

Estudio Acerca del Material Particulado Emitido en Ciudades de Tamaño Medio al Sur de Santiago de Chile*

Particulate Matter Analysis from Mid-sized Cities in the South of Chile

Artículo de Investigación Científica - Fecha de Recepción: 30 de julio de 2013 - Fecha de Aceptación: 9 de mayo de 2014

Giovanni Angelo Salini Calderón

Doctor en Ciencias Físicas. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción (Chile). gsalini@ucsc.cl

Para citar este artículo / To reference this article:

G. A. Salini Calderón, "Estudio Acerca del Material Particulado Emitido en Ciudades de Tamaño Medio al Sur de Santiago de Chile," INGE CUC, vol. 10, no. 1, pp. 97–108, 2014.

Resumen: Este artículo tiene por objetivo presentar un estudio sobre la calidad del aire en ciudades de tamaño medio al sur de Chile. La principal causa de la contaminación del aire en ciudades de tamaño medio es el alto consumo de leña húmeda y de mala calidad, lo cual genera material particulado fino que penetra las vías respiratorias. Se analiza cómo está afectando esta contaminación a la población. Se aplicó un análisis estadístico a una estación de monitoreo de la ciudad de Chillán (desde 2008 a 2013). Este estudio permite concluir que en Chillán la población ha estado expuesta casi todo el año a material particulado dañino para su salud. Se hace hincapié en la necesidad de mantener una base de datos horaria lo más completa posible, para así poder desarrollar buenos modelos de pronóstico que informen a la autoridad de situaciones que excedan la normativa vigente para dicho material.

Palabras clave: PM2.5, PM10, calidad del aire, contaminación por leña.

Abstract: This paper aims to illustrate a study about air quality from mid-sized cities in the South of Chile. The main cause for air pollution in medium-sized cities is the high consumption of wet, low-quality firewood that produces fine particulate material capable of penetrating the respiratory tract. An analysis on how this pollution is affecting the population is implemented; for this purpose, a statistical analysis was applied to a monitoring station in Chillán's city (from 2008 to 2013). This study leads to the conclusion that in Chillán the population is exposed to harmful particulate matter almost all year long. Emphasis is made on the need to maintain a time database, as complete as possible, in order to develop good forecasting models to inform authorities of situations in which the regulations for such material are exceeded.

Keywords: PM2.5, PM10, air quality, firewood pollution.

* Artículo de investigación derivado del proyecto de investigación (personal) "Análisis de la dinámica temporal de material particulado PM10/PM2.5 emitido en ciudades de tamaño medio al sur de Santiago de Chile". Fecha de inicio: 1° de marzo de 2013- Fecha de finalización: 30 de diciembre de 2014.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la contaminación atmosférica ha adquirido una importancia vital en todo el mundo [1]. Estudios recientes dan cuenta de que el medio ambiente se estaría deteriorando [2] y, aún más, debido a ello estaría produciéndose un notable cambio climático a nivel planetario [3].

Se puede comprobar que las concentraciones presentes en el aire provienen de dos tipos de fuentes emisoras: las naturales (que proceden de fenómenos naturales, como los volcanes, incendios forestales, el polvo atmosférico, entre otros) y las artificiales (o antropogénicas), que se producen debido a actividades humanas diarias, como por ejemplo, industrias, chimeneas de los hogares, quemas agrícolas, tubo de escape de los vehículos, los vertederos, actividad minera, plantas térmicas, a carbón, petróleo o gas, etc. Cabe hacer notar que en cuanto a la contaminación natural, este proceso se ha venido registrando durante miles de años en el planeta, y la atmósfera siempre ha sido capaz de adaptarse a estos cambios con mínimas complicaciones. La segunda situación se ha visto incrementada debido al crecimiento sostenido de la población y las actividades que ella realiza; al incremento del parque automotor, así como también al creciente desarrollo inmobiliario.

Los principales agentes contaminantes de la atmósfera se pueden clasificar en contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios conservan su identidad desde que son emitidos hasta que son medidos a través de algún instrumento adecuado. El segundo tipo de contaminante se forma en el aire a partir de reacciones químicas o fotoquímicas entre los contaminantes primarios y los compuestos que están en la atmósfera. A su vez, las fuentes contaminantes se pueden clasificar, independientemente de su origen, en primer lugar como fuentes fijas (o estacionarias), como por ejemplo, las industrias, quemas agrícolas, leña residencial, y en segundo lugar como fuentes móviles, que incluye automóviles particulares, motocicletas, transporte público, camiones, aviones, etc.

A medida que las ciudades crecen sin la implementación de una regulación ni controles adecuados puede aparecer una serie de problemas ambientales, entre ellos la contaminación atmosférica por partículas suspendidas. Entre las partículas suspendidas en las atmósferas se denomina “respirables” a las de un diámetro menor o igual a $10\ \mu\text{m}$ (PM10) por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias [4]. Los principales componentes del material particulado (PM) son hollín, plomo, sulfato e hidrocarburos. Además, la contaminación aérea por material particulado afecta negativamente la calidad del aire y la salud de las personas, animales y bienes materiales. La cantidad que se transporta por material particulado puede representar niveles biológicamente significativos y su presencia en el material

particulado fino, si es inhalado, puede depositarse profundamente en los pulmones en los seres vivos [5]. La exposición a niveles elevados de PM se ha asociado al impacto adverso a la salud humana, y es la mayor fuente de enfermedades y mortalidad alrededor del mundo [6].

El PM de diámetro igual o menor a $10\ \mu\text{m}$ (PM₁₀) –uno de los agentes importante de contaminación ambiental– ha captado el interés de los organismos de salud, debido a su capacidad de penetrar en el sistema respiratorio humano [7], [8]. Sin embargo, el PM con un diámetro igual o menor a $2,5\ \mu\text{m}$ (PM2.5) es el más dañino para la salud humana [9], [10], porque puede llegar fácilmente hasta los pulmones. Para el caso de PM10, podemos distinguir una fracción gruesa, aquella con diámetro entre $2,5$ y $10\ \mu\text{m}$, y una fracción fina, que coincidiría con el PM2.5. Esta última proviene de la combustión residencial, los procesos industriales y los vehículos gasolineros y Diesel (pesados y livianos) [11]. La fracción gruesa proviene principalmente del polvo en suspensión generado por el tráfico, la construcción y quemas agrícolas y de leña. La mayoría de las partículas cuyo diámetro sea mayor a $5\ \mu\text{m}$ se depositan en las vías aéreas superiores (nariz), en la tráquea y los bronquios. Aquellas cuyo diámetro es menor a dicho valor tienen mayor probabilidad de depositarse en los bronquiolos y alvéolos. Se ha establecido que por cada $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento de las concentraciones de 24 horas de PM10 en promedio se verifica un aumento de 3 % de la mortalidad. Con respecto al PM2.5, el análisis de datos en Santiago concluye que un incremento del promedio de 24 horas por sobre $70\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ tiene efecto notorio en el número de consultas de urgencias respiratorias infantiles [2].

