0,57         |
| SF     | -0,69         | 0,98 | 0,95 | 0,98         |



**Figura 15** Tendencia para  $MP_{10}$ , años previo (a y c) y posteriores (b y d) a la aplicación del PDA, Rengo (arriba) y San Fernando (abajo).

Finamente, evaluando directamente la normativa, en la Tabla 11, se presentan las diferencias porcentuales con respecto al año de referencia del PDA y normas. En ella, es posible observar que estas ciudades están por debajo de la norma tanto el P98 como el promedio tri-anual (signos negativos de valores), mas, como se ha visto con anterioridad estas ciudades están previamente al PDA bajo o al límite de la norma, por lo que con el paso de los años y gracias al PDA se ha mejorado la calidad de aire de estas ciudades estando hoy en día bajo la norma diaria en un 38% para RN y SF un 21%, en la norma anual están bajo 12,5% RN y 8% SF.

**Tabla 11** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Rengo y San Fernando.

| Año  | %RN ref (186-78 $\mu\text{gm}^{-3}$ ) |       | %RN (150-50 $\mu\text{gm}^{-3}$ ) |       | %SF ref (186-78 $\mu\text{gm}^{-3}$ ) |       | %SF (150-50 $\mu\text{gm}^{-3}$ ) |       |
|------|---------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
|      | P98                                   | PTA   | P98                               | PTA   | P98                                   | PTA   | P98                               | PTA   |
| 2008 | -34,6                                 | -     | -18,9                             | -     | -30,6                                 | -     | -13,9                             | -     |
| 2009 | -34,4                                 | -     | -18,6                             | -     | -17,7                                 | -     | 2,10                              | -     |
| 2010 | -                                     | -     | -                                 | -     | -                                     | -     | -                                 | -     |
| 2011 | -                                     | -     | -                                 | -     | -                                     | -     | -                                 | -     |
| 2012 | -41,0                                 | -     | -26,8                             | -     | -29,4                                 | -     | -12,5                             | -     |
| 2013 | -35,0                                 | -     | -19,4                             | -     | -37,3                                 | -     | -22,3                             | -     |
| 2014 | -42,6                                 | -33,7 | -28,8                             | 3,50  | -44,6                                 | -42,3 | -31,3                             | -9,90 |
| 2015 | -46,9                                 | -37,0 | -34,2                             | -1,70 | -42,5                                 | -42,0 | -28,7                             | -9,50 |
| 2016 | -50,2                                 | -43,9 | -38,3                             | -12,5 | -36,2                                 | -41,1 | -20,9                             | -8,10 |

-Años no válidos o sin monitoreo.

### 3.5.2. Región del Maule

Las ciudades de esta Región, Talca y Curicó son ciudades que iniciaron en los últimos años la implementación de las herramientas de institucionalidad ambiental para normativas de calidad de aire, por lo que en el caso de Talca su PDA entró en vigencia este año, mientras que el de Curicó aún se encuentra en elaboración. Sin embargo, el PDA piloto de recambio de calefactores y medidas en ambas ciudades inició antes (2012) (MMA 2014), por lo que es posible observar si existen o no cambios en relación a años previos a esto.

### 3.5.2.1. Talca

En esta ciudad, nuevamente se tiene la declaración de sólo una fracción como contaminante saturado, MP<sub>10</sub>, por lo que la evaluación de MP<sub>2,5</sub> permitirá establecer si es necesario o no tomar medidas adecuadas a esta fracción. La Figura 16 se muestran los análisis de tendencia, donde, sólo se consideraron los últimos años de medición (2013-2016), esto debido a que a partir de estos años se implementaron medidas de abatimiento y son los años con datos disponibles para MP<sub>2,5</sub>. Con ellos es posible establecer que hay una disminución de 6,07% por año en el caso de MP<sub>10</sub> (p<0,05), mientras que el MP<sub>2,5</sub> no posee resultados estadísticamente significativos, pero tienden a disminuir un 3,7% por año. Se ha de mencionar que desde el año 2015 aproximadamente, la tendencia se encuentra bajo los 50 µgm<sup>-3</sup> de la norma anual, mientras que se observa que la tendencia del MP<sub>2,5</sub> está por sobre la misma (20 µgm<sup>-3</sup>).

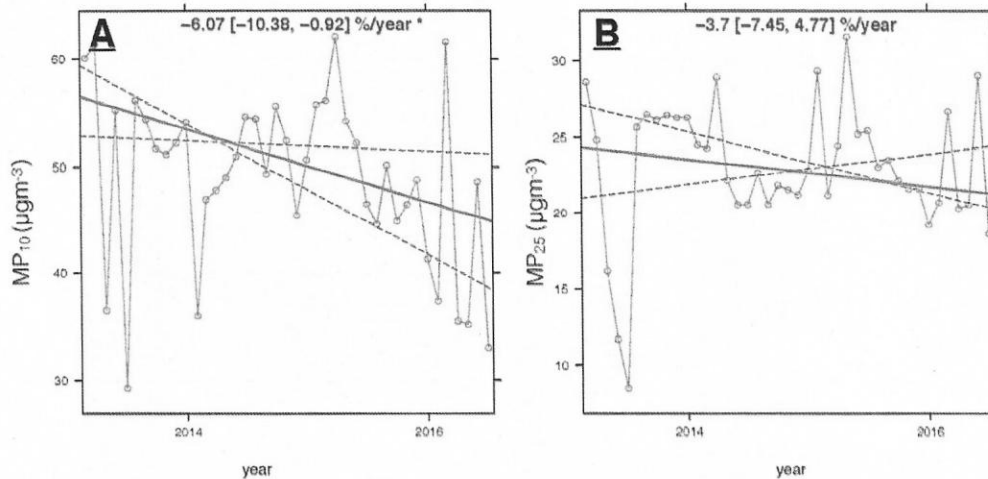
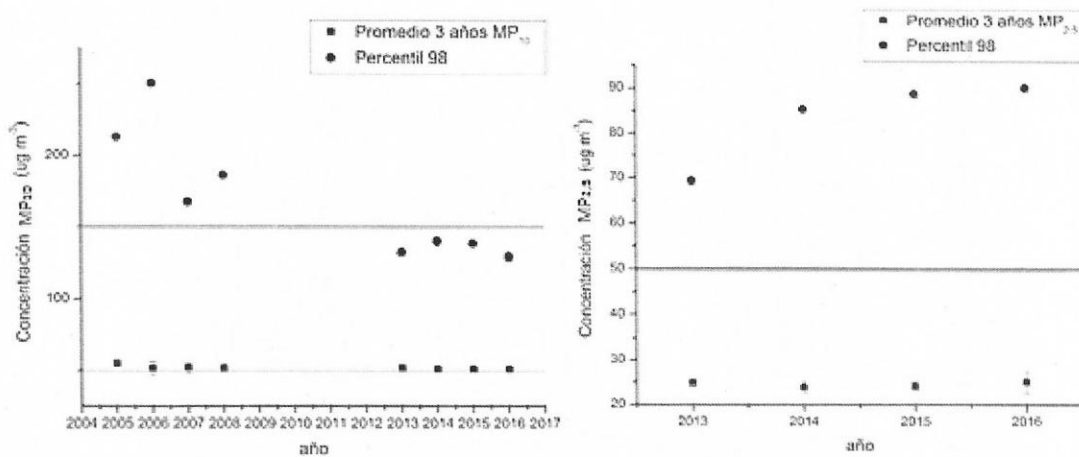


Figura 16 Tendencia para MP<sub>10</sub> (a) y MP<sub>2,5</sub> (b) para años medidos (2013-2016), Talca.

Tabla 12 Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Talca.

| Año  | %MP <sub>10</sub> ref (185,7-57,9 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>2,5</sub> (50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub> (150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|---|-------|---|------|---|------|
|      | P98   | PTA   | P98   | PTA  | P98   | PTA  |
| 2013 | -   | -     | -   | -    | -12,0   | -    |
| 2014 | -24,4   | -     | 70,7  | -    | -6,72   | -    |
| 2015 | -25,3   | -12,1 | 77,4  | -    | -7,90   | -    |
| 2016 | -30,2   | -12,7 | 80,1  | 25,0 | -13,9   | 1,13 |

-Años no válidos o sin monitoreo.



**Figura 17** Promedio tri-anual y percentil 98 para Talca.

La Figura 17 presenta la variación para todos los años medidos del P98 y promedio tri-anales considerando datos inválidos y la Tabla 12 la variación porcentual de esto datos (sólo válidos) en relación a la norma y su excedencia. Analizando en conjunto la Figura 17 y la Tabla 12, se observa que para MP<sub>10</sub>, el P98 y promedio tri-anual desde el 2005-2008 (datos obtenidos del PDA, considerando datos inválidos para el promedio de tres años) están sobre norma, motivo por el cual la zona fue declarada saturada.

Durante el 2009-2012 aún no se implementaba el sistema de monitoreo con disponibilidad de datos en línea, por lo que no es posible establecer lo ocurrido durante este periodo. Para el periodo 2013-2016 se observa que el p98 está bajo el valor reglamentado (-10% en promedio), para el único promedio tri-anual válido correspondiente a los años 2014-2016, está por un valor muy bajo sobre la norma (1,13%), por lo que se requiere de más mediciones y datos válidos para establecer si esta norma está superada o no.

Finalmente, el MP<sub>2,5</sub> se encuentra sobre la norma diaria y tri-anual, durante los últimos 3 años se han superado un 76% en promedio y 25% los valores de referencia, por lo que es recomendable tomar medidas adecuadas a esta fracción. Esto se observa también en los días de episodios críticos (Tabla 34 y 35 de anexo), donde para MP<sub>10</sub> este año se registró solo un día de alerta ambiental, mientras que para MP<sub>2,5</sub> 15 días de alertas y 5 preemergencias, situación que mejoró con respecto al año anterior donde se registraron 30 días de alertas y 4 pre-emergencias ambientales.

Finalmente vale la pena mencionar que la temperatura en esta ciudad presenta una tendencia al alza (4,2% por año,  $p < 0,05$ , resultados Tabla 6), lo cual puede influenciar en las emisiones generadas año a año en la ciudad, pero este efecto se esperaría ver en el  $MP_{2,5}$  que presenta una correlación mayor con esta variable (-0,38) pero no se observa en los resultados anteriores, lo cual se podría explicar por la tendencia a la baja (sin ser significativa estadísticamente) de la velocidad del viento (-4,6% por año, correlación de -0,39), lo que impediría la dispersión de las partículas.

### 3.5.2.2. Curicó

Curicó, a diferencia de Talca, fue declarada como zona saturada por  $MP_{2,5}$ , donde su PDA en elaboración está enfocado en el abatimiento de sólo esta fracción. En este caso, sólo se contaba con datos en línea para la evaluación de las medidas o descripción de la ciudad, por lo que los análisis realizados van desde el año 2013-2016.

Como los casos anteriores, la Figura 15 corresponde a las líneas de tendencia de MP para las mediciones disponibles (2013-2016), donde se evalúan ambas fracciones incluso aquella que no está considerada como saturada o superada, en este caso  $MP_{10}$ . De esta forma, es posible desprender de la figura que las tendencias de esta ciudad tienden a disminuir donde el  $MP_{10}$  es de 2,74 % ( $p < 0,01$ ) y 8,34% ( $p < 0,1$ ), teniéndose que en ambas fracciones la tendencia va sobre la norma anual de cada una.

La Tabla 13, presenta las variaciones porcentuales que se han tenido los años posteriores a la implementación del recambio de calefactores, de las concentraciones ambientales de MP, en base a las normas y el año de referencia.

Así, la Tabla 13 muestra que, para fines de norma, el P98 de  $MP_{10}$  se encuentra bajo el nivel de la norma, actualmente bajo un 6,7% de esta, pero, para el promedio tri-anual (2014-2016) se tiene una superación del 7,8%, por lo que se requiere de más mediciones que permitan obtener resultados representativos, aunque es posible establecer que la norma anual está superada y tomar medidas al respecto.

En cuanto al  $MP_{2,5}$ , es posible notar por qué la ciudad de Curicó está saturada por este contaminante, y cómo las medidas ejecutadas son efectivas, el P98 se acerca año a año al valor normado (20% aproximadamente por año), esto es un buen índice,

considerando que el PDA aún se encuentra en elaboración y sólo se han implementado medidas externas a este.

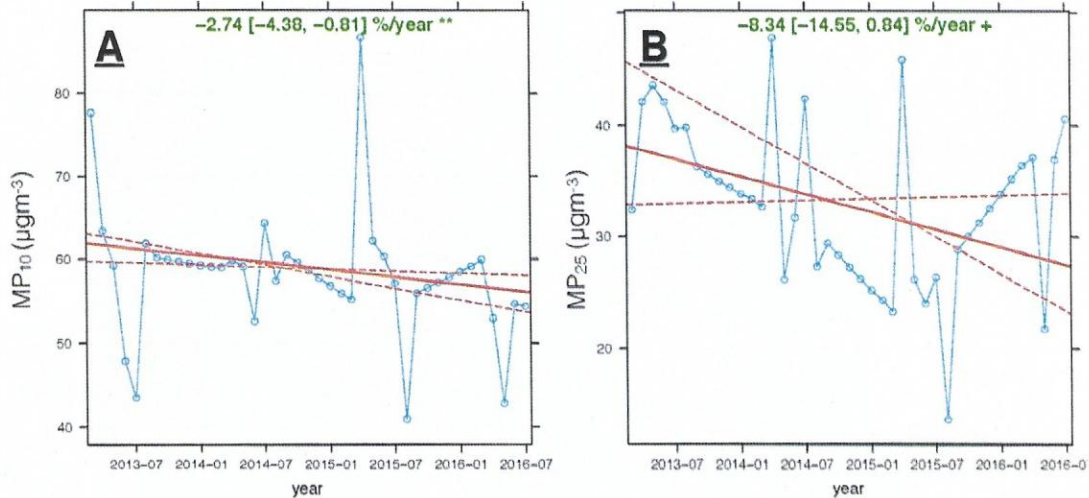


Figura 18 Tendencia para MP<sub>10</sub> (a) y MP<sub>2.5</sub> (b) para años medidos (2013-2016), Curicó.

Tabla 13 Diferencia porcentual con respecto a normas nacionales para Curicó.

| Año  | %MP <sub>2.5</sub> (50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub> (150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|---|------|---|------|
|      | P98   | PTA  | P98   | PTA  |
| 2014 | 90,7  | -    | -6,10   | -    |
| 2015 | 74,3  | -    | -2,00   | -    |
| 2016 | 55,6  | 37,3 | -6,70   | 7,80 |

-Años no válidos o sin monitoreo.

El promedio tri-anual de esta fracción pasa por lo mismo que el anterior, teniéndose la superación de la norma anual. Esta mejora se hace visible también en los días sobre norma pasando de 29 alertas y 17 pre-emergencias el 2013 a 5 alertas y 1 pre-emergencia el 2016 (Tabla 34 y 35, ver Anexo).

Todo esto se ve favorecido por las condiciones meteorológicas (Tabla 6) donde la temperatura y velocidad del viento aumentaron con estadística significativa ambas un 4,3% ( $p < 0,01$  y  $p < 0,05$ ) y la humedad relativa, que se relaciona con el MP fino disminuyó un 3,3% por año ( $p < 0,001$ ), por lo que se dan las condiciones ideales para la reducción de las concentraciones.



### **3.5.3. Región del Biobío**

En esta región se tiene 2 casos, las ciudades en valles montañosos (Chillán y Los Ángeles) y ciudades costeras, en planicie (Concepción, Chiguayante, Coronel y Talcahuano). Otra diferencia entre estas ciudades es el estado del PDA, Chillán con un PDA en vigencia, Los Ángeles con su anteproyecto publicado este año y las ciudades de la provincia de Concepción, donde su PDA está en proceso de elaboración. Se solicitó la información del recambio de calefactores para estas ciudades, pero no se obtuvo respuesta, esto es de suponer debido a lo reciente y no implementación de los PDA como tal en estas ciudades.

#### **3.5.3.1. Chillán y Chillán viejo**

El PDA de Chillán y Chillán Viejo, fue publicado este año y, a diferencia de los ya presentados, abarca ambas fracciones de material particulado, por lo que ahora ambas fracciones son evaluables pero al ser tan reciente se revisarán las medidas implementadas previamente, considerando que el plan piloto de recambio de calefactores de la ciudad inició el 2012.

Por ello, la Figura 19, correspondiente a los análisis de tendencia de ambas fracciones toman como periodo de evaluación desde 2013 al 2016, considerando la aplicación de medidas desde esta fecha, como la entrada en vigencia de la norma primaria de  $MP_{2,5}$ .

Esta presenta que para el  $MP_{2,5}$ , se ve un aumento significativo del 4,97% ( $p < 0,1$ ) y al igual que  $MP_{10}$  de 1,78% que no es significativo estadísticamente, pero aún así ambas tendencias van sobre el valor anual de la norma. Así, las medidas aplicadas previamente al PDA no han sido demasiado efectivas.