Fue a fines de la década de los años 80 que se inició el estudio de la contaminación del aire en la ciudad de Santiago de Chile, comenzando por el material particulado PM10, y posteriormente, a comienzos del año 2000, se incluyó el material particulado de tamaño $2,5\ \mu\text{m}$, y se encontró una estrecha relación entre episodios de contaminación ambiental y visitas a centros de salud de urgencia [12]-[16], así como también vínculos entre episodios de contaminación ambiental y parámetros meteorológicos [17].

También han sido realizado estudios debido a la contaminación por material particulado PM10 y PM2.5 en ciudades de tamaño medio del sur de Chile [18]-[21].

Este estudio tiene por objetivo caracterizar el material particulado PM10 y PM2.5 en la ciudad de Chillán, cuyo incremento se produce especialmente en época invernal; además de ser un aporte para la gestión de la calidad del aire para esta ciudad. A su vez, pretende mostrar el *estado del arte* de la situación real respecto de los contaminantes que están aquejando a algunas ciudades de tamaño medio y situadas al sur de Santiago de Chile, especialmente en época invernal, como un aporte para realizar

estudios más profundos y detallados, sobre todo en aquellas ciudades que ya han sido declaradas como zonas saturadas o en vías de serlo. Pretendemos, además, recalcar la importancia de contar con una data completa y de calidad para la construcción de modelos predictivos que orienten a la autoridad competente en cuanto a aplicar las medidas paliativas correspondientes, con miras a proteger la salud de la población cuando se presenten situaciones de mala calidad del aire debido a los altos índices de contaminación ambiental.

II. DAÑO A LA SALUD POR CONTAMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN CIUDADES DE TAMAÑO MEDIO

Varios estudios epidemiológicos han mostrado una importante correlación existente entre la contaminación del aire y la salud humana. Estos estudios han sido extendidos a ciudades de tamaño medio del sur de Chile. A nivel de los organismos de salud existe una especial atención a las sustancias químicas que tienen propiedades carcinogénicas o mutagénicas (que contienen los contaminantes orgánicos atmosféricos). Ello fundamentalmente debido a que también están afectando gravemente la salud humana en estas ciudades de tamaño medio [22], [23].

En lo que respecta al caso de la contaminación del aire (especialmente en el período de otoño-invierno) y en ciudades de tamaño medio que han sido declaradas como zonas saturadas (una ciudad media es aquella que se diferencia de los núcleos rurales y no alcanza tampoco a formar una gran aglomeración, comparada con las grandes ciudades –denominadas megaciudades–, tal como es el caso de la ciudad de Santiago de Chile). Ejemplo de ello son las ciudades de Chillán, Temuco, Osorno, Talca, etc. Las zonas latentes son aquellas que están en vías de ser declaradas saturadas por material particulado. Ciudades como Los Ángeles, Gran Concepción, etc., son ejemplo de ello. De acuerdo con estudios efectuados recientemente, la principal causa que ocasiona episodios de contaminación ambiental en ciudades de tamaño medio y situadas al sur de (Santiago de) Chile es el uso de leña como fuente principal de calefacción domiciliar e industrial. Además, mientras una ciudad se sitúa más al sur de Santiago de Chile –de tamaño medio–, más consumo de leña se requiere; y lo que es más grave, dicha leña posee alto grado de húmeda, o es de mala calidad, o fue recientemente cortada y está aún verde (todavía no realiza el proceso de secado) [24]. Las posibles causas del uso de la leña como elemento de calefacción sería el factor socioeconómico, factores de tipo cultural, así como factores de tipo geográfico, que se incrementa al descender la temperatura ambiental o elevarse la humedad debido al aumento de la pluviometría.

Estudios vinculados con este tipo de contaminación han sido realizados en distintas ciudades a nivel mundial [25]-[28]. La ciudad de Chillán [29],

así como también en otras ciudades al sur de Chile [30]-[31], han sido estudiadas debido a la contaminación por material particulado, y se ha llegado a la conclusión de que deben ser declaradas como zonas latentes o zonas saturadas, mediante decretos emitidos por el MMA.

En la actualidad Coyhaique (una ciudad bien austral de Chile) es la que presenta más problemas de contaminación atmosférica por PM producto del elevado consumo de leña de mala calidad, debido a que gran parte del año llueve en esta zona austral del país (su pluviometría es de 1385 mm anuales en promedio), y por otra parte, al uso de calefactores no adecuados como medio de calefacción. Esto se debería a la carencia de recursos, así como a falta de interés político; como otra causa estaría también la falta de compromiso de los organismos encargados de fiscalizar la calidad del aire. La compacta y densa nube tóxica que se puede apreciar sobre Coyhaique es un fenómeno que se ha vuelto cada vez más habitual. El frío reinante en esta zona favorece lo que se conoce como “inversión térmica”; fenómeno en el que una capa de aire caliente atrapa bajo ella al aire más frío, impidiendo su disipación y manteniendo, por tanto, todos los contaminantes en la parte baja de esta capa de inversión. Esto ocasiona que la calidad del aire en días de bajas temperaturas llegue a niveles extremadamente peligrosos para la salud de la población.

Otro caso que ha llevado a declarar como zona saturada tiene que ver con la ciudad de Rancagua (situada a unos 100 km al sur de la ciudad de Santiago), así como también sus alrededores. En la actualidad se ha propuesto un Plan de Descontaminación del Valle Central de la VI Región de O’Higgins, debido a que un estudio sobre la calidad del aire en esa zona indicaría que el uso de leña en los hogares aporta el 35 % de la contaminación del aire, en tanto que el 15 % corresponde a quemas agrícolas no autorizadas, aportando las industrias un 12 %, las fuentes móviles 3 % y los incendios forestales 34 % [30].

Recientemente –11 de abril de 2013– la ciudad de Osorno (situada a 940 km al sur de Santiago y perteneciente a la región de Los Lagos) registró un máximo de 404 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5}, condición que supera ampliamente los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que la normativa vigente establece como valor máximo para considerar al ambiente contaminado y riesgoso para la salud de la población.

En lo que respecta a ciudades de tamaño medio que han sido declaradas como zona latente (o en vía de ser declaradas zonas saturadas por contaminación del aire) podemos mencionar el caso del Gran Concepción [31] y Los Ángeles, ambas situadas en la región del Bío Bío y a una distancia de alrededor de 530 km al sur de Santiago. También se repite en estas ciudades el problema generado por el uso de la leña como principal combustible para temperar las viviendas.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA UTILIZADA

A. Área de Estudio

Chillán es una ciudad recientemente declarada como saturada (que comprende a la comuna de Chillán Viejo y la actual comuna de Chillán) y está situada en la provincia de Ñuble (perteneciente a la VIII región del Bío Bío); en la actualidad cuenta con una población de 175 869 habitantes (censo 2012). Esta ciudad está situada sobre una estructura tectónica de fines del período Terciario, en la parte del valle longitudinal que se identifica con el llano central. El terreno de la ciudad corresponde a una llanura aluvial, cuyos sedimentos fluvioglaciares fueron conformados durante la época cuaternaria por la acción de los ríos Ñuble y Cato por el norte y el río Chillán por el sur. La naturaleza aluvial de la ciudad de Chillán se confirma mediante estudios geológicos efectuados posteriormente y a raíz del terremoto de 1939 (magnitud 7,8 Richter) al efectuar una prospección a unos 100 km de profundidad, aproximadamente, sin encontrar roca fundamental.