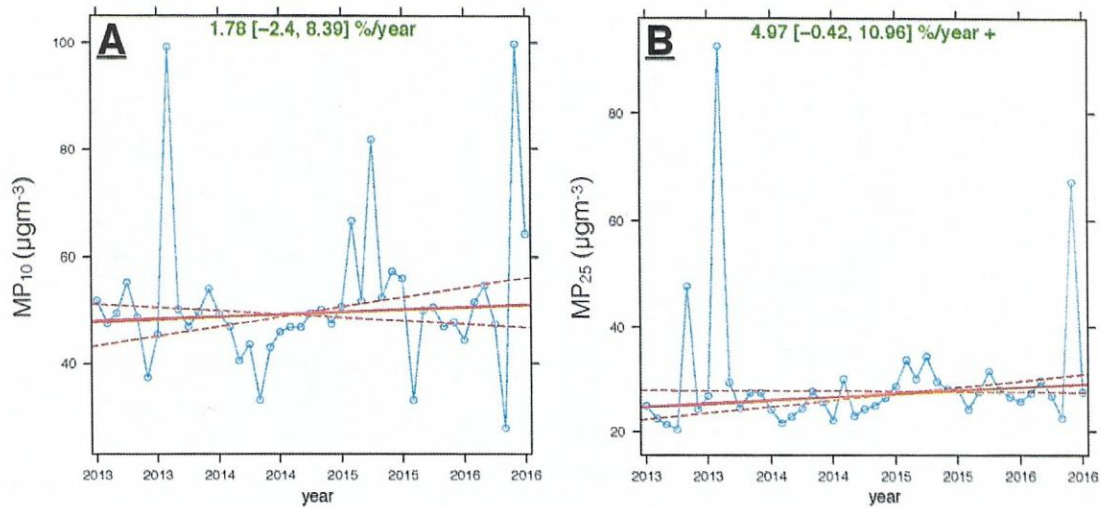


Figura 19 Tendencia para MP<sub>10</sub> (a) y MP<sub>2,5</sub> (b) para años medidos 2013-2016, Chillán.

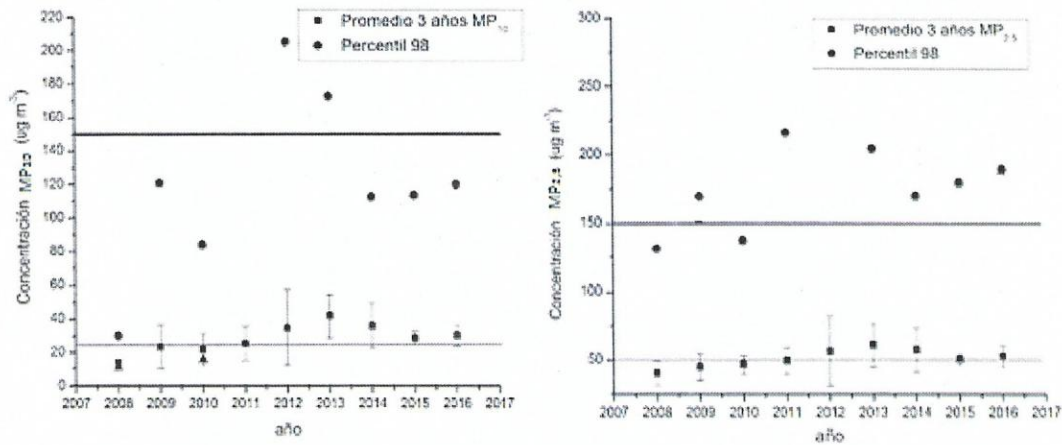


Figura 20 Promedio tri-anual y percentil 98 para Chillán.

Tabla 14 Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Chillán.

| año  | %MP <sub>2,5</sub> (124 µg m <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>10</sub> (185 µg m <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>2,5</sub> (50-20 µg m <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub> (150-50 µg m <sup>-3</sup> ) |     |
|------|--|-------|---|------|--|------|--|-----|
|      | P98  | PTA   | P98   | PTA  | P98  | PTA  | P98  | PTA |
| 2013 | 64,8   | -6,60 | 308   | -    | 15,2   | -    | -  | -   |
| 2014 | 37,0   | -39,2 | 239   | -    | -25,0  | -    | -  | -   |
| 2015 | 44,9   | -38,7 | 259   | 43,3 | -24,4  | 0,50 | -  | -   |
| 2016 | 53,0   | -35,1 | 279   | 51,2 | -20,0  | 5,70 | -  | -   |

-Años no válidos o sin monitoreo.

La Figura 20 presenta la variación del percentil 98 y promedio tri-anual para evaluar la norma en el periodo estudio, observándose disminuciones para  $MP_{10}$  y para  $MP_{2,5}$  reducciones hasta el año 2014 a partir del cual se da un aumento de estos valores.

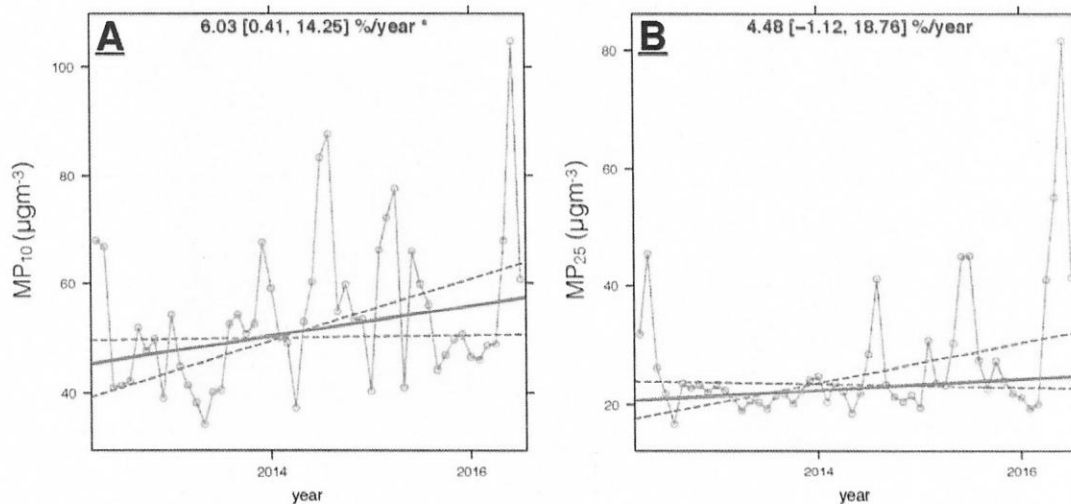
La Tabla 14 presenta sólo los años posteriores a la aplicación de medidas con resultados porcentuales de variación anual de los índices de evaluación del PDA. En ellas, es posible observar que en los primeros años de mediciones los percentiles 98 y promedio tri-anales se encuentran bajo la norma (P98  $MP_{10}$  -80% bajo norma el 2008), pero los años 2011 y 2012, estos valores se superaron, por lo que el PDA toma como año de referencia el 2012, donde la superación de norma para el  $MP_{2,5}$  es la diaria, el percentil 98 y para  $MP_{10}$  es el promedio tri-anual, norma anual. El 2013, es el máximo de todos los años estudiados, a partir del cual pareciera verse una disminución, la cual como se vio anteriormente no lo es en realidad para los datos horarios, donde a su vez, el promedio tri-anual es más alto este año que el anterior 5,7% sobre norma, pero 35% más bajo que el año de referencia. A diferencia del  $MP_{10}$ , el  $MP_{2,5}$ , está muy por sobre la norma diaria, con un P98 un 280% superior al valor normado y se suma la superación de la norma anual, sobre un 51%. Estos valores, vuelven más difícil la tarea inicial de este PDA, considerando que el valor al que se enfrenta al entrar en vigencia es el doble que el referenciado (53%).

Destaca por sobre las ciudades ya estudiadas los días de episodios críticos para  $MP_{2,5}$ , donde para este año se registraron 35 alertas, 16 pre-emergencias y 4 emergencias, donde estas situaciones se ven favorecidas por la disminución de un 16% por año de la velocidad del viento ( $p < 0,05$ ) y para resultados no estadísticamente significativos de amplios intervalos de confianza, la temperatura disminuye un 19%, y la humedad relativa aumenta un 11% (Tabla 6), de manera que se vuelve más propensa la formación y emisión de MP, disminuyendo su dispersión.

### **3.5.3.2. Los Ángeles**

Los Ángeles también ha sido declarado zona saturada para ambas fracciones, tomándose como año de referencia el 2013, por la superación de la norma diaria. Las estaciones de esta ciudad, cuentan con datos desde el 2012, sin ser este válido por lo que los análisis se realizan a partir del 2013.

La Figura 21 muestra la tendencia de ambas fracciones hasta la actualidad, donde para el  $MP_{10}$  fue en aumento 6,03% por año ( $p < 0,05$ ), mientras que para  $MP_{2,5}$ , la tendencia no es estadísticamente significativa. Los Ángeles a diferencia de las otras ciudades no presenta medidas previas, por lo que sólo se podrá observar desde el año de referencia hasta el presente año, donde aún no presenta o entra en vigencia el PDA.



**Figura 21** Tendencia para  $MP_{10}$  (a) y  $MP_{2,5}$  (b) para años medidos (2013-2016), Los Ángeles.

Nuevamente, la Tabla 15 presenta la variación porcentual de la concentración para los años posteriores a la toma de medidas, en este caso desde el 2014-2016. Ya que Chillán evalúa la superación y su PDA abarca ambas fracciones hay valores de referencia para  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ , a partir de los cuales se distinguirá que tanto han variado las concentraciones de la formulación del PDA hasta su aplicación.

Evaluando que tanto ha variado la concentración conforme al año de referencia y considerando que la entrada en vigencia del PDA será el año 2017, por lo que tal y como ocurrió en Chillán se espera encontrar diferencias. Es así, como la concentración de  $MP_{2,5}$  supera en un 223% actualmente y 92% sobre el año de referencia, lo cual ha ido aumentando año a año desde el año de referencia, lo mismo se da para el promedio tri-anual, donde está por sobre un 25% a la norma. Por su parte, el  $MP_{10}$  es menor al año de referencia para los años siguientes, pero incluso así está en ambos casos (diario y anual) sobre norma 35% y 20,4% respectivamente.

**Tabla 15** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Los Ángeles.

| Año  | %MP <sub>2,5</sub> ref (84 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>10</sub> ref (235 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>2,5</sub> (50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>10</sub> (150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|--|--|---|-------|---|------|
|      | P98  | P98  | P98   | PTA   | P98   | PTA  |
| 2014 | 38,4   | -15,1  | 132   | -     | 32,9  | -    |
| 2015 | 51,2   | -18,7  | 154   | -4,00 | 27,4  | 6,90 |
| 2016 | 92,3   | -13,8  | 223   | 26,0  | 35,1  | 20,4 |

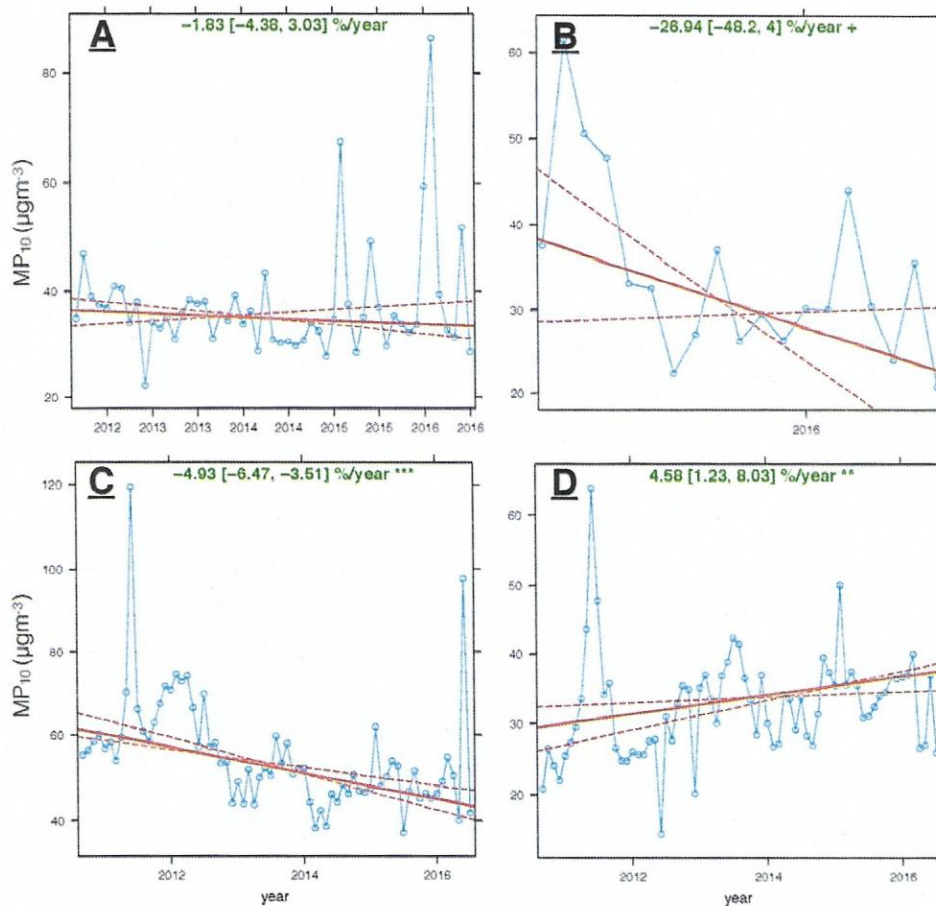
-Años no válidos o sin monitoreo.

Considerando las variables meteorológicas (ver Tabla 6), la temperatura ha aumentado un 1,4% por año ( $p < 0,1$ ), la humedad relativa disminuido un 3,6% ( $p < 0,001$ ) y la velocidad del viento aumentado 11% ( $p < 0,001$ ) la cual definiría una condición favorable para la disminución de las concentraciones pero en este caso al contrario de lo ya visto aumentan, esto puede explicarse a que la correlación existente entre las fracciones de MP con estas variables no son tan altas como las vistas en Chillán (0,24 en promedio) por lo que su efecto será más leve dependiendo así de otros factores, como puede ser el aumento poblacional o variables relacionadas al consumo de leña.

Debido a que el PDA de esta ciudad aún está en elaboración, aún resta establecer el total de las medidas a tomar, donde al observar los resultados obtenidos de episodios críticos (Tablas 34 y 35, ver Anexo) para este año (45 alertas, 35 pre-emergencias y 13 emergencias ambientales), es recomendable generar medidas que limiten las fuentes de emisión para aquellas situaciones en que los niveles de contaminación estén cerca al umbral de estas condiciones, considerando que las condiciones meteorológicas generan un impacto positivo bajo frente a la dispersión del MP.

### 3.5.3.3. Coronel, Concepción, Talcahuano y Chiguayante

Las ciudades presentadas a continuación, como se vio anteriormente, fueron declaradas como zona saturada por MP<sub>10</sub> el 2009, pero con la promulgación de la norma de MP<sub>2,5</sub>, se detuvo la elaboración de PDA, ya que se quiso incluir esta fracción en el PDA, de manera que el año 2015 se declararon estas ciudades como zonas saturadas por MP<sub>2,5</sub> (diario, 2013 año referencia) y unos meses después se inició la elaboración del PDA, sin embargo, a pesar de ser una zona declarada por ambas fracciones de MP, en el PDA en formulación sólo se busca el control de MP<sub>2,5</sub>, por lo que es probable que el PDA no se ajuste a las necesidades reales de la ciudad.



**Figura 22** Tendencia para  $MP_{10}$ , años medidos, Concepción (a), Coronel (b), Talcahuano (c) y Chiguayante (d).

La Figura 22, corresponde a las tendencias calculadas para las 4 ciudades estudiadas del Gran Concepción, sólo para  $MP_{10}$ , debido a la escasez de datos de  $MP_{2,5}$ , para todos los años de medición según la ciudad.

Las tendencias de estas ciudades son distintas entre sí, esto presenta que a pesar de que sean ciudades cercanas y el PDA que se aplique sea el mismo son las fuentes locales y características de cada una las que determinaran el comportamiento de las partículas en ellas. CP y CR, en todo el periodo están bajo la norma anual y presentan una tendencia a la baja, TH inicia en los primeros años sobre norma, pero ha disminuido de forma estadísticamente significativa (4,93% por año,  $p < 0,001$ ) y ahora está bajo ella y finalmente CG, la única con concentraciones en alza (4,58%,  $p < 0,01$ ), pero se encuentra aún bajo norma.

Las estaciones utilizadas en este estudio coinciden con las usadas para establecer la superación de la norma en el PDA, (Kingston College, Cerro Merquín y Punteras). Sin embargo, estas estaciones no poseen datos válidos para MP<sub>2,5</sub>, sólo la estación de la ciudad de Concepción lo hace para el año 2016, esto resulta ser una falla importante en el monitoreo y control de las estaciones y contaminación del sector, ya que para una zona que acoge una parte importante de la población tanto regional como del país, en la que no se asegure la exposición de esta a contaminantes es lamentable.

La Tabla 16, presenta la variación porcentual del percentil 98 y promedio tri-anual de estas ciudades con respecto a la norma nacional, diaria de MP<sub>10</sub> para todas, diaria de MP<sub>2,5</sub> sólo Concepción y anual MP10 para TH y CG, con datos válidos de las estaciones.

Así, el porcentaje estimado presentado en la tabla muestra que, para MP<sub>2,5</sub> se encontró que está en un 15,8% por sobre el valor normado para el promedio diario, mientras que para MP<sub>10</sub>, en todos los casos (ciudades y años) se observa que los valores están bajo norma, la única excepción se da para TH, donde el promedio trianual de 2014-2016 es un 3,3% superior al valor normado, pero se requiere al igual que en las otras ciudades mayor información.

**Tabla 16** Diferencia porcentual con respecto a normas nacionales para Concepción, Coronel, Talcahuano y Chiguayante.

| Año  | %MP <sub>10</sub> (P98 150 µgm <sup>-3</sup> ) |       |       |       | %MP <sub>2,5</sub> (P98, 50 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>10</sub> (PTA, 50 µgm <sup>-3</sup> ) |       |
|------|--|-------|-------|-------|---|--|-------|
|      | TH   | CR    | CG    | CP    | CP  | TH   | CG    |
| 2013 | -19,2  | -     | -46,6 | -51,9 | -   | -  | -     |
| 2014 | -25,5  | -     | -51,4 | -50,2 | -   | -  | -     |
| 2015 | -17,1  | -36,5 | -34,6 | -     | -   | -2,20  | -30,9 |
| 2016 | -5,90  | -42,1 | -47,0 | -23,9 | 15,8  | 3,30   | -31,4 |

-Años no válidos o sin monitoreo.

Las ciudades consideradas parte del Gran Concepción, destacan a diferencia de las otras ciudades del sur de Chile, por las altas emisiones de las fuentes móviles, pudiendo ser incluso equivalentes, un poco menor a las de combustión rural de leña de una de estas ciudades. De manera que el PDA del Gran Concepción ha de considerar dentro de sus medidas con mayor ímpetu que las otras ciudades en estudio, el control

de las fuentes móviles y renovación de transporte público. En la Tabla 17, se presentan las toneladas de MP emitidas por año desde el 2005 al 2014 en el Gran Concepción por fuentes móviles o vehículos motorizado. Es posible distinguir que, a diferencia de los resultados de emisiones para fuentes residenciales que combustionan leña, las fuentes móviles emiten en mayor proporción MP<sub>10</sub>, de manera que esto sirve para evidenciar que las fuentes que emiten o aportan dentro de la contaminación atmosférica difieren entre sí, por lo que como se mencionó, se requiere de una herramienta específica para cada fuente.

**Tabla 17** Emisiones por fuentes móviles en el Gran Concepción ton/año.

|                   | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MP <sub>10</sub>  | 1791 | 1982 | 1961 | 1958 | 2103 | 2353 | 2359 | 2325 | 2702 | 2730 |
| MP <sub>2,5</sub> | 400  | 449  | 456  | 424  | 446  | 543  | 549  | 509  | 545  | 554  |

Fuente: Elaborada a partir de datos del RETC.

Las variables meteorológicas (ver Tabla 6) solo fueron posibles de evaluar en la ciudad de Concepción, donde los coeficientes de correlación son bajos con las tres variables, no afectando de mayor manera sobre este contaminante. Aun así, las tendencias de la temperatura aumentan un 1,5% al año con significancia estadística, al igual que la humedad relativa, que disminuye un 1,1% favoreciendo la descontaminación.

#### 3.5.4. Región de la Araucanía

En esta región. Las ciudades de Temuco y Padre Las Casas, son las únicas que cuentan con estaciones de monitoreo, con ello son las ciudades donde se establece la saturación por este contaminante y genera un PDA. El PDA de Temuco y Padre Las Casas es el primer PDA de descontaminación generado para el sur del país, por lo tanto, es el más antiguo, además, ya cumplió la mitad del tiempo de aplicación, por lo que los resultados de este PDA son importantes, considerando que el 2015 se renovó el PDA, incluyéndose la saturación de MP<sub>2,5</sub>.



### 3.5.4.1. Temuco

Considerando que este PDA entro en vigencia el 2010, y la normativa de MP<sub>2,5</sub> el 2013, para hacer comparables ambas fracciones se toma el año 2012 como inicio del periodo post PDA, comparándolo a años previos a este como los sin aplicación de tal.

De esta manera, la Figura 23, presenta el escenario previo (2008-2011) y posterior (2012-2016) a la aplicación del PDA, para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, por medio del cálculo de tendencias.

De ellas, se obtiene para el periodo previo a la aplicación del PDA el MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> aumentan de forma estadísticamente significativa 7,55% ( $p < 0,001$ ) y 5,96% ( $p < 0,01$ ) asegurada por los valores de p. Para el periodo post aplicación del PDA se observa una disminución, del 2,9% ( $p < 0,1$ ) y 2,97% ( $p < 0,001$ ) por año donde nuevamente, los intervalos son menores a 0 por lo que sí es asegurable la efectividad del PDA por medio de las tendencias, aunque en ambos casos aún se está sobre la norma donde la disminución actual no se iguala a el aumento de los años previos.

En este caso, existen datos suficientes para evaluar de forma robusta la correlción del recambio de calefactores con los indices de evaluación del PDA, resultados que se presentan en la Tabla 18, de la cual se obtiene en todos los coeficientes una correlación negativa, es decir el recambio de calefactores ha sido una medida efectiva ante la disminución de las concentraciones, días y horas sobre norma, emisiones y episodios críticos, sin embargo la relación con la concentración es baja en relación a las demás, especialmente con MP<sub>2,5</sub>.

**Tabla 18** Coeficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Temuco.

|                   | Concentración | DSN   | HSN   | Emisiones | Ep. Críticos |
|-------------------|---------------|-------|-------|-----------|--------------|
| MP <sub>10</sub>  | -0,36         | -0,83 | -0,75 | -0,91     | -0,83        |
| MP <sub>2,5</sub> | -0,08         | -0,99 | -0,85 | -0,86     | -0,99        |

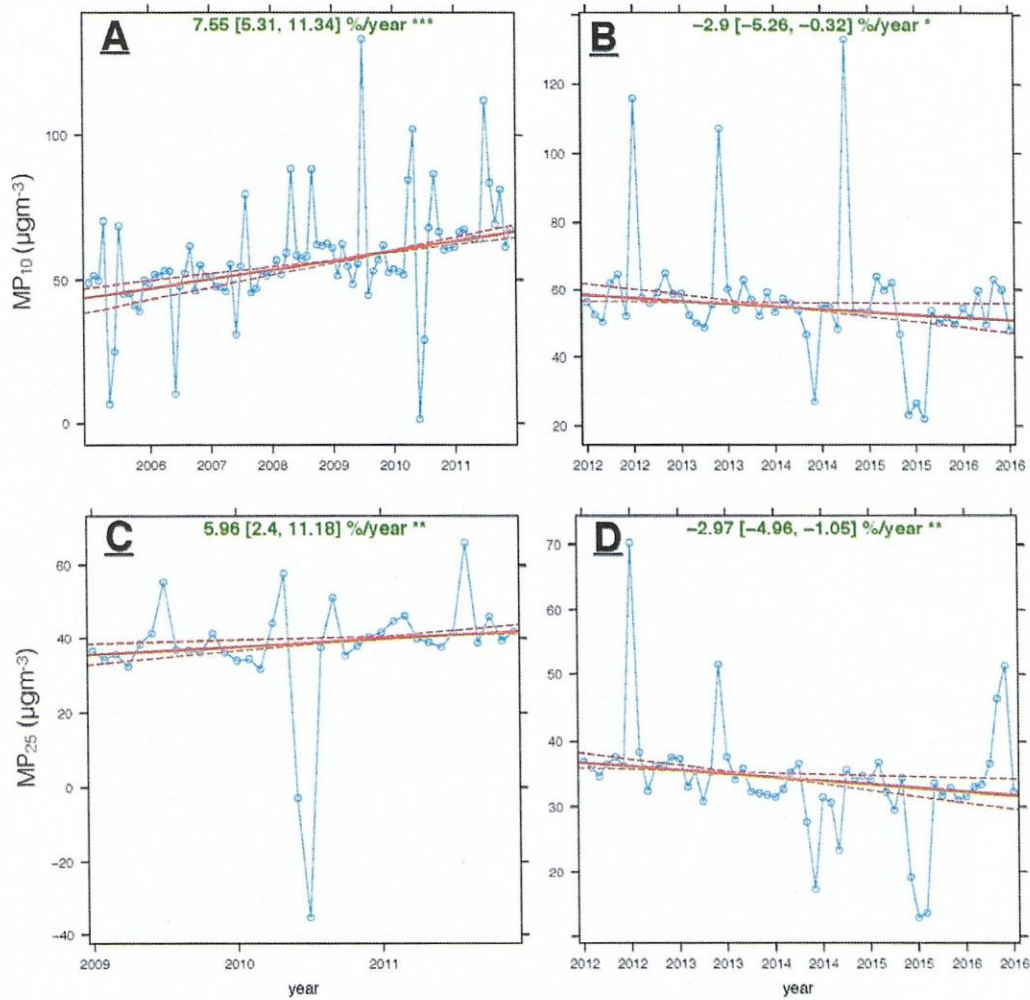


Figura 23 Tendencia para  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  años previo (a y c) y posteriores (b y d) a la aplicación del PDA, Temuco.

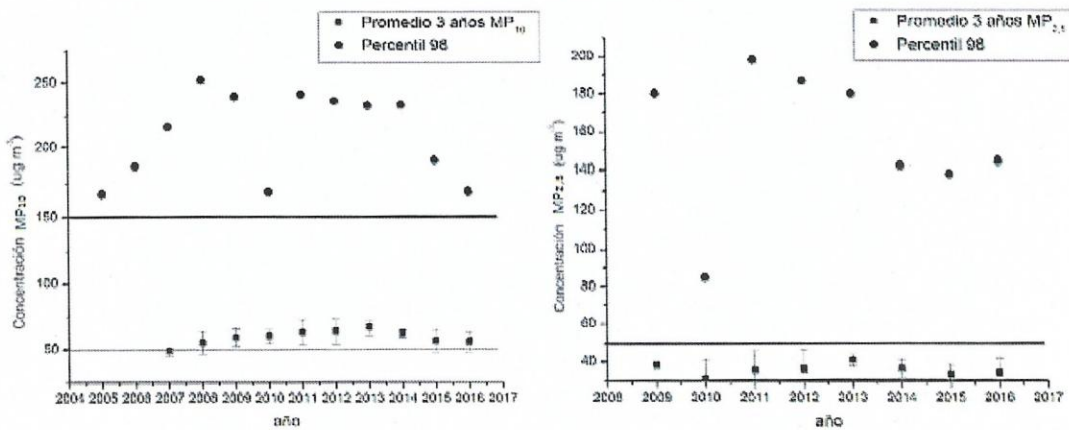


Figura 24 Promedio tri-anual y percentil 98 para Temuco.

**Tabla 20** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Temuco.

| Año  | %MP <sub>2,5</sub> ref (195 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>10</sub> ref (172 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>2,5</sub> (50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub> (150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |       |
|------|---|--|---|------|---|-------|
|      | P98   | P98  | P98   | PTA  | P98   | PTA   |
| 2005 | -   | -2,90  | -   | -    | 11,4  | -     |
| 2006 | -   | 7,90   | -   | -    | 23,7  | -     |
| 2007 | -   | 25,8   | -   | -    | 44,3  | -3,10 |
| 2008 | -   | 46,5   | -   | -    | 68,0  | 9,70  |
| 2009 | -   | 39,0   | -   | -    | 59,4  | 17,8  |
| 2010 | -   | -1,90  | -   | -    | 12,5  | 19,7  |
| 2011 | -   | 39,9   | -   | -    | 60,4  | 25,5  |
| 2012 | -4,10   | 37,1   | 274   | -    | 57,3  | 26,7  |
| 2013 | -7,70   | 35,1   | 260   | -    | 54,9  | 32,7  |
| 2014 | -27,0   | 35,3   | 184   | 82,7 | 55,1  | 22,9  |
| 2015 | -29,1   | 10,5   | 176   | 64,8 | 26,7  | 12,5  |
| 2016 | -25,9   | -1,60  | 189   | 70,5 | 12,8  | 11,5  |

-Años no válidos o sin monitoreo.

A partir de la Figura 24 y Tabla 20, que evalúan la normativa y su variación en el tiempo, considerando los valores inválidos (en Figura 24) y válidos (en Tabla 20) respectivamente para los años de estudio, es posible notar que en todo el periodo de análisis las normas diaria y tri-anual están superadas, incluso los años posteriores al PDA. Considerando, que el PDA estimaba para el 2015 alcanzar un P98 de 135 µgm<sup>-3</sup>, ósea un 23% de reducción respecto al año de referencia para MP<sub>10</sub>. Sin embargo, no se tuvo una reducción sino que un aumento del 10% respecto al año de referencia (2004), por lo que la primera meta del PDA no se logró, a pesar de eso desde el año 2010 se observa una disminución (como se vio en la tendencia) y el año 2016 se alcanzó el valor de referencia, estando realmente cerca (12,8%) del valor de la norma diaria. Esto mismo ocurre con el promedio tri-anual (sobre la norma en un 11,5% el 2016), por lo que es factible establecer que el PDA de Temuco está siendo efectivo, pero en forma retroactiva.

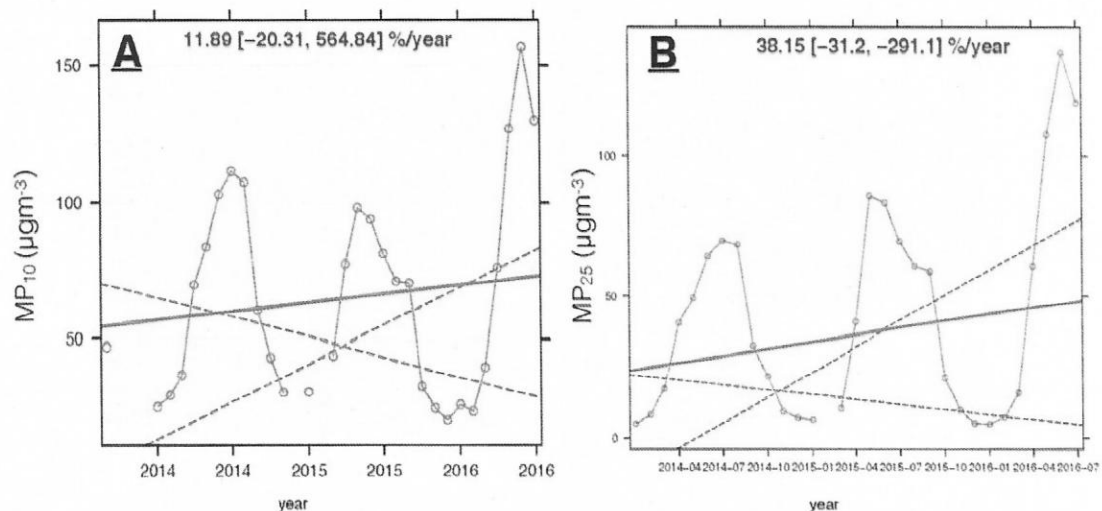
Para el MP<sub>2,5</sub>, el año de referencia tomado es del 2012, este valor se diferencia del calculado en este estudio, por lo que en este caso se evaluará con el establecido en el PDA, con esto se establece que para los desde el 2012-2016 se está por debajo el P98 de referencia, pero aún se está un 180% en promedio sobre la norma y para el promedio tri-anual un 70,5% para el año 2016, de manera que se espera que las concentraciones de esta fracción se vean atacadas tal y como se dio con la fracción gruesa.

Considerando los días sobre norma (Tablas 34 y 35, ver Anexo) es posible notar que los episodios críticos para  $MP_{10}$  han disminuido notablemente comparado a los años previos al PDA, pero el caso se complica si se analizan los episodios críticos de  $MP_{2,5}$  los cuales han aumentado año a año, alcanzando el 2016 96 días de episodios críticos (51 alertas, 36 pre-emergencias y 9 emergencias), lo que establece que la población ha estado expuesta en un corto a niveles peligrosos de concentración.

En esta ciudad, las variables meteorológicas (Tabla 6) tales como la temperatura humedad relativa y velocidad el viento, presentan una baja correlación con las fracciones de MP. La temperatura local ha aumentado un 1,5% por año ( $p < 0,001$ ), pero esta variación es pequeña por lo que puede no influenciar en la situación local.