En particular, y de acuerdo con estudios más recientes, en la ciudad de Chillán no necesariamente sería exclusivamente el consumo de leña en invierno lo que estaría ocasionando la contaminación del aire, sino que también se han estado estudiando fuentes fijas situadas dentro de la misma ciudad, además de la que aportan las fuentes móviles, debido al rápido crecimiento del parque automotor [29]. También, y al igual que otras ciudades de tamaño medio, está experimentando un creciente auge inmobiliario. Por lo tanto, esto ameritaría un estudio más detallado y profundo sobre las verdaderas fuentes contaminantes para esta ciudad.

Chillán es un centro con características climáticas claramente identificadas respecto del resto de Chile Central. Su clima es esencialmente templado cálido mediterráneo con estación seca y lluviosa, con incidencia continental. El mes más caluroso es enero, mes en el que se registran temperaturas medias de 19,7 °C. Las máximas absolutas se registran a mediados del mismo mes, en el que alcanzan valores de hasta 38 °C a la sombra. El mes más frío es julio con temperaturas que oscilan entre 1 y 5 °C. Entre las mínimas absolutas más significativas se registran también en este mes, y alcanzan hasta -8 °C. Las precipitaciones en promedio bordean los 1.107 mm anuales. Las bajas notorias de temperatura observadas en este período se deben al avance de masas de aire frío polar que penetran muy al interior del país, así como la presencia de la cordillera de la Costa, la cual impide que llegue la influencia moderadora del mar. La temperatura media para un año normal es de 13,0 °C, de acuerdo con datos registrados por la estación meteorológica del aeródromo de la Fuerza Aérea de Chile.

En diciembre de 2012 la ciudad de Chillán fue declarada zona saturada por el MMA. Sin embargo, y según la actual normativa vigente, al ser declarada una ciudad como zona saturada debe contar con una cantidad mínima de estaciones de monitoreo que estén funcionando de manera ininterrumpida por tres años consecutivos (lo cual no sucede en este caso), de acuerdo con la norma de calidad del aire vigente. En la actualidad, la ciudad de Chillán cuenta con tres estaciones de monitoreo, pero solo dos están funcionando. En la Fig. 1 puede apreciarse la ubicación de las dos estaciones (de tres) en las que el MMA mantiene información *online*: la estación Purén, ubicada en el centro de la ciudad, y la estación INIA, situada en el sector norte de la misma ciudad. Además, debe contar con un Plan de Descontaminación Ambiental (PDA); Plan que solo dispone la ciudad de Santiago de manera bien diseñada (y con bastantes años de deficiente manejo, mejoras implementadas, así como experiencia ganada).

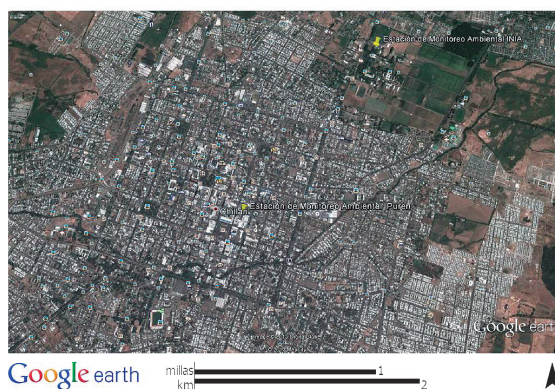


Fig. 1. Ubicación estaciones de monitoreo ambiental en la ciudad de Chillán (red del MMA)

Fuente: Autor.

B. Los Datos

La base de datos de los contaminantes del aire es mantenida y administrada por el MMA (al cual se puede acceder a través de su sitio web oficial [32]). La mayoría de las veces la base de datos –de origen experimental– tiene problema referente a datos faltantes. En la Fig. 2 puede verse los datos graficados horarios correspondientes a PM_{2.5} recolectados desde la estación de monitoreo de Pudahuel, en la ciudad de Santiago. Este gráfico corresponde a datos recolectados desde inicios del año 2000 hasta comienzos de 2013. En cambio, en la Fig. 3 (PM_{2.5} para la estación Las Encinas de Temuco, desde 2009 a 2013) y Fig. 4 (PM₁₀ para la estación Cerro Navia de Santiago, desde 2001 hasta 2013) se observa que los datos son diarios, tal como se podía acceder desde el sitio web del MMA, y fueron obtenidos el 29 julio 2013.

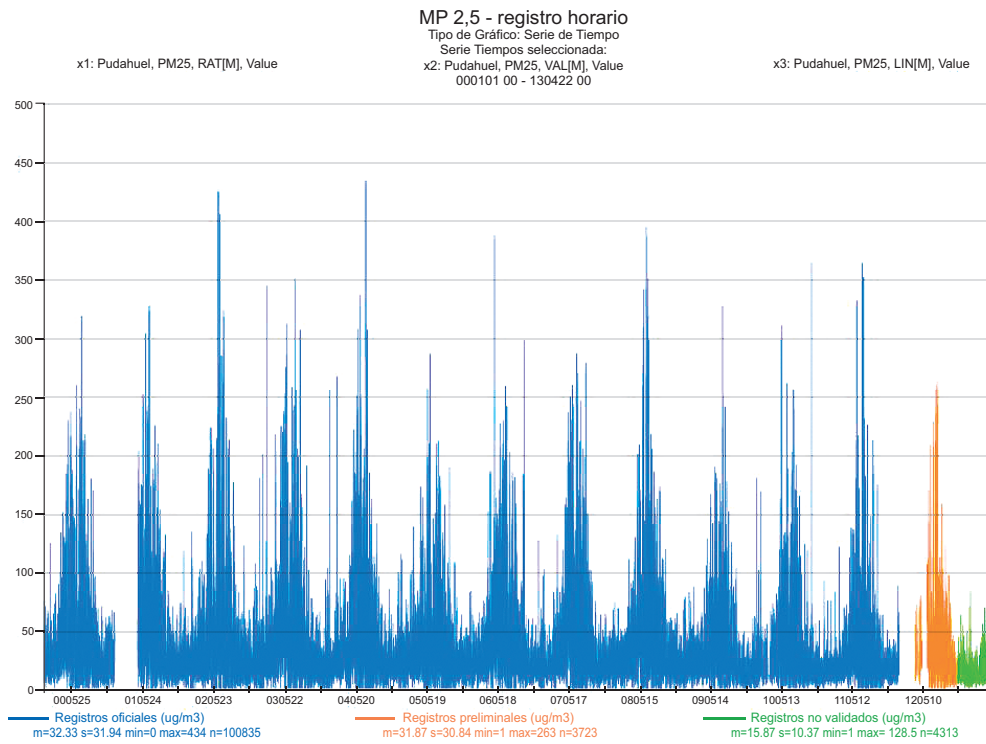


Fig. 2. Data horaria PM_{2,5} estación de monitoreo ambiental Pudahuel en la ciudad de Santiago (red MACAM II, MMA)
Fuente: MMA.