### 3.5.4.2. Padre Las Casas

Para la ciudad de Padre Las Casas, aplica el mismo PDA que Temuco, por lo que se esperaría observar resultados similares a esta ciudad, pero, no es el caso. La Figura 25, presenta los resultados obtenidos al generar las líneas de tendencia en esta ciudad, donde abarca un periodo de tiempo de 2014- 2016, para ambas fracciones de MP. A pesar de que la estación de PL cuenta con datos, son pocos años disponibles, por lo que los análisis de tendencia no poseen la cantidad de data necesaria para dar un resultado estadísticamente significativo.



**Figura 25** Tendencia para  $MP_{10}$  (a) y  $MP_{2,5}$  (b) años posteriores (2014-2016) a la aplicación del PDA, Padre Las Casas.

Esto se observa en las tendencias, donde no es posible establecer un resultado, ya que las tendencias no son estadísticamente significativas, pero, se ve que ambas fracciones van en aumento.

El siguiente análisis refleja claramente que a pesar de ser ciudades vecinas estar ubicadas geográficamente cerca de implementar el mismo PDA los resultados son distintos, ya que en la Tabla 21, se presentan los coeficientes de correlación del recambio de calefactores con los indicadores de evaluación, los cuales resultan ser todos positivos a excepción de las emisiones, por lo que sólo las emisiones disminuyen conforme se instalan o renuevan los calefactores. Mientras, las demás variables aumentan en conjunto, demostrando que esta medida es insuficiente, probablemente porque la parte mayoritaria de los calefactores fue instalada en Temuco y no PL.

Este mismo efecto se da con las variables meteorológicas (Tabla 6) donde destacan el aumento de la temperatura en un 3,3 % por año y de 5,74% de la velocidad del viento ( $p < 0,1$ ), pero incluso con estas condiciones la Tabla 22 que presenta la diferencia porcentual de las concentraciones respecto a las normas y el valor de referencia en la elaboración del PDA, muestra que las concentraciones para  $MP_{2,5}$  ha aumentado durante los últimos 3 años, teniéndose un 303% más que lo establecido por la norma, con respecto al valor de referencia el 2014 y 2015 se tenían valores más bajos a este, pero para el 2016 se sobrepasó, por lo que se tendría una concentración mayor a cuando se inició la evaluación de  $MP_{2,5}$ . En cuanto al  $MP_{10}$ , el P98 se encuentra sobre un 50% a la norma pero ha disminuido paulatinamente a diferencia del promedio trianual que este año es mayor al anterior.

**Tabla 21** Coeficientes de correlación del recambio de calefactores con indicadores de evaluación del PDA (DSN días sobre norma, HSN hora sobre norma y episodios críticos), Padre Las Casas.

|            | Concentración | DSN  | HSN  | Emisiones | Ep. Críticos |
|------------|---------------|------|------|-----------|--------------|
| $MP_{10}$  | 0,93          | 0,93 | 0,89 | -0,91     | 0,64         |
| $MP_{2,5}$ | 0,94          | 0,78 | 0,79 | -0,86     | 0,88         |

**Tabla 22** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Padre Las Casas.

| Año  | %MP <sub>2,5</sub> ref (195 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>10</sub> ref (172 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>2,5</sub> (50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub> (150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|---|--|---|------|---|------|
|      | P98   | PTA  | P98   | PTA  | P98   | PTA  |
| 2012 | -   | -47,1  | -8,10   | -    | -39,3   | -    |
| 2013 | -   | -  | -   | -    | -   | -    |
| 2014 | -17,2   | 45,4   | 198   | -    | 66,7  | -    |
| 2015 | -3,90   | 38,2   | 245   | 92,8 | 58,5  | 29,1 |
| 2016 | 11,8  | 33,6   | 302   | 125  | 53,2  | 37,9 |

-Años no válidos o sin monitoreo.

### 3.5.5. Región de Los Ríos

La Región de los Ríos cuenta con sólo 2 estaciones de monitoreo de calidad de aire públicas o de representatividad poblacional. Una de ellas CESFAM Lago Ranco (en Ranco), presenta monitoreo de ambas fracciones de MP por solo 2 meses del 2011, por lo que la única estación que cumple con los criterios de selección en la región es Valdivia.

#### 3.5.5.1. Valdivia

La ciudad de Valdivia, posee actualmente su anteproyecto, a la espera de la entrada en vigencia PDA que se encuentra en elaboración. En este caso, se generan medidas frente ambas fracciones, considerando principalmente que en la ciudad una proporción importante del MP<sub>10</sub> corresponde a MP<sub>2,5</sub>, de manera que al reducir el MP<sub>2,5</sub> directamente habrá una disminución significativa de MP<sub>10</sub>.

Al igual que Los Ángeles, en Valdivia no es posible evaluar un pre o post escenario por lo que en la Figura 26, se presenta la tendencia para las fracciones de MP desde el año 2013, considerando que el PDA piloto de recambio de calefactores inicio ese año.

De esta manera, es posible observar que, para MP<sub>2,5</sub> se tuvo un incremento para el periodo estudiado de un 13,3% por año ( $p < 0,001$ ), siendo uno de los más altos registrados hasta el momento en comparación a las otras ciudades. Para MP<sub>10</sub>, se observa un aumento del 7,9% ( $p < 0,1$ ), alto de igual manera.

Con respecto a la evaluación de la normativa, la Tabla 23 resume la diferencia porcentual de la concentración o variable de ese año con el año de referencia (2013) y

la norma correspondiente a cada fracción de MP. Así, se observa igual que en las tendencias un aumento de las concentraciones, donde el  $MP_{2,5}$  aumenta año a año en promedio un 15% con respecto al año de referencia y un 50% respecto a la norma diaria. Para el año 2016, el promedio tri-anual presenta un aumento del 25% aprox. en relación a la norma.

El P98 de  $MP_{10}$  para el 2013, se encuentra bajo la norma diaria de la fracción, pero los años previos a este están por sobre, por lo que su variación es importante también, donde se observa un aumento y superación para ambos índices.

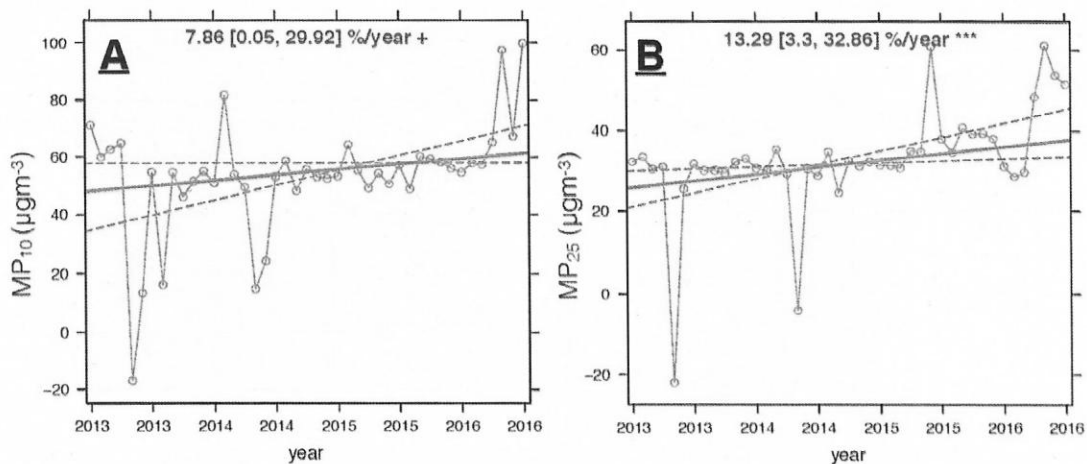


Figura 26 Tendencia para  $MP_{10}$  (a) y  $MP_{2,5}$  (b) años medidos (2014-2016), Valdivia.

Tabla 23 Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales, Valdivia.

|      | % $MP_{2,5}$ ref ( $110 \mu\text{gm}^{-3}$ ) | % $MP_{2,5}$ ( $50-20 \mu\text{gm}^{-3}$ ) |      | % $MP_{10}$ ( $150-50 \mu\text{gm}^{-3}$ ) |      |
|------|--|--|------|--|------|
| Año  | P98  | P98  | PTA  | P98  | PTA  |
| 2014 | -5,30  | 108  | 26,9 | 4,40                                       | 58,7 |
| 2015 | 14,0   | 150  | 26,4 | 19,4                                       | 58,0 |
| 2016 | 38,0   | 203  | 51,9 | 51,4                                       | 89,8 |

Viendo la Tabla 6, los valores meteorológicos de la ciudad, existe una disminución significativa estadísticamente de humedad relativa y velocidad del viento para esta ciudad (5,8%,  $p < 0,001$  y 4,44%,  $p < 0,001$ ), donde una de ellas beneficia y la otra perjudica el aumento de las concentraciones. Los coeficientes de correlación de las partículas con estas variables rondan los 0,3, en ambos tamaños de MP, por lo que la

influencia es baja. Valdivia es una de las ciudades con mayores episodios críticos para ambas fracciones, por lo que se hace hincapié en generar medidas de control a corto plazo, para evitar la alta saturación de partículas por muchas horas seguidas.

### 3.5.6. Región de Los Lagos

En esta región se da una situación similar a la Región anterior, donde además de la estación "Osorno" de la ciudad con el mismo nombre, se encuentra la estación Entre Lagos, la cual sólo se operó por sólo dos meses del año 2011, por lo que no califica en este estudio. Otra estación en estas condiciones era Chiten norte, que no poseía valores horarios y la estación Mirasol, en Puerto Montt, estudiada como un caso especial. Esto deja a Osorno como una de las ciudades con mayor tiempo de mediciones desde el 2008 para  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  y a su vez, registra alto índices de contaminación.

#### 3.5.6.1. Osorno

Osorno, se ve beneficiado en cierto sentido por ser una ciudad reciente con PDA, ya que su plan contempla  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ , por lo que existe un mayor control frente al MP respirable en la ciudad. Osorno también fue una de las ciudades donde el recambio de calefactores se aplicó antes que el PDA (2012), siendo a su vez el año de referencia del PDA, por lo que nuevamente se evalúa desde el 2013.

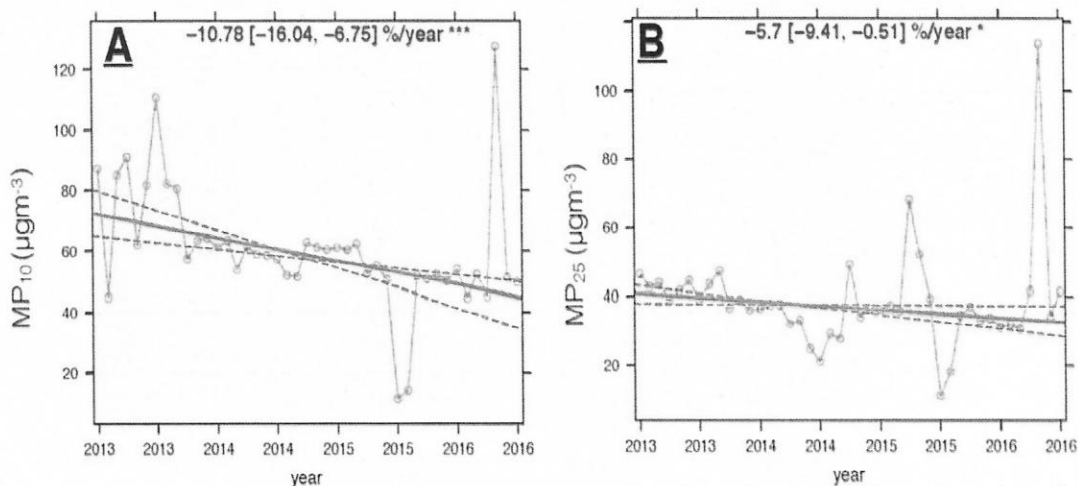


Figura 27 Tendencia para  $MP_{10}$  (a) y  $MP_{2,5}$  (b) para años medidos (2013-2016), Osorno.



La Figura 27, presenta las tendencias para los periodos posteriores a la aplicación de medida para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>. Los resultados presentados son alentadores, en ambas fracciones se observa una disminución significativa estadísticamente 10,78% y 5,7% por año para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> respectivamente (p<0,001 y p<0,05), en este caso las concentraciones disminuyeron con respecto al año de referencia, y están en baja, lo cual le da al PDA un buen inicio, facilitando su misión.

En la Tabla 24, se presentan los resultados obtenidos para la evaluación del PDA conforme a la diferencia porcentual con respecto al año de referencia para formulación de PDA y la norma, para años posteriores a la implementación de medidas. Esta ciudad fue definida la superación de norma diaria y anual para ambas fracciones, por lo que, por un lado, se tiene una mejora considerable en relación al año de referencia en todos los casos mencionados. Sin embargo, desde el 2014 para MP<sub>2,5</sub> se tiene un ligero aumento que aleja la realidad de la meta perseguida, más a partir de las tendencias se podría indicar que no es significativo estadísticamente. Al contrario, el MP<sub>10</sub>, si disminuye, encontrándose por debajo del año de referencia y notablemente más cerca de la norma (daría y anual) en comparación al MP<sub>2,5</sub>. Las condiciones meteorológicas (Tablas 6) también juega un papel a favor, donde la temperatura aumenta manera estadísticamente significativa (1,1%, p<0,01 por año).

**Tabla 24** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Osorno.

| Año  | %MP <sub>2,5</sub><br>ref (312-65 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>10</sub><br>ref (493-118 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>2,5</sub><br>(50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |      | %MP <sub>10</sub><br>(150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|---|-------|---|-------|--|------|--|------|
|      | P98   | PTA   | P98   | PTA   | P98  | PTA  | P98  | PTA  |
| 2013 | -45,5   | -     | -43,0   | -     | 240  | -    | 87,2   | -    |
| 2014 | -46,9   | -     | -47,3   | -     | 231  | -    | 73,3   | -    |
| 2015 | -41,5   | -     | -49,9   | -     | 265  | -    | 64,7   | -    |
| 2016 | -31,0   | -38,8 | -51,3   | -51,1 | 330  | 98,8 | 60,2   | 15,3 |

-Años no válidos o sin monitoreo.

Considerando esto, es de esperar que los episodios críticos se vean controlados o disminuidos de igual manera, lo cual no ocurre, siendo la ciudad de Osorno una de las con mayor cantidad de días sobre los umbrales definidos como episodios críticos en ambas fracciones (Tablas 34 y 35, ver Anexo). Con esto se establece que aunque la

superación de norma y saturación por MP se establece con resultados a largo plazo (anuales), se dan concentraciones peligrosas, agudas en periodos cortos (días u horas), las cuales para los resultados de la Tabla 24 se ven atenuados.

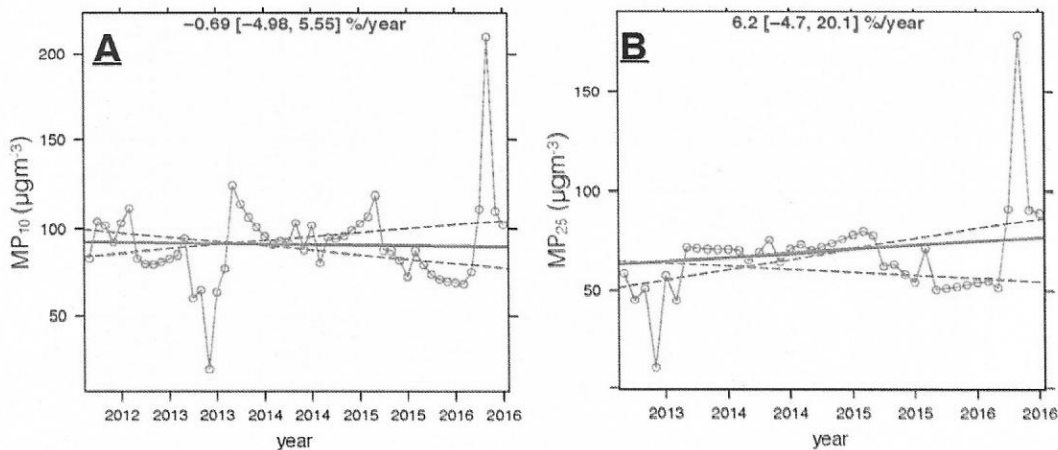
### 3.5.7. Región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

Al igual que en las regiones anteriores solo una ciudad de esta región calificó para el estudio, pero a diferencia de las otras en esta sólo había estaciones de monitoreo en esta ciudad, siendo Coyhaique la más importante, capital regional y de mayor población.

#### 3.5.7.1. Coyhaique

Coyhaique es de las ciudades que presentan medidas previas al PDA (2011, recambio de calefactores), el cual entró en vigencia el 2016, por lo que se espera ver un resultado positivo.