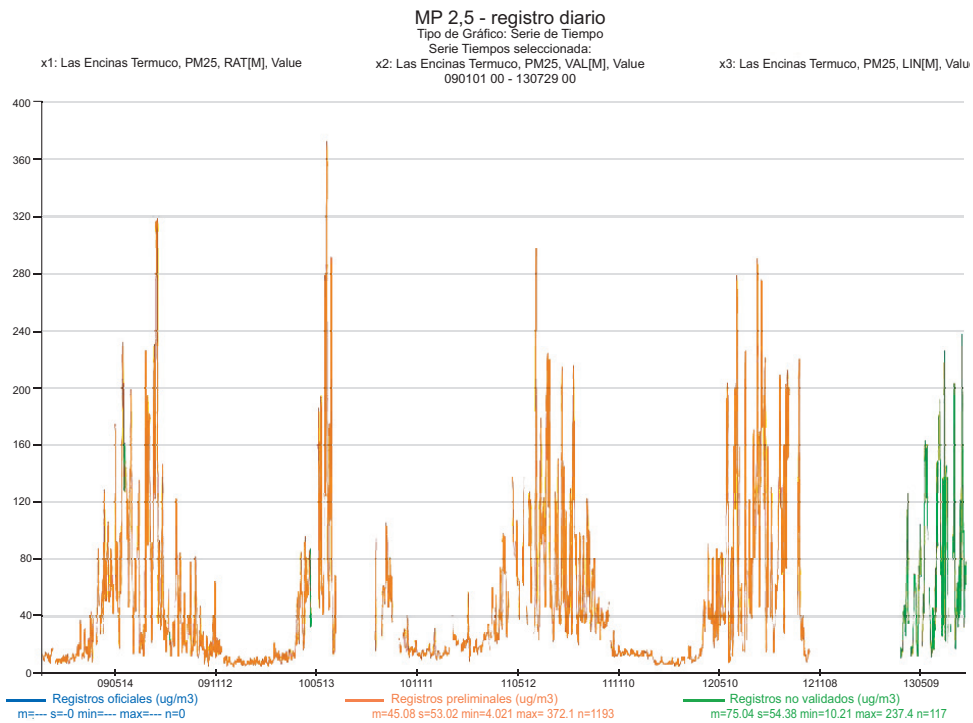


Fig. 3. Data diaria PM_{2,5} estación de monitoreo ambiental Las Encinas en la ciudad de Temuco (red MMA)
Fuente: MMA.

ESTUDIO ACERCA DEL MATERIAL PARTICULADO EMITIDO EN CIUDADES DE TAMAÑO MEDIO AL SUR DE SANTIAGO DE CHILE

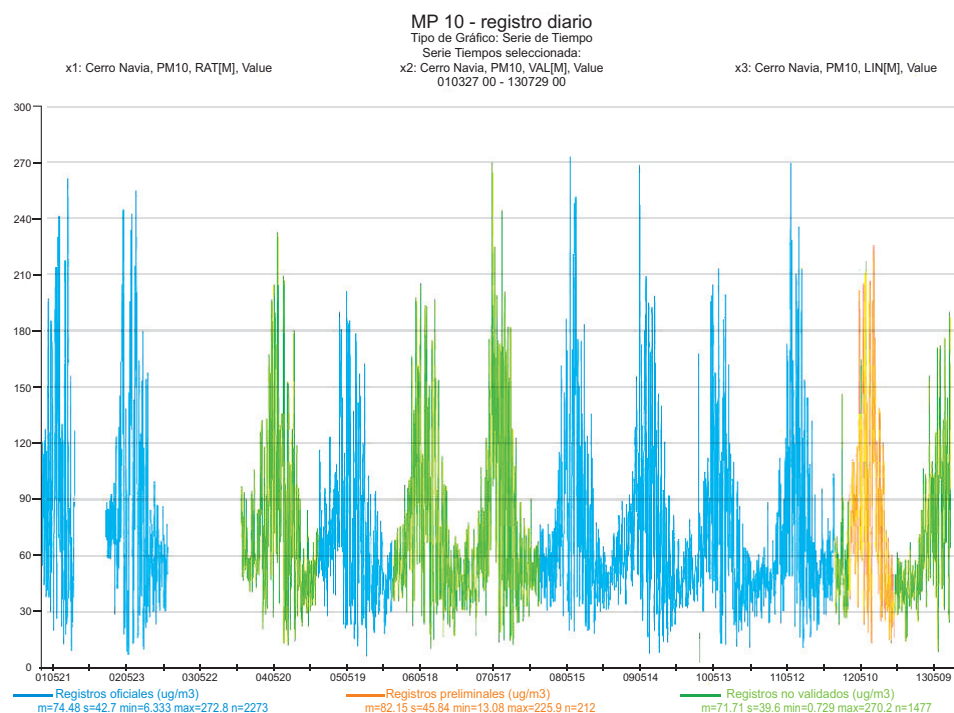


Fig. 4. Data diaria PM10 estación de monitoreo ambiental Cerro Navia en la ciudad de Santiago (red MACAM II)

Este sitio web no contó con datos horarios de ninguna estación hasta el mes de marzo de 2014, fecha en que asumió el actual gobierno.. Además, en las tres últimas figuras se observa los datos faltantes que hay que rellenar. Algunos autores prefieren eliminar un año correspondiente a la data faltante, pero como ocurre en las ciudades de tamaño medio, el funcionamiento de las estaciones de monitoreo ambiental tiene fecha de inicio de funcionamiento bastante reciente. Por ejemplo, la estación Las Encinas de la ciudad de Temuco tiene data desde 2009 hasta ahora. Estos corresponden a unos 3 a 4 años de datos, y eliminar un período anual puede ser nefasto a la hora de construir modelos de pronósticos; con mayor razón si los datos suministrados son diarios, ya que reduce la cantidad de datos para ser usados en modelos de pronóstico. Lo que conlleva a utilizar metodologías de relleno de dichos datos perdidos, teniendo en cuenta la naturaleza de la serie (si es lineal o no lineal), así como el tamaño que presente el *gap* (o vacíos) en estas series temporales para seleccionar el método de relleno más adecuado [33]. Esto es muy relevante, debido a que los modelos de pronóstico requieren que la base de datos esté completa para su funcionamiento eficiente, especialmente si se requiere un pronóstico en línea (*online*). Si se necesitara hacer algún pronóstico horario (por ejemplo, a las 19:00 horas del día siguiente), la data diaria no sería muy útil.

La base de datos utilizada en este estudio ha sido recopilada y procesada desde el sitio web que mantiene el MMA [34]. Hemos usado los datos recopilados

desde la estación de monitoreo INIA (Chillán) para PM10 y PM2.5, realizando gráficos, procesamiento y análisis estadístico de dichos datos.