Por el contrario, a lo esperado, la Figura 28 que presenta las estimaciones de tendencias lineales de MP para el periodo 2012-2016, que indica que en esta ciudad ambas fracciones no tienen tendencias estadísticamente significativas. De esta manera, es complejo estimar el efecto de la toma de medidas en la ciudad. El que la tendencia no presente significancia estadística puede estar asociado a la falta de valores para la evaluación o a que es muy variable en el tiempo de estudio para establecer una.



**Figura 28** Tendencia para MP<sub>10</sub> (a) y MP<sub>2.5</sub> (b) para años medidos (2012-2016), Coyhaique.

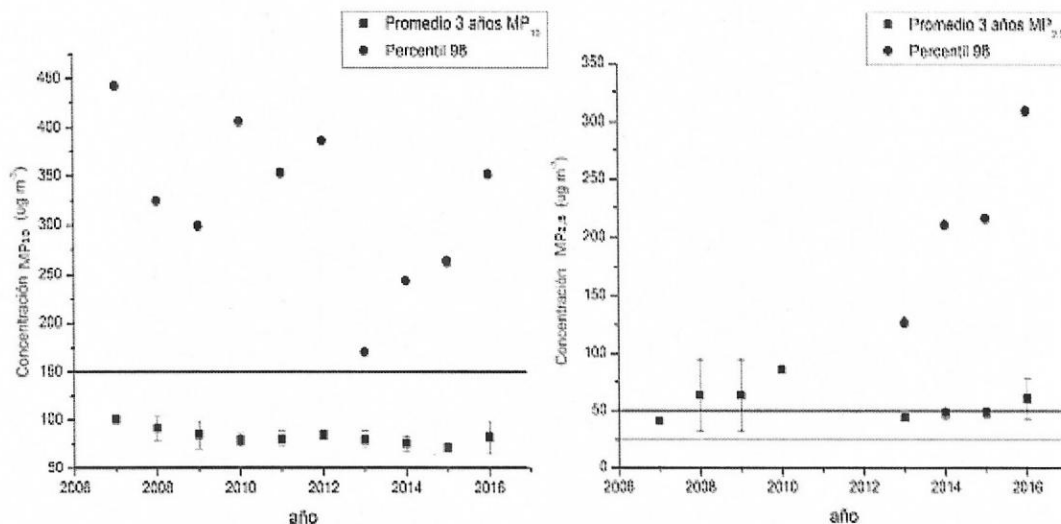


Figura 29 Promedio tri-anual y percentil 98 para Coyhaique.

La Figura 29 presenta los niveles de percentil 98 y promedio tri-anales de los años medidos, en relación a la norma. Estos, permiten establecer que las normas de ambas fracciones están superadas en todos los años de medición, siendo prácticamente constante, lo cual se observa también en los resultados de la Tabla 25, que expresa los resultados de la figura anterior de manera porcentual, considerando el año de referencia para la formulación del PDA. MP<sub>10</sub> está bajo el valor de referencia tanto el P98 como el promedio tri-anual, valor que se repite para la norma de MP<sub>2,5</sub>, pero no para el P98 donde este año se supera en un 518% la norma diaria, siendo hasta el momento el mayor porcentaje de superación, en las ciudades analizadas.

Para la fracción MP<sub>10</sub>, se presenta un aumento año a año al igual que MP<sub>2,5</sub> pero ciertamente más bajo, 134% para P98 y 64,7 para el promedio tri-anual de 2012-2014. Sabiendo esto, los próximos años de monitoreo ha de esperarse que se cuente con el porcentaje requerido de datos validados ya que, actualmente no es posible obtener los datos de promedio tri-anual, de manera que, para evaluar el PDA, será necesario mejorar el sistema de monitoreo.

Coyhaique es la ciudad que presenta la mayor cantidad de días de episodios críticos (Tabla 34 de Anexo) para MP<sub>10</sub> entre todas las ciudades en estudio (30 alertas, 31 pre-emergencias y 21 emergencias para 2016), lo cual llama la atención considerando que son pocas las ciudades que presentan alta frecuencia de episodios

críticos para MP<sub>10</sub>. En el caso de MP<sub>2,5</sub>, también es una de las ciudades con muchos días en estas condiciones (Tabla 35 de Anexo) donde destaca la cantidad de emergencias para este año, siendo 51 días registrados.

**Tabla 25** Diferencia porcentual con respecto al año de referencia del PDA y normas nacionales para Coyhaique.

| Año  | %MP <sub>10</sub><br>ref (403-84 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>2,5</sub><br>(50-20 µgm <sup>-3</sup> ) |       | %MP <sub>10</sub><br>(150-50 µgm <sup>-3</sup> ) |      |
|------|--|-------|--|-------|--|------|
|      | P98  | PTA   | P98  | PTA   | P98  | PTA  |
| 2012 | -4,00  | -     | -  | -     | 157  | -    |
| 2013 | -  | -     | -  | -     | -  | -    |
| 2014 | -39,6  | -2,00 | 321  | -14,2 | 62,2   | 64,7 |
| 2015 | -34,6  | -     | 332  | -     | 75,7   | -    |
| 2016 | -12,7  | -     | 518  | -     | 134  | -    |

-Años no válidos o sin monitoreo.

Esto indica que existen datos horarios que al incluirlos en el promedio móvil de 24 horas dan por sobre los 330 µgm<sup>-3</sup>, situación que se arrastra de años anteriores (22 días el 2015 y 29 el 2014), por lo que fuera de cualquier aplicación del PDA, se requiere un actuar inmediato frente a estas situaciones, evitar que las concentraciones superen a normativa diaria y los niveles previos de emergencia ya que es complejo disminuir las concentraciones en este caso.

Considerando que esta ciudad corresponde a la de mayor índice de consumo de leña, el PDA prohíbe el uso de más de un calefactor entre las 18 y 06 horas (en caso de no haber sido parte del recambio de calefactores o acrediten cumplir la norma de emisión, DSN°39, 2011, MMA), en caso de alerta y preemergencia, tomándose esta misma medida para emergencia, pero por 24 horas (aplicando de igual manera a calderas), en este caso, se busca revertir la contaminación disminuyendo las fuentes de emisión pero, considerando las condiciones de estabilidad atmosférica para el invierno-otoño en este caso la concentración de MP se dispersará poco, por lo que es probable que para la actualización del PDA la medida en caso de emergencia sea aplicada para pre-emergencia, para evitar llegar al nivel de emergencia.

Es posible observar una mejora en la calidad del aire durante el año 2014, lo cual se asocia a las medidas del PDA, como el 35% del cumplimiento de la meta del recambio de calefactores, pero durante el año 2015 y 2016 se tiene un deterioro, probablemente por un retraso en la continuidad de los recambios u otros factores como el crecimiento de la población en la zona.

### 3.5.8. Casos especiales

Estos casos corresponden a las ciudades de Puerto Montt y Punta Arenas, ambas ciudades no han sido declaradas como zonas saturadas o latentes, por lo que no poseen o requieren PDA, por lo que sirven como comparación con respecto a las otras ciudades.

#### 3.5.8.1. Puerto Montt

Se ubica al final de la depresión intermedia estando en la costa, lo cual beneficia su ventilación con respecto a las demás ciudades, presenta un consumo de leña alto y en comparación al resto de las ciudades durante los últimos años ha tendido a aumentar su temperatura un 13,6% por año ( $p < 0,001$ , Tabla 6), donde se espera una disminución de las emisiones asociadas a calefacción.

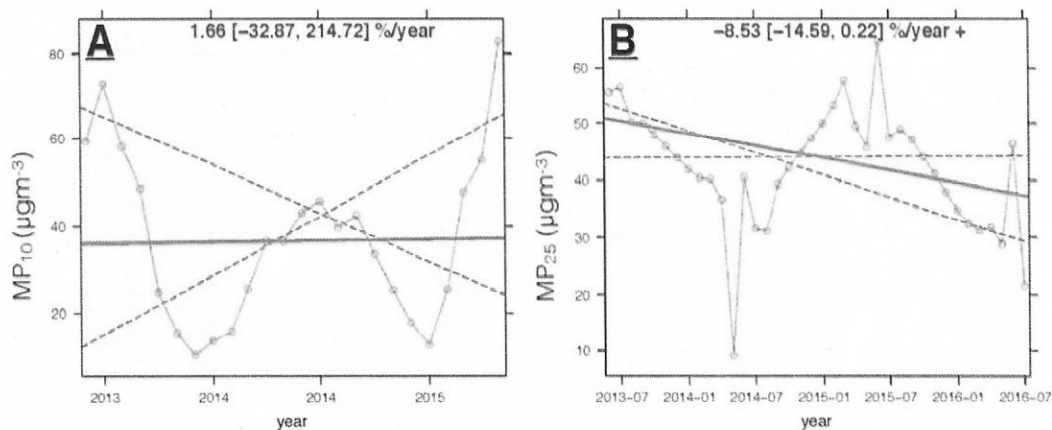


Figura 30 Tendencia para MP<sub>10</sub> (a) y MP<sub>2,5</sub> (b) para años medidos (2012-2016), Puerto Montt.

Así, la Figura 30, correspondiente a los análisis de tendencia para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> para el periodo 2013-2016, muestra que no hay tendencias estadísticamente significativas ( $p > 0,1$ ) y presentan una ligera alza de concentraciones para MP<sub>10</sub>, pero el MP<sub>2,5</sub> se asocia positivamente con lo esperado en base a la temperatura, disminuyendo un 8,53% por año ( $p < 0,1$ ), siendo significativo con un intervalo de confianza del 90%.

La Tabla 26 presenta las variaciones porcentuales para evaluar la normativa en esta ciudad desde el año 2014 al 2016. Observando la tabla, aplicando la normativa, se obtiene un resultado inesperado, donde el MP<sub>2,5</sub> supera la norma diaria correspondiente, ya que los P98 para los años 2014 y 2016 son un 89,7% y 151,7% superiores al valor normado, por lo que es posible establecer que esta ciudad requiere de medidas para el control de este contaminante, las cuales actualmente no están siendo aplicadas.

**Tabla 26** Diferencia porcentual año con respecto a normas nacionales para Pto. Montt

| Año  | %MP <sub>2,5</sub> (50 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>10</sub> (150 µgm <sup>-3</sup> ) |
|------|--|--|
|      | <b>P98</b>                                 | <b>P98</b>                                 |
| 2014 | 89,7                                       | -34,7                                      |
| 2015 | -  | -  |
| 2016 | 151  | -  |

-Años no válidos o sin monitoreo.

Destaca en esta ciudad la escasez de datos, donde se inició el monitoreo el año 2013 pero sólo 2 de los años medidos corresponden a años válidos, por lo que establecer a superación de la norma, para lo que se requiere la validez de tres años calendario se vuelve complejo de definir. Luego de observar la superación de norma diaria (Figuras 9, 10 y 11), no es de extrañar los días de episodios críticos registrados el 2016 (Tablas 34 y 35, ver Anexo), siendo 31 alertas, 16 pre-emergencias y 2 emergencias, por lo que se hace un llamado de atención, con el fin de estudiar esta ciudad más a fondo, previniendo a llegar a casos como los vistos previamente.

### 3.4.8.2. Punta Arenas

Punta Arenas, en este análisis sería la ciudad modelo, en términos de calidad de aire para las ciudades del sur del país. Teniendo un poco más del doble de la población y el cuádruple de viviendas que Coyhaique, su ubicación en una planicie, la alta velocidad de vientos registrada, como el alto consumo de gas para calefacción en vez de leña, se dan las condiciones favorables con respecto al resto de las ciudades analizadas, lo cual impulsa bajas concentraciones de MP.

Esta ciudad presenta emisiones muy bajas asociadas a leña, esto debido a que esta ciudad tiene acceso gas natural a un bajo costo (\$95,5 comparado a \$732,8 por litro para la octava región) (ENAP 2010). Todo esto, se ve reflejado en la Tabla 27, donde se presentan los resultados porcentuales de diferencias entre la norma y los valores locales, donde se está por más de un 70% bajo ella casi todos los índices.

**Tabla 27** Diferencia porcentual año con respecto a normas nacionales para Punta Arenas.

| Año  | %MP <sub>2,5</sub> (50 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>2,5</sub> (20 µgm <sup>-3</sup> ) | %MP <sub>10</sub> (150 µgm <sup>-3</sup> ) |
|------|--|--|--|
| 2014 | -73,8                                      | -  | -91,3                                      |
| 2015 | -77,1                                      | -  | -  |
| 2016 | -77,2                                      | -73,8                                      | -  |

-Años no válidos o sin monitoreo.

#### IV. DISCUSION Y COMENTARIOS FINALES

Son diversos los ejes de trabajo y ciudades estudiadas, de manera que a continuación se presentan una síntesis y discusión que incluye la mayor parte de los resultados presentados.

La Tabla 28 para la fracción  $MP_{10}$  y la Tabla 29 para la fracción  $MP_{2,5}$  resumen los resultados más importantes obtenidos en este estudio. Destacan la evaluación de las herramientas de gestión, si se declaró la zona como saturada o no, en que proceso se encuentra el PDA, para los casos en que el plan aún no entraba o entra en vigencia se ve si se toman medidas o no. Para evaluar los avances de los PDA se establece el porcentaje de calefactores renovados con respecto a la meta del plan y si las emisiones de MP por consumo residencial de leña aumenta (+) o disminuye (-). Finalmente, para resumir los índices de calidad de aire que definen la efectividad de los planes se evalúa si la ciudad supera los 50 días sobre norma diaria, si se superan los 20 episodios críticos al año, esto en relación al promedio de los últimos tres años estudiados. Aumento (+) o disminución (-) de las tendencias para concentraciones de MP y finalmente la diferencia porcentual de los valores actuales (promedio de últimos tres años, 2014-2016) para norma diaria (evaluada de percentil 98 anual) y norma anual (de promedios aritméticos tri-anales).

La Estrategia 2014-2018, que impulsa la elaboración de planes de descontaminación a lo largo de Chile ha resultado ser efectiva, considerando el año 2016 como la mitad del periodo de aplicación, la implementación de 5 nuevos planes de descontaminación en las ciudades del sur del país (Talca, Chillán, Temuco, Osorno y Coyhaique) y la declaración de nuevas 4 zonas saturadas con planes en elaboración o ante proyectos publicados (Curicó, Los Ángeles, Concepción y Valdivia), permite establecer el compromiso del gobierno con la población, ante el aire que respiran día a día. Sin embargo, aún queda mucho camino por recorrer. Considerando que aún hay ciudades que sólo regulan una de las de fracciones de tamaño de MP, las cuales idealmente han de ser tratadas en conjunto.