En la tabla I se muestran algunas ciudades de tamaño medio del sur de Chile, que han sido declaradas zonas saturadas o latentes. En esta tabla puede apreciarse los parámetros geopolíticos para cada una de las ciudades que tienen alta contaminación ambiental debido a material particulado grueso y fino.

En general, ciudades que han sido declaradas zonas saturadas no cuentan con un eficiente plan de descontaminación ambiental. Y eso lo demuestra los constantes episodios que ocurren todos los años y en época de otoño-invierno. El caso más reciente (mayo-junio de 2013) corresponde a la ciudad de Temuco y la comuna de Padre las Casas (situada a 3,5 km de Temuco) [35]. La ciudad de Temuco fue la segunda, después de Santiago, en ser declarada zona saturada debido a la alta concentración de material particulado PM10 que estaba ocasionando daño a la salud de la población. Sin embargo, la administración anterior del MMA tomó la determinación de no informar a la población acerca de los valores horarios de material particulado grueso y fino a través de la página web del MMA [36]. Cabe señalar que los verdaderamente interesados en la información suministrada son solo aquellos científicos que están vinculados a la ciencia del medio ambiente. Entonces, ¿qué sentido tiene negar dicha información si, con suerte, muy pocas personas visitan la página web del MMA para consultar su base de datos?

TABLA I. INFORMACIÓN GEOPOLÍTICA DE CIUDADES AL SUR DE CHILE

Ciudad	Latitud	Longitud	Región	Altitud (msnm)	Población	Superficie (km ²)
Rancagua	34° 10' 15" S	70° 44' 40" W	O'Higgins	572	236.363	260
Curicó	34° 59' 0" S	71° 14' 0" w	Maule	228	132.404	1.328
Talca	35° 26' 0" S	71° 40' 0" W	Maule	102	235.089	232
Chillán	36° 36' 24" S	72° 6' 12" W	Bío Bío	124	175.869	511
Los Ángeles	36° 56' 0" S	72° 19' 0" W	Bío Bío	139	187.255	1.748
Temuco	38° 44' 0" S	72° 36' 0" W	Araucanía	122	260.878	464
Osorno	40° 34' 0" S	73° 09' 0" w	Los Lagos	35	132.245	951
Coyhaique	45° 34' 0" S	72° 04' 0" W	Aisen	310	82.071	109.025

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A. Normativa Ambiental Vigente

La alta concentración de material particulado, especialmente en invierno, ha sido un problema recurrente en Santiago de Chile, cuyo estudio ha sido efectuado desde los años 80. En 1998 se publicó la norma primaria de calidad del aire para material particulado PM10 (fracción gruesa) [37], y solo recientemente (1° de enero de 2012) comenzó a regir la norma primaria para material particulado respirable PM2.5 (denominada también "fracción fina") [38].

La actual norma chilena sobre calidad del aire para PM10 establece que el valor máximo promedio de 24 horas ha sido fijado en 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (m^3N : metro cúbico normal, a 25 °C y 1 atmósfera), vale decir, como valor diario, y como media (aritmética) anual fue fijada en 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Por su parte, para el material fino PM2.5 se fijó un valor máximo promedio (de 24 horas) de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como promedio (aritmético) anual.

La Organización Mundial de la salud (OMS), por su parte, ha recomendado valores mínimos para contaminantes ambientales que afectan la salud humana. No obstante, algunos países (entre ellos Chile) han fijado sus propias normas para estos contaminantes, que, por cierto, están bastante más arriba a lo recomendado por la OMS. Así, para el material particulado PM10 recomienda 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor máximo promedio de 24 horas, y como media (aritmética) anual un valor de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para PM2.5 recomienda 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio máximo de 24 horas y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media anual [39].

B. Caso: Estación de Monitoreo INIA

En la tabla II mostramos la estadística (descriptiva) para los datos horarios de PM2.5 recopilados desde la estación de monitoreo INIA (Chillán), y entre 2008 a 2013, para cada año. Se observa que para todos estos años los valores máximos de PM10 fueron muy superiores a la norma chilena (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En general, para datos horarios debieran existir 8760 datos (365x24). En esta tabla se observa que en 2008 y 2012 hubo menos datos recolectados que los restantes años. En la misma tabla vemos que para 2011 se aprecia un *pick* de 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual no es un error, ni tampoco un problema de mal funcionamiento del equipo que recolecta los datos. Este *pick* fue alcanzado el 7 de julio a las 21:00 y a las 22:00. Si se observa la base de datos original, las concentraciones comienzan a aumentar significativamente entre el 4 de julio hasta el 8 de julio, con valores (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como 105,8; 549,7; 677,8; 988,7; 828,6; 413,7; 370,1; 423,3; 849; 1000; 1000; 774, valores que superan largamente tanto la norma de calidad del aire chilena como la de la OMS. Además, observamos que para 2012 el promedio de concentraciones fue muy superior a los otros años (salvo 2011), teniendo una desviación estándar demasiado grande. Por su parte, en esta tabla, y a modo comparativo, hemos incluido para 2011 la estadística del período otoño-invierno (entre abril y agosto). La desviación estándar disminuyó para este caso en comparación con el caso anual, lo cual indica una menor dispersión de los datos. En general, se puede afirmar que todos los datos presentan una gran dispersión, aun si se realizara el análisis por período dentro del mismo año. Así, el coeficiente de variación para 2011 es de 140 % y el correspondiente al período invernal 130 %. Esto revela que hay muchísima variación en los datos recolectados. Lo cual es muy común, y a su vez, independiente de la estación de monitoreo, así como del lugar geográfico que presente altos índices de contaminación ambiental.

En la tabla III se muestra la estadística para los datos faltantes y para cada serie temporal correspondientes a los años en estudio. Así, para 2012 hay una data faltante del 60 %, y en segundo lugar está 2010. También se muestra los dos mayores *gaps* (vacíos) para cada año. En la Fig. 5 se muestra un gráfico de concentraciones de PM2.5 para la estación INIA y para 2011. Como es normal, las concentraciones más altas se generaron en el período otoño-invierno (entre abril y agosto). Se ha colocado a modo de comparación las normas chilena y de la OMS para PM2.5.

ESTUDIO ACERCA DEL MATERIAL PARTICULADO EMITIDO EN CIUDADES DE TAMAÑO MEDIO AL SUR DE SANTIAGO DE CHILE

Lo sorprendente en esta figura es que en casi todo el periodo anual la población ha estado expuesta a dicho material particulado (uno de los más peligrosos para la salud humana). Si nos remitimos a la norma de la OMS, todo el año se ha superado dicha norma.

Como comparación hemos realizado el mismo análisis para PM10, y escogimos el año 2009. La razón de no escoger el mismo año 2011 fue que había mucha data faltante. En la tabla IV observamos la estadística (descriptiva) para los datos recopilado entre 2008 y 2013. Salvo 2011 y 2013 –debido a que hubo menos datos horarios recopilados–, en todos los otros años se observa valores máximos muy superiores a la norma chilena. El año 2011 tiene mucho dato faltante, especialmente entre el 12 de marzo y el 8 de

septiembre, que coincide con el período otoño-invierno. Por ello se aprecia una curtosis negativa y una asimetría (o coeficiente de sesgo) negativa y desviación estándar menor que los otros años (salvo 2013).

En la tabla V se muestra la estadística para los datos faltantes entre 2008 a 2013 y para el año 2009. En este caso, 2011 presenta la mayor data faltante (con un 64.5 %). La Fig. 6 corresponde a un gráfico de concentraciones de PM10 para 2009. En este gráfico nuevamente se observa que los mayores valores para PM10 se registran en el período invernal. También se muestra como comparación tanto la norma chilena como la de la OMS para PM10, y se observa otra vez la superación tanto de la norma chilena como de la OMS de manera prolongada.

TABLA II. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PM2.5 ESTACIÓN INIA, CHILLÁN 2011 (PROMEDIO 24 HORAS)

PM2.5 Año	Data Original	Número de datos	Máximo valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Asimetría ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Curtosis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
(horaria)								
2008*	2640	2069	326.4	1	16.5	19.2	5.4	57.2
2009	8760	8588	610.7	1	28.6	42.6	4.2	25.7
2010	8760	7701	512.3	1	30.3	43.5	3.7	19.6
2011	8760	8415	1000	1	53.2	74.6	5.2	39.1
2011 \diamond	3672	3504	1000	1	80.0	104.6	3.7	18.8
2012**	5568	2225	867	0.8	171.0	217.4	1.5	1.8
2013	8760	173	746.9	0.4	68.0	185.4	3.3	9.0

*: Inicio registro 13 de septiembre **: Inicio registro 13 de mayo \diamond : período otoño-invierno.

TABLA III. DATOS FALTANTES PM2.5 ESTACIÓN INIA, CHILLÁN 2011 (PROMEDIO 24 HORAS)

PM2.5 Año	Data Original	Número de datos	Data Faltante	%	Primer Mayor	Primer Mayor %	Segundo Mayor	Segundo Mayor %
(horaria)								
2008*	2640	2069	571	21.6	273	47.8	145	25.4
2009	8760	8588	172	2.0	137	80	23	13.3
2010	8760	7701	1059	12.0	735	69	100	9.4
2011	8760	8415	345	4.0	64	18.6	27	7.8
2012**	5568	2225	3343	60.0	2047	61	298	8.9
2013	192	173	19	10.0	12	63	5	26.3

*: Inicio registro 13 de septiembre **: Inicio registro 13 de mayo.

TABLA IV. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PM10 ESTACIÓN INIA, CHILLÁN 2011 (PROMEDIO 24 HORAS)

PM10 Año	Data Original	Número de datos	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Asimetría ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Curtosis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
(horaria)								
2008	8784	8190	636	1	45.9	52.4	3.7	20.8
2009	8760	8601	877	0.4	48.9	62.1	4.1	25.5
2010	8760	8498	699.4	1	39.9	51.2	4.3	27.1
2011	8760	3095	99	1	62.0	26.6	0.0	-1.3
2012*	5568	5397	741.5	1	41.5	60.7	4.6	28.7
2013	1176	1176	94.35	0.4	25.4	13.0	0.8	1.1

*: Inicio registro 13 de mayo.

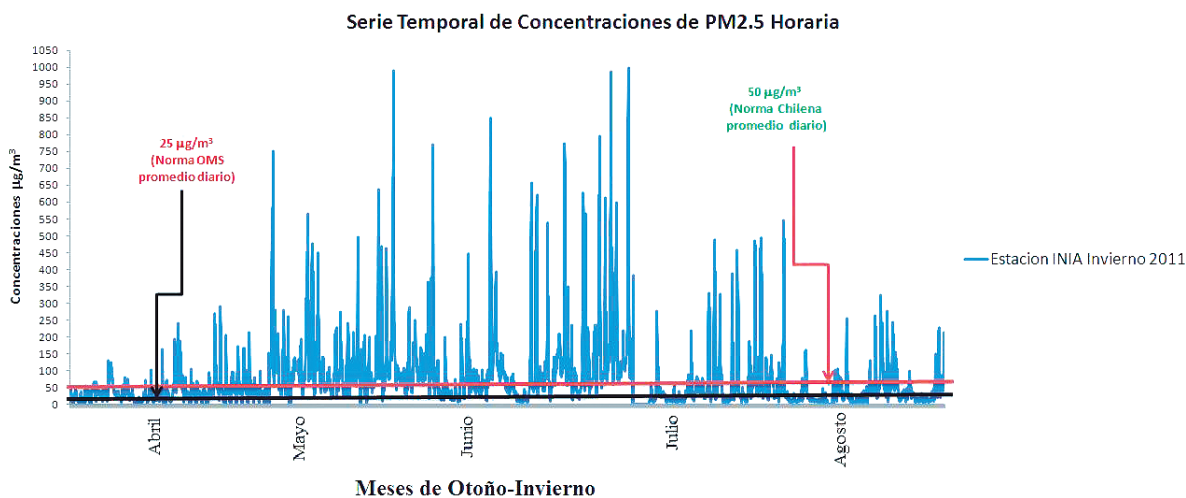


Fig. 5. Data horaria PM2.5 estación de monitoreo ambiental INIA (2011) en la ciudad de Chillán (MMA)

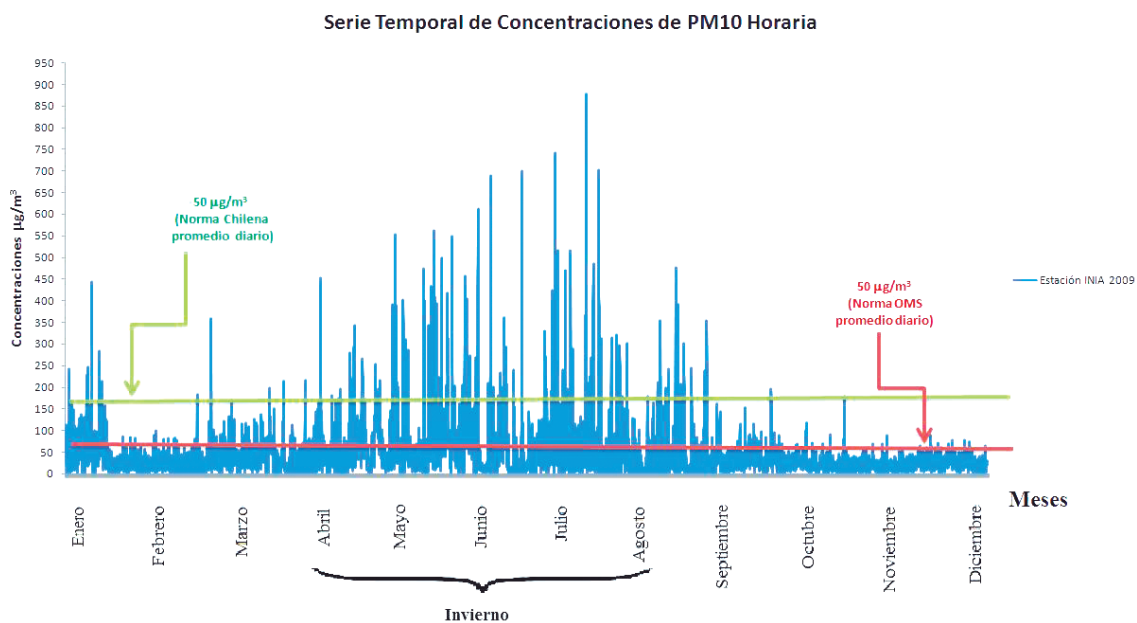


Fig. 6. Data horaria PM10 estación de monitoreo ambiental INIA (2009) en la ciudad de Chillán (MMA)

TABLA V. DATOS FALTANTES PM10 ESTACIÓN INIA, CHILLÁN 2011 (PROMEDIO 24 HORAS)

PM10 Año	Data Original	Número de datos	Data Faltante	%	Primer Mayor	Primer Mayor %	Segundo Mayor	Segundo Mayor %
(horaria)								
2008	8784	8190	594	6.8	273	46	122	21
2009	8760	8601	159	1.8	134	84.3	23	14.5
2010	8760	8498	262	3.0	88	33.6	43	16.4
2011	8760	3095	5665	64.5	4330	76.4	927	16.4
2012*	5568	5397	195	3.5	59	30.3	33	16.9
2013	1176	1176	0	0.0	0	0	0	0

*: Inicio registro 13 de mayo.

C. Modelos de Pronóstico

La ciudad de Santiago cuenta con un modelo de pronóstico oficial desde 1998, denominado "Modelo de pronóstico de Cassmassi" [40], y desde 2012 ha sido incorporado el modelo neuronal para mejorar el pronóstico de la calidad del aire en Santiago, perteneciente al Centro Meteorológico Ambiental de la Universidad de Santiago de Chile, liderado por los académicos Ernesto Gramsch y Patricio Pérez [41]. Sin embargo, actualmente de entre las ciudades contaminadas de tamaño medio distintas a Santiago solo Temuco contaría con un modelo de pronóstico oficial (el modelo Cassmassi). Luego, es importante contar con un modelo de pronóstico alternativo al oficial para ciudades de tamaño medio que hayan sido declaradas como zona saturada. Con ello se lograría disminuir la cantidad de falsos positivos (predecir una situación de alerta, siendo que no ocurrirá) producidos por los modelos de pronóstico. Justamente es el modelo neuronal el que ha presentado menor cantidad de falsos positivos; dando así mayor confianza a la autoridad correspondiente para que tome una mejor decisión en aras de implementar medidas preventivas para la protección de la salud de la población.

Otro aspecto importante que debe ser considerado, en lo que respecta al estudio por contaminación debido a material particulado, es el inventario de emisiones que debe generarse para todos los tipos de fuentes contaminantes que hay en un sector o ciudad donde se está ocasionando dicha polución. En el caso de la ciudad de Santiago se han generado al menos dos inventarios: uno el año 2000 y otro actualizado el año 2005. Para el caso de otras ciudades chilenas también se ha estado trabajando en ello [42].

Trabajos futuros debieran apuntar al análisis de PM10 y PM2.5 para la otra estación de monitoreo de Chillán (estación Purén en la Fig. 1), así como para otras ciudades de tamaño medio.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha analizado la situación actual en que están las ciudades de tamaño medio del sur de Chile, que han sido declaradas como saturadas o latentes, fundamentalmente debido al consumo de leña de mala calidad. Se ha demostrado, a través del análisis de los datos recopilados por la estación de monitoreo INIA (Chillán), que la población ha estado expuesta casi todo el año al material particulado tanto grueso como fino, y en cantidades que superan largamente tanto la norma ambiental chilena como la de la OMS. Ello expone a la población a enfermedades respiratorias.

Además, se ha enfatizado la importancia de contar con una buena base de datos para llevar a cabo

el diseño y puesto en marcha de un modelo de pronóstico para la calidad del aire que sea más efectivo y certero. Por ello es muy importante que el MMA mantenga una base de datos horaria, con la data lo más completa posible, en todas las estaciones de monitoreo, especialmente en ciudades de tamaño medio situadas al sur de Chile.

Se ha puesto énfasis en la necesidad de generar un nuevo modelo de pronóstico de la calidad del aire, distinto al que cuenta el Ministerio del Medio Ambiente, debido a los errores que ha mostrado en cuanto a su capacidad de pronóstico en la ciudad de Santiago y en la ciudad de Temuco; debido a lo cual se genera falsos positivos que dan origen a que se tomen decisiones erróneas por parte de las autoridades. Esto permitiría mantener bien informada a la población cuando se presenten alertas ambientales y, por otro lado, que la autoridad respectiva pueda tomar decisiones que permitan mitigar el daño a la salud humana que ocasiona esta contaminación del aire.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer el apoyo dado por el Departamento de Matemática y Física Aplicadas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción para llevar a cabo a buen término esta investigación. También agradece a su familia (compuesta por su esposa y sus hijos) por su apoyo y comprensión.

REFERENCIAS

- [1] M. J. Molina and L.T. Molina, "Megacities and atmospheric pollution", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 54, pp. 1047-3289, 2004.
- [2] R. G. E. Morales, Ed., *Contaminación Atmosférica Urbana*. Santiago (Chile): Editorial Universitaria, 2006.
- [3] M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, and C. E. Hanson, Eds., *Climate Change 2007: Impacts, adaptations and vulnerability. IPCC Fourth Assessment Report*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] O. G. Raabe, "Respiratory exposure to air pollutants", in *Air pollutants and the respiratory tract* (D. L. Swift and W. M. Foster, Eds.), vol. 128. New York, NY: Marcel Dekker, 1999.
- [5] M. Foster and D. L. Costa, Eds., *Air Pollutants and the Respiratory Tract. Lung Biology in Health and Disease*, 2nd ed. Boca Ratón, USA: Taylor & Francis, 2005.
- [6] W. McDonnell, N. Nishino-Ishikawa, F. Petersen, L. Chen, and D. Abbey, "Relationships of mortality with the fine and coarse fractions of long term ambient PM10 concentrations in nonsmokers", *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, vol. 10, pp. 427-436, 2000.
- [7] C. Pope and D. Dockery, "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, pp. 709-742, 2006.
- [8] D. M. Stieb, S. Judek, and R. T. Burnett, "Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 52, pp. 470-484, 2002.

- [9] J. Schwartz, F. Laden, and A. Zanobetti, "The concentration-response relation between $PM_{2.5}$ and daily deaths", *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, n° 10, pp. 1025-1029, October 2002.
- [10] P. J. Silva, F. Vawdrey, M. Corbett, and M. Erupe, "Fine particle concentrations and composition during winter time inversions in Logan, Utah, USA", *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 5410-5422, 2007.
- [11] R. N. Colville, E. J. Hutchinson, J. S. Mindell, and R. F. Warren, "The transport sector as a source of air pollution", *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 1537-1565, 2001.
- [12] M. Iabaca, F. Olaeta, E. Campos, J. Villaire, M. Tellez-Rojo, and I. Romieu, "Association between levels of fine particulate and emergency visits for pneumonia and other respiratory illnesses among children in Santiago Chile", *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 49, pp. 154-163, 1999.
- [13] L. A. Cifuentes, J. Vega, K. Köpfer, and L. Lave, "Effect of the Fine Fraction of Particulate Matter versus the Coarse Mass and Other Pollutants on Daily Mortality in Santiago, Chile", *Journal of Air & Waste Management Association*, vol. 50, pp. 1287-1298, 2000.
- [14] B. Ostro, G. Eskeland, J. Sanchez, and T. Feysoglu, "Air pollution and health effects: a study of medical visits among children in Santiago, Chile", *Environmental Health Perspective*, vol. 107, pp. 69-73, 1999.
- [15] R. E. Dales, S. Cakmak, and C. B. Vidal, "Air pollution and hospitalization for venous thromboembolic disease in Chile", *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, vol. 8, pp. 669-674, 2010.
- [16] R. Troncoso, L. de Grange, and L. A. Cifuentes, "Effects of environmental alerts and pre-emergencies on pollutant concentrations in Santiago, Chile", *Atmospheric Environment*, vol. 61, pp. 550-557, 2012.
- [17] P. Ulriksen, M. Merino y A. Llano, "Informe Técnico: Análisis comparativo de condiciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica, en Santiago, durante los períodos de otoño invierno de 1997, 1998, 1999, 2000 y 2001". Laboratorio de Modelación y Contaminación Atmosférica, 2001.
- [18] J. E. Celis, J. R. Morales, C. A. Zaror, and J. C. Inzunza, "A study of the particulate matter PM_{10} composition in the atmosphere of Chillán, Chile", *Chemosphere*, vol. 54, pp. 541-550, 2004.
- [19] J. E. Celis, J. R. Morales, C. A. Zaror y O. M. Carvacho, "Contaminación del aire atmosférico por material particulado en una ciudad intermedia: el caso de Chillán, (Chile)", *Información Tecnológica*, vol. 18, n° 3, pp. 49-58, 2007.
- [20] M. Tsapakis, E. Lagoudaki, E. G. Stephanou, I. G. Kavouras, P. Koutrakis, P. Oyala, and D. von Baer, "The composition and sources of $PM_{2.5}$ organic aerosol in two urban areas of Chile", *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 3851-3863, 2002.
- [21] I. Kavouras, P. Koutrakis, F. Cereceda-Balic, and P. Oyala, "Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in five Chilean cities using factor analysis", *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 51, pp. 451-464, 2001.
- [22] M. Oyarzún, "Contaminación Aérea y sus efectos en la salud", *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, vol. 26, pp. 16-25, 2010.
- [23] P. Sanhueza, C. Vargas y P. Mellado, "Impacto de la contaminación del aire por PM_{10} sobre la mortalidad diaria en Temuco", *Revista Médica de Chile*, vol. 134, pp.754-761, 2006.
- [24] A. Gómez-Lobo, "El consume de leña en el sur de Chile: ¿por qué nos debe preocupar y qué se puede hacer?", *Revista Ambiente y Desarrollo*, vol. 21, n° 3, pp. 43-47, 2005.
- [25] C. Brandt, R. Kune, B. Dobmeier, J. Schnelle-Kreis, J. Orasche, G. Schmoeckel, J. Diemer, R. Zimmermann, and M. Gaderer, "Ambient PM_{10} concentrations from wood combustion - Emission modeling and dispersion calculation for the city area of Augsburg, Germany", *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 3466-3474, 2011.
- [26] C. Gonçalves, C. Alves, A. P. Fernandes, C. Monteiro, L. Tarelho, M. Evtuygina, and C. Pio, "Organic compounds in $PM_{2.5}$ emitted from fireplace and woodstove combustion of typical Portuguese wood species", *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 4533-4545, 2011.
- [27] J. A. Cooper, "Environmental impact of residential wood combustion emission and its implications", *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 30, n° 8, pp. 855-861, 1980.
- [28] S. Szidat., A. S. H. Prévôt, J. Sandradewi, M. Rami Alfara, H-A. Synal, L. Wacker, and U. Baltensperger, "Dominant impact of residential wood burning on particulate matter in Alpine valleys during winter", *Geophysical Research Letters*, vol. 34, pp. 1-6, 2007.
- [29] P. Herrera, Chillán, Capital de la Cultura Tóxica", *NOS Magazine*, n° 128, pp. 18-22, junio, 2012.
- [30] Codelco, "Impulsan acciones públicas para descontaminar Rancagua", 2012. [Online]. Available: http://www.codelco.com/impulsan-acciones-publicas-para-descontaminar-rancagua/prontus_codelco/2012-08-09/172432.html.
- [31] CONAMA-Bío Bío, Departamento de Control de la Contaminación. Informe de gestión de la calidad del aire. Gran Concepción, mayo de 2005. Disponible en: <http://www.ecoronel.cl/wp-content/uploads/2014/03/Informe-gestion-de-la-calidad-del-aire-en-gran-concepcion.pdf>
- [32] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Disponible en: <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-propertyvalue-12824.html>.
- [33] H. Junninen, H. Niska, K. Tuppurainen, J. Ruuskanen, and M. Kolehmainen. Methods for imputation of missing values in air quality data sets", *Atmospheric Environment*, vol. 38, pp. 2897-2907, 2004.
- [34] Disponible en: <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/>.
- [35] País: Temuco registra tercera emergencia ambiental del año, *La Tercera de la Hora* (12 de junio de 2013).
- [36] Actualidad: Niveles de toxicidad horaria no serán informadas a la población, *El Austral* (12 de junio de 2013), 4.
- [37] Decreto n° 59/98 (1998). Norma de calidad primaria para PM_{10} . Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Santiago de Chile (MMA). Disponible en: <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-propertyvalue-12824.html>.
- [38] Ministerio del Medio Ambiente. Norma Primaria de Calidad Ambiental para material Particulado Fino Respirable $PM_{2.5}$, 5. Diario Oficial de la República de Chile, n° 39.955, Cuerpo 1, lunes 9 de mayo de 2011, 24.
- [39] OMS. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de riesgos (OMS, 2006). Disponible en: http://www.pnuma.org/forodeministros/19-mexico/documentos/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf

ESTUDIO ACERCA DEL MATERIAL PARTICULADO EMITIDO EN
CIUDADES DE TAMAÑO MEDIO AL SUR DE SANTIAGO DE CHILE

- [40] C. Cassmassi, "Improvement of the forecast air quality of the knowledge of the local meteorological conditions in the metropolitan region", *Technical Report Number 2*, National Commission of the Environment Metropolitan Region, Santiago, Chile, 1999.
- [41] Universidad de Santiago de Chile, "Información meteorológica y ambiental", 2013. [Online]. Disponible en: <http://ambiente.usach.cl/>.
- [42] M. Osses de Eicker, R. Zah, R. Triviño, and H. Hurni, "Spatial accuracy of a simplified disaggregation method for traffic emission applied in seven mid-sized Chilean cities", *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp. 1491-1502, 2008.