**Tabla 28** Resumen de resultados obtenidos para MP<sub>10</sub>, para ciudades en estudio.

| Ciudad | Declarada zona saturada | Estado PDA | Se toman medidas previas | % de calefactores cambiados respecto meta | Emisiones MP | Más de 50 días sobre norma | Más de 30 días de Ep. Críticos | Tendencia en ciudad | Norma diaria % | Norma anual % |
|--------|-------------------------|------------|--------------------------|---|--------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|---------------|
| RG     | Si                      | V          | NA                       | 12  | +            | No                         | No                             | -                   | 17             | 56            |
| RE     | Si                      | V          | NA                       |   | +            | No                         | No                             | ---                 | -34            | -4            |
| SF     | Si                      | V          | NA                       |   | +            | No                         | No                             | -                   | -27            | -9            |
| CU     | No                      | NP         | Si                       | NA  | +            | No                         | No                             | -                   | -10            | 1             |
| TL     | Si                      | V          | Si                       | 5,40                                      | +            | No                         | No                             | -                   | -5             | 7             |
| CL     | Si                      | V          | Si                       | 5   | +            | No                         | No                             | +                   | -23            | 3             |
| LA     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | No                         | No                             | NS                  | 32             | 14            |
| TH     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | No                         | No                             | -                   | -16            | 1             |
| CR     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | No                         | No                             | ---                 | -40            | NA            |
| CG     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | No                         | No                             | +                   | -44            | -31           |
| CP     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | No                         | No                             | NS                  | -37            | NA            |
| TM     | Si                      | V          | NA                       | 42 (19)                                   | +            | No                         | Si                             | -                   | 32             | 15            |
| PL     | Si                      | V          | NA                       |   | +            | No                         | Si                             | NS                  | 62             | 30            |
| VL     | Si                      | E          | Si                       | 2   | +            | Si                         | Si                             | ++                  | 25             | 68            |
| OS     | Si                      | V          | Si                       | 2   | +            | Si                         | Si                             | ---                 | 66             | 15            |
| PM     | No                      | NP         | No                       | NA  | +            | No                         | Si                             | NS                  | -35            | NA            |
| CY     | Si                      | V          | Si                       | 35  | +            | Si                         | Si                             | NS                  | 91             | 65            |
| PA     | No                      | NP         | No                       | NA  | +            | No                         | No                             | NA                  | -91            | NA            |

**Tabla 29** Resumen de resultados obtenidos para MP<sub>2,5</sub>, para ciudades en estudio.

| Ciudad | Declarada zona saturada | Estado PDA | Se toman medidas previas | % de calefactores cambiados respecto meta | Emisiones MP | Más de 50 días sobre norma | Más de 30 días de Ep. Críticos | Tendencia en ciudades | Norma diaria % | Norma anual % |
|--------|-------------------------|------------|--------------------------|---|--------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------|---------------|
| RG     | No                      | NP         | NA                       | 12%                                       | +            | Si                         | No                             | --                    | 110            | 63            |
| RE     | No                      | NP         | NA                       |   | +            | NA                         | NA                             | NA                    | NA             | NA            |
| SF     | No                      | NP         | NA                       |   | +            | NA                         | NA                             | NA                    | NA             | NA            |
| CU     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | Si                         | Si                             | --                    | 76             | 25            |
| TL     | No                      | NP         | Si                       | 5,40%                                     | +            | Si                         | Si                             | NS                    | 74             | 37            |
| CL     | Si                      | V          | Si                       | 5%  | +            | Si                         | Si                             | +                     | 259            | 47            |
| LA     | Si                      | E          | Si                       | NA  | +            | Si                         | Si                             | NS                    | 170            | 11            |
| TH     | Si                      | E          | Si                       | NA  | -            | NA                         | NA                             | NA                    | NA             | NA            |
| CR     | Si                      | E          | Si                       | NA  | -            | NA                         | NA                             | NA                    | NA             | NA            |
| CG     | Si                      | E          | Si                       | NA  | -            | NA                         | NA                             | NA                    | NA             | NA            |
| CP     | Si                      | E          | Si                       | NA  | -            | NA                         | NA                             | NA                    | 16             | NA            |
| TM     | Si                      | V          | NA                       | 42%                                       | +            | Si                         | Si                             | -                     | 183            | 72            |
| PL     | Si                      | V          | NA                       | (19%)                                     | +            | Si                         | Si                             | NS                    | 220            | 93            |
| VL     | Si                      | E          | Si                       | 2%  | +            | Si                         | Si                             | +++                   | 153            | 55            |
| OS     | Si                      | V          | Si                       | 2%  | +            | Si                         | Si                             | --                    | 275            | 99            |
| PM     | No                      | NP         | No                       | NA  | +            | Si                         | Si                             | --                    | 120            | NA            |
| CY     | No                      | NP         | Si                       | 35%*                                      | +            | Si                         | Si                             | NS                    | 390            | -14           |
| PA     | No                      | NP         | No                       | NA  | +            | No                         | Si                             | NA                    | -77            | -73           |

V=Vigente, E= en elaboración, NA= No aplica, no hay, no se puede calcular, NS no significativo estadísticamente.

+ en aumento, - a la baja.

Para tendencias: +/- <0,1 a 4,9%, ++/-- 5 a 9,9%, +++/--- 10% o mas

(Aplicable a también a Tabla 28)

Fuente Elaboración Propia.

Entre las mayores fallas existentes en las estaciones de monitoreo son la falta de monitoreo de  $MP_{2,5}$ , la ausencia de estaciones para ciudades con mayor población, mediciones inválidas por sobre el 30%. Todo esto seguido por la aplicación tardía de planes basados en referencias muy por debajo de la contaminación actual generan un retroceso en el alcance de las metas, tal como se ve en muchas de las ciudades en este estudio (aquí nombrar algunas como ejemplo).

Se ha generado un gran avance en cuanto a la disponibilidad de datos en esta área, gracias a los servicios en línea, pero aún no es suficiente y su uso está asociado a la educación ambiental de la población, ante lo cual se trabaja en la actualidad.

Las demás medidas son difíciles de cuantificar como es el caso del recambio de calefactores, pero a partir de la superación de norma en horas, días y episodios críticos (igualmente, horas y días), se puede establecer que las medidas enfocadas atenuar la contaminación a corto plazo no presentan avances visibles, por su corto tiempo de aplicación, donde PL, VL, OS y CY presentan más de 30 días de episodios críticos para  $MP_{10}$  este año.

Para  $MP_{2,5}$  se da la misma situación, pero en todas las ciudades donde se monitorea esta fracción, a excepción de RG. En todos los planes, se prohíbe el uso de más de un calefactor y calderas por un periodo de tiempo, con el fin de disminuir las emisiones, pero se realiza cuando las concentraciones ya están en situación crítica, por lo que idealmente se debería pronosticar previamente si se alcanzarán estas concentraciones, aplicando modelos que pronostiquen de forma oportuna la tendencia en aumento del material particulado que generara estas situaciones de emergencia.

Finalmente, la efectividad de aplicación de los PDA, varia con cada ciudad, pero depende más que nada del tiempo en el cual se desarrollan, se observan progresos para la atenuación de  $MP_{10}$ , pero, el  $MP_{2,5}$  es el gran problema actual, estando por sobre la norma horaria por más de 50%, 100% y hasta un 500% en algunas ciudades (CY), no siendo monitoreado debidamente ni considerado en los planes, de manera que aún queda mucho por hacer. Con respecto al control de  $MP_{2,5}$ , se requieren medidas más exigentes. Así, si podrán obtener resultados en un menor tiempo, considerando que los planes de mayor tiempo de aplicación, como Temuco, enfocado más a las emisiones residenciales de leña a alcanzando resultados parciales respecto a sus proyecciones.

## V. . CONCLUSIÓN

Para concluir, la respuesta a la pregunta inicialmente planteada puede ser respondida parcialmente, debido a que a pesar de que existen mejoras en relación a como estarían las ciudades del sur de Chile sin la aplicación de planes de descontaminación o medidas de control, aún se superan los índices de contaminación más altos establecidos por la legislación nacional, que es lo que los planes buscan lograr como primera meta en sus 10 años de aplicación, por lo que, desde este punto de vista, se requiere de más tiempo para poderlos evaluar.

A pesar de esto, las ciudades de Rancagua, Rengo, San Fernando, Talca, Curicó, Concepción, Talcahuano, Coronel, Temuco y Osorno, presentan tendencias estadísticamente significativas a la disminución de las concentraciones de ambas fracciones de MP, disminuyendo año a año un porcentaje menor al 10%. Estas disminuciones aún no se reflejan en el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad de aire, sin embargo, es un avance destacable. Se podría establecer que las medidas son más efectivas frente a la exposición a largo plazo, considerando que los promedios tri-anales se ven disminuidos en varias ocasiones bajo la norma anual.

El problema más relevante detectado en este estudio es que no todas las ciudades presentan estas mejoras, Padre Las Casas, una ciudad que posee un PDA en conjunto con Temuco no se ve favorecida como esta, esto puede deberse a que las medidas se han centrado más que nada en Temuco por ser una ciudad más grande o Padre Las Casas poseen emisiones mayores o diferencias socioeconómicas, como también posible transporte desde Temuco a Padre Las Casas. También Coyhaique, que incluso alcanzando un 35% de la meta del recambio de calefactores presentó mejoras hasta el 2014, retrocediendo durante el 2016, donde nuevamente se ve influenciado por los factores dados anteriormente.

Las otras ciudades con peor escenario son, Los Ángeles, Chillán, Valdivia y Coyhaique, siendo justo las ciudades con el plan en entrada en vigencia este año o solo con ante proyecto, lo cual demuestra que la ausencia de plan es perjudicial.

Destacan entre los resultados los valores obtenidos para las variables meteorológicas, temperatura, humedad y velocidad del viento, las cuales a pesar de presentar una baja correlación con las fracciones de MP, presentan resultados estadísticamente significativos para las estimaciones de tendencias lineales. Donde, para el periodo de estudio se observa que desde el 2005 al 2016 la temperatura ha aumentado entre un 1 a 13% al año según la ciudad. Esto conlleva a la disminución de la humedad relativa la cual disminuye de un 1 a 6% al año, asociado principalmente a la escasez de lluvia registrada en los últimos años. Estos resultados evidencian el cambio climático, donde la contaminación por se ve influenciada por éste y a su vez, afecta al mismo. Así, los PDA han de ajustarse a estos factores, donde las ciudades con exposición a MP se ven más vulnerables a estos cambios futuros.

Es recomendable realizar este análisis no sólo a partir de la estimación de emisiones y su reducción o por análisis de calidad de aire a partir de las concentraciones, sino que también estudiar la composición de MP, definiendo los componentes principales que lo caracterizan, siguiendo especialmente los trazadores de leña, con el fin de definir que las principales fuentes de en la zona es la combustión de leña u otras fuentes, donde las emisiones de leña pueden disminuir y las otras crecer. Los avances pueden ser registrados también por la morbilidad y mortalidad de la población a partir de estudios epidemiológicos o registros hospitalarios, relacionando la posibilidad y riesgo asociado de que las variaciones de MP en la atmósfera generan efectos perjudiciales o no en la salud de las personas.

Finalmente se recalca la necesidad de prestar más atención al material particulado fino, el cual presenta escaso monitoreo y control, siendo este el de composición más compleja originario de procesos más complejos y con mayor probabilidad de ingresar al organismo dañando gravemente la salud de la población.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, J. A. (2011). Particulate air pollution, systemic oxidative stress, inflammation, and atherosclerosis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 4(1), 79–93. <http://doi.org/10.1007/s11869-010-0101-8>
- Carslaw, D.C.; Ropkins, K. openair - An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software* 2012;27-28:52-61
- Celis, J. E., Morales, J. R., Zaror, C. A., & Inzunza, J. C. (2004). A study of the particulate matter PM10 composition in the atmosphere of Chillán, Chile. *Chemosphere*, 54(4), 541–550. [http://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00711-2](http://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00711-2)
- CNE. Estudio del Potencial Energetico de la Madera en la Matriz Energetica Chilena. Santiago de Chile: Comisión Nacional de Energía (CNE), República de Chile, disponible en: <http://goo.gl/KKpyn8>; 2008
- CNE. Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de madera. Santiago, Chile: Comisión naciona de energía, Ministerio de Energía República de Chile, Disponible en: <http://goo.gl/3nplw5>; 2015
- Díaz-Robles, L.A.; Fu, J.S.; Vergara-Fernández, A.; Etcharren, P.; Schiappacasse, L.N.; Reed, G.D.; Silva, M.P. Health risks caused by short term exposure to ultrafine particles generated by residential wood combustion: A case study of Temuco, Chile. *Environ Int* 2014;66:174-181
- Díaz-Robles, L.A.; Saavedra, H.; Schiappacasse, L.N.; Cereceda-BalicF. The air quality in Chile: Twenty years of challenge. *Environmental Management, Air & Waste Management Association* 2011;3:28-34
- ENAP. (2010). Diversificación Energética de Magallanes.
- Gómez Lobo, A., Lima, J. L., Hill, C., & Meneses, M. (2006). Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile. Informe Final. Dpto.de Economía, Universidad de Chile.
- Grahame, T. J., Distinguishing Health Effects Among Different PM2.5 Components. In *Urban airborne particulate matter : origin, chemistry, fate, and health impacts*, Zereini, F.; Wiseman, C. L. S., Eds. Springer: Heidelberg ; New York, 2010; pp xxiii, 656 p
- INE. Demografía Nacional y Regional. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Ministerio de Economía, Disponible en: <http://goo.gl/ues2q3>; 2016
- Leiva, M.A.; Santibañez, D.A.; Ibarra E, S.; Matus C, P.; Seguel, R. A five-year study of particulate matter (PM2.5) and cerebrovascular diseases. *Environmental pollution* 2013;181:1-6

- Minenergia. Buen Uso de la Leña, División de Eficiencia Energética Ministerio de Energía. Retrieved from [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-54981\\_BuenUsoLena082013.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-54981_BuenUsoLena082013.pdf), 2015
- MMA., DS-N°12, Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2,5. Decreto Supremo N°12. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, disponible en: <https://goo.gl/6Bmnmd>; 2011
- MMA, DS-N°39 (2012a) Establece Norma De Emisión De Material Particulado, Para Los Artefactos Que Combustionen O Puedan Combustionar Leña Y Pellet De Madera, Decreto Supremo N°39. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2012
- MMA (2012b). Reporte Oficial del Estado del Medio Ambiente 2011, Capítulo 1 Contaminación del aire. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, Disponible en: <http://goo.gl/rRr0xT>; 2012
- MMA. Primer Reporte Anual del Estado del Medio Ambiente 2013. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente, República de Chile, Disponible en: <http://goo.gl/HYfBeV>; 2013
- MMA., DS-N°15, Establece Plan De Descontaminación Atmosférica Para El Valle Central De La Región Del Libertador General Bernardo O'Higgins. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2013
- MMA. Planes de Descontaminación Atmosférica. Estrategia 2014 - 2018. Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, Disponible en: <http://goo.gl/ulH0Zf>; 2014
- MMA. (2015a). Noveno Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes 2015.
- MMA. (2015b). Política de uso de la leña y sus derivados para calefacción.
- MMA., DS-N°8, Establece Plan De Descontaminación Atmosférica Por MP2,5, Para Las Comunas De Temuco Y Padre Las Casas Actualización Del Plan De Descontaminación Por MP10, Para Las Mismas Comunas. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2015
- MMA., DS-N°46, Establece Plan De Descontaminación Atmosférica Para La Ciudad De Coyhaique Y Su Zona Circundante. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), 2016
- MMA., DS-N°47, Establece Plan De Descontaminación Atmosférica Para La Comuna De Osorno. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2016

- MMA., DS-N°48, Establece Plan De Prevención Y Descontaminación Atmosférica Para Las Comunas De Chillán Y Chillán Viejo. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2016
- MMA., DS-N°49, Establece Plan De Descontaminación Atmosférica Para Las Comunas De Talca Y Maule. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2016
- MMA., DS-N°79, Establece Plan De Descontaminación Atmosférica De Temuco Y Padre Las Casas. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente (MMA), República de Chile, 2016
- Morales, R. G. E. (2006). Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=HdeX6SWHBW8C&pgis=1>
- Nel, a E., Diaz-Sanchez, D., & Li, N. (2001). The role of particulate pollutants in pulmonary inflammation and asthma: evidence for the involvement of organic chemicals and oxidative stress. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 7(1), 20–6. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11140402>
- Peters, A., Dockery, D. W., Muller, J. E., & Mittleman, M. A. (2001). Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction. *Circulation*, 103(23), 2810–5. <http://doi.org/10.1161/01.cir.103.23.2810>
- Sanhueza, L., Mardones, C., & Jiménez, J. (2015). Efectos De La Incorporación De Fuentes Residenciales En Mecanismos De Compensación De Emisiones Industriales De PM10. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 31(3), 279–291. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sanhueza, P. a, Torreblanca, M. a, Diaz-Robles, L. a, Schiappacasse, L. N., Silva, M. P., & Astete, T. D. (2009). Particulate air pollution and health effects for cardiovascular and respiratory causes in Temuco, Chile: a wood-smoke-polluted urban area. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 59(July 2014), 1481–1488. <http://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1481>
- SEGPRES, DS-N°59, Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. Decreto Supremo N°59. Santiago de Chile: Ministerio Secretaría General de la Presidencia, (SEGPRES), República de Chile, D: <http://goo.gl/zftuDs>; 1998
- Toro A., R., Morales S., R. G. E., Canales, M., Gonzalez-Rojas, C., & Leiva G., M. A. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment*, 79, 115–123.

- Toro A., R., Campos, C., Molina, C., Morales S., R. G. E., & 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 (October 2016),101–109. Celis, J. E., Morales, J. R., Zaror, C. A., & Inzunza, J. C., A study of the particulate matter PM10 composition in the atmosphere of Chillán, Chile. *Chemosphere*, 54(4), 2004, 541–550. [http://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00711-2](http://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00711-2)
- Valdés, A., Zanobetti, A., Halonen, J. I., Cifuentes, L., Morata, D., & Schwartz, J. (2012). Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 11, 82. <http://doi.org/10.1186/1476-069X-11-82>
- WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. WHO/SDE/PHE/OEH/0602. Ginebra, Suiza: World Health Organization (WHO), Available from: <http://goo.gl/hq316i>; 2006



## VIII. ANEXO

**Tabla 30** Porcentaje de disponibilidad de datos para las ciudades en estudio para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>.

|   | Año                                      | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |     |
|---|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
|   | MP <sub>10</sub><br>(µgm <sup>-3</sup> ) | RG   | 89   | 96   | 95   | 87   | 85   | 23   | 70   | 92   | 90   | 100  | 98   | 100 |
| RN  |  |      |      | 71   | 98   | 100  | 96   | 93   | 98   | 88   | 99   | 98   | 96   |     |
| SF  |  |      |      | 59   | 98   | 99   | 94   | 97   | 99   | 90   | 100  | 98   | 99   |     |
| CU  |  |      |      |      |      |      |      |      | 16   | 72   | 92   | 97   | 79   |     |
| TL  |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 76   | 99   | 100  | 100  |     |
| CLL                                       |  |      |      | 0    | 92   | 83   | 26   |      |      | 75   | 97   | 95   | 93   | 97  |
| LA  |  |      |      |      |      |      |      |      | 61   | 93   | 88   | 96   | 98   |     |
| TH  |  |      |      |      |      |      | 9    | 59   | 62   | 92   | 99   | 99   | 100  |     |
| CR  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 96   | 98   |     |
| CG  |  |      |      |      |      |      | 19   | 55   | 75   | 87   | 100  | 96   | 94   |     |
| CP  |  |      |      |      |      | 9    | 84   | 61   | 57   | 100  | 99   | 74   | 88   |     |
| TM  |  | 98   | 99   | 96   | 97   | 94   | 88   | 89   | 96   | 86   | 99   | 100  | 99   |     |
| PL  |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 2    | 1    | 84   | 84   | 84  |
| VL  |  |      |      |      | 84   | 67   | 50   | 69   | 87   | 76   | 93   | 95   | 86   |     |
| OS  |  |      |      |      | 83   | 73   | 61   | 68   | 83   | 74   | 91   | 96   | 91   |     |
| PM  |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 52   | 96   | 34   |      |     |
| CY  |  |      |      | 60   | 86   | 94   | 96   | 85   | 88   | 69   | 95   | 99   | 97   |     |
| PA  |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 7    | 99   |      |      |     |
|   | Año                                      |      |      | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |     |
| MP <sub>2,5</sub><br>(µgm <sup>-3</sup> ) | RG                                       |      |      |      | 43   | 85   | 23   | 69   | 92   | 90   | 100  | 99   | 100  |     |
|   | RN                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|   | SF                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|   | CU                                       |      |      |      |      |      |      |      | 15   | 72   | 95   | 92   | 78   |     |
|   | TL                                       |      |      |      |      |      |      |      |      | 75   | 99   | 100  | 100  |     |
|   | CLL                                      |      |      |      | 18   | 63   | 26   |      |      | 75   | 96   | 97   | 96   | 97  |
|   | LA                                       |      |      |      |      |      |      |      | 57   | 89   | 93   | 95   | 99   |     |
|   | TH                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|   | CR                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 20   |      |     |
|   | CG                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 18   |      |     |
|   | CP                                       |      |      |      |      | 5    |      |      |      |      |      | 69   | 88   |     |
|   | TM                                       |      |      |      |      | 93   | 73   | 82   | 97   | 86   | 99   | 100  | 99   |     |
|   | PL                                       |      |      |      |      |      |      |      |      | 2    | 1    | 96   | 87   | 85  |
|   | VL                                       |      |      |      | 29   | 67   | 49   | 50   | 88   | 76   | 94   | 95   | 88   |     |
|   | OS                                       |      |      |      | 27   | 72   | 36   | 37   | 82   | 71   | 91   | 93   | 90   |     |
|   | PM                                       |      |      |      |      |      |      |      |      | 52   | 96   | 34   | 78   |     |
|   | CY                                       |      |      | 1    | 0    |      |      |      |      | 68   | 93   | 99   | 97   |     |
|   | PA                                       |      |      |      |      |      |      |      |      | 7    | 100  | 92   | 79   |     |

- Sin mediciones.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA

**Tabla 31** Promedios anuales para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> (µg·m<sup>-3</sup>) para las ciudades en estudio.

| Año   | RG    |       | RE    |       | SF    |       | CU    |       | TL    |       | CLL   |       | LA    |       | TH    |       | CR   |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
|       | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10 | PM25  |
| 2005  | 70,3  | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2006  | 71,9  | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2007  | 74,2  | -     | 62,9* | -     | 52,8* | -     | -     | -     | -     | -     | 34,4* | -     | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2008  | 66,5  | 32,2* | 48,6  | -     | 51,6  | -     | -     | -     | -     | -     | 46,4  | 13,9* | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2009  | 84,5  | 39,2  | 48,6  | -     | 52,7  | -     | -     | -     | -     | -     | 53,9  | 32,6* | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2010  | 101*  | 26,3* | 45,8  | -     | 24,2  | -     | -     | -     | -     | -     | 39,8* | 18,3* | -     | -     | 45,0* | -     | -    | -     |
| 2011  | 92,6* | 40,6* | 45,3  | -     | 48,5  | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 73,0* | -     | -    | -     |
| 2012  | 83,5  | 40,9  | 49,8  | -     | 46,2  | -     | -     | -     | -     | -     | 75,6* | 51,0* | 48,6* | 28,5* | 56,6* | -     | -    | -     |
| 2013  | 82,1  | 35,8  | 55,9  | -     | 46,0  | -     | 57,7* | 32,1* | 51,7  | 24,9* | 52,8  | 32,4  | 47,8  | 20,8  | 52,2  | -     | -    | -     |
| 2014  | 77,0  | 30,3  | 49,5  | -     | 42,9  | -     | 52,6  | 27,8  | 49,8  | 23,0  | 44,8  | 24,5  | 57,1  | 23,5  | 45,6  | -     | -    | -     |
| 2015  | 73,5  | 28,2  | 42,1  | -     | 46,8  | -     | 56,0  | 24,9  | 51,1  | 24,4  | 53,1  | 29,1  | 55,5  | 27,7  | 48,9  | -     | 35,9 | 11,7* |
| 2016  | 78,3  | 34,1  | 39,7  | -     | 48,2  | -     | 53,1  | 29,7  | 50,8  | 27,6  | 60,6  | 37,1  | 68,0  | 43,3  | 60,5  | -     | 30,8 | -     |
| Total | 77,8  | 34,8  | 48,8  | -     | 45,7  | -     | 66,7  | 40,4  | 50,8  | 24,7  | 53,7  | 32,2  | 54,8  | 27,6  | 54,2  | -     | 34,0 | 11,7  |
|       | CG    |       | CP    |       | TM    |       | PL    |       | VL    |       | OS    |       | PM    |       | CY    |       | PA   |       |
|       | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10  | PM25  | PM10 | PM25  |
| 2005  | -     | -     | -     | -     | 45,0  | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2006  | -     | -     | -     | -     | 48,8  | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| 2007  | -     | -     | -     | -     | 51,5  | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 100*  | 40,8* | -    | -     |
| 2008  | -     | -     | -     | -     | 64,3  | -     | -     | -     | 55,8* | 21,7* | 61,2  | 20,8* | -     | -     | 82,8  | 86,0* | -    | -     |
| 2009  | -     | -     | 28,2* | 29,5* | 60,9  | 38,2  | -     | -     | 55,4* | 32,3* | 71,2* | 32,6* | -     | -     | 71,8  | -     | -    | -     |
| 2010  | 18,7* | -     | 33,4  | -     | 54,4  | 24,1* | -     | -     | 56,2* | 31,8* | 54,3* | 32,4* | -     | -     | 83,2  | -     | -    | -     |
| 2011  | 42,7* | -     | 41,7* | -     | 73,0  | 44,4* | -     | -     | 60,1* | 36,8* | 73,7* | 29,2* | -     | -     | 86,3* | -     | -    | -     |
| 2012  | 28,3* | -     | 34,8* | -     | 62,7  | 39,3  | 50,7* | 25,9* | 60,7  | 38,2  | 124,6 | 66,0  | -     | -     | 84,1  | -     | -    | -     |
| 2013  | 36,1  | -     | 35,5  | -     | 63,4  | 39,1  | -     | -     | 46,0  | 27,8  | 79,1* | 41,2* | 42,2* | 40,1* | 69,5* | 44,4* | 1,7* | 1,7*  |
| 2014  | 31,6  | -     | 32,5  | -     | 58,2  | 31,2  | 67,8  | 33,9  | 51,3  | 29,2  | 59,2  | 33,8  | 31,4  | 28,9  | 73,7  | 52,0  | 5,5  | 5,4   |
| 2015  | 36,0  | 13,3* | 38,7* | 19,7* | 47,1  | 28,6  | 61,3  | 43,2  | 56,4  | 37,8  | 47,8  | 35,2  | 38,1* | 30,8* | 71,2  | 49,2  | -    | 5,0   |
| 2016  | 35,3  | -     | 50,7  | 28,6  | 61,9  | 42,5  | 77,7  | 58,4  | 78,7  | 46,9  | 66,0  | 50,3  | -     | 33,6  | 102   | 81,5  | -    | 5,3   |
| Total | 33,9  | 13,3  | 37,0  | 23,7  | 57,3  | 35,7  | 70,0  | 45,0  | 56,9  | 34,1  | 70,8  | 40,0  | 35,7  | 32,7  | 81,2  | 54,7  | 5,2  | 5,1   |

\*Valor calculado con año inválido, - Sin mediciones.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA

**Tabla 32** Emisiones urbanas – rurales de MP<sub>10</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.

| Región                                | Ciudad          | 2005   |       | 2006   |       | 2007   |       | 2008   |       | 2009   |       | 2010   |       | 2011   |       | 2012   |       | 2013   |       | 2014   |       |
|---------------------------------------|-----------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                                       |                 | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural |
| Libertador General Bernardo O'Higgins | Total región    | 6,90   | 4,50  | 7,00   | 4,50  | 7,10   | 4,60  | 7,20   | 4,60  | 7,20   | 4,60  | 7,30   | 4,70  | 7,40   | 4,70  | 7,50   | 4,70  | 7,60   | 4,70  | 7,40   | 3,70  |
|                                       | Rancagua        | 1,90   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,10   | 1,30  | 2,10   | 1,30  | 2,10   | 1,30  | 2,10   | 1,00  |
|                                       | Rengo           | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  |
|                                       | San Fernando    | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,30  |
| Maule                                 | Total región    | 17,2   | 11,2  | 17,3   | 11,2  | 17,5   | 11,3  | 17,6   | 11,3  | 17,7   | 11,3  | 17,8   | 11,3  | 17,9   | 11,3  | 18,0   | 11,3  | 18,1   | 11,3  | 14,7   | 7,40  |
|                                       | Curicó          | 2,40   | 1,60  | 2,40   | 1,60  | 2,40   | 1,60  | 2,40   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,00   | 1,00  |
|                                       | Talca           | 4,20   | 2,70  | 4,20   | 2,70  | 4,30   | 2,70  | 4,30   | 2,80  | 4,30   | 2,80  | 4,30   | 2,80  | 4,40   | 2,80  | 4,40   | 2,80  | 4,40   | 2,80  | 3,60   | 1,80  |
| Biobío                                | Total región    | 40,5   | 26,4  | 40,8   | 26,4  | 41,0   | 26,5  | 41,3   | 26,5  | 41,6   | 26,5  | 41,8   | 26,6  | 42,1   | 26,6  | 42,3   | 26,6  | 42,6   | 26,6  | 33,1   | 16,6  |
|                                       | Chillán         | 3,50   | 2,30  | 3,50   | 2,30  | 3,60   | 2,30  | 3,60   | 2,30  | 3,60   | 2,30  | 3,60   | 2,30  | 3,60   | 2,30  | 3,70   | 2,30  | 3,70   | 2,30  | 2,90   | 1,40  |
|                                       | Los Ángeles     | 4,00   | 2,60  | 4,00   | 2,60  | 4,10   | 2,60  | 4,10   | 2,60  | 4,10   | 2,60  | 4,10   | 2,60  | 4,20   | 2,60  | 4,20   | 2,60  | 4,20   | 2,60  | 3,30   | 1,70  |
|                                       | Concepción      | 4,50   | 2,90  | 4,50   | 2,90  | 4,60   | 2,90  | 4,60   | 3,00  | 4,60   | 3,00  | 4,70   | 3,00  | 4,70   | 3,00  | 4,70   | 3,00  | 4,70   | 3,00  | 3,70   | 1,90  |
|                                       | Chiguayante     | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,60   | 1,60  | 2,60   | 1,60  | 2,60   | 1,60  | 2,60   | 1,70  | 2,60   | 1,70  | 2,60   | 1,70  | 2,60   | 1,70  | 2,10   | 1,00  |
|                                       | Coronel         | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,30   | 1,40  | 2,30   | 1,40  | 2,30   | 1,40  | 1,80   | 0,90  |
|                                       | Talcahuano      | 3,40   | 2,20  | 3,40   | 2,20  | 3,40   | 2,20  | 3,40   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 2,70   | 1,40  |
| Araucanía                             | Total región    | 48,8   | 31,8  | 49,3   | 31,9  | 49,7   | 32,0  | 50,1   | 32,1  | 50,5   | 32,2  | 51,0   | 32,4  | 51,4   | 32,4  | 51,8   | 32,5  | 52,2   | 32,6  | 34,1   | 17,2  |
|                                       | Temuco          | 15,6   | 10,2  | 15,7   | 10,2  | 15,9   | 10,2  | 16,0   | 10,3  | 16,1   | 10,3  | 16,3   | 10,3  | 16,4   | 10,3  | 16,5   | 10,4  | 16,7   | 10,4  | 10,9   | 5,50  |
|                                       | Padre Las Casas | 3,80   | 2,50  | 3,80   | 2,50  | 3,80   | 2,50  | 3,90   | 2,50  | 3,90   | 2,50  | 3,90   | 2,50  | 4,00   | 2,50  | 4,00   | 2,50  | 4,00   | 2,50  | 2,60   | 1,30  |
| Los Ríos                              | Total región    | 19,3   | 12,6  | 19,5   | 12,6  | 19,6   | 12,6  | 19,7   | 12,6  | 19,8   | 12,6  | 19,9   | 12,6  | 20,0   | 12,6  | 20,0   | 12,6  | 20,1   | 12,6  | 22,3   | 11,2  |
|                                       | Valdivia        | 8,30   | 5,40  | 8,30   | 5,40  | 8,40   | 5,40  | 8,40   | 5,40  | 8,50   | 5,40  | 8,50   | 5,40  | 8,50   | 5,40  | 8,60   | 5,40  | 8,60   | 5,40  | 9,50   | 4,80  |
| Los Lagos                             | Total región    | 57,7   | 37,6  | 58,5   | 37,9  | 59,3   | 38,3  | 60,2   | 38,6  | 61,0   | 38,9  | 61,8   | 39,3  | 62,7   | 39,6  | 63,5   | 39,9  | 64,3   | 40,2  | 39,9   | 20,1  |
|                                       | Osorno          | 11,1   | 7,30  | 11,3   | 7,30  | 11,5   | 7,40  | 11,6   | 7,50  | 11,8   | 7,50  | 11,9   | 7,60  | 12,1   | 7,60  | 12,3   | 7,70  | 12,4   | 7,80  | 7,70   | 3,90  |
|                                       | Pto. Montt      | 16,8   | 10,9  | 17,0   | 11,0  | 17,2   | 11,1  | 17,5   | 11,2  | 17,7   | 11,3  | 18,0   | 11,4  | 18,2   | 11,5  | 18,4   | 11,6  | 18,7   | 11,7  | 11,6   | 5,80  |
| Aysén                                 | Total región    | 10,4   | 6,70  | 10,5   | 6,80  | 10,6   | 6,80  | 10,7   | 6,90  | 10,9   | 6,90  | 11,0   | 7,00  | 11,1   | 7,00  | 11,3   | 7,10  | 11,4   | 7,10  | 12,9   | 6,50  |
|                                       | Coyhaique       | 5,30   | 3,40  | 5,40   | 3,50  | 5,40   | 3,50  | 5,50   | 3,50  | 5,60   | 3,50  | 5,60   | 3,60  | 5,70   | 3,60  | 5,70   | 3,60  | 5,80   | 3,60  | 6,60   | 3,30  |
| Magallanes y la Antártica Chilena     | Total región    | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,90   | 0,50  | 0,90   | 0,50  | 0,70   | 0,40  |
|                                       | Punta Arenas    | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,60   | 0,30  |

Fuente Elaboración propia a partir de datos de RETC.

**Tabla 33 Emisiones urbanas – rurales de MP<sub>2,5</sub> en miles ton/año, por combustión residencial de leña para ciudades en estudio.**

| Región                                | Ciudad          | 2005   |       | 2006   |       | 2007   |       | 2008   |       | 2009   |       | 2010   |       | 2011   |       | 2012   |       | 2013   |       | 2014   |       |
|---------------------------------------|-----------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                                       |                 | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural | Urbano | Rural |
| Libertador General Bernardo O'Higgins | Total región    | 6,70   | 4,40  | 6,80   | 4,40  | 6,90   | 4,40  | 7,00   | 4,50  | 7,00   | 4,50  | 7,10   | 4,50  | 7,20   | 4,50  | 7,30   | 4,60  | 7,80   | 4,90  | 6,70   | 3,4   |
|                                       | Rancagua        | 1,90   | 1,20  | 1,90   | 1,20  | 1,90   | 1,20  | 1,90   | 1,20  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,00   | 1,30  | 2,20   | 1,40  | 1,90   | 0,9   |
|                                       | Rengo           | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,30  | 0,50   | 0,2   |
|                                       | San Fernando    | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,50   | 0,3   |
| Maule                                 | Total región    | 16,7   | 10,9  | 16,8   | 10,9  | 17,0   | 10,9  | 17,1   | 11,0  | 17,2   | 11,0  | 17,3   | 11,0  | 17,4   | 11,0  | 17,5   | 11,0  | 18,6   | 11,6  | 13,3   | 6,7   |
|                                       | Curicó          | 2,30   | 1,50  | 2,30   | 1,50  | 2,40   | 1,50  | 2,40   | 1,50  | 2,40   | 1,50  | 2,40   | 1,50  | 2,40   | 1,50  | 2,40   | 1,50  | 2,60   | 1,60  | 1,80   | 0,9   |
|                                       | Talca           | 4,10   | 2,70  | 4,10   | 2,70  | 4,10   | 2,70  | 4,20   | 2,70  | 4,20   | 2,70  | 4,20   | 2,70  | 4,30   | 2,70  | 4,30   | 2,70  | 4,60   | 2,80  | 3,20   | 1,6   |
| Biobío                                | Total región    | 39,4   | 25,7  | 39,6   | 25,7  | 39,9   | 25,7  | 40,1   | 25,7  | 40,4   | 25,8  | 40,7   | 25,8  | 40,9   | 25,8  | 41,1   | 25,9  | 31,4   | 19,6  | 41,5   | 20,9  |
|                                       | Chillán         | 3,40   | 2,20  | 3,40   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,50   | 2,20  | 3,60   | 2,20  | 2,70   | 1,70  | 3,60   | 1,8   |
|                                       | Los Ángeles     | 3,90   | 2,50  | 3,90   | 2,50  | 4,00   | 2,50  | 4,00   | 2,60  | 4,00   | 2,60  | 4,00   | 2,60  | 4,10   | 2,60  | 4,10   | 2,60  | 3,10   | 1,90  | 4,10   | 2,1   |
|                                       | Concepción      | 4,40   | 2,90  | 4,40   | 2,90  | 4,40   | 2,90  | 4,50   | 2,90  | 4,50   | 2,90  | 4,50   | 2,90  | 4,60   | 2,90  | 4,60   | 2,90  | 3,50   | 2,20  | 4,60   | 2,3   |
|                                       | Chiguayante     | 2,40   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,50   | 1,60  | 2,60   | 1,60  | 2,00   | 1,20  | 2,60   | 1,3   |
|                                       | Coronel         | 2,10   | 1,40  | 2,10   | 1,40  | 2,10   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 2,20   | 1,40  | 1,70   | 1,10  | 2,20   | 1,1   |
|                                       | Talcahuano      | 3,30   | 2,10  | 3,30   | 2,10  | 3,30   | 2,10  | 3,30   | 2,10  | 3,40   | 2,10  | 3,40   | 2,10  | 3,40   | 2,10  | 3,40   | 2,20  | 2,60   | 1,60  | 3,50   | 1,7   |
| Araucanía                             | Total región.   | 47,5   | 30,9  | 47,9   | 31,0  | 48,3   | 31,1  | 48,7   | 31,2  | 49,1   | 31,3  | 49,6   | 31,5  | 49,9   | 31,5  | 50,3   | 31,6  | 53,6   | 33,5  | 30,8   | 15,5  |
|                                       | Temuco          | 15,1   | 9,90  | 15,3   | 9,90  | 15,4   | 9,90  | 15,5   | 10,0  | 15,7   | 10,0  | 15,8   | 10,0  | 15,9   | 10,1  | 16,1   | 10,1  | 17,1   | 10,7  | 9,80   | 5,0   |
|                                       | Padre Las Casas | 3,70   | 2,40  | 3,70   | 2,40  | 3,70   | 2,40  | 3,80   | 2,40  | 3,80   | 2,40  | 3,80   | 2,40  | 3,90   | 2,40  | 3,90   | 2,40  | 4,10   | 2,60  | 2,40   | 1,2   |
| Los Ríos                              | Total región    | 18,8   | 12,3  | 18,9   | 12,3  | 19,0   | 12,3  | 19,1   | 12,3  | 19,2   | 12,3  | 19,3   | 12,3  | 19,4   | 12,3  | 19,5   | 12,2  | 20,7   | 12,9  | 20,1   | 10,2  |
|                                       | Valdivia        | 8,00   | 5,20  | 8,10   | 5,20  | 8,10   | 5,20  | 8,20   | 5,20  | 8,20   | 5,20  | 8,30   | 5,20  | 8,30   | 5,20  | 8,30   | 5,20  | 8,8    | 5,50  | 8,60   | 4,3   |
| Los Lagos                             | Total región    | 56,1   | 36,5  | 56,9   | 36,9  | 57,7   | 37,2  | 58,5   | 37,5  | 59,3   | 37,8  | 60,1   | 38,2  | 60,9   | 38,5  | 61,7   | 38,8  | 66,1   | 41,3  | 36,0   | 18,2  |
|                                       | Osorno          | 10,8   | 7,10  | 11,0   | 7,10  | 11,1   | 7,20  | 11,3   | 7,20  | 11,5   | 7,30  | 11,6   | 7,40  | 11,8   | 7,40  | 11,9   | 7,50  | 12,8   | 8,00  | 7,00   | 3,5   |
|                                       | Pto. Montt      | 16,3   | 10,6  | 16,5   | 10,7  | 16,8   | 10,8  | 17,0   | 10,9  | 17,2   | 11,0  | 17,5   | 11,1  | 17,7   | 11,2  | 17,9   | 11,3  | 19,2   | 12,0  | 10,5   | 5,3   |
| Aysén                                 | Total región    | 10,1   | 6,60  | 10,2   | 6,60  | 10,3   | 6,70  | 10,4   | 6,70  | 10,6   | 6,70  | 10,7   | 6,80  | 10,8   | 6,80  | 10,9   | 6,90  | 11,7   | 7,30  | 11,6   | 5,9   |
|                                       | Coyahique       | 5,10   | 3,30  | 5,20   | 3,40  | 5,30   | 3,40  | 5,30   | 3,40  | 5,40   | 3,40  | 5,50   | 3,50  | 5,50   | 3,50  | 5,60   | 3,50  | 6,00   | 3,70  | 5,90   | 3,00  |
| Magallanes y la Antártica Chilena     | Total región    | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,80   | 0,50  | 0,90   | 0,60  | 0,60   | 0,30  |
|                                       | Punta Arenas    | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,60   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,70   | 0,40  | 0,50   | 0,30  |

Fuente Elaboración propia a partir de datos de RETC.

Tabla 34 Días por episodio crítico alerta, preemergencia y emergencia para MP<sub>10</sub> en las ciudades en estudio.

| .AÑO | EC | RG | RN | SF | CU | TL | CLL | LA | TH | CR | CG | CP | TM | PL | VL  | OS  | PM | CY | PA  |
|------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|----|-----|
| 2005 | A  | 2  |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    | 10 |    |     |     |    |    |     |
|      | P  | 0  |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    | 5  |    |     |     |    |    |     |
|      | E  | 0  |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    | 0  |    |     |     |    |    |     |
| 2006 | A  | 4  |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    | 12 |    |     |     |    |    |     |
|      | P  | 2  |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    | 3  |    |     |     |    |    |     |
|      | E  | 0  |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    | 0  |    |     |     |    |    |     |
| 2007 | A  | 9  | 7* | 1* |    |    | 0*  |    |    |    |    |    | 21 |    |     |     |    |    | 30* |
|      | P  | 2  | 1* | 0* |    |    | 0*  |    |    |    |    |    | 10 |    |     |     |    |    | 25* |
|      | E  | 0  | 0* | 0* |    |    | 0*  |    |    |    |    |    | 2  |    |     |     |    |    | 17* |
| 2008 | A  | 2  | 0  | 2  |    |    | 0   |    |    |    |    |    | 31 |    | 9*  | 16  |    |    | 39  |
|      | P  | 1  | 0  | 0  |    |    | 0   |    |    |    |    |    | 15 |    | 6*  | 7   |    |    | 23  |
|      | E  | 0  | 0  | 0  |    |    | 0   |    |    |    |    |    | 2  |    | 1*  | 2   |    |    | 11  |
| 2009 | A  | 7  | 0  | 4  |    |    | 6   |    |    |    |    | 0* | 26 |    | 0*  | 17* |    |    | 34  |
|      | P  | 3  | 0  | 2  |    |    | 1   |    |    |    |    | 0* | 19 |    | 0*  | 18* |    |    | 26  |
|      | E  | 0  | 0  | 0  |    |    | 0   |    |    |    |    | 0* | 2  |    | 0*  | 11* |    |    | 6   |
| 2010 | A  | 6* | 0  | 0  |    |    | 0*  |    | 0* |    | 0* | 0  | 8  |    | 1*  | 4*  |    |    | 33  |
|      | P  | 8* | 0  | 0  |    |    | 0*  |    | 0* |    | 0* | 0  | 3  |    | 1*  | 2*  |    |    | 28  |
|      | E  | 6* | 0  | 0  |    |    | 0*  |    | 0* |    | 0* | 0  | 1  |    | 0*  | 0*  |    |    | 19  |
| 2011 | A  | 7  | 0  | 5  |    |    |     |    | 7* |    | 2* | 3* | 30 |    | 12* | 35* |    |    | 37* |
|      | P  | 0* | 0  | 1  |    |    |     |    | 7* |    | 3* | 3* | 12 |    | 4*  | 28* |    |    | 35* |
|      | E  | 0* | 0  | 0  |    |    |     |    | 3* |    | 3* | 3* | 2  |    | 0*  | 10* |    |    | 16* |
| 2012 | A  | 19 | 0  | 2  | 4  |    | 22* | 7* | 0* |    | 0* | 0* | 25 | 0* | 23  | 60  |    |    | 38  |
|      | P  | 6  | 0  | 0  | 1  |    | 13* | 3* | 0* |    | 0* | 0* | 10 | 0* | 9   | 62  |    |    | 28  |
|      | E  | 0  | 0  | 0  | 15 |    | 7*  | 1* | 0* |    | 0* | 0* | 6  | 0* | 1   | 50  |    |    | 17  |
| 2013 | A  | 6  | 0  | 1  | 2* | 0  | 9   | 1  | 0  |    | 0  | 0  | 17 |    | 1   | 30* | 0* | 4* | 0*  |
|      | P  | 0  | 0  | 0  | 2* | 0  | 5   | 0  | 0  |    | 0  | 0  | 9  |    | 0   | 19* | 0* | 5* | 0*  |
|      | E  | 0  | 0  | 0  | 2* | 0  | 4   | 0  | 0  |    | 0  | 0  | 4  |    | 0   | 8*  | 0* | 0* | 0*  |
| 2014 | A  | 10 | 0  | 0  | 2  | 0  | 6   | 14 | 0  |    | 1  | 0  | 15 | 23 | 4   | 28  | 0  | 28 | 0   |
|      | P  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1   | 4  | 0  |    | 1  | 0  | 8  | 19 | 1   | 20  | 0  | 11 | 0   |
|      | E  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 1  | 0  |    | 0  | 0  | 5  | 2  | 0   | 3   | 0  | 5  | 0   |
| 2015 | A  | 3  | 0  | 0  | 6  | 3  | 11  | 9  | 3  | 2  | 2  | 0* | 2  | 16 | 14  | 14  | 0* | 24 |     |
|      | P  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6   | 6  | 1  | 0  | 0  | 0* | 3  | 8  | 5   | 10  | 0* | 14 |     |
|      | E  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1   | 2  | 0  | 0  | 0  | 0* | 2  | 3  | 1   | 2   | 0* | 5  |     |
| 2016 | A  | 4  | 0  | 0  | 1  | 0  | 11  | 13 | 1  | 0  | 0  | 0  | 8  | 24 | 27  | 23  |    |    | 36  |
|      | P  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6   | 7  | 0  | 0  | 0  | 0  | 3  | 11 | 12  | 13  |    |    | 30  |
|      | E  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1   | 4   |    |    | 21  |

\*Calculado para años no válidos. Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA.

**Tabla 35** Días por episodio crítico alerta, preemergencia y emergencia para MP<sub>2,5</sub> en las ciudades en estudio.

| AÑO  | EC | RG  | RN | SF | CU  | TL | CLL | LA  | TH | CR | CG | CP | TM  | PL | VL  | OS  | PM  | CY  | PA |   |
|------|----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|---|
| 2005 | A  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     |    |   |
|      | P  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     |    |   |
|      | E  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     |    |   |
| 2006 | A  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     |    |   |
|      | P  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     |    |   |
|      | E  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     |    |   |
| 2007 | A  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     | 0* |   |
|      | P  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     | 0* |   |
|      | E  |     |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    |     |    |     |     |     |     | 0* |   |
| 2008 | A  | 19* |    |    |     |    | 0*  |     |    |    |    |    |     |    | 1*  | 1*  |     |     | 0* |   |
|      | P  | 4*  |    |    |     |    | 0*  |     |    |    |    |    |     |    | 0*  | 0*  |     |     | 0* |   |
|      | E  | 0*  |    |    |     |    | 0*  |     |    |    |    |    |     |    | 0*  | 0*  |     |     | 0* |   |
| 2009 | A  | 33  |    |    |     |    | 30* |     |    |    |    | 1* | 57  |    | 4*  | 14* |     |     |    |   |
|      | P  | 12  |    |    |     |    | 14* |     |    |    |    | 2* | 44  |    | 1*  | 15* |     |     |    |   |
|      | E  | 2   |    |    |     |    | 1*  |     |    |    |    | 2* | 21  |    | 0*  | 11* |     |     |    |   |
| 2010 | A  | 0*  |    |    |     |    | 3*  |     |    |    |    |    | 14* |    | 2*  | 0*  |     |     |    |   |
|      | P  | 0*  |    |    |     |    | 0*  |     |    |    |    |    | 3*  |    | 1*  | 0*  |     |     |    |   |
|      | E  | 0*  |    |    |     |    | 0*  |     |    |    |    |    | 0*  |    | 0*  | 0*  |     |     |    |   |
| 2011 | A  | 19* |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    | 56* |    | 17* | 10* |     |     |    |   |
|      | P  | 3*  |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    | 45* |    | 15* | 8*  |     |     |    |   |
|      | E  | 0*  |    |    |     |    |     |     |    |    |    |    | 14* |    | 3*  | 2*  |     |     |    |   |
| 2012 | A  | 62  |    |    | 21  |    | 61* | 14* |    |    |    |    | 67  | 0* | 54  | 74  |     |     |    |   |
|      | P  | 30  |    |    | 10  |    | 42* | 11* |    |    |    |    | 46  | 0* | 37  | 61  |     |     |    |   |
|      | E  | 5   |    |    | 18  |    | 19* | 4*  |    |    |    |    | 22  | 0* | 7   | 51  |     |     |    |   |
| 2013 | A  | 36  |    |    | 29* | 4* | 41  | 13  |    |    |    |    | 62  |    | 29  | 39* | 44* | 34* | 0* |   |
|      | P  | 20  |    |    | 17* | 2* | 21  | 4   |    |    |    |    | 44  |    | 11  | 27* | 16* | 19* | 0* |   |
|      | E  | 1   |    |    | 0*  | 0* | 10  | 0   |    |    |    |    | 15  |    | 0   | 12* | 4*  | 5*  | 0* |   |
| 2014 | A  | 37  |    |    | 30  | 18 | 28  | 29  |    |    |    |    | 48  | 43 | 47  | 46  | 26  | 54  | 0  |   |
|      | P  | 12  |    |    | 7   | 2  | 14  | 10  |    |    |    |    | 33  | 34 | 10  | 37  | 9   | 51  | 0  |   |
|      | E  | 2   |    |    | 0   | 0  | 2   | 2   |    |    |    |    | 8   | 8  | 1   | 13  | 2   | 29  | 0  |   |
| 2015 | A  | 25  |    |    | 14  | 30 | 49  | 39  |    | 0  | 0* | 0* | 48  | 58 | 83  | 59  | 18* | 87  | 0  |   |
|      | P  | 0   |    |    | 2   | 4  | 18  | 23  |    | 0  | 0* | 0* | 24  | 47 | 31  | 38  | 8*  | 61  | 0  |   |
|      | E  | 0   |    |    | 0   | 0  | 0   | 7   |    | 0  | 0* | 0* | 0   | 17 | 6   | 18  | 0*  | 22  | 0  |   |
| 2016 | A  | 28  |    |    | 5   | 15 | 35  | 47  |    |    |    |    | 0   | 51 | 43  | 66  | 54  | 31  | 46 | 0 |
|      | P  | 10  |    |    | 1   | 5  | 16  | 35  |    |    |    |    | 0   | 36 | 53  | 46  | 47  | 16  | 58 | 0 |

\*Calculado para años no válidos. Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA