

ANÁLISIS DE TENDENCIA DEL MATERIAL PARTICULADO EN LA REGIÓN METROPOLITANA Y REGIONES CENTRO SUR

ELABORADO PARA EL MINISTERIO DE MEDIO
AMBIENTE

LICITACIÓN ID: 608897-LP19
INFORME FINAL Versión Corregida
Abril-2020



www.cmmolina.cl

cmmolina@cmmolina.cl

(+56) 2 247 9650

Antonio Bellet 292 int. 602
Providencia, Santiago

INDICE

INDICE	1
PRESENTACIÓN.....	4
RESUMEN EJECUTIVO	5
Introducción	13
Recopilación de datos de concentración de MP₁₀ y MP_{2,5} de las ciudades con planes de descontaminación:	18
Solicitud formal de información	18
Análisis exploratorio (screening) de la información de Calidad de Aire y meteorología	20
Región del Libertador Bernardo O'Higgins	20
Región del Maule	24
Región de Ñuble y Región del Biobío	29
Región de la Araucanía.....	39
Región de Los Ríos.....	43
Región de Los Lagos	46
Región de Aysén.....	49
Diagnóstico de la completitud de datos de las estaciones de Rancagua a Coyhaique. ...	52
Análisis de completitud de información	52
Evaluación del cumplimiento de normas de calidad respectivas	57
Recopilación de toda la información previa existente, para la Región Metropolitana, donde se incluya la información de los estudios anteriores con el fin de establecer tendencias.	64
Implementar metodologías de control y aseguramiento de la calidad de las muestras y análisis para la estación Parque O'Higgins.	83
Metodología de Selección de Filtros Utilizada para asegurar la calidad y representatividad de los resultados.	84
Análisis de la incertidumbre de las mediciones	86
Establecer un análisis de tendencias de Material Particulado MP₁₀ y MP_{2,5} de las principales ciudades de la zona centro sur del país.	91
Descripción de metodología de análisis de Tendencias utilizando la metodología de Factor de Impacto por Concentración (FIC).	91
Metodología de análisis de FICs a nivel regional.....	93
Metodología de análisis de FICs a nivel nacional	95
Metodología de análisis de FICs de ciudades con Plan de Descontaminación	96

Análisis de tendencias del material particulado MP₁₀ y MP_{2,5} de las principales ciudades de la zona centro sur del país (Rancagua a Coyhaique), mediante el factor de impacto en las Concentraciones (FIC).	97
Resultados FICs Nacionales	97
Resultados FIC regional:	100
<i>Factores que impactan las concentraciones de MP₁₀ y MP_{2,5} de las estaciones ubicadas de Rancagua a Coyhaique.</i>	122
Análisis de factores que impactan las concentraciones de MP ₁₀ y MP _{2,5} para las estaciones de monitoreo de Rancagua a Coyhaique, e incorporar resultados obtenidos del análisis de FIC de MP ₁₀ y MP _{2,5} para las estaciones de monitoreo de Rancagua a Coyhaique.....	122
<i>Realizar un análisis fisicoquímico de los filtros históricos de MP fino y grueso entre los períodos comprendidos entre agosto de 2014 a diciembre 2018, para la estación Parque O'Higgins.</i>	126
Análisis de la concentración de elementos.....	126
<i>Análisis de tendencia de composición elemental de MP fino y MP grueso usando la metodología de Factor de Impacto por Concentración (FIC)</i>	134
Metodología estadística	134
Análisis de Resultados MP_{2,5}	137
Variación del MP _{2,5}	137
Variaciones y tendencias de la composición elemental del MP _{2,5}	138
Análisis de Resultados MP_{2,5-10}	148
Variación del MP _{2,5-10}	148
Variaciones y tendencias de la composición elemental del MP _{2,5-10}	149
<i>Determinar las concentraciones y distribución del aporte de las fuentes de material particulado fino y grueso, de acuerdo con los resultados obtenidos en la estación Parque O'Higgins de la RM.</i>	155
Resultados MP fino	155
Resultados MP grueso	160
<i>Análisis de la evolución de las emisiones y la participación de los diferentes sectores en la calidad del aire durante los últimos 5 años en la Región Metropolitana</i>	167
<i>Conclusiones</i>	169
<i>Bibliografía</i>	172
<i>ANEXO I: Corrección de datos históricos de MP_{2,5}</i>	176
<i>ANEXO II: Filtros Solicitados al Ministerio de Medio Ambiente.</i>	180
Filtros entregados por el Ministerio de Medio Ambiente.....	180
Filtros enviados a analizar.	182

<i>ANEXO III: Serie de tiempo de concentración de MP y elementos</i>	185
MP fino.....	185
MP grueso	196
<i>ANEXO IV: Tabla de valores obtenidos por metodología FIC regional y su significancia estadística</i>	206
<i>ANEXO V: Tablas de factor de impacto para MP fino y grueso y composición elemental</i>	218
Tablas de Factor de Impacto y su significancia estadística para el MP _{2.5} y su composición elemental	218
Tablas de Factor de Impacto y su significancia estadística para el MP _{grueso} y su composición elemental.	223
<i>ANEXO VI: Análisis de concentración de elementos en función del nivel de concentración de MP_{2.5}</i>	228
<i>ANEXO VII: Abreviaciones</i>	239

PRESENTACIÓN

Centro Mario Molina Chile (CMMCh) presenta a continuación el Informe Final en su versión corregida, referente a la licitación número ID 698897-LP19, solicitado por el Ministerio del Medio Ambiente, enmarcado bajo el título “Análisis de Tendencia del Material Particulado en la Región Metropolitana y Regiones Centro-Sur”.

El objetivo general de este estudio es generar antecedentes técnicos mediante la realización de la caracterización fisicoquímica del material particulado en la Región Metropolitana (RM) para la estación Parque O’Higgins , entre los años 2014-2018, con la finalidad de estudiar las tendencias de concentración de MP_{10} y $MP_{2,5}$ de las principales ciudades de la zona centro-sur del país (Rancagua-Coyhaique) con planes de descontaminación vigentes, para apoyar el seguimiento de la evolución de la calidad del aire a nivel nacional.

RESUMEN EJECUTIVO

Los estudios de tendencias de concentración de material particulado han sido antecedentes trascendentales para el actual Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA, DS N° 31/2016). La Región Metropolitana dispone de una base de datos única, de categoría y estándares internacionales, que consiste en filtros de MP fino y MP grueso ($MP_{2,5}$ y $MP_{2,5-10}$, respectivamente) que históricamente han sido colectados en la estación de Parque O'Higgins. La información disponible comprende desde abril del 1998 hasta septiembre del 2014, y en este proyecto tiene como objetivo actualizar esta base de datos hasta el diciembre 2018. Se incorpora además un resumen de los resultados químicos disponibles hasta el momento, y se entregan series de tiempo de concentración y resumen estadísticos, encontrándose resultados dentro del orden de magnitud de lo que se venía registrando en la información histórica.

Adicionalmente se realizó una revisión de la información histórica de calidad del aire (para partículas) y meteorología de la RM y las principales ciudades con planes de descontaminación vigentes del Sur de Chile, desde la VI a la XII región para el período 2014-2018. Se incorporaron evaluación de normas de calidad, y análisis de tendencias utilizando análisis de regresión multivariado.

La situación de calidad del aire para la RM señala condición de saturación tanto para $MP_{2,5}$ como para MP_{10} . Prácticamente todas las estaciones de la Red MACAM (excepto Las Condes) presentan concentración por sobre las normas de calidad respectiva. Respecto de MP_{10} , la saturación se da preferentemente por la norma anual en todas las estaciones, excepto para Talagante.

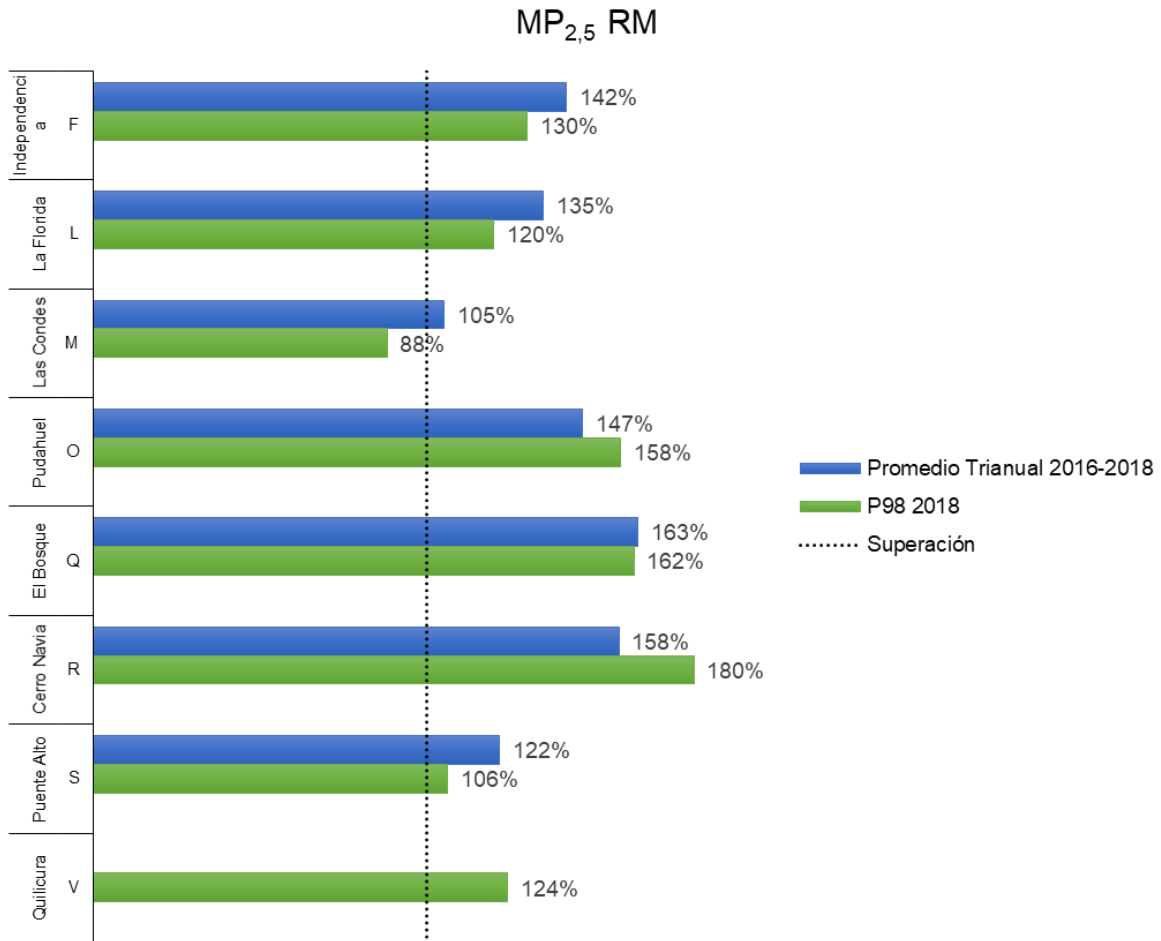


Ilustración 1: Resumen calidad del aire RM por MP_{2,5} al año 2018. Elaboración Propia. Fuente: SMA

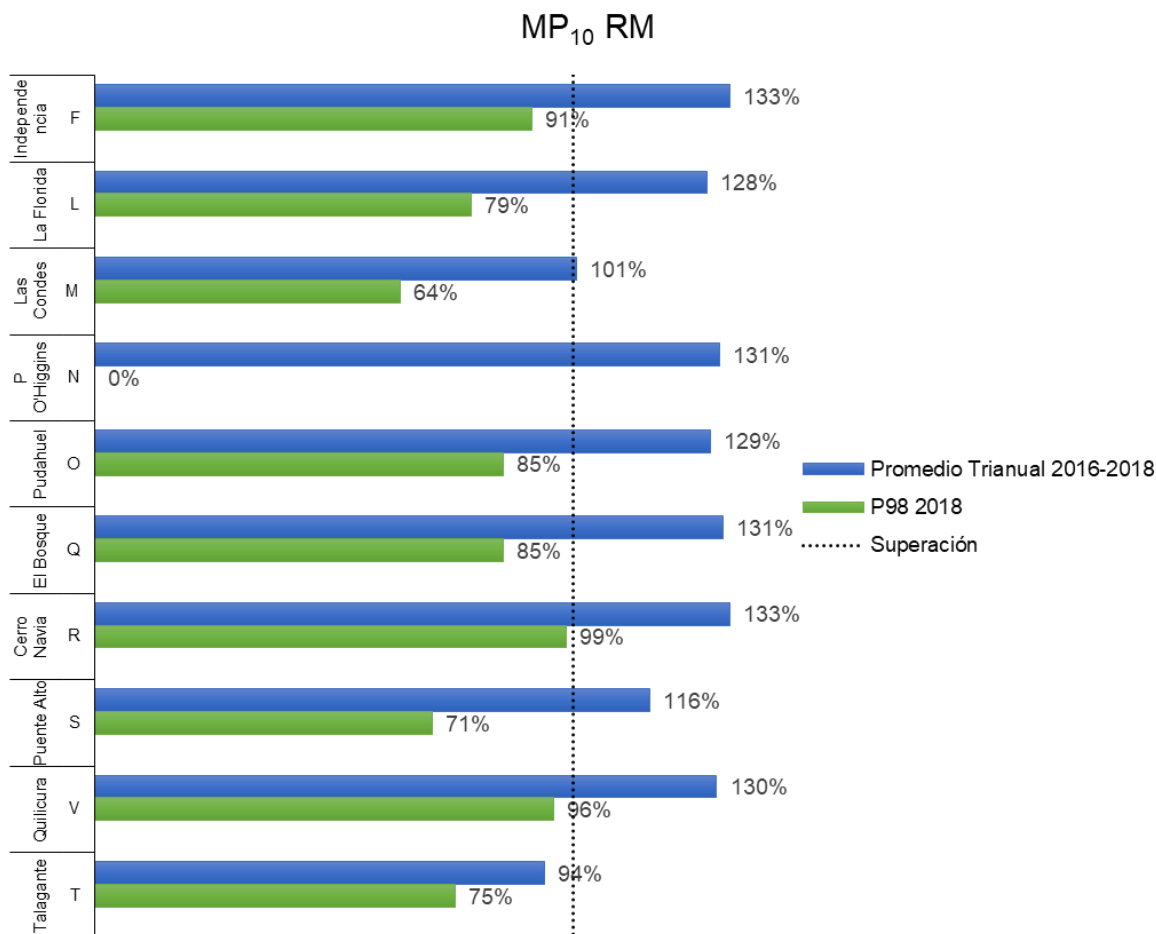


Ilustración 2: Resumen calidad del aire RM por MP₁₀ al año 2018. Elaboración Propia. Fuente: SMA

Históricamente, la estación de Parque O'Higgins realiza monitoreo dicotómico (MP fino y grueso) desde el año 1989, y desde el año 1998 se han estado realizando análisis de composición elemental (por XRF) en laboratorios internacionales acreditados. En esta oportunidad se enviaron a análisis XRF 678 filtros (365 filtros de fracción fina y 313 de fracción gruesa y 6 filtros blancos) correspondientes a mediciones realizadas entre el año 2014-2018, y se complementó con información histórica, teniendo en total una base de datos de especiación química de 20 años, única a nivel mundial. Se observa que las concentraciones de MP fino han ido disminuyendo en todo el período, sin embargo, considerando solo los períodos fríos (abril-septiembre) es posible aislar dos quiebres de tendencia, el primero en el 2007-2008, el segundo el 2015 -2016. En efecto, las concentraciones invernales tienden a presentar valores más altos en los últimos 4 períodos (2015-2018) con relación a los períodos anteriores (2011-2014). Adicionalmente, es posible identificar que son las concentraciones invernales las que más han ido disminuyendo, indicando que las medidas implementadas efectivamente han tenido un impacto mayor en los períodos invernales.

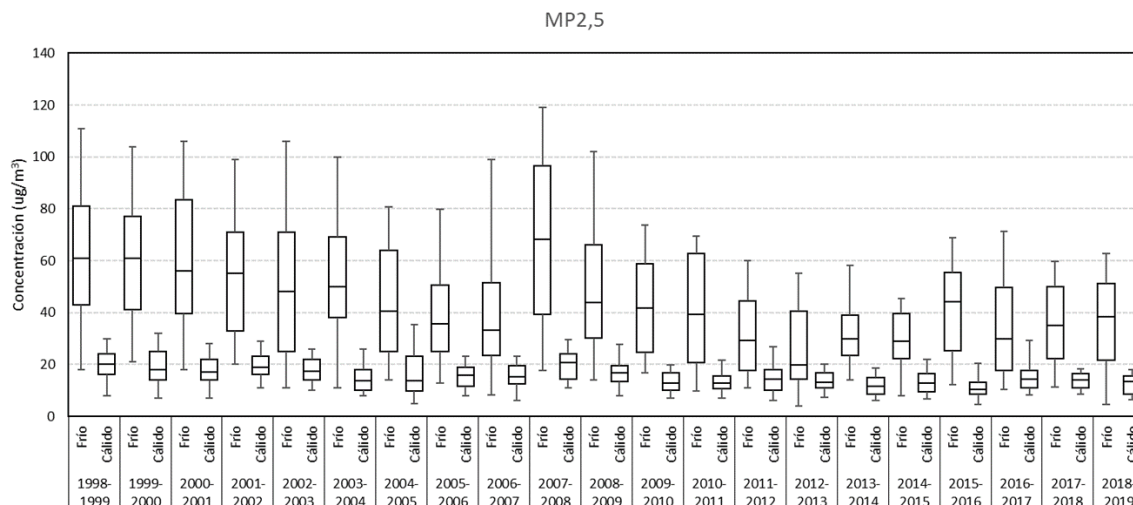


Ilustración 3: Gráficos de caja de concentración de MP fino equipo dicotómico Parque O'Higgins. Elaboración propia.

La concentración promedio de elementos determinados en el período 2014-2018 se encuentran dentro de los órdenes de magnitud de los registros históricos. En general todos los elementos presentan mayor concentración durante el período frío respecto del cálido, especialmente S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Br, Pb.

La concentración de elementos fue analizada estadísticamente bajo la metodología de Factor de Impacto, que consiste en análisis de regresión multivariado presentado en (Sax et al., 2007), el cual permite evaluar tendencias de concentración descontando la influencia de variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento en la variabilidad de las concentraciones.

Elementos presentes en la corteza terrestre (Al, Si, Ca, Ti) y previamente han sido atribuidas la resuspensión de polvo de caminos (Barraza et al., 2017), o bien debido a actividades de construcción (Achilleos et al., 2016; Moreno et al., 2010) no permiten identificar una tendencia de disminución o aumento claro a lo largo de los años. Ti es el único elemento que tiende a mostrar una tendencia a la reducción en los 20 años. Dado los perfiles temporales mostrados por estos elementos, es posible afirmar que reflejan actividades antropogénicas asociadas al desgaste/erosión de suelos, y muy influenciados por el efecto del tráfico vehicular, dado el perfil semanal encontrado.

Los elementos Cu, As, Zn y S han sido atribuidas a emisiones industriales. Cu y Zn también han sido atribuidos al impacto de emisiones vehiculares (Barraza et al., 2017; Moreno et al., 2010), por lo que estos elementos están presentes en ambas fuentes emisoras. Los FICs para Cu, S y Zn indican una tendencia clara a la reducción, aunque al igual que en el caso de los elementos térreos anteriores, también hay incrementos en los últimos dos años (2017-2018). Cu y Zn presentan FICs altos en el año 2005. El incremento de S, Ni y V que se observa en el año 2007 obedece a períodos corte de suministro de gas natural proveniente desde Argentina, donde las industrias tuvieron que volver a utilizar petróleos pesados para funcionar.

Pb y Br previamente han sido atribuidos al impacto vehicular, y muestran la clásica reducción de FIC debido al retiro de tetracloroetil plomo de las gasolinas producto de la implementación del convertidor catalítico en el mercado automotriz (Arteconi et al., 2011) en el período 1992-1993, mostrando los mayores valores de FIC en el año 1998-2001. Posteriormente los valores de FIC's tienden a ser más estables en el caso del Br, y una leve tendencia a la disminución para el caso del Pb.

Como se mencionó anteriormente, Cu y Zn, además de provenir de fuentes industriales también provienen de tráfico vehicular, ya sea por desgaste de frenos o por combustión de lubricantes en el combustible (Grigoratos and Martini, 2015; Viana et al., 2007). Ambos elementos muestran una tendencia a la disminución, excepto los últimos dos años, probablemente señalando las modificaciones que han tenido las diferentes regulaciones en transporte vehicular (normas Euro principalmente).

El Cl y Na han sido utilizados como trazadores de aerosoles marinos en (Barraza et al., 2017; Kavouras et al., 2001; Moreno et al., 2010) (Moreno et al., 2010), y ambos elementos pueden ser utilizadas como indicadores de la contribución regional asociada a fuentes emisoras fuera de la cuenca de Santiago (fuentes costeras). El K por otra parte ha sido asociado al impacto de emisiones de quema de biomasa (Kavouras et al., 2001; Moreno et al., 2010). Se observa que el Na aumenta significativamente a partir del año 2001, para después mostrar una tendencia hacia la reducción. Por otra parte, Cl presenta mayores valores FIC entre los años 1998-1999, y posteriormente tiende a disminuir. Por otro lado, la evolución de K a través de los años muestra una tendencia a la disminución. El hecho de Na y Cl muestren comportamientos y tendencias diferentes, obedece a que no responden a las mismas fuentes emisoras con igual magnitud. El comportamiento temporal de Na está más relacionado con las emisiones regionales, y más cercano al impacto de aerosoles marinos. Sin embargo, el Cl tiene un comportamiento más asociado a fuentes antropogénicas debido al aumento significativo en otoño-Invierno.

De la revisión de información de calidad del aire de las regiones VI a la XII se pudo encontrar que existe información disponible a ser utilizada, sin embargo, se encontraron múltiples períodos con series de datos que claramente evidenciaban problemas de monitoreo. Estos períodos fueron removidos de las series, para los análisis estadísticos posteriores. La situación de calidad del aire al año 2018 indica condición de saturación en casi todas las estaciones de monitoreo, especialmente las que se encuentran en la Región de Aisén, La Araucanía y Los Lagos.

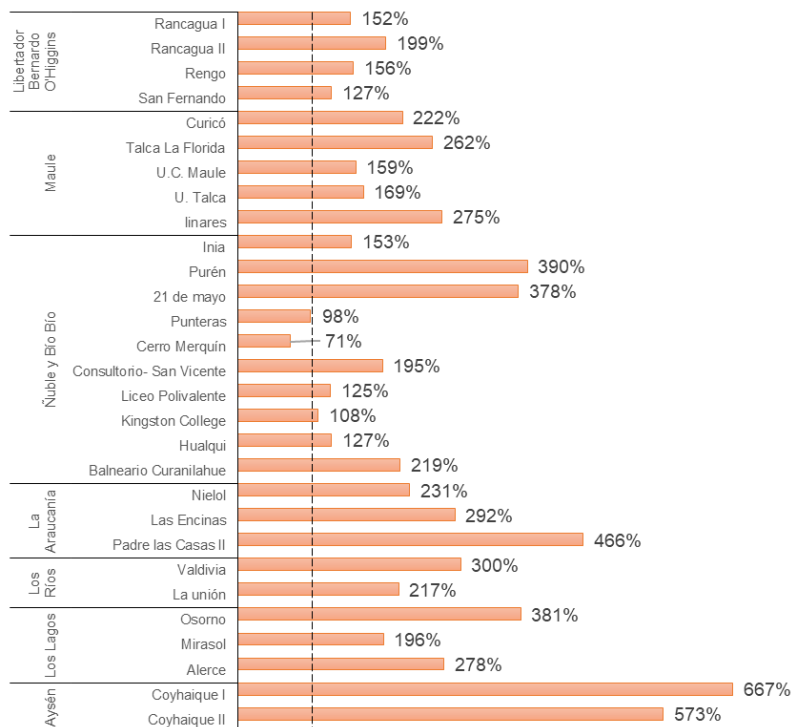
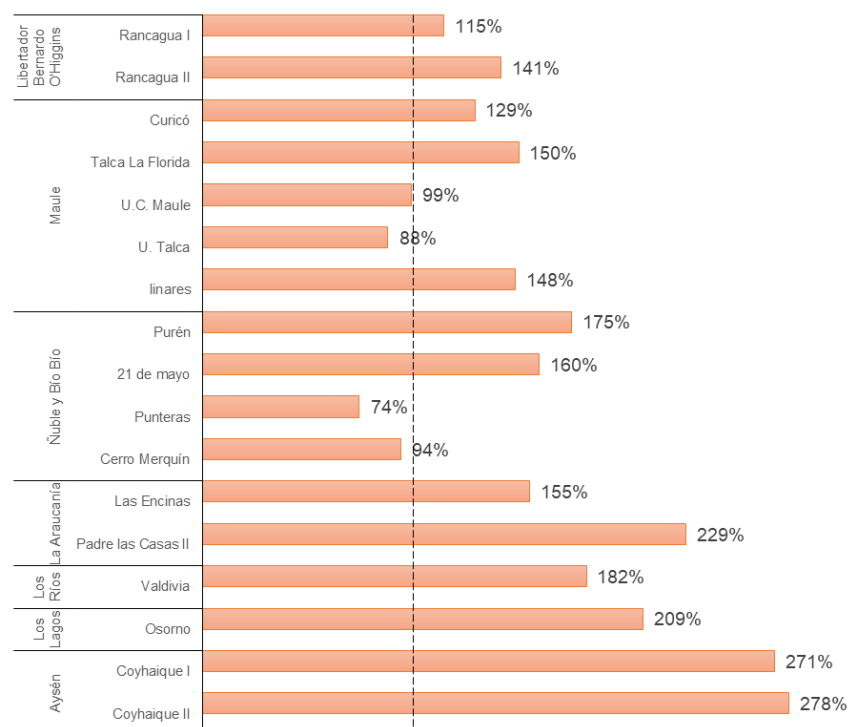
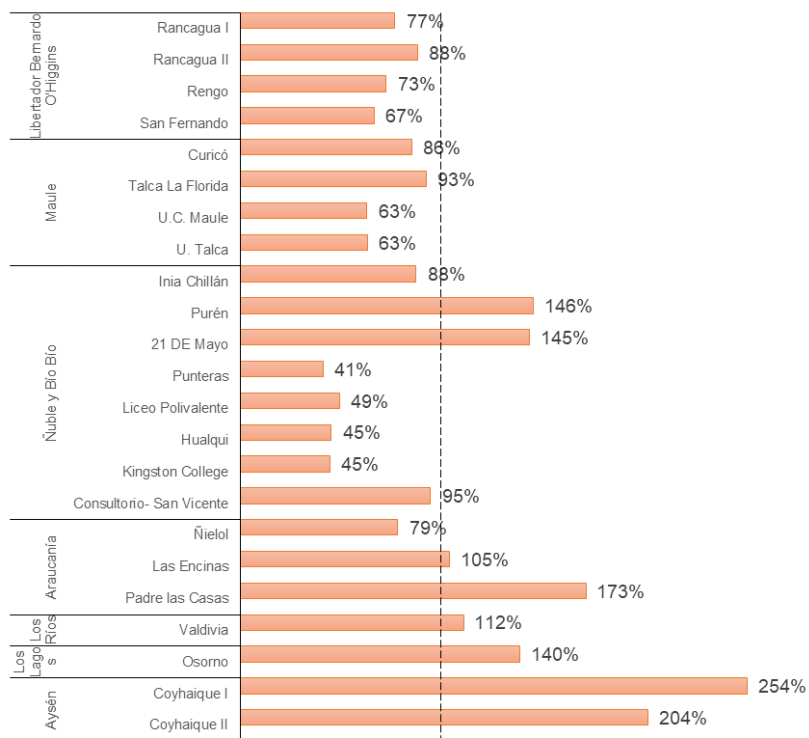
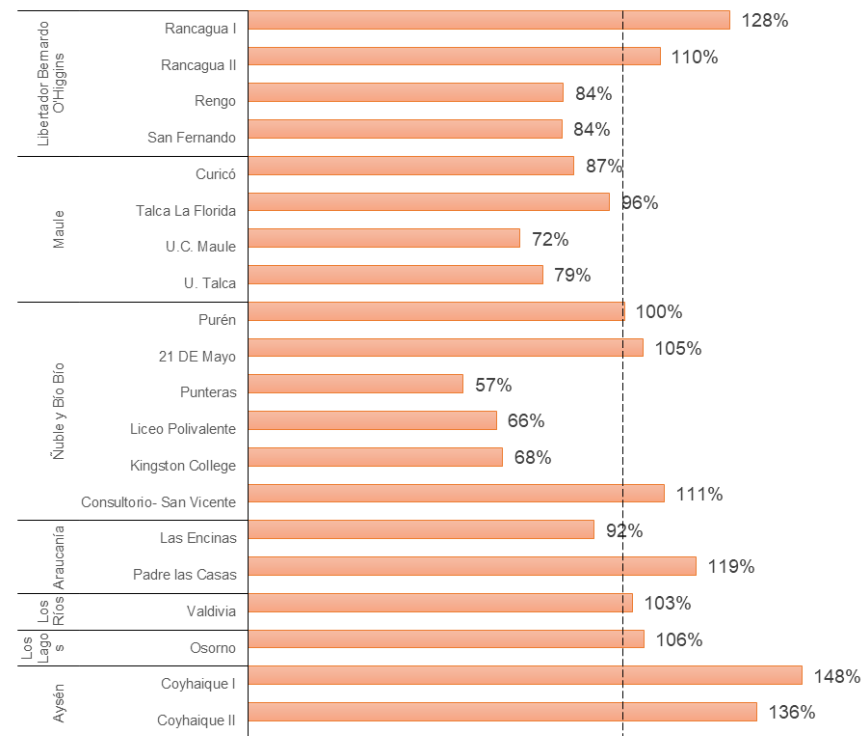
MP_{2,5} Percentil 98 Año 2018MP_{2,5} Promedio Trianual 2016-2018

Ilustración 4: Resumen calidad del aire regiones por MP_{2,5} al año 2018. Elaboración Propia.

MP₁₀ Percentil 98 Año 2018MP₁₀ Promedio Trianual 2016-2018Ilustración 5: Resumen calidad del aire regiones por MP₁₀ al año 2018. Elaboración Propia.

El análisis de tendencia de factor de impacto por concentración (FIC) aplicado a los monitoreos continuos, señala que dentro de los factores que más impactan la concentración son las variables meteorológicas de velocidad de viento, y el efecto estacional, lo que tiene relación con las menores condiciones de dispersión durante los meses más fríos y también al aumento de las fuentes emisoras de calefacción, en especial son importante en aquellas ciudades del extremo sur. El análisis estadístico indica que a nivel país la tendencia anual indica una disminución de los niveles de concentración a partir del año 2015 tanto para MP_{10} como $MP_{2,5}$, esta variable es estadísticamente significativa, con una disminución durante los fines de semana señalando predominio de fuentes antropogénicas.

Respecto de la tendencia para MP_{10} y $MP_{2,5}$ en la RM se encuentra que hay una disminución en los dos últimos años (2017-2018). La distribución espacial, señala que las mayores concentraciones se dan hacia el sector poniente de la región, especialmente en Cerrillos, El Bosque, Cerro Navia y Pudahuel.

Respecto de la tendencia anual en las regiones se observa una disminución en casi todas ellas, excepto en la Araucanía y Los Lagos en donde hubo impactos por concentración mayores en el último año, respecto de lo que se venía presentando.

El modelo receptor aplicado a los análisis de composición elemental disponibles indica cuatro fuentes emisoras predominantes, identificadas como tráfico vehicular mezclado con contribución regional (aerosoles marinos), polvo resuspendido y quema de leña. Para el último período (2014-2018 se encuentra que la mayor parte de los impactos por $MP_{2,5}$ se dan por el impacto de emisiones vehiculares con una fuerte contribución regional, que incrementa durante invierno debido a las menores condiciones de dispersión atmosférica. Respecto de los años anteriores se ha encontrado que los aportes industriales y de quema de biomasa (leña) presentan una reducción menor.

En términos generales, los análisis estadísticos indicados en este informe evidencian que todas las estaciones de monitoreo están mostrando un comportamiento de escala urbana, respondiendo prácticamente al mismo fenómeno local. Para elaborar una imagen más acabada de cada zona, es necesario que el monitoreo actual de calidad del aire evolucione a incrementar el monitoreo en zonas donde no hay información (zonas rurales, zonas background) e incorporar mediciones frecuentes de especies trazadoras de fuentes y componentes secundarios de las partículas atmosféricas, con la finalidad de disponer de mejores indicadores del seguimiento de medidas de los Planes de Descontaminación.

Introducción

La Organización Mundial de la Salud posiciona a la contaminación atmosférica como uno de los principales problemas medioambientales y estimó que el año 2016 ocurrieron aproximadamente 4.2 millones de muertes prematuras por año en todo el mundo, cuya causa está asociada a la exposición a contaminantes atmosféricos, especialmente a la exposición a $MP_{2,5}$ (WHO, 2016).

Los estudios de tendencias de concentración de material particulado forman parte de antecedentes trascendentales para el actual Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA, DS N° 31/2016), ya que permiten evaluar la efectividad de las acciones y medidas enfocadas en la reducción de las emisiones de las diversas fuentes de la zona. Al respecto, la RM dispone de una base de datos única, de categoría y estándares internacionales, que muy pocas ciudades la tienen. Esta base de datos consiste en los filtros de MP fino y MP grueso ($MP_{2,5}$ y $MP_{2,5-10}$, respectivamente) que históricamente han sido colectados en la estación de Parque O'Higgins. Esta base de datos considera la concentración de gravimétrica de ambas fracciones de MP y además de composición elemental, cuya data comprende desde abril del 1998 hasta septiembre del 2014. En el presente proyecto, se actualizará esta base de datos hasta el año 2018, y por lo tanto esta información sirve de testigo de todo lo que ha ocurrido en la RM en 20 años de historia de descontaminación atmosférica.

Los principales componentes del $MP_{2,5}$ son *Sulfato*, *Nitrato*, *Amonio*, *Cloruro*, *Carbono Elemental (EC)* y *Aerosoles Orgánicos (OA)* (Finlayson-Pitts and Pitts, 2000; Seinfeld and Pandis, 2016). Los OA corresponden a una compleja mezcla de cientos o incluso miles de compuestos orgánicos diferentes. Un resumen de estas especies se entrega en la Tabla 1.

Tabla 1: Principales Componentes primarios y secundarios de partículas atmosféricas y su relación con fuentes emisoras. Fuente (Seinfeld and Pandis, 2016)

COMPONENTE	RELACIÓN CON FUENTES EMISORAS.
AEROSOL ORGÁNICO (OA)	En atmósferas urbanas es el principal componente del $MP_{2,5}$ en masa, y una parte proviene de fuentes primarias (combustión, degradación de vegetación, etc.) que se denomina POA (Aerosol Orgánico Primario), y una parte proviene de la transformación atmosférica de gases precursores (COVs, Compuestos orgánicos Volátiles) en partículas, que se denomina SOA (Aerosol Orgánico Secundario).
CARBONO ELEMENTAL (EC)	Es la parte refractaria del $MP_{2,5}$, y se refiere a carbono elemental propiamente tal, que corresponde a material que no ha sido combustionado eficientemente producto de la pirolisis que ocurre durante la combustión. Este contaminante es responsable de la absorción de radiación solar y es exclusivamente de origen primario ya que proviene únicamente por procesos de combustión incompleta.
CARBONATOS	Corresponde a partículas de origen mineral o bien de actividades en donde hay procesos mecánicos (construcción, por ejemplo), y están

COMPONENTE	RELACIÓN CON FUENTES EMISORAS.
	distribuidos preferentemente en la fracción gruesa de las partículas ($MP_{2,5-10}$).
NITRATO (NO_3)	Contaminante secundario fotoquímico, proveniente de la transformación atmosférica de los NO_x emitidos en procesos de combustión interna (motores vehiculares, por ejemplo), en calderas industriales. Algunos otros procesos también emiten NO_x debido al contenido de nitrógeno en el combustible, como por ejemplo la combustión de biomasa.
SULFATO (SO_4)	Compuesto contaminante secundario, proveniente de las emisiones de SO_2 que ha sido oxidado sucesivamente en la atmósfera. Está más bien relacionado con la combustión de combustibles con alto contenido de azufre (petróleos pesados, carbón) y también en procesos de refinación minera (procesos industriales).
AMONIO (NH_4)	Es el contra ion inorgánico atmosférico de excelencia de los iones inorgánicos anteriormente mencionados. Proviene principalmente de las emisiones de NH_3 , destacándose las actividades agrícolas y ganaderas. También se relacionan con emisiones vehiculares en donde existan trampas de urea para el control de otras emisiones gaseosas.
CLORURO, SODIO, MAGNESIO	Se encuentran como sales en las partículas atmosféricas, y como iones positivos que provienen de diferentes fuentes emisoras. Están asociados a emisión de aerosoles marinos, en ausencia de otras fuentes se pueden incluir otras emisiones industriales como las industrias productoras de papel.
ELEMENTOS TRAZA	Algunos elementos de estos se denominan metales de transición y usualmente se encuentran en bajas cantidades, sin embargo, su determinación permite la identificación de elementos trazas útiles para la identificación de fuentes emisoras relevantes, por ejemplo, fundiciones, termoeléctricas, etc.

La determinación de la composición química de los principales componentes de las partículas atmosféricas es una labor compleja, ya que involucra la aplicación de diferentes técnicas de análisis. No existe una metodología estandarizada y única, sino que son diferentes aproximaciones que buscan determinar la composición química del material particulado. El análisis de tendencias de concentración histórica de las series de MP_{10} y $MP_{2,5}$ realizado para la RM se encuentra concentrado en la determinación de los elementos trazas, mediante el análisis de fluorescencia por rayos X (XRF). Esto ha permitido visualizar realmente los efectos que han tenido las diferentes medidas implementadas en los 20 años de descontaminación atmosférica de región, entre las que destaca la desulfuración de combustible, el cambio de matriz energética, implementación de mejores tecnologías de combustión en motores vehiculares, etc. Estos antecedentes se encuentran expresados con mayor detalle en la sección de revisión bibliográfica de este documento.

Con relación a la composición elemental se han encontrado que determinados grupos de elementos pueden ser atribuidos a una fuente en particular o bien a un grupo. Un resumen se entrega en la Tabla 2 para fuentes relacionadas con la resuspensión de polvo y transporte vehicular, y en la Tabla 3 para determinados tipos de fuentes industriales. ***Esta información es fundamental para entender los resultados de análisis de composición elemental utilizados en este informe.*** Por ejemplo, elementos Sc, Ce, Sm, Fe, Al, Mn se han relacionado generalmente con fuentes naturales de resuspensión de polvo, ya que se encuentran como minerales. Zn, Ba, Al, Cr, Fe, Hg, La, Mg, Mn, Na, Sb, Sc, V, OC, BC, por otra parte, se han asociados al tráfico vehicular.

Tabla 2: Fuentes emisoras relacionadas con el tráfico vehicular y principales especies trazadoras determinadas en la composición química y elemental del MP (Presentación "Source apportionment of PM", presentada en 10th Task Force on Measurement and Modelling meeting, Paris, 15-17 June 2009 realizada por Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Moreno T., Amato F., Pandolfi M., Pey. J.).

FUENTE	TRAZADOR	REFERENCIA
Suelo	Sc, Ce, Sm, Fe, Al	(Koistinen et al., 2004; Lee et al., 1994)
Suelo/polvo natural	Si	(Chan et al., 1991)
Relacionados con suelo	Si, Fe	(Janssen et al., 1997)
Suelo	Mn, Al, Sc	(Huang et al., 1994)
Polvo natural	Al, Si, Fe	(Maenhaut and Cafmeyer, 1987)
Minerales del suelo	Al, Si, Fe, Ca, (Mg), Mn, K, Ti, REEs, Zr, Rb, Sr, Sc, Cs, U, Th, Li	(Querol et al., 2007, 2004, 2001, 1996) (Alastuey et al., 2005; Moreno et al., 2005; Viana et al., 2008)
Sales marinas	Soluble Na, Cl, (Mg)	Gran parte de todos los estudios
Tráfico vehicular	TC, BC, Cu, Zn, Pb	(Laschober et al., 2004)
Tráfico vehicular	Zn, Ba, Al, Cr, Fe, Hg, La, Mg, Mn, Na, Sb, Sc, V, OC, BC	(Allen et al., 2001)
Tráfico vehicular	Cu, Zn, Ba	(Chellam et al., 2005)
Tráfico vehicular	Cu, BC, Fe, Zn	(Aarnio et al., 2005)
Tráfico vehicular	OC, EC, NO ₃ ⁻ , Sn, Sb, Ba, Cu	(Querol et al., 2001; Rodriguez and Hall, 2003; Viana et al., 2007)
Desgaste de frenos	SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Mg, Ba	(Hildemann et al., 1991)Hildemann et al., 1991
Desgaste de neumáticos	Zn	(Harrison et al., 1996)
Desgaste de neumáticos	di penteno (limoneno), estireno	(APEG, 1999)
Sales de caminos	Cl-	(APEG, 1999)
Desgaste de vehículos	Cu, Zn, Pb, Ba, Mo	(Harrison et al., 2003)
Desgaste de frenos	Cu, Zn, Pb, Ba, Cd, Sb, (Fe)	(Sternbeck et al., 2002)
Emisión de escape vehículos diésel	PM ₁₀ , V, and Cd (Ca, Cr, Zn, Sr, and Pb)	(James J Schauer et al., 2005)

FUENTE	TRAZADOR	REFERENCIA
Emisión de escape vehículos gasolina y desgaste de neumáticos	V, Cr, Zn, Sr, Pb, Mo, Ag	(James J Schauer et al., 2005)
Resuspensión de polvo	S, Mg, Al, K, Ca; Fe and Ti, Sr, Cd, Pb	(James J Schauer et al., 2005)
Desgaste de frenos	Fe, Cr, Mn, Cu, Zn, Sb, Ba	(James J Schauer et al., 2005)

Dependiendo del tipo de fuente emisora industrial, se pueden encontrar determinados elementos enriquecidos. Por ejemplo, V, Ni, en particulado atmosférico se han atribuido a partículas emitidas de la combustión de petróleos, especialmente a petróleos pesados. Zn, Cu, Hg, Pb, Sb, también pueden ser encontrados en cantidades altas en incineradores de desechos. Un resumen con referencias incluidas se entrega en la Tabla 3.

Tabla 3: Fuentes emisoras relacionadas con industrias y principales especies trazadoras determinadas en la composición química y elemental del MP (Presentación "Source apportionment of PM", presentada en 10th Task Force on Measurement and Modelling meeting, Paris, 15-17 June 2009 realizada por Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Moreno T., Amato F., Pandolfi M., Pey. J.).

FUENTE	TRAZADOR	REFERENCIA
Centrales eléctricas a carbón	As, Se, S, Mo, Hg (se reducen significativamente con sistemas de FGD)	(Fung and Wong, 1995; Harrison et al., 1996; Huang et al., 1994; Ojanen et al., 1998; Pacyna, 1984)
Centrales eléctricas de petróleo y petroquímica	V, Ni, La, Sm, S	(Huang et al., 1994; Ojanen et al., 1998; Pacyna, 1984)
Incineración de basura	Zn, Cu, Hg, Pb, Sb,	(Harrison et al., 1996; Pacyna, 1984; Parekh et al., 1989; Sweet et al., 1993; Van Borm et al., 1990)
Quema de biomasa	K, Carbono volátil, Carbono elemental, levoglucosano	(Chan et al., 1991; Huang et al., 1994; Janssen et al., 1997; Ojanen et al., 1998)
Industria de Acero	Fe, Mn, Cr, Ca	(Huang et al., 1994; Ojanen et al., 1998)
Acero	Fe, Cr, Mn, Ni, Zn, Se, Mo, Cd, Sn, Pb	(Querol et al., 2004; Viana et al., 2007)
Acero Inoxidable	V, Cr, Ni, Mo	(Querol et al., 2004; Viana et al., 2007)
Fundición	Fe, Zn, Pb, Mn	(Swietlicki et al., 1996)
Fundición de Zinc	Zn, Cd, Pb, Sn	(Sweet et al., 1993)
Fundición de Pirita	As, Cu	(Pio et al., 1996)
Fundición de Cobre	As, Cu, Bi	(Alastuey et al., 2005; Querol et al., 2007, 2004; Sánchez-Rodas et al., 2007)

FUENTE	TRAZADOR	REFERENCIA
Esmaltes y Cerámicas (fabricación de azulejos)	Zn, As, Se, Zr, Cs, Tl, Pb, Bi	(Minguillón et al., 2007; Querol et al., 2007)

Recopilación de datos de concentración de MP₁₀ y MP_{2,5} de las ciudades con planes de descontaminación:

Solicitud formal de información

Luego de haber realizado una solicitud formal de información de calidad de aire y meteorología se ha realizado la recopilación de datos de las principales ciudades con planes de descontaminación ubicadas en la zona Centro-Sur, donde se ha recopilado la siguiente información:

- Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (Decreto N°15 del 2013, MMA).
- Talca y Maule MP₁₀ y MP_{2,5} (DS N°49 del 2016, MMA).
- Chillán y Chillán Viejo MP₁₀ y MP_{2,5} (DS N°48 del 2016, MMA).
- Los Ángeles MP₁₀ y MP_{2,5} (DS N°4 del 2017, MMA).
- Temuco y Padre Las Casas (DS N°8 del 2015, MMA).
- Valdivia MP₁₀ y MP_{2,5} (DS N°25 del 2016, MMA).
- Osorno MP₁₀ y MP_{2,5} (DS N°46 del 2016, MMA).

Se ha decidido también incluir en el análisis la información de las estaciones del Concepción Metropolitano, ya que se espera que el Plan de Descontaminación esté terminado en todos sus trámites este año para implementarse en el año 2020¹.

A continuación, en la Tabla 4 se presentan las estaciones recopiladas luego de la solicitud formal al Ministerio de Medioambiente, con respectivos parámetros de calidad de aire y meteorológicos disponibles.

Tabla 4. Lista de Estaciones con sus parámetros de calidad de aire y meteorología disponibles. Elaboración propia.

Región	Comuna	Estaciones	Parámetro CA	Parámetro Meteorológico
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	Rancagua	Rancagua I	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, PP, P, RG, T y VV
		Rancagua II	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, RG, T y VV
	Rengo	Rengo	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, P, RG, T y VV
	San Fernando	San Fernando	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, P, RG, T y VV
Región del Maule	Curicó	Curicó	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, RG, T y VV
	Linares	Linares	MP _{2,5}	DV, HR, RG, T y VV
	Talca	La Florida	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, P, VV y T
		U.C. Maule		DV, HR, P, VV, T
		U. de Talca		DV, HR, P, VV, T
	Chiguayante	Punteras	MP ₁₀ y MP _{2,5}	HR, T y VV

¹ <https://assets.diarioconcepcion.cl/2019/09/Diario-concepcion-15-09-2019.pdf>

Región	Comuna	Estaciones	Parámetro CA	Parámetro Meteorológico
Región de Ñuble y Región del Biobío	Chillán	INIA, Chillán		T, VV y DV
		Purén		HR, T, VV, DV y RG
	Concepción	Kingston College		HR, T, VV, DV y RG
	Coronel	Cerro Merquín		-
	Curanilahue	Balneario Curanilahue	MP _{2,5}	VV, T, HR
	Hualqui	Hualqui	MP ₁₀ y MP _{2,5}	
	Los Ángeles	21 de mayo	MP ₁₀ y MP _{2,5}	HR, T y VV
		Los Ángeles Oriente	MP ₁₀ y MP _{2,5}	HR, T, VV, DV y RG
	Talcahuano	Consultorio, San Vicente	MP ₁₀	HR, T y VVHR, T y VV
Tomé	Liceo Polivalente	MP ₁₀ y MP _{2,5}	HR, T y VV	
Región de la Araucanía	Padre Las Casas	Padre Las Casas II	MP ₁₀ y MP _{2,5}	HR, PP, P, RG, T, DV y VV
	Temuco	Las Encinas	MP ₁₀ y MP _{2,5}	HR, PP, P, RG, T y VV
		Museo Ferroviario		HR, PP, P, RG, T, DV y VV
Ñielol	HR, PP, P, RG, T, DV y VV			
Región de Los Ríos	La Unión	La Unión	MP _{2,5}	HR, T y VV
	Valdivia	Valdivia	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, T, VV, P y HR
		Valdivia 2	-	DV, HR, T y VV
Región de Los Lagos	Osorno	Osorno	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, T y VV
	Puerto Montt	Alerce	MP _{2,5}	HR, T y VV
		Mirasol	MP _{2,5}	HR, P, RG, T y VV
Región de Aysén	Coyhaique	Coyhaique	MP ₁₀ y MP _{2,5}	DV, HR, RG, T y VV
		Coyhaique II		DV, HR, P, T y VV

En los puntos que se describirán a continuación se busca hacer un análisis detallado de la disponibilidad de las variables mencionadas en la Tabla 4, donde **MP₁₀** y **MP_{2,5}** corresponden al material particulado respirable y fino respectivamente, en relación a las variables meteorológicas **DV** corresponde a Dirección del Viento, **VV** a magnitud de la Velocidad del Viento, **HR** a la Humedad Relativa del Aire, **T** a la Temperatura ambiental, **P** a la Presión Atmosférica, **PP** a las precipitaciones caídas y **RG** a la radiación Global proveniente del sol. Para efectos de simplicidad de gráficos y tablas se ocuparán las abreviaturas recién descritas cuando se analicen las variables.

En el presente documento se establecen las estaciones y variables definitivas a ser incorporadas en los análisis estadísticos de tendencias del material particulado 2014-2018 y sus factores de impacto.

Análisis exploratorio (screening) de la información de Calidad de Aire y meteorología

A continuación, se presentan análisis screening de los datos recopilados para cada una de las estaciones indicadas en la **Tabla 4**. El objetivo de este análisis es identificar periodos de información cuya variabilidad temporal sea anómala, por ejemplo, valores continuos con datos iguales, concentración de MP_{2,5} mayor a la de MP₁₀, valores negativos, valores fuera de rango, etc.

Región del Libertador Bernardo O'Higgins

A continuación, se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones Rengo, Rancagua I, Rancagua II y San Fernando, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones. Los datos han sido graficados tal como fueron entregados por la contraparte técnica del estudio.

La estación Rengo presenta datos de MP_{2,5} a partir de enero-2017 hasta diciembre-2018, mientras que de MP₁₀ desde enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP₁₀ son mayores a los de MP_{2,5} y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.1 (°C) y la máxima es de 34.1 (°C), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernal. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 7 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde julio-2015 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 8.2 (m/s), no presenta datos anómalos. La radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m²) y un máximo de 1094 (W/m²), no se observa comportamiento anómalo.

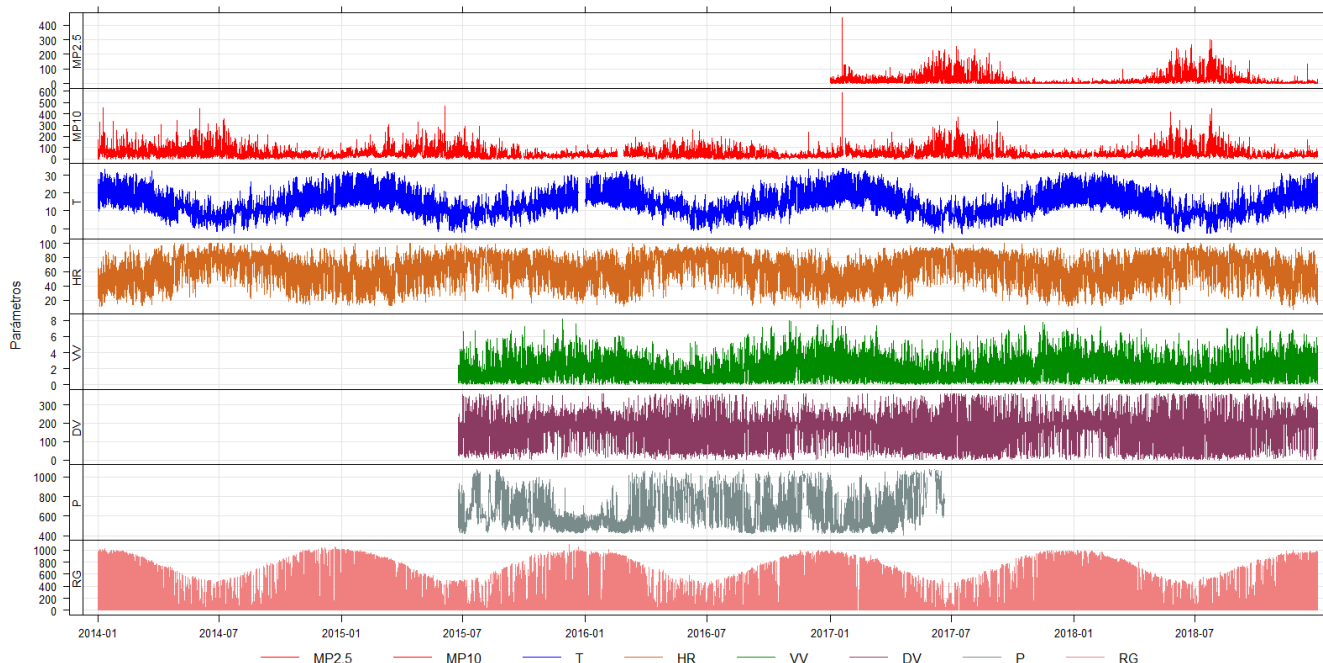


Figura 1. Estación Rengo, concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación San Fernando (**Figura 2**) presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de abril de 2016, mientras que de MP_{10} desde enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -2.5 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 34.7 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 106 (%) y un mínimo de -18 (%), estos valores indican a que existen errores de lectura para esta variable por lo que se eliminarán todos los valores negativos y mayores a 100 de la base de datos. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.5 (m/s), no presenta datos anómalos. La variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 980 hPa, sin embargo, presenta caídas abruptas hasta 2 (hPa), se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m^2) y un máximo de 994 (W/m^2), no presenta comportamiento anómalo.

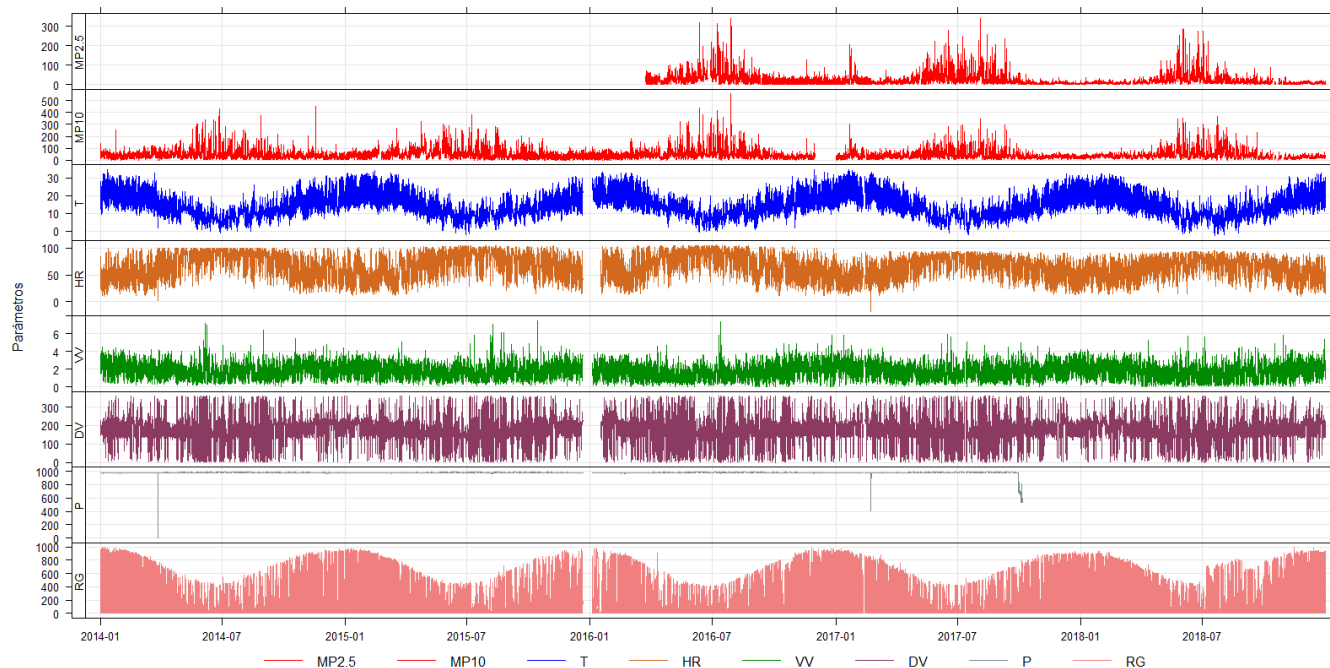


Figura 2. Estación San Fernando. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Rancagua I presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -2.5 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 37.1 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial, y no presenta comportamiento anómalo. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 93 (%) y un mínimo de 6 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.0 (m/s), no presenta datos anómalos. La variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta caídas abruptas hasta 425 (hPa) en julio de 2014. Además, se observa un corrimiento de la serie hacia valores más bajos a partir de febrero de 2016, que no responde a un cambio real atmosférico, sino que a un efecto instrumental. La variable precipitación se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, oscila entre 0 y 11 (mm) para el período de 4 años, las principales mediciones de esta variable se presentan a mediados de 2016 y mediados de 2017. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, mostrando una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de -9 (W/m^2) y un máximo de 1546 (W/m^2), además presenta errores de lectura en febrero 2015 y enero 2016.

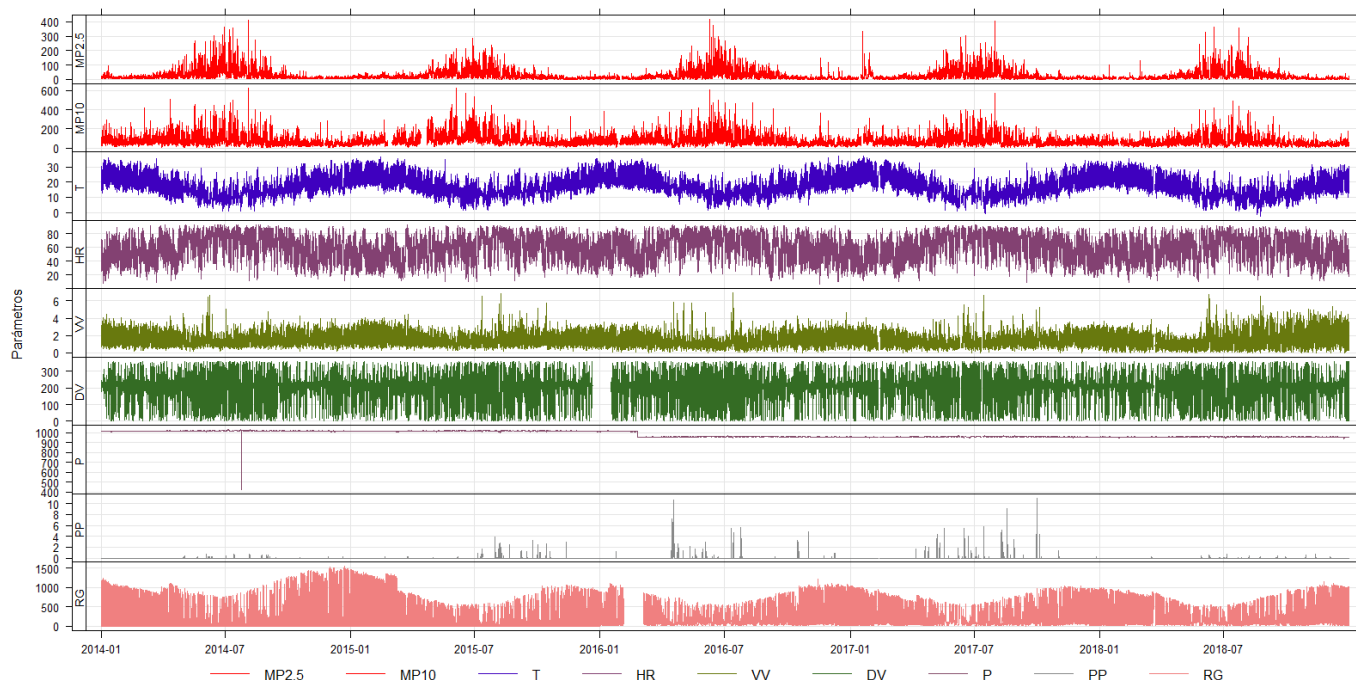


Figura 3. Estación Rancagua I. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Rancagua II presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.7 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 35.9 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernacional. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura como es de esperar, presenta un valor máximo de 97 (%) y un mínimo de 0 (%), y no se observa un comportamiento anómalo. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscilando entre 0 y 8.1 (m/s), y no presenta datos anómalos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de -32 (W/m^2) y un máximo de 1090 (W/m^2). E Los valores negativos serán eliminados de la base de datos.

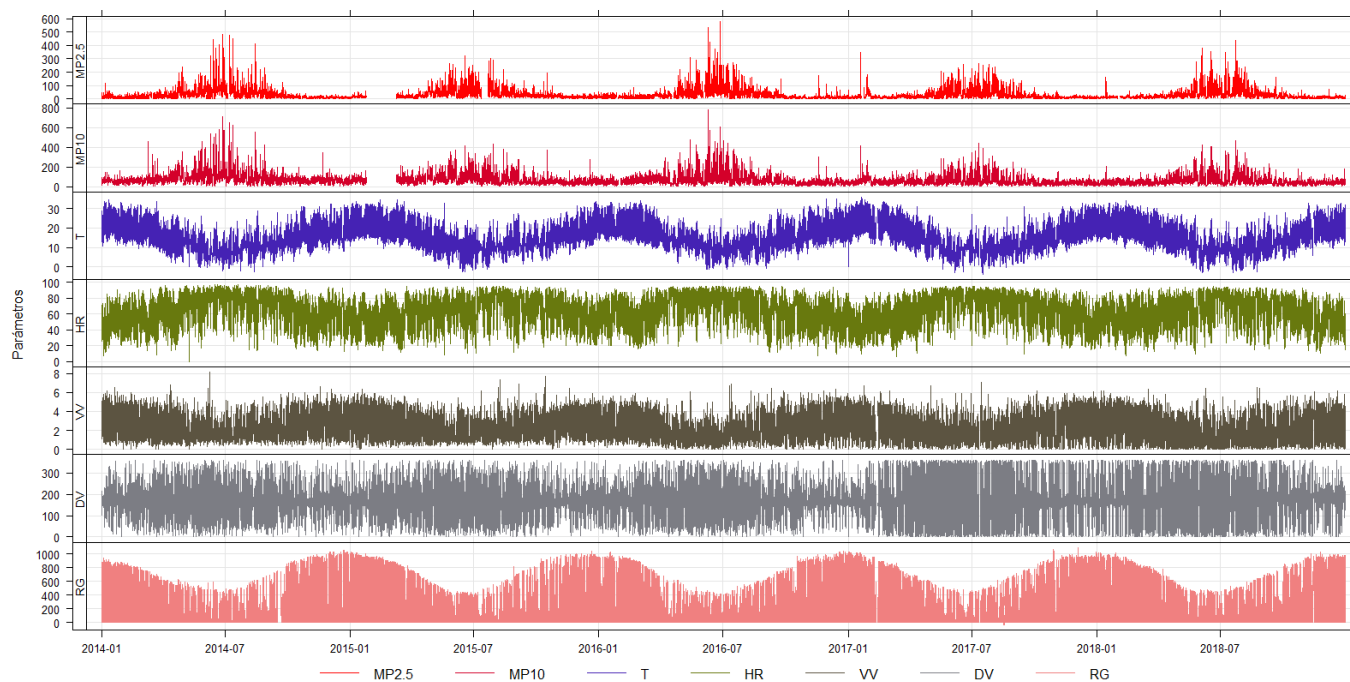


Figura 4. Estación Rancagua II. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

Región del Maule

A continuación, se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones Curicó, Linares, Universidad Católica del Maule, Universidad de Talca y La Florida, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones, estos datos han sido graficados tal como se facilitaron por la contraparte técnica del estudio.

La estación Curicó presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.5 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 35.9 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernol. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura como es de esperar, presenta un valor máximo de 97.1 (%) y un mínimo de 0 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 8.3 (m/s), y no presenta datos anómalos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m²) y un máximo de 1101 (W/m²). Se observa presenta una abrupta subida en noviembre de 2016, lo que no corresponde a un valor real sino a una desviación de medición instrumental.

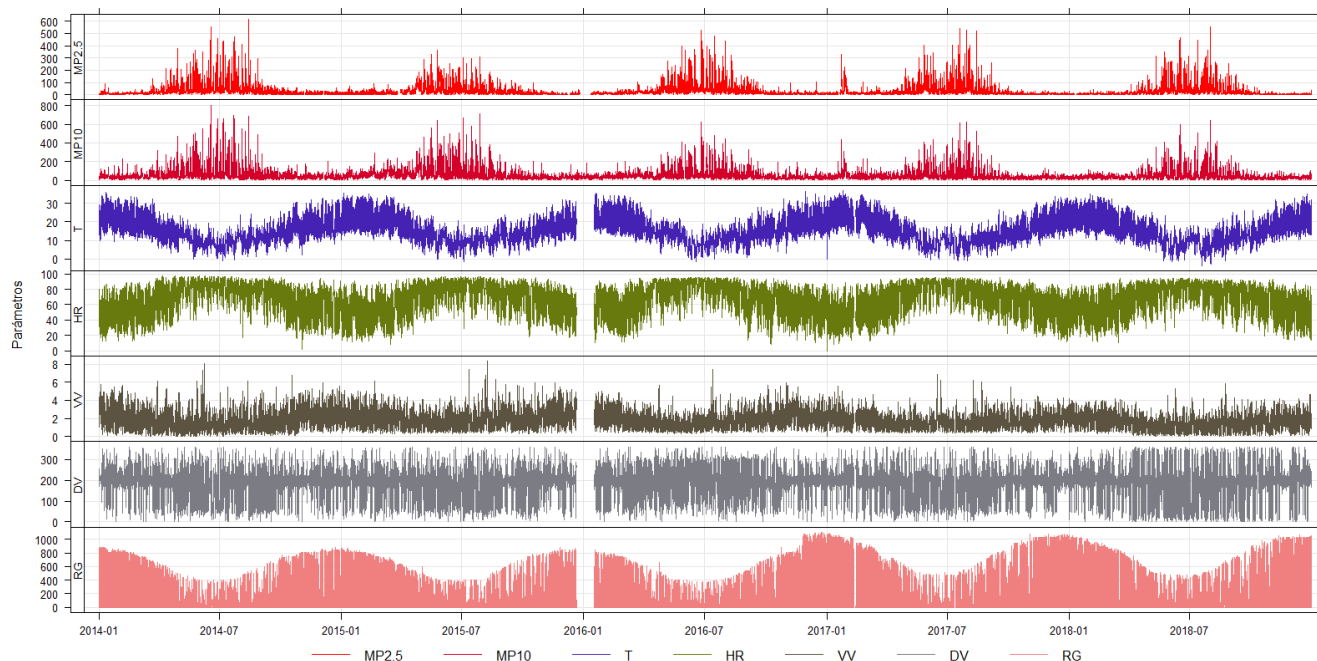


Figura 5. Estación Curicó. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Linares presenta datos solo datos $MP_{2,5}$ a partir de enero-2016 a diciembre-2018 (no hay datos de MP_{10}). La tendencia de concentración de $MP_{2,5}$ es de aumentar en temporada estival y disminuir en invernial, con algunos peaks durante fines de 2016 e inicios de 2018 lo que se puede relacionar con el impacto de las emisiones de algunos incendios forestales. La variable temperatura se encuentra disponible desde junio-2016 hasta diciembre-2018, con valor mínimo de -3.6 ($^{\circ}C$) y máximo de 41.2 ($^{\circ}C$). Presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde junio-2016 a diciembre-2018, presentando un comportamiento anti correlacionado con la temperatura. Muestra un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 0. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde junio-2016 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 11.3 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presentando una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m^2) y un máximo de 1153 (W/m^2). No se distingue comportamientos anómalos.

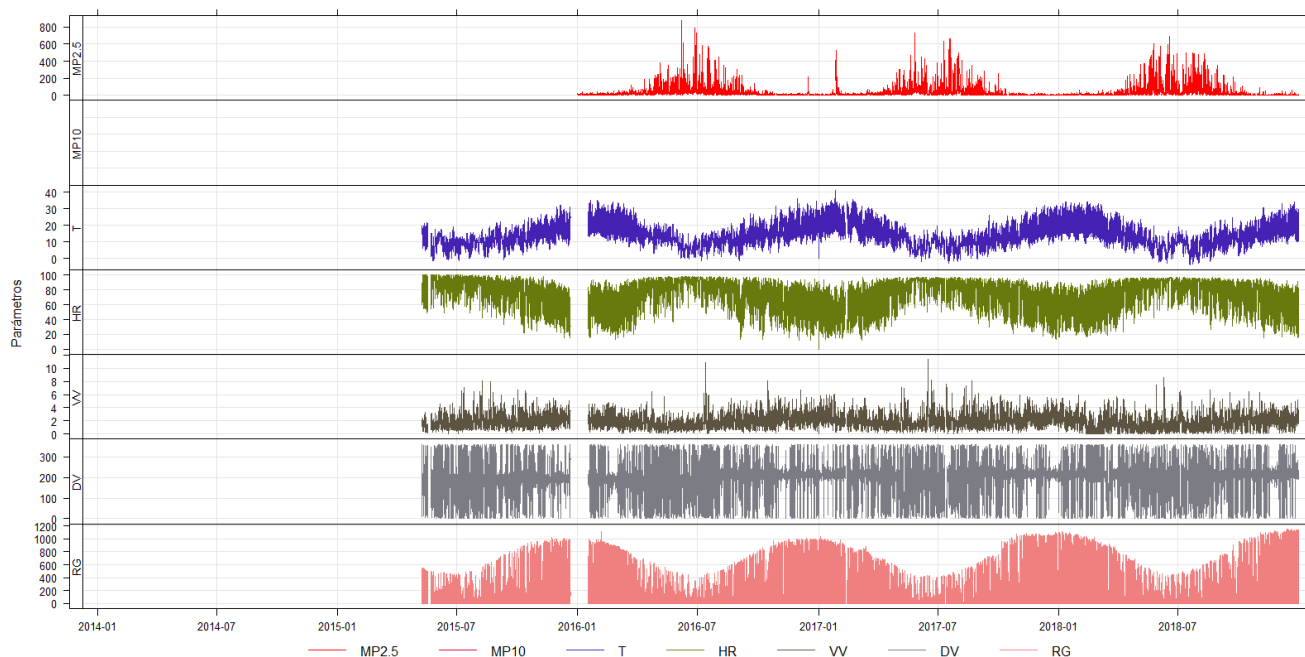


Figura 6. Estación Linares. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Universidad Católica del Maule presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.8 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 37.1 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, mostrando un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con un valor máximo de 102 (%) y un mínimo de -14 (%). Los valores fuera del rango 0-100% señalan errores de lectura para esta variable por lo que se eliminarán todos los valores anómalos. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.3 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta una caída abrupta hasta 0 (hPa) en enero de 2017, se eliminará este valor anómalo de la base de datos.

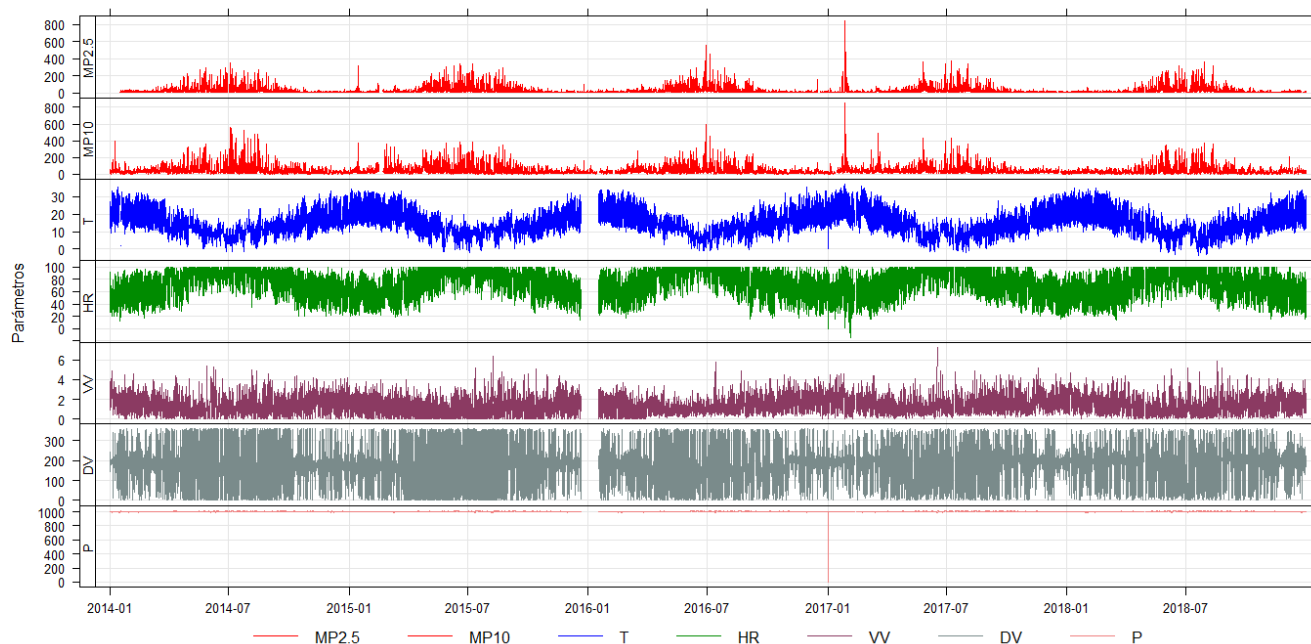


Figura 7. Estación U.C. del Maule. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Universidad de Talca presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta marzo-2018, la mínima es de -3.4 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 37.2 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a marzo-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 148 (%) y un mínimo de 0 (%), estos valores indican a que existen errores de lectura para esta variable por lo que se eliminarán todos los valores mayores a 100 de la base de datos. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 8.1 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta tres caídas abruptas hasta 0 (hPa) durante el período, se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos.

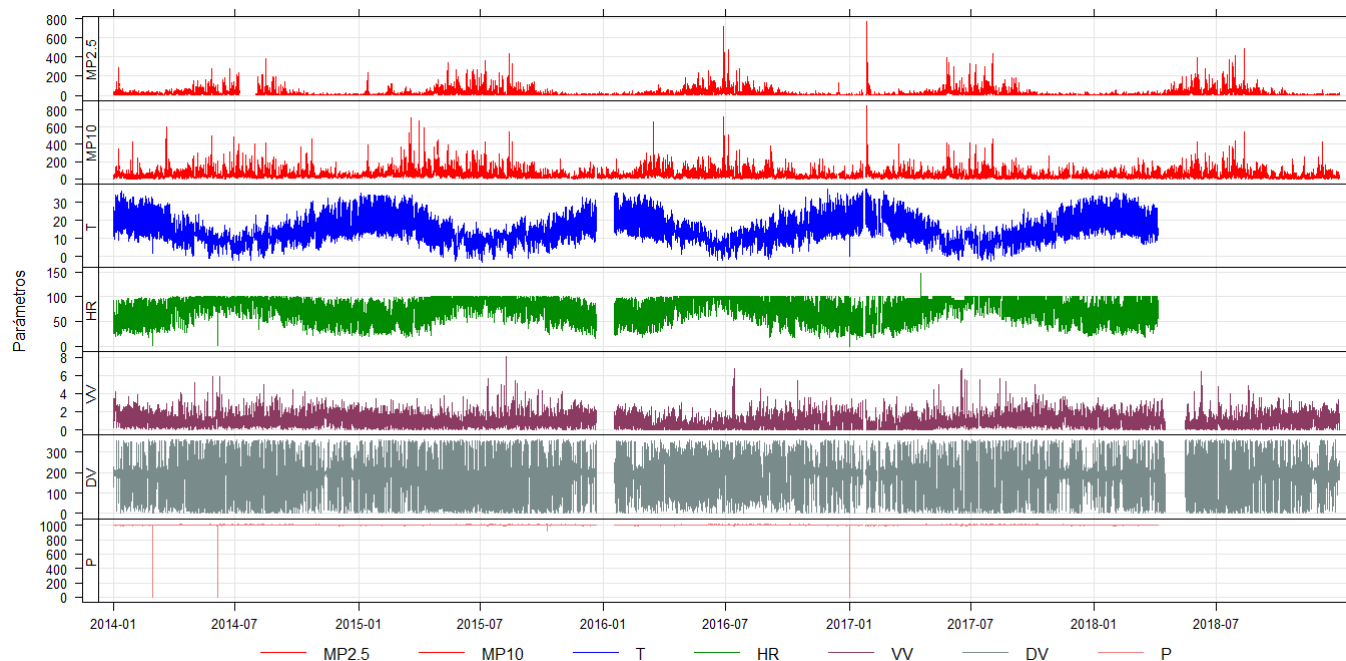


Figura 8. Estación Universidad de Talca. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación La Florida presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -2.6 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 37.5 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernal. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura. Presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 10 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 9.5 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta cuatro caídas abruptas hasta 600 (hPa), se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos.

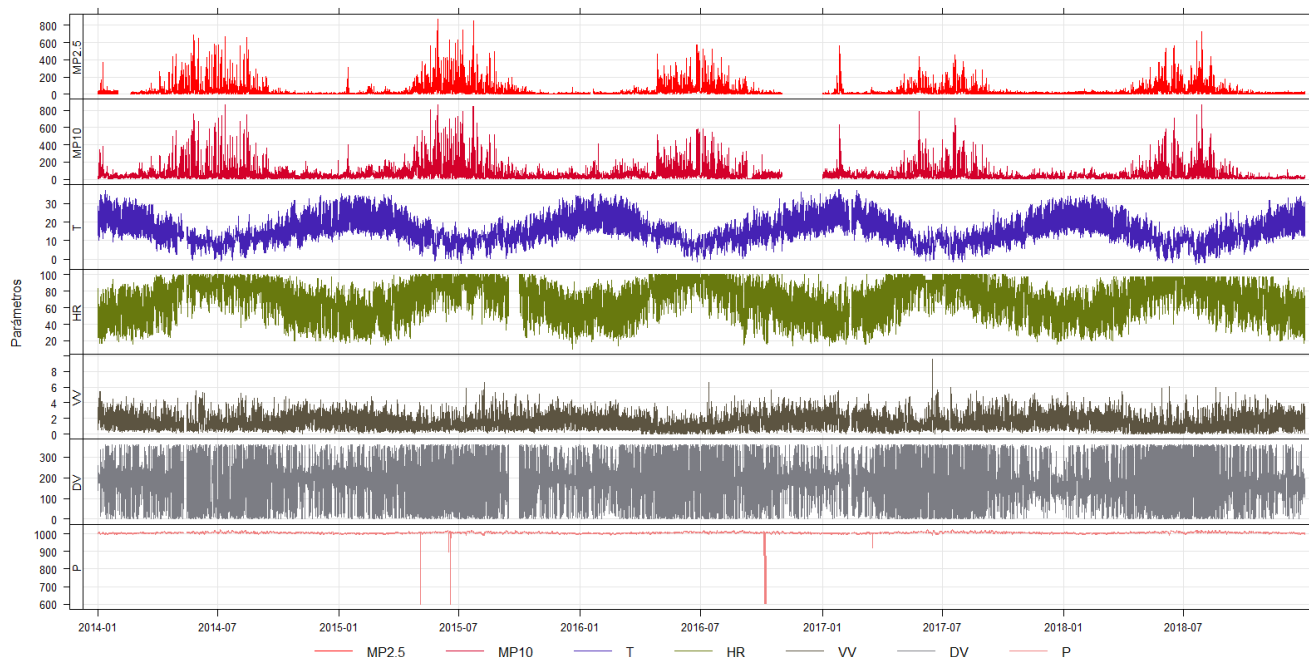


Figura 9. Estación La Florida. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia

Región de Ñuble y Región del Biobío

A continuación se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones Inia Chillán y Purén correspondiente a Ñuble, y Balneario Curanilahue, 21 de Mayo, Cerro Merquín, Consultorio San Vicente, Kingston College, Los Ángeles Oriente, Liceo Polivalente y Punteras correspondientes a la Región del Biobío, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones, estos datos han sido graficados tal como se facilitaron por la contraparte técnica.

La estación 21 de Mayo presenta datos de MP₁₀ y MP_{2,5} a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP₁₀ son mayores a los de MP_{2,5} y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.2 (°C) y la máxima es de 38.8 (°C), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 10 (%), además en la serie se observa un aumento de valores del registro a partir de julio 2017, estos valores indican a que existen errores de lectura para esta variable. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 11.9 (m/s), no presenta datos anómalos.

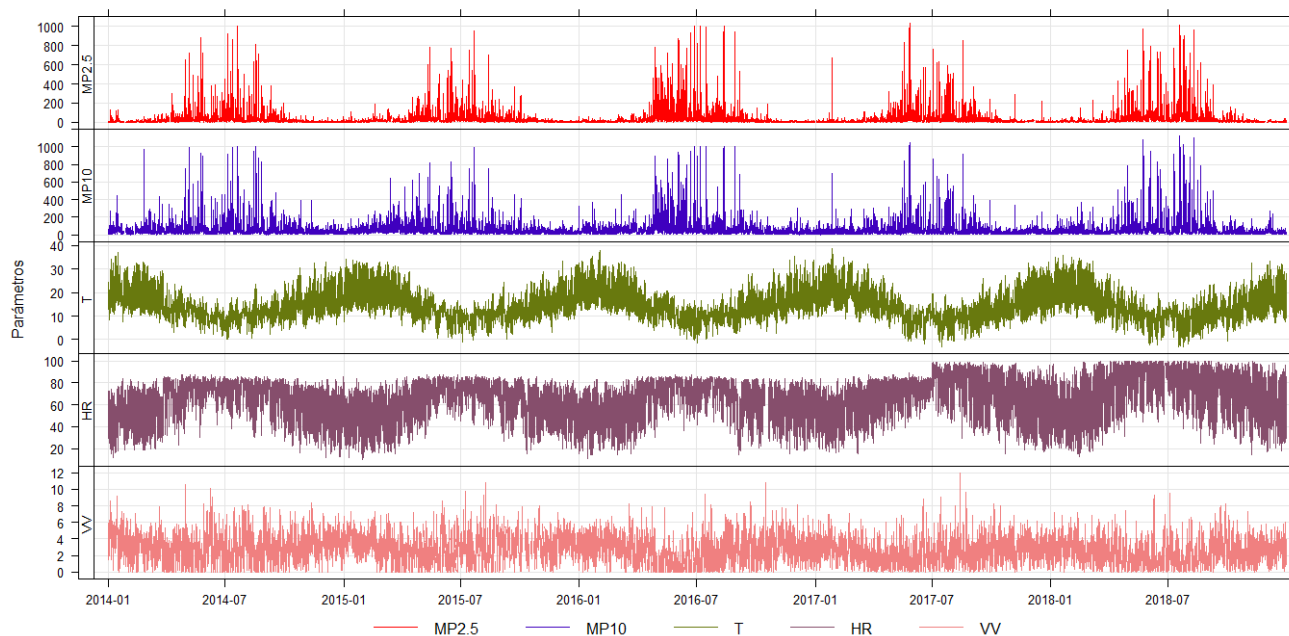


Figura 10. Estación 21 de Mayo. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia

La estación Balneario Curanilahue presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de diciembre-2016 a diciembre-2018, mientras que para MP_{10} no hay registros. Los valores de $MP_{2,5}$ siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde septiembre-2018 hasta diciembre-2018, la mínima es de -0.8 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 30.5 ($^{\circ}C$). La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde septiembre-2018 a diciembre-2018, presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 17. Finalmente, la variable velocidad de viento se encuentra disponible desde septiembre-2018 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 6.8 (m/s). Esta estación no se considerará para realizar el análisis de Factor de Impacto por Concentración por tener un período insuficiente de registros, ya que presenta valores de variables meteorológicas de 3 meses y de $MP_{2,5}$ por 2 años.

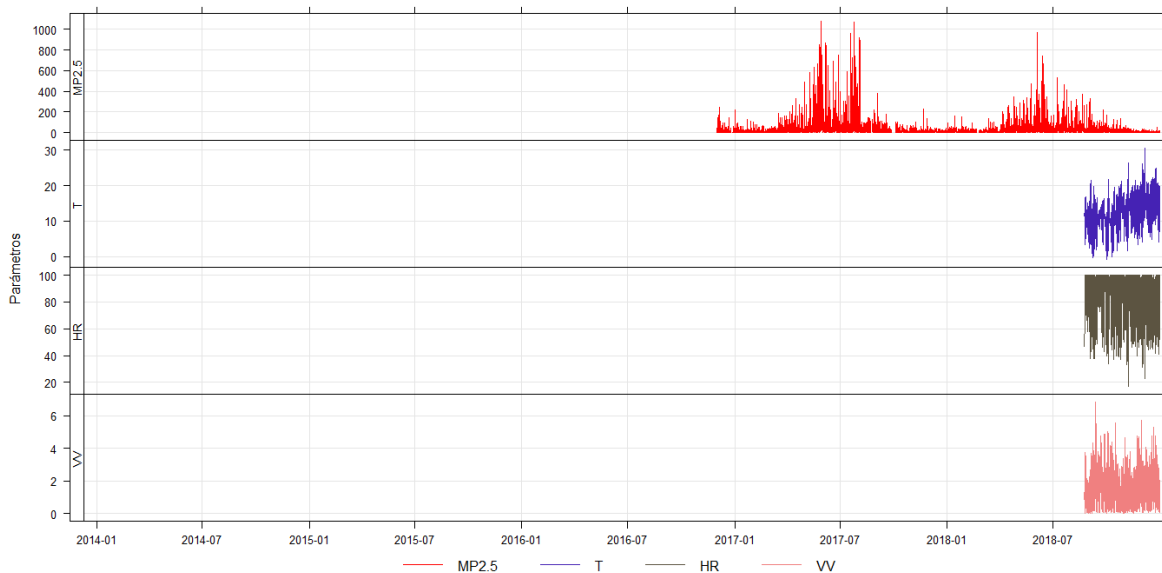


Figura 11. Estación Balneario Curanilahue. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia

La estación Cerro Merquín presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de enero- 2016 a diciembre-2018, mientras que de MP_{10} desde enero-2014 hasta diciembre-2018, con un período de ausencia de datos entre fines de 2016 y de 2017. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. No se disponen del registro de variables meteorológicas.

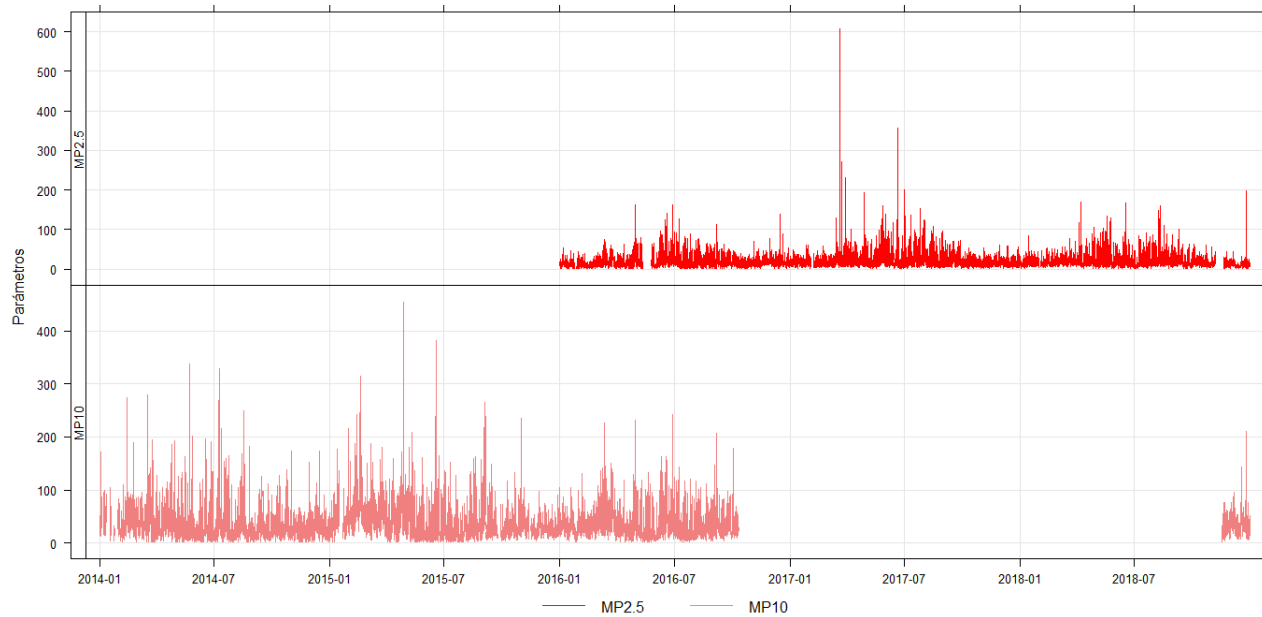


Figura 12. Estación Cerro Merquín. concentraciones horarias de variables contaminantes. Elaboración Propia

La estación Consultorio San Vicente presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de noviembre-2016 a diciembre-2018, mientras que de MP_{10} desde enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable $MP_{2,5}$ no se considerará para el cálculo de Factor de Impacto por Concentración por poseer solo dos años de registro de datos. La variable temperatura se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, la mínima es de 2.5 (°C) y la máxima es de 25.6 (°C). La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 38 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.8 (m/s).

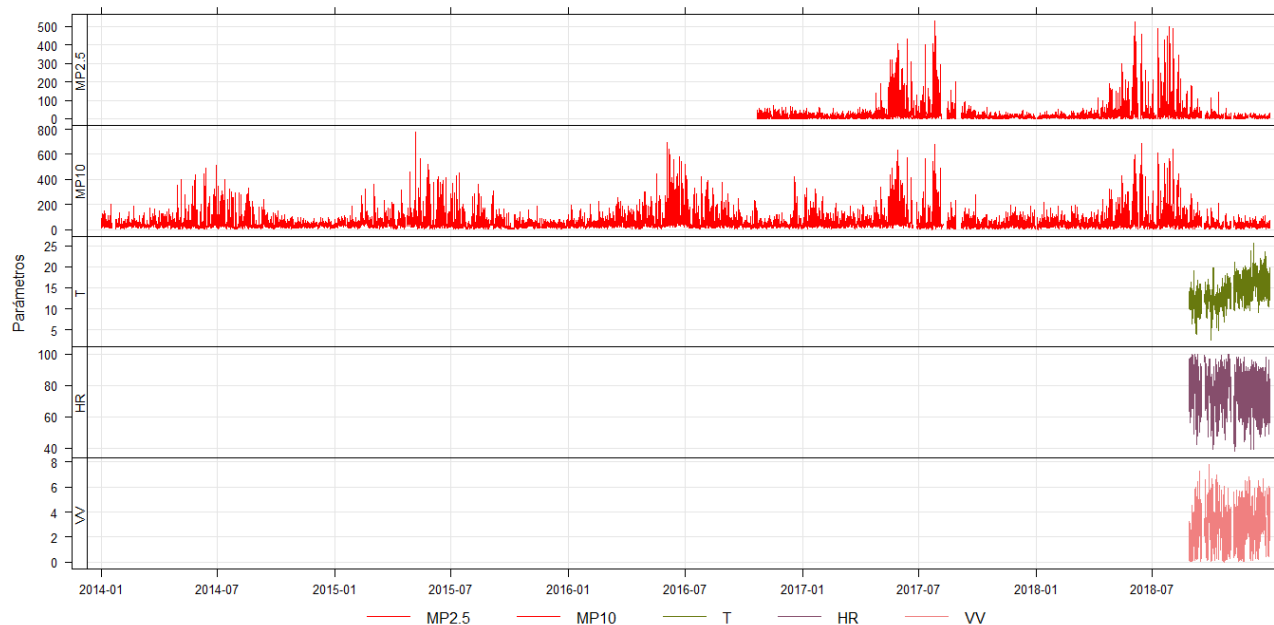


Figura 13. Estación Consultorio San Vicente. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia

La estación Inia Chillán presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2017 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.4 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 40 ($^{\circ}C$), y presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 11.3 (m/s).

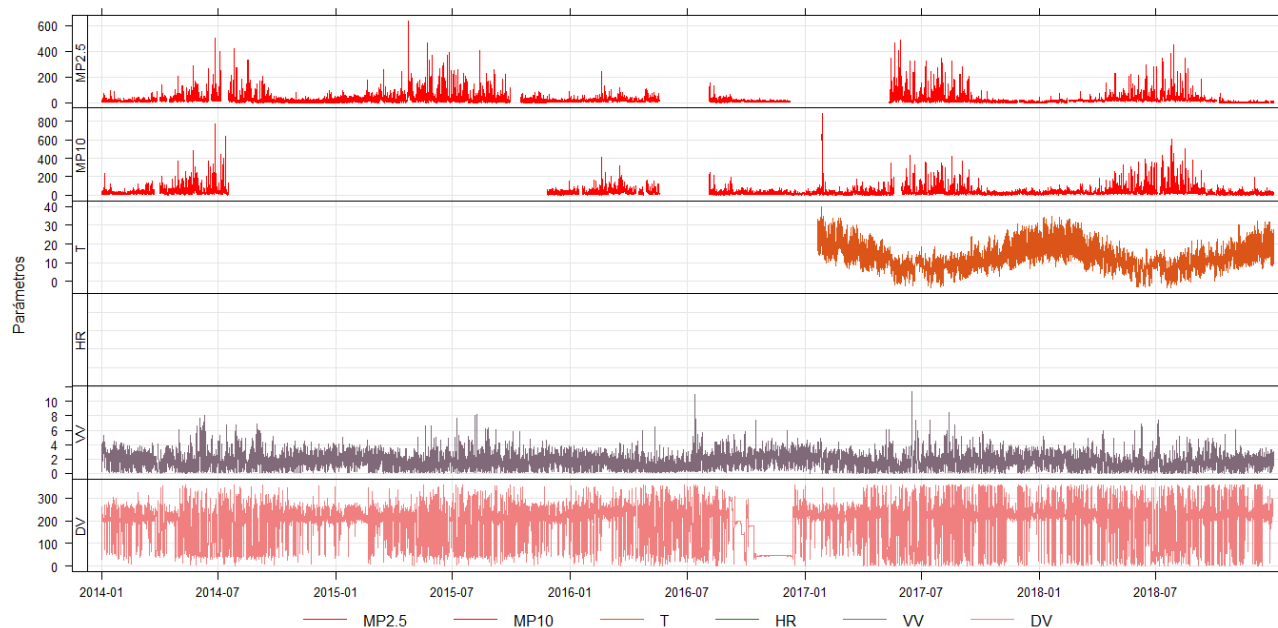


Figura 14. Estación Inia Chillán. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Kingston College presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de enero-2016, mientras que de MP_{10} desde enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de 0.2 (°C) y la máxima es de 32.8 (°C), presentando un ciclo estacional con aumentos en época estival y disminución en invernical. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con valores entre 100 (%) y 11 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 12 (m/s), presenta un corto período de registros anómalos entre diciembre-2014 y febrero-2015 por lo que se borrarán de la base de datos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m²) y un máximo de 1198 (W/m²). Esta serie muestra un comportamiento anómalo entre julio de 2015 a enero-2017 por lo que no se considerará esta variable para el cálculo de factor de impacto por concentración.

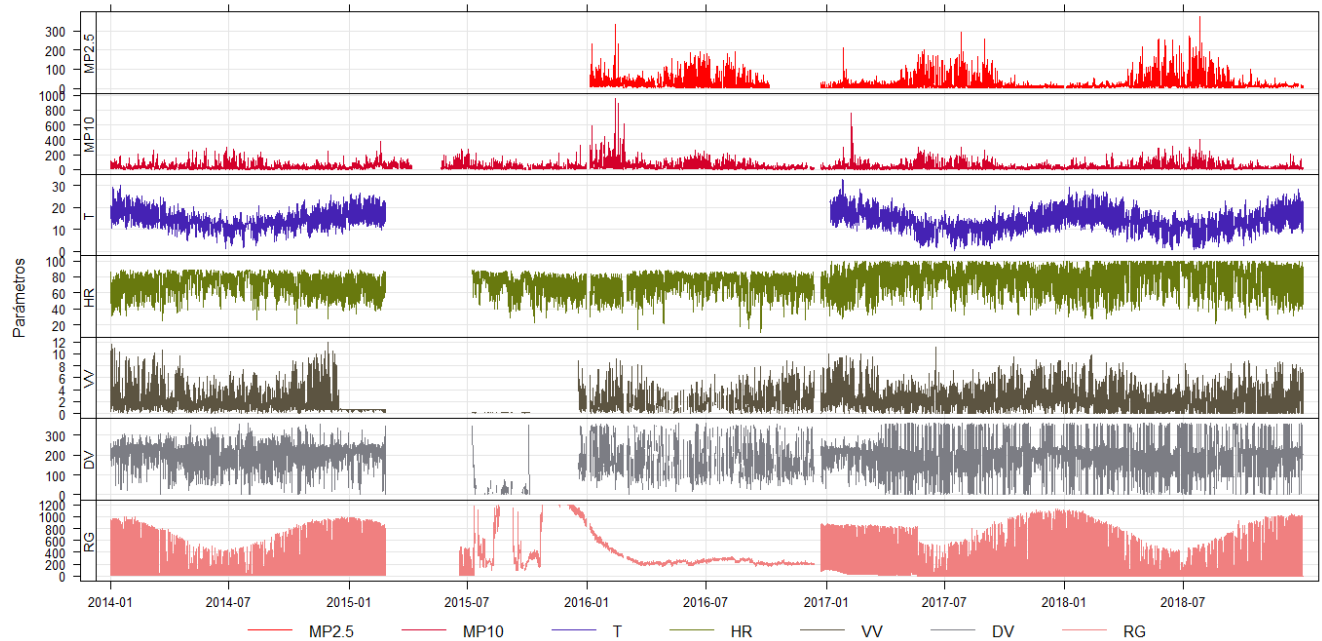


Figura 15. Estación Kingston College. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Los Ángeles Oriente presenta datos de $MP_{2.5}$ a partir de marzo-2014 a diciembre-2018, mientras que de MP_{10} desde enero a marzo-2014. Los valores de MP_{10} no se considerarán para el cálculo de Factor de Impacto por Concentración. Los registros de $MP_{2.5}$ no presentan una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano como es de esperar. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.7 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 38.6 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernal. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con valores entre 100 (%) y 9 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 9.8 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m^2) y un máximo de 1052.6 (W/m^2), no se observan comportamientos anómalos.

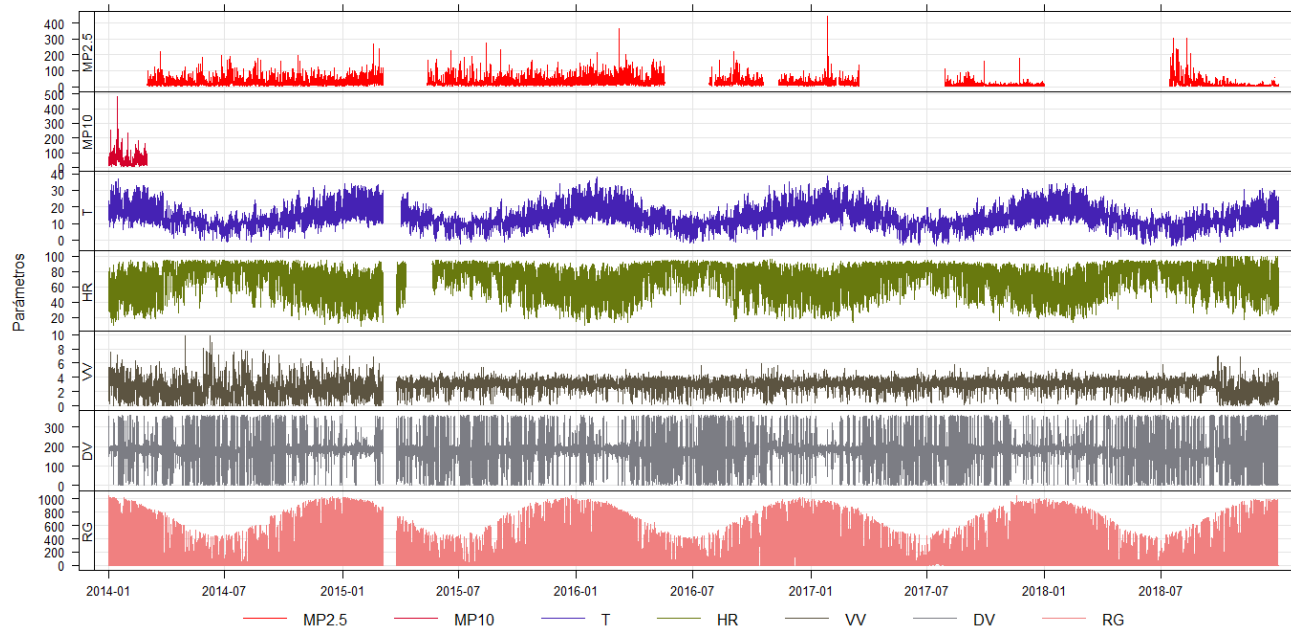


Figura 16. Estación Los Ángeles Oriente. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Liceo Polivalente presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de enero- 2016 a diciembre-2018, mientras que de MP_{10} desde enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, la mínima es de 3.5 (°C) y la máxima es de 25.5 (°C). La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, mostrando un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con valores entre 100 (%) y 29 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, oscila entre 0 y 8 (m/s).

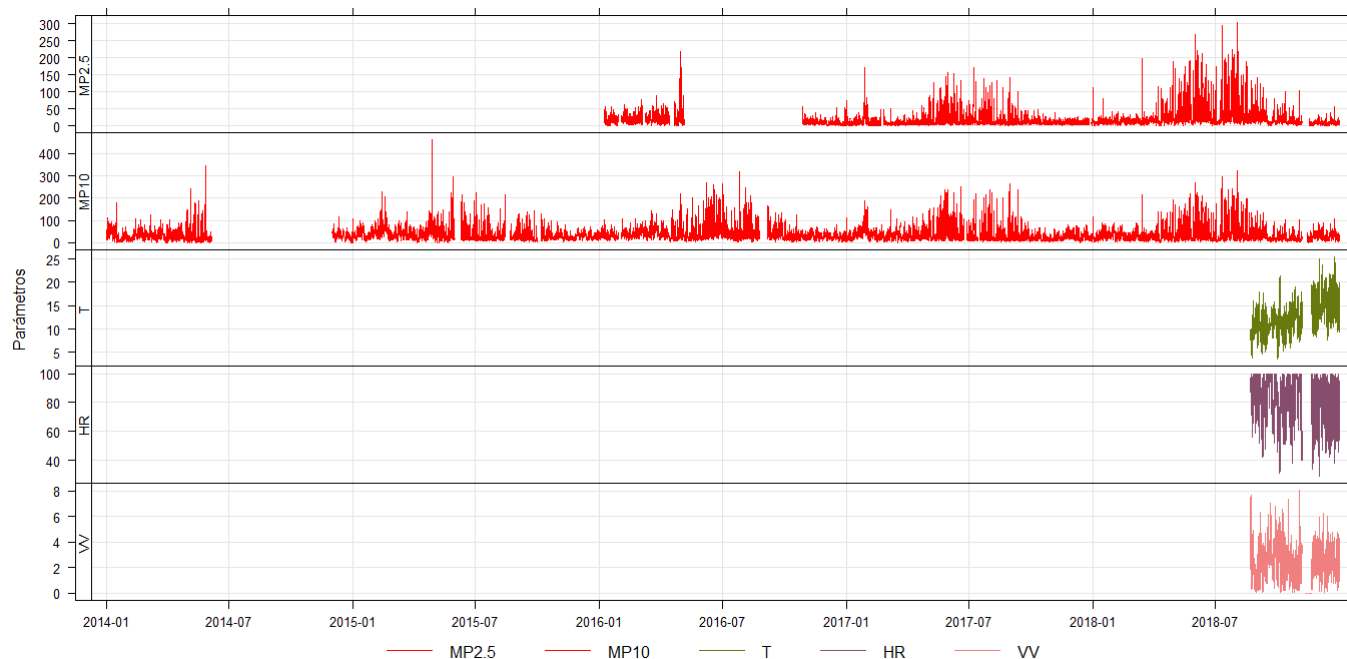


Figura 17. Estación Liceo Polivalente. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Punteras presenta datos de $MP_{2.5}$ a partir de enero- 2016 a diciembre-2018, mientras que de MP_{10} desde enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2.5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, la mínima es de 2.5 (°C) y la máxima es de 30 (°C). La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, con valores entre 100 (%) y 17(%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, oscila entre 0 y 9.2 (m/s).

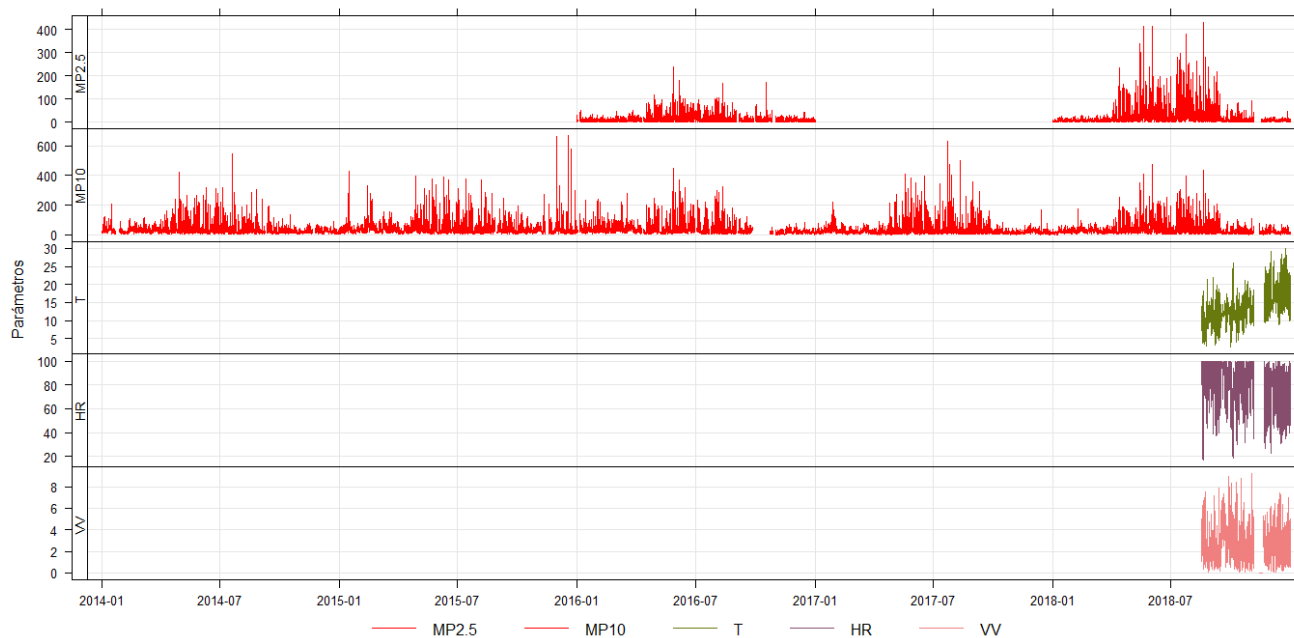


Figura 18. Estación Punteras. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Purén presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 41.5 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernal. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con valores entre 99 (%) y un 9 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 12.9 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presentando una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de 0 (W/m^2) y un máximo de 1101 (W/m^2). No se identifican períodos con comportamiento anómalo.

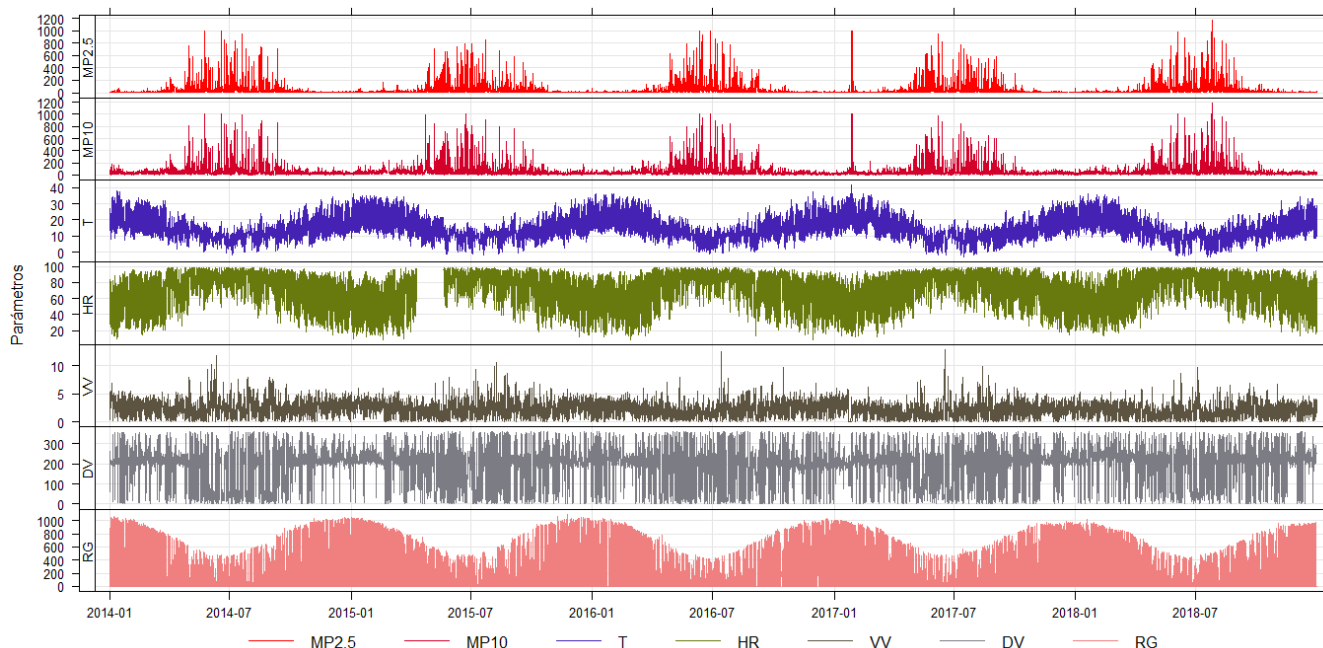


Figura 19. Estación Purén. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

Región de la Araucanía

A continuación, se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones Las Encinas, Museo Ferroviario, Ñielol y Padre Las Casas II, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones, estos datos han sido graficados tal como se facilitaron por la contraparte técnica del estudio.

La estación Las Encinas Temuco presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde abril-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -79.4 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 31.5 ($^{\circ}C$). La serie presenta varios mínimos que corresponden a errores de lectura por lo que serán borrados de la base de datos. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde abril-2014 a diciembre-2018, presenta un valor máximo de 110 (%) y un mínimo de 0 (%). Todos los valores mayores a 100 de la base de datos serán eliminados. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde abril-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre -15 y 7.5 (m/s), esta serie presenta errores de lectura ya que las magnitudes de velocidad negativas no tienen significado físico. Por otra parte, se distinguen tres picos específicos que escapan de la serie normal de datos. Tanto los valores negativos como los anómalos altos serán eliminados de la base de datos. La variable presión del aire se mantiene sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta dos caídas abruptas hasta 0 (hPa), se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos. La variable precipitación se encuentra disponible desde abril-2015 a diciembre-2018, registrado valores entre 0 y 14.2 (mm). Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde abril-2014 a enero-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de -895

(W/m²) y un máximo de 1482 (W/m²), el valor mínimo se obtiene durante último mes donde se tienen registros disponibles.

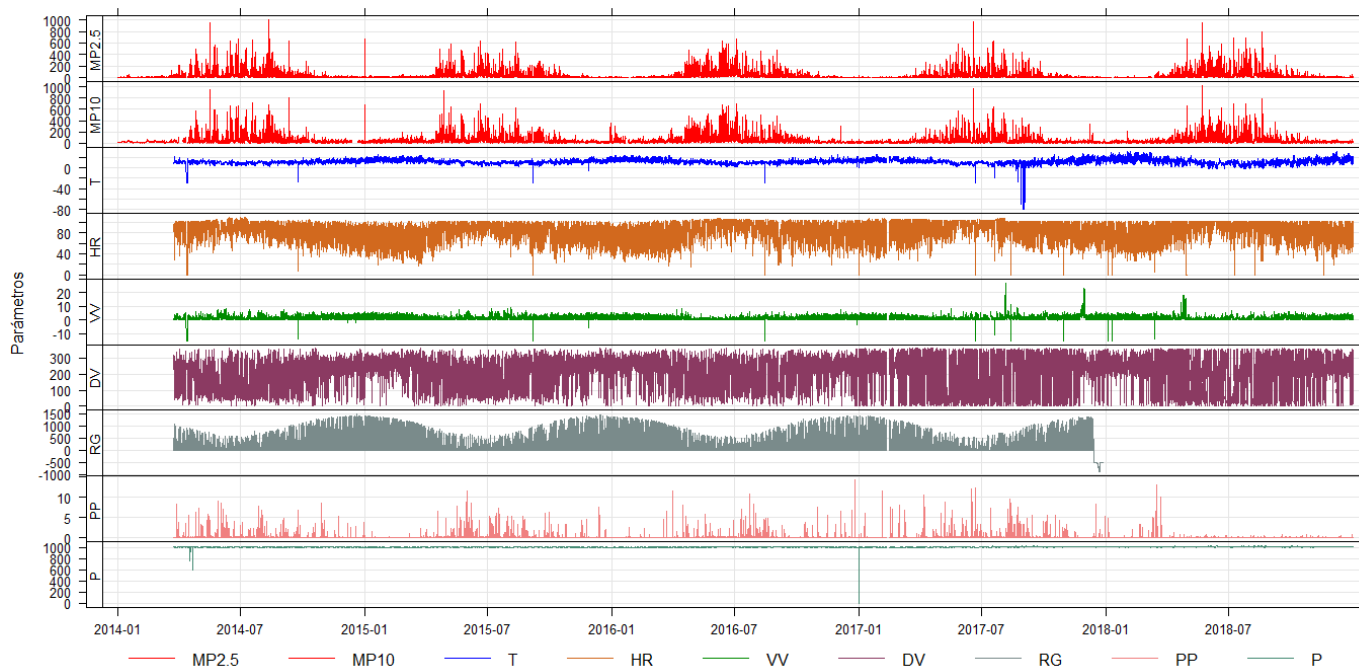


Figura 20. Estación Las Encinas Temuco. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Museo Ferroviario presenta datos de MP_{2,5} a partir de enero-2014 a diciembre-2017, al igual que para MP₁₀. Los valores de MP₁₀ son mayores a los de MP_{2,5} y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde abril-2014 hasta enero-2017, la mínima es de -1.7 (°C) y la máxima es de 36.6 (°C), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde abril-2014 a enero-2017, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 110 (%) y un mínimo de 12 (%), estos valores indican a que existen errores de lectura para esta variable por lo que se eliminarán todos los valores mayores a 100 de la base de datos. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde agosto-2014 hasta enero-2017, oscila entre 0 y 6.7 (m/s), no presenta datos anómalos. La variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, registrando una mínima de 983 (hPa). La variable precipitación presenta registros disponibles desde abril-2014 a enero-2017 y sus registros oscilan entre 0 y 14 (mm). Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde abril-2014 a enero-2017, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de -6 (W/m²) y un máximo de 1133 (W/m²), los valores negativos serán eliminados de la base de datos.

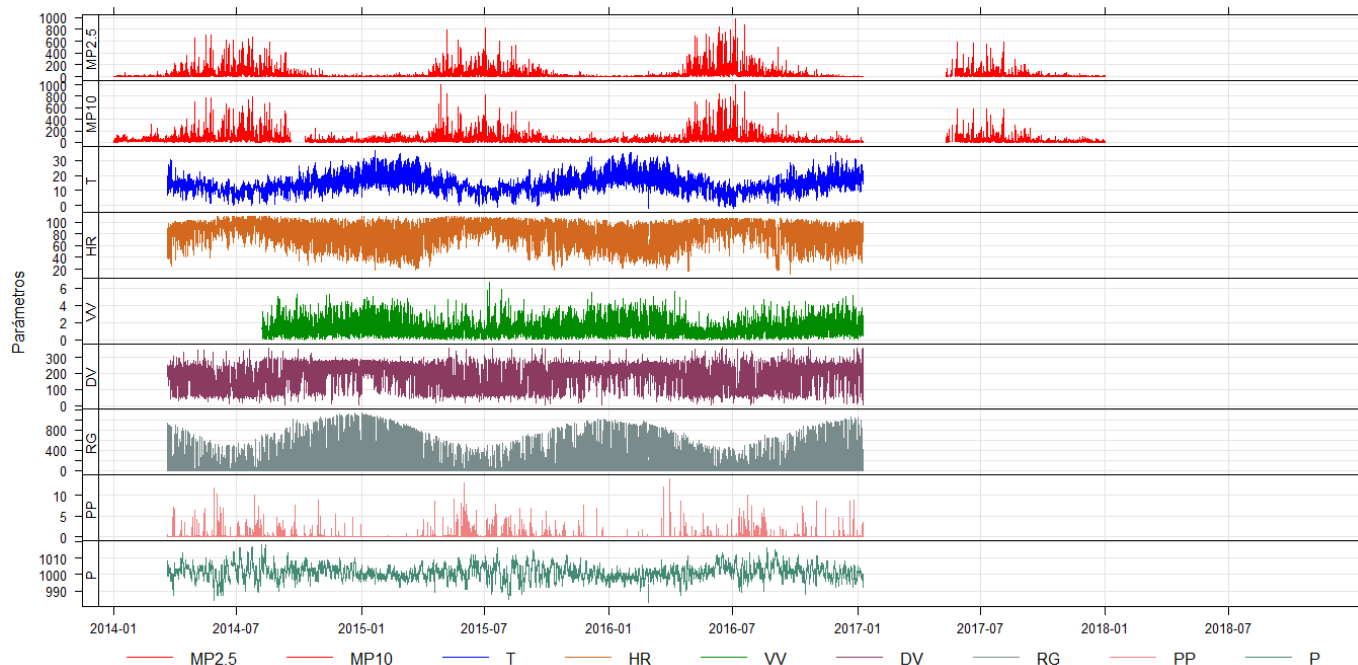


Figura 21. Estación Museo Ferroviario. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Ñielol presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde noviembre-2017 hasta diciembre-2018, la mínima es de -1.8 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 32.4 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde noviembre-2017 a diciembre-2018, mostrando un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con valores entre 106 (%) y 0 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde noviembre-2017 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.7 (m/s). No presenta datos anómalos. La variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1020 hPa, sin embargo, presenta caídas abruptas hasta 0 (hPa). Se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos. La variable precipitación presenta registros disponibles desde noviembre-2017 a diciembre-2018 y sus registros oscilan entre 0 y 13 (mm). Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, mostrando un comportamiento correlacionado con la temperatura, con un mínimo de -6 (W/m^2) y un máximo de 1096 (W/m^2). Se eliminarán los registros negativos de la base de datos.

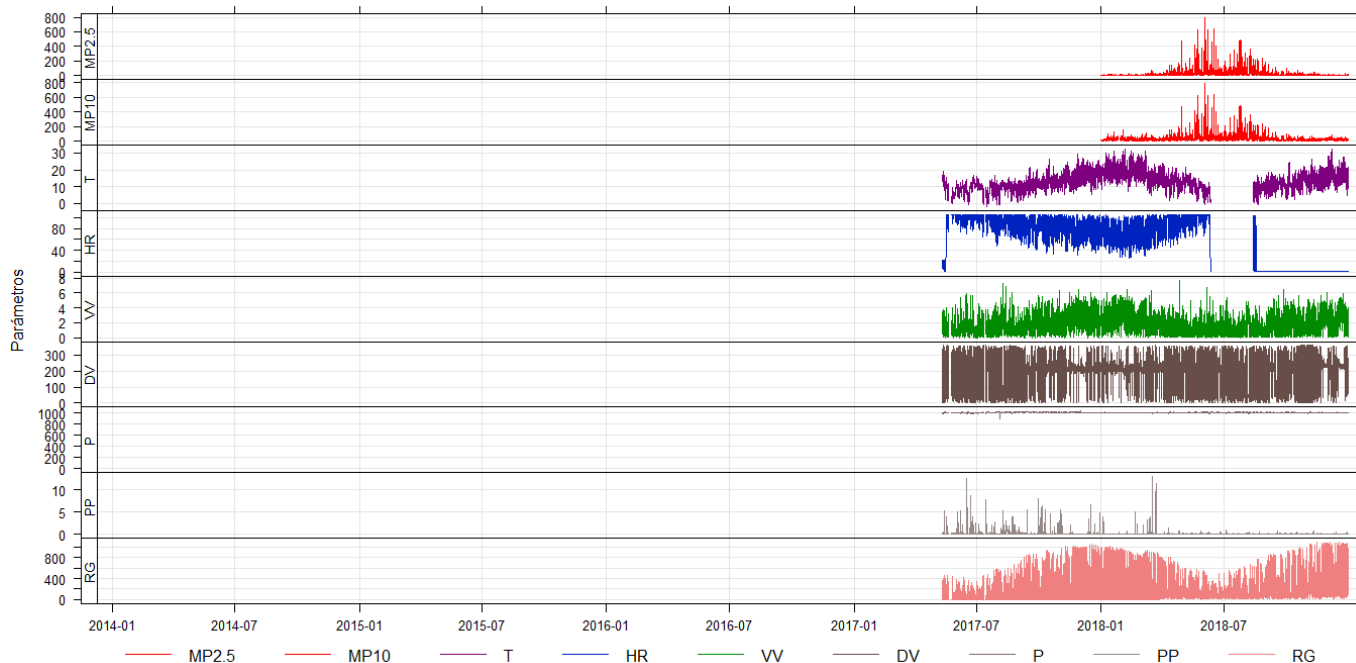


Figura 22. Estación Ñielol. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Padre Las Casas II presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de enero-2014 a diciembre-2018 al igual que de MP_{10} . Se observa en la serie de MP_{10} que, durante los años 2014, 2015 y 2016 no superan los 1000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de concentración, y luego para los años siguientes el registro es mayor. Esto hace suponer que en los tres primeros años se estableció un corte superior de 1000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en los registros de concentraciones impidiendo el reporte de valores superiores en dicho período. Esto se hace visible gráficamente en el periodo de invierno del año 2016 donde ambas fracciones presentan máximos de 1000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]). Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde abril-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.2 ($^{\circ}\text{C}$) y la máxima es de 34 ($^{\circ}\text{C}$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernical. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde abril-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de 0 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre -0.3 y 25.4 (m/s) este máximo corresponde a un pico alcanzado en septiembre de 2018, se eliminarán los datos anómalos de la base de datos. La variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta caídas abruptas hasta 0 (hPa), se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos. La variable precipitación presenta registros disponibles desde abril-2014 a diciembre-2018 y sus registros oscilan entre 0 y 13 (mm). Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde abril-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de -7 (W/m^2) y un máximo de 986 (W/m^2), se eliminarán los registros negativos de la base de datos.

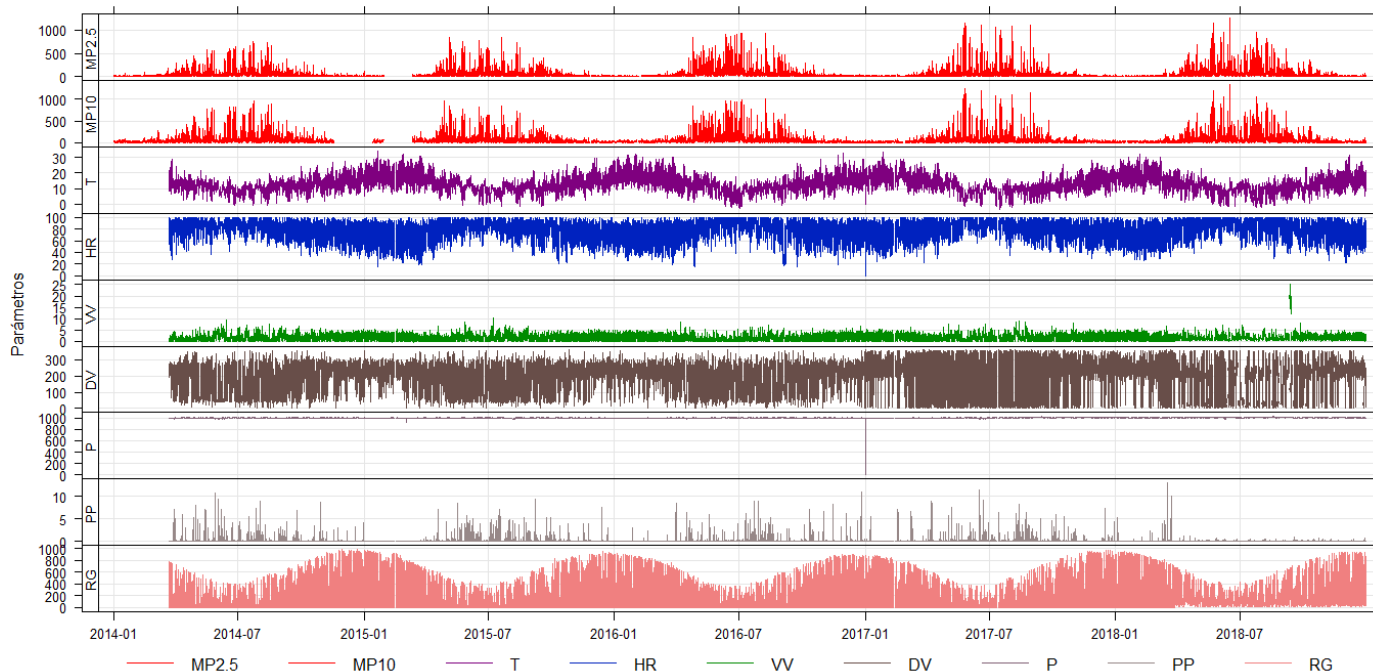


Figura 23. Estación Padre Las Casas II. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

Región de Los Ríos

A continuación, se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones La Unión, Valdivia I y Valdivia II, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones, estos datos han sido graficados tal como se facilitaron por la contraparte técnica.

La estación La Unión presenta datos de MP_{2,5} a desde enero a diciembre-2018, mientras que de MP₁₀ no hay registros. Los valores de MP_{2,5} siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde octubre-2017 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3 (°C) y la máxima es de 31.6 (°C), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde octubre-2017 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura con valores entre 99.4 (%) y 22.4 (%). Finalmente, la variable velocidad de viento se encuentra disponible desde octubre-2017 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.5 (m/s), no presenta datos anómalos.

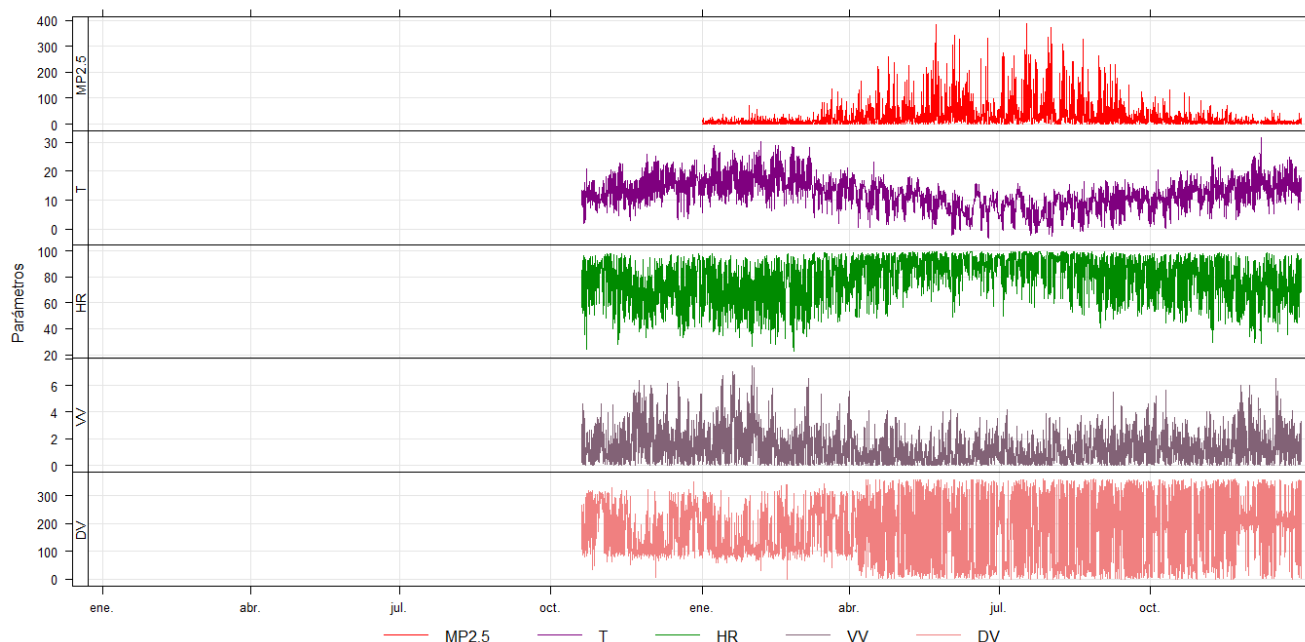


Figura 24. Estación La Unión. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Valdivia presenta datos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a partir de enero-2015 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -39.9 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 36.1 ($^{\circ}C$), la mínima corresponde a un valor anormal registrado en septiembre de 2018 por lo que este valor será eliminado de la base de datos. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2016 a abril-2018, presenta un valor máximo de 113 (%) y un mínimo de 0 (%). La serie graficada indica que existen errores de lectura para esta variable por lo que no será incluida en el análisis de Factor de Impacto por Concentración. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 7.7 (m/s), no presenta datos anómalos. La variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 600 hPa, sin embargo, presenta caídas abruptas hasta 497 (hPa), la serie graficada indica que existen errores de lectura para esta variable por lo que no será incluida en el análisis de Factor de Impacto por Concentración.

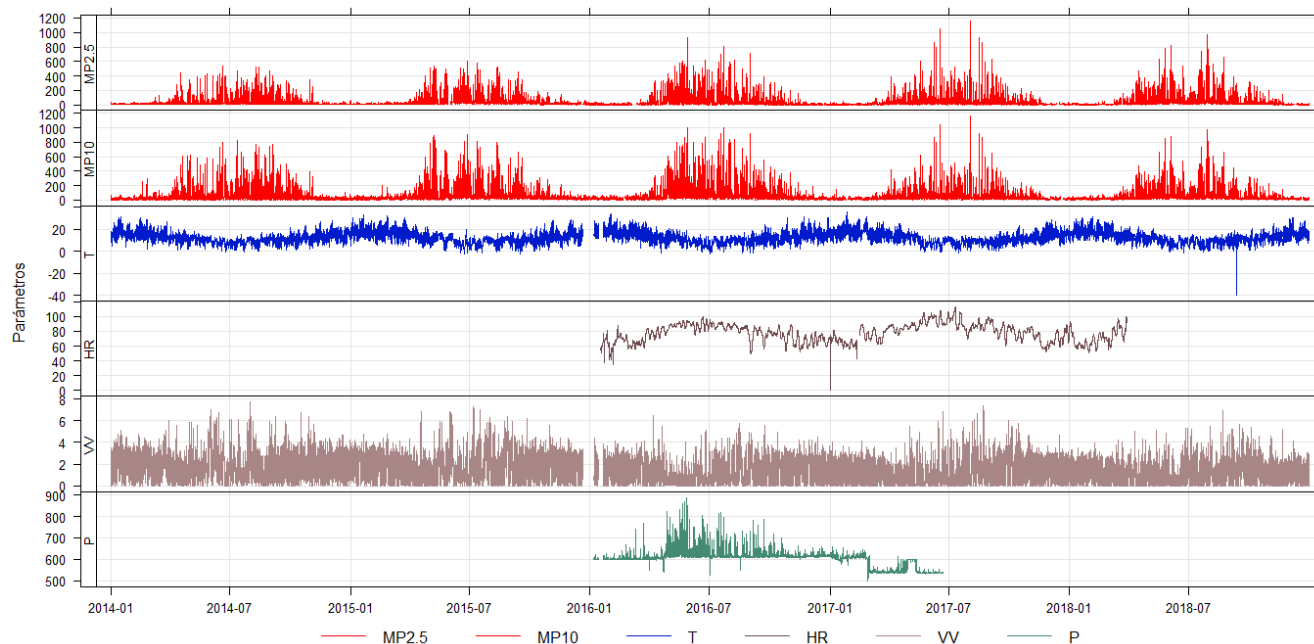


Figura 25. Estación Valdivia. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Valdivia II no presenta registros de material particulado. La variable temperatura se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, la mínima es de -1.8 (°C) y la máxima es de 29.8 (°C). La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, presenta un valor máximo de 92.8 (%) y un mínimo de 15.9 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde septiembre a diciembre-2018, oscila entre 0 y 5.2 (m/s). Esta estación no será incluida para el análisis de Impacto por Concentración puesto que no presenta datos de Material Particulado.

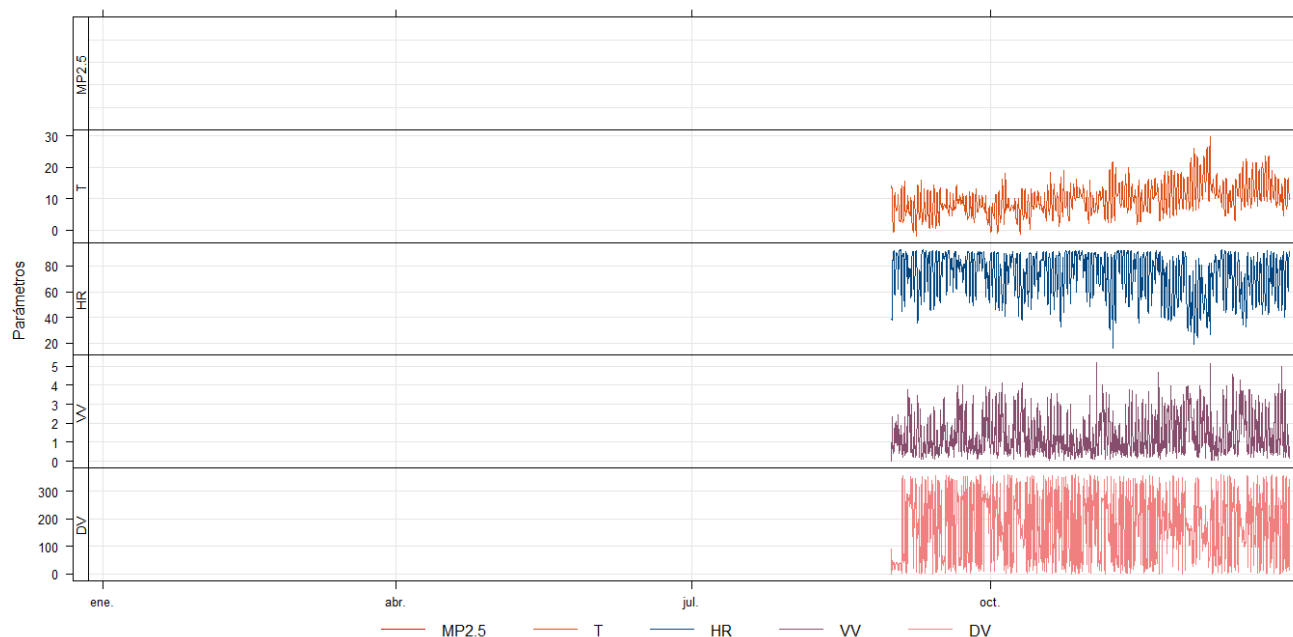


Figura 26. Estación Valdivia II. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

Región de Los Lagos

A continuación, se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones Alerce, Mirasol y Osorno, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones, estos datos han sido graficados tal como se facilitaron por la contraparte técnica.

La estación Alerce presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de mayo-2017 a diciembre-2018, mientras que de MP_{10} no hay registros. Los valores de $MP_{2,5}$ siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde abril 2017 hasta diciembre-2018, la mínima es de -3.2 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 35.3 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernial sin embargo tiene discontinuidad en su serie por lo que no se considerará para calcular Factor de Impacto por Concentración. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde abril-2017 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, con valores entre 99.5 (%) y 16.2 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde abril-2017 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 14.4 (m/s), no presenta datos anómalos.

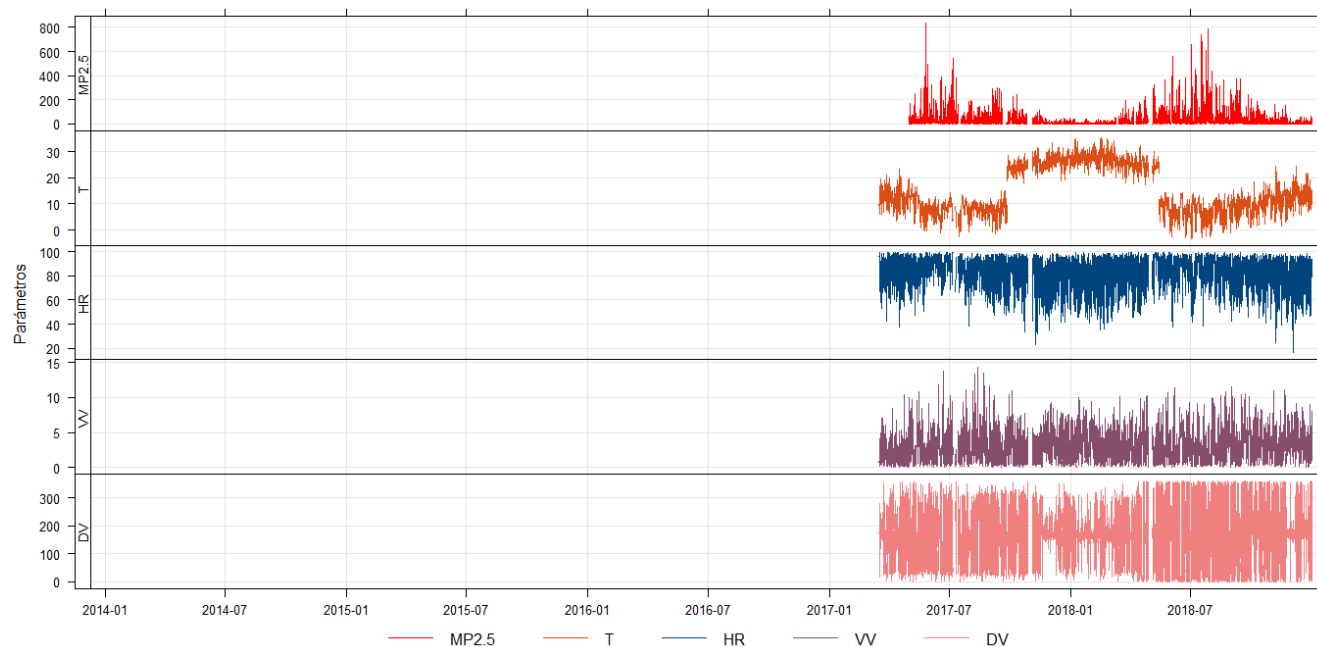


Figura 27. Estación Alerce. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Mirasol presenta datos de $MP_{2,5}$ a partir de marzo-2016 hasta diciembre-2018, mientras que de MP_{10} no hay registros. Los valores de $MP_{2,5}$ siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde agosto-2016 hasta diciembre-2018, la mínima es de -45 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 36.8 ($^{\circ}C$), los eventos de temperaturas extremas son identificables y serán eliminados de la base de datos. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde agosto-2016 a diciembre-2018, presenta un valor máximo de 100 (%) y un mínimo de -15 (%), estos valores indican a que existen errores de lectura para esta variable por lo que se eliminarán todos los valores negativos de la base de datos. La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde agosto-2016 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 27 (m/s), el máximo alcanzado corresponde a un evento aislado durante el 2018 y este registro se eliminará de la base de datos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde agosto-2016 a diciembre-2018, presenta un mínimo de 0 (W/m^2) y un máximo de 1134 (W/m^2), no presenta comportamiento anómalo.

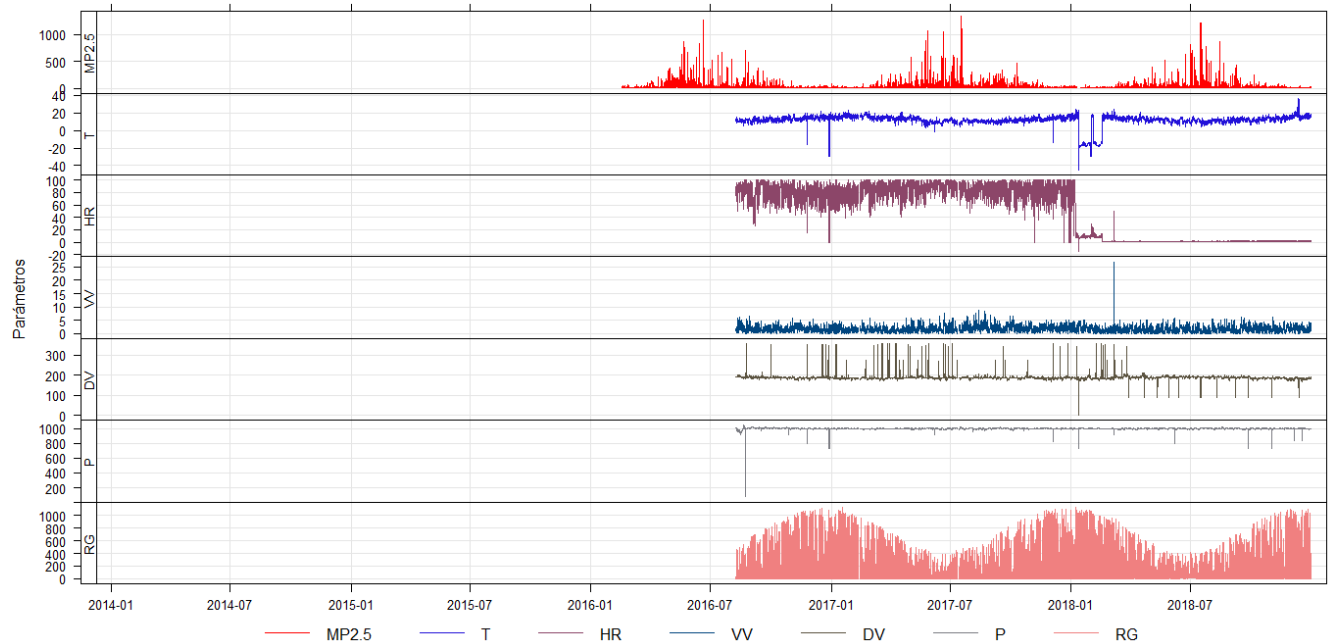


Figura 28. Estación Mirasol. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Osorno presenta datos de $MP_{2,5}$ y MP_{10} a partir de enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -72.8 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 34 ($^{\circ}C$), la mínima corresponde a un evento aislado e identificable que será eliminado de la base de datos. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 95 (%) y un mínimo de 0 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 10.1 (m/s), no presenta datos anómalos.

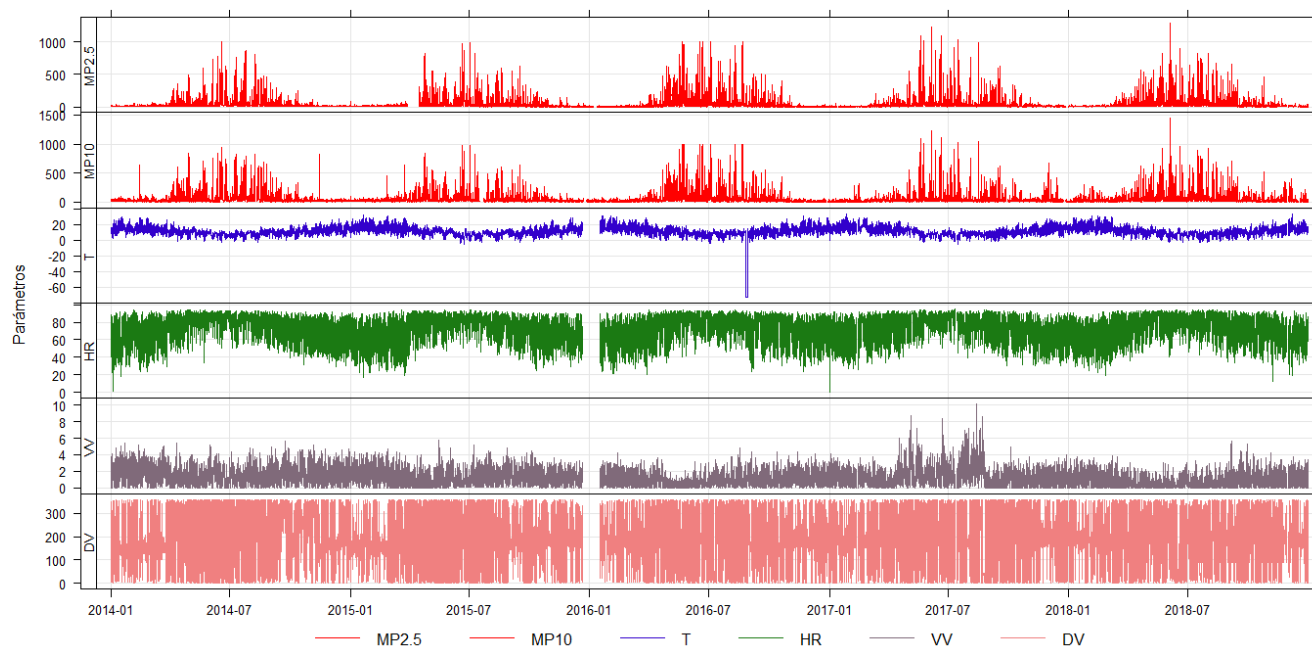


Figura 29. Estación Osorno. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

Región de Aysén

A continuación, se presenta un análisis screening de los datos disponibles de las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II, donde cada uno de los gráficos muestra la tendencia temporal de los registros horarios disponibles en las estaciones, estos datos han sido graficados tal como se facilitaron por la contraparte técnica.

La estación Coyhaique 1 presenta datos de $MP_{2,5}$ y MP_{10} a partir de enero-2014 hasta diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -9.2 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 38.7 ($^{\circ}C$), presenta una tendencia de aumento de temperaturas en época estival y disminución en invernacional a excepción del registro durante el año 2018 que presenta un estancamiento de las mediciones en torno a los 10 ($^{\circ}C$), estos registros serán eliminados de la base de datos. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde enero-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 95.5 (%) y un mínimo de 2 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre 0 y 9.9 (m/s), no presenta datos anómalos. Finalmente, la radiación global se encuentra disponible desde junio-2014 a diciembre-2018, presenta como es de esperar una tendencia correlacionada con la temperatura, con un mínimo de -9.2 (W/m^2) y un máximo de 1355 (W/m^2), presenta un comportamiento notoriamente anómalo a partir del año 2018 al igual que la temperatura por lo que estos registros serán eliminados de la base de datos.

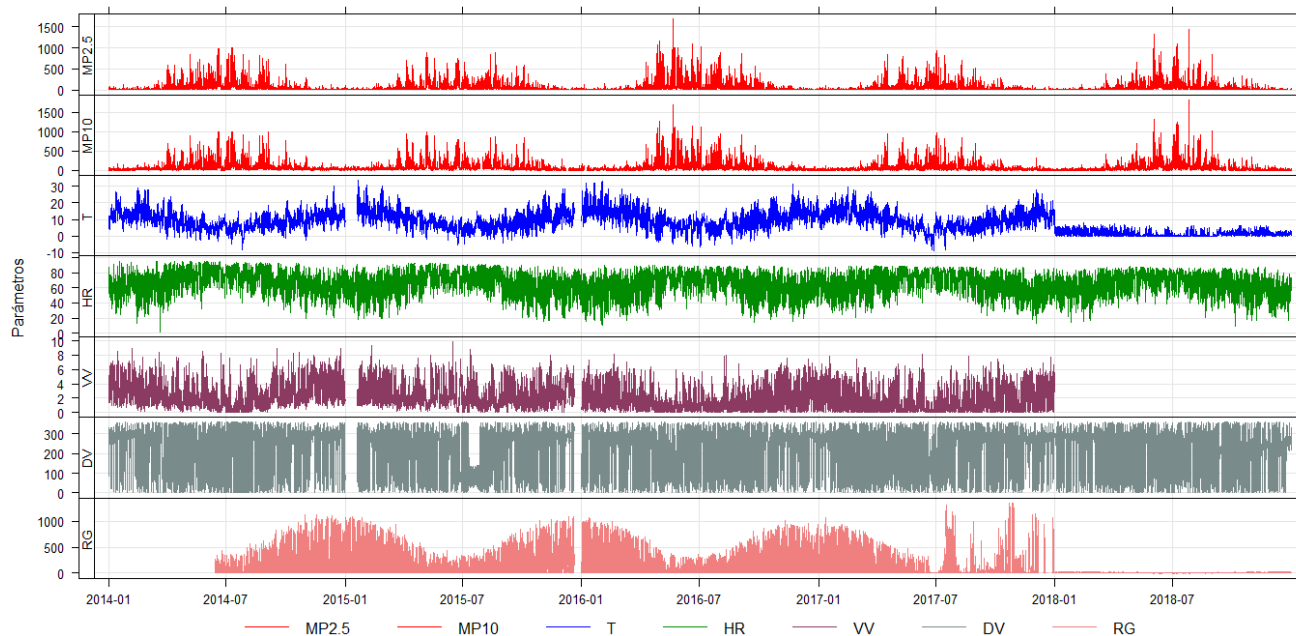


Figura 30. Estación Coyhaique 1. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

La estación Coyhaique II presenta datos de $MP_{2,5}$ y MP_{10} desde enero-2014 a diciembre-2018. Los valores de MP_{10} son mayores a los de $MP_{2,5}$ y siguen una tendencia temporal de aumento de concentraciones en invierno y disminución en verano. La variable temperatura se encuentra disponible desde marzo-2014 hasta diciembre-2018, la mínima es de -50 ($^{\circ}C$) y la máxima es de 35.6 ($^{\circ}C$) donde las mínimas corresponden a eventos aislados e identificables por lo que se eliminarán de la base de datos. La variable humedad relativa del aire se encuentra disponible desde marzo-2014 a diciembre-2018, presenta un comportamiento anti correlacionado con la temperatura, como es de esperar, presenta un valor máximo de 98.4 (%) y un mínimo de 0 (%). La variable velocidad de viento se encuentra disponible desde enero-2014 hasta diciembre-2018, oscila entre -15 y 11.6 (m/s), donde los valores negativos corresponden a eventos aislados e identificables y además ocurre en las mismas fechas que los errores de lectura de la variable temperatura, por lo que estos datos serán eliminados. Finalmente, la variable presión del aire se mantiene principalmente sobre 1010 hPa, sin embargo, presenta caídas abruptas hasta 0 (hPa), se eliminarán estos valores anómalos de la base de datos.

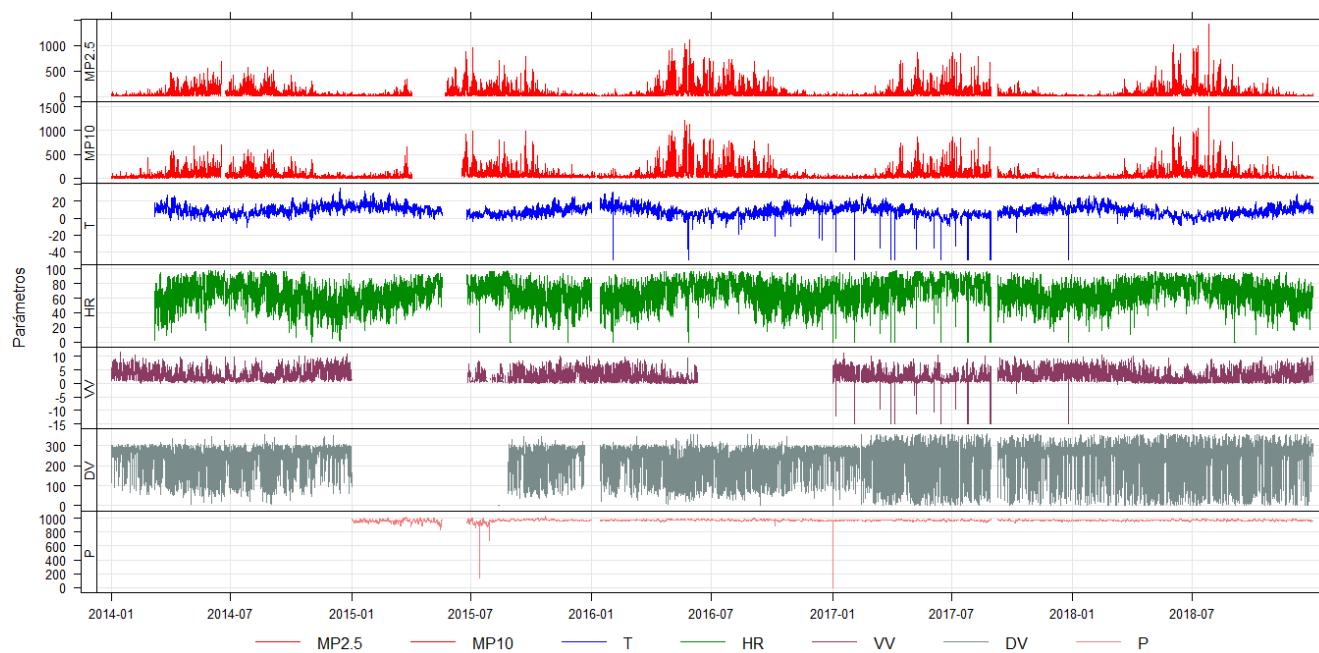


Figura 31. Estación Coyhaique II. concentraciones horarias de variables contaminantes y meteorológicas. Elaboración Propia.

Diagnóstico de la completitud de datos de las estaciones de Rancagua a Coyhaique.

Análisis de completitud de información

A continuación, se realiza un análisis de completitud de las variables recopiladas por estación. Para el Material Particulado se han utilizado los criterios de completitud que exigen las normas de calidad del MP_{2,5} (MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE 2011), y de MP₁₀ (MINGEPRES y CONAMA, 1998). Con respecto a la completitud de variables meteorológicas se seguirán los criterios de completitud exigidos por la USEPA (USEPA 2000). Los colores de cada tabla indican nivel de completitud conforme con los siguientes criterios:

- Casilla color verde denota un valor de completitud que cumple con la respectiva norma de calidad de la variable,
- Casilla color rojo indica que la variable no cumple con el criterio de completitud,
- Casilla color amarillo indica que el valor se encuentra en un rango tolerable de completitud (entre 60 y 75 %), esto es solo para el caso de meteorología.
- Casilla color rojo oscuro con valores negro indica que la variable pese a cumplir con criterio de completitud se descarta debido a presentar errores de lecturas para el período, esto se estableció por el análisis de screening de la información presentado en el punto 2.2.
- Casilla roja con SV indica que la estación no posee esa variable para dicho período.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar por MP_{2,5} son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I, Rancagua II, Rengo y San Fernando.
- Maule: Curicó, La Florida, U.C. Maule, U. Talca y Linares.
- Ñuble y Biobío: Purén, 21 de Mayo, Cerro Merquín, Consultorio San Vicente, Liceo Polivalente, Kingston College y Balneario Curanilahue.
- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas, Museo Ferroviario.
- Los Ríos: Valdivia I.
- Los Lagos: Osorno y Mirasol.
- Aysén: Coyhaique I y Coyhaique II.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar por MP₁₀ son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I, Rancagua II, Rengo y San Fernando.
- Maule: Curicó, La Florida, U.C. Maule y U. Talca.
- Ñuble y Biobío: INIA Chillán, Purén, 21 de Mayo, Punteras, Cerro Merquín, Consultorio San Vicente, Liceo Polivalente y Kingston College.
- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas, Museo Ferroviario.
- Los Ríos: Valdivia I.
- Los Lagos: Osorno.
- Aysén: Coyhaique I y Coyhaique II.

Para realizar el análisis propuesto en la oferta técnica sobre el Factor de Impacto por concentración, es necesario poseer data meteorológica de calidad con el fin de establecer efectos de cada una de estas variables sobre el Material Particulado. Es por esta razón que se analiza el estado de completitud de la data meteorológica dispuesta por el ministerio de medioambiente. Con las estaciones nombradas a continuación se puede hacer un seguimiento de al menos dos años de efectos de variables meteorológicas sobre el Material Particulado.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar Humedad Relativa son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I, Rancagua II, Rengo y San Fernando.
- Maule: Curicó, La Florida, U.C. Maule, U. Talca y Linares.
- Ñuble y Biobío: Purén, 21 de Mayo, Los Ángeles Oriente y Kingston College.
- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas, Museo Ferroviario.
- Los Lagos: Osorno y Alerce.
- Aysén: Coyhaique I y Coyhaique II.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar Temperatura son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I, Rancagua II, Rengo y San Fernando.
- Maule: Curicó, La Florida, U.C. Maule, U. Talca y Linares
- Ñuble y Biobío: INIA Chillán, Purén, 21 de Mayo, Los Ángeles Oriente y Kingston College.
- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas, Museo Ferroviario.
- Los Ríos: Valdivia I.
- Los Lagos: Osorno y Mirasol.
- Aysén: Coyhaique I y Coyhaique II.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar por Velocidad de Viento son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I, Rancagua II, Rengo y San Fernando.
- Maule: Curicó, La Florida, U.C. Maule, U. Talca y Linares.
- Ñuble y Biobío: INIA Chillán, Purén, 21 de Mayo, Los Ángeles Oriente y Kingston College.
- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas, Museo Ferroviario.
- Los Ríos: Valdivia I.
- Los Lagos: Osorno, Mirasol y Alerces.
- Aysén: Coyhaique I y Coyhaique II.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar Presión son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I y San Fernando.
- Maule: La Florida, U.C. Maule y U. Talca.
- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas y Ñielol.
- Los Lagos: Mirasol.
- Aysén: Coyhaique II.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar Precipitación son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I.

- La Araucanía: Las Encinas, Padre Las Casas, Museo Ferroviario.

De la *Tabla 5* se obtiene que las estaciones a considerar para analizar Radiación Global son:

- Libertador Bernardo O'Higgins: Rancagua I, Rancagua II, Rengo y San Fernando.
- Maule: Curicó y Linares.
- Ñuble y Biobío: Purén y Los Ángeles Oriente.
- La Araucanía: Ñielol, Las Encinas, Padre Las Casas y Museo Ferroviario.
- Los Lagos: Mirasol.
- Aysén: Coyhaique I.

Tabla 5. Tabla de completitud de variables contaminantes y meteorológicas de las estaciones de Rancagua a Coyhaique. "sv" indica sin valores. Elaboración Propia.

		Rancagua I	Rancagua II	Rengo	San Fernando	Curicó	Talca La Florida	U.C. Maule	U. Talca	linares	Inia Chillán	Purén	21 de mayo	los Ángeles Oriente	Punteras	Cerro Merquín	Consultorio- San Vicente	Liceo Polivalente	Kingston College	Balneario Curanilahue	Ñielol	M. Ferroviario	Las Encinas	Padre las Casas II	Valdivia	La unión	Valdivia 2	Osorno	Mirazol	Alerce	Coyhaique I	Coyhaique II
MP _{2,5}	2014	99	96	0	0	97	93	94	91	0	91	99	98	83	0	0	0	0	0	0	0	99	99	99	100	0	SV	98	0	0	99	97
	2015	98	83	0	0	91	99	96	99	0	95	99	99	81	0	0	0	0	0	0	0	99	99	87	95	0	SV	94	0	0	98	85
	2016	98	96	0	70	96	80	98	98	98	71	98	99	73	93	95	14	45	70	7.6	0	98	98	98	92	0	SV	96	86	0	98	98
	2017	98	98	96	95	98	97	97	96	98	63	98	98	62	0	98	93	95	87	96	0	64	98	99	96	0	SV	95	99	59	98	95
	2018	97	97	97	96	98	99	98	98	98	96	98	98	46	95	95	90	95	97	98	98	0	97	97	97	97	SV	98	98	94	98	98
MP ₁₀	2014	99	98	98	99	97	100	99	99	SV	50	99	98	17	95	94	98	49	98	SV	0	93	93	87	98	SV	SV	98	SV	SV	99	97
	2015	94	86	97	97	97	99	97	97	SV	9.8	99	100	0	96	95	99	93	81	SV	0	99	99	84	96	SV	SV	95	SV	SV	97	78
	2016	98	97	95	90	97	82	96	98	SV	70	98	99	0	85	75	99	94	91	SV	0	97	98	98	97	SV	SV	98	SV	SV	98	97
	2017	98	99	95	97	98	98	97	97	SV	94	99	99	0	98	0	92	95	98	SV	0	64	99	98	96	SV	SV	96	SV	SV	99	96
	2018	97	99	97	96	98	97	97	99	SV	96	99	99	0	96	12	92	70	98	SV	98	0	99	97	97	SV	SV	98	SV	SV	98	99
Velocidad del Viento	2014	100	100	0	100	99	99	99	99	0	98	100	100	100	0	SV	0	0	99	0	0	40	77	78	100	0	0	100	0	0	100	100
	2015	100	100	52	97	97	100	97	97	61	100	100	80	94	0	SV	0	0	23	0	0	100	100	99	97	0	0	97	0	0	98	40
	2016	100	99	99	99	96	100	96	95	95	99	99	92	100	0	SV	0	0	51	0	0	99	100	100	95	0	0	95	40	0	100	43
	2017	97	98	100	99	98	98	98	96	99	100	100	100	100	0	SV	0	0	100	0	62	2.3	99	98	99	20	0	98	99	72	98	96
	2018	99	99	100	100	100	100	99	26	100	100	100	100	100	33	SV	32	33	99	35	100	0	92	72	98	100	34	99	100	94	0	99
Temperatura	2014	100	100	100	100	99	99	100	99	0	0	100	100	100	0	SV	0	0	100	0	0	78	77	78	100	0	0	100	0	0	100	82
	2015	100	100	97	97	97	100	97	97	61	0	100	100	93	0	SV	0	0	16	0	0	100	100	99	97	0	0	97	0	0	88	90
	2016	100	99	99	99	96	100	96	95	95	0	99	100	100	0	SV	0	0	0	0	0	99	100	100	96	0	0	95	40	0	100	96
	2017	97	98	100	99	98	98	98	96	99	95	100	100	100	0	SV	0	0	98	0	62	2.3	99	98	100	20	0	98	99	75	99	96

		Rancagua I	Rancagua II	Rengo	San Fernando	Curicó	Talca La Florida	U.C. Maule	U. Talca	linares	Inia Chillán	Purén	21 de mayo	los Ángeles Oriente	Punteras	Cerro Merquín	Consultorio- San Vicente	Liceo Polivalente	Kingston College	Balneario Curanilahue	Ñielol	M. Ferroviario	Las Encinas	Padre las Casas II	Valdivia	La unión	Valdivia 2	Osorno	Miraflores	Alerce	Coyhaique I	Coyhaique II	
Humedad Relativa	2018	98	99	100	100	100	100	99	91	100	100	100	100	100	33	SV	32	32	99	35	58	0	100	57	99	100	34	99	100	98	100	100	
	2014	100	100	100	100	99	99	100	99	0	SV	100	100	100	0	SV	0	0	99	0	0	78	77	78	0	0	0	100	0	0	100	82	
	2015	100	100	100	97	97	96	97	97	61	SV	89	100	83	0	SV	0	0	62	0	0	100	100	99	0	0	0	97	0	0	100	90	
	2016	100	99	99	95	96	100	96	95	95	SV	99	99	100	0	SV	0	0	94	0	0	99	100	100	95	0	0	95	40	0	100	96	
	2017	97	100	100	99	98	96	98	96	99	SV	100	100	100	0	SV	0	0	100	0	62	2.3	99	98	99	20	0	98	99	75	99	96	
2018	99	99	100	100	100	96	90	26	100	SV	100	100	100	33	SV	32	32	99	35	100	0	100	72	23	100	34	99	100	98	100	100		
Precipitaciones	2014	100	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	0	78	77	78	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	
	2015	100	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	0	100	100	99	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV
	2016	100	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	0	99	100	100	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV
	2017	97	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	62	2.3	99	98	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV
	2018	99	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	82	0	100	99	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV
Presión Atmosférica	2014	100	SV	0	100	SV	99	100	99	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	0	78	77	78	0	SV	SV	SV	0	SV	SV	0	
	2015	100	SV	51	97	SV	100	97	97	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	0	100	100	99	0	SV	SV	SV	0	SV	SV	87	
	2016	100	SV	68	98	SV	100	96	95	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	0	99	100	100	96	SV	SV	SV	40	SV	SV	96	
	2017	97	SV	40	75	SV	98	98	96	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	62	2.3	99	98	47	SV	SV	SV	99	SV	SV	96	
	2018	95	SV	0	0	SV	100	99	26	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	100	0	100	99	0	SV	SV	SV	100	SV	SV	100	
Radiación Global	2014	100	98	100	100	99	SV	SV	SV	0	SV	100	SV	100	SV	SV	SV	SV	100	SV	0	78	77	78	SV	SV	SV	SV	0	SV	55	SV	
	2015	100	91	99	97	97	SV	SV	SV	61	SV	100	SV	94	SV	SV	SV	SV	49	SV	0	100	100	99	SV	SV	SV	SV	0	SV	93	SV	
	2016	43	99	99	98	96	SV	SV	SV	95	SV	97	SV	98	SV	SV	SV	SV	92	SV	0	99	100	100	SV	SV	SV	SV	40	SV	98	SV	
	2017	47	98	98	99	98	SV	SV	SV	99	SV	100	SV	100	SV	SV	SV	SV	99	SV	62	2.3	97	98	SV	SV	SV	SV	99	SV	81	SV	
	2018	47	84	97	100	76	SV	SV	SV	100	SV	100	SV	100	SV	SV	SV	SV	99	SV	100	0	0	99	SV	SV	SV	SV	87	SV	100	SV	

Evaluación del cumplimiento de normas de calidad respectivas

Para cada parámetro de calidad del aire monitoreado se evaluará el cumplimiento de la normativa de calidad de aire respectiva mediante el cálculo de los estadísticos correspondientes (percentil 98, promedio anual, promedio trianual y concentración de 24 horas).

A continuación se presentan tablas de normas de calidad anuales, para el $MP_{2,5}$ y MP_{10} en la **Tabla 6** y **Tabla 7** respectivamente. La casilla verde con valor negro indica que la estación se encuentra bajo la norma anual, la casilla verde con valor rojo indica que la estación sobrepasa la norma anual y finalmente la casilla roja con SV indica que no existen datos disponibles para el período.

Se observa que desde la Región de la Araucanía hacia el sur las estaciones presentan valores por sobre la normativa vigente para el promedio anual ($20 \mu g/m^3$) en los últimos 4 años. La estación Universidad de Talca y Punteras son las estaciones que presentan menor concentración de $MP_{2,5}$.

Tabla 6. Tabla de promedios Anuales de $MP_{2,5}$ para las estaciones de Rancagua a Coyhaique. "sv" indica sin valores. Elaboración Propia.

	$MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	2014	2015	2016	2017	2018
Libertador Bernardo O'Higgins	Rancagua I	28	25	24	23	21
	Rancagua II	32	42	31	26	28
	Rengo	SV	SV	SV	22	22
	San Fernando	SV	SV	SV	21	18
Maule	Curicó	27	25	30	25	23
	Talca La Florida	33	32	37	25	29
	U.C. Maule	22	22	20	20	20
	U. Talca	18	19	19	17	17
	linares	SV	SV	32	28	30
Biobío y Ñuble	Inia Chillán	SV	29	23	SV	20
	Purén	31	32	35	34	37
	21 de mayo	27	29	33	28	35
	los Ángeles Oriente	SV	32	34	SV	SV
	Punteras	SV	SV	12	17	16
	Cerro Merquín	SV	SV	18	20	18
	Consultorio San Vicente	SV	SV	SV	20	24
	Liceo Polivalente	SV	SV	SV	13	21
	Kingston College	SV	SV	SV		19
	Hualqui	SV	SV	SV	21	20
Balneario Curanilahue	SV	SV	SV	35	26	
Araucanía	Ñielol	SV	SV	SV	SV	21
	M. Ferroviario	30	27	36	SV	SV
	Las Encinas	31	30	33	27	33
	Padre las Casas II	35	47	49	40	48
Los Ríos	Valdivia	29	38	40	33	37

	MP _{2,5} (µg/m ³)	2014	2015	2016	2017	2018
	Valdivia 2	SV	SV	SV	SV	SV
	Osorno	34	33	46	36	43
Los Lagos	Mirasol	SV	SV	SV	30	23
	La unión	SV	SV	SV	SV	27
	Alerce	SV	SV	SV	SV	27
Aysén	Coyhaique I	62	52	67	45	51
	Coyhaique II	61	52	65	52	50

Respecto de MP₁₀, se observa que desde la Región de la Araucanía hacia el sur las estaciones presentan un sobrepaso de la normativa anual (50 µg/m³) en algunos de los últimos 4 años, además se observa que particularmente para el año 2016, las regiones de la Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén aumentaron notoriamente las concentraciones respecto de los años anteriores. La región de Aysén es quien presenta la más alta concentración por MP₁₀.

Tabla 7. Tabla de promedios Anuales de MP₁₀ para las estaciones de Rancagua a Coyhaique. Elaboración Propia.

	MP ₁₀ (µg/m ³)	2014	2015	2016	2017	2018
Libertador Bernardo O'Higgins	Rancagua I	70	80	73	64	55
	Rancagua II	80	73	63	50	52
	Rengo	49	42	35	45	45
	San Fernando	43	47	46	39	41
Maule	Curicó	51	56	47	42	41
	Talca La Florida	55	63	60	46	39
	U.C. Maule	42	39	35	40	33
	U. Talca	44	51	43	37	38
Biobío y Ñuble	Inia Chillán	SV	SV	SV	32	39
	Purén	49	53	50	48	53
	Consultorio- San Vicente	45	49	56	59	52
	Punteras	30	36	32	26	28
	Liceo Polivalente	SV	34	37	31	31
	Cerro Merquín	31	36	SV	SV	SV
	Hualqui	SV	SV	SV	34	33
	Kingston College	32	SV	42	30	30
	Los Ángeles Oriente	SV	SV	SV	SV	SV
21 DE Mayo	55	56	57	46	55	
Araucanía	M. Ferroviario	59	46	51	SV	SV
	Ñielol	SV	SV	SV	SV	31
	Las Encinas	50	49	51	41	46
	Padre las Casas	69	71	63	53	63
Los Ríos	Valdivia	46	55	66	42	46

	MP ₁₀ (µg/m ³)	2014	2015	2016	2017	2018
Los Lagos	Osorno	54	46	55	47	57
Aysén	Coyhaique I	82	77	86	64	72
	Coyhaique II	69	70	84	59	61

A continuación se presentan tablas de normas de calidad según Percentil 98, para el MP_{2,5} y MP₁₀ en la *Tabla 8* y *Tabla 9* respectivamente. La casilla verde con valor negro indica que la estación se encuentra bajo la norma anual, la casilla verde con valor rojo indica que la estación sobrepasa la norma anual, la casilla amarilla indica que la estación se encuentra en estado de latencia (80% de la concentración según norma) y finalmente la casilla roja con SV indica que no existen datos disponibles para el período.

De la *Tabla 8* se observa una superación de normativa y condición de latencia para todas las estaciones excepto Punteras y Cerro Merquín, pertenecientes a la región del Biobío. Una vez más las estaciones del extremo sur de Chile son las que presentan mayores valores de concentración de MP_{2,5}. Específicamente la región de Aysén presenta una superación sobre el 300% de la normativa de percentil 98 (50 µg/m³), y una superación sobre el 280% para la normativa anual (20 µg/m³). La región de Los Lagos presenta una superación de hasta el 400% de la normativa del percentil 98 para la estación Osorno en el año 2016, mientras que la misma estación presenta una superación del hasta el 200% según la normativa de promedio trianual para el periodo 2016-2018. La región de Los Ríos presenta una superación de hasta un 300% de la normativa del percentil 98 para la estación Valdivia I en el año 2018, mientras que la misma estación presenta una superación por sobre el 170% según la normativa del promedio trianual para el período 2014-2016. La región de La Araucanía presenta una condición de superación de hasta el 466% para la estación Padre Las Casas II en el año 2018, mientras que la misma estación presenta una superación por sobre el 200% de la normativa de promedio trianual para el periodo 2014-2018.

Tabla 8. Tabla de promedios Trianuales y Percentil 98 de MP_{2,5} para las estaciones de Rancagua a Coyhaique. "sv" indica sin valores. Elaboración Propia.

Región	MP _{2,5} (µg/m ³)	Promedio Tri Anual			Percentil 98				
		2014-2016	2015-2017	2016-2018	2014	2015	2016	2017	2018
Libertador Bernardo O'Higgins	Rancagua I	25	24	23	98	75	89	73	76
	Rancagua II	35	33	28	130	97	110	83	99
	Rengo	sv	sv	sv	sv	sv	sv	67	78
	San Fernando	sv	sv	sv	sv	sv	sv	70	63
Maule	Curicó	27	27	26	89	74	99	91	111
	Talca La Florida	34	31	30	135	130	115	117	131
	U.C. Maule	21	21	20	71	77	69	84	79
	U. Talca	18	18	18	62	69	69	84	85
	linares	sv	sv	30	sv	sv	118	141	138
Ñuble y Biobío	Inia	sv	sv	sv	sv	91	45	sv	77
	Purén	33	33	35	155	145	162	164	195

Región	MP _{2,5} (µg/m ³)	Promedio Tri Anual			Percentil 98				
		2014-2016	2015-2017	2016-2018	2014	2015	2016	2017	2018
	21 de mayo	30	30	32	140	122	172	124	189
	los Ángeles Oriente	SV	SV	SV	SV	72	64	SV	SV
	Punteras	SV	SV	15	SV	SV	28	53	49
	Cerro Merquín	SV	SV	19	SV	SV	45	49	35
	Consultorio- San Vicente	SV	SV	SV	SV	SV	SV	85	98
	Liceo Polivalente	SV	SV	SV	SV	SV	SV	37	63
	Kingston College	SV	SV	SV	SV	SV	SV		54
	Hualqui	SV	SV	SV	SV	SV	SV	61	63
	Balneario Curanilahue	SV	SV	SV	SV	SV	SV	164	109
La Araucanía	Ñielol	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	116
	M. Ferroviario	31	SV	SV	148	122	164	SV	SV
	Las Encinas	32	30	31	154	132	143	159	146
	Padre las Casas II	44	45	46	160	171	190	226	233
Los Ríos	Valdivia	35	37	36	101	130	146	128	150
	Valdivia 2	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV
	La unión	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	108
Los Lagos	Osorno	38	38	42	183	174	220	183	191
	Mirasol	SV	SV	SV	SV	SV	SV	163	98
	Alerce	SV	SV	SV	SV	SV	SV	SV	139
Aysén	Coyhaique I	60	54	54	297	219	378	221	334
	Coyhaique II	60	56	56	196	168	324	217	286

De la *Tabla 9* se observa una superación de norma trianual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Percentil 98 ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y condición de latencia (sobre el 80% del valor de la normativa correspondiente) a partir de la región de La Araucanía. En concreto, para la región de La Araucanía se observa un sobrepaso de la normativa de percentil 98 hasta en un 173% para la estación Padre Las Casas en el año 2018, mientras que para la misma estación existe un sobrepaso de la norma anual hasta en un 135% para el período trianual 2014-2016. Para la región de Los Ríos se observa un sobrepaso del P98 hasta en un 150% para el año 2016, mientras que existe un sobrepaso de la norma trianual hasta en un 112% para el período 2014-2016. La región de Los Lagos presenta un sobrepaso del P98 hasta en un 168% para el año 2016, mientras que existe un sobrepaso de la norma trianual hasta en un 106% para el período 2016-2018. Finalmente, para la región de Aysén existe un sobrepaso del P98 hasta en un 274% para el año 2016, mientras que se sobrepasa la norma trianual en un 164% para el período 2014-2016 en la estación Coyhaique I.

Tabla 9. Tabla de promedios Trianuales y Percentil 98 de MP₁₀ para las estaciones de Rancagua a Coyhaique.
 "sv" indica sin valores. Elaboración Propia.

Región	MP ₁₀ (µg/m ³)	Promedio Tri Anual			Percentil 98				
		2014-2016	2015-2017	2016-2018	2014	2015	2016	2017	2018
Libertador Bernardo O'Higgins	Rancagua I	74	72	64	140	182	154	133	116
	Rancagua II	72	62	55	198	143	158	109	132
	Rengo	42	41	42	104	99	66	110	109
	San Fernando	45	44	42	95	112	115	92	100
Maule	Curicó	51	48	43	131	138	126	118	128
	Talca La Florida	59	56	48	162	194	155	155	139
	U.C. Maule	39	38	36	114	94	86	101	95
	U. Talca	46	44	39	99	116	105	107	95
Ñuble y Biobío	Inia Chillán	sv	sv	sv	sv	sv	sv	90	132
	Purén	51	50	50	173	176	171	174	220
	21 DE Mayo	56	53	53	180	171	207	155	217
	Punteras	33	31	29	59	89	58	65	62
	Liceo Polivalente	sv	34	33	sv	75	75	65	74
	Cerro Merquín	sv	sv	sv	78	92	sv	sv	sv
	Hualqui	sv	sv	sv	sv	sv	sv	75	68
	Kingston College	sv	sv	34	71	sv	96	71	67
	Consultorio San Vicente	50	55	56	111	123	147	146	142
Los Ángeles Oriente	sv	sv	sv	sv	sv	sv	sv	sv	
Araucanía	M. Ferroviario	52	sv	sv	202	143	178	sv	sv
	Ñielol	sv	sv	sv	sv	sv	sv	sv	118
	Las Encinas	50	47	46	174	162	163	165	157
	Padre las Casas	68	63	60	223	212	207	240	259
Los Ríos	Valdivia	56	54	51	135	179	226	135	167
Los Lagos	Osorno	52	49	53	234	189	251	194	210
Aysén	Coyhaique I	82	76	74	334	297	411	244	380
	Coyhaique II	74	71	68	202	217	362	225	306

A continuación, se presenta una tabla resumen de la información a ser utilizada en los análisis estadísticos de Tendencias.

Tabla 10: cuadro resumen información a ser utilizados para los análisis estadísticos de Tendencias. Elaboración Propia.

Región	Estación	Variables	Período
VI Región	Rengo	MP _{2,5}	2017-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	San Fernando	MP _{2,5}	May 2016-Dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Rancagua I	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Rancagua II	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
VI Región	Curicó	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Linares	MP ₁₀	No hay
		MP _{2,5}	ene-2016-Dic 2018
	U del Maule	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	U de Talca	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	La Florida	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
Ñuble	INIA	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2017-2018
	Purén	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
Bío-Bío	21 de mayo	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Balneario Curanilahue	MP _{2,5}	Dic 2016-dic 2018
		MP ₁₀	Sin información
	Cerro Merquín	MP _{2,5}	Ene 2016-dic 2018
		MP ₁₀	Ene 2014-Sep 2016
	Consultorio San Vicente	MP _{2,5}	Oct 2016-dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Kingston College	MP _{2,5}	Ene 2016-dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Los Ángeles Oriente	MP _{2,5}	Mar 2014-Jun 2016
		MP ₁₀	Sin información
	Liceo Polivalente	MP _{2,5}	Oct 2016-dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
Punteras	MP _{2,5}	Sin información	

Región	Estación	Variables	Período
		MP_{10}	2014-2018
Araucanía	Las Encinas	$MP_{2,5}$	2014-2018
		MP_{10}	2014-2018
	Museo Ferroviario	$MP_{2,5}$	Ener-2014-Dic-2017
		MP_{10}	Ener-2014-Dic-2017
	Ñielol	$MP_{2,5}$	Ener-2018-Dic-2018
		MP_{10}	Ener-2018-Dic-2018
	Padre Las Casas II	$MP_{2,5}$	2014-2018
		MP_{10}	2014-2018
Los Ríos	La unión	$MP_{2,5}$	2018
		MP_{10}	Sin información
	Valdivia I	$MP_{2,5}$	2014-2018
		MP_{10}	2014-2018
	Valdivia II	$MP_{2,5}$	Sin información
		MP_{10}	Sin información
Los Lagos	Alerce	$MP_{2,5}$	may 2017-dic 2018
		MP_{10}	no hay
	Mirasol	$MP_{2,5}$	Mar 2016-dic 2018
		MP_{10}	no hay
	Osorno	$MP_{2,5}$	2014-2018
		MP_{10}	2014-2018
Aysén	Coyhaique I	$MP_{2,5}$	2014-2018
		MP_{10}	2014-2018
	Coyhaique II	$MP_{2,5}$	2014-2018
		MP_{10}	2014-2018

Recopilación de toda la información previa existente, para la Región Metropolitana, donde se incluya la información de los estudios anteriores con el fin de establecer tendencias.

En la Región Metropolitana se encuentra establecida una red de monitoreo de calidad del aire de contaminantes atmosféricos. La medición de MP continuo en la Red MACAM comenzó en el año 2000 en cuatro estaciones de la Red MACAM: La Florida (L), Las Condes (M), Parque O'Higgins (N) y Pudahuel (O). En el año 2009 el monitoreo de MP_{2,5} se extendió al resto de las estaciones de la Red: Independencia (F), Cerrillos (P), El Bosque (Q), Cerro Navia (R), Puente Alto (S), Talagante (T). La medición con equipamiento discreto comenzó a fines de la década de los 80 con equipamiento dicotómico (filtros) en estaciones de Las Condes, Parque O'Higgins e Independencia.

A continuación, se entregan la evaluación de las normas de calidad de MP₁₀ y MP_{2,5}, para la Región Metropolitana, calculada en base a los monitoreos continuos. En la Figura 32 se entrega el resumen de la situación de calidad del aire para MP₁₀ en cada una de las estaciones de la Red MACAM, actualizada hasta el año 2018. El análisis se presenta en base al valor de concentración en cada estación respecto del valor de la norma, en porcentaje. Respecto de la norma anual se encuentra que todas las estaciones presentan condición de Saturación, excepto la estación de Talagante, que está en Latencia (94%). La Saturación va desde 101% (en Las Condes) hasta un 132% (en estación Independencia). No se encuentra condición de saturación respecto de la norma diaria (P98), sin embargo, Independencia, Parque O'Higgins, Pudahuel, El Bosque, Cerro Navia y Quilicura presentan condición de Latencia (86% a un 99%).

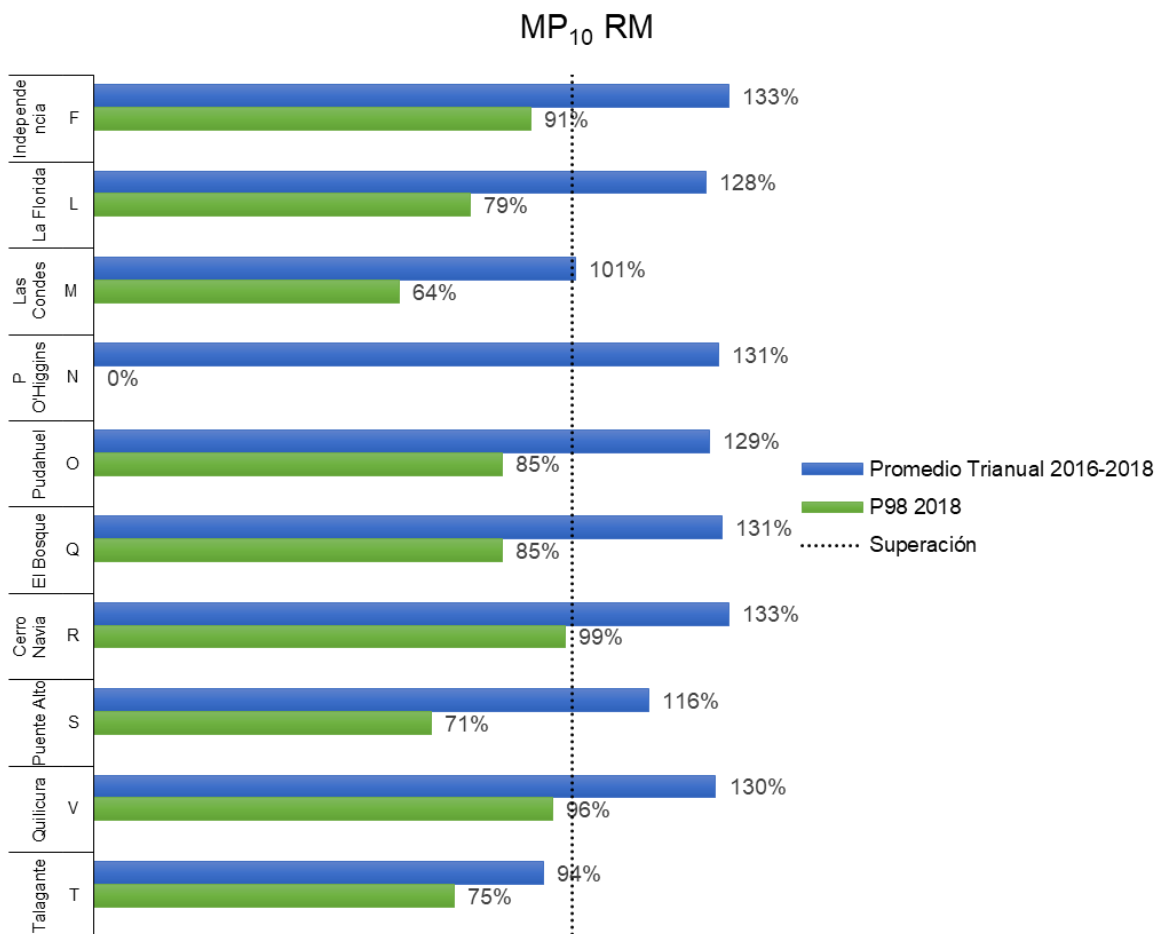


Figura 32: Evaluación de la norma anual y diaria de MP₁₀ en la Red MACAM. Elaboración Propia.

En la Figura 33 se entrega el resumen del estado de la norma de calidad de MP_{2,5} actualizado al período y año más reciente (2018). En este caso se encuentra una condición de calidad del aire más desfavorable que en el caso de MP₁₀, ya que el número de estaciones en condición de Saturación es mayor. Solo el P98 de Las Condes presenta condición de Latencia. Respecto de MP₁₀, la condición de saturación por norma anual va desde un 116% en Las Condes hasta un 162% en El Bosque; en tanto que la saturación por norma diaria va desde un 105% en Puente Alto hasta un 185% en estación Cerro Navia.

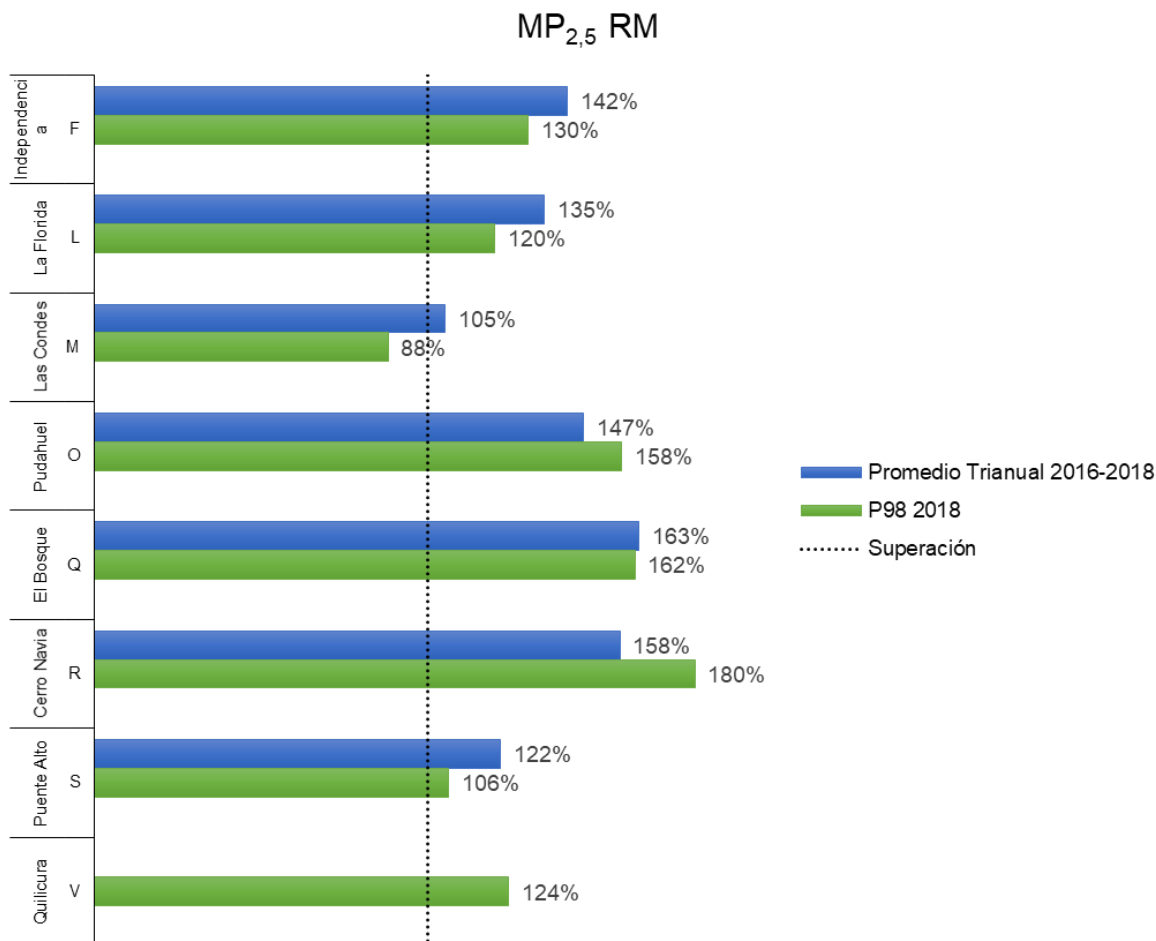


Figura 33: Evaluación de la norma anual y diaria de MP_{2,5} en la Red MACAM. Elaboración Propia.

Respecto de las Tendencias de concentración, se han desarrollado tres estudios principales, los que se entregan a continuación.

- Análisis de Tendencia del Material Particulado en la Región Metropolitana 2012-2014.
- Análisis de Tendencia del Material Particulado en la Región Metropolitana 2008-2010.
- Análisis Retrospectivo de los impactos en Calidad del Aire, emisiones e impactos en salud de los 10 primeros años del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana 1997-2007.

Del último análisis de Tendencias, que incluye la información de los estudios previos, se encontró que la tendencia general del nivel de concentración de MP_{2,5} en la Región Metropolitana muestra un decrecimiento, sin embargo, los niveles y la tendencia de la reducción son menores con relación a lo observado en dos de las regiones más contaminadas de EE. UU. (Central y Southeast)². Los datos

²<http://www.epa.gov/airtrends/pm.html>

de MP_{10} actualizados hasta el año 2018, siguen mostrando una tendencia a la disminución, tanto para el promedio Trianual y Percentil 98 (Figura 34 y Figura 35, respectivamente). La línea negra indica el promedio de todas las estaciones de monitoreo, en tanto que el área de color rosado señala los valores máximos y mínimos alcanzados para todas las estaciones disponibles con monitoreo válido para el año o período trianual respectivo. En ambos casos la tendencia es hacia la disminución de concentración, donde el promedio Trianual presenta una disminución de $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por período.

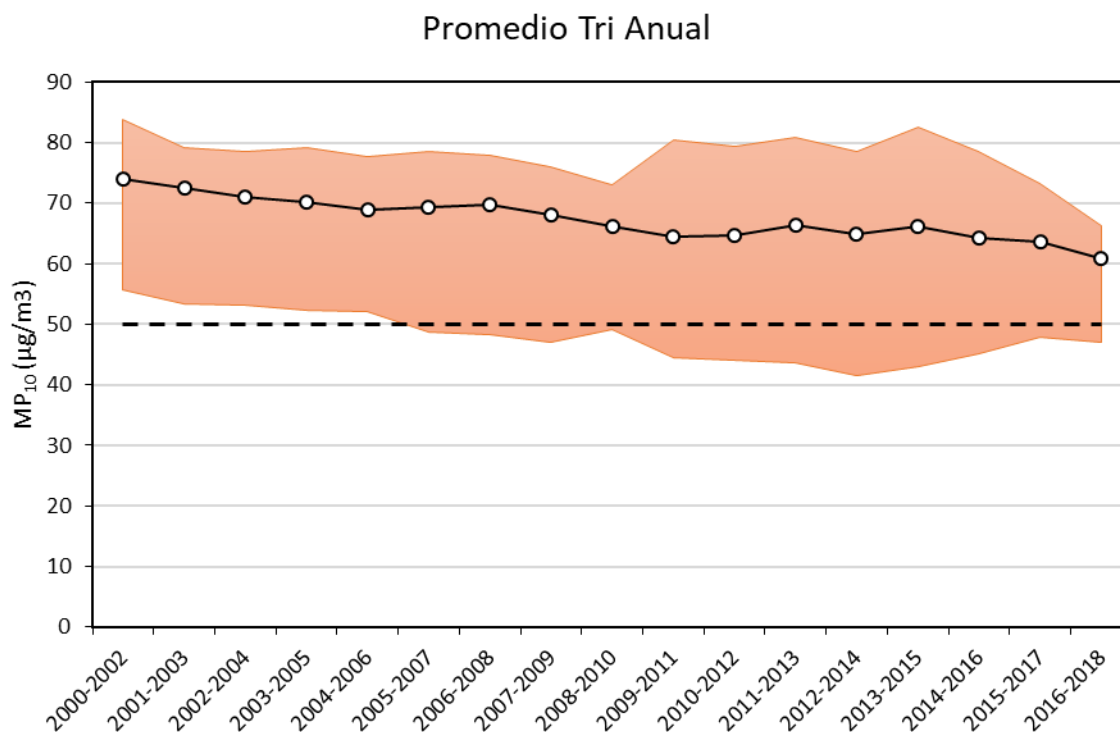


Figura 34: Evolución del promedio Trianual de MP_{10} en la Red MACAM. La línea negra indica el promedio de todas las estaciones de monitoreo, en tanto que el área de color anaranjado señala los valores máximos y mínimos alcanzados para todas las estaciones disponibles con monitoreo válido para el período trianual respectivo. Elaboración Propia.

Respecto de la norma diaria (o percentil 98), se ha constatado que a contar del año 2009 el promedio de todas las estaciones se ubica bajo el valor de la norma, pero mantiene su condición de Latencia, sin embargo, la concentración máxima aún se mantiene por sobre el valor de la norma. Además, en el año 2015, la concentración máxima anual presentó un incremento significativo. Este incremento se observó en varias estaciones, particularmente en Quilicura y Cerrillos, y con menor magnitud en Pudahuel, Parque O'Higgins, El Bosque y Puente Alto. Por otra parte, Independencia, Talagante han mostrado, desde el año 2010, una tendencia hacia el incremento en sus valores de P98.

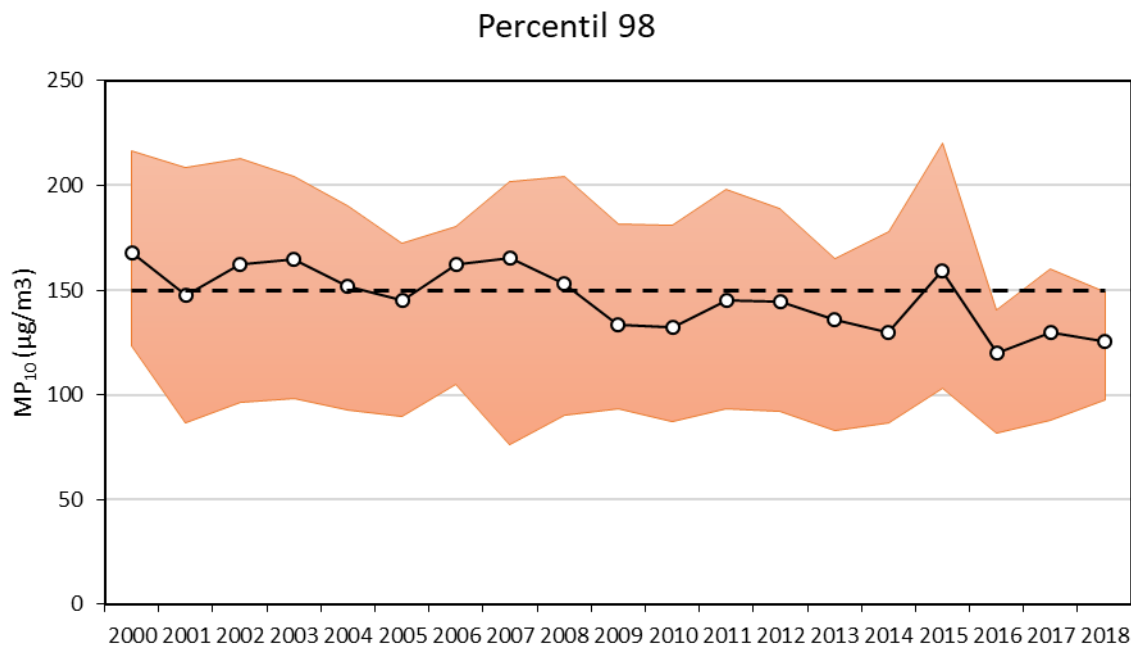


Figura 35: Evolución del promedio percentil 98 de MP_{10} en la Red MACAM. La línea negra indica el promedio de todas las estaciones de monitoreo, en tanto que el área de color anaranjado señala los valores máximos y mínimos alcanzados para todas las estaciones disponibles con monitoreo válido para el año respectivo. Elaboración Propia.

Respecto de $MP_{2,5}$, en la Figura 36 y Figura 37 se entrega la evolución del promedio trianual y el P98. Cabe mencionar que a contar desde el año 2012-2013, hubo un cambio de tecnología de medición desde TEOM a BAM, que generó diferencias entre los valores de concentración. Por lo anterior, los valores del año 2000-2012, registrados con tecnología TEOM, fueron ajustados a los valores que se deberían obtener en base al monitoreo BAM. El detalle de este análisis está detallado en el ANEXO I de este informe.

La tendencia del promedio Trianual de todas las estaciones es hacia la disminución con pendientes más pronunciadas que en el caso de MP_{10} . Esto se debe a que las medidas de los Planes de Descontaminación de MP_{10} siempre estuvieron focalizados en la fracción fina.

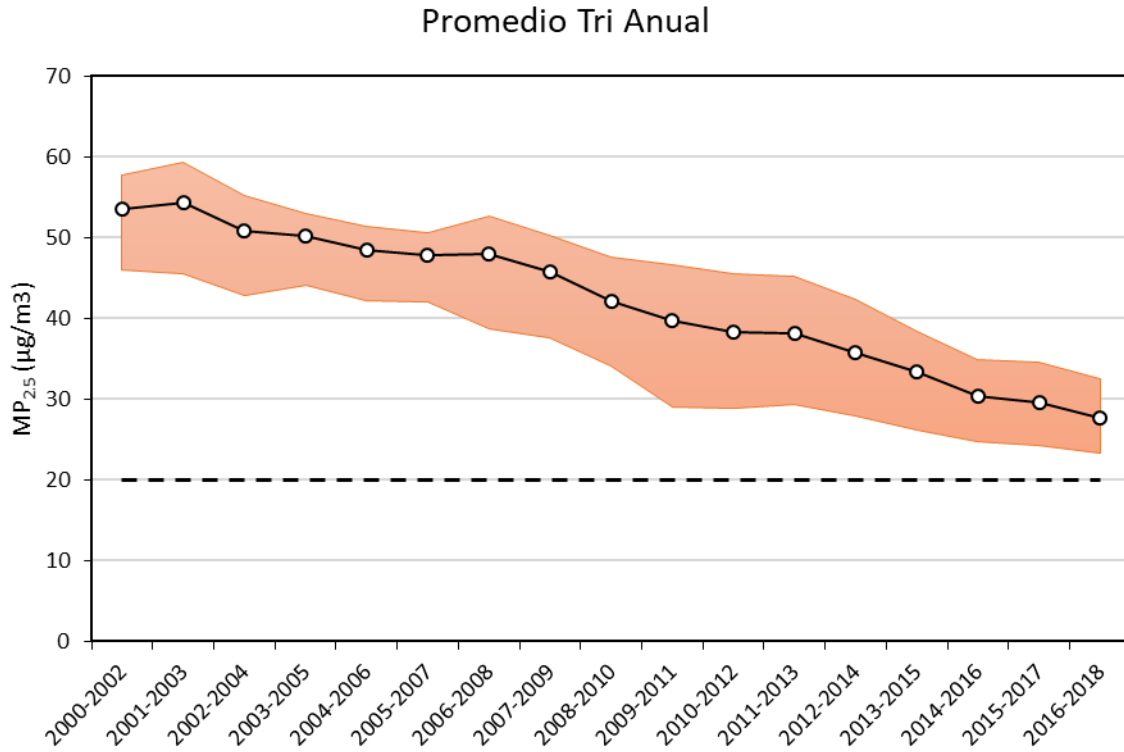


Figura 36: Evolución del promedio Trianual de $MP_{2,5}$ en la Red MACAM. La línea negra indica el promedio de todas las estaciones de monitoreo, en tanto que el área de color anaranjado señala los valores máximos y mínimos alcanzados para todas las estaciones disponibles con monitoreo válido para el período trianual respectivo. Elaboración Propia.

La tendencia del percentil 98 también muestra una disminución significativa del promedio de todas estaciones, a una razón de $4.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año.

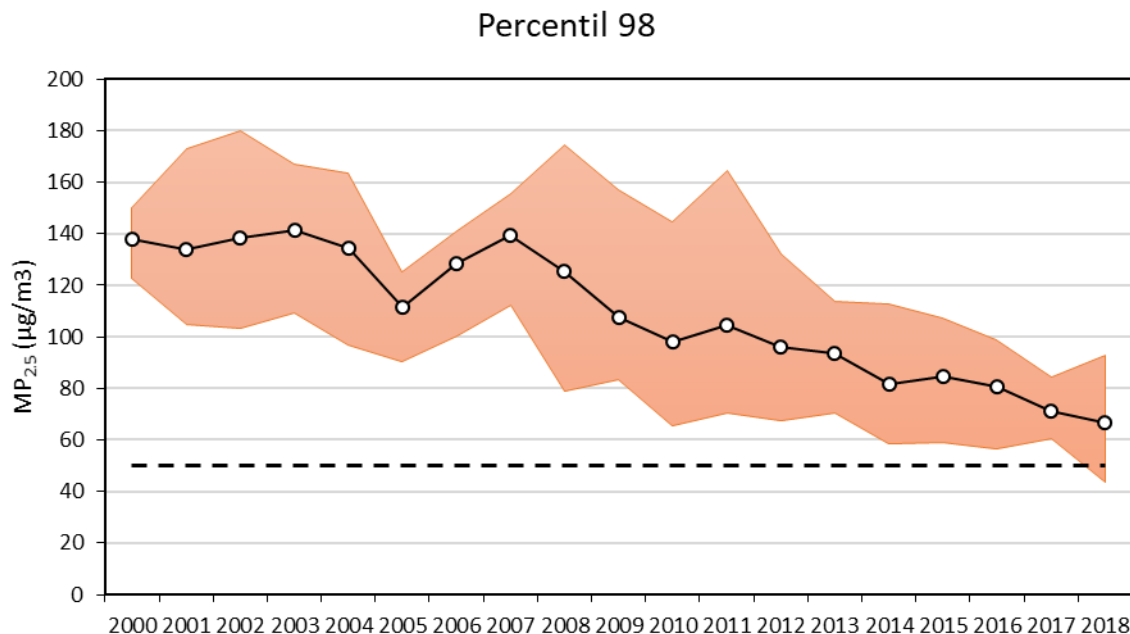


Figura 37: Evolución del promedio percentil 98 de $MP_{2,5}$ en la Red MACAM. La línea negra indica el promedio de todas las estaciones de monitoreo, en tanto que el área de color anaranjado señala los valores máximos y mínimos alcanzados para todas las estaciones disponibles con monitoreo válido para el año respectivo. Elaboración Propia.

Las tendencias de concentración de concentración de $MP_{2,5}$ y su composición elemental fueron evaluadas en base al estadístico denominado Factor de Impacto por Concentración (FIC), que estudia la relación que existe entre la concentración de $MP_{2,5}$ y los elementos con las variables meteorológicas y variables temporales, usando modelos de regresión lineal. La metodología implementada se basa en la identificación de factores específicos que influyen en las concentraciones de partículas y evalúan cuantitativamente su impacto relativo, normalizando la muestra para que los resultados de los factores de impacto se interpretan en términos de cuantas veces la concentración de un contaminante determinado ha aumentado o disminuido con respecto al nivel de referencia.

Las figuras siguientes entregan una visión resumida de los principales resultados de este análisis. Se observa una tendencia al crecimiento del $MP_{2,5}$ durante los últimos tres períodos, que no se puede explicar solo a partir del análisis de composición elemental, sino también del aumento de los precursores que generan un incremento de la fracción secundaria del $MP_{2,5}$.

El azufre (S) ha mostrado una reducción importante a lo largo de los años. La mayor parte del S elemental medido en la serie se encuentra como sulfato y por lo tanto obedece a la oxidación de los SO_x emitidos por la combustión de materia prima y combustibles que contienen S. La serie de composición de S en $MP_{2,5}$ comienza en el año 1998 y los mayores hitos se relacionan con la desulfuración del combustible en el 2000 (reducción a 1.000 ppm), en el 2004 (reducción a 50 ppm) y desde el 2011 (reducción a 15 ppm). El año 1999 el S en el $MP_{2,5}$ representaba casi un 8,5%, bajó hasta un 4.5% en 2004, mantenido relativamente estable hasta hoy. Después del año 2004, la medida más importante en este ámbito fue la implementación de programas de reducción de SO_x en los principales establecimientos emisores de la Región Metropolitana. El efecto de la crisis del

suministro del gas natural también se vio reflejada como impacto en la concentración $MP_{2,5}$, S y con menor extensión en Ti. Según el Plan, el aumento de S (azufre) a partir del año 2006 permite identificar los impactos asociados al recambio del sector industrial, cuya matriz energética pasó de ser principalmente a gas natural desde una combinación entre diésel y petróleos pesados.

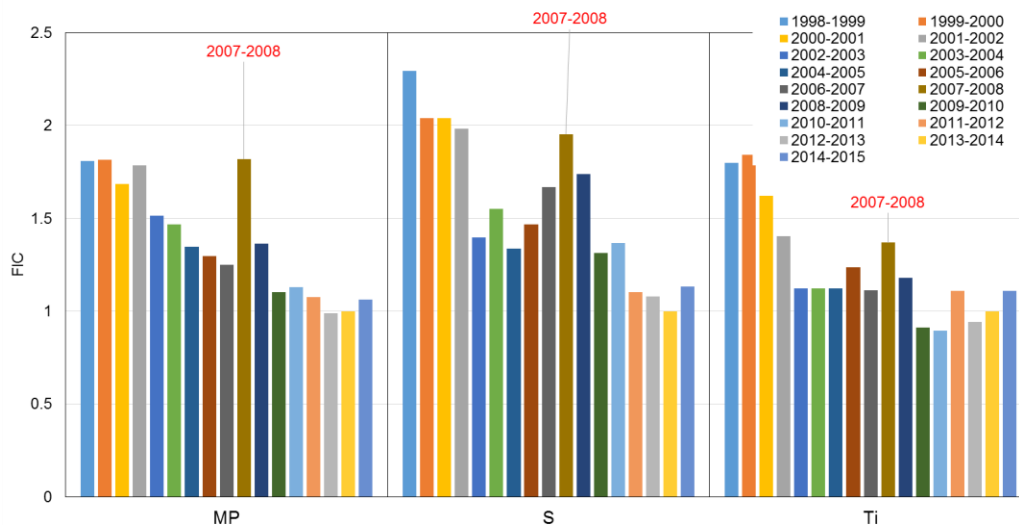


Figura 38: Coeficiente de impacto de Concentración de elementos de MP, S, Ti en el $MP_{2,5}$. El período 2014-2015 está incompleto debido a que la serie de filtros analizados llega hasta septiembre del 2014. Elaboración Propia.

De los elementos estudiados, el Pb y Br presentan una tendencia más clara a la disminución, como consecuencia la remoción en la gasolina de estos. Lo anterior ha determinado que ya no sean trazadores representativos de las emisiones del tráfico vehicular como se observó en los primeros períodos de medición. En efecto la tendencia entre Br y Pb no presenta la misma pendiente a contar del año 2003.

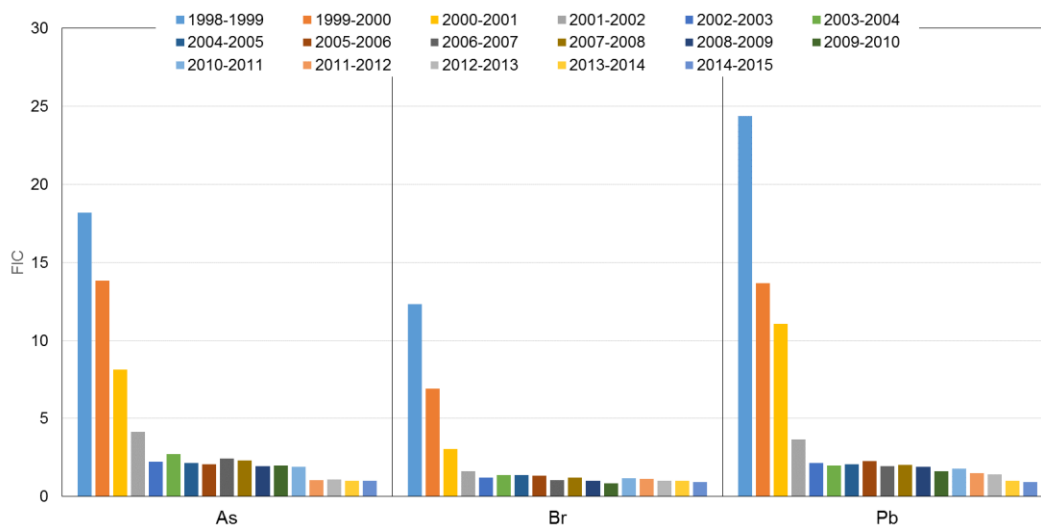


Figura 39: Coeficiente de impacto de Concentración de elementos de As, Br, Pb en el $MP_{2,5}$. El período 2014-2015 está incompleto debido a que la serie de filtros analizados llega hasta septiembre del 2014. Elaboración Propia.

El establecimiento de normas de emisión más estrictas (Euro I-Euro V, masificación del uso de convertidores catalíticos, filtros DPF en vehículos diésel) también ha llevado a que otros componentes de los vehículos se vean tecnológicamente mejorados, como los mecanismos de frenos, neumáticos, etc., lo que ha detonado que componentes de Cu, Zn y Cr vayan presentando menor impacto por concentración a través de los años, inclusive considerando que el parque vehicular presenta un incremento anual sobre el 5%. Respecto del aumento del año 2005-2006, (Barraza et al., 2017) argumentó que entre ambos años entraron en operación cuatro autopistas urbanas importantes, una de las cuales se encuentra muy cerca de la estación y por lo tanto aumentando el impacto de las emisiones vehiculares en torno a esa estación.

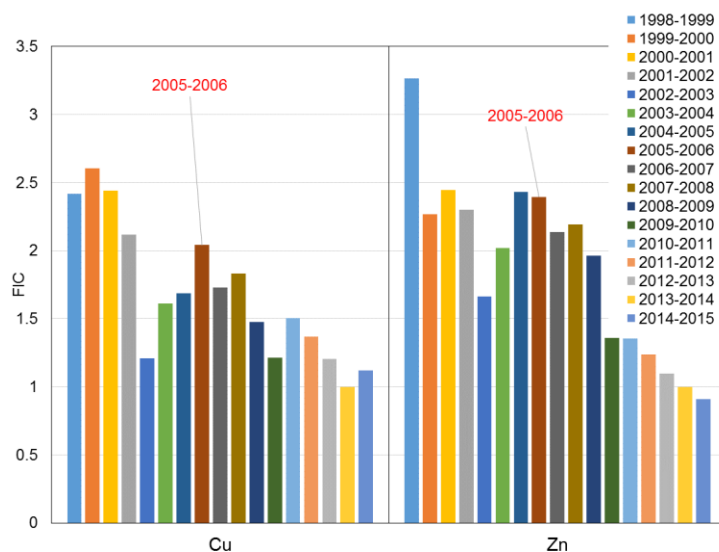


Figura 40: Coeficiente de impacto de Concentración de elementos de Cu, Zn en el $MP_{2.5}$. El período 2014-2015 está incompleto debido a que la serie de filtros analizados llega hasta septiembre del 2014. Elaboración Propia.

Históricamente se utilizó el análisis de factores por componentes principales para la interpretación de los resultados. Con la aplicación del modelo receptor, se consiguen factores que tienen un perfil característico, que es atribuible a una fuente, o un grupo de fuentes emisoras, con su respectiva contribución en el tiempo. Se han publicado varios estudios de tendencias en base a esta metodología, entre los que destacan.

1. Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A.M., Gallardo, L., 2017. Temporal evolution of main ambient $PM_{2.5}$ sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. Atmospheric Chemistry and Physics 17, 10093–10107. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10093-2017>

Este es el más reciente estudio (2017) que cuantifica las principales fuentes que han contribuido al $MP_{2.5}$, se analizaron filtros muestreados entre abril de 1998 y agosto de 2012 en Santiago Centro

usando dos diferentes modelos receptores (PMF 5.0 y UNMIX 6.0) aplicados sobre mediciones elementales provenientes de 1243 filtros con 24 horas de exposición, se analizó cómo cada fuente varió a través del tiempo, determinó cuánto contribuyó cada fuente al $MP_{2.5}$ total en Santiago y cuán efectiva fueron las políticas de regulación implementadas a lo largo del período. Para este estudio no se encuentran disponibles datos de carbono orgánico (OC), carbono elemental (EC) y aerosoles orgánicos secundarios (SOA).

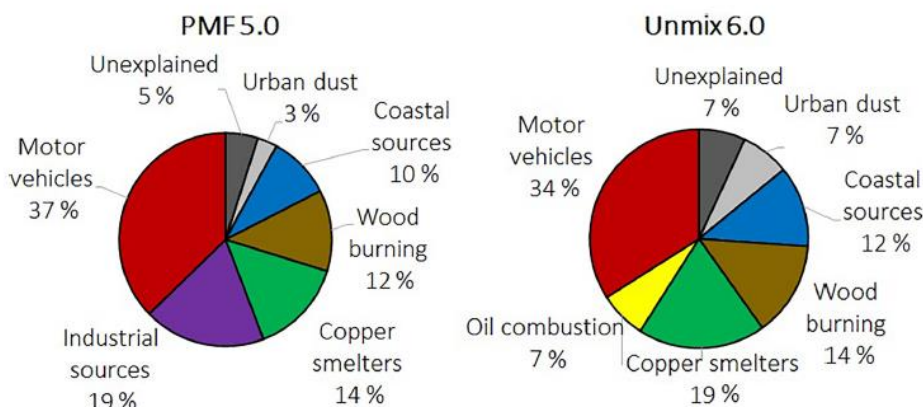


Figura 41. Contribución de fuentes al $MP_{2.5}$ en Santiago, Chile, para el período 1998-2012 usando dos modelos diferentes. El promedio de $MP_{2.5}$ sobre 15 años fue de $24.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Barraza et al, 2017.

Ambos modelos resolvieron 6 fuentes de contribución principales para $MP_{2.5}$ (Vehicular, Industrial, refinерías de cobre, quema de biomasa, aerosol marino y polvo resuspendido).

Durante los 15 años analizados se han implementado varias medidas en regulaciones de calidad de aire por las autoridades regionales con el propósito de reducir los niveles de partículas en Santiago. La principal diferencia entre los resultados de PMF y UNMIX fue que UNMIX identificó la combustión de petróleo como una fuente única, dominada un 85% por la presencia de Ni, similar a lo encontrado por Artaxo (1998). La Tabla 11 resume los principales cambios en cada fuente de contribución y su correspondiente regulación en calidad de aire u otros eventos que causaron estos cambios.

Tabla 11. Cambios significativos en las fuentes de $MP_{2.5}$ en el contexto de mejoramiento de medidas de calidad de aire de Santiago. Barraza et al, 2017.

Fuente	Fecha	Impacto sobre la Fuente	Explicación y comentarios
Vehicular	2002	Reducción de $1.53 \mu\text{g m}^{-3}$ (15.59%)	Mejora en la calidad del combustible. Plomo eliminado de la gasolina
Vehicular	2005 y 2006	Incremento de $1.60 \mu\text{g m}^{-3}$ (18.92%)	Construcciones de carreteras urbanas
Vehicular	2007	Incremento de $1.34 \mu\text{g m}^{-3}$ (13.42%)	Incremento en número de vehículos motorizados privados debido a la pobre implementación del Transantiago
Vehicular	2008 - 2010	Reducción de $5.69 \mu\text{g m}^{-3}$ (43.97%)	Mejoras al Transantiago
industrial	2002	Reducción de $2.52 \mu\text{g m}^{-3}$ (34.33%)	Reducción del contenido de azufre en el combustible Diesel en 2001

Fuente	Fecha	Impacto sobre la Fuente	Explicación y comentarios
industrial	2005 -2007	Incremento de 1.86 $\mu\text{g m}^{-3}$ (45.04%)	Reducción en la importación de gas natural argentino.
industrial	2009 -2010	Reducción de 1.76 $\mu\text{g m}^{-3}$ (31.17%)	Apertura del terminal marino de Quintero para introducir GLN.
Refinería de Cobre	1998 - 2002	Reducción de 4.13 $\mu\text{g m}^{-3}$ (69.04%)	Implementación de tecnologías de abatimiento de emisiones en refinería Caletones.
Refinería de Cobre	2010 -2011	Reducción de 1.41 $\mu\text{g m}^{-3}$ (64.66%)	Reducción de emisiones de SO_2 y MP en las refinerías de Caletones y Ventanas.
Quema de Biomasa	2007 - 2008	Incremento de 1.16 $\mu\text{g m}^{-3}$ (43.39%)	Desconocido
Quema de Biomasa	2009 -2010	Reducción de 0.55 $\mu\text{g m}^{-3}$ (16.98%)	Desconocido
Marina	2002 - 2005	Reducción de 1.62 $\mu\text{g m}^{-3}$ (77.46%)	Reducción del contenido sulfúrico en Diesel
Marina	Desde 2010	Reducción de 1.05 $\mu\text{g m}^{-3}$ (76.17%)	Apertura del terminal marino Quintero para introducir GLN.
Polvo resuspendido	2001 - 2002	Reducción de 0.42 $\mu\text{g m}^{-3}$ (48.84%)	Introducción de la gasolina libre de plomo.
Polvo resuspendido	Desde 2004	Incremento de 0.67 $\mu\text{g m}^{-3}$ (45.04/171.78%)	Incremento en el número de vehículos motorizados (tasa de crecimiento anual: 4%)
Polvo resuspendido	Desde 2011	Incremento de 0.48 $\mu\text{g m}^{-3}$ (51.61%)	Incremento en el número de vehículos motorizados (tasa de crecimiento anual: 7%), sequía extendida desde 2010.

2. Jorquera, H., Barraza, F., 2012. Source apportionment of ambient PM_{2.5} in Santiago, Chile: 1999 and 2004 results. *Science of The Total Environment* 435–436, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.049>

Este estudio publicado en 2012 consistió en aplicar un modelo receptor, específicamente el PMF 3.0, a muestras de $MP_{2.5}$ tomadas en dos campañas llevadas a cabo en 1999 y 2004, y comparar sus resultados.

Para ambas campañas se encontraron 6 fuentes de contribución, y sus contribuciones 1999/2004 son: Vehicular: $28 \pm 2.5 / 31.2 \pm 3.4\%$, quema de biomasa $24.8 \pm 2.3 / 28.9 \pm 3.3\%$, sulfatos: $18.8 \pm 1.7 / 16.2 \pm 2.5\%$, aerosol marino: $13 \pm 2.1 / 9.9 \pm 1.5\%$, refinerías de cobre: $11.5 \pm 1.4 / 9.7 \pm 3.3\%$ y polvo resuspendido: $3.9 \pm 1.5 / 4.0 \pm 2.4\%$. Por otra parte, la variación en concentración de material particulado fino entre los años de estudio disminuyó de 34.2 a 25.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ entre 1999 y 2004.

La contribución de fuentes encontradas se presenta gráficamente en la figura siguiente:

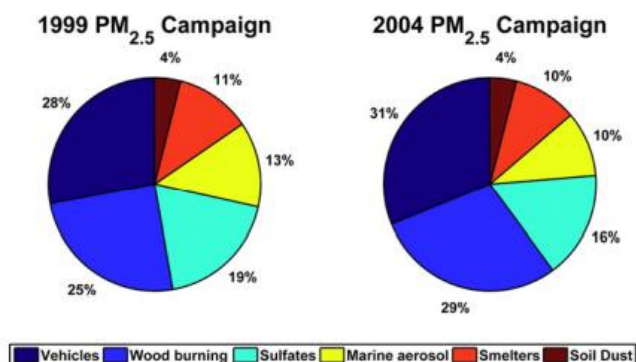


Figura 42. Fuentes de contribución encontradas para las campañas de monitoreo de 1999 y 2004. Fuente: Jorquera y Barraza, 2012.

La Tabla 12 resume las contribuciones al MP_{2,5} para seis fuentes identificadas en la campaña de 1999, los valores fueron obtenidos usando una regresión lineal múltiple donde los 6 factores explican un 86% de la varianza observada, medida por el $MP_{2.5}$ observado versus el modelado. Para correr el modelo se consideraron trazas de 15 elementos. La fuente asociada a quema de biomasa se caracteriza por la presencia de las trazas de Potasio principalmente, luego la fuente asociada a fundiciones de cobre se caracteriza por la presencia de azufre, los sulfatos secundarios presentan presencia de azufre y potasio, la fuente asociada a polvo resuspendido presenta trazas de silicio, hierro, aluminio y calcio, el aerosol marino se asocia a la presencia de azufre, silicio, potasio y cloro, y finalmente la fuente vehicular se asocia a la presencia de azufre, hierro, silicio y calcio. La traza de azufre está presente en alta concentración en 5 de las 6 fuentes obtenidas.

Tabla 12. Perfiles de fuente encontrados para una solución de 6 factores en [ng/m³] para los datos de 1999. Fuente: Jorquera y Barraza, 2012.

Species	Wood burning	Copper smelters	Secondary sulfates	Soil dust	Marine aerosol	Motor vehicles
BC	2022	118	583	292	589	2149
Al	2.5	16.7	7.6	165.1	28.1	29.8
Si	0.2	40.3	12.0	405.2	61.8	96.3
S	21.3	466	712	5.2	179	254
Cl	8.0	2.6	5.8	3.7	22.3	0.0
K	53.7	7.1	27.2	30.9	52.2	12.3
Ca	0.0	10.7	0.0	135.8	31.1	48.9
Ti	1.2	2.1	1.7	17.7	3.1	6.2
Mn	1.1	0.0	0.3	4.1	0.4	7.2
Fe	26.2	21.2	12.5	191.7	35.9	108
Cu	1.0	4.3	2.8	3.9	6.8	9.0
Zn	3.5	2.4	2.2	2.5	11.0	19.5
As	0.1	22.7	2.2	1.0	1.1	1.3
Br	8.2	0.4	1.6	0.0	3.0	3.1
Pb	35.2	2.0	0.7	0.2	6.7	33.9

En la Tabla 13 se presentan los resultados de las fuentes de contribución resumidas y su aporte a la concentración de $MP_{2.5}$. Se observa que la fuente de contribución vehicular es la que presenta la mayor concentración de aporte, seguido por la quema de biomasa y sulfatos.

Tabla 13. Resultados de Fuentes de contribución para la campaña de 1999. Fuente: Jorquera y Barraza, 2012.

Source	Coefficient [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Std. dev. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Vehicles	10.58	0.95
Wood burning	9.39	0.85
Sulfates	7.11	0.65
Marine aerosol	4.93	0.79
Smelters	4.35	0.52
Dust	1.50	0.57

La Tabla 14 resume las contribuciones al $MP_{2.5}$ para seis fuentes identificadas en la campaña del 2004. Para correr el modelo se consideraron trazas de 15 elementos al igual que el análisis de 1999. La fuente asociada a emisiones vehiculares se encuentra dominada por la presencia de las trazas de Hierro, zinc, calcio y plomo. La fuente de aerosol marino cuenta con la presencia de Azufre, cloro y potasio, la fuente proveniente de las refinerías de cobre se caracteriza por las trazas de azufre principalmente, la fuente de polvo resuspendido está dominada por la presencia de silicio, hierro, potasio y calcio, y finalmente la quema de biomasa está caracterizada por la presencia de potasio y silicio. Es posible ver que la traza de azufre desapareció de las principales fuentes de contribución y solo se encuentra como traza producto de la refinería de cobre. Este resultado se correlaciona con las medidas de eliminación del azufre de combustibles Diesel.

Tabla 14. Perfil de fuentes [ng/m^3] para la solución de 6 factores, datos del 2004. Fuente: Jorquera y Barraza, 2012.

Species	Motor vehicles	Marine aerosol	Copper smelters	Soil dust	Secondary sulfates	Wood burning
Si	0.0	0.0	1.2	146.3	15.0	29.4
P	2.1	0.0	7.4	0.9	27.5	0.6
S	0.0	41.6	181.3	0.0	726.8	0.0
Cl	1.3	28.7	0.0	1.3	0.0	0.0
K	0.0	14.5	0.0	60.6	14.7	153.0
Ca	17.9	0.0	1.7	58.4	5.4	7.3
Ti	1.5	0.1	0.0	6.0	0.7	1.2
Cr	1.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
Mn	7.6	0.0	0.0	3.9	0.1	0.0
Fe	106.8	2.6	7.8	103.2	8.1	13.2
Zn	34.5	0.0	0.0	6.0	4.3	0.0
As	0.1	0.0	9.6	0.0	0.0	0.0
Br	5.2	0.9	0.3	0.0	0.0	3.8
Ba	4.6	0.1	0.3	2.1	0.0	0.3
Pb	11.5	0.6	2.1	1.4	1.3	1.3

Finalmente, la Tabla 15 presenta los resultados de la concentración portada por cada fuente al $MP_{2.5}$ donde se observa que la fuente vehicular sigue siendo el principal aporte en concentración, seguido de quema de biomasa y sulfatos.

Tabla 15. Resultados de Fuentes de contribución para la campaña del 2004. Fuente: Jorquera y Barraza, 2012.

Source	Coefficient [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Std. dev. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Vehicles	9.99	1.07
Wood burning	9.27	1.04
Sulfates	5.20	0.80
Marine aerosol	3.18	0.47
Smelters	3.12	1.06
Dust	1.29	0.76

La Figura 43 presenta una comparación gráfica que evidencia la clara disminución del aporte de concentración de las 5 fuentes encontradas al $MP_{2.5}$ para la época julio a noviembre, principalmente invernal. La mayor diferencia y disminución se observa en la fuente de quema de biomasa y emisiones vehiculares.

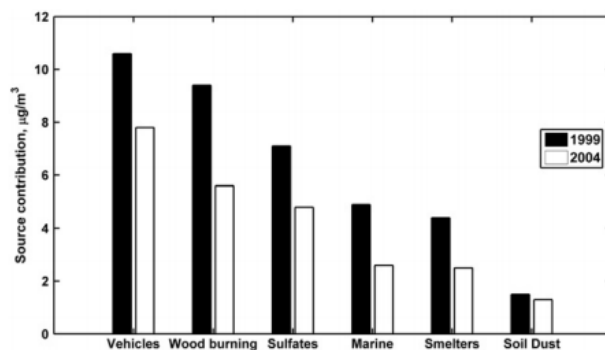


Figura 43. Comparación de las fuentes de contribución Julio-Noviembre en [$\mu\text{g m}^{-3}$] para las campañas de 1999 y 2004.

- Rojas, C.M., Artaxo, P., Van Grieken, R., 1990. Aerosols in Santiago de Chile: A study using receptor modeling with X-ray fluorescence and single particle analysis. Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 24, 227–241. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(90\)90028-S](https://doi.org/10.1016/0957-1272(90)90028-S)

Este estudio presenta los resultados de aplicación de un modelo receptor, específicamente Factores Principales Absolutos (PFA) sobre filtros de material particulado fino y grueso colectados entre enero y febrero de 1987, en la Universidad de Santiago de Chile con un muestreador dicotómico. En el análisis de XRF fue posible encontrar hasta 17 elementos traza. El data set de estudio consistió en concentraciones elementales y variables meteorológicas y permitieron la identificación de seis fuentes de contribución al material particulado fino (suelo, industrial, vehicular, combustibles, partículas sulfatadas y quema de biomasa) y cinco fuentes para el modo grueso (suelo, industrial, vehicular, combustible y partículas sulfatadas). La regresión sobre las concentraciones de masa elemental permitió la estimación de la diferente contribución de las fuentes a los aerosoles de Santiago. En ambas fracciones la solución encontrada por PFA indica que el plomo aparece asociado con las emisiones vehiculares y actividades metalúrgicas.

Los perfiles de las fuentes encontradas para el modo fino y grueso presentan similar composición.

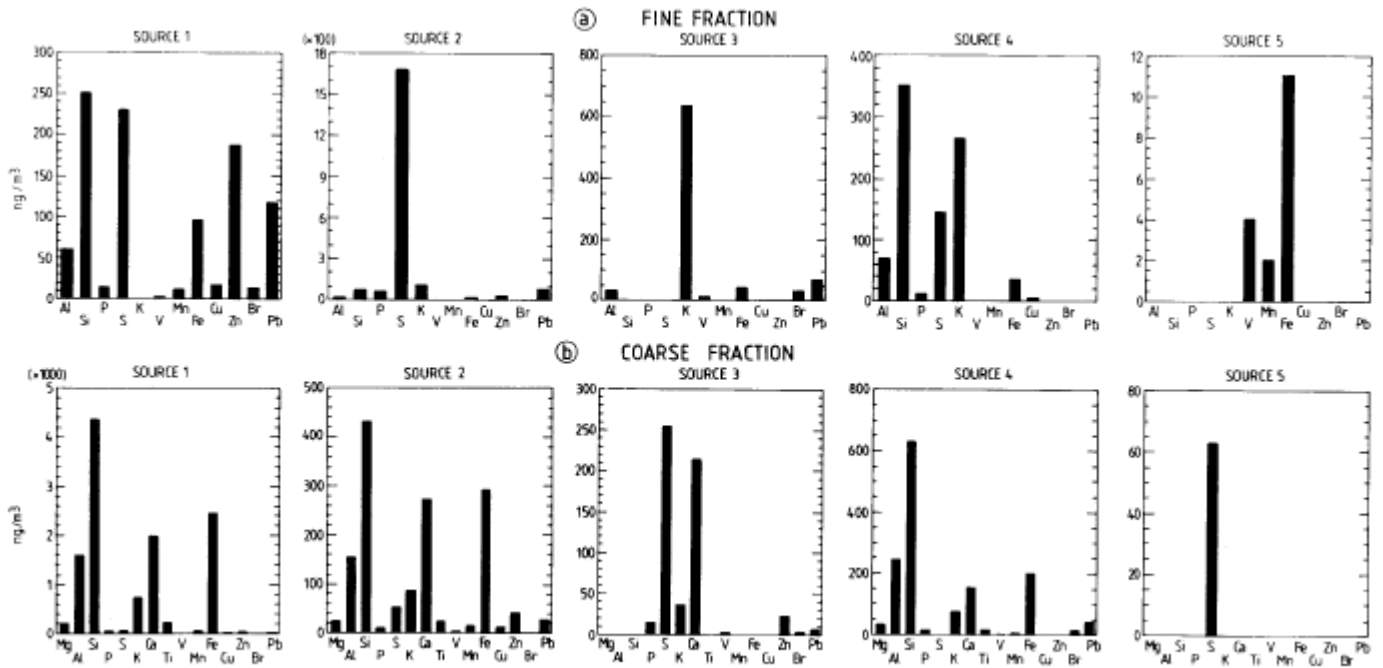


Fig. 2. Fine (a) and coarse (b) aerosol fraction source composition affecting the monitoring site. The ordinate axis represents concentration in ng/m^3 , while the abscissa axis contains the different elements detected.

Figura 44. Composición de fuentes para aerosoles finos (a) y gruesos (b) que afectan al sitio de monitoreo. La ordenada indica los niveles de concentración en $[\text{ng}/\text{m}^3]$ mientras que la abscisa presenta los elementos detectados. Fuente: Rojas et al, 1990.

Finalmente en la Tabla 16 y Tabla 17 se presentan los aportes porcentuales de las fuentes encontradas por el método Factores Principales Absolutos, para las cinco fuentes de cada fracción. Se observa que en ambas fracciones las fuentes se presentan mezcladas, y que para el modo grueso el polvo resuspendido seguido de los sulfatos es la fuente que se encuentra mayoritariamente como aporte.

Tabla 16. Aporte de fuentes al Material Particulado Fino $MP_{2.5}$, encontrados con el método Factores Principales Absolutos. Fuente: Rojas et al, 1990

Fuente	Aporte
Partículas Sulfatadas	49%
Quema de Biomasa/Emisiones Vehiculares	26%
Quema de Combustible	13%
Polvo resuspendido/metalúrgica	6.4%
Polvo Resuspendido/Quema de Biomasa	5.6%

Tabla 17. Aporte de fuentes al Material Particulado Grueso $MP_{2.5-10}$, encontrados con el método Factores Principales Absolutos. Fuente: Rojas et al, 1990

Fuente	Aporte
Polvo Resuspendido	74%
Polvo Resuspendido/Industrial	12.8%
Sulfatos	9%
Polvo resuspendido/Emisiones Vehiculares	4%
Sulfatos Secundarios	0.2%

- Sax, S.N., Koutrakis, P., Rudolph, P.A.R., Cereceda-Balic, F., Gramsch, E., Oyola, P., 2007. Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. *Journal of the Air & Waste Management Association* 57, 845–855. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.7.845>

La aplicación de este modelo receptor en el período 1998-2007 permitieron discernir cinco fuentes: suelo, motores vehiculares, aceites residuales, aerosol marino y sulfatos secundarios tal como se observa en la Tabla 18.

Tabla 18: Ponderación promedio de las cargas de $MP_{2,5}$ (1998-2006) para los estimada por medio de análisis de factores.
Fuente: Sax et al, 2007.

Element	$PM_{2,5}$				
	Soil	Motor Vehicles	Residual Oil	Sulfates	Marine Aerosols
Al	0.9763	0.0097	-0.0707	-0.03806	-0.0014
As	0.1701	0.2354	0.0157	0.54901	
Ba	0.0839	0.0304	0.053	-0.03502	
Br	-0.031	0.8283	0.0172	0.02263	0.030439
Ca	0.7362	0.0632	0.1724	-0.00701	0.119266
Cl	-0.0069	0.3923	0.0869	-0.19173	0.253382
Cu	0.103	0.0701	0.4489	0.08408	-0.17211
Fe	0.4636	0.1123	0.4352	0.01354	0.039583
K	0.3023	0.4422	-0.0434	0.16289	0.216127
Mn	0.0789	0.0299	0.8065	-0.02844	0.191805
Na	0.0311	0.0621	0.0438		0.904273
P	0.0181	-0.0211	0.0669	0.97644	
Pb	0.0818	0.4353	0.2481	0.02911	-0.19394
S	-0.0338	0.0887	0.0111	0.93597	-0.05768
Se	-0.174	0.193	-0.022	0.39997	
Si	0.9293	-0.0196	0.0499	0.01175	0.006237
Sn	0.0949	-0.1073	-0.0564		
Ti	0.7458	0.0014	0.1863	0.01372	
Zn	0.0489	0.0686	0.4427	0.09136	-0.01562
Average loading (%)	24.6	12.3	13.6	13.6	

El factor “suelo” corresponde a aproximadamente el 24.6% del $MP_{2,5}$, sin embargo como puede verse en la Figura 45, existe un aporte mínimo durante el año 2002 producto de concentración de lluvias dos veces por sobre lo usualmente reportado en la RM (551.9 mm de mayo a julio). El crecimiento del aporte de este factor entre los años 2003-2007 (17.8% anual) se puede deber a dos razones, una es el crecimiento del parque vehicular que aporta como polvo resuspendido y la segunda es el incremento de las emisiones provenientes de fuentes de construcción, acorde a como es observado en la Figura 47. Este factor también obedece a la introducción de vehículos catalíticos en la Región Metropolitana.

El factor aceite residual explica aproximadamente el 14% de la variabilidad del $MP_{2,5}$, e incluye lubricantes y diésel de motores. El comportamiento de este factor obedece a la introducción de tecnologías más limpias y normas de composición del diésel y la gasolina en Santiago.

La fuente de “sulfatos” explican entre un 15 a 20%, mostrando un comportamiento estacional durante el año. Las emisiones de SO_2 se encuentran en este factor, esto es la combustión de diésel en los motores vehiculares, generadores y otros tipos de motores. También son importantes tres refinerías cercanas a Santiago.

Los aerosoles marinos se agrupan en un último factor y pueden ser identificados debido a la estacionalidad que presentan y su alta ponderación en Cl y Na. El incremento en la velocidad del viento durante verano hace que las masas de aire de la costa tengan mayor facilidad para alcanzar la Región Metropolitana de Santiago.

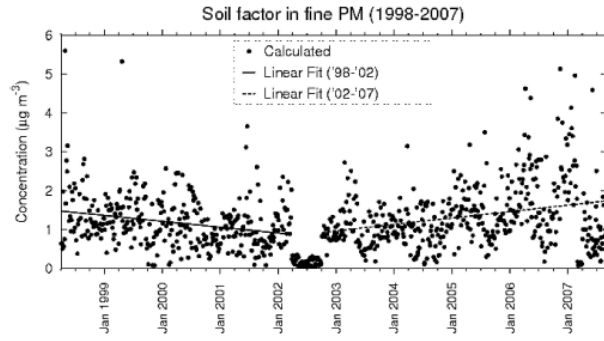


Figura 45: Contribución absoluta de la fuente suelo en el $MP_{2.5}$. Las líneas muestran las tendencias por mínimos cuadrados.

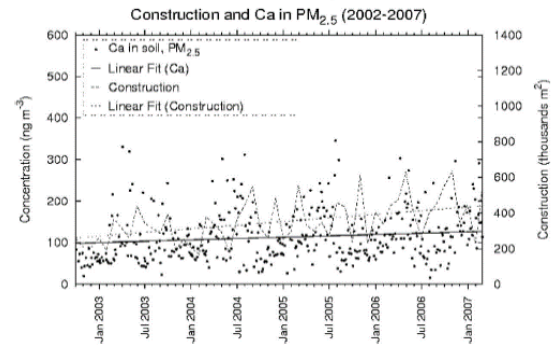


Figura 46: Concentración de Ca y actividad de construcción (m^2) en Santiago desde 2002 a 2006.

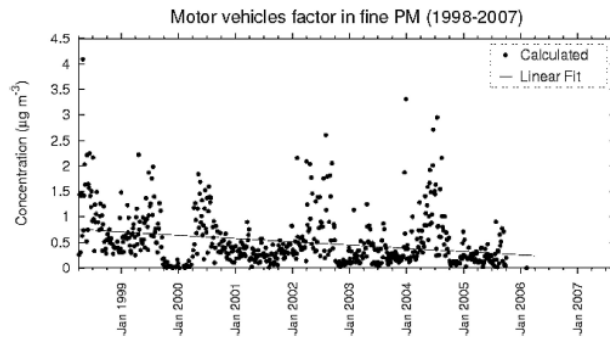


Figura 47: Contribución absoluta de la fuente motor de vehículos en la fracción de $MP_{2.5}$.

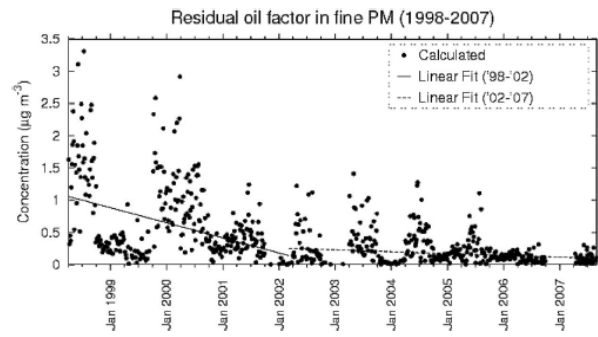


Figura 48: Contribución absoluta de la fuente aceites residuales en la fracción de $MP_{2.5}$.

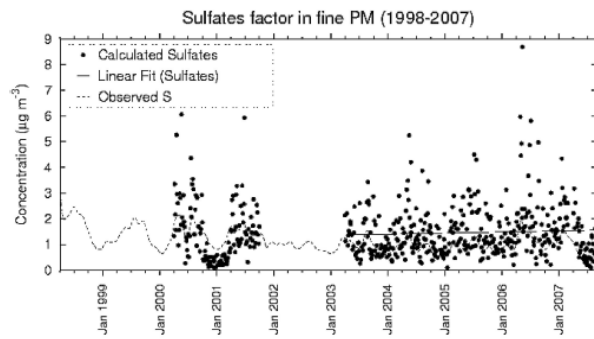


Figura 49: Contribución absoluta de la fuente Sulfatos en la fracción de $MP_{2.5}$.

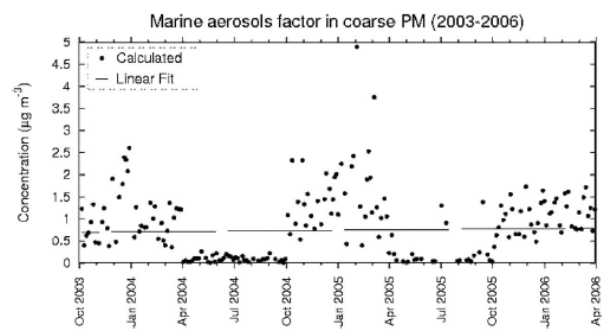


Figura 50: Contribución absoluta de la fuente Aerosoles marinos en la fracción de $MP_{2.5}$.

Adicionalmente, existe información que permiten establecer tendencias de concentración de composición química para la RM. Históricamente se ha encontrado que tanto los aerosoles orgánicos como el nitrato de amonio deben ser las principales prioridades de las medidas de descontaminación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica del $MP_{2.5}$ (PPDA $MP_{2.5}$). Particularmente, el Carbono Orgánico representa uno de los mayores desafíos ya que, este grupo aporta cerca del 60% de la masa del $MP_{2.5}$ y está relacionado tanto con emisiones primarias como secundarias de compuestos orgánicos.

La Figura 51 presenta la tendencia creciente de la relación Carbono Orgánico/Carbono Elemental (OC/EC), lo cual indica que con el transcurso de los años, la Región Metropolitana ha experimentado una modificación importante, tanto en términos de sus fuentes emisoras (de industria a transporte), como de su composición química (de S a OC/EC).

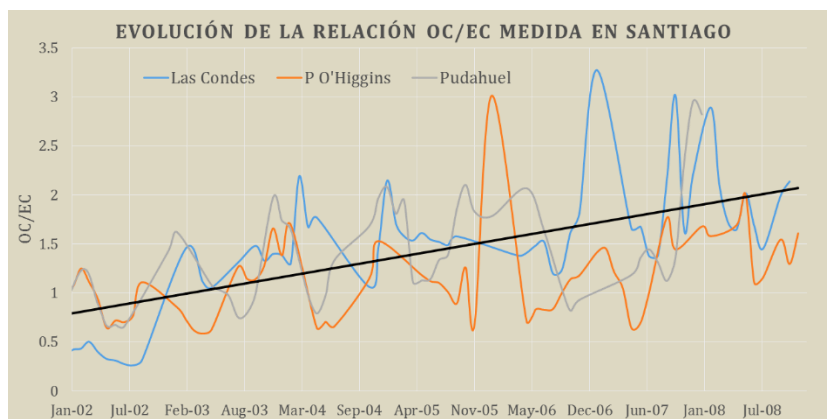


Figura 51: Tendencia de aumento de la participación de componentes orgánicos en el $MP_{2,5}$. Elaboración propia.

Se ha encontrado que gran parte del $MP_{2,5}$ de la RM es de naturaleza secundaria. Por ende, los procesos fotoquímicos en la atmósfera toman un rol decisivo en la formación de las partículas finas, y por lo tanto la participación gases precursores son los que determinan la composición química del $MP_{2,5}$. En la Región Metropolitana, los gases precursores más importantes son los COVs, NOx y el NH_3 . Así, la identificación de las fuentes emisoras de estos gases serán claves para poder, en forma exitosa, reducir la concentración del $MP_{2,5}$.

Dado el rol de la actividad fotoquímica de la atmósfera en la formación del $MP_{2,5}$ hace que la relación emisión-concentración de partículas en la atmósfera en ningún caso puede ser lineal. Esta es la principal dificultad en la identificación de responsabilidades de fuentes emisoras, ya que existe una dinámica compleja de reacciones fotoquímicas en la atmosférica que se debe entender y conocer con certeza antes de establecer políticas y medidas de control. Para conseguir aquello, es necesario contar con una apropiada base de información sobre la composición química de las emisiones y conocer la dinámica de estas en la atmósfera, solo así se puede disponer de fundamentos para la dictación de políticas necesarias para cumplir con los objetivos del Plan.

Implementar metodologías de control y aseguramiento de la calidad de las muestras y análisis para la estación Parque O'Higgins.

Tanto la metodología de análisis químico y estadístico utilizada en este informe ha sido la misma de los informes anteriores, los cuales han generado múltiples publicaciones en revistas científicas indexadas, lo que garantiza la solidez de los resultados que aquí se entregan. Ante la inexistencia de laboratorios de referencia nacionales, los análisis químicos de las muestras provenientes de los instrumentos dicotómicos fueron realizados en la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Harvard (Harvard T.H Chan), mediante fluorescencia de rayos X.

El equipo de análisis XRF utilizado corresponde a Epsilon5 XRF Spectrometer (Holanda) de la empresa PANalytical. El principio de análisis consiste en irradiar las muestras de MP colectadas en los filtros con rayos X. Los fotones emitidos por las muestras se integran en el tiempo y entregan una medición cuantitativa de un rango de elementos que va desde el Na hasta el Pb³. El espectro de cuentas de rayos X vs energía de fotones irradiada muestra múltiples peaks que corresponden a cada elemento, y el área de cada uno de los peaks es proporcional a la concentración elemental.

6-8 filtros/mes de Parque O'Higgins fueron seleccionados para análisis químico lo que permite obtener resultados de 81 elementos químicos, entre los que se incluyen los de mayor relevancia (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, W, Au, Hg, Tl, Pb). Como criterio general, se seleccionaron 1 muestra cada 2 días, sin embargo, durante los meses de invierno se privilegiaron el análisis de los filtros de los días episodios.

En adición a los procedimientos de calidad que posee el propio laboratorio, se incluyó el análisis de filtros blancos de transporte, para controlar la trazabilidad del análisis.

Los resultados de los análisis por metodologías XRF entregan datos de concentraciones de elementos de la tabla periódica, con su respectivo valor de incertidumbre. Solo se consideraron válidas las muestras cuya concentración sea al menos 3 veces su incertidumbre.

Para cada período de monitoreo (frío-cálido, explicados más adelante en este texto) solo se consideraron válidas aquellas series de datos de composición elemental que acumule al menos el 70% de las muestras válidas (Concentración ≥ 3 veces StdDev).

³ Esta técnica permite obtener resultados de 81 elementos químicos, entre los que se incluyen los de mayor relevancia (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, W, Au, Hg, Tl, Pb).

Metodología de Selección de Filtros Utilizada para asegurar la calidad y representatividad de los resultados.

Como se estableció en la propuesta técnica, durante los primeros días de vigencia del contrato se realizó una solicitud de filtros seleccionados por el MMA para ser analizados. Se solicitó la totalidad de los filtros disponibles comprendidos entre 2014 y 2018 de los cuales se seleccionó un número representativo de filtros por año, por mes y día de la semana para generar una muestra estadística válida para los análisis cuantitativos como los modelos receptores.

El ministerio de Medio Ambiente dispuso del total de 1.118 filtros de material particulado fino y grueso con la frecuencia de monitoreo día por medio en invierno y cada dos días en verano.

Frecuencia de monitoreo 1 cada dos días						
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4

Frecuencia de monitoreo 1 día por medio						
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4

	Día analizado por XRF
	Día con filtro disponible

Figura 52. Criterio de Selección de filtros de $MP_{2,5}$ y $MP_{2,5-10}$ analizados por XRF. Elaboración propia.

Una vez realizada la selección de filtros según los criterios de la Figura 52 se procedió a incluir aquellos filtros muestreados en días de episodio constatado. Esta información fue obtenida formalmente desde el Ministerio de Medio Ambiente.

En el "ANEXO II: Filtros Solicitados al Ministerio de Medio Ambiente. se presenta la totalidad de los filtros entregados por el Ministerio de Medio Ambiente, y los finalmente seleccionados en formato gráfico de calendario. De la totalidad de filtros recibidos se mandaron a analizar 6 filtros blancos y 678 muestreados. De los 678 filtros 313 corresponden a Material Particulado Grueso y 365 a Material Particulado Fino.

A continuación, se entrega una tabla de detalles de filtros por fracción y por día. Para el año 2014 se tiene un menor número de filtros para analizar debido a que solo se disponen de filtros a partir del mes de septiembre a diciembre, con frecuencia de 1 muestra cada 2 días.

Tabla 19. Filtros enviados a analizar por año. Elaboración propia.

Año	MP _{2,5}	MP _{2,5-10}	Total
2014	24	16	38
2015	89	79	168
2016	89	71	160
2017	85	68	153
2018	81	69	150
Total	368	303	671

Para asegurar una validez estadística de filtros por día de la semana se presenta la siguiente tabla que indica los números de días nominales de la semana enviados a analizar, esta selección de días se realizó manteniendo la premisa de mantener una equidad entre los días de la semana a analizar.

Tabla 20. Detalle de los días muestreados enviados a analizar para la fracción fina. Elaboración propia.

Año	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Total
2014	4	3	3	3	4	4	3	24
2015	13	13	12	13	15	14	9	89
2016	12	11	12	13	17	14	10	89
2017	10	12	16	12	11	12	12	85
2018	11	11	12	12	11	16	8	81
Total	50	50	55	53	58	60	42	368

Tabla 21. Detalle de los días muestreados enviados a analizar para la fracción gruesa. Elaboración propia.

Año	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Total
2014	2	0	1	2	4	4	3	16
2015	12	10	11	13	14	11	8	79
2016	9	9	9	11	15	10	8	71
2017	6	10	14	10	8	10	10	68
2018	10	9	10	11	10	12	7	69
Total	39	38	45	47	51	47	36	303

Análisis de la incertidumbre de las mediciones

El tratamiento de la incertidumbre de las mediciones de XRF ha ido variando a lo largo de la elaboración de reportes y artículos. Un breve resumen se entrega a continuación.

En el estudio más reciente de tendencias (Barraza et al., 2017) se seleccionaron aquellas series de tiempo de elementos con completitud de información de al menos 75% de las muestras por sobre el valor del límite de detección. El límite de detección se calculó siguiendo la metodología señalada por (Sax et al., 2007), considerando en el análisis estadísticos los elementos Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As and Se, Br, Sr, Ba and Pb. De éstos se descartaron Mg, V, Sr, Ba y Se debido a que había varios vacíos de información en las series, y también Pb y Br, debido a que son fuentes cuya composición varió en el tiempo. Adicionalmente, se descontó de las concentraciones de K, la contribución proveniente del suelo (K_{ns}), mediante $K_{ns}=K-0.3*Fe$ obtenido desde el gráfico de dispersión $KvsFe$.

En (Jhun et al., 2013) se presentó solamente un análisis de tendencias a determinadas series de tiempo de elementos relacionados con la matriz energética. Se utilizó como límite de detección 2 veces la incertidumbre del análisis indicada por el laboratorio. Se escogieron aquellas series de elementos con al menos un 95% de completitud (concentración mayor que su incertidumbre) que fueron S, K, Fe, Br y Pb; sin embargo, también se incluyeron los elementos con menor completitud ya que son reconocidos trazadores, tales como Cr y Ni.

En (Moreno et al., 2010) se incluyó un mayor número de elementos al análisis estadístico de contribución por fuentes, descartándose aquellas muestras con incertidumbre mayor o igual al 20% del valor de concentración (es decir valor de concentración mayor o igual a 5 veces la incertidumbre). Se consideraron series de elementos con al menos 80% de completitud en el análisis estadístico.

En (Valdés et al., 2012) se calculó el límite de detección como indicado (Sax et al., 2007), y se seleccionaron series de elementos que tienen al menos 95% de completitud.

En (Sax et al., 2007) se determinó el límite de detección como 3 veces el error estándar de los blancos (10% de las muestras). Se descartaron todas aquellas muestras con concentración menores que el límite de detección. Se incluyeron series de elementos cuya completitud sea al menos de un 80%.

Adicionalmente, hay dos referencias más, que a pesar de que, no consideran la misma base de datos histórica de Parque O'Higgins, sí incluyen procedimiento analítico de concentración de elementos similar. En (Jorquera and Barraza, 2012) se consideró el valor de incertidumbre entregado por el laboratorio más $1/3$ del valor del límite de detección. Los valores de concentración bajo el límite de detección se reemplazaron por $1/2$ del límite de detección, y su incertidumbre total fue reemplazada por $5/6$ del límite de detección. En (Kavouras et al., 2001) solo se incluyeron aquellos elementos cuya concentración fue mayor que la incertidumbre reportada por el laboratorio. Aquellos elementos con completitud anual mayor o igual que 75% fueron incluidos en el análisis. Sin embargo, también se incluyeron las series que no cumplieron esta completitud, tales como Zr, V, Ni, Cr, As y Mg; debido a que sus niveles ambientales eran altos en una ciudad específica y eran trazadores de fuentes tales como refinерías de petróleo, industrias de procesamiento de metales y fundiciones de Cu.

Un resumen de la cantidad de elementos considerados en los análisis estadísticos de tendencias y de contribución por fuentes considerados en cada estudio se entrega en la Tabla 22. Esta tabla sirve como referencia para evaluar la cantidad de elementos y tipo de elementos que se obtuvieron en las muestras analizadas para el período 2014-2018 y compararlas con estudios anteriores. En la mayoría de las referencias, los elementos considerados en el análisis son S, K, Cr, Fe, Al, Si, Ni, Cu, Zn, Br, Pb, Cl, Ca, Mn, Ti, As y Se; y menos frecuentes son V, Mo, Ba, Na, Mg, P, Sr, Rb, Zr. El resto de los elementos no se considera en los análisis estadísticos.

Tabla 22: Resumen de elementos considerados en el análisis de tendencias y de contribución por fuentes de los principales estudios realizados en la RM.

Referencia	<i>Barraza et al., 2017</i>	<i>Jhun et al., 2013</i>	<i>Valdés et al., 2012</i>	<i>Jorquera and Barraza, 2012 (PIXE)</i>	<i>Moreno et al., 2010</i>	<i>Sax et al., 2007</i>	<i>Kavouras et al., 2001</i>
Período	1998-2014	1998-2010	1998-2007	1998 y 2004	1998-2007	1998-2003	1998
N° de elementos	12	7	16	21	23	14	23
Na			x		x		
Mg					x		x
Al	x		x	X	x	x	x
Si	x		x	X	x	x	x
P				X	x		
S	x	x	x	X	x	x	x
Cl	x		x	X	x		x
K	x	x	x	X	x	x	x
Ca			x	X	x	x	x
Sc							
Ti	x			X	x		x
V				X	x		x
Cr	x	x	x	X	x	x	x
Mn			x	X	x	x	x
Fe	x	x	x	X	x	x	x
Co							
Ni	x	x	x	X		x	x
Cu	x		x	X	x	x	x
Zn	x		x	X	x	x	x
Ga							
Ge							
As	x			X	x		x
Se			x	X	x	x	
Br		x	x	X	x	x	x
Rb							x
Sr					x		x
Y							

Referencia	<i>Barraza et al., 2017</i>	<i>Jhun et al., 2013</i>	<i>Valdés et al., 2012</i>	<i>Jorquera and Barraza, 2012 (PIXE)</i>	<i>Moreno et al., 2010</i>	<i>Sax et al., 2007</i>	<i>Kavouras et al., 2001</i>
Período	1998-2014	1998-2010	1998-2007	1998 y 2004	1998-2007	1998-2003	1998
N° de elementos	12	7	16	21	23	14	23
Zr							x
Nb							
Mo				X	x		x
Pd							
Ag							
Cd							
In							
Sn							
Sb							
Cs							
Ba				X	x		x
La							
Ce							
Sm							
Eu							
Tb							
W							
Au							
Hg							
Tl							
Pb		x	x	X	x	x	x

Respecto de la base de datos analizada para el período 2014-2018 y siguiendo el criterio de (Kavouras et al., 2001) se encuentra que de los 48 elementos que entrega el análisis XRF, 15 elementos para MP grueso y 14 para MP fino pasaron los criterios de completitud. En la tabla siguiente se entrega un resumen estadístico (en $\mu\text{g}/\text{filtro}$), indicando aquellos elementos que pasaron los criterios de descarte. Los elementos disponibles para el análisis son los mismos que en general se han utilizado para los estudios anteriores referenciados en la Tabla 22, lo que indica que el laboratorio de análisis químico utilizado entrega resultados confiables según su relación concentración/incertidumbre, lo que permite asegurar continuidad del estudio de Tendencias. Para MP fino descartaron los elementos Mg, P, Sc, V, Cr, Co, Ni, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, W, Au, Hg, Tl. Para MP grueso se descartaron los mismos elementos, excepto el Mg, P, V, Cr, Br. Adicionalmente, los filtros blancos analizados no tienen concentración de elementos significativa, asegurando calidad. Los únicos elementos detectados en

los filtros blancos fue el Al, Si, Ti, S y Fe, sin embargo, su valor promedio representa un 1,7% del promedio de la serie de MP grueso, y un 7.4% del MP fino.

En general todos los elementos detectados están más acumulados en la fracción gruesa, en lugar de la fina. Sin embargo, altos porcentajes de acumulación se encuentran en el caso del Na (32%), S (69%), K (33%), Zn (47%), Br (71%) y Pb (60%). Los elementos con mayor acumulación en la fracción fina indican contribución antropogénica preferente, como el caso del Br y Pb, o bien contribución netamente secundaria, como el caso del S, presente como sulfato.

Tabla 23: Análisis de la incertidumbre y de la completitud de los resultados de elementos para las muestras 2014-2018. Valores de concentración se encuentran en $\mu\text{g}/\text{filtro}$.

Elemento	Blanco	Grueso	Fino	% Grueso	% Fino
Na	N.R.	8.89 ± 4.8 (313)	4.24 ± 3.1 (365)	68%	32%
Mg	N.R.	5.79 ± 3 (313)	N.R.	84%	
Al	0.66 ± 0.1 (6)	44.59 ± 24.8 (313)	3.79 ± 2.6 (365)	92%	8%
Si	0.3 ± 0.2 (6)	97.65 ± 54.5 (313)	6.71 ± 5.4 (365)	94%	6%
P	N.R.	N.R.	N.R.		
S	0.04 ± 0 (6)	6.27 ± 2.8 (313)	13.72 ± 7.8 (365)	31%	69%
Cl	N.R.	8.49 ± 7.6 (313)	2.13 ± 4.2 (365)	80%	20%
K	N.R.	10.81 ± 6 (313)	5.26 ± 3.3 (365)	67%	33%
Ca	N.R.	47.86 ± 29.8 (313)	3.61 ± 3.1 (365)	93%	7%
Sc	N.R.	N.R.	N.R.		
Ti	0.08 ± 0 (6)	4.49 ± 2.6 (313)	0.42 ± 0.3 (365)	91%	9%
V	N.R.	N.R.	N.R.		
Cr	N.R.	0.17 ± 0.2 (313)	N.R.	67%	
Mn	N.R.	1.25 ± 0.8 (313)	0.33 ± 0.3 (365)	79%	21%
Fe	0.22 ± 0.2 (6)	57.05 ± 34.2 (313)	8.14 ± 6.8 (365)	88%	12%
Co	N.R.	N.R.	N.R.		
Ni	N.R.	N.R.	N.R.		
Cu	N.R.	1.01 ± 0.8 (313)	0.42 ± 0.3 (365)	71%	29%
Zn	N.R.	1.3 ± 0.9 (313)	1.16 ± 1 (365)	53%	47%
Ga	N.R.	N.R.	N.R.		
Ge	N.R.	N.R.	N.R.		
As	N.R.	N.R.	N.R.		
Se	N.R.	N.R.	N.R.		
Br	N.R.	N.R.	0.22 ± 0.2 (365)	29%	71%
Rb	N.R.	N.R.	N.R.		
Sr	N.R.	N.R.	N.R.		
Y	N.R.	N.R.	N.R.		
Zr	N.R.	N.R.	N.R.		
Nb	N.R.	N.R.	N.R.		
Mo	N.R.	N.R.	N.R.		

Elemento	Blanco	Grueso	Fino	% Grueso	% Fino
<i>Pd</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Ag</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Cd</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>In</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Sn</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Sb</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Cs</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Ba</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>La</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Ce</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Sm</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Eu</i>	2.21 ± 1.3 (6)	N.R.	N.R.		
<i>Tb</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>W</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Au</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Hg</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Tl</i>	N.R.	N.R.	N.R.		
<i>Pb</i>	N.R.	0.3 ± 0.2 (313)	0.45 ± 0.3 (365)	40%	60%

Establecer un análisis de tendencias de Material Particulado MP₁₀ y MP_{2,5} de las principales ciudades de la zona centro sur del país.

Esta sección del estudio considera los análisis estadísticos aplicados a la base de datos entregada por la contraparte técnica del estudio referente de las estaciones de Rancagua a Coyhaique. Se presenta a continuación, un análisis de tendencia de concentración de MP_{2,5}, MP₁₀, y composición elemental, con metodologías basadas modelos de regresión lineal, buscando explicar la concentración másica de las partículas (MP₁₀ o MP_{2,5} continuo) en función de variables categóricas, como fue presentando anteriormente (Koutrakis et al., 2005; Sax et al., 2007). Se ha decidido mantener la misma metodología histórica con la finalidad de permitir comparabilidad con los estudios previos disponibles.

Descripción de metodología de análisis de Tendencias utilizando la metodología de Factor de Impacto por Concentración (FIC).

A partir de los antecedentes de completitud de las estaciones de monitoreo de la zona Centro-Sur de Chile entregado en el primer informe de avance, se construyó una base de datos de concentración de MP₁₀ y MP_{2,5}, a la que se le aplicó un análisis estadístico de regresión lineal multivariada. Este análisis se usa para describir la relación entre una variable de respuesta “Y” con una o más variables predictoras $X_1, X_2... X_n$. Cuando $n > 1$ entonces se habla de regresión multivariada. El modelo multivariado utilizado permite explicar la variabilidad de la concentración del material particulado en función del efecto de diferentes variables categóricas predictoras.

Para este estudio se realizaron regresiones multivariadas usando los datos continuos de MP₁₀ y MP_{2,5} en función de las variables meteorológicas (humedad, temperatura y magnitud de velocidad del viento), las regiones en las que se encuentran las estaciones de monitoreo, sus ciudades respectivas (Zona Centro-Sur de Chile), Temporada de mediciones (invierno o verano), día de la semana (Lunes-Domingo), mes del año (Enero – Diciembre) y año de medición (2014 – 2018) con el fin de observar tendencias en la concentración.

La finalidad de aplicar este modelo de regresión es poder encontrar el impacto relativo de las variables predictoras (X_n) en la concentración de MP₁₀ o MP_{2,5}, utilizando el índice **Factor de Impacto por concentración (FIC)**, el cual se detalla más adelante.

Cabe mencionar que los valores FICs son índices relativos, no absolutos. Es decir, los valores de FIC que entrega el modelo son valores relativos a niveles de referencia definidos a priori durante el análisis de regresión. Por lo tanto, los FIC se interpretan como aumentos o disminuciones de la concentración atribuido a la variación de una variable explicativa, respecto del nivel de referencia definido.

Las Regiones y estaciones incluidas en el análisis de tendencias son las siguientes:

Tabla 24. Detalles de la categorización y variables de referencia del modelo FIC. Elaboración propia.

Región	Estación	Variables	Período
O'Higgins	Rengo	MP _{2,5}	2017-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	San Fernando	MP _{2,5}	May 2016-Dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Rancagua I	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Rancagua II	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
Maule	Curicó	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Linares	MP ₁₀	No hay
		MP _{2,5}	ene-2016-Dic 2018
	U del Maule	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	U de Talca	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	La Florida	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
Ñuble	INIA	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2017-2018
	Purén	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
Bío-Bío	21 de mayo	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Balneario Curanilahue	MP _{2,5}	Dic 2016-dic 2018
		MP ₁₀	Sin información
	Cerro Merquín	MP _{2,5}	Ene 2016-dic 2018
		MP ₁₀	Ene 2014-Sep 2016
	Consultorio San Vicente	MP _{2,5}	Oct 2016-dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Kingston College	MP _{2,5}	Ene 2016-dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Los Ángeles Oriente	MP _{2,5}	Mar 2014-Jun 2016
		MP ₁₀	Sin información
	Liceo Polivalente	MP _{2,5}	Oct 2016-dic 2018
		MP ₁₀	2014-2018
Punteras	MP _{2,5}	Sin información	
	MP ₁₀	2014-2018	
Araucanía	Las Encinas	MP _{2,5}	2014-2018

Región	Estación	Variabes	Período
	Museo Ferroviario	MP ₁₀	2014-2018
		MP _{2,5}	Ener-2014-Dic-2017
	Ñielol	MP ₁₀	Ener-2014-Dic-2017
		MP _{2,5}	Ener-2018-Dic-2018
	Padre Las Casas II	MP ₁₀	Ener-2018-Dic-2018
		MP _{2,5}	2014-2018
Los Ríos	La unión	MP _{2,5}	2018
		MP ₁₀	Sin información
	Valdivia I	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Valdivia II	MP _{2,5}	Sin información
		MP ₁₀	Sin información
Los Lagos	Alerce	MP _{2,5}	may 2017-dic 2018
		MP ₁₀	no hay
	Mirasol	MP _{2,5}	Mar 2016-dic 2018
		MP ₁₀	no hay
	Osorno	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
Aysén	Coyhaique I	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018
	Coyhaique II	MP _{2,5}	2014-2018
		MP ₁₀	2014-2018

Se aplicaron 3 tipos de metodologías de análisis de FIC:

Metodología de análisis de FICs a nivel regional

Se aplicó una metodología de FIC para obtener resultados a nivel nacional. En este caso se realizó un sólo análisis multivariado por fracción de MP₁₀ (o MP_{2,5}), con la finalidad de construir una imagen a nivel nacional de la variación de la concentración de partículas. Conforme con la metodología histórica, se ha utilizado como supuesto que la concentración de los contaminantes atmosféricos se asemeja a una distribución log-normal, por lo que se ha decidido utilizar el logaritmo natural de la concentración del contaminante en lugar de la concentración directamente.

Para esta metodología se ocuparon las variables categóricas **Región, Año, Temporada, Mes, Día y Variables meteorológicas como Humedad Relativa, Temperatura y Magnitud de la Velocidad del Viento**, por lo que el modelo estadístico nacional se expresa en base a la siguiente ecuación:

$$\ln(MP) = \alpha + \Sigma\beta_{Rj} * Rj + \Sigma\beta_{Aj} * Aj + \Sigma\beta_{Sj} * Sj + \Sigma\beta_{Mj} * Mj + \Sigma\beta_{DSj} * DSj + \Sigma\beta_{Tj} * Tj + \Sigma\beta_{HRj} * HRj + \Sigma\beta_{VVj} * VVj \quad (ec. 3)$$

Donde α es el intercepto, que indica la concentración del nivel de referencia, Rj indica la Región de Aplicación del modelo, Aj indica el año, Sj indica la temporada, Mj indica el mes, DSj indica el día de semana, Tj indica la Temperatura ambiente, HRj indica la Humedad Relativa del ambiente y VVj indica la velocidad del viento.

Aplicando el operador Exponencial a la ecuación 3 y utilizando las propiedades de éste, la expresión se puede simplificar en términos del factor de impacto como lo indica la ecuación 4:

$$(MP) = I * f_{Rj} * f_{Aj} * f_{Sj} * f_{DSj} * f_{Mj} * f_{Tj} * f_{HRj} * f_{VVj} \quad (ec. 4)$$

Se define a $f_{ij} = \exp[\Sigma\beta_{ij} * ij]$ como Factor de Impacto por Concentración (FIC) de la variable i de una categoría j (e.g., i = Región, j = O'Higgins).

Se realizó un primer análisis de tendencia de concentración, para dar una imagen de la situación a nivel nacional (desde la VI a la XII región). Se utilizaron como variables categóricas de referencia Temporada Estival, Año 2014, Región de O'Higgins, Lunes y Enero. Para las variables continuas, dicotomizadas o tricotomizadas magnitud del viento, Humedad Relativa y Temperatura se consideraron los siguientes rangos como nivel de referencia: Magnitud del viento ≥ 1.6 [m/s], Humedad Relativa $\geq 70\%$ y Temperatura ≤ 20 [°C]. Las designaciones anteriores se realizaron siguiendo la metodología de (Koutrakis et al., 2005) y se resumen en la Tabla 25.

Tabla 25. Detalles de la categorización y variables de referencia para el modelo FIC nacional. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Nivel de Referencia
Región	1: O'Higgins 2: Maule 3: Ñuble 4: Biobío 5: Araucanía 6: Los Ríos 7: Los Lagos 8: Aysén	Región de O'Higgins
Temporada	1: Estival 2: Invernal	Estival
Día de la Semana	1: Lunes 2: Martes 3: Miércoles 4: Jueves 5: Viernes 6: Sábado 7: Domingo	Lunes
Magnitud de la velocidad del viento	1: $VV \geq 1.6$ [m/s]	$VV \geq 1.6$ [m/s]

Variable	Categorización	Nivel de Referencia
	2: 0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s] 3: 0.8 ≥ VV	
Humedad Relativa	1: HR ≥ 70% 2: HR < 70%	HR ≥ 70%
Temperatura	1: T ≤ 20 [°C] 2: T > 20 [°C]	T ≤ 20 [°C]

Metodología de análisis de FICs a nivel nacional

En este caso Para esta metodología se ocuparon las variables categóricas **Estación, Año, Temporada, Mes, Día y Variables meteorológicas como Humedad Relativa, Temperatura y Magnitud de la Velocidad del Viento**, por lo que el modelo estadístico nacional que expresado en la siguiente ecuación:

$$\ln(MP) = \alpha + \Sigma\beta_{Ej} * Rj + \Sigma\beta_{Aj} * Aj + \Sigma\beta_{Sj} * Sj + \Sigma\beta_{Mj} * Mj + \Sigma\beta_{DSi} * DSj + \Sigma\beta_{Tj} * Tj + \Sigma\beta_{HRj} * HRj + \Sigma\beta_{VVj} * VVj \quad (ec.3)$$

Donde α es el intercepto, que indica la concentración promedio del nivel de referencia escogido, Ej indica la Estación de Aplicación del modelo, Aj indica el año, Sj indica la temporada, Mj indica el mes, DSj indica el día de semana, Tj indica la Temperatura ambiente, HR indica la Humedad Relativa del ambiente y VV indica la velocidad del viento. Al igual que el caso anterior, la ecuación de FIC regional expresarse en términos del factor de impacto como lo indica la ecuación 4:

$$(MP) = I * f_{Ej} * f_{Aj} * f_{Sj} * f_{DSj} * f_{Mj} * f_{Tj} * f_{HRj} * f_{VVj} \quad (ec.4)$$

Se define a $f_{ij} = \exp[\Sigma\beta_{ij} * ij]$ como Factor de Impacto por Concentración (FIC) de la variable i de una categoría j (e.g., i= Estación, j = Rengo).

Esta metodología se aplicó individualmente para cada región desde O'Higgins hasta Aysén, para dar una imagen de la situación a regional local. Se utilizaron como variables categóricas de referencia Temporada Estival, Año 2014, Región de O'Higgins y Lunes. Para las variables continuas, dicotomizadas o tricotomizadas magnitud del viento, Humedad Relativa y Temperatura se consideraron los siguientes rangos como nivel de referencia: Magnitud del viento ≥ 1.6 [m/s], Humedad Relativa $\geq 70\%$ y Temperatura ≤ 20 [°C]. Las designaciones anteriores se realizaron siguiendo la metodología de (Koutrakis et al., 2005) y se resumen en la Tabla 26.

Tabla 26. Detalles de la categorización y variables de referencia para el modelo FIC aplicado por región. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Temporada	1: Estival 2: Invernal	Estival
Día de la Semana	1: Lunes 2: Martes 3: Miércoles 4: Jueves 5: Viernes 6: Sábado 7: Domingo	Lunes
Magnitud de la velocidad del viento	1: $VV \geq 1.6$ [m/s] 2: 0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s] 3: $0.8 \geq VV$	$VV \geq 1.6$ [m/s]
Humedad Relativa	1: $HR \geq 70\%$ 2: $HR < 70\%$	$HR \geq 70\%$
Temperatura	1: $T \leq 20$ [°C] 2: $T > 20$ [°C]	$T \leq 20$ [°C]

Metodología de análisis de FICs de ciudades con Plan de Descontaminación

Se realizaron análisis de FIC's separados en los casos de la Región del Maule, Bío-Bío y Los Lagos, ya que poseen más de un plan de Descontaminación. En estos casos, con la finalidad de tener una imagen de la efectividad de cada Plan, los análisis estadísticos de FIC's fueron aplicados acorde con el siguiente esquema

Región del Maule

- Estación Curicó como la ciudad de Curicó
- Estación Linares la ciudad de Linares
- Estaciones de La Florida, Maule y Talca, todas juntas dado el Plan de Descontaminación que posee (Talca y Maule).

Región del Bio-Bio

- Estaciones los Ángeles y 21 de mayo, como la ciudad de Los Ángeles (Plan de Descontaminación)
- Todas las otras estaciones del Gran Concepción

Región de Los Lagos

- Estaciones Alerce y Mirasol como **Puerto Montt**
- Estación Osorno, como la ciudad Osorno (Plan de Descontaminación)

Los resultados se incorporan en las secciones siguientes de este documento.

Análisis de tendencias del material particulado MP₁₀ y MP_{2,5} de las principales ciudades de la zona centro sur del país (Rancagua a Coyhaique), mediante el factor de impacto en las Concentraciones (FIC).

Resultados FICs Nacionales

En la Tabla 27 se entregan los resultados de los FICs derivados de la metodología descrita en el punto anterior. Se presentan los FICs de las variables Año, Región y Temporada, variables que se consideran más explicativas para un análisis a gran escala como lo es a nivel nacional (Zona Centro Sur del país). Estas tres variables mostraron coeficientes estadísticamente significativos y para visualizar mejor los valores de los FIC, se entregan los gráficos respectivos de Tendencia Anual y Distribución Espacial en la Figura 53 y Figura 54. La tendencia anual señala que, a nivel nacional, hay una tendencia de disminución tanto para el MP_{2,5} como para MP₁₀. Sin embargo, en los dos últimos años (2017-2018) los niveles se han mantenido más bien constantes. El análisis se ha realizado considerando todas las estaciones de calidad del aire y también descontando aquellas en donde no hay plan de descontaminación vigente (descontando las estaciones de Alerce y Miraflores en Puerto Montt). La tendencia en ambos casos se mantiene, con diferencias menores.

Tabla 27. Factor de Impacto por Concentración obtenido para las diferentes variables categóricas y el parámetro estadístico P significativo cuando es menor a 0.05. Elaboración propia.

Variables	MP ₁₀	Valor P	Todas las estaciones de CA		Sin estaciones de Alerce y Mirasol	
			MP _{2,5}	Valor P	MP _{2.5}	Valor P
Concentración nivel de referencia (ug/m³)	31.264	< 2e-16	13.404	< 2e-16	13.341	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000		1.000	
Año 2015	1.025	0.004	1.022	0.094	1.020	0.116
Año 2016	0.952	6.810E-09	0.923	3.010E-11	0.930	1.53e-09
Año 2017	0.836	< 2e-16	0.817	< 2e-16	0.811	< 2e-16
Año 2018	0.844	< 2e-16	0.801	< 2e-16	0.795	< 2e-16
O'Higgins	1.000		1.000		1.000	
Maule	0.711	< 2e-16	0.694	< 2e-16	0.702	< 2e-16
Ñuble	0.771	< 2e-16	0.884	3.52E-15	0.888	3.00e-14
Biobío	0.774	< 2e-16	0.971	0.019	0.938	3.27e-07
Araucanía	0.803	< 2e-16	0.766	< 2e-16	0.781	< 2e-16
Los Ríos	0.743	< 2e-16	0.896	2.400E-08	0.914	5.32e-06
Los Lagos	0.691	< 2e-16	0.862	< 2e-16	0.880	1.09e-15
Aysén	1.104	< 2e-16	1.585	< 2e-16	1.595	< 2e-16
Primavera-Verano	1.000		1.000		1.000	
Otoño-Invierno	1.750	< 2e-16	2.743	< 2e-16	2.779	< 2e-16

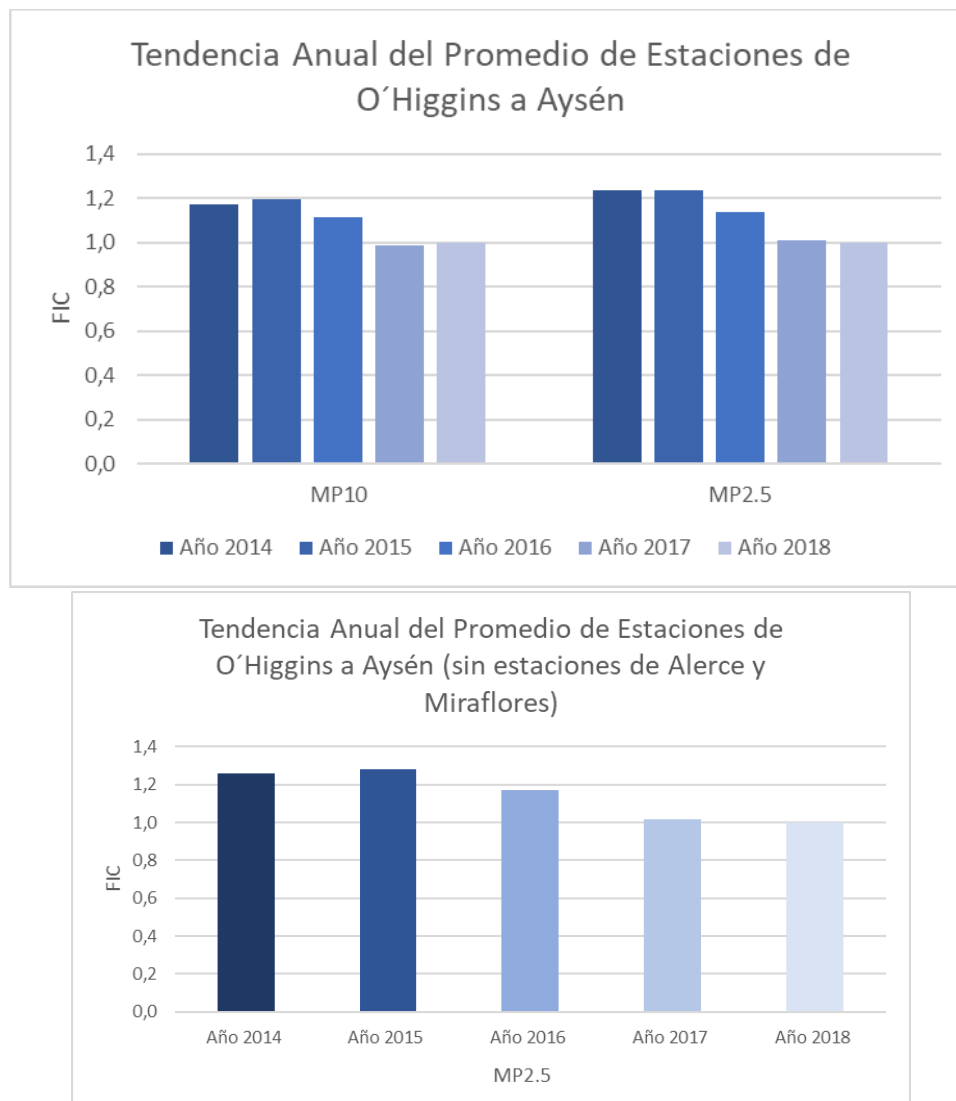


Figura 53. Tendencia Anual del Promedio de Estaciones de O'Higgins a Aysén. Factor de Impacto por concentración de la variable categórica Año. El gráfico superior considera a todas las estaciones del sector centro sur de Chile, mientras que el de abajo se consideraron solo las estaciones con Plan de Descontaminación (excepción de las estaciones de Alerce y Miraflores, ya que no tiene plan vigente). Fuente: Elaboración Propia.

El efecto región se ilustra en la Figura 54. En general las regiones se encuentran mayormente impactadas por material particulado fino. Se observa que la región de Aysén es la más afectada tanto por MP₁₀ y MP_{2,5} llegando a alcanzar 1.5 veces el nivel de referencia, seguido por la región de O'Higgins, Biobío, Los Ríos, Los Lagos y Araucanía. La región del Maule es la menos afectada por MP₁₀ y MP_{2,5}.

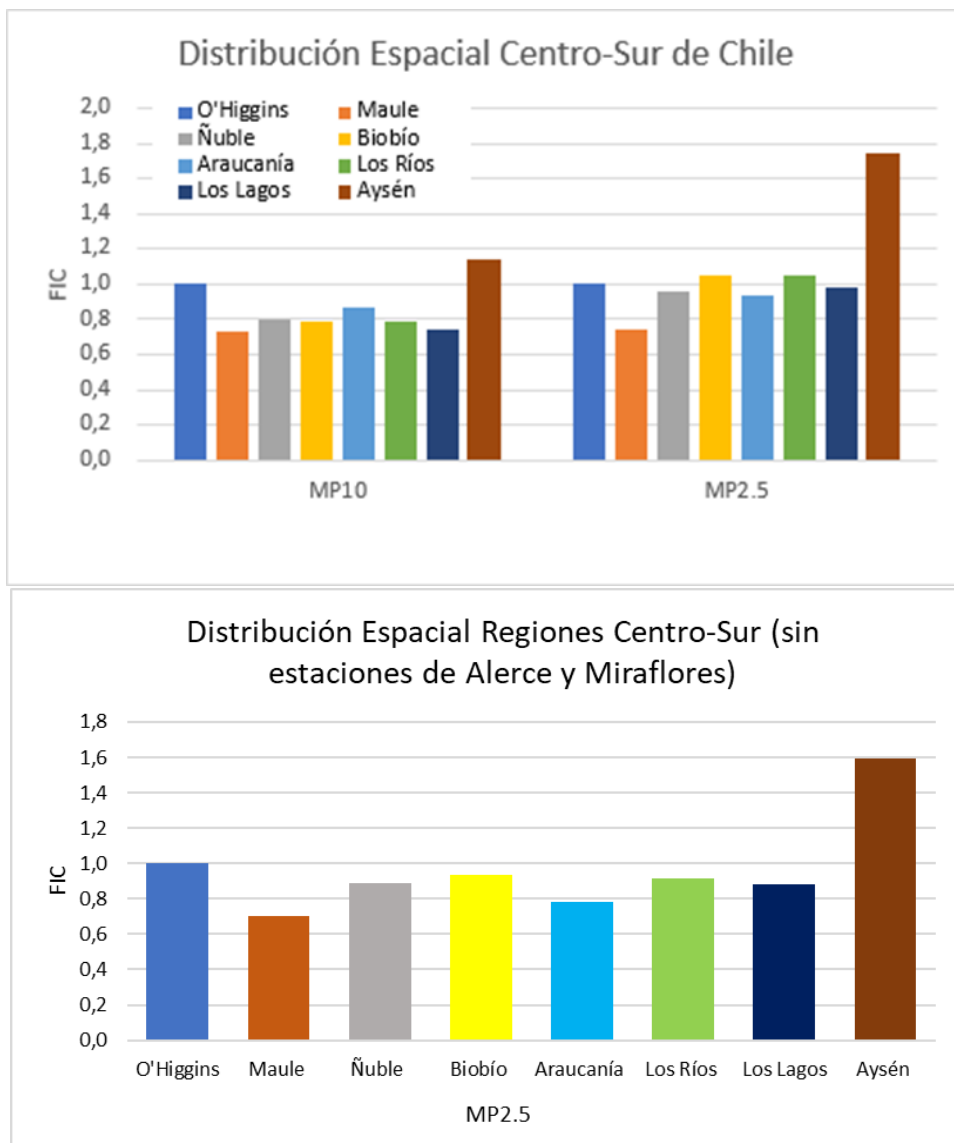


Figura 54: Factor de Impacto por Concentración de la variable categórica Región. El gráfico superior considera a todas las estaciones del sector centro sur de Chile, mientras que el de abajo se consideraron solo las estaciones con Plan de Descontaminación (excepción de las estaciones de Alerce y Miraflores, ya que no tiene plan vigente). Fuente: Elaboración Propia.

Resultados FIC regional:

Región de O'Higgins:

Para la región del Libertador Bernardo O'Higgins se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 28. Donde la estación Rengo fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración serán descritos en comparación a la estación Rengo, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 28. Lista de estaciones del ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Rengo 2: San Fernando 3: Rancagua I 4: Rancagua II	Rengo

En la Figura 55, la distribución espacial indica que las estaciones urbanas Rancagua I y II se encuentran más impactadas por MP_{10} , y la estación Rancagua II especialmente por $MP_{2,5}$, mientras que la estación Rengo y San Fernando de carácter rurales se encuentran con niveles de FIC similares, esta variable es estadísticamente significativa para las estaciones Rengo, Rancagua I y II.

La tendencia Anual indica una disminución de los niveles de concentración a partir del año 2015 tanto para MP_{10} como $MP_{2,5}$, esta variable es estadísticamente significativa. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el $MP_{2,5}$ alcanza hasta 2 veces el nivel de referencia lo que se relaciona con el mayor uso de biomasa para calefacción residencial, esta variable es estadísticamente significativa. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos, y es estadísticamente significativa. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma, esta variable es estadísticamente significativa, para la humedad relativa y temperatura no hay una tendencia clara y no resultan estadísticamente significativas.

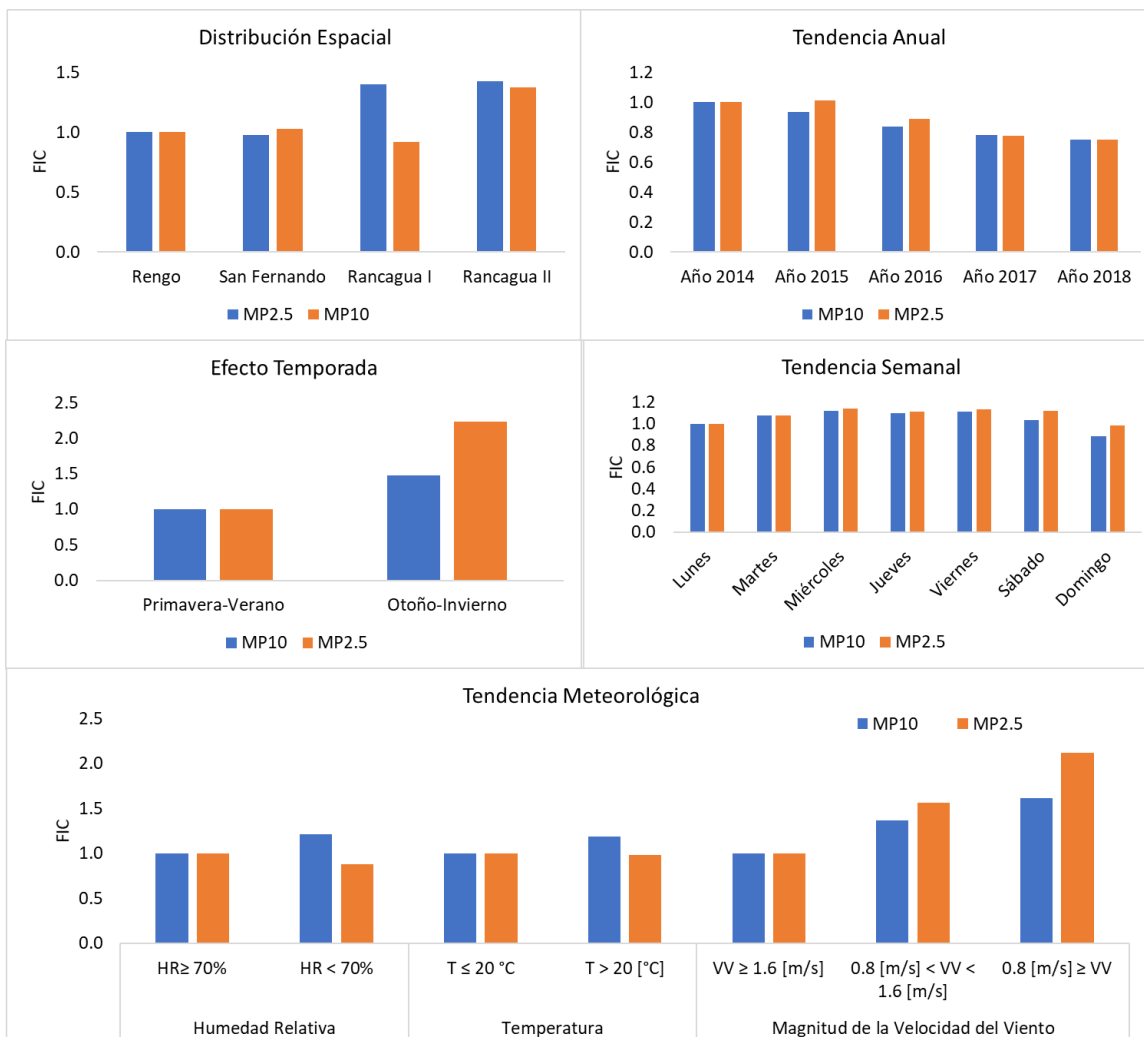


Figura 55. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región de O'Higgins, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Región del Maule

Para la región del Maule se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 29. Donde la estación Curicó fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración están descritos en comparación a la estación Curicó, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 29. Lista de estaciones correspondientes a la región del Maule pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
----------	----------------	------------

Estación	1: Curicó 2: Linares (solo para MP _{2,5}) 3: La Florida 4: U.C Maule 5: U. de Talca	Curicó
----------	---	--------

En la Figura 56, la distribución espacial indica que las estaciones Curicó, Linares y La Florida se encuentran más impactadas por MP_{2,5}, y la estación Curicó y La Florida especialmente por MP₁₀, mientras que la estación U.C. Maule y U. de Talca se encuentran con niveles de MP₁₀ similares, estas variables resultaron estadísticamente significativas.

La tendencia Anual indica una disminución de los niveles de concentración a partir del año 2015 tanto para MP₁₀ como MP_{2,5}, esta variable resultó estadísticamente significativa. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, especialmente para el MP_{2,5} donde se alcanza 2.5 veces el nivel de referencia, esta variable resultó estadísticamente significativa. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos, esta variable resultó estadísticamente significativa. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma, esta variable resultó ser estadísticamente significativa.

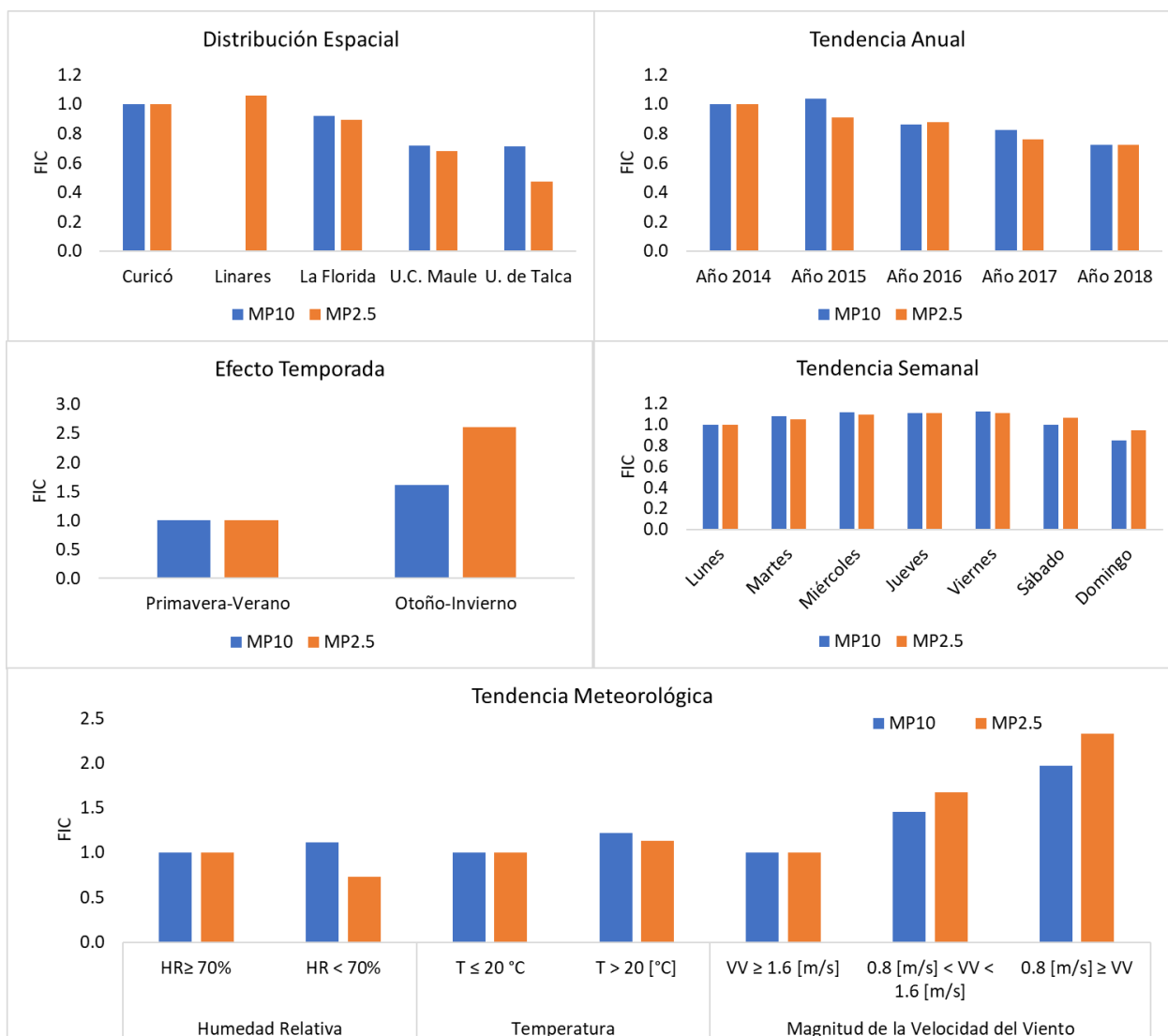


Figura 56. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región del Maule, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Para un análisis más detallado, esta región se dividió en tres zonas, acorde con los Planes de Descontaminación aplicables. La tendencia anual para la estación de Curicó señala una disminución tanto para MP₁₀ como para MP_{2,5}, como lo muestra la figura siguiente.

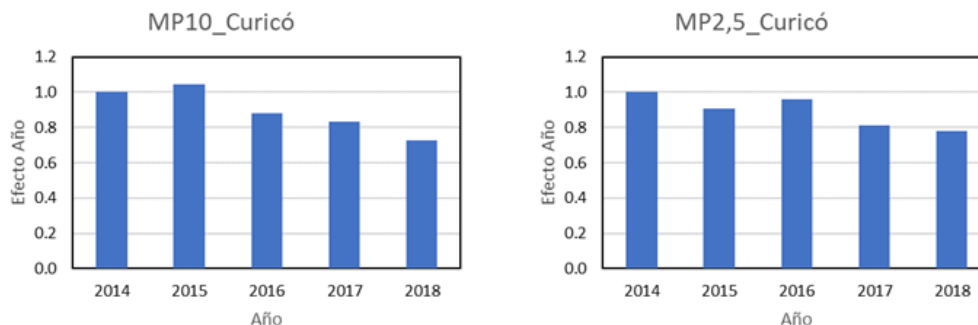


Figura 57: Tendencia anual de concentración estación Curicó.

Respecto de Linares, la base de datos proporcionada por la contraparte técnica solo contiene datos de MP_{2,5} para el período de análisis. La tendencia anual para la estación Linares también señala una disminución para MP_{2,5} en los tres años de medición.

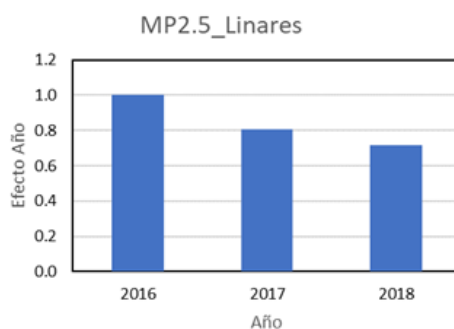


Figura 58: Tendencia anual de concentración estación Linares.

Respecto de Talca y Maule se encuentra una tendencia a la disminución en MP₁₀, pero respecto de MP_{2,5} hay un estancamiento para los últimos tres años, 2016-2018. La disminución del año 2014 respecto del 2016-2018 es de aproximadamente 22%.

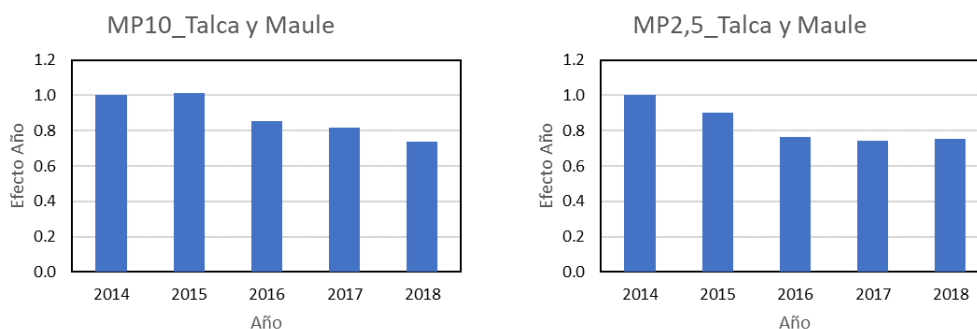


Figura 59: Tendencia anual de concentración estación Talca y Maule.

En la Tabla 30 se entrega el efecto semanal, temporada y meteorológico por separado para las distintas ciudades. El efecto temporada es el que más impacta la concentración de partículas, especialmente para MP_{2,5}, que aumenta en casi el triple en temporada O-I. Le sigue el efecto de la

velocidad del viento, el que aumenta aproximadamente 1,7 veces cuando la velocidad es reducida, demostrando que las condiciones de ventilación son igualmente importantes en la concentración de partículas durante invierno.

Tabla 30: Factor de Impacto por Concentración obtenido para las diferentes variables categóricas y el parámetro estadístico P significativo cuando es menor a 0.05. Elaboración propia.

Variables	Curicó				Linares		Talca y Maule			
	MP ₁₀	p	MP _{2.5}	p	MP _{2.5}	p	MP ₁₀	p	MP _{2.5}	p
Intercepto (ug/m ³)	23.34	<2e-16	9.48	<2e-16	14.14	<2e-16	25.08	<2e-16	9.3	0
P-V	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
O-I	1.71	<2e-16	2.93	<2e-16	2.66	<2e-16	1.67	<2e-16	2.73	<2e-16
Lunes	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
Martes	1.08	0.09	1.05	0.28	0.99	0.86	1.07	0.11	1.09	0.22
Miércoles	1.11	0.11	1.08	0.04	1.02	0.8	1.1	0.03	1.14	0.39
Jueves	1.11	0.02	1.1	0.05	1.05	0.54	1.1	0.04	1.19	0.05
Viernes	1.12	0	1.1	0.04	0.99	0.87	1.11	0.02	1.16	0.05
Sábado	1	0.22	1.05	0.08	0.99	0.91	1.01	0.79	1.09	0.27
Domingo	0.85	0	0.94	0.46	0.9	0.13	0.81	0	1	0.52
HR>=70	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
HR<70	1.14	0.95	0.75	<2e-16	0.55	<2e-16	1.16	0	0.82	<2e-16
T<=20	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
T>20	1.23	<2e-16	1.14	0	1.06	0.28	1.21	0	1.19	0.02
VV>1.6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0.8<VV<1.6	1.35	<2e-16	1.41	<2e-16	1.96	<2e-16	1.42	<2e-16	1.79	<2e-16
VV<0.8	1.65	<2e-16	1.51	<2e-16	1.61	0	1.96	<2e-16	2.6	<2e-16

Región de Ñuble

Para la región de Ñuble se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 31. Donde la estación Inia Chillán fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración serán descritos en comparación a la estación Inia Chillán, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 31. Lista de estaciones correspondientes a la región de Ñuble pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Inia Chillán 2: Purén	Inia Chillán

En la Figura 60, la distribución espacial indica que la estación Purén se encuentra más impactada por $MP_{2,5}$ y MP_{10} esta variable es estadísticamente significativa. La tendencia Anual indica un aumento en los niveles de contaminación desde el 2014 al 2015, y luego disminución a partir del año 2015 tanto para MP_{10} como $MP_{2,5}$ a excepción del año 2017 donde el MP_{10} vuelve a aumentar, esta variable resulta estadísticamente significativa. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el $MP_{2,5}$ alcanza hasta casi 4 veces el nivel de referencia y el MP_{10} 2 veces el nivel de referencia, esta variable resultó estadísticamente significativa. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos sin embargo esta variable no resultó estadísticamente significativa. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma, esta variable resultó estadísticamente significativa.

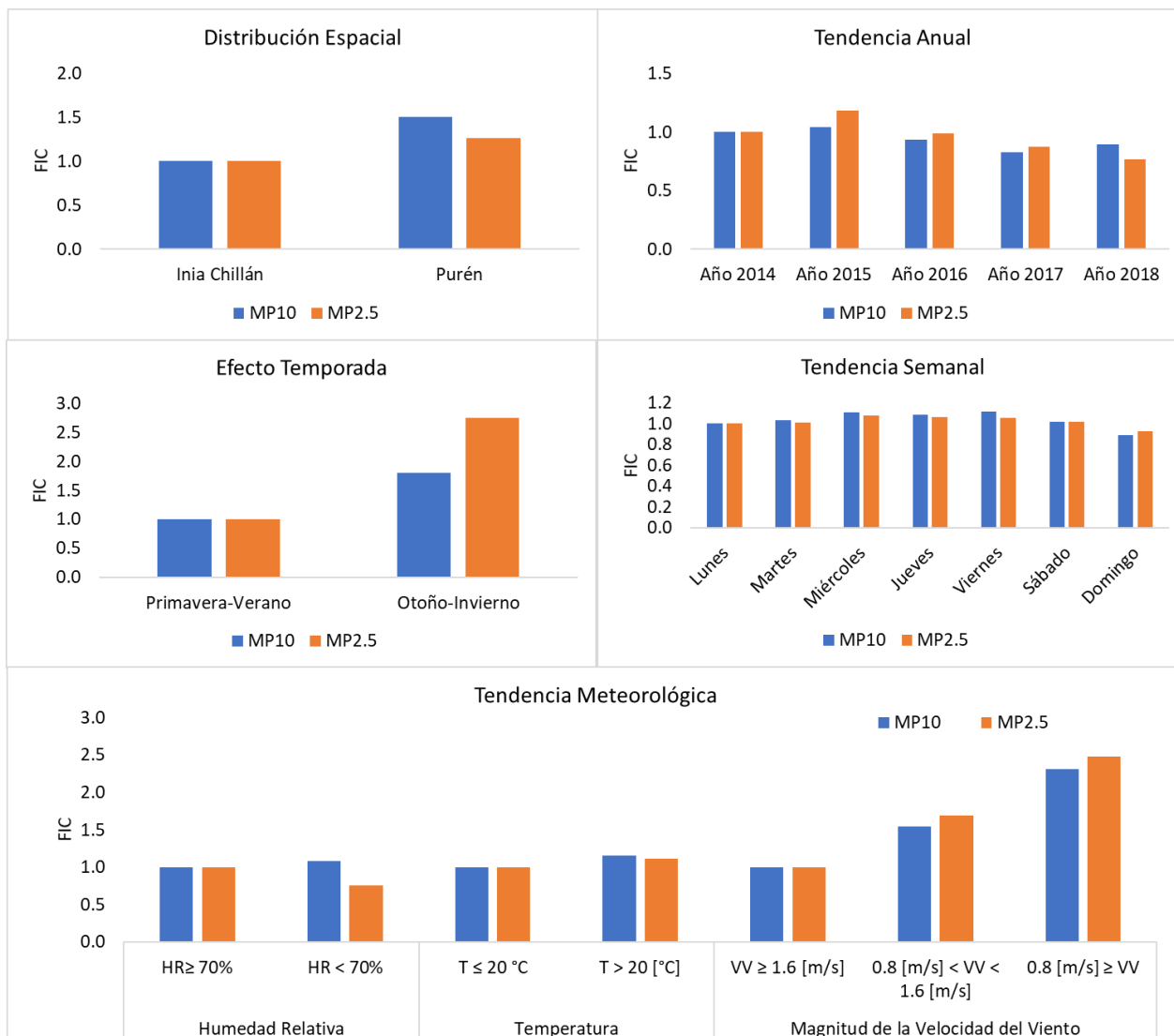


Figura 60. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región de Ñuble, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Región del Biobío

Para la región del Biobío se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 32. Donde la estación 21 de Mayo fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración serán descritos en comparación a la estación 21 de Mayo, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 32. Lista de estaciones correspondientes a la región del Biobío, pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: 21 de mayo 2: Balneario Curanilahue (solo para MP _{2,5}) 3: Cerro Merquín	21 de Mayo

Variable	Categorización	Referencia
	4: Consultorio San Vicente 5: Kingston College 6: Los Ángeles Oriente (solo para MP _{2,5}) 7: Liceo Polivalente 8: Punteras	

En la Figura 61, la distribución espacial indica que las estaciones Cerro Merquín, Kingston College, Liceo Polivalente y Punteras se encuentran menos impactadas por MP₁₀, mientras que B. Curanilahue y Los Ángeles presentan alto factor de impacto por MP_{2,5}, esta variable resultó ser estadísticamente significativa para las estaciones B. Curanilahue, Los Ángeles, Liceo Polivalente y Punteras.

La tendencia Anual indica un aumento en los niveles de contaminación desde el 2014 al 2015, y luego disminución a partir del año 2015 tanto para MP₁₀ como MP_{2,5} a excepción del año 2018 donde el MP₁₀ y MP_{2,5} se mantiene constante, esta variable resulta estadísticamente significativa. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el MP_{2,5} alcanza hasta 2 veces el nivel de referencia y el MP₁₀ aumenta levemente, esta variable resultó estadísticamente significativa. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos, esta variable resultó ser estadísticamente significativa solo para la fracción respirable. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma, esta variable resultó estadísticamente significativa.

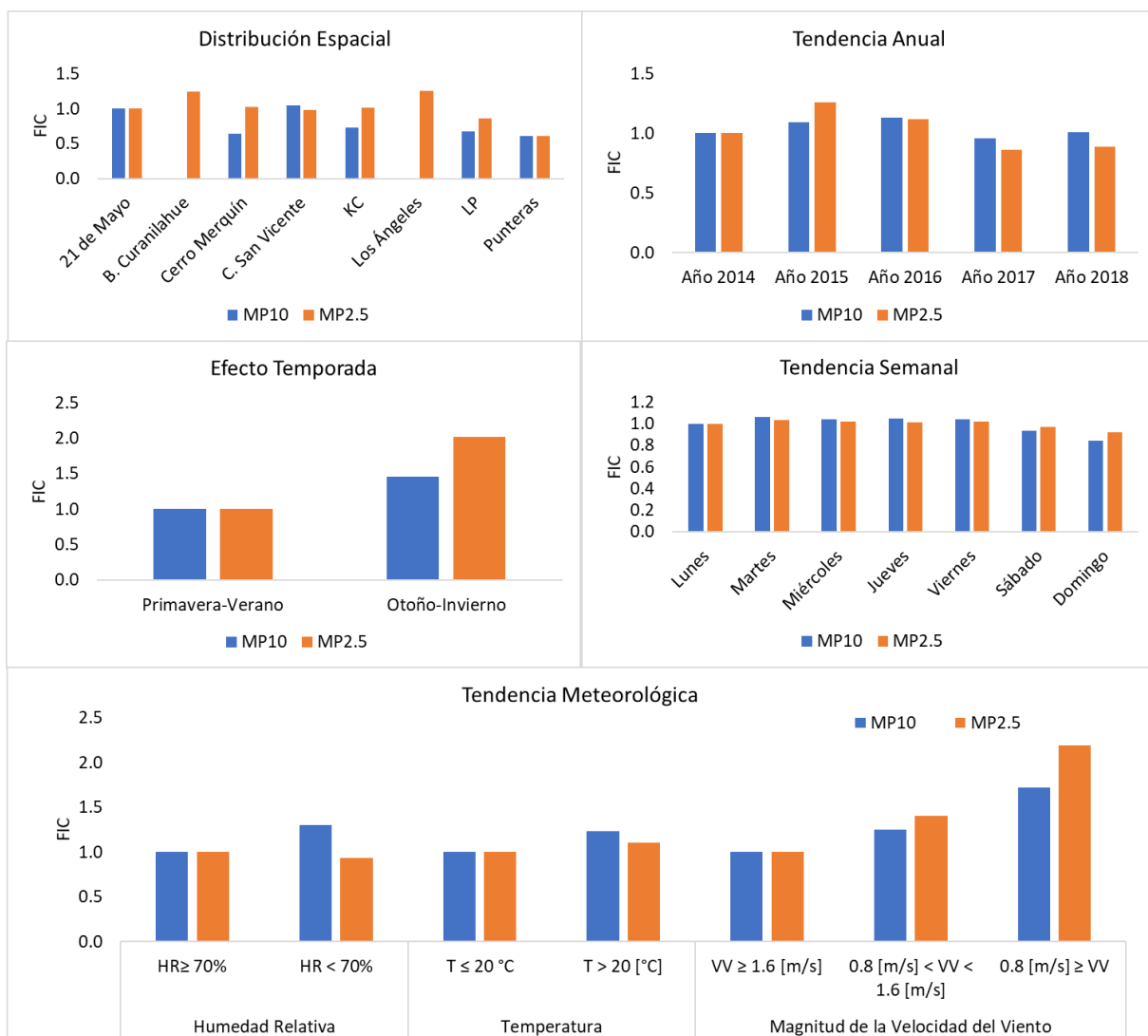


Figura 61. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región del Biobío, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, Fuente: Elaboración Propia.

Dado que en esta región existen dos Planes de Descontaminación (Los Ángeles y Gran Concepción, respectivamente), se analizaron por separado las estaciones. Solo se corrieron datos de MP10 para la estación 21 de Mayo. En Los Ángeles solo hay datos de 2015 y 2016. Para MP2,5 se tienen las dos estaciones. La Tendencia anual de MP10 en Los Ángeles (estación 21 de Mayo) indica una reducción de los niveles de concentración solo a contar del año 2017, que es casi igual al del año 2018. Respecto de MP2,5, se encuentra también una reducción en los mismos años.

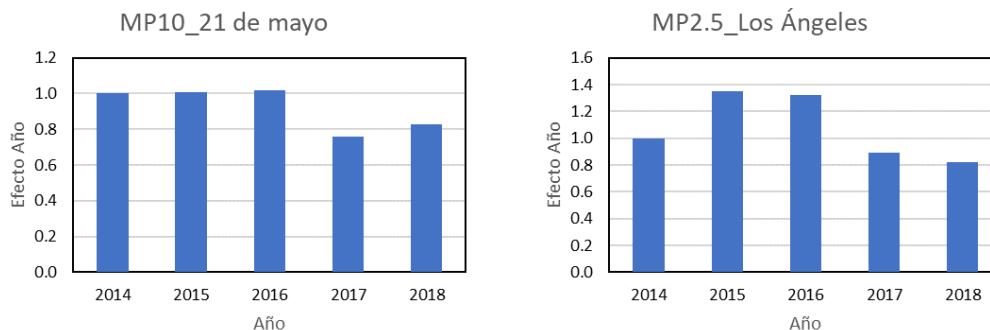


Figura 62: Tendencia anual de concentración estaciones asociadas al Plan de Descontaminación de Los Ángeles.

Respecto de las estaciones del Gran Concepción (región del Bío-Bío) se encuentra una reducción de MP₁₀. No es posible establecer una tendencia para MP_{2,5}, en efecto durante el último año las concentraciones han ido aumentando.

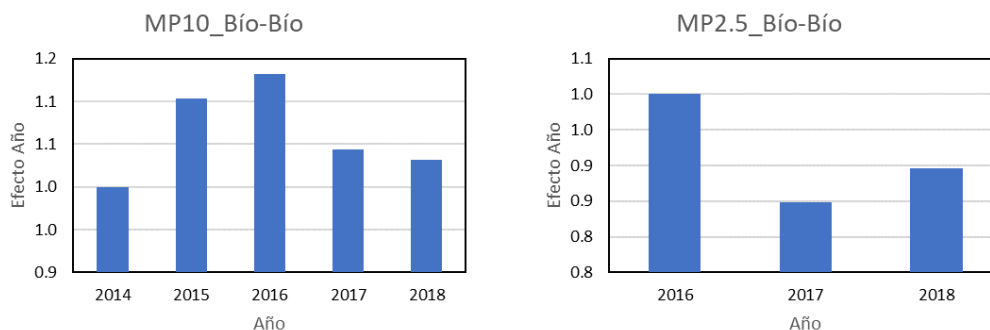


Figura 63: Tendencia anual de concentración estaciones asociadas al Plan de Descontaminación del Gran Concepción.

En la Tabla 33 se entregan los valores de FIC's para es estaciones de la ciudad de los Ángeles y del Gran Concepción. El efecto temporada sigue siendo el que más impacta la concentración de partículas, sin embargo, el incremento es menor que en la región del Ñuble. El incremento en MP_{2,5} en Otoño-Invierno es mayor en la ciudad de Los Ángeles que en el Gran Concepción. La velocidad del viento sigue siendo la siguiente variable meteorológica que más afecta la concentración.

Tabla 33: Factor de Impacto por Concentración obtenido para las diferentes variables categóricas y el parámetro estadístico P significativo cuando es menor a 0.05. Elaboración propia.

Variables	Ciudad de los Ángeles				Gran Concepción			
	MP ₁₀	p	MP _{2.5}	p	MP ₁₀	p	MP _{2.5}	p
P-V	1	0	1	0	1	0	1	0
O-I	1.66	<2e-16	2.27	<2e-16	1.43	<2e-16	1.94	<2e-16
Lunes	1	0	1	0	1	0	1	0
Martes	1.06	0.18	0.97	0.7	1.1	0.05	1.07	0.37
Miércoles	1.04	0.33	1.04	0.59	1.03	0.58	0.99	0.87

	<i>Ciudad de los Ángeles</i>				<i>Gran Concepción</i>			
Jueves	1.05	0.28	0.97	0.67	1.03	0.52	1.01	0.89
Viernes	1.05	0.25	1.02	0.82	1.04	0.4	1.02	0.85
Sábado	0.94	0.2	0.9	0.13	0.89	0.01	0.98	0.83
Domingo	0.81	0	0.82	0	0.86	0	0.94	0.45
HR>=70	1	0	1	0	1	0	1	0
HR<70	1.23	0	0.92	0.09	1.44	<2e-16	0.99	0.81
T<=20	1	0	1	0	1	0	1	0
T>20	1.28	0	1.02	0.72	1.19	0	1.2	0.01
VV>1.6	1	0	1	0	1	0	1	0
0.8<VV<1.6	1.76	<2e-16	1.92	<2e-16	1.25	0	1.3	0
VV<0.8	3.59	<2e-16	4.35	<2e-16	1.34	0	1.45	0

Región de La Araucanía

Para la región de La Araucanía se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 34. Donde la estación Padre Las Casas fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración serán descritos en comparación a la estación Padre Las Casas, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 34. Lista de estaciones correspondientes a la región de La Araucanía pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Padre Las Casas 2: Las Encinas Temuco 3: Museo Ferroviario	Padre Las Casas

En la Figura 64, la distribución espacial indica que la estación Padre Las Casas es la mayor impactada por MP₁₀ y MP_{2,5} seguida de Las Encinas Temuco y Museo Ferroviario, esta variable es estadísticamente significativa para todos los sitios y fracciones. La tendencia Anual indica un aumento en los niveles de contaminación desde el 2014 al 2016, una disminución en el 2017 y un nuevo aumento para el año 2018 tanto por MP₁₀ y MP_{2,5}, esta variable resultó estadísticamente para todos los años en ambas fracciones. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el MP_{2,5} alcanza hasta 4 veces el nivel de referencia y el MP₁₀ aumenta al doble, esta variable resultó estadísticamente significativa para ambas fracciones. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos, sin embargo, solo resultó significativa estadísticamente para el domingo en ambas fracciones. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma, esta variable resultó estadísticamente significativa para

ambas fracciones, al igual que la humedad relativa, que indica que a una humedad mayor al 70% el factor de impacto aumenta.

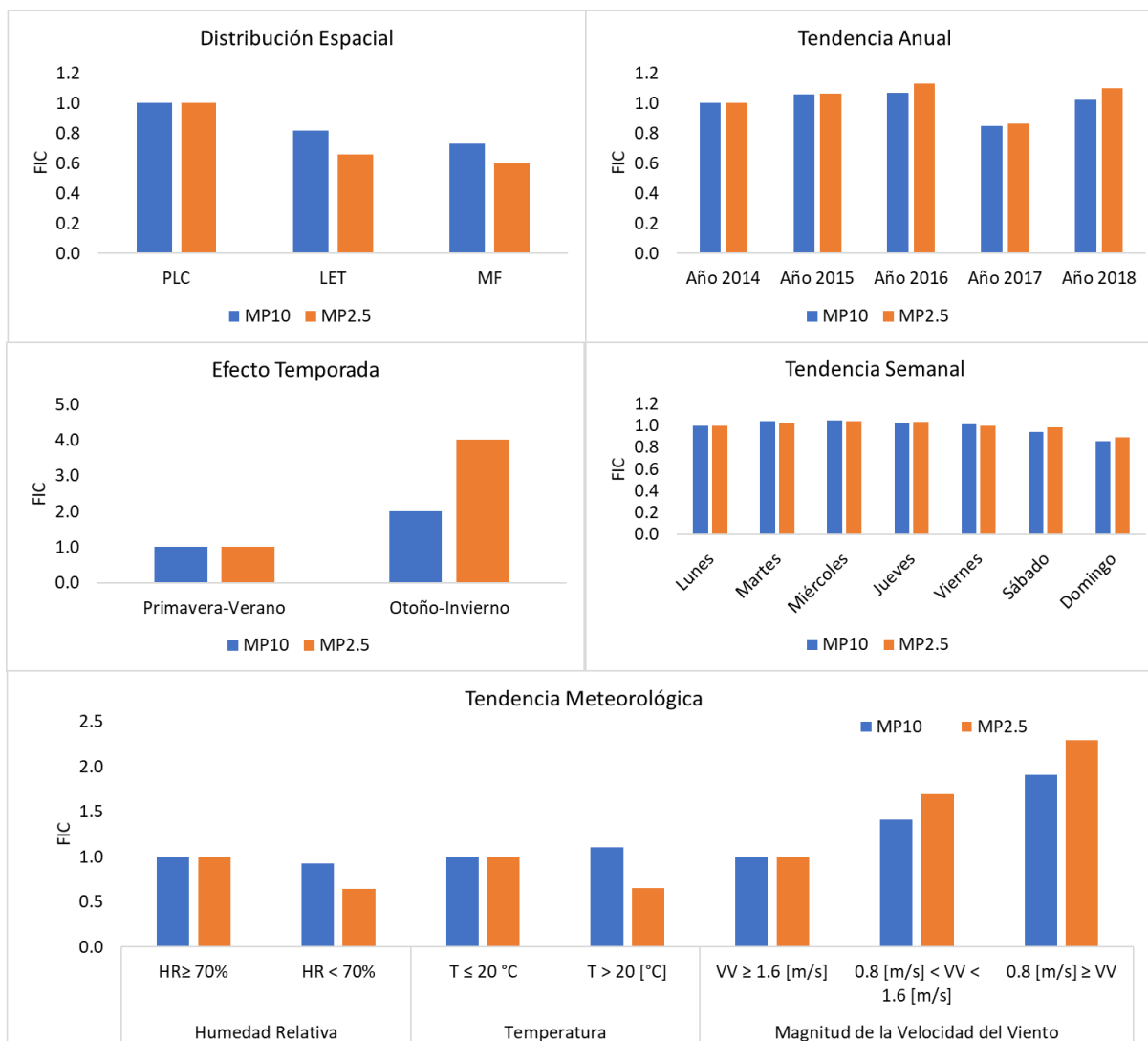


Figura 64. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región de La Araucanía, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Región de Los Ríos

Para la región de Los Ríos se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 35. Donde la estación Valdivia I es la única que cuenta con los datos suficientes para realizar el análisis FIC por lo que no se considera el análisis de distribución espacial, además, las otras variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 35. Lista de estaciones correspondientes a la región de Los Ríos pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Valdivia I	Valdivia I

En la Figura 65 la tendencia Anual indica un aumento en los niveles de contaminación desde el 2014 al 2015, y luego una disminución hasta el 2018 tanto para MP_{10} y $MP_{2,5}$, esta variable resulta estadísticamente significativa para todos los años en ambas fracciones. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el $MP_{2,5}$ alcanza hasta 2.5 veces el nivel de referencia y el MP_{10} aumenta al doble, esta variable resulta estadísticamente significativa para ambas fracciones. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos e indican un máximo los miércoles, sin embargo, esta variable no resulta estadísticamente significativa para ningún día. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma, esta variable resulta estadísticamente significativa, y además para humedades relativas mayores a 70% y temperaturas menores a 20 °C se tiene un mayor factor de impacto, estas condiciones se relacionan con condiciones de estancamiento de la capa de inversión térmica, estas dos variables resultan estadísticamente significativas, a excepción de la temperatura en la fracción respirable.

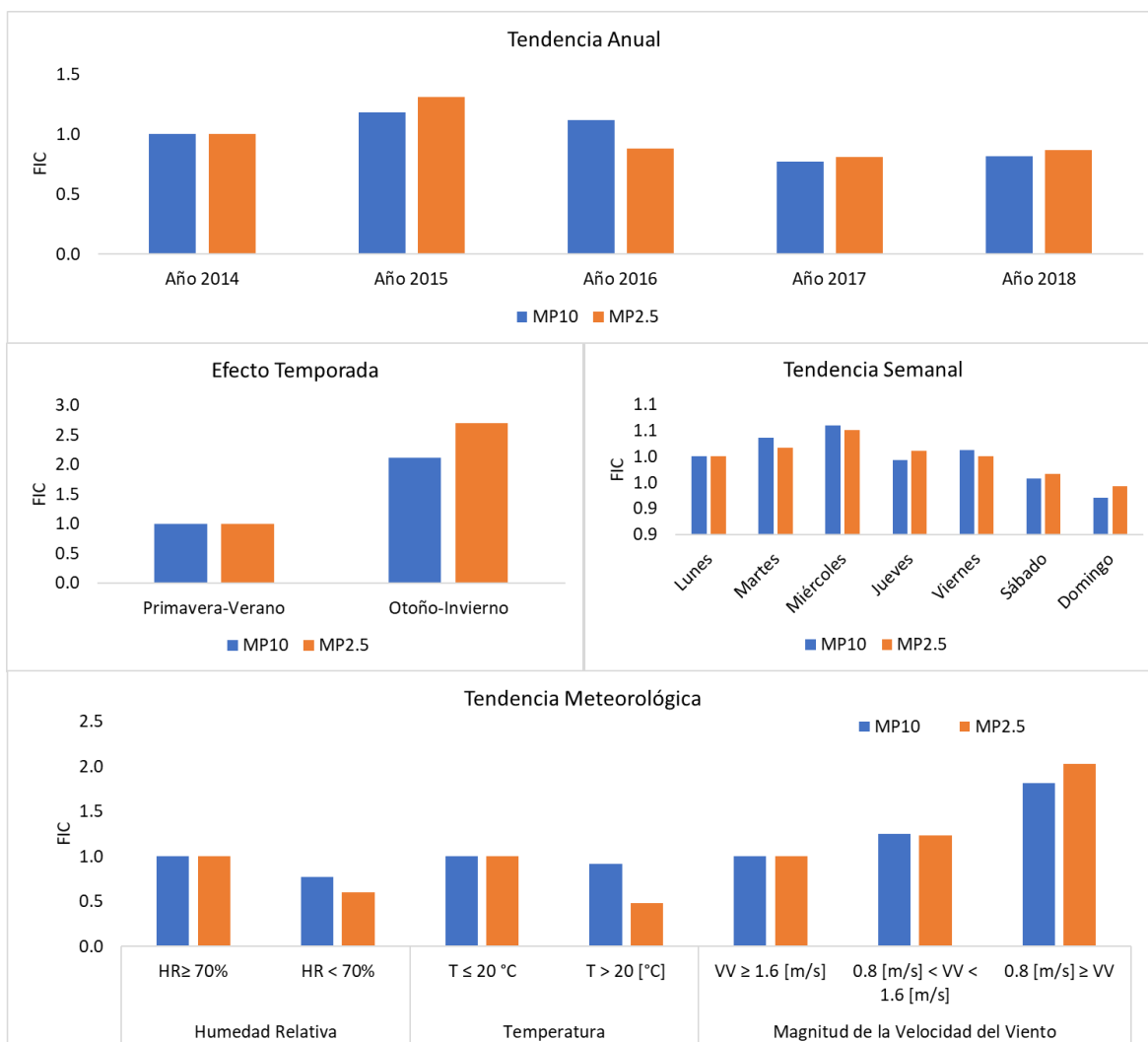


Figura 65. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región de Los Ríos, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico fuente: Elaboración Propia.

Región de Los Lagos

Para la región de Los Lagos se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 36. Donde la estación Alerce fue designada como estación de referencia para MP_{2,5} mientras que la estación Osorno fue designada como referencia para MP₁₀, por lo que los impactos por concentración de cada fracción serán descritos en comparación a la estación Alerce u Osorno, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 36. Lista de estaciones correspondientes a la región de Los Lagos pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Alerce (solo para MP _{2,5}) 2: Mirasol (solo para MP _{2,5}) 3: Osorno	Alerce para MP _{2,5} Y Osorno para MP ₁₀

En la Figura 66, la distribución espacial indica que la estación Alerce es la más impactada por MP_{2,5} mientras que Osorno es la única estación con datos disponibles de MP₁₀, por lo que no se puede establecer una comparación para esta fracción. La tendencia Anual indica una disminución desde el 2014 al 2016 y luego un aumento en los dos años posteriores para ambas fracciones, esta variable resulta estadísticamente significativa para todos los años en ambas fracciones. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el MP_{2,5} alcanza casi 2.5 veces el nivel de referencia y el MP₁₀ aumenta al doble, esta variable resulta estadísticamente significativa para ambas fracciones. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los sábados y domingos, esta variable resulta estadísticamente significativa para los domingos en ambas fracciones, y sábado para el MP₁₀. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma donde resulta ser estadísticamente significativo, y además para humedades relativas mayores a 70% y temperaturas menores a 20 °C se tiene un mayor factor de impacto, estas condiciones se relacionan con condiciones de estancamiento de la capa de inversión térmica, estas dos variables solo resultan ser estadísticamente significativas en la fracción fina.

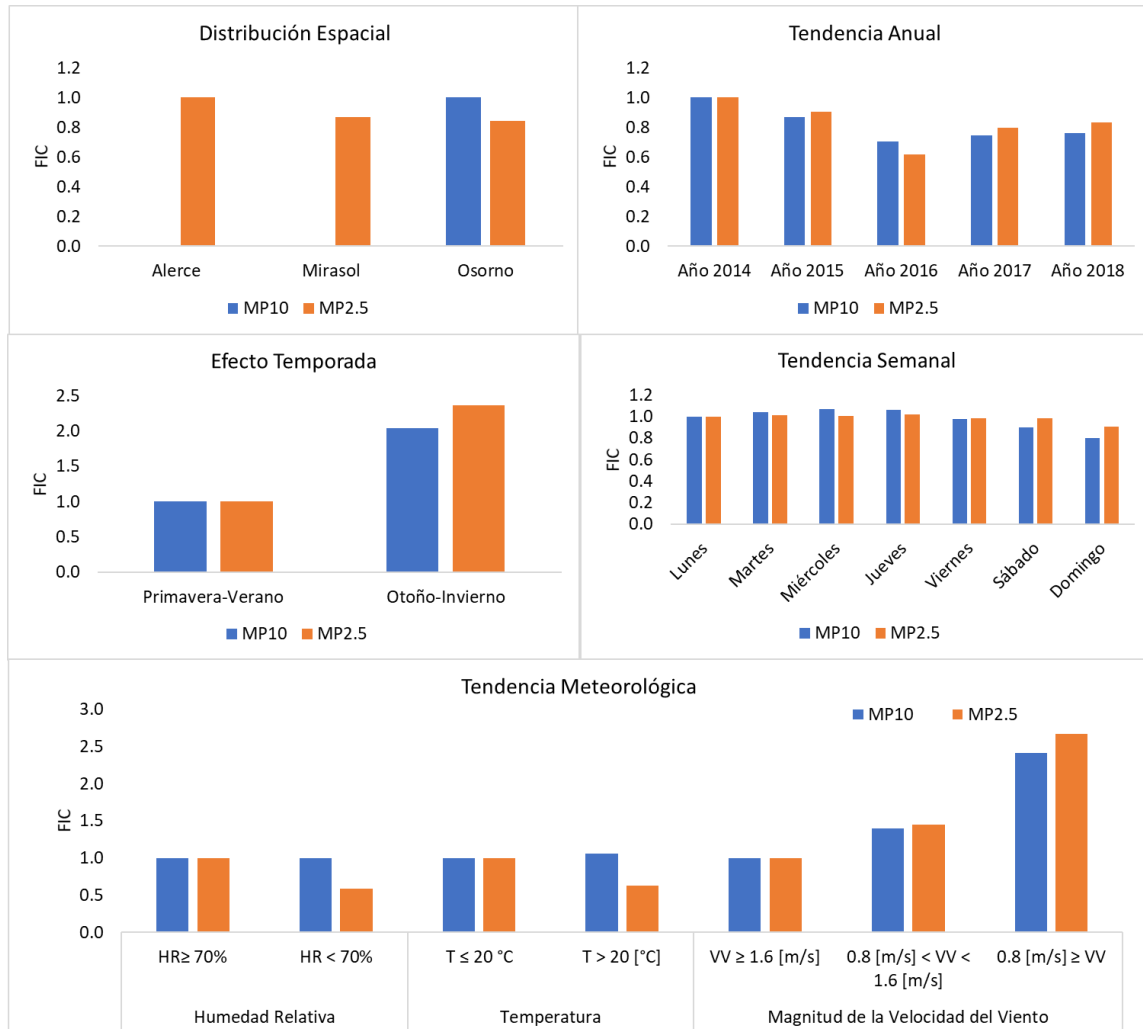


Figura 66. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región de Los Lagos, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Las estaciones de la Región de los Lagos se dividieron en dos áreas, estaciones de Alerce y Mirasol; y estación de Osorno. En ambos casos, a contar del año 2016 es posible evidenciar un aumento en el impacto por concentración.

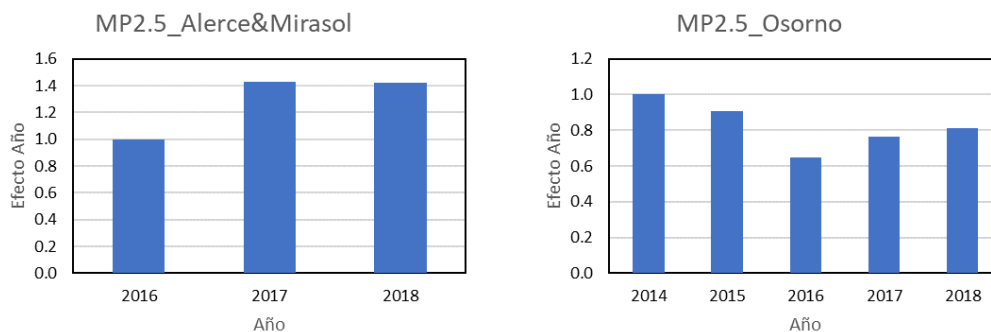


Figura 67: Tendencia anual de concentración estaciones Alerce y Mirasol como conjunto, y Osorno.

Tabla 37: Factor de Impacto por Concentración obtenido para las diferentes variables categóricas y el parámetro estadístico P significativo cuando es menor a 0.05. Elaboración propia.

Variables	Alerce y Mirasol				Osorno			
	MP10	p	MP2.5	p	MP10	p	MP2.5	p
P-V	-----	-----	1	0	1		1	0
O-I	-----	-----	2.02	<2e-16	2.04	< 2e-16	2.76	<2e-16
Lunes	-----	-----	1	0	1		1	0
Martes	-----	-----	0.99	0.94	1.04	0.47	1.03	0.64
Miércoles	-----	-----	0.97	0.73	1.07	0.19	1.08	0.24
Jueves	-----	-----	0.99	0.9	1.06	0.27	1.08	0.25
Viernes	-----	-----	0.9	0.25	0.98	0.68	1.02	0.8
Sábado	-----	-----	0.95	0.57	0.9	0.05	0.97	0.65
Domingo	-----	-----	0.98	0.85	0.8	0	0.88	0.05
HR>=70	-----	-----	1	0	1		1	0
HR<70	-----	-----	0.67	0	1	0.99	0.6	<2e-16
T<=20	-----	-----	1	0	1		1	0
T>20	-----	-----	0.62	0	1.05	0.65	0.56	0
VV>1.6	-----	-----	1	0	1		1	0
0.8<VV<1.6	-----	-----	1.57	0	1.4	< 2e-16	1.43	0
VV<0.8	-----	-----	2.57	<2e-16	2.41	< 2e-16	2.72	<2e-16

Región de Aysén

Para la región de Aysén se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 38. Donde la estación Coyhaique I fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración serán descritos en comparación a la estación Coyhaique I, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 38. Lista de estaciones correspondientes a la región de Aysén pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Coyhaique I 2: Coyhaique II	Coyhaique I

En la Figura 68, la distribución espacial indica que la estación Coyhaique II es la más impactada por MP_{2,5} mientras que por MP₁₀ ambas estaciones muestran semejante impacto, esta variable resultó ser estadísticamente significativa para ambas fracciones. La tendencia Anual indica una disminución constante desde el 2014 al 2017 para ambas fracciones, sin embargo, en el año 2018 ocurre un

aumento para MP_{10} , esta variable resultó ser estadísticamente significativa para todos los años en ambas fracciones. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el $MP_{2,5}$ alcanza 3 veces el nivel de referencia y el MP_{10} aumenta más de 2 veces, esta variable resultó ser estadísticamente significativa para ambas fracciones. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los domingos, pero no son resultados estadísticamente significativos. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma donde se observa un aumento de 3 veces el FIC de referencia, esta variable resultó ser estadísticamente significativa.

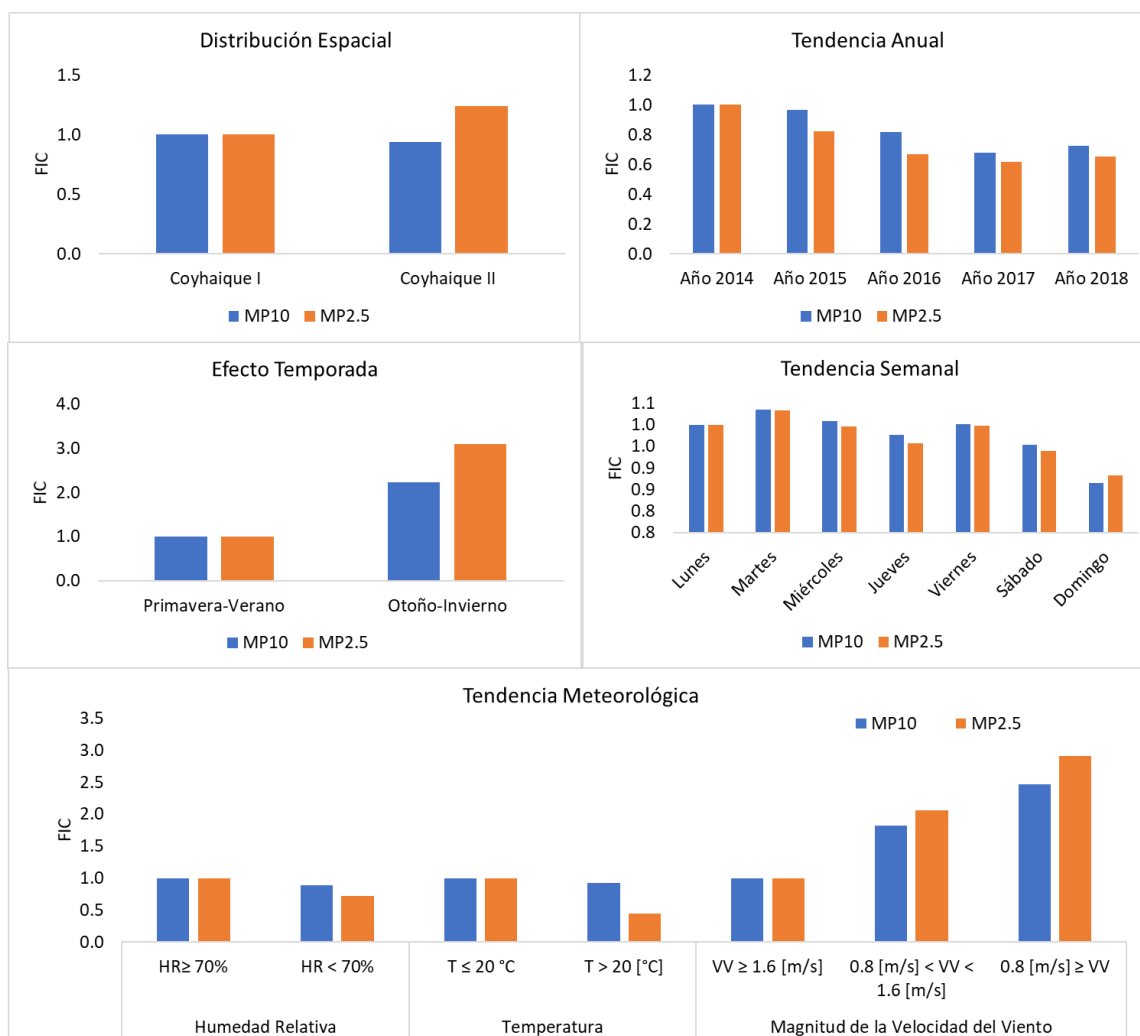


Figura 68. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la región de Aysén, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Para concluir con la sección de FIC regionales, los antecedentes expuestos indican ciertas tendencias de concentración interesantes de ser resumidas:

- a) Para el efecto Año se observa un aumento de las concentraciones el año 2015 para las regiones de O'Higgins hasta el Biobío, y además en general se observa que el año 2018 presenta una tendencia de aumento con respecto al 2017 para ambas fracciones.
- b) Para el efecto temporada se observa en general que el mayor factor de impacto para ambas fracciones se tiene en la temporada Otoño-Invierno, sin embargo, se observa un FIC mayor a partir de la región de La Araucanía, donde el impacto para MP_{2,5} tiende a ser mayor a 2.5 veces el nivel de referencia alcanzándose un máximo de 4 veces para la región de La Araucanía, mientras que el impacto por MP₁₀ tiende a ser mayor a 2.0 veces el nivel de referencia.
- c) Para el efecto día de semana se observa que en general los días sábado y domingo presentan una disminución leve en el factor de impacto.
- d) Para el efecto Meteorológico se observa que la principal variable que afecta al FIC es la velocidad de viento, observándose un mayor factor de impacto cuando la velocidad del viento es menor a 0.8 [m/s], además, desde la región de La Araucanía se observa que las variables Humedad Relativa y Temperatura empiezan a afectar de igual forma el factor de impacto, relacionándose un mayor impacto a humedad relativa > 70% y una temperatura < 20 °C, con una diferencia de hasta 0,5 veces el nivel de referencia.

Región Metropolitana

Adicionalmente en este estudio se decidió incluir un análisis de FIC para los datos continuos de la Región Metropolitana, utilizando la misma metodología y variables categóricas que los FICs regionales. Se analizaron los parámetros meteorológicos y contaminantes de las estaciones descritas en la Tabla 39. Donde la estación Independencia fue designada como estación de referencia, por lo que los impactos por concentración serán descritos en comparación a la estación Independencia, además, las demás variables categóricas analizadas se describen en la Tabla 26 con su respectivo nivel de comparación (referencia).

Tabla 39. Lista de estaciones correspondientes a la región de Aysén pertenecientes al ministerio de medio ambiente incluidas en el análisis del modelo FIC. Elaboración propia.

Variable	Categorización	Referencia
Estación	1: Independencia 2: La Florida 3: Las Condes 4: P. O'Higgins 5: Pudahuel 6: Cerrillos 7: El Bosque 8: Cerro Navia 9: Puente Alto 10: Talagante 11: Quilicura	Independencia

En la Figura 69. Figura 69, la distribución espacial indica que las estaciones Cerrillos, El Bosque y Quilicura son las más impactada por $MP_{2,5}$ y MP_{10} , por otra parte, la estación Talagante es la que menos se encuentra impactada, esto puede tener relación con su ubicación fuera de la zona urbana de Santiago, estas estaciones resultaron estadísticamente significativas. La tendencia Anual indica una disminución constante desde el 2015 al 2018 para ambas fracciones, esta variable resulta estadísticamente significativa para ambas fracciones en todos los años, excepto para el MP_{10} en 2016. El efecto de temporada indica, como es de esperar, que el mayor impacto por concentración se da en época invernal, donde el $MP_{2,5}$ alcanza 2.0 veces el nivel de referencia y el MP_{10} aumenta más de 1.5 veces, esta variable resulta estadísticamente significativa para ambas fracciones. La tendencia semanal indica principalmente que los niveles de concentración disminuyen los domingos sin embargo esta variable no es estadísticamente significativa para ningún día. Finalmente, la Tendencia Meteorológica indica que la velocidad del viento es el parámetro que más influye en los niveles de concentración de contaminación, donde los mayores niveles ocurren cuando existe una velocidad de viento menor a 0.8 [m/s] asociados a vientos de calma donde se observa un aumento de 2 veces el FIC de referencia, esta variable resulta estadísticamente significativa para ambas fracciones.

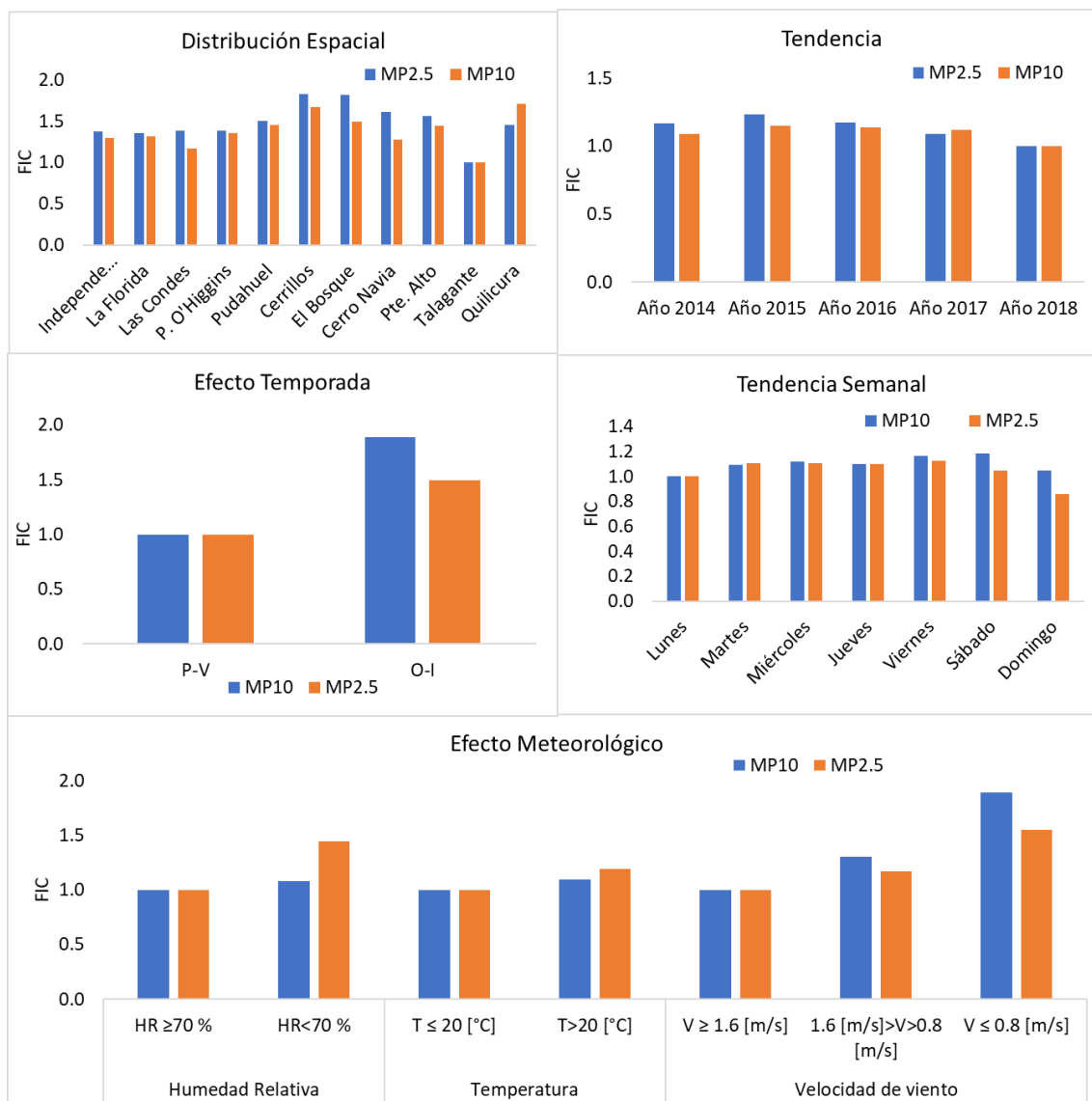


Figura 69. Factor de Impacto por Concentración modelado para las diferentes variables categóricas para la Región Metropolitana, donde se observa el efecto Espacial, Anual, Temporal, Mensual, Semanal y Meteorológico, fuente: Elaboración Propia.

Factores que impactan las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ de las estaciones ubicadas de Rancagua a Coyhaique.

Análisis de factores que impactan las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para las estaciones de monitoreo de Rancagua a Coyhaique, e incorporar resultados obtenidos del análisis de FIC de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para las estaciones de monitoreo de Rancagua a Coyhaique.

En esta sección se toman los resultados de los análisis de Tendencias de las secciones anteriores y se han comparado entre sí los **efectos de Temporada, Semana y Efecto meteorológico**, con la finalidad de identificar y cuantificar los efectos que más impactan en las concentraciones de $MP_{2,5}$ y MP_{10} . En términos generales se puede señalar que los efectos temporada y velocidad del viento son los que más impactan la concentración tanto de MP_{10} como de $MP_{2,5}$. El efecto Temporada se entrega en la Figura 70, y es más significativo para $MP_{2,5}$. El aumento de la concentración de MP_{10} en el período otoño-invierno va desde un 48% en la Región del Bío-Bío hasta un 220% en la Región de Aysén. Los aumentos de impacto por concentración para $MP_{2,5}$ son significativamente mayores, que van desde un 80% en la RM hasta un 400% en la Región de la Araucanía. En general las regiones con mayor cantidad de población y por ende más grandes son las que presentan menores incrementos de concentración. En general, la evaluación del efecto temporada es significativo inclusive descontando el efecto de los parámetros meteorológicos velocidad del viento, temperatura y humedad relativa. Esto refleja que existen otros factores que explican la variabilidad del efecto Temporada en el incremento de concentración en época invernal, entre los que se incluyen altura de la capa de mezcla y movimientos sinópticos de masas de calidad del aire (factores meteorológicos no incluidos en este modelo), y también incremento del impacto de fuentes emisoras estacionales (como la combustión de leña residencial). En efecto, los mayores valores FIC's se encuentran en la Región de la Araucanía (FIC=4) y Aysén (FIC=3,1), donde se espera que la principal fuente emisora es la combustión de biomasa para calefacción residencial.

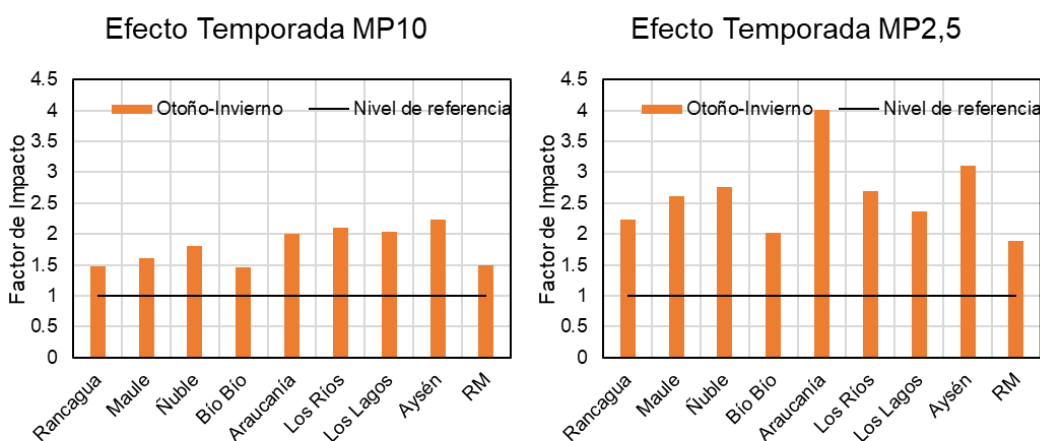


Figura 70: Efecto Temporada para todas las regiones de análisis.

Respecto del efecto semanal (Figura 71), en general en todas las regiones se encuentra un efecto semanal con una reducción durante los fines de semana, sin embargo, el incremento en el impacto es significativamente más bajo en comparación con el efecto temporada (otoño-Invierno Primavera-Verano) y la velocidad del viento (explicado más adelante). El efecto semanal está más influenciado por patrones de flujo vehicular, ya que el FIC es más alto para MP₁₀, y las disminuciones durante los fines de semana son más significativas. Esto se explica debido al hecho que el MP₁₀ contiene la parte gruesa de las partículas principalmente atribuida a la resuspensión de polvo, y por lo tanto se observa mejor el efecto de la disminución del flujo vehicular en los domingos.

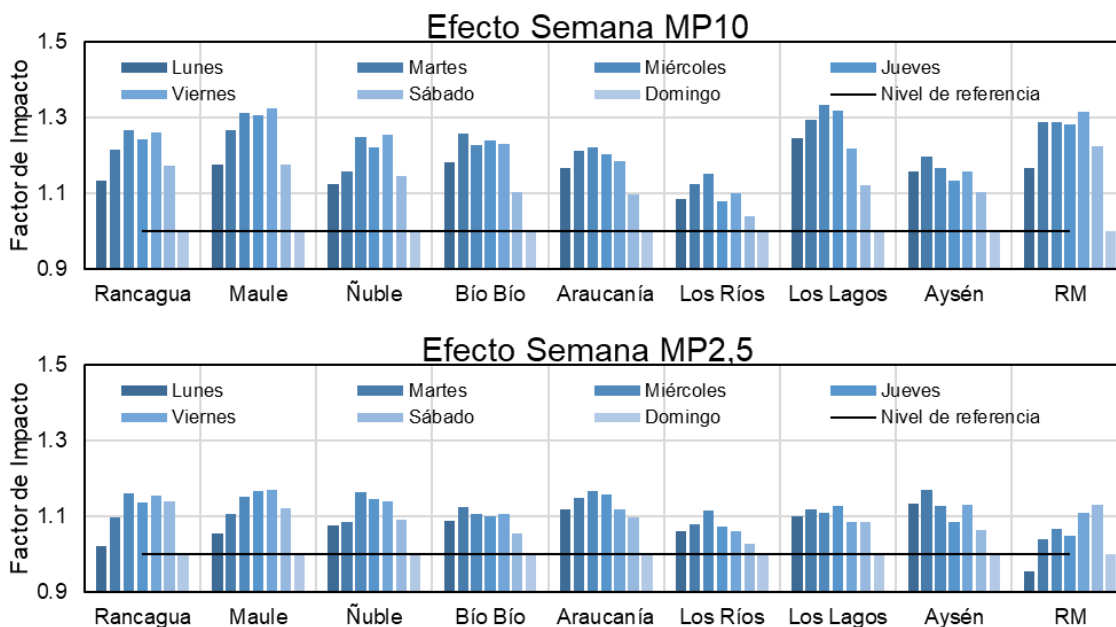


Figura 71: Efecto semanal para todas las regiones de análisis.

Tabla 40: Matriz de correlación (Pearson) entre el efecto Semanal de las diferentes regiones. Celdas destacadas corresponden a valores por sobre 0,8.

		MP ₁₀							
Región	Rancagua	Maule	Ñuble	Bío Bío	Araucanía	Los Ríos	Los Lagos	Aysén	RM
Rancagua	1,00	0.99	0.98	0.90	0.90	0.82	0.84	0.83	0.99
Maule		1.00	0.97	0.94	0.93	0.84	0.88	0.85	0.98
Ñuble			1.00	0.85	0.86	0.78	0.80	0.76	0.94
Bío Bío				1.00	0.99	0.89	0.95	0.94	0.91
Araucanía					1.00	0.93	0.98	0.94	0.89
Los Ríos						1.00	0.90	0.91	0.79
Los Lagos							1.00	0.88	0.82
Aysén								1.00	0.86
RM									1.00

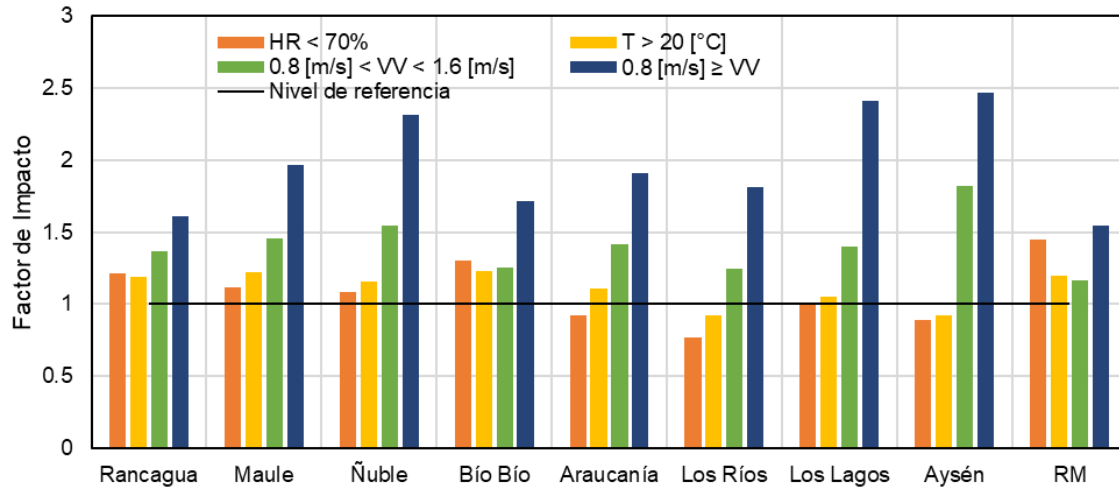
MP _{2,5}									
Rancagua	1,00	0,96	0,88	0,59	0,68	0,57	0,60	0,38	0,84
Maule		1,00	0,95	0,72	0,79	0,66	0,72	0,49	0,69
Ñuble			1,00	0,78	0,87	0,82	0,78	0,57	0,49
Bío Bío				1,00	0,93	0,88	0,90	0,94	0,17
Araucanía					1,00	0,91	0,97	0,81	0,22
Los Ríos						1,00	0,81	0,79	0,07
Los Lagos							1,00	0,80	0,17
Aysén								1,00	0,02
RM									1,00

Respecto del efecto meteorológico (Figura 72) la variable que más afecta es la de velocidad del viento. La concentración de MP_{2,5} es en promedio 2 a 3 veces aproximadamente más alta cuando la velocidad del viento es baja (mejor a 0,8 m/s). Como se mencionó anteriormente, una menor velocidad del viento tiene relación con menor capacidad de dispersión atmosférica y los menores FIC's se obtienen con velocidades de viento más altas, que ocurren en momentos en donde existe una limpieza (o "barrido") de las masas de aire contaminadas fuera de cada ciudad.

Respecto de la Humedad Relativa y Temperatura, hay algunas diferencias que se obtienen entre las diferentes regiones, especialmente en los impactos por MP_{2,5}. La RM, Rancagua y Bío-Bío si bien presentan impactos estadísticamente significativos, no son muy altas respecto de sus niveles de referencia. Por el contrario, la Región del Ñuble, Maule, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén sí muestran mayores variaciones de FIC. En todas ellas, temperaturas menores que 20° y humedad relativa mayores que 70% muestran mayor impacto por concentración. Usualmente, temperaturas muy bajas correlacionan con días de inversión térmica radiativos particularmente severos, ya que ayudan a enfriar más rápidamente la superficie terrestre y las primeras capas atmosféricas. En estos días, las bajas temperaturas también favorecen el incremento de la magnitud (contribución) de las emisiones de calefacción a Leña para calefacción para satisfacer necesidades de confort en las residencias. Esto es especialmente importante en ciudades donde la quema de leña es la principal fuente emisora (La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén).

La humedad y temperatura tienen un efecto leve y relativamente constante en todas las regiones, sin embargo, las menores velocidades de viento presentan los FICs más altos, especialmente en la Región de Aysén, Los Lagos y Ñuble que muestran FIC > 2 para MP₁₀. El efecto meteorológico en los FIC de MP_{2,5} es mayor que MP₁₀ en todas las regiones.

Efecto Meteorológico MP10



Efecto Meteorológico MP2,5

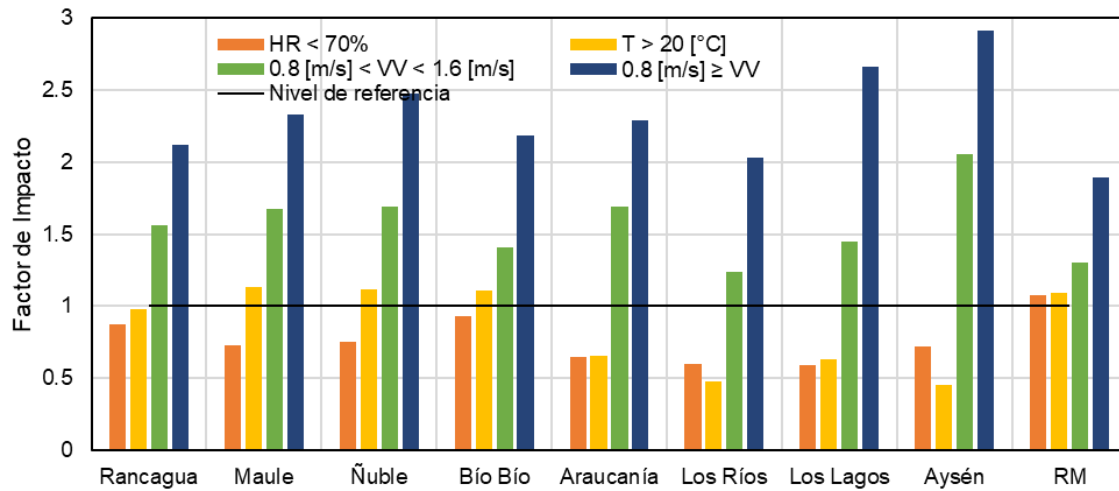


Figura 72: Efecto meteorológico para todas las regiones de análisis.

Realizar un análisis fisicoquímico de los filtros históricos de MP fino y grueso entre los períodos comprendidos entre agosto de 2014 a diciembre 2018, para la estación Parque O'Higgins.

De las 1106 muestras recibidas por CMM, se enviaron a análisis XRF 678 filtros, que corresponden a 6 filtros blancos, 365 filtros de fracción fina y 313 de fracción gruesa. En esta sección se entregan los resultados de los análisis químicos de forma comparativa con los resultados históricos disponibles, con la finalidad de evaluar el nivel de concentración alcanzado respecto de la información histórica.

Análisis de la concentración de elementos

La concentración de elementos en las muestras de MP fue calculada conforme con las siguientes ecuaciones.

$$C_t = C_c + C_g$$

$$C_f = \frac{M_f}{V_f}$$

$$C_c = \frac{M_c}{V_t} - \frac{V_c}{V_t} C_f$$

Donde C_t es la concentración de MP total (MP_{10}), C_c concentración de MP grueso ($MP_{2,5-10}$), C_f es la concentración de MP fino ($MP_{2,5}$), M_c es la masa del filtro fino y M_f masa del filtro grueso, V_f es el volumen fino, y V_c el volumen grueso.

En el ANEXO III de este informe se entregan las series de tiempo de concentración elemental de los principales elementos analizados en los filtros, como gráficos de cajas. Las series de tiempo están construidas siguiendo la metodología presentada por (Koutrakis et al., 2005), esto es diferenciadas por período frío y período cálido. Esto se hace así debido a que en los meses fríos (abril-septiembre) las concentraciones de $MP_{2,5}$ son significativamente superiores a las concentraciones de los meses cálidos (octubre-marzo). Esto permite evaluar de una manera más clara la variación estacional de concentración de partículas y elementos en la serie de tiempo. En la figura siguiente se entrega una ilustración que ejemplifica como fue catalogado los períodos de monitoreo.

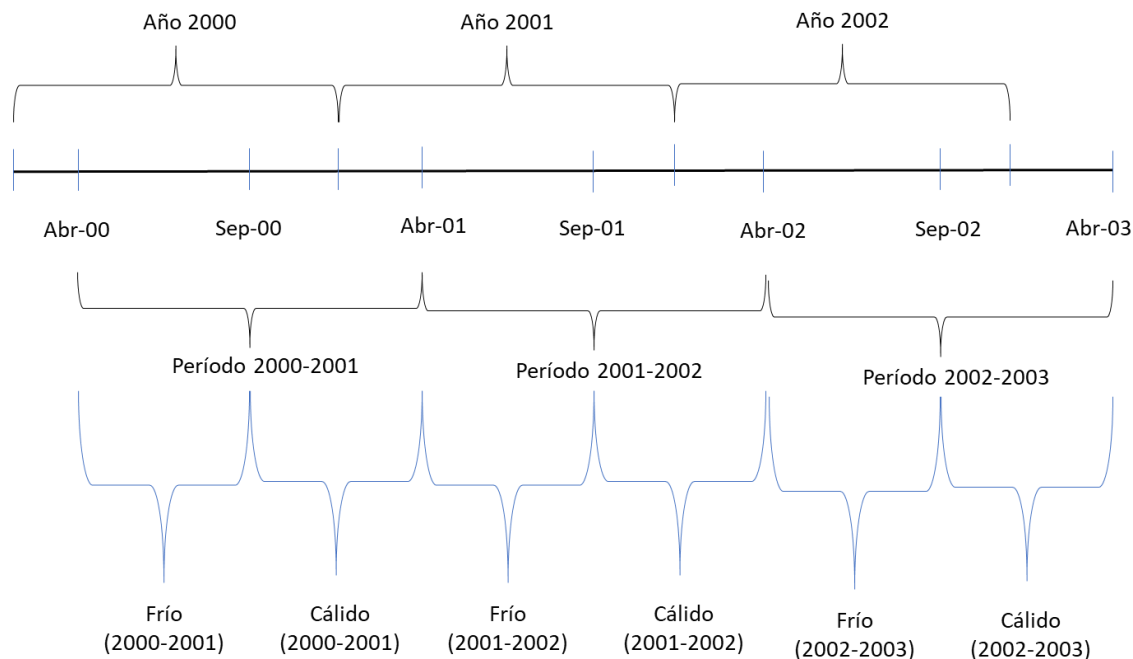


Figura 73: Esquema de categorización de periodos anuales diferenciados por periodos fríos y cálidos. Elaboración propia.

En la Figura 74 se entrega la serie de tiempo de concentración de $MP_{2,5}$ como gráficos de caja y bigotes para cada temporada, con la finalidad de observar la distribución de los datos a lo largo de cada período. Las concentraciones han ido disminuyendo al observar toda la serie, sin embargo, considerando solo los periodos fríos es posible aislar dos quiebres de tendencia, el primero en el 2007-2008, el segundo el 2015 -2016. En efecto las concentraciones invernales tienden a presentar valores más altos en los últimos 4 periodos (2015-2018) con relación a los periodos anteriores (2011-2014).

La tendencia de la relación frío/cálido de la concentración de $MP_{2,5}$ se entrega en la Figura 75. Es posible identificar que las concentraciones invernales al inicio de la serie eran cerca de 3 veces las que presentaba el período estival, que ha disminuido a 2,5 veces, indicando que las medidas implementadas efectivamente han tenido un impacto mayor en los periodos invernales.

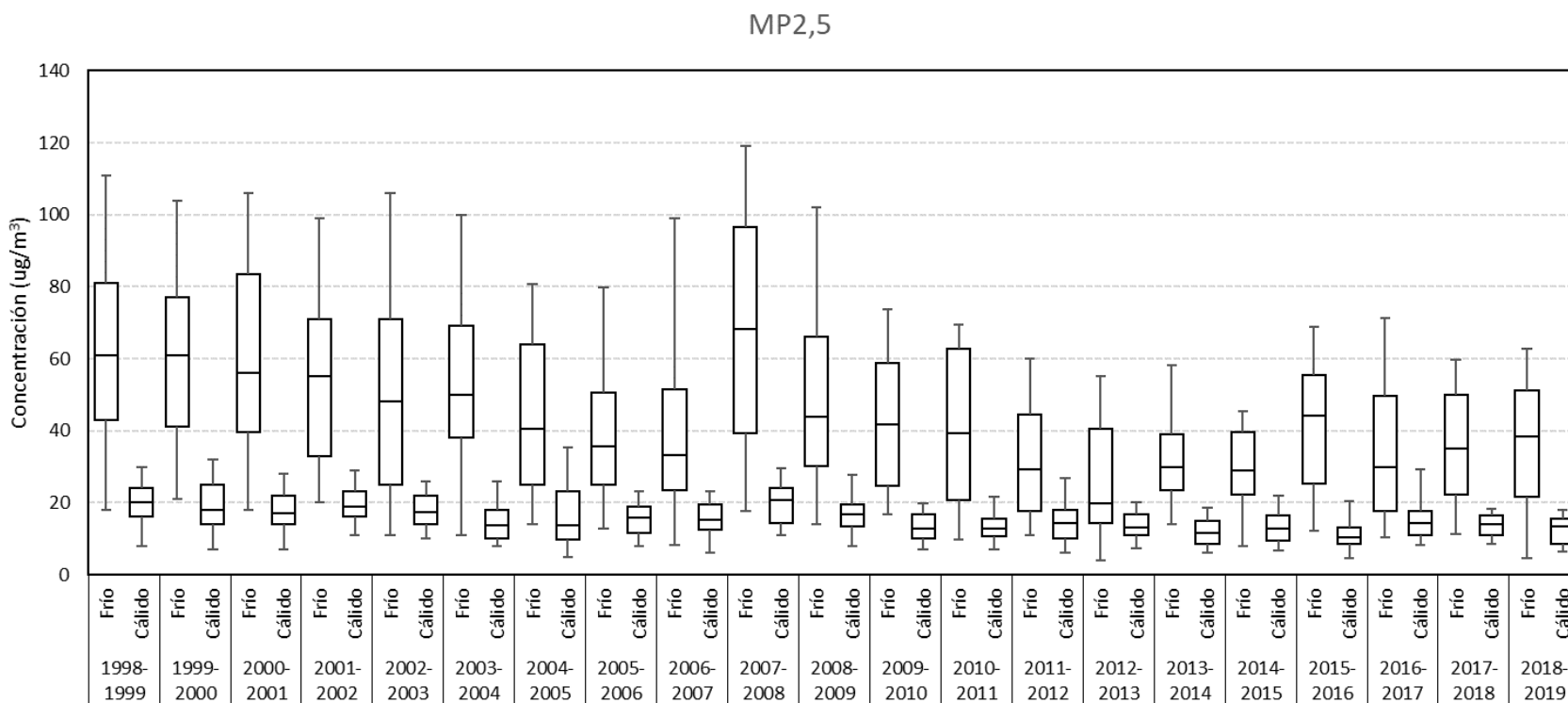


Figura 74: Gráficos de caja y bigotes para MP_{2,5} por período.

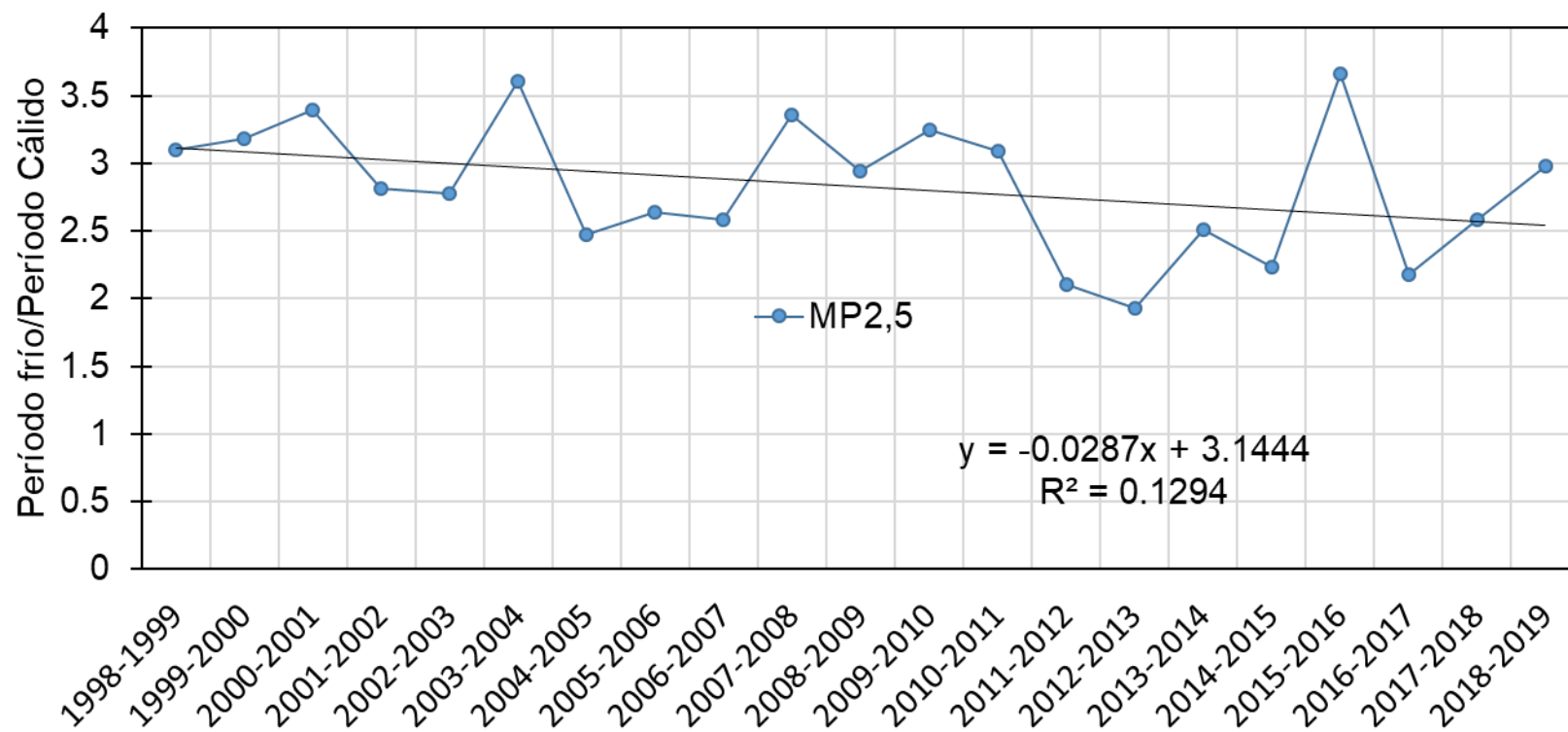


Figura 75: Relación entre los valores promedio de concentración de MP_{2,5} del período frío y cálido.

En la Tabla 41 se puede observar que los promedios de concentración de elementos determinados en el período 2014-2018 se encuentran dentro de los órdenes de magnitud de los registros históricos. En general todos los elementos presentan mayor concentración durante el período frío respecto del cálido, especialmente S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Br, Pb. La mayoría de estos elementos tiene relación con fuentes de tráfico vehicular, combustión de biomasa y combustibles fósiles. Existen otros elementos que presentan mayores concentraciones en el período cálido, especialmente el Na, y con menor extensión el Mg y el Al. Estos elementos fueron atribuidos por Moreno et al., a la influencia predominante de fuentes naturales, especialmente a sales marinas.

En la Tabla 42 se entrega un resumen estadístico de los resultados de análisis químicos de los principales análisis elementos determinados en la fracción gruesa del MP, comparando el análisis con la información histórica previa recopilada.

Tabla 41: Promedios de concentración de elementos en MP_{2,5} por cada temporada. INV indica período inválido por contar menos del 75% de completitud. Elaboración propia.

Período anual	Temporada	ug/m3	ng/m3																	
		MP2,5	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Pb
1998 , 1999	Frío	63	INV	INV	130.8	344.6	2136.1	406.3	436.8	182.6	INV	INV	7.2	32.5	454.3	4.6	50.2	205.2	188.3	602.8
	Cálido	20	208.8	42.2	142.6	395.2	1041.2	147.4	253.7	124.4	INV	INV	INV	9.1	219.5	INV	22.7	52.8	26.9	117.0
1999 , 2000	Frío	61	INV	INV	101.0	306.4	1778.4	550.5	373.1	145.5	INV	INV	6.3	21.9	381.0	2.8	54.3	110.8	103.2	323.1
	Cálido	19	185.7	40.0	127.1	354.8	1003.1	132.3	270.1	114.2	INV	INV	INV	7.6	205.5	INV	21.7	40.4	14.4	64.6
2000 , 2001	Frío	63	INV	INV	108.2	355.6	1788.3	INV	391.2	154.1	INV	INV	9.3	26.6	457.6	INV	57.5	128.7	51.1	271.6
	Cálido	19	257.3	INV	105.4	340.0	1121.4	INV	220.7	104.9	INV	INV	INV	11.2	212.7	INV	21.5	49.9	7.2	61.5
2001 , 2002	Frío	57	INV	INV	62.6	223.4	1746.4	INV	355.2	124.7	INV	INV	10.4	28.0	379.7	2.5	49.0	129.5	18.1	70.3
	Cálido	20	INV	INV	106.2	335.7	1069.1	INV	296.1	105.6	INV	INV	3.9	9.5	194.9	INV	15.4	39.0	4.6	18.6
2002 , 2003	Frío	52	INV	INV	63.4	200.8	1192.5	INV	288.0	109.7	INV	INV	6.5	19.0	329.0	INV	28.3	89.6	18.4	40.7
	Cálido	19	INV	INV	69.6	221.8	829.7	INV	272.5	74.7	INV	INV	INV	6.5	139.3	INV	12.0	37.9	3.9	14.3
2003 , 2004	Frío	56	INV	INV	92.9	267.7	1244.4	226.0	341.8	128.6	INV	INV	5.8	22.8	369.6	INV	33.6	100.8	16.4	38.9
	Cálido	15	318.2	70.2	163.2	313.8	860.2	40.6	338.6	108.0	12.7	INV	2.1	9.7	208.9	INV	14.9	39.8	4.4	11.5
2004 , 2005	Frío	45	236.6	53.3	130.0	264.0	1152.6	229.3	347.3	156.0	16.9	INV	5.1	27.7	469.8	1.2	37.5	128.4	18.7	44.8
	Cálido	18	380.9	67.8	161.4	298.4	788.5	46.3	275.6	103.1	12.1	INV	1.8	9.1	206.1	INV	12.6	45.3	3.7	11.0
2005 , 2006	Frío	42	257.1	59.7	141.2	282.5	1067.8	205.4	367.5	153.5	17.0	1.1	5.3	25.6	488.3	1.6	48.8	127.6	15.1	44.9
	Cálido	16	354.0	71.7	168.0	336.9	926.8	43.5	216.9	117.8	13.4	INV	2.3	10.6	233.2	INV	16.8	41.2	4.0	14.3
2006 , 2007	Frío	42	282.1	64.7	128.5	262.9	1643.9	272.1	367.7	151.1	16.0	2.9	5.3	27.8	454.8	3.4	40.9	114.0	17.7	48.8
	Cálido	16	166.1	42.2	99.8	229.7	874.6	61.0	213.9	117.7	14.3	1.8	1.9	10.8	223.6	INV	16.2	42.4	2.9	10.3
2007 , 2008	Frío	70	161.7	48.2	168.1	419.5	1346.1	393.1	550.5	314.7	32.4	5.7	8.5	46.3	804.8	4.0	48.9	147.3	17.5	47.6
	Cálido	21	434.6	46.7	167.0	393.6	1178.0	53.8	277.5	143.9	15.1	3.6	2.0	11.8	235.5	1.4	17.7	42.1	4.2	14.4
2008 , 2009	Frío	51	269.2	INV	167.6	455.5	1216.1	260.6	444.4	249.8	21.5	5.6	6.1	32.5	499.3	3.8	39.4	118.0	13.1	41.8
	Cálido	17	463.3	INV	142.7	331.8	1130.8	37.8	318.3	125.6	13.4	2.0	2.6	12.0	215.8	INV	15.8	44.3	4.1	14.9
2009 , 2010	Frío	44	281.8	INV	140.3	328.7	1163.5	306.1	381.3	220.5	18.1	1.9	5.6	33.3	450.8	INV	31.3	90.9	11.1	32.7
	Cálido	13	301.2	INV	110.2	279.8	606.7	68.9	220.2	101.9	10.9	1.3	2.5	11.7	189.0	INV	14.9	42.6	3.8	19.6

Período anual	Temporada	ug/m3	ng/m3																	
		MP2,5	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Pb
2010-2011	Frío	41	292.6	INV	145.9	338.6	1001.1	350.5	375.2	186.4	16.8	INV	4.2	21.8	412.6	INV	58.6	76.6	15.6	40.3
	Cálido	13	277.3	44.4	151.8	285.9	730.8	28.6	202.9	110.7	9.9	1.2	1.7	10.1	193.5	0.9	17.8	30.7	4.8	12.7
2011-2012	Frío	33	137.0	42.2	182.0	371.9	779.0	209.5	298.4	209.4	18.6	1.8	3.7	22.6	427.5	1.6	31.8	70.2	10.0	29.5
	Cálido	16	315.1	50.5	278.0	617.3	752.6	63.4	308.9	149.4	15.1	1.4	1.7	11.7	252.5	INV	17.9	25.8	4.7	11.4
2012-2013	Frío	27	121.7	39.1	167.6	343.6	608.5	147.3	256.3	170.6	16.3	1.6	3.3	19.4	361.7	INV	25.9	50.2	10.2	21.8
	Cálido	14	243.5	59.8	165.8	317.9	843.6	21.4	186.7	120.2	11.2	1.8	INV	9.5	197.7	INV	10.8	25.2	3.7	10.6
2013-2014	Frío	33	125.0	50.1	203.3	408.1	725.0	144.9	308.1	200.3	19.0	2.6	3.6	19.4	418.6	INV	25.9	59.7	11.7	19.5
	Cálido	13	271.8	58.2	163.8	322.1	647.1	56.0	159.7	129.5	11.3	INV	INV	9.6	196.6	INV	7.9	22.1	4.3	INV
2014-2015	Frío	31	154.8	56.8	173.9	331.5	769.7	140.3	255.6	176.5	16.3	1.7	3.2	14.7	332.2	INV	21.6	42.5	11.1	18.4
	Cálido	14	256.9	60.0	187.0	311.8	649.8	37.7	221.2	136.7	15.3	INV	10.3	10.6	237.3	1.9	10.7	25.2	6.3	12.2
2015-2016	Frío	41	127.6	50.0	193.9	362.3	574.6	165.5	351.2	238.9	23.7	INV	6.4	23.1	518.3	2.5	28.4	76.3	13.6	26.6
	Cálido	11	172.4	41.2	91.3	139.6	608.5	9.8	147.6	63.0	8.4	INV	INV	5.7	124.3	1.8	7.6	20.7	7.8	11.4
2016-2017	Frío	35	111.9	INV	77.3	129.2	658.9	103.1	235.1	73.6	11.3	INV	3.0	16.2	293.8	2.3	18.5	60.4	11.7	30.2
	Cálido	16	305.9	66.3	180.8	299.7	611.7	34.6	220.8	135.5	14.9	1.5	2.1	11.0	229.2	1.8	8.9	26.8	7.6	11.6
2017-2018	Frío	36	158.3	62.5	240.0	442.8	659.9	111.5	285.1	246.7	29.3	INV	4.2	22.2	595.1	2.6	32.5	80.7	12.7	28.2
	Cálido	14	369.6	75.1	215.5	372.9	681.0	47.2	158.4	163.4	18.5	INV	2.0	8.8	256.9	1.8	8.8	25.8	6.0	12.3
2018-2019	Frío	37	157.3	56.6	219.1	403.2	688.3	202.0	291.8	231.3	27.5	1.4	5.2	23.1	599.5	2.7	31.6	86.2	11.5	26.1
	Cálido	13	298.5	62.0	142.5	233.3	509.2	74.9	141.1	114.1	14.8	INV	2.6	9.3	208.3	1.9	11.0	34.2	6.3	11.7

Tabla 42: Promedios de concentración de elementos en MP grueso por cada temporada. INV indica período inválido por no existir muestras para análisis. Pend indica muestras que están pendientes de análisis químicos. Elaboración propia.

Período	Temporada	ug/m3	ng/m3																		
		Mp	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
2008-2009	Frío	34	INV	INV	1111.6	3750.4	14.2	323.0	261.2	445.9	1655.5	157.6	3.0	22.6	46.4	1894.9	INV	1.7	34.8	63.6	15.5
	Cálido	44	165.2	INV	1252.3	4106.5	7.5	367.9	589.8	478.5	1363.4	155.8	2.6	9.4	47.7	1834.9	INV	1.2	30.5	70.5	10.3
2009-2010	Frío	46	111.5	INV	1234.8	4272.5	25.9	412.7	247.8	510.1	2082.4	183.1	3.1	27.7	58.3	2485.2	INV	1.9	59.8	84.2	18.0
	Cálido	31	90.0	INV	1012.3	3230.2	8.2	221.0	547.1	397.5	1054.1	120.1	2.3	5.3	36.7	1418.4	INV	INV	20.1	30.7	7.5
2010-2011	Frío	43	255.5	159.0	1395.7	4195.5	16.9	354.8	274.5	495.0	1872.6	174.9	2.5	17.7	53.1	2326.4	3.2	1.5	52.2	76.7	16.0
	Cálido	29	366.8	169.2	1390.1	2969.6	10.2	213.1	437.6	350.1	1062.1	107.4	1.9	3.8	34.5	1380.5	2.6	0.9	28.9	40.7	7.3
2011-2012	Frío	39	232.0	200.2	1748.7	3895.4	21.1	305.5	249.0	451.1	1885.5	160.0	3.9	12.6	50.5	2246.5	4.9	1.5	56.9	71.5	15.1
	Cálido	38	426.2	187.8	1857.7	4120.9	12.4	232.5	468.8	468.3	1311.2	135.2	2.4	3.7	43.7	1714.6	3.6	1.0	27.6	34.2	6.7
2012-2013	Frío	38	233.5	183.1	1664.4	3698.5	16.5	271.8	227.4	423.6	1671.6	151.0	3.3	8.8	46.9	2055.8	4.7	1.4	51.4	59.2	12.9
	Cálido	33	392.1	208.3	1626.9	3525.3	12.0	238.8	459.3	412.5	1266.1	127.1	2.8	3.5	40.0	1640.8	3.8	1.0	25.1	33.6	7.3
2013-2014	Frío	46	220.8	229.8	2002.1	4481.5	18.8	317.0	215.3	522.7	2051.8	187.4	4.1	12.5	57.3	2564.6	5.7	1.6	51.6	68.1	13.6
	Cálido	29	371.8	201.0	1484.0	3188.3	10.9	206.7	512.4	380.7	1191.5	115.6	2.3	3.8	35.7	1462.0	3.1	0.9	17.7	24.5	5.9
2014-2015	Frío	36	285.1	214.3	1704.8	3815.8	17.0	285.9	281.8	420.7	1784.7	149.2	3.0	7.7	44.6	2035.8	4.9	1.5	42.3	46.4	11.9
	Cálido	37	379.2	209.1	1664.8	3556.3	9.8	199.2	378.6	396.2	1449.8	149.7	3.1	4.6	44.2	1805.6	3.6	1.8	21.7	29.2	8.4
2015-2016	Frío	59	289.8	286.9	2282.2	5053.8	23.1	311.0	239.2	559.5	2851.3	239.7	4.6	13.2	67.8	3230.1	7.0	2.5	65.6	77.8	15.1
	Cálido	35	388.7	185.3	1416.8	3052.7	7.6	201.5	401.6	341.2	1314.3	129.2	2.4	3.5	36.4	1552.9	3.2	1.4	21.4	29.2	7.5
2016-2017	Frío	30	205.7	157.6	1184.4	2677.1	9.1	240.2	144.8	289.5	1446.9	134.0	2.8	6.9	35.6	1809.9	4.1	1.5	41.2	51.0	10.5
	Cálido	36	508.0	297.2	2312.7	4967.8	22.0	259.8	558.0	572.5	2164.8	218.0	4.4	4.8	64.7	2576.6	5.5	1.7	27.9	39.9	10.2
2017-2018	Frío	42	276.2	212.4	1663.9	3736.7	15.4	252.1	184.0	394.3	1955.8	184.2	3.4	7.9	48.0	2372.2	4.9	1.9	48.9	64.8	14.4
	Cálido	39	440.9	210.0	1547.6	3279.4	9.4	196.7	475.9	369.2	1345.8	141.0	2.1	4.2	38.6	1644.3	3.2	1.6	20.7	26.7	10.2
2018-2019	Frío	45	283.0	231.1	1770.3	3913.7	16.9	246.2	223.4	426.2	2033.9	184.8	3.1	8.7	50.4	2439.6	4.8	1.7	51.9	64.5	14.5
	Cálido	29	378.8	173.9	1070.5	2312.7	6.5	160.1	490.1	270.6	1025.0	101.0	1.5	3.6	28.7	1218.7	2.2	1.5	20.0	34.4	10.9

Análisis de tendencia de composición elemental de MP fino y MP grueso usando la metodología de Factor de Impacto por Concentración (FIC)

Metodología estadística

Al igual que en el caso de los datos continuos, la concentración de $MP_{2.5}$, $MP_{2.5-10}$ medida por el método gravimétrico y los elementos derivados del análisis XRF de los mismos fueron analizados mediante un análisis de regresión multivariado siguiendo la metodología de (Sax et al., 2007). La finalidad de aplicar este modelo estadístico es poder explicar la concentración de $MP_{2.5}$ y $MP_{2.5-10}$ y de elementos bajo la modalidad de Factor de Impacto por Concentración (desde ahora en adelante FIC), el cual permite evaluar tendencias de concentración descontando la influencia de variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento en la variabilidad de las concentraciones.

Los valores FIC que entrega el modelo son valores relativos a niveles de referencia definidos a priori durante el análisis de regresión. Los niveles de referencia para las variables meteorológicas fueron los mismos indicados por (Koutrakis et al., 2005; Sax et al., 2007), y como se detalla más adelante.

El modelo estadístico requiere que las variables explicativas estén expresadas como variables categóricas como lo describe la siguiente ecuación:

$$\ln[MP_{10}] = \alpha + \sum \beta_{snj} * snj + \sum \beta_{aj} * aj + \sum \beta_{mj} * mj + \sum \beta_{HRj} * HRj + \sum \beta_{Tj} * Tj + \sum \beta_{VVj} * VVj + \sum \beta_{PPj} * PPj \quad (Ec. 1)$$

Las variables explicativas son las siguientes: Temporada sn (j:1-2), año a (j:1-6), mes m (j:1.12), Temperatura T (j:1-2), Humedad Relativa HR (j:1-2), magnitud de viento VV (j:1-3), y precipitaciones PP (j:1-2). Donde j indica la categorización de las variables.

Por lo tanto, los FIC se interpretan como aumentos o disminuciones de la concentración de material particulado atribuido a la variación de una variable explicativa, respecto al nivel de referencia definido.

Los resultados de este análisis se discuten en términos del FIC, donde un impacto mayor que uno (1) indica una concentración de MP mayor que el nivel de referencia. Esto facilita la comparación entre las diferentes variables categóricas, y en el anexo se detallan las variables que fueron estadísticamente significativas para el modelo. La variable temporada fue definida como 1: Otoño -

Invierno (entre los meses abril-septiembre); y 2: Primavera Verano (entre los meses Octubre-Marzo).

Tabla 43. Detalles de la categorización y las variables de referencia para el modelo FIC de filtros MP_{2.5}. Elaboración Propia.

Variabes MP_{2.5}	Categoría	Referencia
Año	1: 1998 2: 1999 3: 2000 4: 2001 5: 2002 6: 2003 7: 2004 8: 2005 9: 2006 10: 2007 11: 2008 13: 2009 14: 2010 15: 2011 16: 2012 17: 2013 18: 2014 19: 2015 20: 2016 21: 2017 22: 2018	Año 1998
Temporada	1: Otoño -Invierno 2: Primavera- Verano	Otoño- Invierno
Día de la Semana	1: Lunes 2: Martes 3: Miércoles 4: Jueves 5: Viernes 6: Sábado 7: Domingo	Lunes
Magnitud de la velocidad del Viento	1: VV<0.8 [m/s] 2: 0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s] 3: VV>1.6 [m/s]	VV < 0.8 [m/s]
Humedad Relativa	1: HR > 70 % 2: HR < 70 %	HR > 70%
Temperatura	1: T < 20 °C 2: T > 20 °C	T < 20 °C

Tabla 44. Detalles de la categorización y las variables de referencia para el modelo FIC de filtros MP_{2,5-10}. Elaboración Propia.

Variables MP₁₀	Categoría	Referencia
Año	1: 2008 2: 2009 3: 2010 4: 2011 5: 2012 6: 2013 7: 2014 8: 2015 9: 2016 10: 2017 11: 2018	Año 2008
Temporada	1: Otoño-Invierno 2: Primavera-Verano	Otoño-Invierno
Día de la Semana	1: Lunes 2: Martes 3: Miércoles 4: Jueves 5: Viernes 6: Sábado 7: Domingo	Lunes
Magnitudes de Velocidad del viento	1: VV < 0.8 [m/s] 2: 0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s] 3: VV > 1.6 [m/s]	VV < 0.8 [m/s]
Humedad Relativa	1: HR ≥ 70 % 2: HR < 70 %	HR > 70%
Temperatura	1: T ≥ 20 °C 2: T < 20 °C	T < 20 °C

Análisis de Resultados MP_{2,5}

Variación del MP_{2,5}

En esta sección se explica la variación temporal y espacial de los resultados del repositorio de filtros obtenidos desde la estación Parque O'Higgins, disponibles desde 1998 hasta 2018.

El análisis de FIC “**efecto año**” considera como niveles de concentración de referencia a las mediciones realizadas en 1998 para el MP_{2,5}, es decir, para la distribución temporal los FIC están calculados en relación con las veces que aumentan o disminuyen respecto a las mediciones del año 1998. En la Figura 76 se observa una tendencia sostenida de disminución de los FIC para todo el período 1998-2018, con excepción de aumentos en el año 2001 y 2007. La disminución 1998-2018 es de un 48% aproximadamente. Sin embargo, cabe hacer notar que desde el año 2012, los valores FIC tienden a ser más o menos constantes lo que indica que las medidas de Descontaminación del Plan no están siendo tan efectivas como en años anteriores, y cuyo efecto se enfoca a mantener las concentraciones en lugar de disminuirlas.

Respecto del “**efecto temporada**” se encuentra que el período otoño-invierno tiene un FIC significativamente más alto que en el período primavera-verano. Esto se debe a las malas condiciones de ventilación de la cuenca en invierno, destacándose la disminución de la altura de la capa de mezcla y disminución de temperaturas que impiden la correcta dispersión de la contaminación. Adicionalmente, las emisiones residenciales de calefacción aumentan, especialmente las de quema de biomasa cuya contribución es significativa en invierno y en días episodios (Carbone et al., 2013; Gramsch et al., 2016; Tagle et al., 2018). Por otro lado, el “**efecto semana**” señala que el domingo es el único día de la semana donde el FIC disminuye estadísticamente, ilustrando que las actividades antropogénicas de la ciudad (especialmente transporte vehicular) impactan permanentemente las concentraciones de MP_{2,5}.

Respecto del “efecto meteorológico”, se encuentra una clara tendencia de aumento del FIC para las velocidades de viento menores a 0.8 [m/s] asociadas a corrientes muy bajas que impiden la de ventilación de la cuenca. La tendencia del FIC no es clara ni para la temperatura ni humedad relativa; y, además, estas 2 últimas variables no resultan estadísticamente significativas para el modelo.

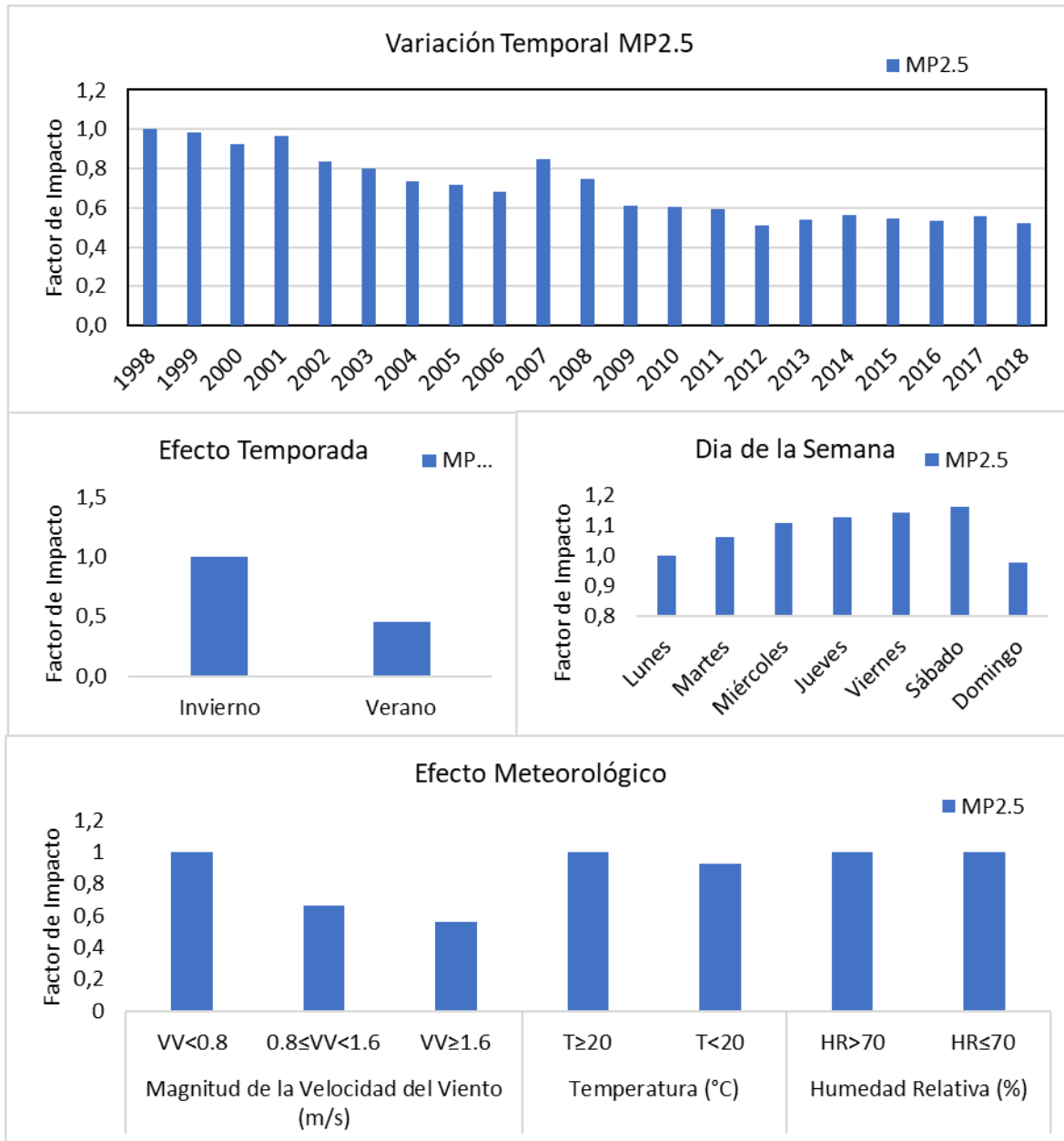


Figura 76: Efectos de variables sobre el Factor de Impacto por concentración del $MP_{2.5}$. Elaboración propia

Variaciones y tendencias de la composición elemental del $MP_{2.5}$

Las especies presentadas en la Figura 77 (Al, Si, Ca, Ti) son elementos presentes en la corteza terrestre y previamente han sido atribuidas la re-suspensión de polvo de caminos (Barraza et al., 2017), o bien debido a actividades de construcción (Achilleos et al., 2016; Moreno et al., 2010). Respecto de Al, Ca y Si, no es posible identificar una tendencia de disminución o aumento claro a lo largo de los años. Los años 2017 y 2018 muestran incremento en todos los elementos. Ti es el único elemento que tiende a mostrar una tendencia a la reducción en los 20 años (excepto los últimos dos años).

Si bien, la tendencia semanal (efecto semana) indica una clara disminución los fines de semana para todos los elementos, para el efecto temporada solo los elementos Ca y Ti presentan mayores impactos por concentración en época otoño-invierno. Adicionalmente, el efecto meteorológico indica que la velocidad del viento y humedad relativa tienen efectos en los valores FIC de todos los elementos. A bajas velocidades de viento y bajos niveles de humedad relativa se obtienen los FIC mayores y significativos. La Temperatura no tiene un efecto significativo en los FIC. La velocidad del viento puede ser utilizada como indicador de las condiciones de dispersión atmosférica, y por lo tanto a menores velocidades, menor es la capacidad de dispersión haciendo aumentar los valores de FIC. La Humedad Relativa se relaciona con la capacidad humectadora del suelo, y por lo tanto a mayor humedad relativa, más humectado está el suelo y por lo tanto menor es la capacidad de resuspensión de partículas.

Dado los perfiles temporales mostrados por estos elementos, es posible afirmar que reflejan actividades antropogénicas asociadas al desgaste/erosión de suelos, y muy influenciados por el efecto del tráfico vehicular, dado el perfil semanal encontrado.

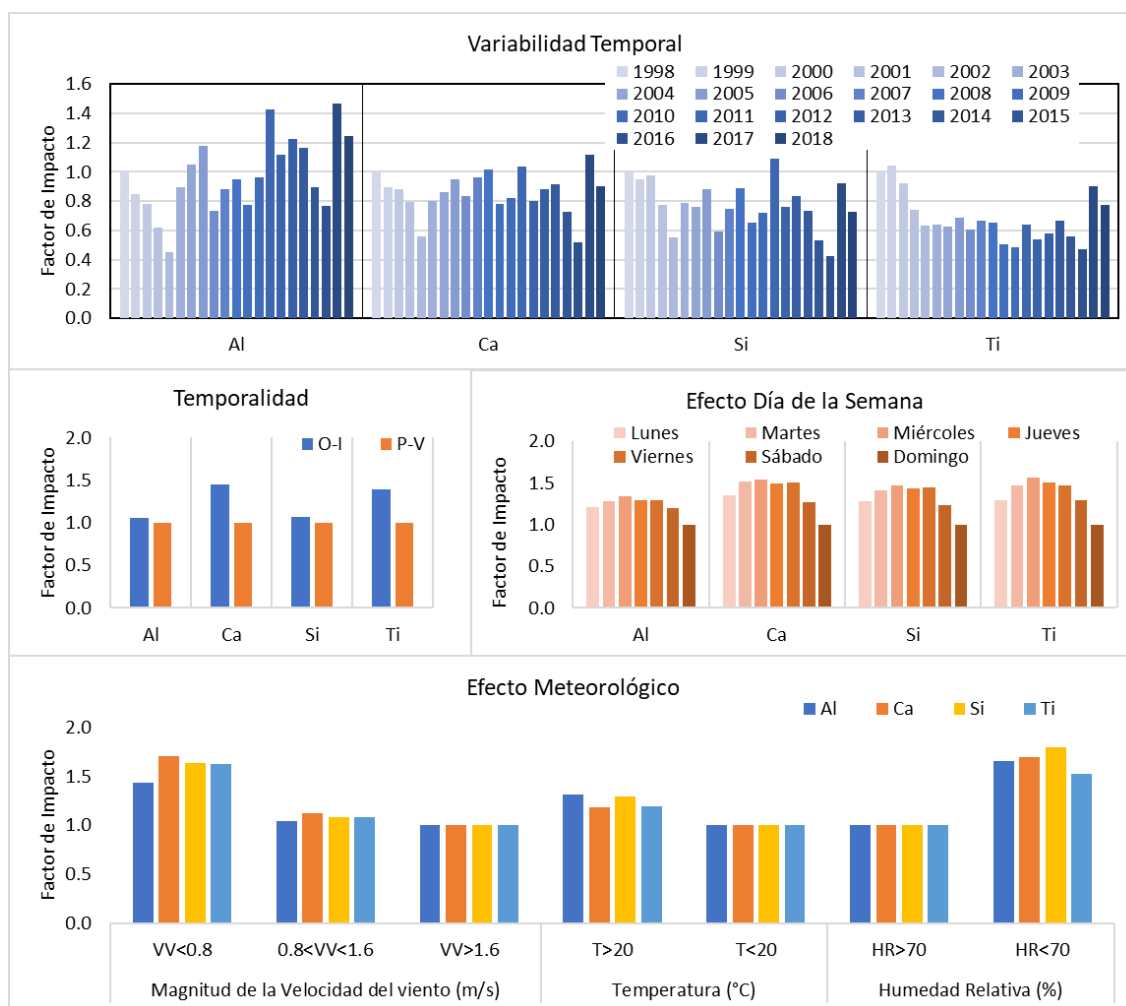


Figura 77. Efectos de variables sobre el Factor de Impacto por concentración para las especies asociadas a la corteza terrestre.

Previamente, las especies Cu, As, Zn y S han sido atribuidas a emisiones industriales. En (Kavouras et al., 2001) se usó el Cu, As y Zn para identificar la fundición de Cu de El Teniente. En (Barraza et al., 2017) utilizó el Cu, As y el S para la misma fuente. Los FICs para Cu, S y Zn indican una tendencia clara a la reducción (Figura 78), aunque al igual que en el caso de los elementos térreos anteriores, también hay incrementos en los últimos dos años (2017-2018). Adicionalmente, se identifican algunas variaciones entre los años. Por ejemplo, el Cu y Zn presentan FICs altos en el año 2005 en tanto que el S lo muestra en el año 2007. Cu y Zn también han sido atribuidos al impacto de emisiones vehiculares (Barraza et al., 2017; Moreno et al., 2010), por lo que estos elementos están presentes en ambas fuentes emisoras. S, por su parte, está mayormente asociada a fuentes industriales, en especial con el uso de combustibles fósiles industriales (Barraza et al., 2017; Kavouras et al., 2001; Moreno et al., 2010). En efecto el incremento que se observa en el año 2007 obedece a períodos corte de suministro de gas natural proveniente desde Argentina, donde las industrias tuvieron que volver a utilizar petróleos pesados para funcionar.

Respecto de los efectos semana y temporada es posible señalar que solo los elementos Cu y Zn presentan variación significativa. Los mayores FIC de estos elementos se dan en período otoño invierno y disminuye significativamente los fines de semana reforzando la interpretación que estos elementos poseen una fuerte contribución del tráfico vehicular. Por el contrario, el S prácticamente no presenta variación, debido a que este elemento está contenido en la contribución secundaria de las partículas (como sulfato), y por lo tanto tiene un tiempo de residencia atmosférica mayor que las partículas primarias (como las emitidas por el tráfico vehicular). En efecto, S es el elemento que menos variación tiene con las variables meteorológicas y tiende a aumentar levemente a condiciones de humedad altas ya que estas condiciones favorecen la formación de sulfato.



Figura 78. Efectos de las variables sobre el Factor de Impacto por Concentración para elementos asociados a emisiones industriales

Existen otros elementos de la base de datos que no pasaron los criterios de completitud de (Kavouras et al., 2001), sin embargo sí se han incluido en otros reportes y publicaciones debido a que son trazadores clásicos industriales. En este caso se habla de los elementos Ni, V y As, cuyos análisis de FIC's se entregan en la Figura 79. Ni y V fueron usados como trazadores de emisiones industriales asociadas a la combustión de petróleos y refinería y As (junto con Cu y Zn) como trazador específico de la refinería de Cu en (Barraza et al., 2017; Kavouras et al., 2001). As y V muestran factores altos durante los tres primeros años de monitoreo y están relacionados con el fomento de cambio de matriz energética en el sector industrial o bien con la paralización y retiro de

industrias dentro de la RM. En el año 1997 se implementaron políticas hacia el uso de gas natural, explicando en parte el descenso de FICs de estos elementos al inicio de la serie. En efecto estos elementos también tienen un incremento en el año 2007-2008 debido a los recortes de suministro de gas natural explicado anteriormente.

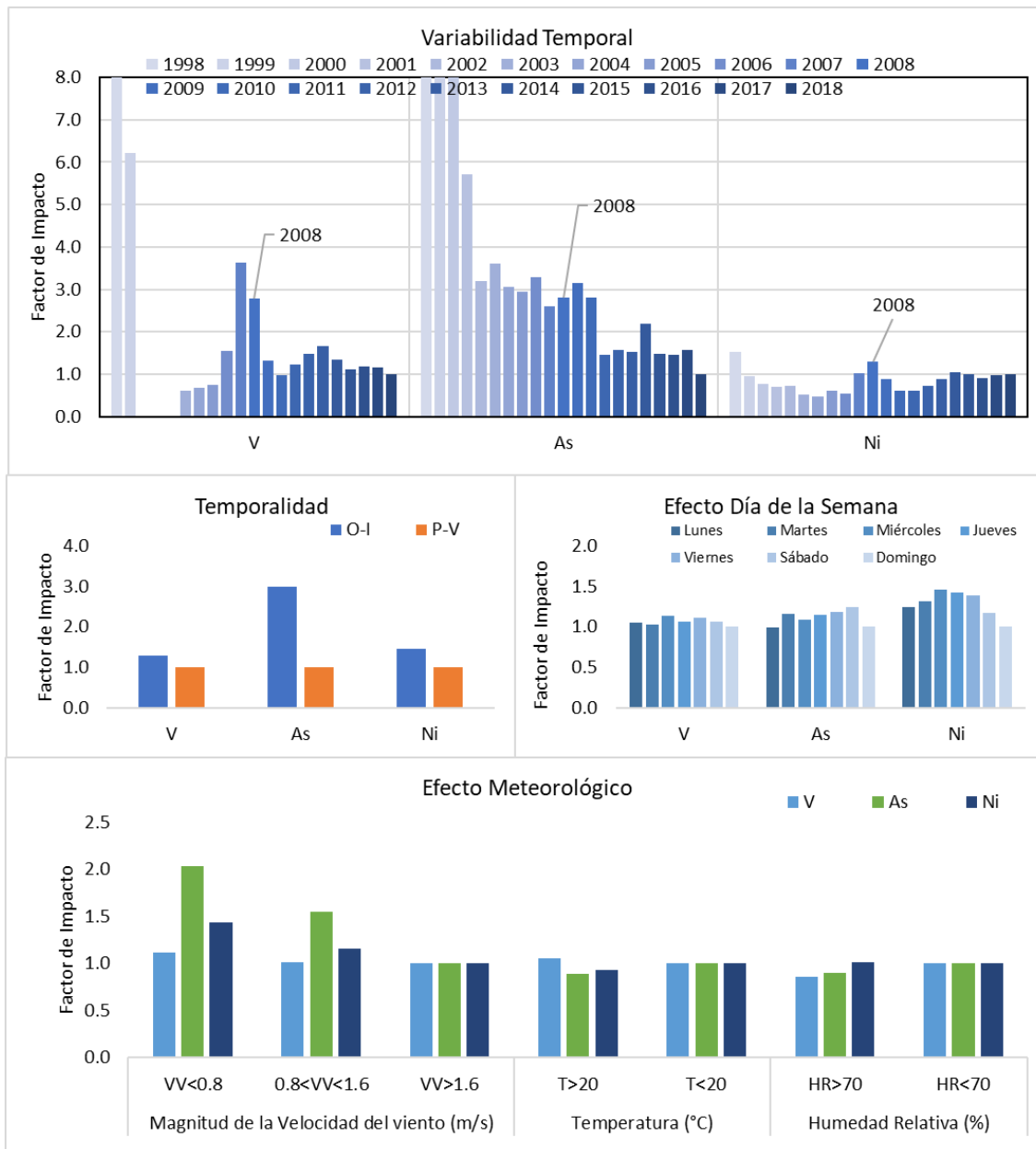


Figura 79: Efectos de las variables sobre el Factor de Impacto por Concentración para elementos V, As y Ni. Se ha cortado el eje de Y del efecto año para ver con mayor claridad la variación en los últimos años.

Las especies presentadas en la Figura 80 y Figura 81, han sido previamente asociadas al impacto de tráfico vehicular. Se han incluido de nuevo las series de Cu y Zn solo para permitir la comparación

con otros elementos (Achilleos et al., 2016; Kavouras et al., 2001; Moreno et al., 2010; Viana et al., 2007). Pb y Br (Figura 81) muestran la clásica reducción de FIC debido al retiro de tetracloroetil plomo de las gasolinas producto de la implementación del convertidor catalítico en el mercado automotriz (Arteconi et al., 2011) en el período 1992-1993, mostrando los mayores valores de FIC en el año 1998-2001. El Br también se le adicionaba a la gasolina conjunto con el Pb. Posteriormente los valores de FIC's tienden a ser más estables en el caso del Br, y una leve tendencia a la disminución para el caso del Pb.

Como se mencionó anteriormente, Cu y Zn, además de provenir de fuentes industriales también provienen de tráfico vehicular, ya sea por desgaste de frenos o por combustión de lubricantes en el combustible (Grigoratos and Martini, 2015; Viana et al., 2007). Ambos elementos muestran una tendencia a la disminución, excepto los últimos dos años, probablemente señalando las modificaciones que han tenido las diferentes regulaciones en transporte vehicular (normas Euro principalmente). Fe y Mn no presentan una tendencia tan ilustrativa como los anteriores, sin embargo, sí se identifica una tendencia a la reducción especialmente el caso de Mn. En (Moreno et al., 2010) el Mn fue utilizado como trazador de la fuente "aceites residuales", que considera el impacto de las emisiones de escape motores a diésel y de la combustión de lubricantes, por lo que este elemento responde más bien al impacto de fuentes de tráfico vehicular. Respecto del Fe, no se logra distinguir una tendencia clara. Fe también ha sido asociado al desgaste de frenos (Grigoratos and Martini, 2015), sin embargo también está presente en material mineral / geológico, por lo que también puede estar relacionado con la resuspensión local o regional, polvo urbano, material geológico, polvo de carreteras, etc. (Viana et al., 2007).

Respecto del efecto temporal (efecto semana y temporada) se encuentra que todos los elementos presentan mayores impactos en época otoño-invierno y disminuyen los fines de semana, reforzando la idea de la influencia del tráfico vehicular. Br es el elemento que menos variación presenta durante los fines de semana, indicando que este elemento también puede tener una contribución adicional de otra fuente.

Finalmente, respecto del efecto meteorológico se observa una clara tendencia de disminución cuando la velocidad del viento aumenta, indicando que en condiciones de ventilación pobres estas fuentes se manifiestan mayormente. El Fe es el único elemento cuyo FIC aumenta a bajos niveles de humedad relativa, reforzando la idea que este elemento tiene contribución importante de la resuspensión de polvo. El efecto de la temperatura no resulta estadísticamente significativo.

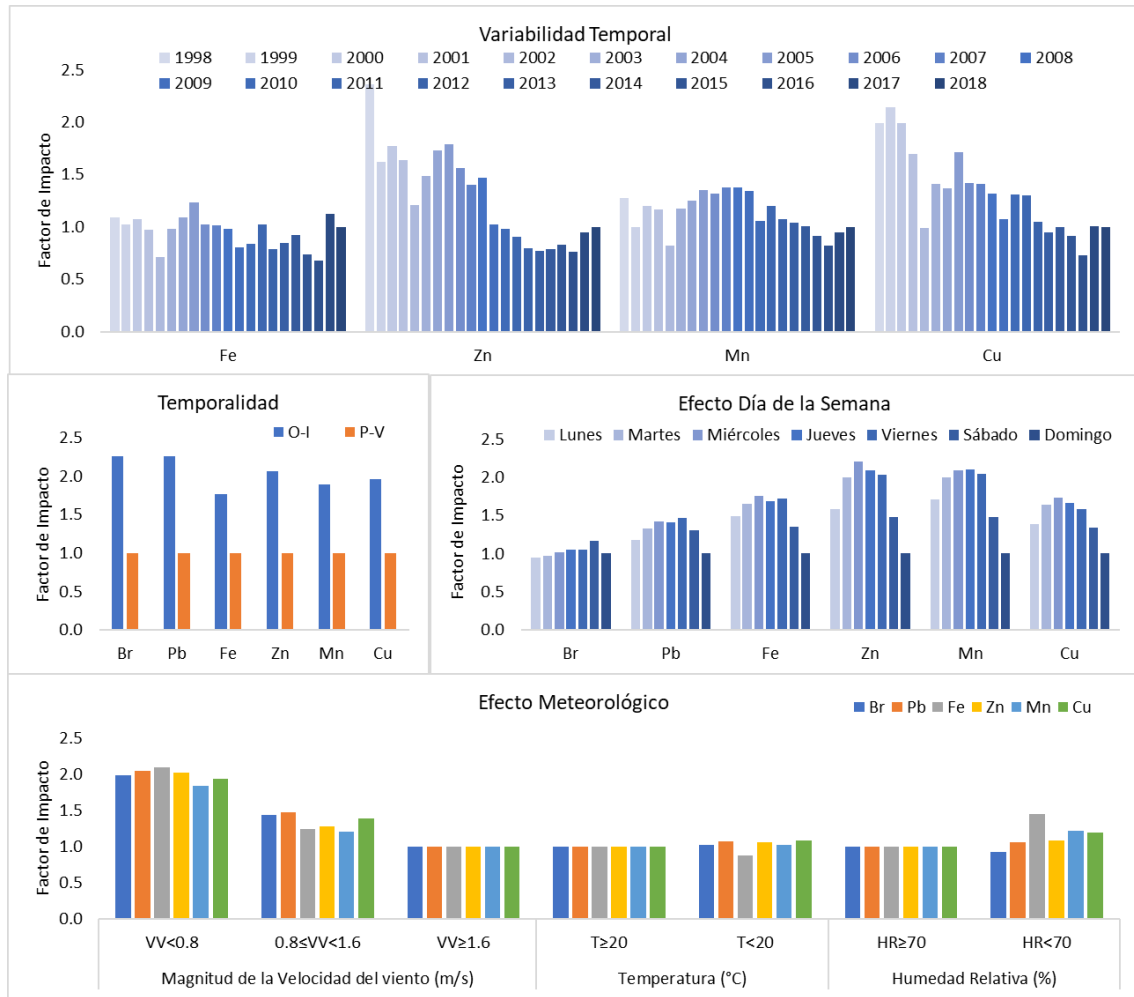


Figura 80. Factor de Impacto por concentración para las especies relacionadas a emisiones vehiculares.

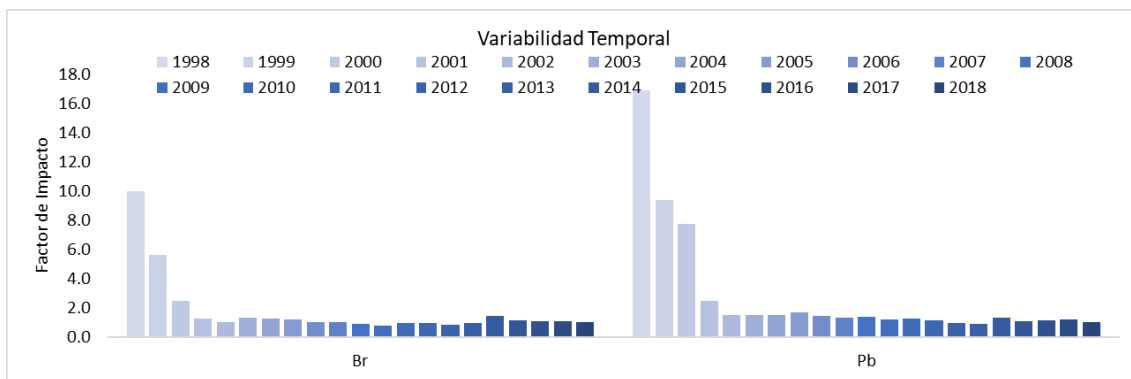
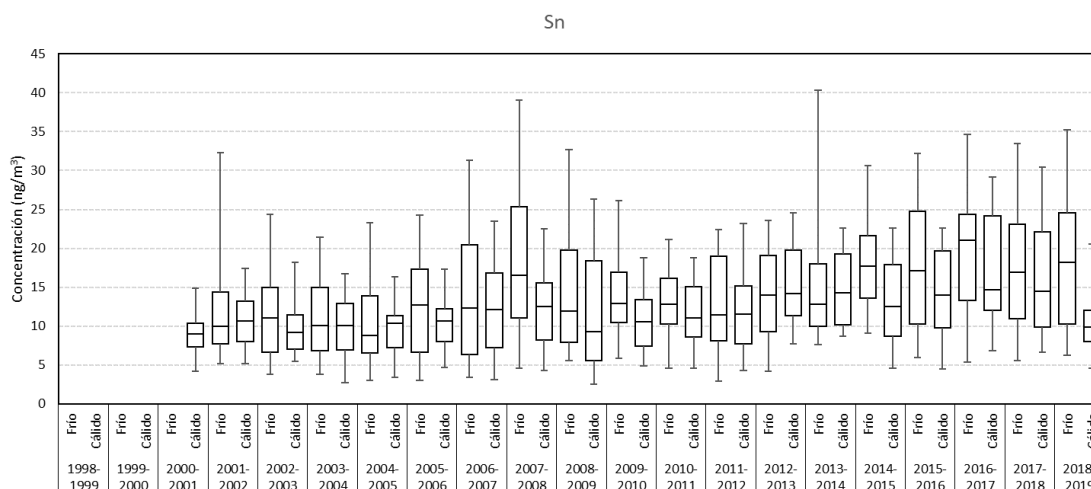
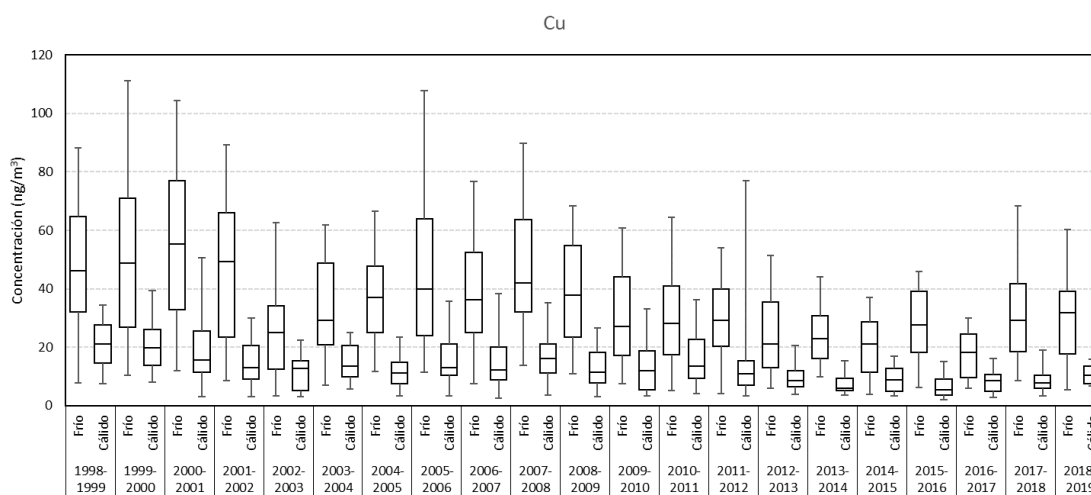
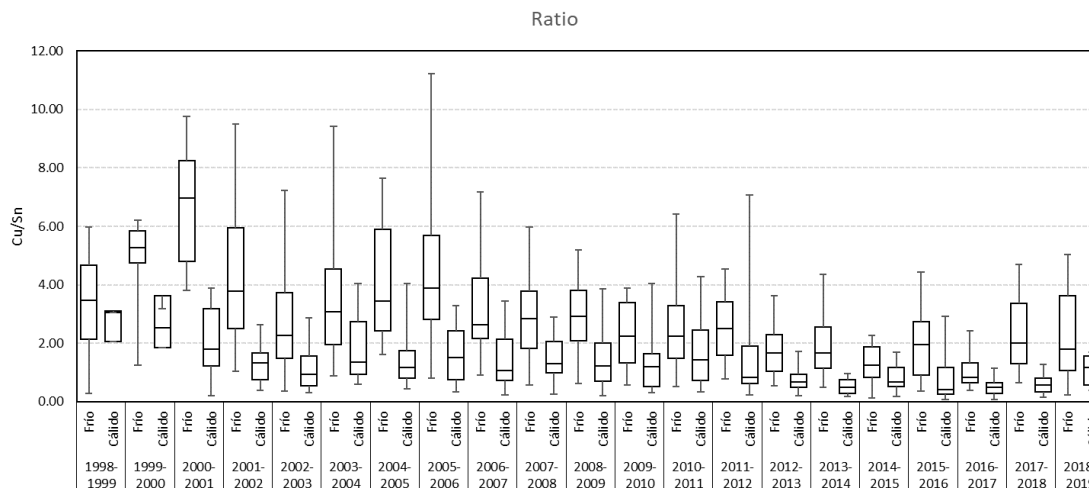


Figura 81: Factor de Impacto por concentración para Pb y Br.

(Charron et al., 2019) identificaron elementos específicos relacionados con la emisión de partículas provenientes del tráfico vehicular no asociadas a las emisiones de escape, sino que a desgaste de

frenos principalmente. En específico señala que los elementos Cu, Fe, Sb, Sn, Mn están fuertemente correlacionados con indicadores de tráfico. El Fe puede provenir desde revestimiento de frenos metálicos (como polvo de acero o hierro), desde fibras como el acero o el desgaste del rotor de hierro fundido para frenos ligeramente metálicos. El Cu es un lubricante de alta temperatura presente en los revestimientos y también se incluye en las fibras como latón para aumentar el rendimiento de frenado. Sb es un elemento del forro del freno tanto en el relleno como sulfato de antimonio como en el lubricante como trisulfuro de antimonio. Los óxidos de cromo son elementos del relleno de los forros de freno utilizados por sus propiedades térmicas, y las fibras de titanato de potasio están presentes como un fortalecedor en los forros orgánicos. Cr también podría provenir de la combustión de aceite lubricante. Se ha señalado que las relaciones que involucran cobre (Cu / Fe y Cu / Sn) podrían usarse como trazadores de emisiones de desgaste de frenos siempre que los frenos con Cu permanezcan en uso.





El Cl fue utilizado como trazador de aerosoles marinos en (Barraza et al., 2017; Kavouras et al., 2001) mientras que en (Moreno et al., 2010) se utilizó el Na, por lo que ambos elementos pueden ser utilizadas como indicadores de la contribución regional asociada a fuentes emisoras fuera de la cuenca de Santiago (fuentes costeras). El K por otra parte ha sido asociado al impacto de emisiones de quema de biomasa (Kavouras et al., 2001; Moreno et al., 2010). Sin embargo, dado que el K también está presente en el material del suelo, en (Barraza et al., 2017) se descontó esta contribución a partir del gráfico de dispersión de borde K vs Fe (Edge plot). Los elementos asociados a estas fuentes se presentan en la Figura 82.

Se observa que el Na aumenta significativamente a partir del año 2001, para después mostrar una tendencia hacia la reducción. Por otra parte, Cl presenta mayores valores FIC entre los años 1998-1999, y posteriormente tiende a disminuir. Por otro lado, la evolución de K a través de los años muestra una tendencia a la disminución.

Cl y K son los elementos que presentan mayores valores de FICs en temporada Otoño-Invierno, en tanto que Na aumenta hasta en un 20% en temporada estival. Para el efecto semanal no se presenta una tendencia clara y esta variable no es estadísticamente significativa para ninguna especie.

Finalmente, el efecto meteorológico indica que las especies Cl y K disminuyen cuando la velocidad del viento aumenta, no así el Na que se mantiene constante. Para temperaturas menores a 20 °C las especies tienden a disminuir su factor de impacto. Los resultados para la humedad relativa no resultan estadísticamente significativos.

El hecho de Na y Cl muestren comportamientos y tendencias diferentes, obedece a que no responden a las mismas fuentes emisoras con igual magnitud. El comportamiento temporal de Na está más relacionado con las emisiones regionales, y más cercano al impacto de aerosoles marinos. Sin embargo, el Cl tiene un comportamiento más asociado a fuentes antropogénicas debido al aumento significativo en otoño-Invierno.

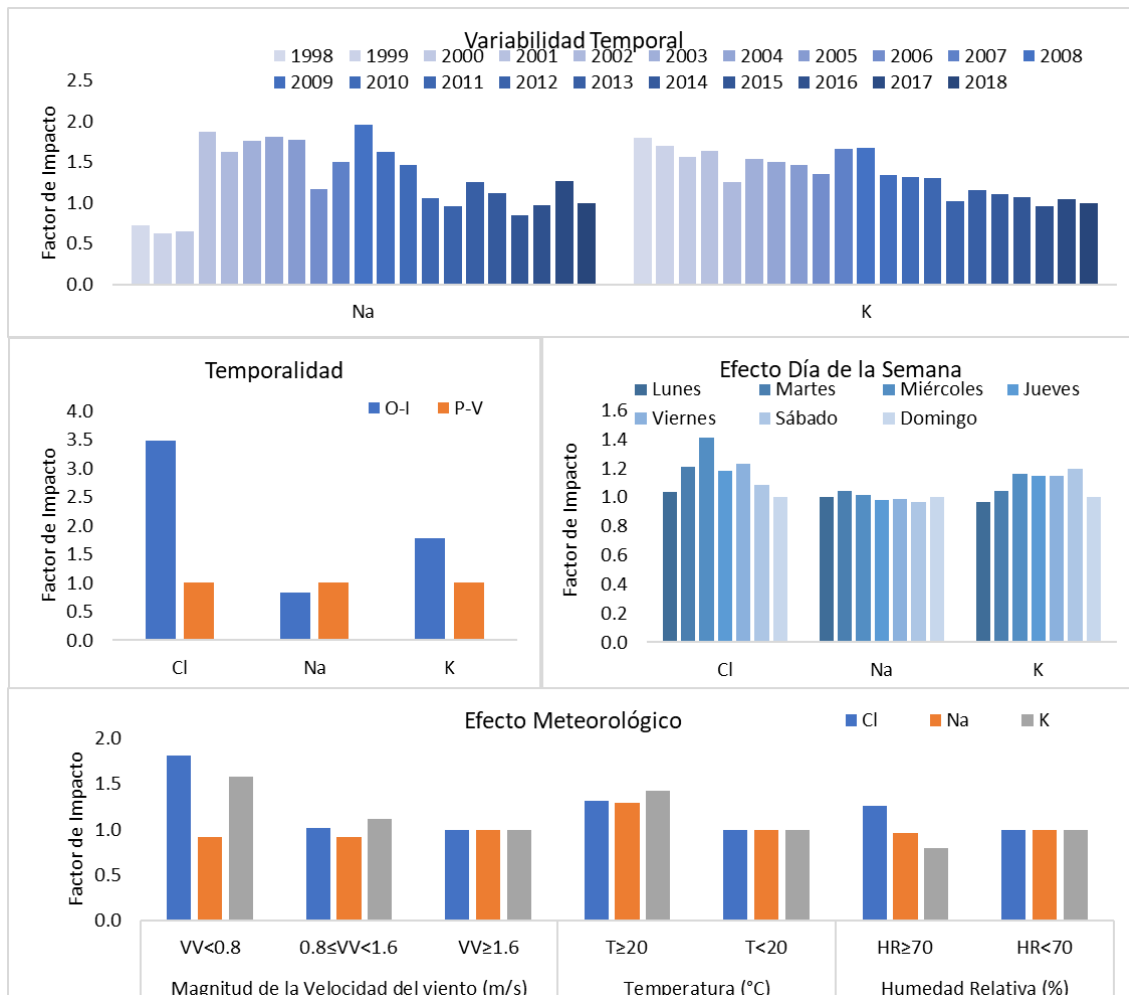


Figura 82. Factor de Impacto por concentración de especies relacionadas al Aerosol Marino y Quema de Biomasa.

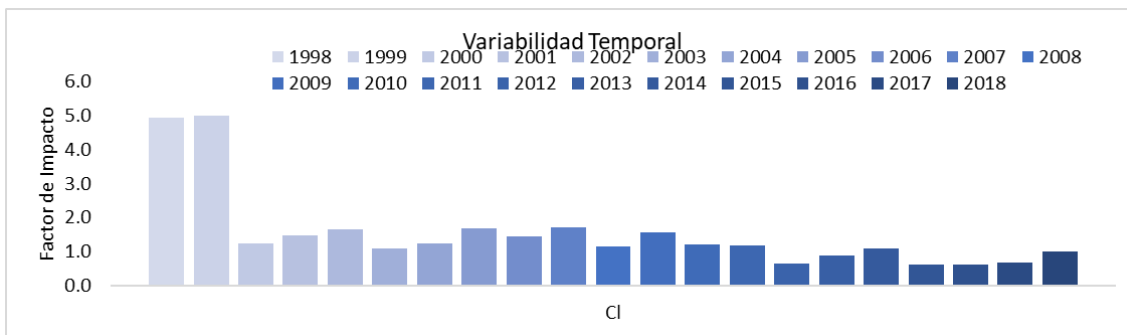


Figura 83: Factor de Impacto por concentración para Cl

Análisis de Resultados MP_{2,5-10}

En esta sección se explica la variación temporal y espacial de los resultados del repositorio de filtros obtenidos desde la estación Parque O'Higgins, disponibles desde 2008 hasta 2018, donde las muestras se separaron por sitio y temporada, para la fracción gruesa del MP₁₀ y su composición elemental donde se consideraron los elementos Al, Ca, Mn, Si, Ti, Br, Fe, Pb, Zn, Sn, Sr, Cu, S, P, Zr, Cl y K.

El análisis de FIC considera como niveles de concentración de referencia a las mediciones realizadas en 2008 para el MP₁₀, es decir, para la distribución temporal los FIC están calculados en relación con las veces que aumentan o disminuyen respecto a las mediciones del año 2008 para MP₁₀ y sus especies.

Para simplificar la presentación de los resultados se agruparon las especies por su fuente de origen en común, esta información se obtuvo de la literatura disponible y se describe en cada gráfico.

Variación del MP_{2,5-10}

En la Figura 84 se observa la variación a través de los años del MP_{2,5-10}. No es posible identificar una tendencia definida en los FIC. Hay un aumento leve en los años 2009, 2015 y 2017, sin embargo, estas alzas no superan el 50% del nivel de referencia.

También se observa que en la temporada de otoño-invierno el FIC es más alto que en el verano, indicando que las malas condiciones de ventilación también favorecen el aumento de concentración de partículas gruesas producto de acumulación atmosférica. En efecto, los valores de FIC's también aumentan cuando las velocidades de viento son bajas. Por otro lado, la tendencia semanal indica que el domingo es el único día de la semana donde el Factor de Impacto disminuye, mientras que en los días de mitad de semana la tendencia aumenta, sin embargo, no es una variable estadísticamente significativa.

Finalmente, para las variables meteorológicas se tiene que la velocidad del viento y la humedad son las que estadísticamente tienen efecto sobre el MP grueso. Respecto de la humedad relativa se tiene que el factor de impacto aumenta casi en un 60% cuando esta es menor a 70%, debido a que el suelo está menos humectado y por lo tanto favorece la resuspensión de partículas.

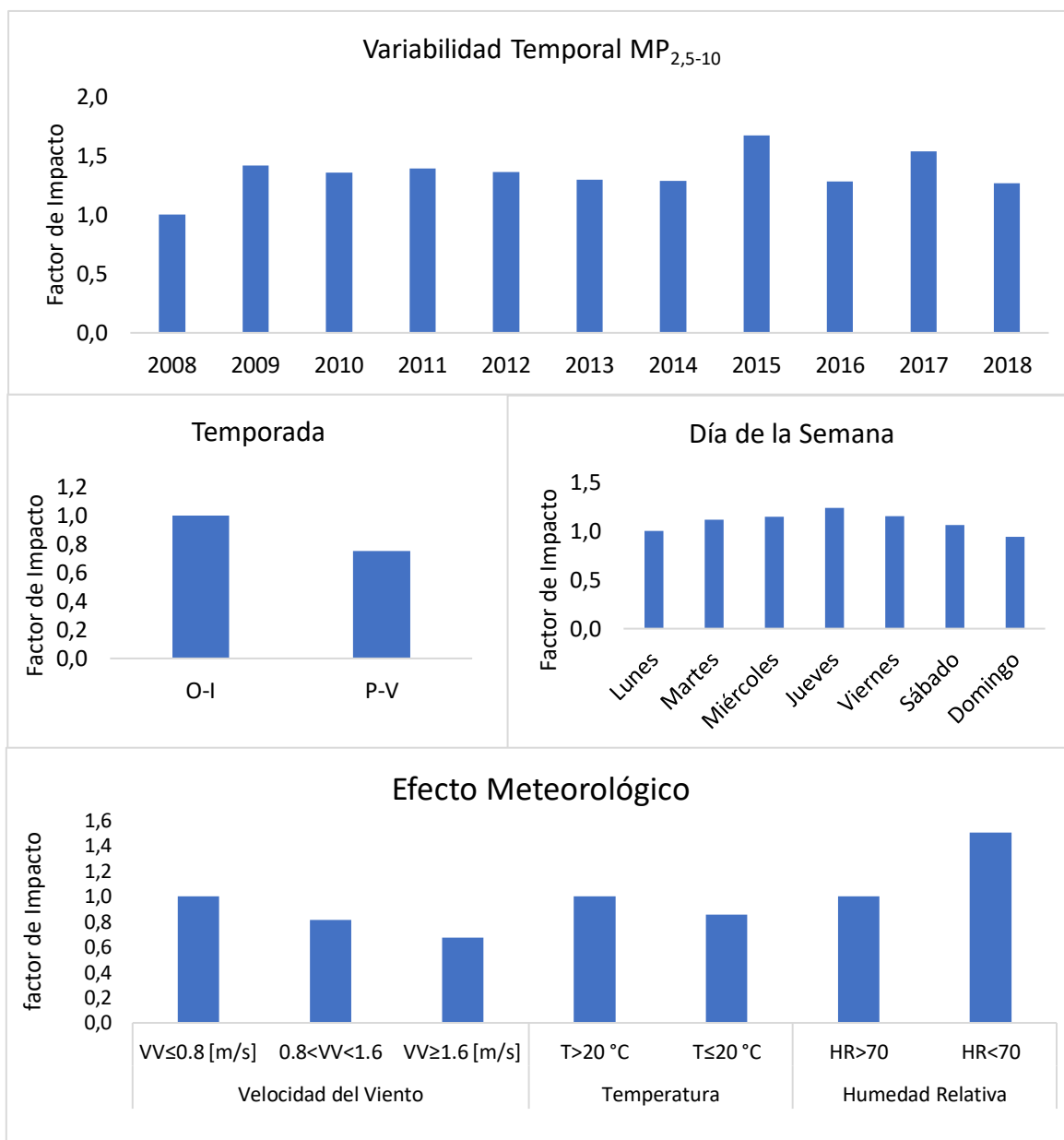


Figura 84. Factor de Impacto por concentración sobre el MP_{2,5-10}.

Variaciones y tendencias de la composición elemental del MP_{2,5-10}

Las especies presentadas en la Figura 85, se asocian a elementos provenientes de la corteza terrestre (Achilleos et al., 2016) y por lo tanto se atribuyen preferentemente a la re-suspensión de polvo, o bien debido a actividades de construcción.

Todos los elementos muestran una tendencia nula (sin variación), excepto para los años 2015-2017. Respecto del efecto temporada se distingue una tendencia de mayores del FIC para todas las especies en Otoño-Invierno, y una disminución significativa durante los fines de semana, por lo

tanto, estas especies están también relacionadas con la resuspensión de polvo debido al tráfico vehicular.

Respecto del efecto meteorológico indica un claro aumento del Factor de Impacto cuando la velocidad del viento disminuye, y este efecto es similar para todos los elementos. Esto indica que el FIC aumenta cuando empeora la calidad de ventilación. La temperatura indica que a temperaturas menores a 20 °C el Factor de Impacto disminuye. Con respecto a la Humedad Relativa se tiene un mayor factor de impacto cuando la humedad relativa disminuye, estas tres variables resultaron estadísticamente significativas.

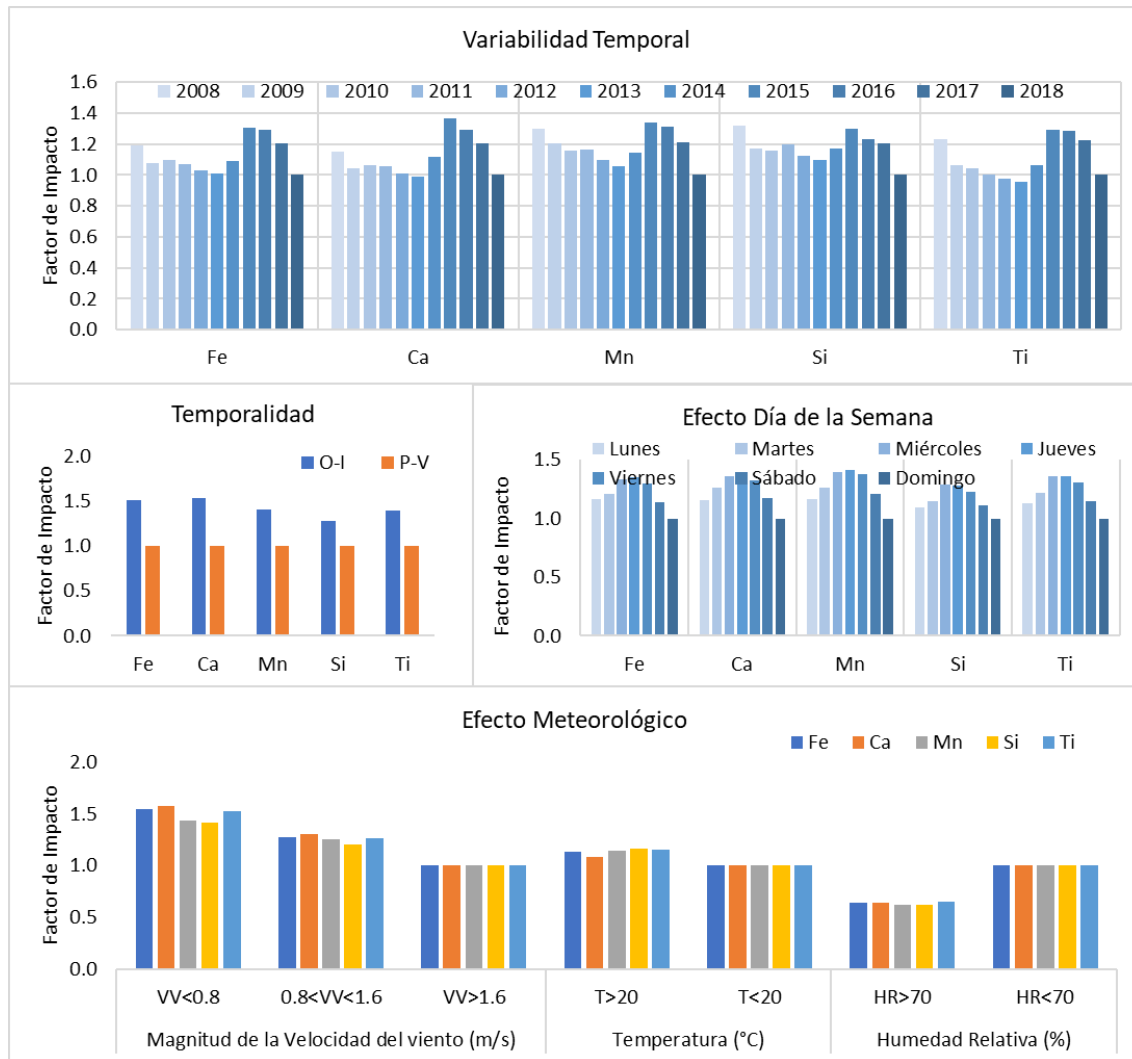


Figura 85. Factor de Impacto por Concentración para las especies asociadas a la resuspensión del polvo.

Las especies presentadas en la Figura 80, han sido asociadas previamente a emisiones de transporte vehicular. Dado que estos elementos se encuentran en el MP grueso, estos elementos deberán tener origen más bien mecánico y por lo tanto emisiones de escape vehiculares no debieran contribuir significativamente en estos resultados. Así, algunas fuentes emisoras que aquí se

consideran consisten en desgaste de frenos, neumáticos y también resuspensión de material (Achilleos et al., 2016; Viana et al., 2007).

Respecto de la tendencia anual, que todos los elementos muestran valores altos de FIC en los años 2015-2017 al igual que la serie de elementos analizada en la Figura 85. Sin embargo, Br, Al, y Sn se caracterizan por presentar bajos valores de FIC en el año 2008 y mostrar una tendencia al aumento hasta el año 2016. Estos elementos también han sido atribuidos al desgaste de frenos en los vehículos (Grigoratos and Martini, 2015), y por lo tanto estos elementos responden al incremento del parque vehicular. La serie de Pb presenta un perfil más similar al de los elementos anteriores (resuspensión de polvo) y responde a la acumulación de Pb que se ha depositado en el suelo producto de la emisión de escapes vehiculares en décadas pasadas, por lo tanto, es polvo de suelo contaminado con Pb. Zn y Sr no tienden a mostrar una tendencia definida.

Los elementos Br, Fe, Pb y Zn muestran FIC mayores en período otoño Invierno, en tanto que Sn y Sr muestran aumentos leves. Por otro lado, para el efecto de los días de la semana solo se observa una disminución para el domingo en los elementos Fe, Pb y Zn y con menor extensión en Sr.

Finalmente, para el efecto meteorológico se observa una clara tendencia de disminución cuando la velocidad del viento aumenta, esta disminución puede llegar hasta un 40% menos del factor de impacto cuando la velocidad supera los 1.6 (m/s). El FIC por temperatura y humedad aumenta cuando la temperatura es mayor a 20 °C y la humedad menor a 70%, estos resultados resultan estadísticamente significativos para las especies Fe, Zn y Sr.

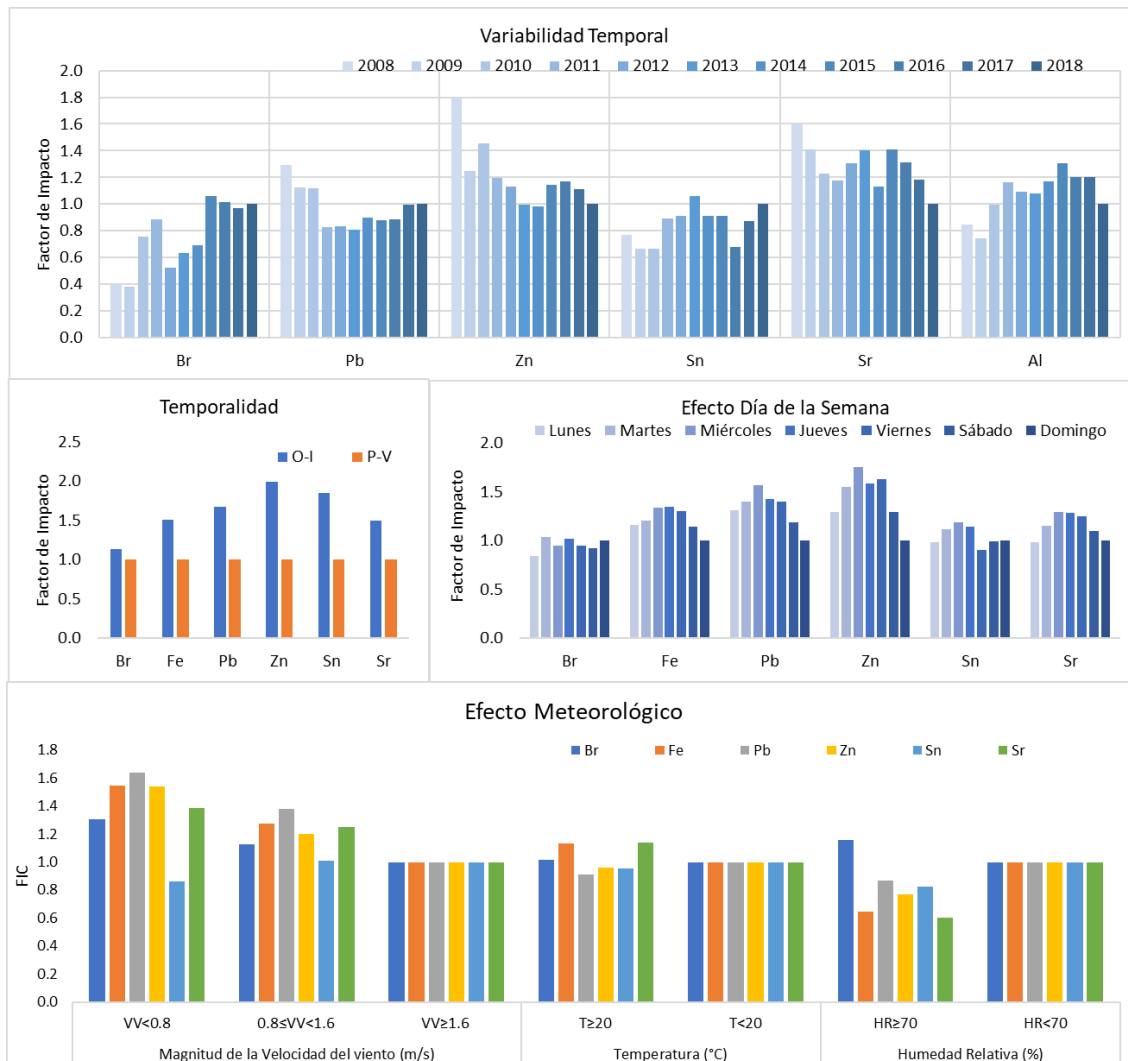


Figura 86. Factor de Impacto por concentración para especies relacionadas a emisiones vehiculares, para el $MP_{2,5-10}$.

Las especies Cu, S, P y Zr se presentan en la Figura 87. (Moreno et al., 2010) ha usado Cu para identificar fuentes denominado “aceites residuales” y S y P para identificar fuente “sulfato”. De la misma forma que el caso del Pb, la fuente aceites residuales corresponde a polvo de suelo contaminado con emisiones de escape vehiculares. S y P han sido atribuidos como contribución regional al MP grueso (como sulfatos). Como se mencionó anteriormente, el Cu también se considera como trazador de emisión vehicular de carácter mecánico (Viana, et al., 2008).

Todos los elementos muestran una tendencia hacia la disminución leve, en especial, S y P. Respecto del efecto temporada, se encuentra una disminución de FIC en general durante el período Primavera-Verano, disminuyendo el impacto casi en un 50% para todas las especies. Por otro lado, para el efecto semanal se observa una disminución de la concentración el domingo, pero esta variable no es estadísticamente significativa.

Finalmente, para el efecto meteorológico, el aumento de la velocidad del viento genera una disminución en el factor de impacto, a excepción de la especie S (al igual que para esta especie en la fracción $MP_{2.5}$), el factor de impacto para la temperatura aumenta cuando esta es mayor a 20°C y por humedad aumenta cuando esta es menor a 70%, los resultados son estadísticamente significativos solo para velocidad de viento y humedad relativa para las especies Cu, P y Zr, para el azufre no se tienen resultados significativos en ninguna variable meteorológica.

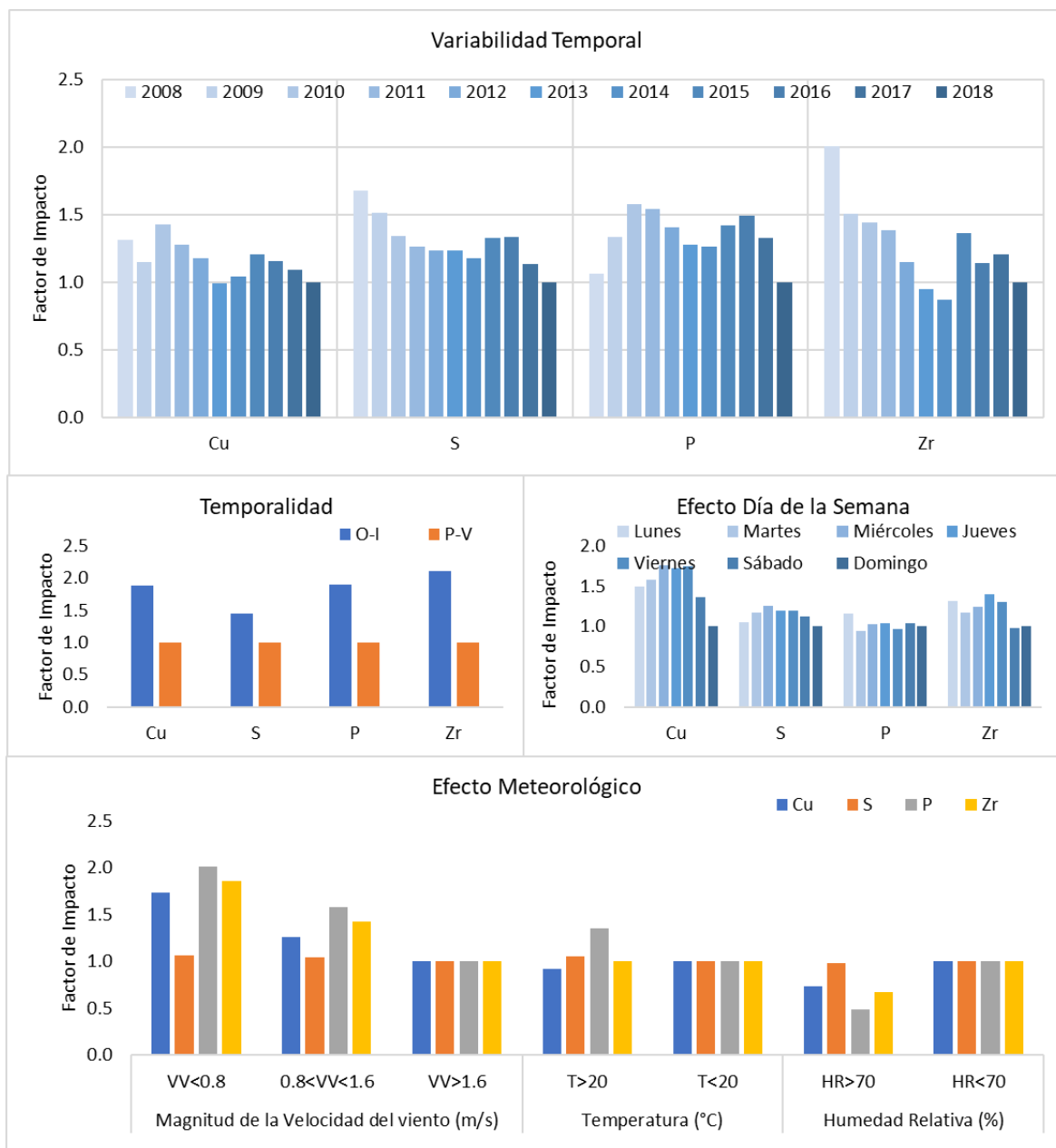


Figura 87. Factor de Impacto por concentración para especies Cu, S, P, y Zr, para el $MP_{2.5-10}$.

Los valores FIC para el Cl, K y Na están presentadas en la Figura 88. Aquí Cl y Na tienen mayor relación con el impacto de las fuentes costeras (aerosol marino) como fue documentado por (Moreno et al., 2010). En efecto son los únicos elementos que tienen mayor valor FIC en el período Primavera-

Verano, y además ambos tienden a aumentar a mayores velocidades de viento, demostrando que hay mayor impacto de sales marinas cuando hay vientos costeros que llegan a la cuenca de Santiago. No es posible identificar alguna tendencia a lo largo de los años.

Respecto del K se encuentra que presenta mayor FIC's en época invernal y tiende a ser mayor cuando la velocidad del viento es baja, indicando que este elemento se acumula en bajas condiciones de ventilación. Este comportamiento puede reflejar el impacto K natural o bien de emisiones de biomasa depositadas en el suelo.

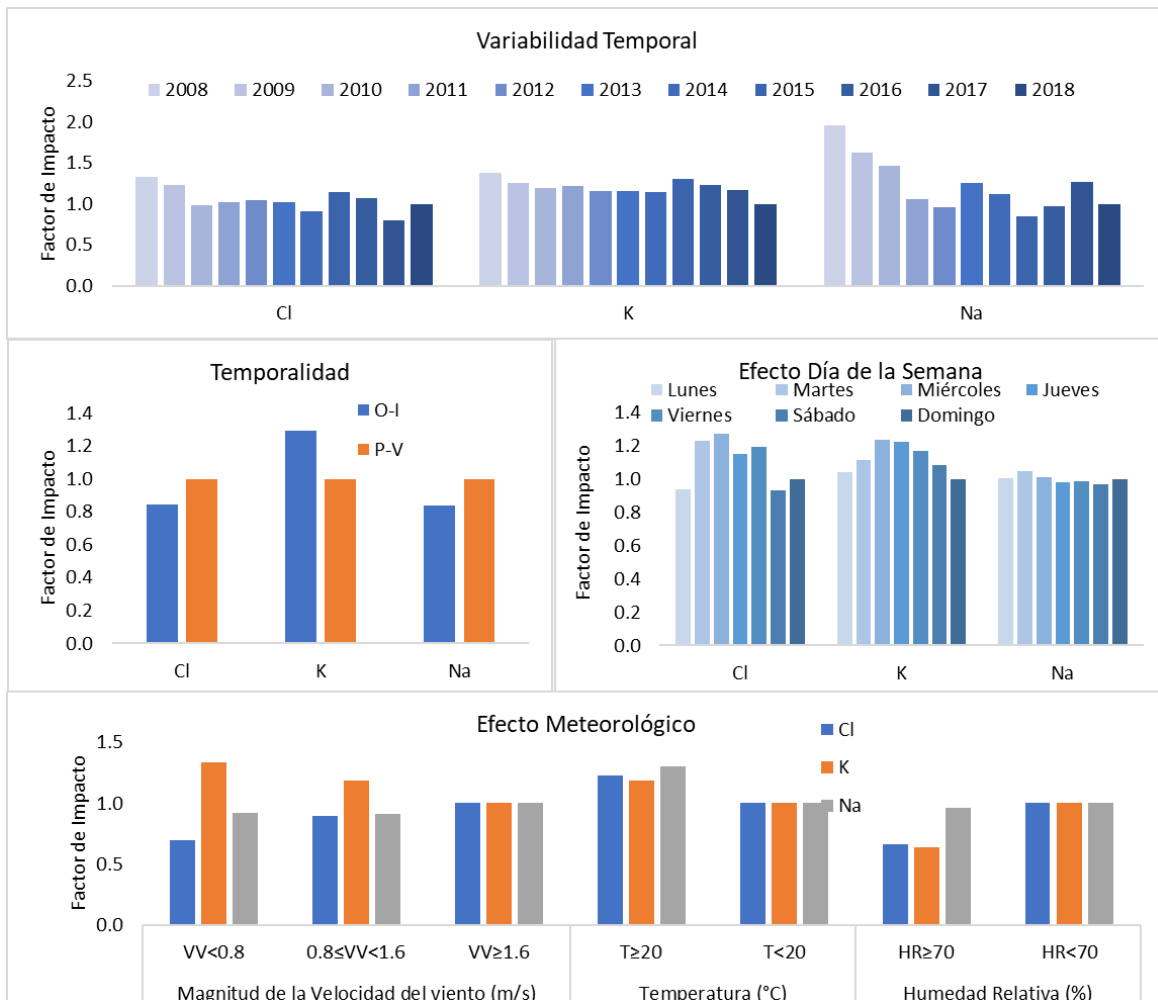


Figura 88. Factor de Impacto por concentración para las especies relacionadas al aerosol marino y la quema de biomasa, para el $MP_{2,5-10}$.

Determinar las concentraciones y distribución del aporte de las fuentes de material particulado fino y grueso, de acuerdo con los resultados obtenidos en la estación Parque O'Higgins de la RM.

A continuación, se presentan los resultados del modelo receptor PMF para la estación Parque O'Higgins desde el año 1998 hasta el 2018. De la totalidad de elementos considerados en la base de datos, solo un subconjunto de ellos pasaron la prueba de relación concentración/incertidumbre, esto es Na, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Sn, Pb, V, Ni, As, K. Si bien la relación de Ni y V no pasaron los criterios de señal/ruido, igualmente fueron incluidos puesto que han sido utilizados principalmente como trazadores de emisiones industriales, y han sido considerados en estudios anteriores. Acorde con (Barraza et al., 2017), la concentración de K se le descontó la contribución del suelo y se ha reemplazado por Kns (K non soil) = $K - 0,3 * Fe$, con la finalidad de obtener un trazador de la quema de biomasa.

Para las distintas configuraciones se buscó encontrar un set de especies que se asocien a fuentes emisoras previamente documentadas en la literatura (Barraza et al., 2017; Jhun et al., 2013; Moreno et al., 2010), estas fuentes vienen dadas por las condiciones del entorno del sitio de monitoreo y para el caso de Santiago las principales fuentes son las siguientes:

- Emisiones Vehiculares
- Quema de Biomasa
- Polvo suspendido
- Sulfuros Regionales
- Industria
- Aerosol Marino

Resultados MP fino

Primero utilizó soluciones simulando 6 fuentes de contribución al material particulado, sin embargo, un factor tubo contribución nula. Luego se corrió el modelo con 5 factores, sin embargo, ninguna solución resultó ser estable. Solo soluciones con 4 factores resultaron ser estables cuyo resultado se entrega a continuación.

El perfil de factores se entrega en la Figura 89, identificándose las siguientes fuentes emisoras: Industrial, tráfico vehicular mezclado con contribución regional (aerosoles marinos), polvo resuspendido y quema de leña.

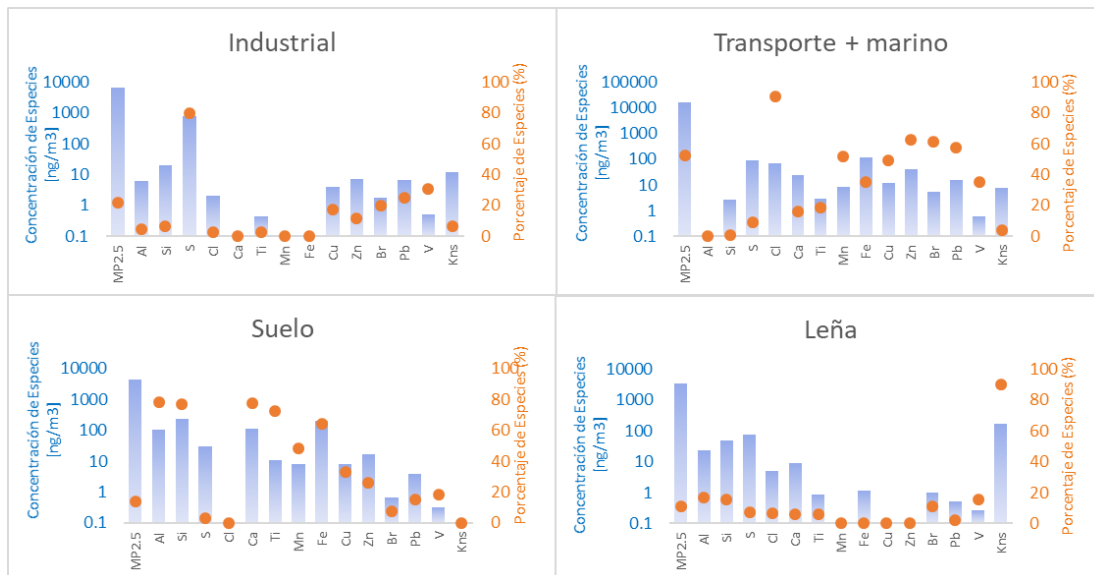


Figura 89: Perfil de factores

La primera fuente contiene la mayor parte del MP fino, y concentra principalmente los elementos S y V. No posee una estacionalidad semanal/anual definida. S ha sido utilizado como trazador de contribución regional, ya que corresponde principalmente al Sulfato del MP fino, el cual proviene de mayormente de oxidación y transformación atmosférica de las emisiones de SO₂ industriales. En este factor también aparece el V, que ha sido atribuido principalmente a la emisión de petróleos pesados y diésel en el sector industrial, reforzando el hecho que este factor responde al impacto de fuentes provenientes desde fuera de la Región Metropolitana. También se identifican contribución de Pb, Br Cu y Zn, que previamente ha sido utilizado como trazador de emisiones industriales, en específico de la refinería de Cu en (Barraza et al., 2017; Kavouras et al., 2001). Dada la presencia de estos metales, esta fuente tiene un impacto más bien de escala regional.

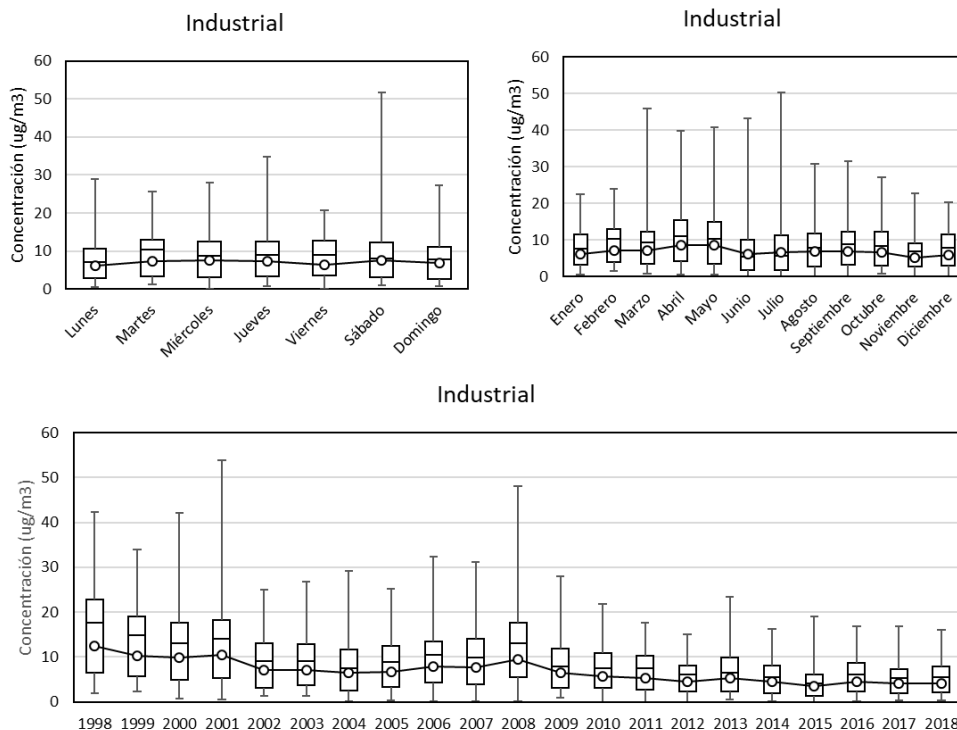


Figura 90: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

La segunda fuente identificada tiene contribuciones mayoritarias de Cl, Mn, Cu, Zn y Br. La mayoría de estos elementos ha sido atribuida a emisiones de tráfico vehicular, ya sea en emisiones de escape (Mn, Br) o bien en emisiones de desgaste de frenos de vehículos (Cu, Zn), por lo tanto, este factor refleja fuertemente el rol de las emisiones del tráfico vehicular en la zona. Tiene una estacionalidad marcada con incremento en los meses de invierno, y ha presentado una disminución sostenida a lo largo de los años. El hecho que también aparezca el Cl en este factor indica que existe también una contribución regional dada principalmente por el comportamiento sales marinos.

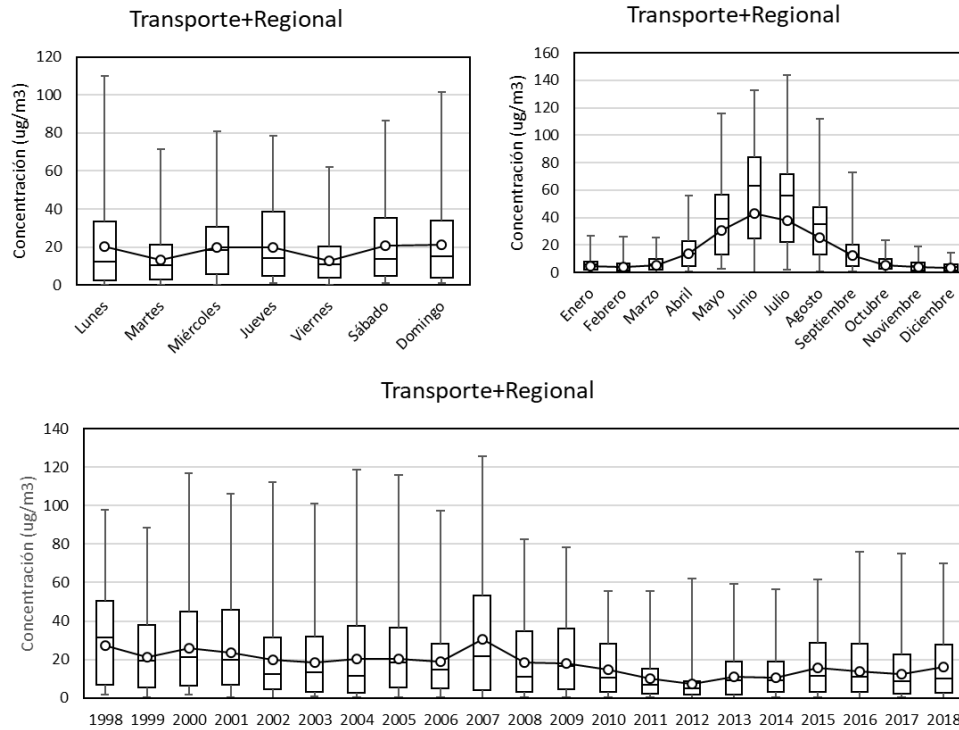


Figura 91: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

La tercera fuente emisora identificada tiene contribuciones mayoritarias de Al, Si, Ca, Ti y Fe, los cuales han sido atribuidos en la literatura como componentes del suelo. De esta manera este factor ha sido catalogado como fuentes de suelo o resuspensión de suelo, y corresponde al levantamiento de polvo resuspendido que se da por la acción del tráfico vehicular, actividades de construcción o bien la acción del viento. No muestra una estacionalidad anual, y su tendencia ha tendido a aumentar con el tiempo, lo que tiene relación con el aumento del parque vehicular. Esta fuente tiene una categorización de origen más bien local,

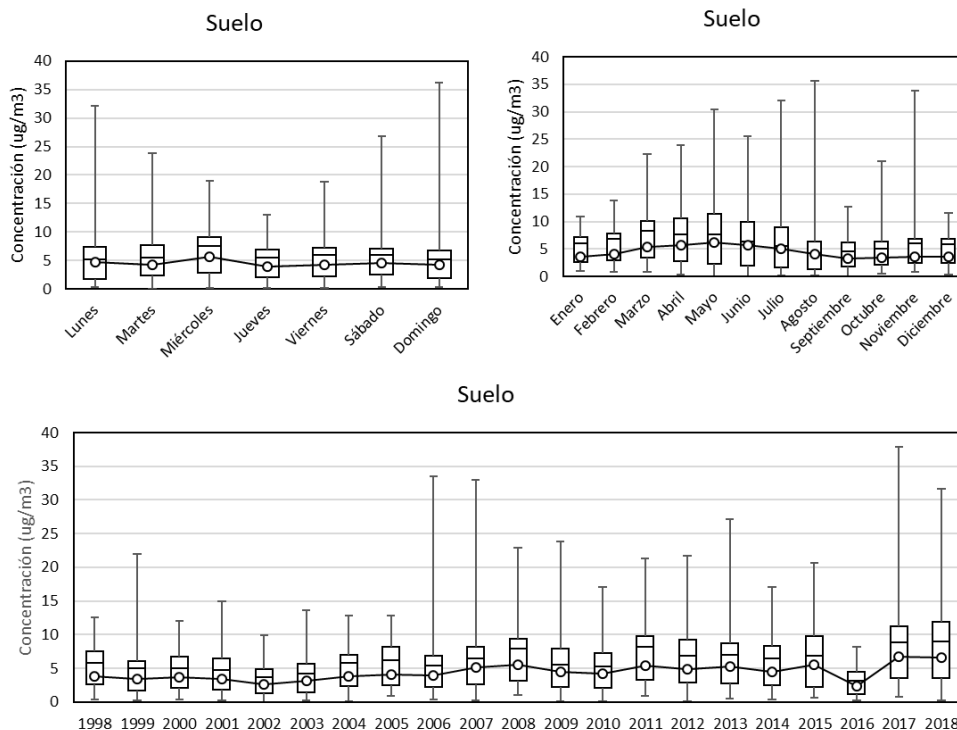


Figura 92: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

La última fuente identificada por el modelo corresponde a la quema de biomasa, ya que concentra mayormente su trazador (Kns). También se observan contribuciones de Si y Al que han sido también atribuidos a las cenizas de la combustión de leña. Si bien esta fuente no presenta una estacionalidad muy marcada durante los meses de invierno, el perfil de este factor demuestra inequívocamente que esta fuente no tiene demasiado peso en el $MP_{2,5}$ de la RM, como lo tienen las otras fuentes emisoras consideradas. Además, se ha observado una leve tendencia a la disminución como respuesta a que esta fuente ha ido adquiriendo cada vez menor importancia en la zona producto de las restricciones de uso y también al uso de otras alternativas para calefacción.

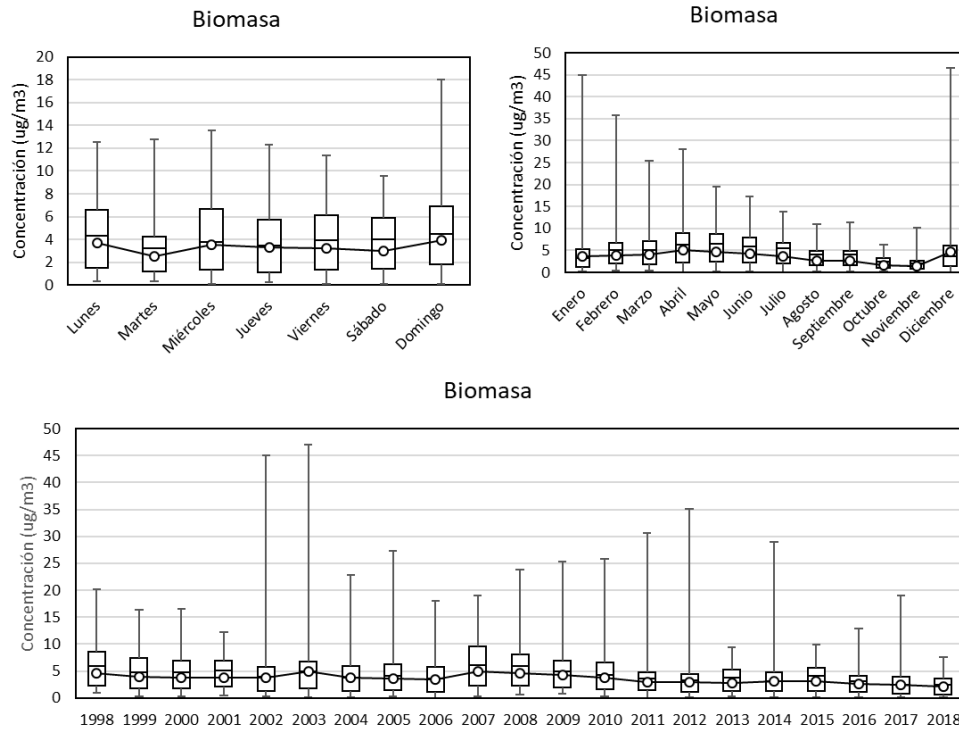


Figura 93: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

Resultados MP grueso

Se utilizó soluciones simulando 6, 5 y 4 fuentes de contribución al material particulado, encontrándose una solución de 5 factores que permiten explicar gran parte de la variabilidad de los datos. Cabe mencionar que el MP grueso corresponde a mayoritariamente a partículas generadas por procesos mecánicos, y principalmente corresponde a polvo resuspendido, el cual está impactado por diferentes tipos de fuentes emisoras. Por naturaleza de las partículas gruesas, éstas tienen un tiempo de residencia atmosférica significativamente menor al de las partículas finas y por lo tanto las fuentes aquí identificadas son de naturaleza preferentemente local. En la figura siguiente se entrega el perfil de las fuentes emisoras identificadas.

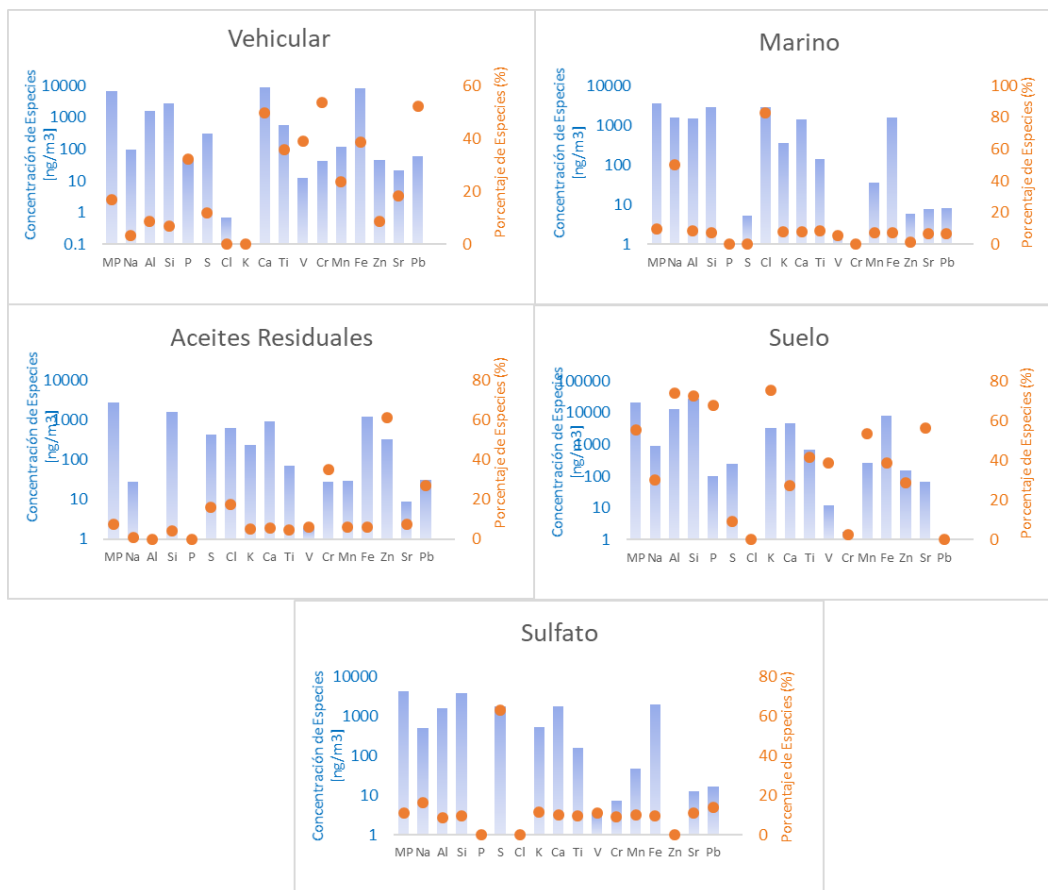


Figura 94: Perfil de factores identificados

El primer factor contiene la mayor parte de la masa del MP y tiene contribuciones mayoritarias de Pb, Cr y Ca. Estos elementos han sido encontrados en emisiones de escape vehiculares, y por lo tanto este factor está reflejando contribución del polvo resuspendido contaminado por las emisiones de escape del tráfico vehicular, que se ha acumulado por años en el suelo. El perfil anual muestra un incremento en meses de invierno, y por lo tanto responde al efecto de acumulación en épocas frías del año. Presenta una tendencia leve hacia el aumento a lo largo de los años.

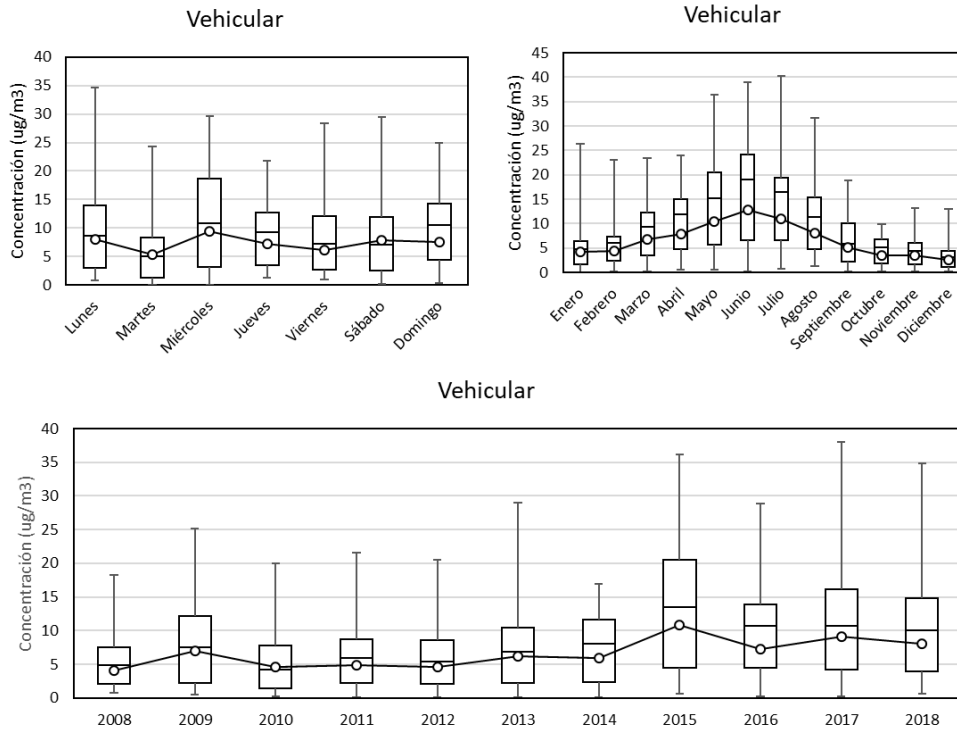


Figura 95: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

El segundo factor encontrado tiene contribuciones mayores de Cl y Na, por lo que ha sido atribuido al impacto de las emisiones las sales marinas. En efecto el perfil anual indica mayor concentración durante los meses estivales que es cuando se espera mayores tasas de recambio de masas de aire dentro de la ciudad. La tendencia de la contribución de esta fuente se ha mantenido más bien constante a lo largo de los años.

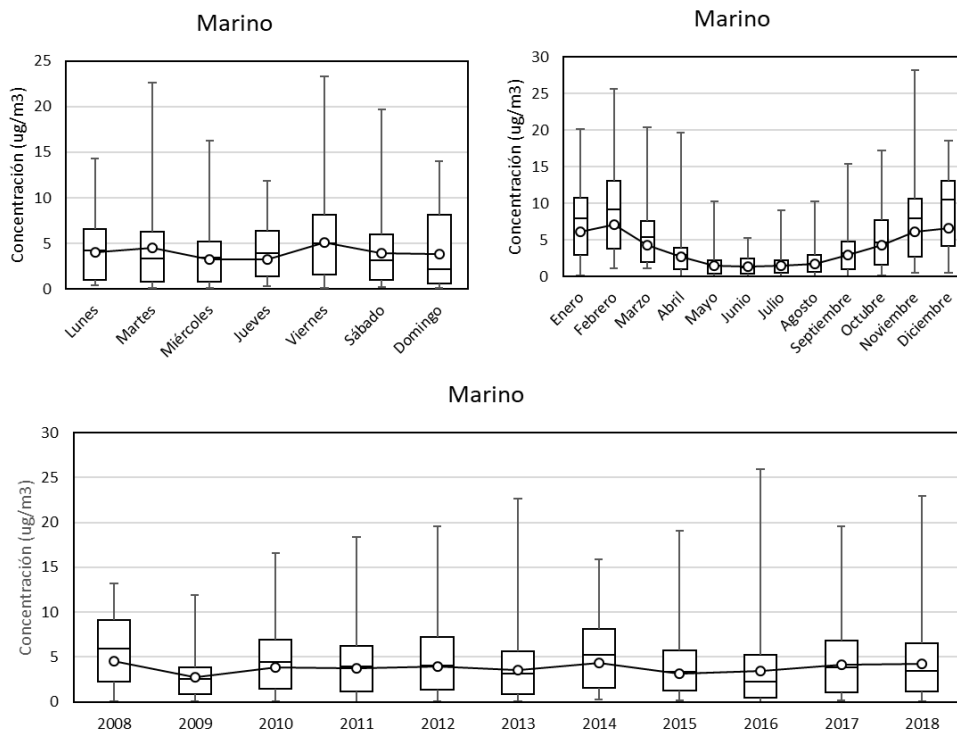


Figura 96: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

El tercer factor se ha catalogado como aceites residuales ya que presenta características similares a las encontradas en (Moreno et al., 2010), con contribución mayoritaria de elementos Zn y Cr, los cuales son residuos de la combustión en los motores vehiculares de combustible o lubricantes. Esta fuente tiene una contribución que ha tendido a disminuir a lo largo de los años, indicando el efecto de las mejores tecnologías de combustión de los motores vehiculares.

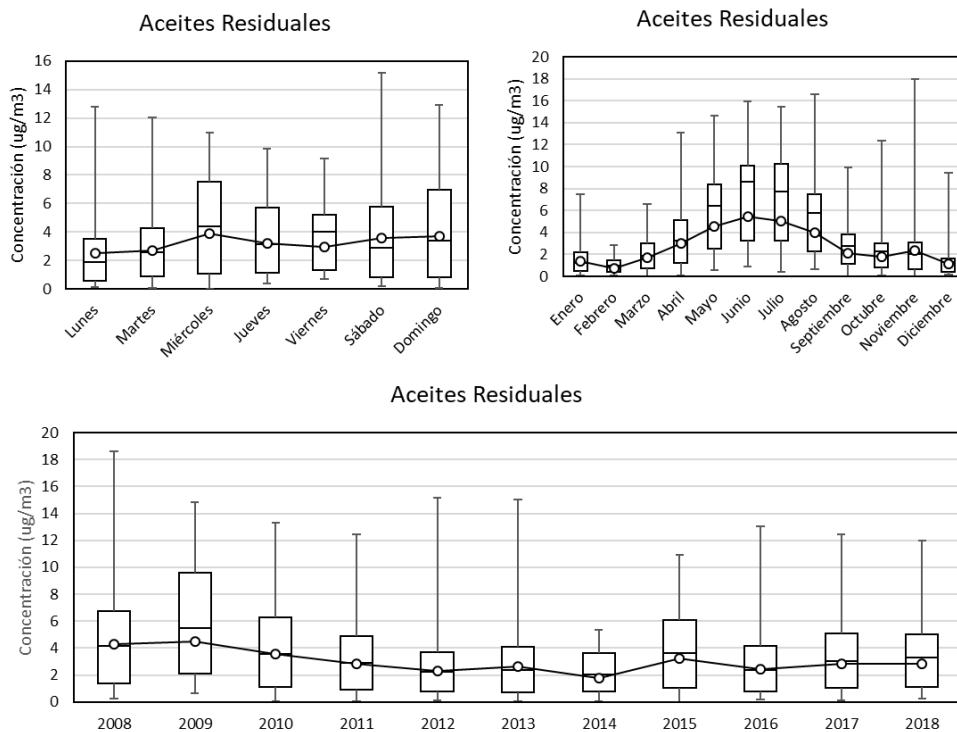


Figura 97: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

La siguiente fuente agrupa principalmente a los elementos clásicos del polvo natural, esto es Al y Si. También hay contribuciones importantes de P y K, los que también están presentes en el suelo natural. Es por esto que esta fuente se ha catalogado como suelo. A lo largo de los años no es posible identificar una tendencia definida de concentración.

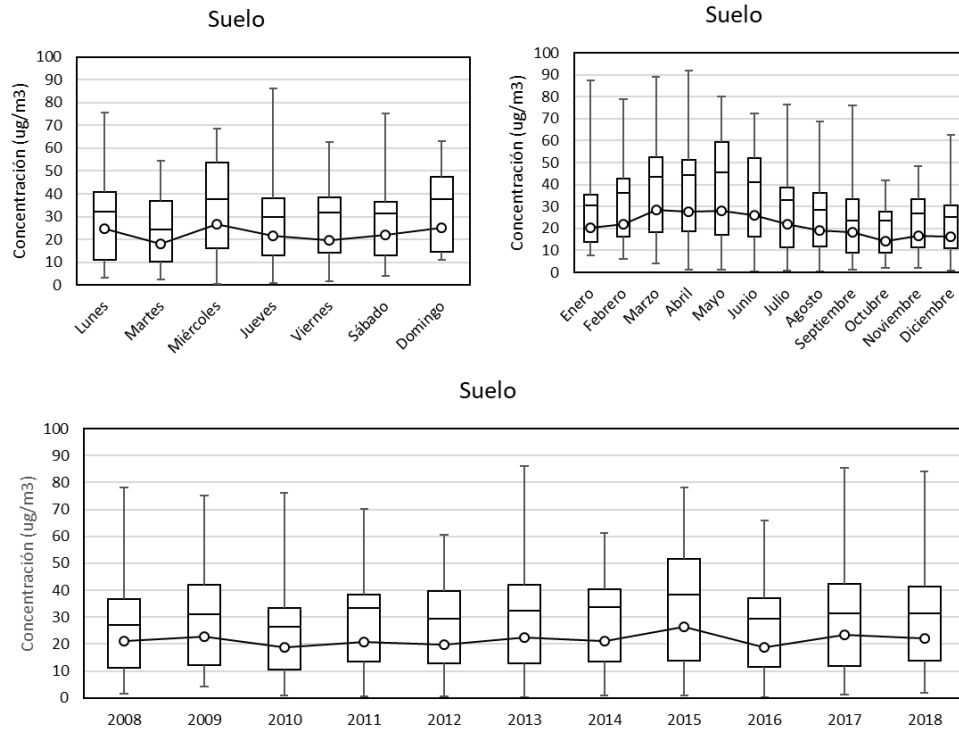


Figura 98: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

La última fuente identificada tiene contribución predominante de S y ha tendido a disminuir a lo largo de los años, por lo que fue catalogado como sulfato.

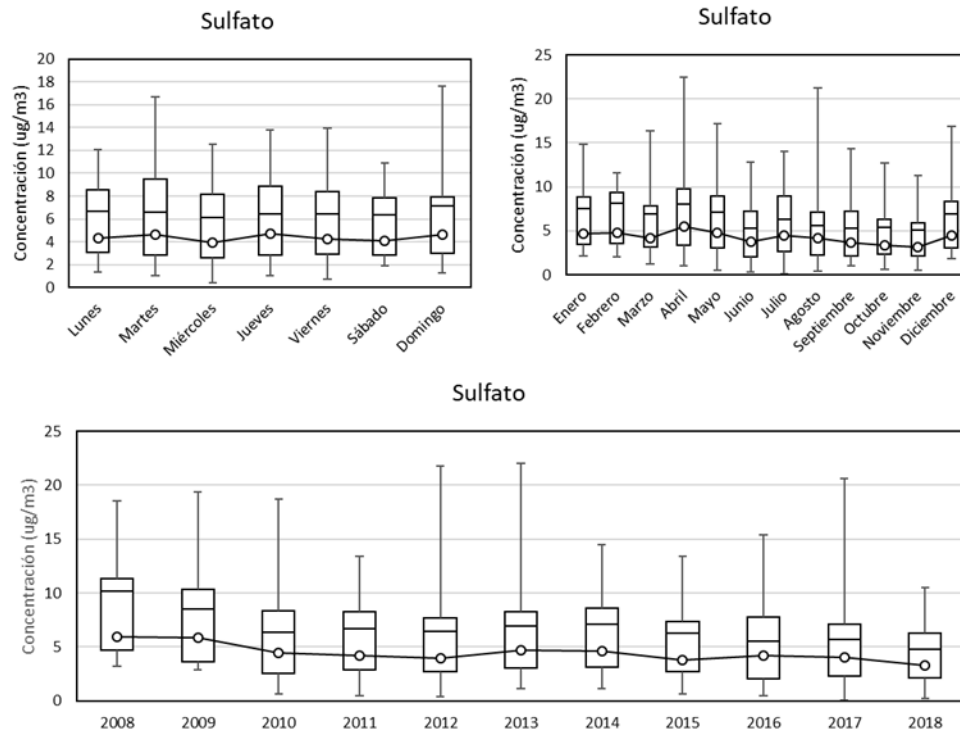


Figura 99: Perfil temporal semanal, anual y tendencia.

Análisis de la evolución de las emisiones y la participación de los diferentes sectores en la calidad del aire durante los últimos 5 años en la Región Metropolitana

En la figura siguiente se entrega la evolución de la participación de las fuentes emisoras en el MP_{2,5} en función de los resultados obtenidos en la sección anterior. Se encuentra que la concentración en la región siempre ha predominado la fracción fuente Transporte+Regional. Esta fuente obedece a las emisiones del parque vehicular de Santiago, combinado con una fuerte contribución regional que obedece al aporte que entregan las fuentes fuera de la RM, destacándose la contribución marina.

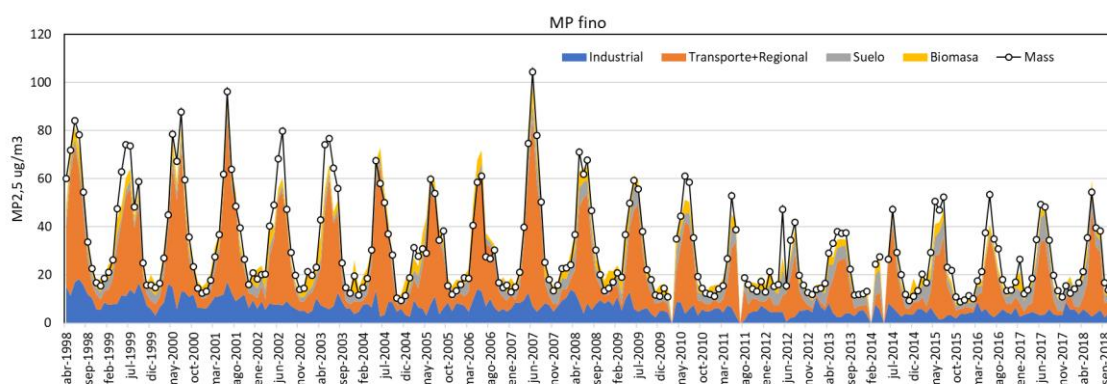


Figura 100: Evolución de la participación de las diferentes fuentes emisoras calidad del aire MP fino.

Como una figura simplificada, se entrega de forma comparativa las tortas de contribución de las fuentes emisoras encontradas para MP fino y grueso en diferentes períodos de evaluación. Se encuentra una reducción promedio del sector industrial y de biomasa, que ha llevado a incrementar la contribución de polvo resuspendido. El transporte vehicular y la contribución regional ha tenido una contribución más bien constante a lo largo de los años.

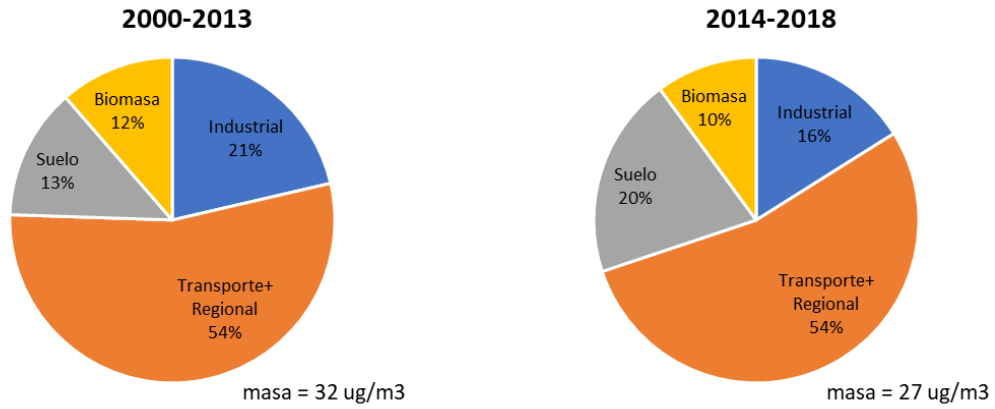


Figura 101: MP fino.

Respecto de la contribución de MP grueso, se destaca el incremento de la proporción del polvo contaminado por emisiones vehiculares. El resto de las fuentes ha tenido un comportamiento más bien constante.

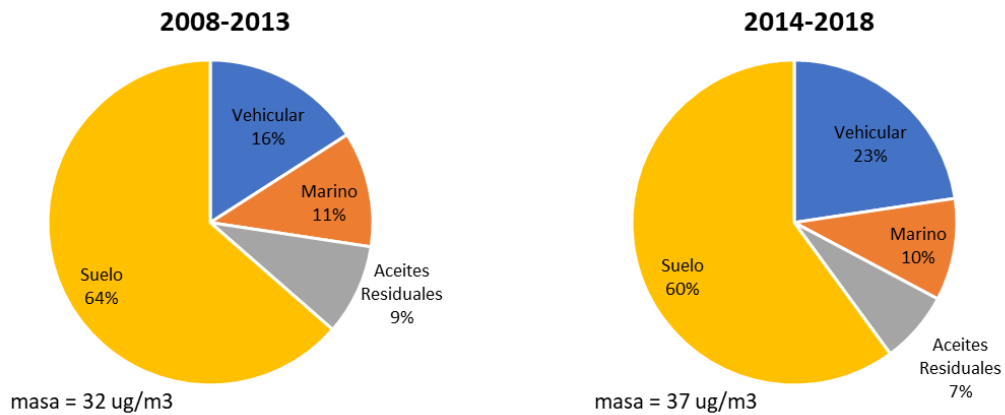


Figura 102: MP grueso

Conclusiones

Se realizó una revisión de la información histórica de calidad del aire (para partículas) y meteorología de la RM y las principales ciudades con planes de descontaminación vigentes del Sur de Chile, desde la VI a la XII región para el período 2014-2018. De la revisión de información de calidad del aire de las regiones VI a la XII se encontraron múltiples períodos con series de datos que claramente evidenciaban problemas de monitoreo. Removiendo estos períodos, se lograron identificar tendencias que señalan que la situación de calidad del aire al año 2018 es una condición de saturación en casi todas las estaciones de monitoreo analizadas, especialmente las que se encuentran en la Región de Aisén, La Araucanía y Los Lagos que muestran valores que van desde 466% a un 667% del valor de la norma respectiva.

En la RM, prácticamente todas las estaciones de la Red MACAM (excepto Las Condes) presentan condición de saturación tanto para $MP_{2,5}$ como para MP_{10} . Respecto de MP_{10} , la saturación se da preferentemente por la norma anual en todas las estaciones, excepto para Talagante.

El análisis de tendencia de factor de impacto por concentración (FIC) aplicado a los monitoreos continuos, señala que dentro de los factores que más impactan la concentración es la velocidad del viento y el efecto estacional. La velocidad del viento tiene relación con las condiciones de dispersión en de la atmósfera, mientras que el efecto estacional obedece a dos factores: el primero es meteorológico relacionado con la disminución de la altura de la capa de mezcla en los meses fríos y el segundo que corresponde al incremento de las fuentes emisoras de invierno, en especial la calefacción de leña residencial en aquellas ciudades del extremo sur. El análisis estadístico indica que a nivel país la tendencia anual hay una disminución de los niveles de concentración a partir del año 2015 tanto para MP_{10} como $MP_{2,5}$, con una disminución estadísticamente significativa durante los fines de semana señalando predominio de fuentes antropogénicas.

Respecto de la tendencia anual en las estaciones de las regiones del sur de Chile se observa una disminución en casi todas ellas, excepto en la Araucanía y Los Lagos en donde hubo impactos por concentración mayores en el último año considerado (2018), respecto de lo que se venía presentando. Respecto de la tendencia de los datos continuos de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en la RM se encuentra que hay una disminución general en ambas fracciones para el período 2014-2018. La distribución espacial, señala que las mayores concentraciones se dan hacia el sector poniente de la RM, especialmente en $MP_{2,5}$ en las estaciones de Cerrillos, El Bosque, Cerro Navia y Pudahuel. El sitio con menor impacto por concentración corresponde a la estación de Talagante, que es aproximadamente un 70% menor que las estaciones más impactadas del sector oriente.

La base de datos histórica de filtros del equipo dicotómico de Parque O'Higgins fue complementada con análisis de elementos XRF a filtros comprendidos entre el año 2014 y 2018, consiguiendo una base de datos de especiación química de 20 años (1998-2018), única a nivel mundial. Las mediciones gravimétricas indican que las concentraciones de MP fino muestran una tendencia a la disminución considerando todo el período 1998-2018, sin embargo, en los últimos 4 años se distingue un estancamiento de los niveles. Las concentraciones en los meses fríos son los que mayor disminución muestran, indicando efectividad de las medidas implementadas a lo largo de los años. Sin embargo, considerando solo los períodos fríos (abril-septiembre) en donde se acumulan los episodios de

contaminación más severos, es posible identificar dos quiebres de tendencia, el primero en el 2007-2008, el segundo el 2015 -2016. Las concentraciones invernales muestran valores más altos en los últimos 4 períodos (2015-2018) con relación a los períodos anteriores (2011-2014) demostrando que medidas más agresivas se requieren para poder seguir bajando los niveles de particulado fino en la Región.

Los resultados de análisis de concentración elemental de filtros del período 2014-2018 se encuentra dentro de los órdenes de magnitud de los registros históricos, lo que permite realizar comparaciones con años anteriores sin sesgos por metodología analítica. En general todos los elementos presentan mayor concentración durante el período frío respecto del cálido, especialmente S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Br, Pb.

No es posible identificar una tendencia definida respecto de la concentración de elementos asociados a la corteza terrestre (Al, Si, Ca, Ti), las que han sido utilizados como trazador de la resuspensión del polvo y/o actividades de construcción. Los elementos Cu, Zn y S, atribuidos a emisiones industriales y a emisiones vehiculares indican una tendencia clara a la reducción. Cu y Zn, si bien muestran una tendencia a la disminución, durante los últimos años no se registra mayor modificación. Se observa un período de incremento de S, Ni y V centrado en el año 2007, que corresponde mayor impacto industrial, debido a los cortes de suministro de gas natural proveniente desde Argentina, donde el sector industrial se modificó para funcionar en una mezcla de diésel y gas natural. Pb y Br, antiguamente usados como aditivos de combustible vehicular muestran la clásica reducción de FIC debido al retiro de tetracloroetil plomo de las gasolinas producto de la implementación del convertidor catalítico en el mercado automotriz en el período 1992-1993, mostrando los mayores valores de FIC en el año 1998-2001. Posteriormente los valores de FIC's tienden a ser más estables para el caso del Br, y una leve tendencia a la disminución para el caso del Pb. El Cl y Na han sido utilizados como trazadores de aerosoles marinos, y ambos elementos han sido usados como indicadores de la contribución regional asociada a fuentes emisoras fuera de la cuenca de Santiago (fuentes costeras). Se observa que el Na aumenta significativamente a partir del año 2001, para después mostrar una tendencia hacia la reducción, en tanto que el Cl muestra mayores impactos entre los años 1998-1999, y posteriormente tiende a disminuir. Por lo tanto, el comportamiento temporal de Na está más relacionado con las emisiones regionales, y más cercano al impacto de aerosoles marinos. Sin embargo, el Cl tiene un comportamiento más asociado a fuentes antropogénicas debido al aumento significativo en otoño-Invierno. El K por otra parte ha sido asociado al impacto de emisiones de quema de biomasa y su evolución a través de los años va hacia la disminución.

El modelo receptor aplicado a los análisis de composición elemental disponibles indica cuatro fuentes emisoras predominantes, identificadas como tráfico vehicular mezclado con contribución regional (aerosoles marinos), polvo resuspendido y quema de leña. Para el último período (2014-2018) se encuentra que la mayor parte de los impactos por $MP_{2,5}$ se dan por el impacto de emisiones vehiculares con una fuerte contribución regional, que incrementa durante invierno debido a las menores condiciones de dispersión atmosférica. Respecto de los años anteriores se ha encontrado que los aportes industriales y de quema de biomasa (leña) presentan una reducción menor.

A partir de los análisis de composición elemental y de tendencias evidencian que todas las estaciones de monitoreo están mostrando un comportamiento de escala urbana, y prácticamente

el mismo fenómeno local. Para elaborar una imagen de mayor tamaño y más fiel, es necesario que el monitoreo actual de calidad del aire evolucione a incrementar el monitoreo en zonas donde no hay información (zonas rurales, zonas background) e incorporar mediciones de especies trazadoras de fuentes y componentes secundarios de las partículas, con la finalidad de disponer de mayores y mejores indicadores del seguimiento de medidas de los Planes de Descontaminación.

Bibliografía

- Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Räisänen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T., Jantunen, M., 2005. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system. *Atmospheric Environment* 39, 5059–5066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.012>
- Achilleos, S., Wolfson, J.M., Ferguson, S.T., Kang, C.-M., Hadjimitsis, D.G., Hadjicharalambous, M., Achilleos, C., Christodoulou, A., Nisanzi, A., Papoutsas, C., Themistocleous, K., Athanasatos, S., Perdikou, S., Koutrakis, P., 2016. Spatial variability of fine and coarse particle composition and sources in Cyprus. *Atmospheric Research* 169, 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.10.005>
- Alastuey, A., Querol, X., Castillo, S., Escudero, M., Avila, A., Cuevas, E., Torres, C., Romero, P.-M., Exposito, F., García, O., Pedro Diaz, J., Dingenen, R.V., Putaud, J.P., 2005. Characterisation of TSP and PM_{2.5} at Izaña and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain) during a Saharan Dust Episode (July 2002). *Atmospheric Environment* 39, 4715–4728. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.018>
- Allen, A.G., Nemitz, E., Shi, J.P., Harrison, R.M., Greenwood, J.C., 2001. Size distributions of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom. *Atmospheric Environment* 35, 4581–4591. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00190-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00190-X)
- APEG, 1999. Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom.
- Arteconi, A., Mazzarini, A., Di Nicola, G., 2011. Emissions from Ethers and Organic Carbonate Fuel Additives: A Review. *Water Air Soil Pollut* 221, 405. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0804-y>
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A.M., Gallardo, L., 2017. Temporal evolution of main ambient PM_{2.5} sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 10093–10107. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10093-2017>
- Carbone, S., Saarikoski, S., Frey, A., Reyes, F., Reyes, P., Castillo, M., Gramsch, E., Oyola, P., Jayne, J., Worsnop, D.R., Hillamo, R., 2013. Chemical Characterization of Submicron Aerosol Particles in Santiago de Chile. *Aerosol and Air Quality Research* 13, 462–473. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0261>
- Chan, C.C., Ozkaynak, H., Spengler, J.D., Sheldon, L., 1991. Driver exposure to volatile organic compounds, carbon monoxide, ozone and nitrogen dioxide under different driving conditions. *Environ. Sci. Technol.* 25, 964–972. <https://doi.org/10.1021/es00017a021>
- Charron, A., Polo-Rehn, L., Besombes, J.-L., Golly, B., Buisson, C., Chanut, H., Marchand, N., Guillaud, G., Jaffrezo, J.-L., 2019. Identification and quantification of particulate tracers of exhaust and non-exhaust vehicle emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 5187–5207. <https://doi.org/10.5194/acp-19-5187-2019>
- Chellam, S., Kulkarni, P., Fraser, M.P., 2005. Emissions of Organic Compounds and Trace Metals in Fine Particulate Matter from Motor Vehicles: A Tunnel Study in Houston, Texas. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55, 60–72. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464597>
- Finlayson-Pitts, B.J., Pitts, J.N., 2000. CHAPTER 9 - Particles in the Troposphere, in: Finlayson-Pitts, B.J., Pitts, J.N. (Eds.), *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press, San Diego, pp. 349–435. <https://doi.org/10.1016/B978-012257060-5/50011-3>
- Fung, Y.S., Wong, L.W.Y., 1995. Apportionment of air pollution sources by receptor models in Hong Kong. *Atmospheric Environment, International Conference on Sustainable Development*

- Strategies and Global/Regional/Local Impacts on Atmospheric Composition and Climate 29, 2041–2048. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00239-H](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00239-H)
- Gramsch, E., Reyes, F., Vásquez, Y., Oyola, P., Rubio, M.A., 2016. Prevalence of Freshly Generated Particles during Pollution Episodes in Santiago de Chile. *Aerosol and Air Quality Research* 16, 2172–2185. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0691>
- Grigoratos, T., Martini, G., 2015. Brake wear particle emissions: a review. *Environ Sci Pollut Res Int* 22, 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- Harrison, R.M., Jones, A.M., Lawrence, R.G., 2003. A pragmatic mass closure model for airborne particulate matter at urban background and roadside sites. *Atmospheric Environment* 37, 4927–4933. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.08.025>
- Harrison, R.M., Peak, J.D., Msibi, M.I., 1996. Measurements of airborne particulate and gaseous sulphur and nitrogen species in the area of the Azores, Atlantic Ocean. *Atmospheric Environment* 30, 133–143. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00228-Q](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00228-Q)
- Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T., 1991. Quantitative characterization of urban sources of organic aerosol by high-resolution gas chromatography. *Environ. Sci. Technol.* 25, 1311–1325. <https://doi.org/10.1021/es00019a014>
- Huang, X., Olmez, I., Aras, N.K., Gordon, G.E., 1994. Emissions of trace elements from motor vehicles: Potential marker elements and source composition profile. *Atmospheric Environment* 28, 1385–1391. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90201-1](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90201-1)
- James J Schauer, Glynis C Lough, Martin M Shafer, William F Christensen, Michael F Arndt, Jeffrey T DeMinter, June-Soo Park, 2005. Characterization of Metals Emitted from Motor Vehicles (Research Report No. 133). Health Effects Institute.
- Janssen, N.A.H., Van Mansom, D.F.M., Van Der Jagt, K., Harssema, H., Hoek, G., 1997. Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations. *Atmospheric Environment* 31, 1185–1193. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(96\)00291-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00291-9)
- Jhun, I., Oyola, P., Moreno, F., Castillo, M.A., Koutrakis, P., 2013. PM_{2.5} mass and species trends in Santiago, Chile, 1998 to 2010: The impact of fuel-related interventions and fuel sales. *Journal of the Air & Waste Management Association* 63, 161–169. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.742027>
- Jorquera, H., Barraza, F., 2012. Source apportionment of ambient PM_{2.5} in Santiago, Chile: 1999 and 2004 results. *Science of The Total Environment* 435–436, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.049>
- Kavouras, I.G., Koutrakis, P., Cereceda-Balic, F., Oyola, P., 2001. Source Apportionment of PM₁₀ and PM₂₅ in Five Chilean Cities Using Factor Analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association* 51, 451–464. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464273>
- Koistinen, K.J., Edwards, R.D., Mathys, P., Ruuskanen, J., Künzli, N., Jantunen, M.J., 2004. Sources of fine particulate matter in personal exposures and residential indoor, residential outdoor and workplace microenvironments in the Helsinki phase of the EXPOLIS study. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 30, 36–46.
- Koutrakis, P., Sax, S.N., Sarnat, J.A., Coull, B., Demokritou, P., Demokritou, P., Oyola, P., Garcia, J., Gramsch, E., 2005. Analysis of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{2.5–10} Concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55, 342–351. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464627>
- Laschober, C., Limbeck, A., Rendl, J., Puxbaum, H., 2004. Particulate emissions from on-road vehicles in the Kaisermühlen-tunnel (Vienna, Austria). *Atmospheric Environment* 38, 2187–2195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.017>

- Lee, D.S., Garland, J.A., Fox, A.A., 1994. Atmospheric concentrations of trace elements in urban areas of the United Kingdom. *Atmospheric Environment* 28, 2691–2713. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90442-1](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90442-1)
- Maenhaut, W., Cafmeyer, J., 1987. Particle induced X-ray emission analysis and multivariate techniques: An application to the study of the sources of respirable atmospheric particles in Gent, Belgium [WWW Document]. URL /paper/Particle-induced-X-ray-emission-analysis-and-An-to-Maenhaut-Cafmeyer/da692b122bf13e86c4d840a40db3e377e068a19c (accessed 2.26.20).
- Minguillón, M.C., Querol, X., Alastuey, A., Monfort, E., Mantilla, E., Sanz, M.J., Sanz, F., Roig, A., Renau, A., Felis, C., Miró, J.V., Artíñano, B., 2007. PM10 speciation and determination of air quality target levels. A case study in a highly industrialized area of Spain. *Science of The Total Environment* 372, 382–396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.023>
- Moreno, F., Gramsch, E., Oyola, P., Rubio, M.A., 2010. Modification in the Soil and Traffic-Related Sources of Particle Matter between 1998 and 2007 in Santiago de Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association* 60, 1410–1421. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.12.1410>
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Gibbons, W., 2005. Exotic dust incursions into central Spain: Implications for legislative controls on atmospheric particulates. *Atmospheric Environment* 39, 6109–6120. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.038>
- Ojanen, C.H., Pakkanen, T.A., Mañkela, T., Hillamo, R.E., Aarnio, P., Häme, K., Koskentalo, T., 1998. Size segregated aerosol measurements at 3.5 and 20 M heights in Helsinki. *Journal of Aerosol Science, Proceedings of the 1998 International Aerosol Conference Part 1* 29, S245–S246. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00366-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00366-8)
- Pacyna, J.M., 1984. Estimation of the atmospheric emissions of trace elements from anthropogenic sources in Europe. *Atmospheric Environment* (1967) 18, 41–50. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(84\)90227-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(84)90227-0)
- Parekh, P.P., Ghauri, B., Husain, L., 1989. Identification of pollution sources of anomalously enriched elements. *Atmospheric Environment* (1967) 23, 1435–1442. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90403-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90403-4)
- Pio, C.A., Castro, L.M., Cerqueira, M.A., Santos, I.M., Belchior, F., Salgueiro, M.L., 1996. Source assessment of particulate air pollutants measured at the southwest european coast. *Atmospheric Environment* 30, 3309–3320. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00058-1](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00058-1)
- Querol, X., Alastuey, A., Lopez-Soler, A., Mantilla, E., Plana, F., 1996. Mineral composition of atmospheric particulates around a large coal-fired power station. *Atmospheric Environment* 30, 3557–3572. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00108-2](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00108-2)
- Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Mantilla, E., Ruiz, C.R., 2001. Monitoring of PM10 and PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources. *Atmospheric Environment* 35, 845–858. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00387-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00387-3)
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Viana, M.M., Artíñano, B., Salvador, P., Mantilla, E., de Santos, S.G., Patier, R.F., de La Rosa, J., de la Campa, A.S., Menéndez, M., Gil, J.J., 2004. Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. *Science of The Total Environment, Highway and Urban Pollution* 334–335, 359–376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.036>
- Querol, X., Viana, M., Alastuey, A., Amato, F., Moreno, T., Castillo, S., Pey, J., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Artíñano, B., Salvador, P., García Dos Santos, S., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M.C., Monfort, E., Gil, J.I., Inza, A., Ortega, L.A., Santamaría, J.M., Zabalza, J., 2007. Source origin of trace elements in PM from regional

- background, urban and industrial sites of Spain. *Atmospheric Environment* 41, 7219–7231. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.022>
- Rodriguez, A., Hall, M.J., 2003. The simulation of condensation removal of a heavy metal from exhaust gases onto sorbent particles. *Waste Management* 23, 493–502. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00068-5](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00068-5)
- Sánchez-Rodas, D., Sánchez de la Campa, A.M., de la Rosa, J.D., Oliveira, V., Gómez-Ariza, J.L., Querol, X., Alastuey, A., 2007. Arsenic speciation of atmospheric particulate matter (PM₁₀) in an industrialised urban site in southwestern Spain. *Chemosphere* 66, 1485–1493. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.043>
- Sax, S.N., Koutrakis, P., Rudolph, P.A.R., Cereceda-Balic, F., Gramsch, E., Oyola, P., 2007. Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. *Journal of the Air & Waste Management Association* 57, 845–855. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.7.845>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2016. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 3rd ed. Wiley.
- Sternbeck, J., Sjödin, Å., Andréasson, K., 2002. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment* 36, 4735–4744. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00561-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00561-7)
- Sweet, C.W., Vermette, S.J., Landsberger, S., 1993. Sources of toxic trace elements in urban air in Illinois. *Environ. Sci. Technol.* 27, 2502–2510. <https://doi.org/10.1021/es00048a030>
- Swietlicki, E., Puri, S., Hansson, H.-C., Edner, H., 1996. Urban air pollution source apportionment using a combination of aerosol and gas monitoring techniques. *Atmospheric Environment* 30, 2795–2809. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00322-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00322-3)
- Tagle, M., Reyes, F., Vásquez, Y., Carbone, S., Saarikoski, S., Timonen, H., Gramsch, E., Oyola, P., 2018. Spatiotemporal Variation in Composition of Submicron Particles in Santiago Metropolitan Region, Chile. *Front. Environ. Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00027>
- 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* 11, 82. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-82>
- Van Borm, W., Wouters, L., Van Grieken, R., Adams, F., 1990. Lead particles in an urban atmosphere: An individual particle approach. *Science of The Total Environment* 90, 55–66. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90185-W](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90185-W)
- Viana, M., Kuhlbusch, T.A.J., Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R.M., Hopke, P.K., Winiwarter, W., Vallius, M., Szidat, S., Prévôt, A.S.H., Hueglin, C., Bloemen, H., Wählín, P., Vecchi, R., Miranda, A.I., Kasper-Giebl, A., Maenhaut, W., Hitznerberger, R., 2008. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *Journal of Aerosol Science* 39, 827–849. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>
- Viana, M., Querol, X., Götschi, T., Alastuey, A., Sunyer, J., Forsberg, B., Heinrich, J., Norbäck, D., Payo, F., Maldonado, J.A., Künzli, N., 2007. Source apportionment of ambient PM_{2.5} at five spanish centres of the european community respiratory health survey (ECRHS II). *Atmospheric Environment* 41, 1395–1406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.016>

ANEXO I: Corrección de datos históricos de MP_{2,5}

De acuerdo con información del estudio “CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO FINO Y GRUESO EN LA REGIÓN METROPOLITANA” (Licitación ID: 608897-186-LQ15), se encuentran los siguientes antecedentes, respecto del monitoreo MP_{2,5}.

- En período 2000-2008 se monitoreo en 4 estaciones de la Red R.M.: **EML- EMM-EMN-EMO**, con equipos TEOM sin protocolo EPA.
- En periodo 2009-2013, se monitorea en todas las estaciones de la Red R.M. con equipos TEOM sin protocolo EPA. **EMF - EML - EMM - EMN-EMO- EMP- EMQ- EMR- EMS- EMT- EMV**
- En periodo 2012-2014, se realizaron pruebas en algunas estaciones en paralelo con equipos Beta Met One 1020 (MP₁₀) con incorporación de ciclón MP_{2,5} y con Teom -FDMS (Teom más Filter Dynamic Measurement System).
- Desde Octubre de 2013 se comenzó el reemplazo de todo el equipamiento por equipos Beta Met One 1020 con protocolo EPA para MP_{2,5} actualmente en funcionamiento.

Respecto del monitoreo MP₁₀ encuentran los siguientes antecedentes.

	Fecha MP₁₀ Oficial c/principio de medición atenuación Beta
EMF	21-marzo 2019 Beta BAM 1020
EML	21-marzo 2019 Beta BAM 5014
EMM	21-marzo 2019 Beta BAM 1020
EMN	21-marzo 2019 Beta BAM 1020
EMO	04-febrero- 2019 Beta BAM 1020
EMPII	21-marzo 2019 Beta BAM 1020
EMQ	21-marzo 2019 Beta BAM 1020
EMR	14-marzo-2019 Beta BAM 1020
EMS	21-marzo 2019 Beta BAM 1020
EMT	24-marzo 2019 Beta BAM 1020
EMVII	22 abril 2016 Beta BAM 1020

Dado que estos cambios tecnológicos implicaron variaciones en las concentraciones de MP_{2,5}, estos efectos tienen que ser considerados en estudios de Tendencias. Por lo anterior los datos históricos TEOM fueron corregidos siguiendo la “Metodología 1” detallada en el informe final del estudio “CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO FINO Y GRUESO EN LA REGIÓN METROPOLITANA” del año 2017. Las series de tiempo de MP_{2,5} corregidas fueron complementadas con las nuevas series de los equipos actuales certificados (BAM). Las series corregidas se entregan a continuación.

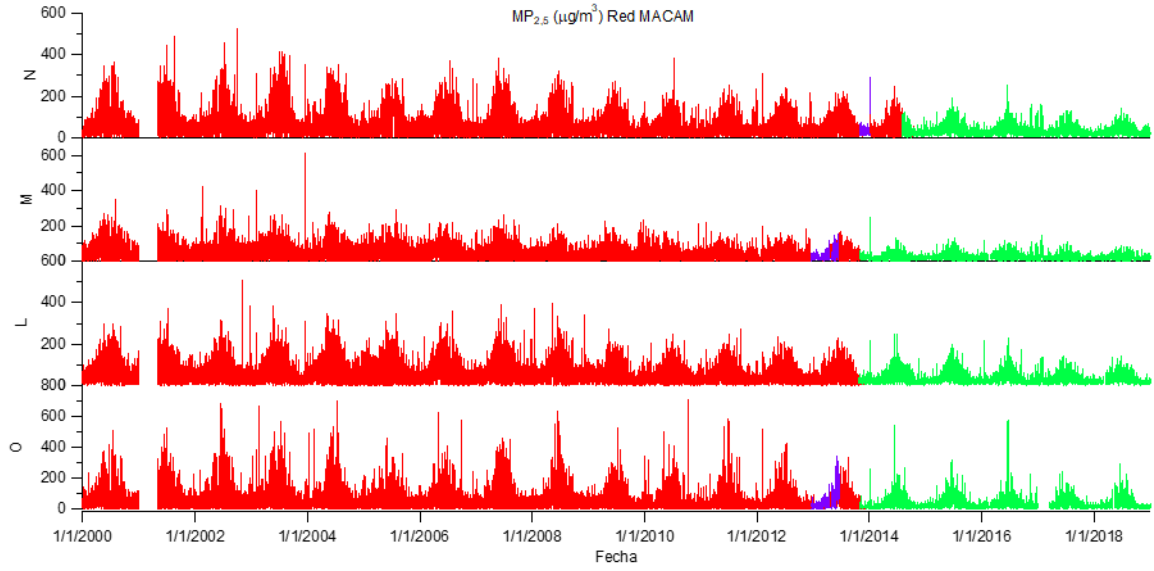


Figura 103: Serie de tiempo horaria de concentración $MP_{2.5}$. Rojo indica tecnología TEOM corregidos. Morado indica tecnología TEOM +FDMS. Verde indica tecnología BAM.

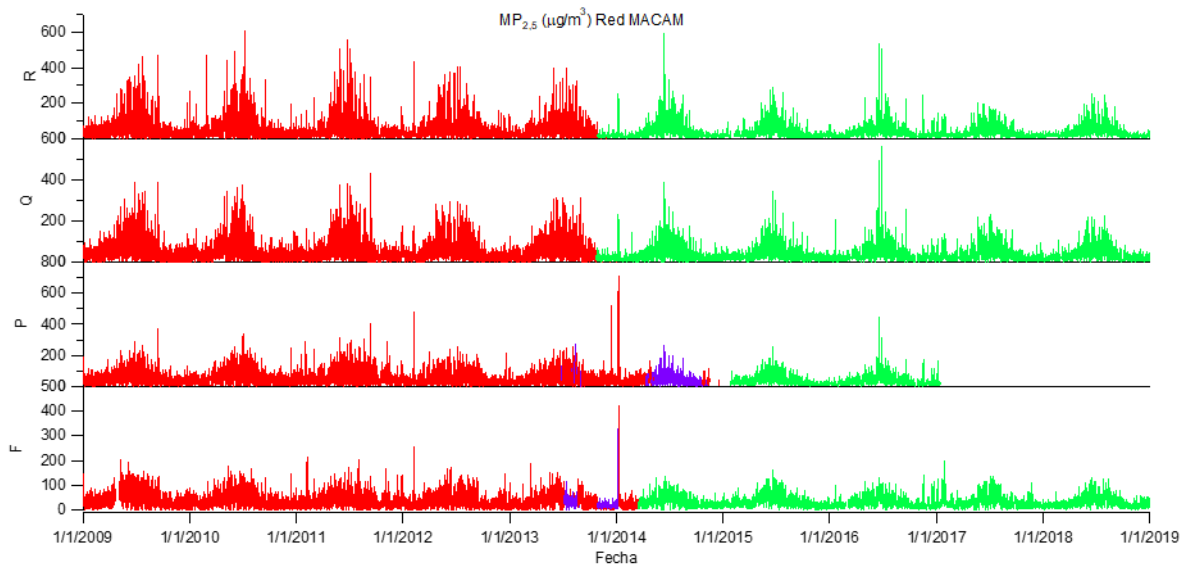


Figura 104: Serie de tiempo horaria de concentración $MP_{2.5}$. Rojo indica tecnología TEOM corregidos. Morado indica tecnología TEOM +FDMS. Verde indica tecnología BAM.

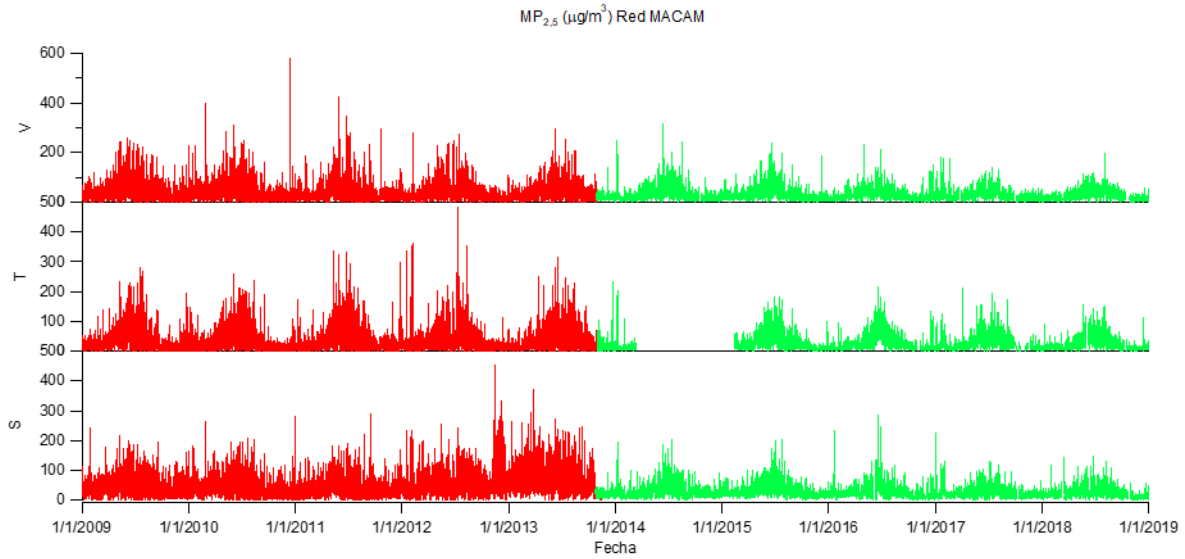


Figura 105: Serie de tiempo horaria de concentración $MP_{2.5}$. Rojo indica tecnología TEOM corregidos. Morado indica tecnología TEOM +FDMS. Verde indica tecnología BAM

Una comparación ilustrativa del cálculo de norma anual y diaria de $MP_{2.5}$ en base a series de concentración sin corregir y corregidas, se entrega en las figuras siguientes.

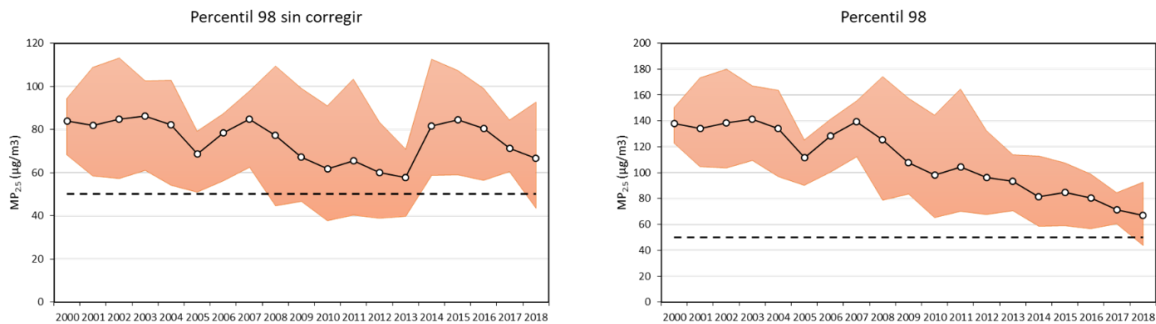


Figura 106: Cálculo de norma diaria $MP_{2.5}$ con datos sin justar (izquierda) y ajustados (deracha).

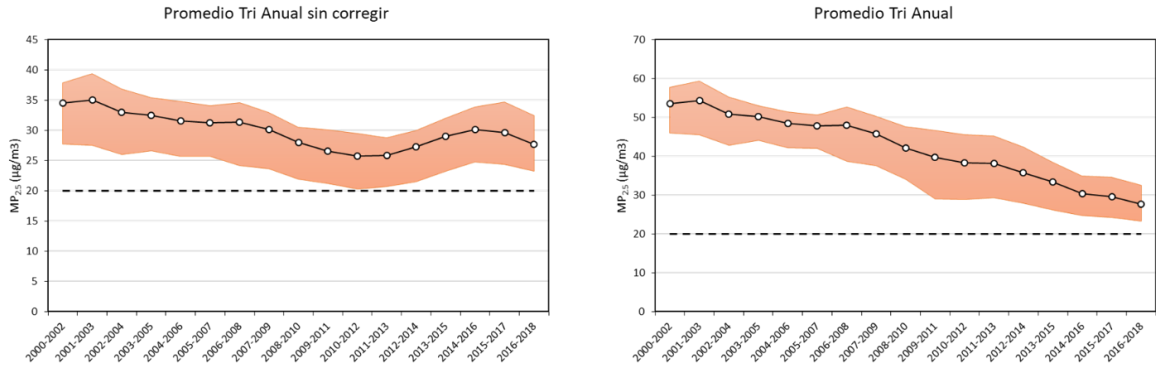
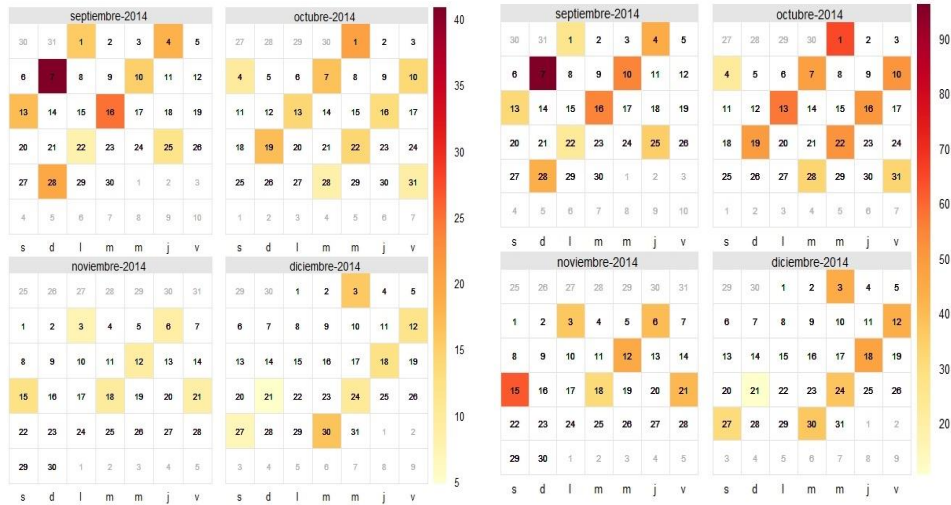


Figura 107: Cálculo de norma anual MP_{2,5} con datos sin justar (izquierda) y ajustados (derecha).

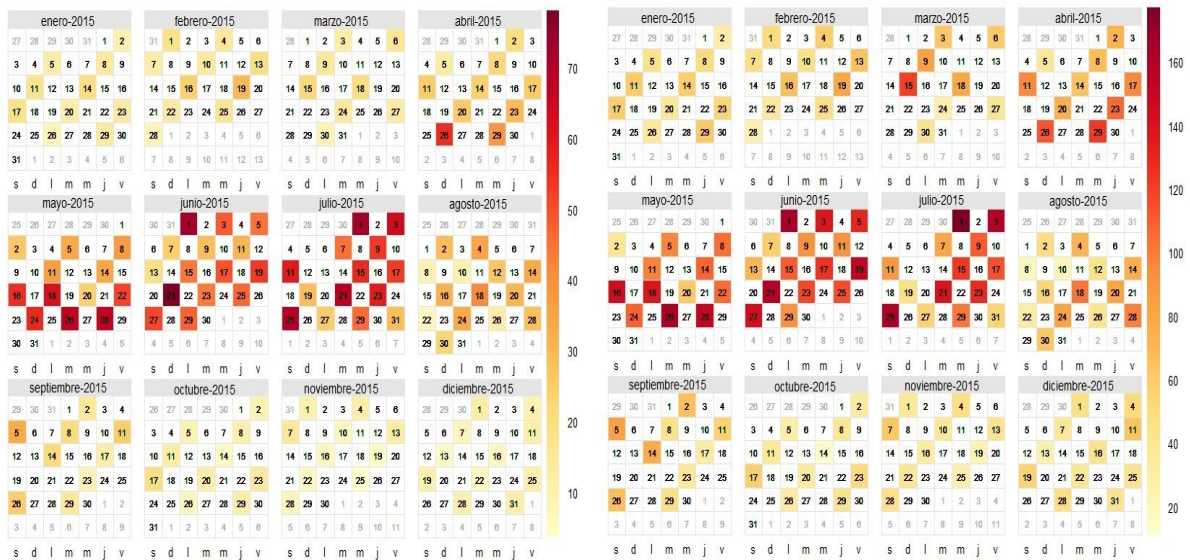
ANEXO II: Filtros Solicitados al Ministerio de Medio Ambiente.

Filtros entregados por el Ministerio de Medio Ambiente.

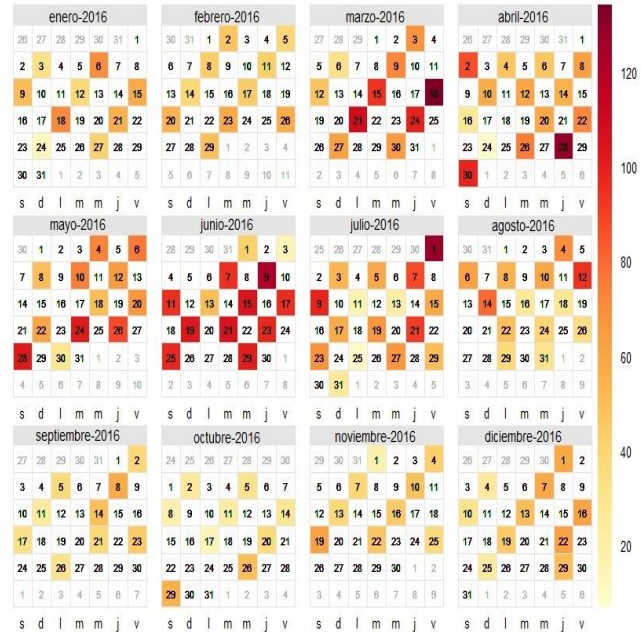
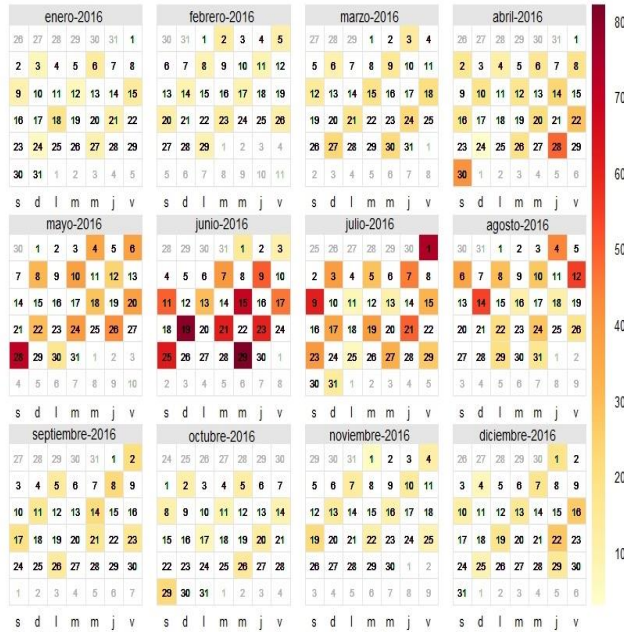
A continuación, se presentan los calendarios ilustrativos de los días de filtros disponibles a analizar, donde el color del recuadro indica la concentración de MP.



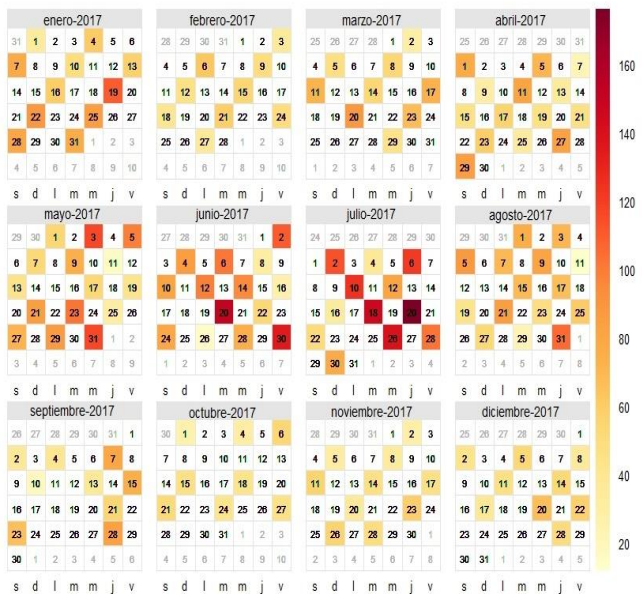
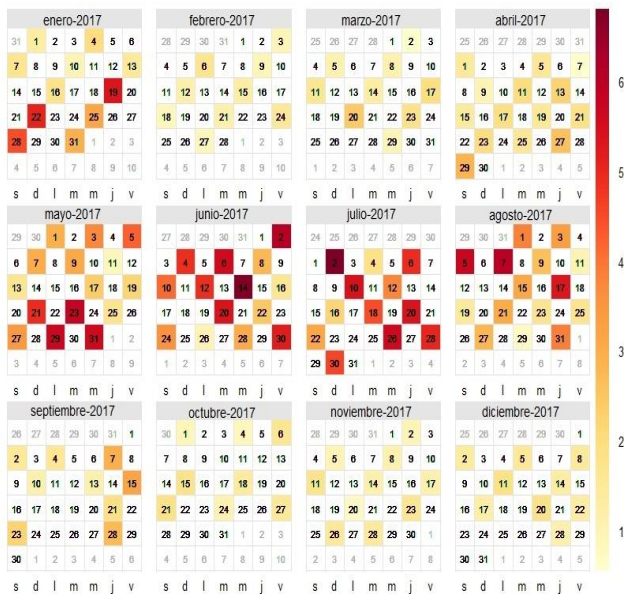
Filtros disponibles para el año 2014. Izquierda: Filtros disponibles para $MP_{2.5}$. Derecha: Filtros disponibles



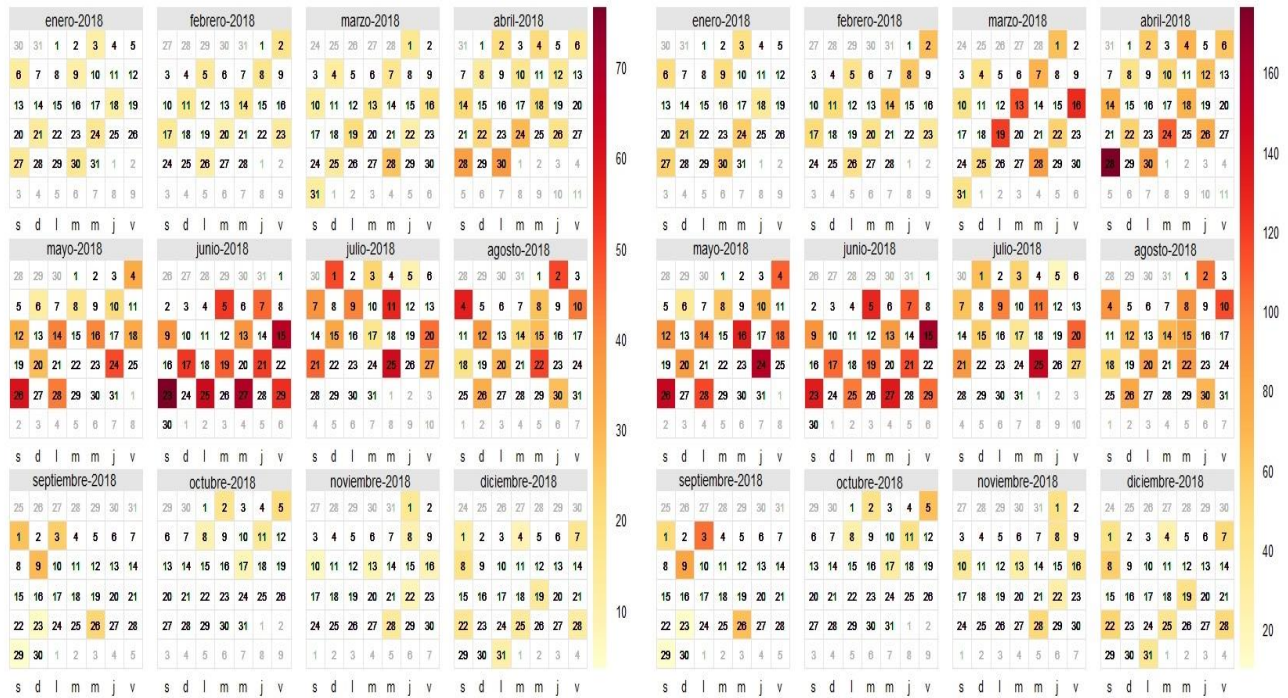
Filtros disponibles para el año 2015. Izquierda: Filtros disponibles para $MP_{2.5}$. Derecha: Filtros disponibles para MP_{10}



Filtros disponibles para el año 2016. Izquierda: Filtros disponibles para $MP_{2.5}$.
Derecha: Filtros disponibles para MP_{10}

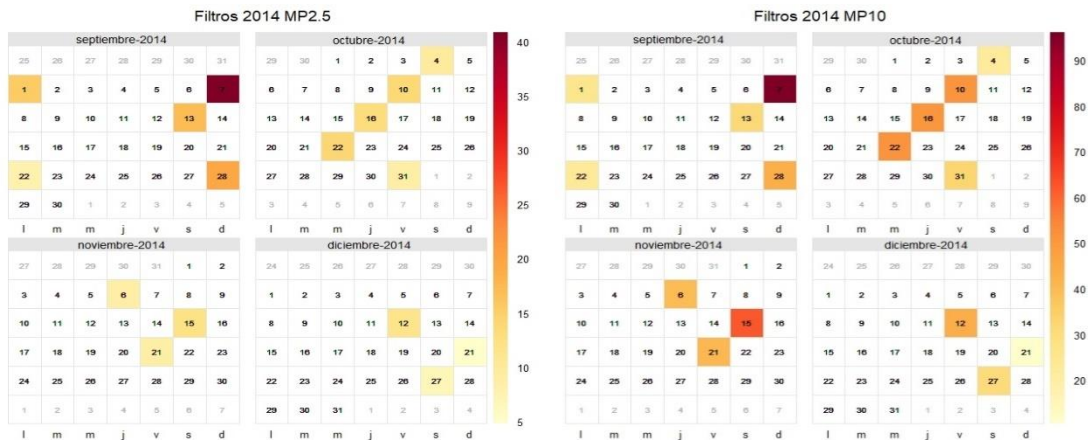


Filtros disponibles para el año 2017. Izquierda: Filtros disponibles para $MP_{2.5}$.
Derecha: Filtros disponibles para MP_{10}

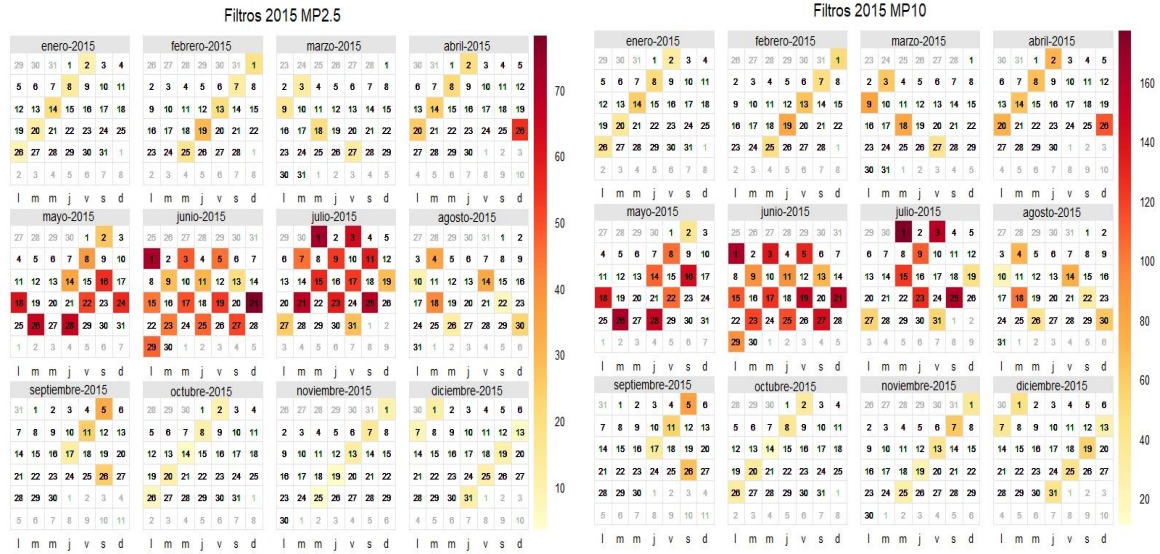


Filtros disponibles para el año 2018. Izquierda: Filtros disponibles para $MP_{2.5}$. Derecha: Filtros disponibles para MP_{10}

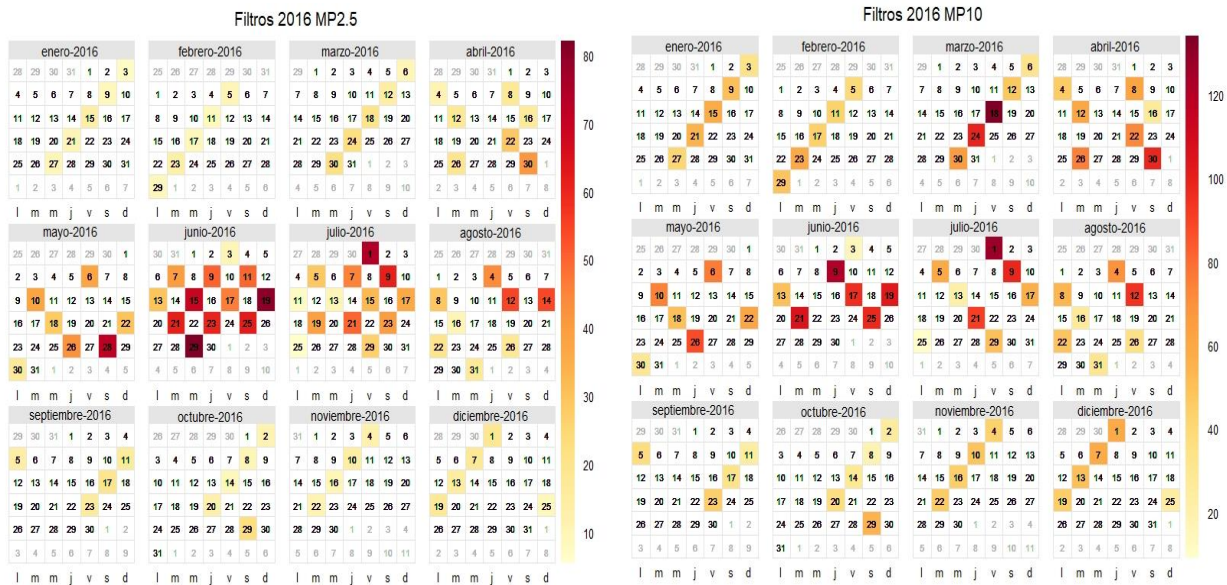
Filtros enviados a analizar.



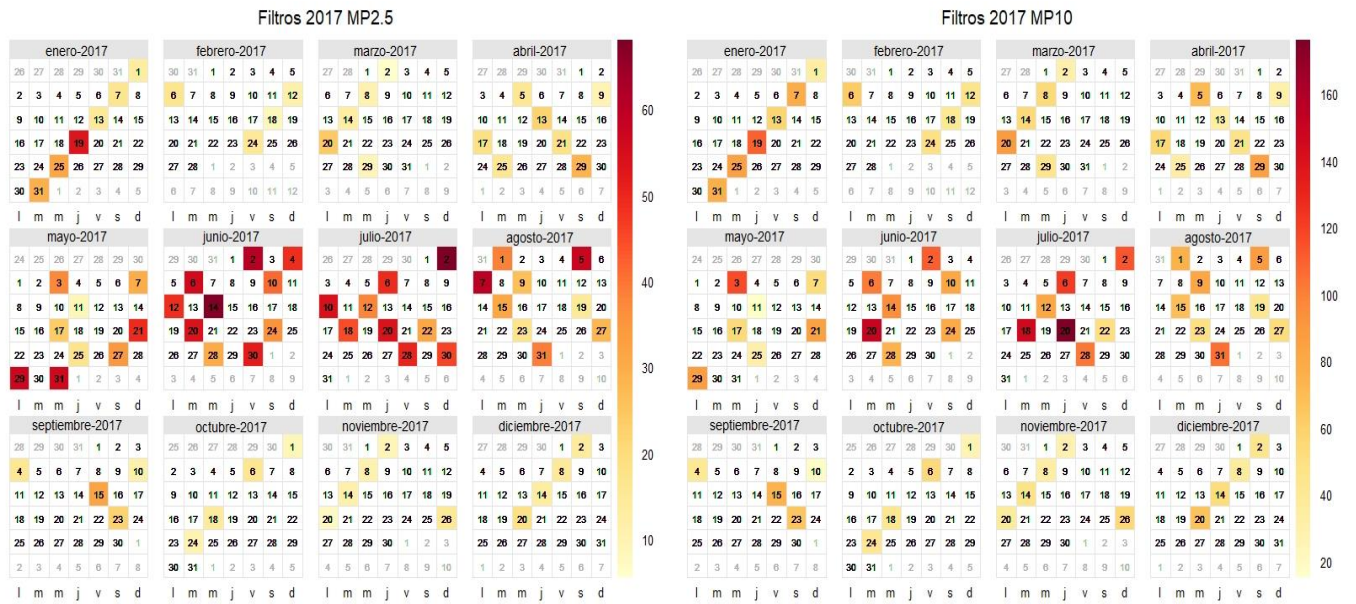
Filtros seleccionados para el año 2014. Izquierda: Fracción Fina. Derecha: Fracción Gruesa.



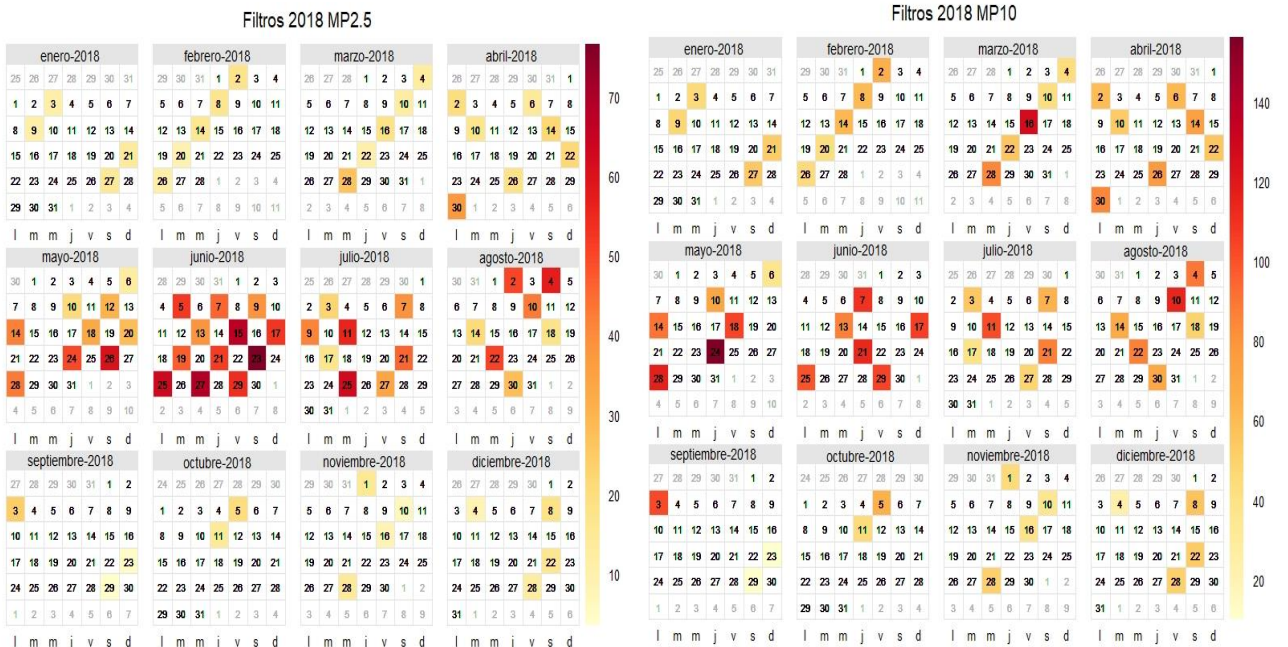
Filtros seleccionados para el año 2015. Izquierda: Fracción Fina. Derecha: Fracción Gruesa.



Filtros seleccionados para el año 2016. Izquierda: Fracción Fina. Derecha: Fracción Gruesa.



Filtros seleccionados para el año 2017. Izquierda: Fracción Fina. Derecha: Fracción Gruesa.



Filtros seleccionados para el año 2018. Izquierda: Fracción Fina. Derecha: Fracción Gruesa.

ANEXO III: Serie de tiempo de concentración de MP y elementos

MP fino

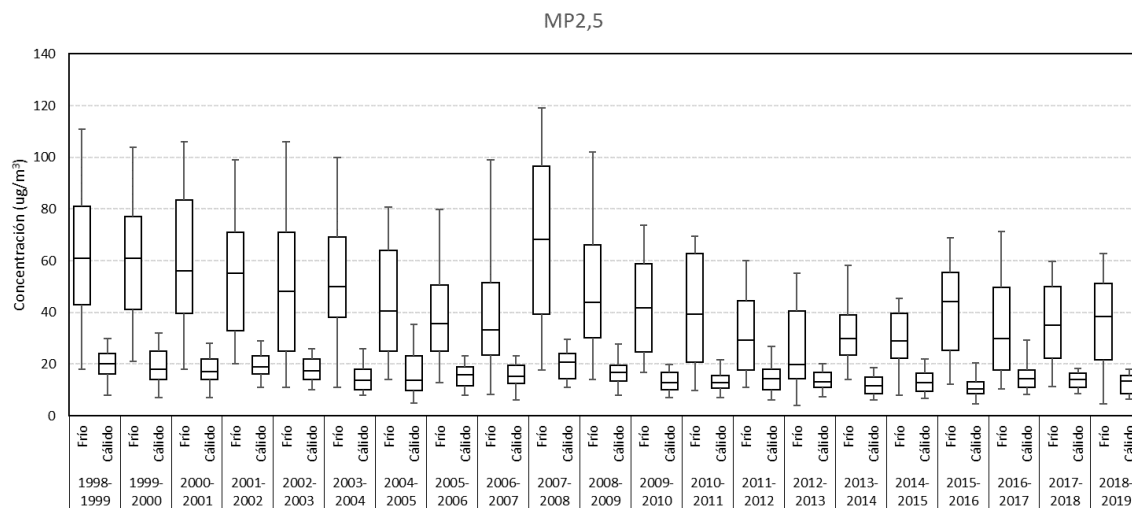
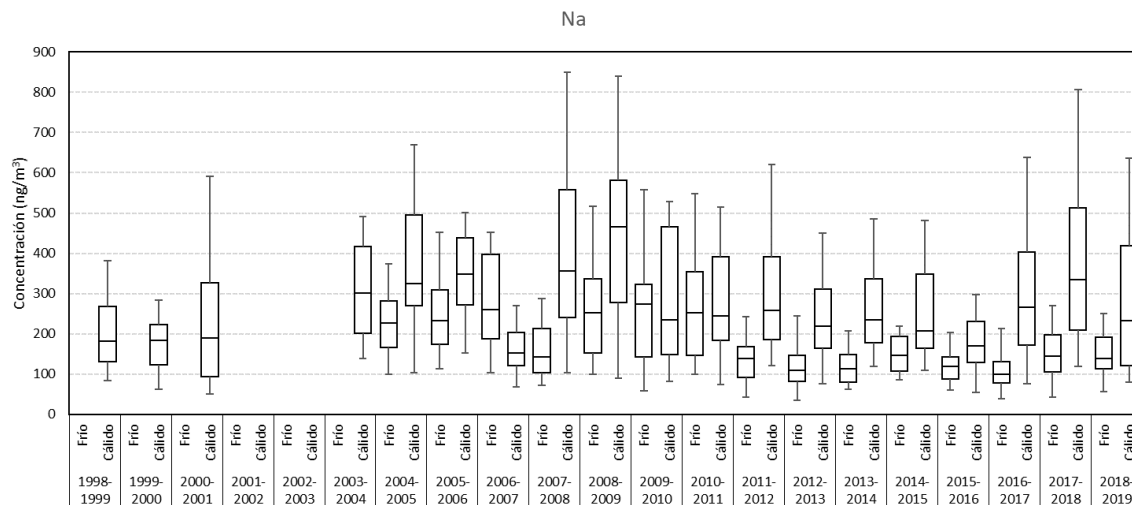
Figura 108: Gráficos de caja de concentración de MP_{2,5}.

Figura 109: Gráficos de caja de concentración de Na. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

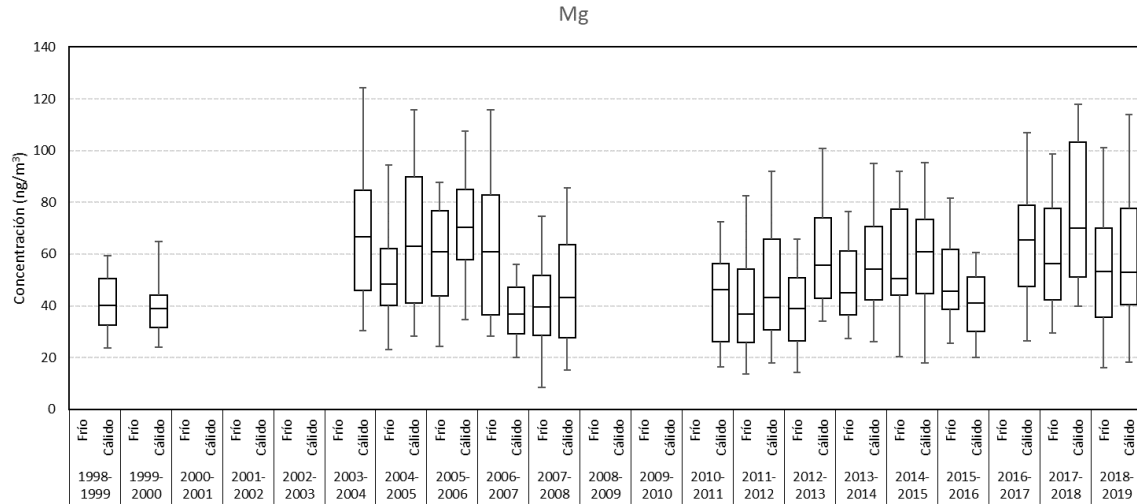


Figura 110: Gráficos de caja de concentración de Mg. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

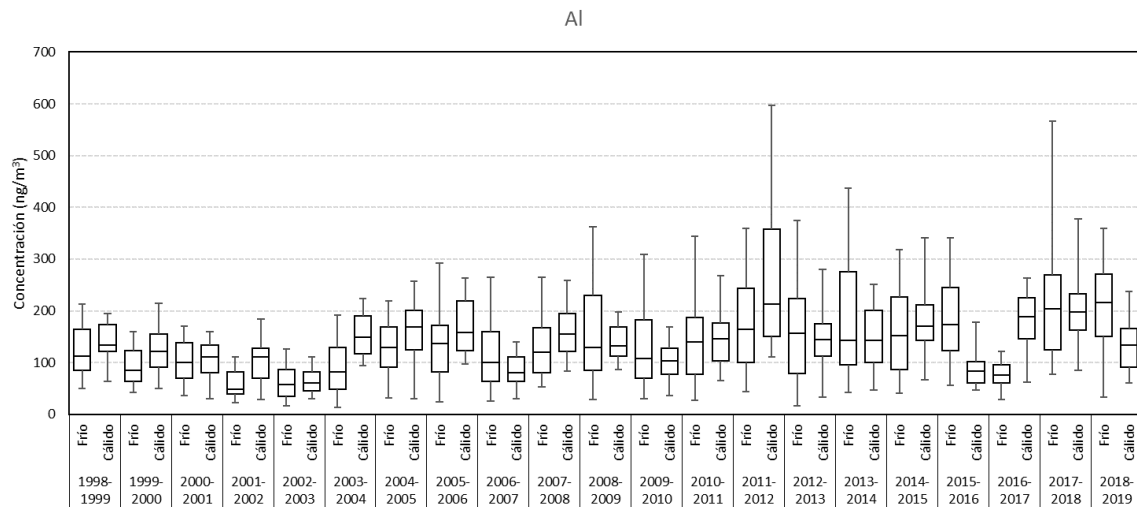


Figura 111: Gráficos de caja de concentración de Al. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

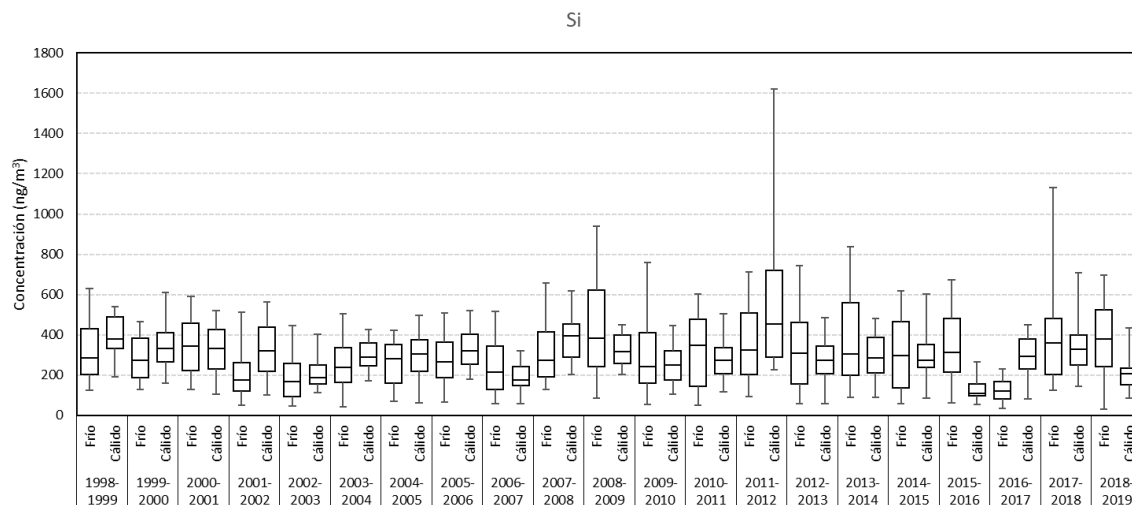


Figura 112: Gráficos de caja de concentración de Si. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

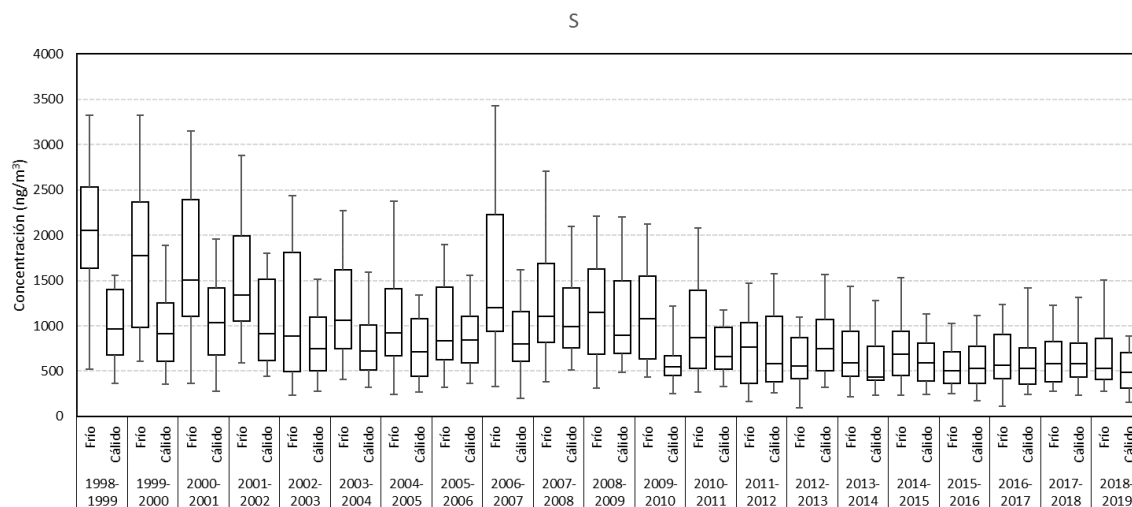


Figura 113: Gráficos de caja de concentración de S. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

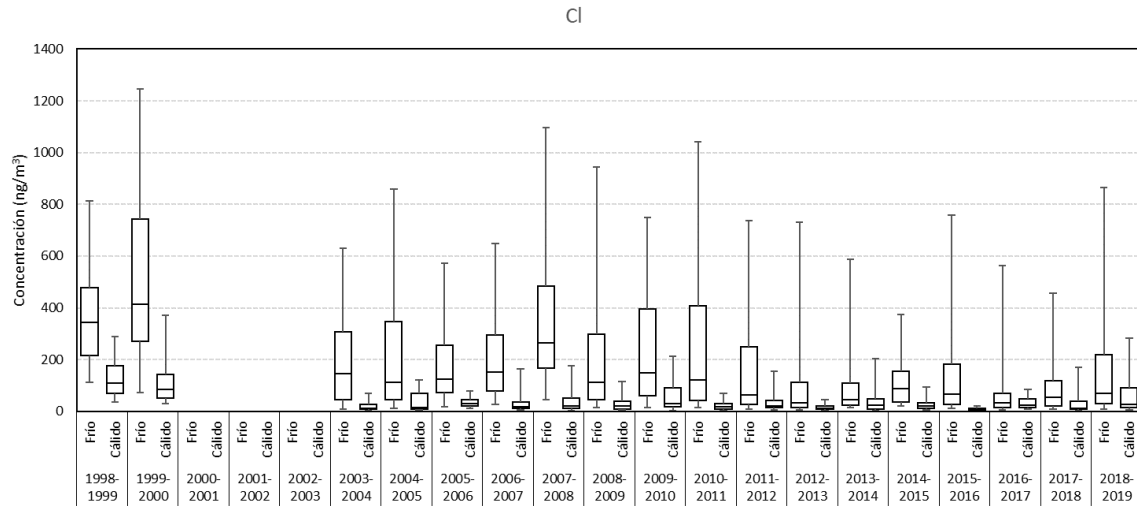


Figura 114: Gráficos de caja de concentración de Cl. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

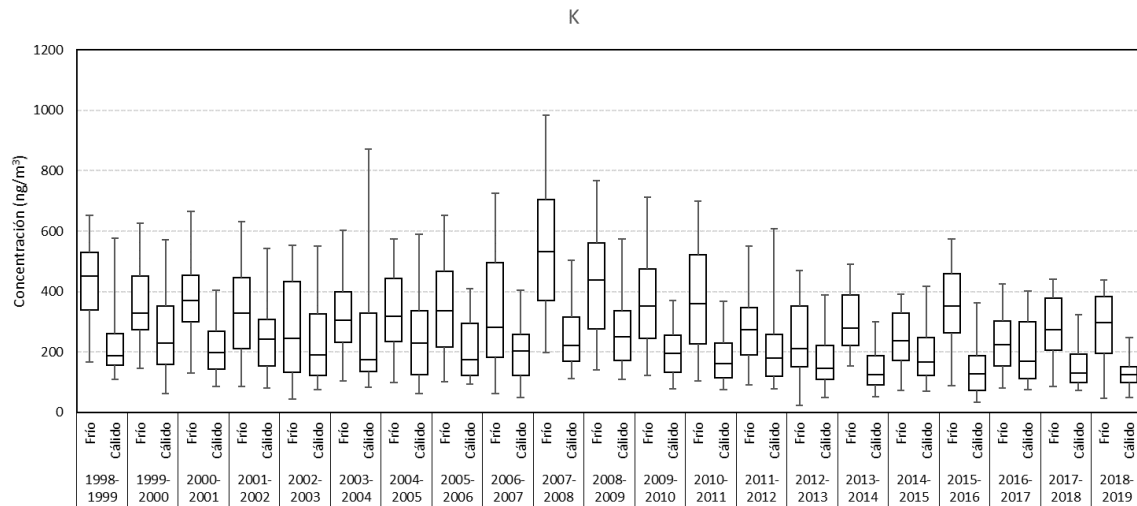


Figura 115: Gráficos de caja de concentración de K. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

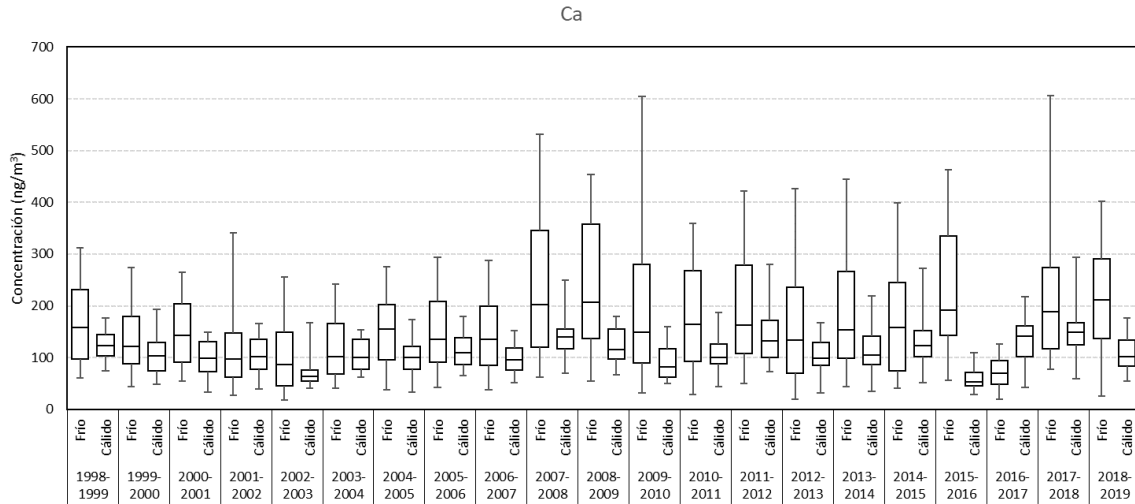


Figura 116: Gráficos de caja de concentración de Ca. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

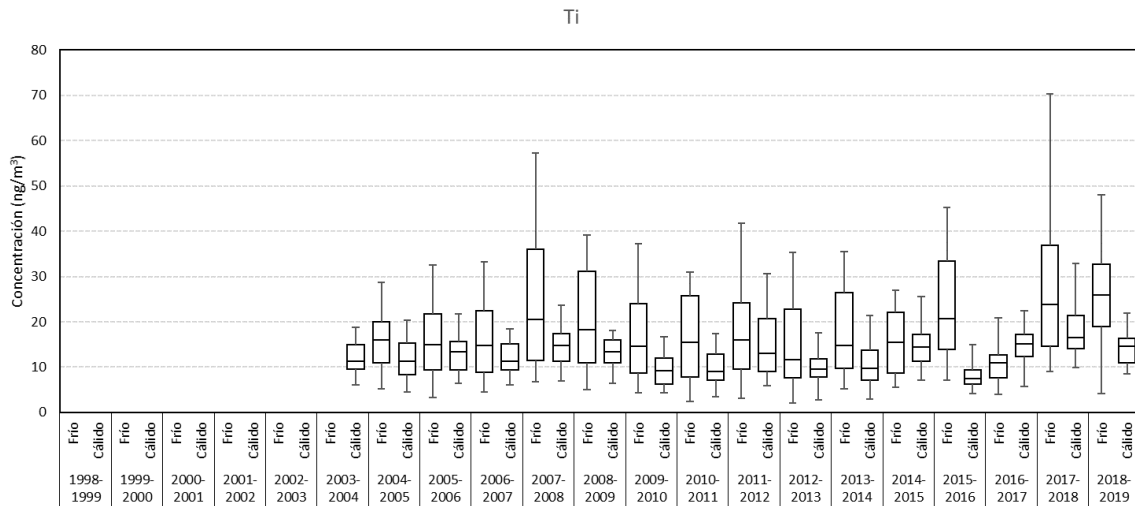


Figura 117: Gráficos de caja de concentración de Ti. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

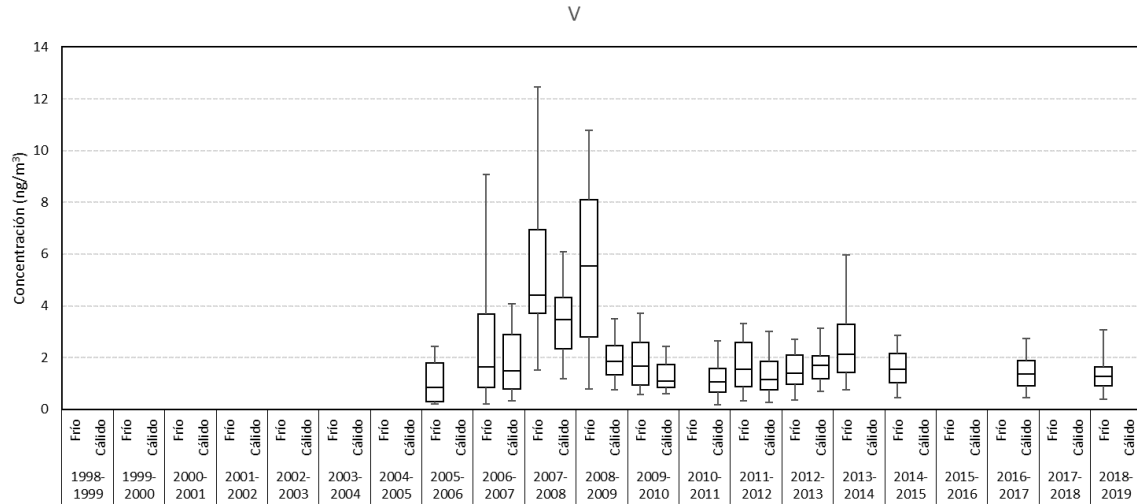


Figura 118: Gráficos de caja de concentración de V. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

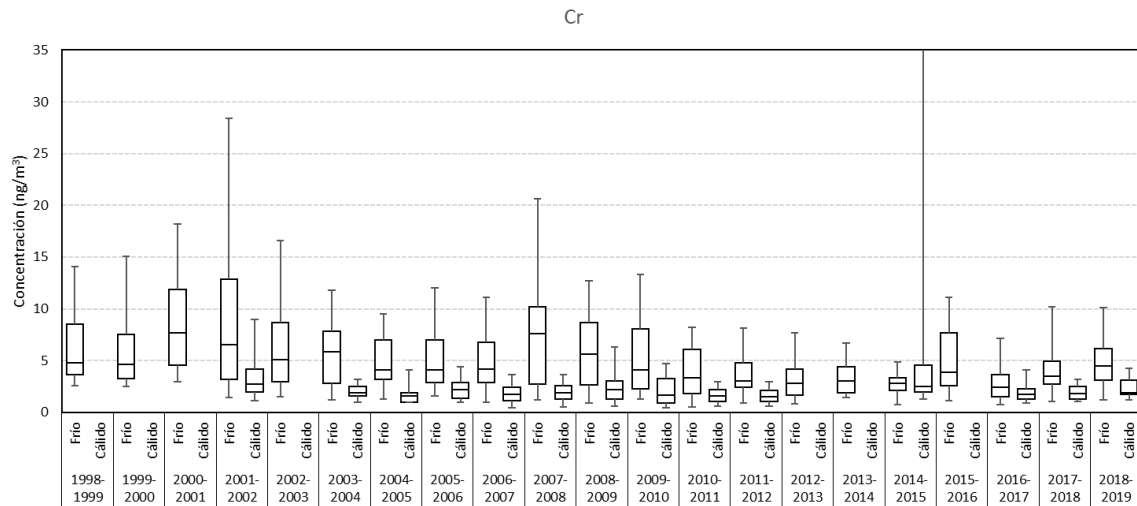


Figura 119: Gráficos de caja de concentración de Cr. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

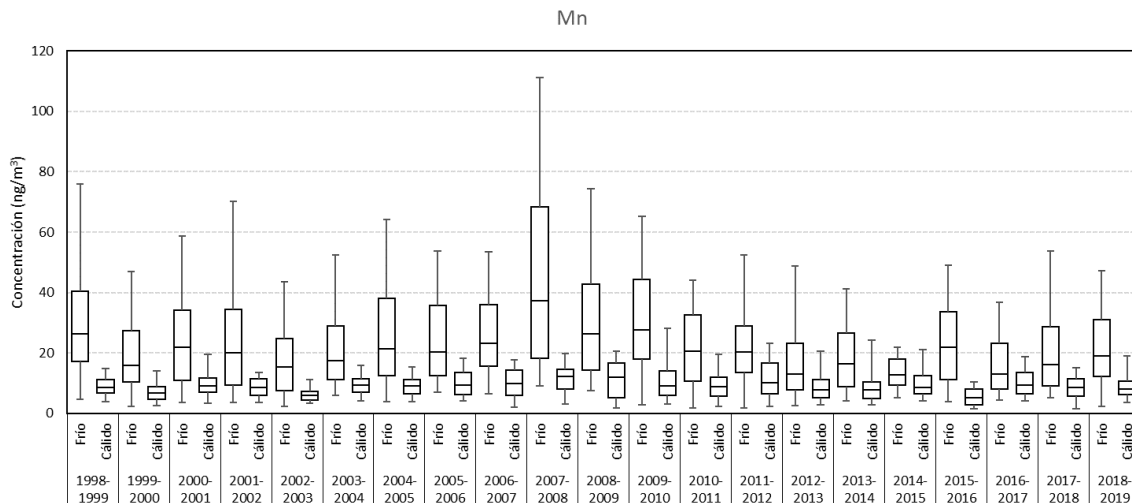


Figura 120: Gráficos de caja de concentración de Mn. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

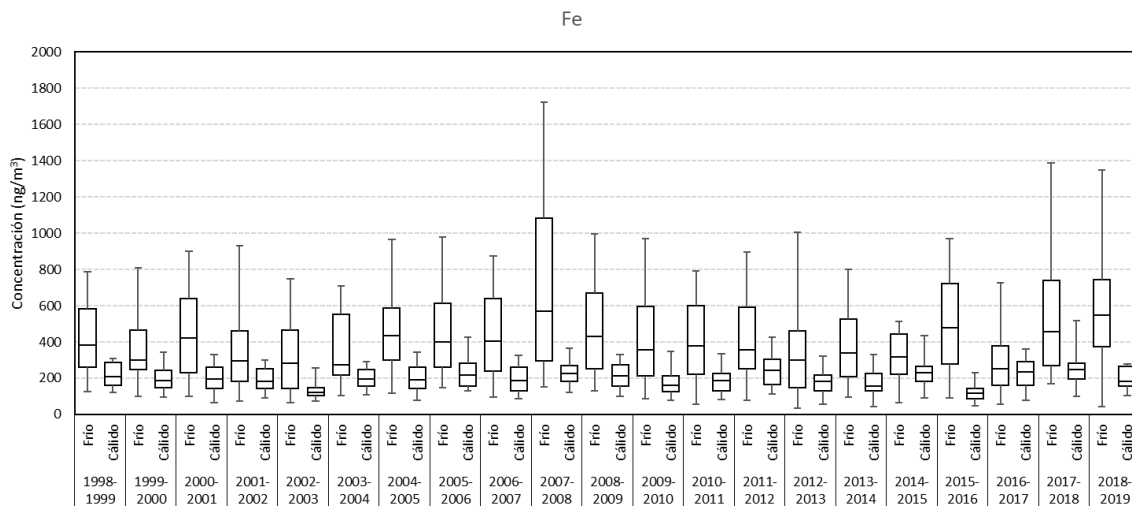


Figura 121: Gráficos de caja de concentración de Fe. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

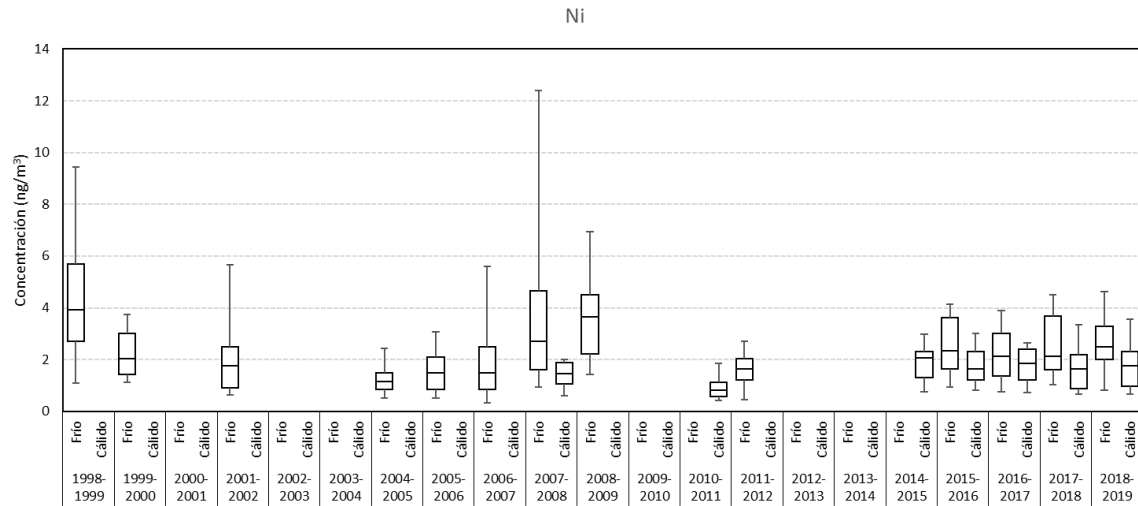


Figura 122: Gráficos de caja de concentración de Ni. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

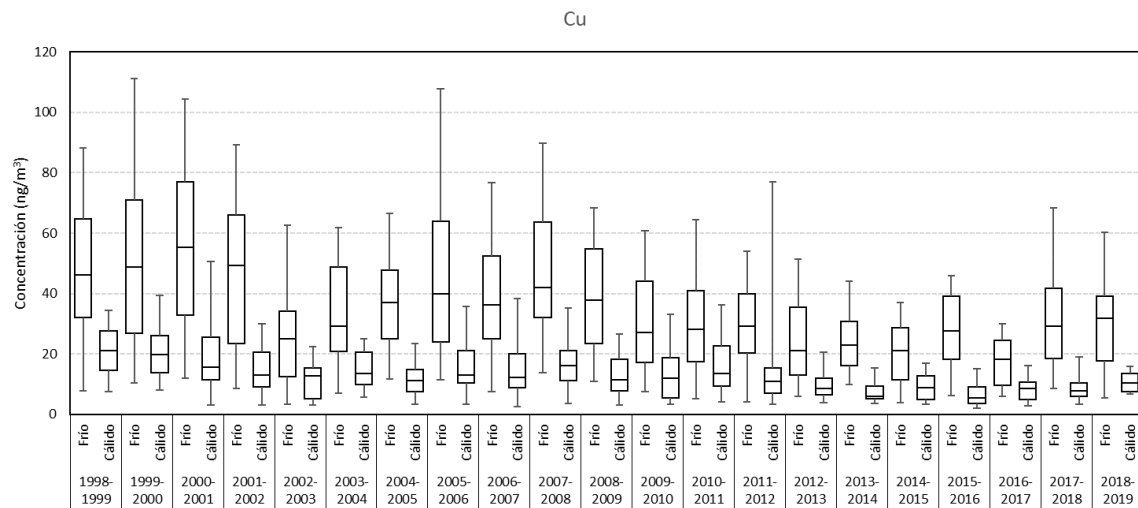


Figura 123: Gráficos de caja de concentración de Cu. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

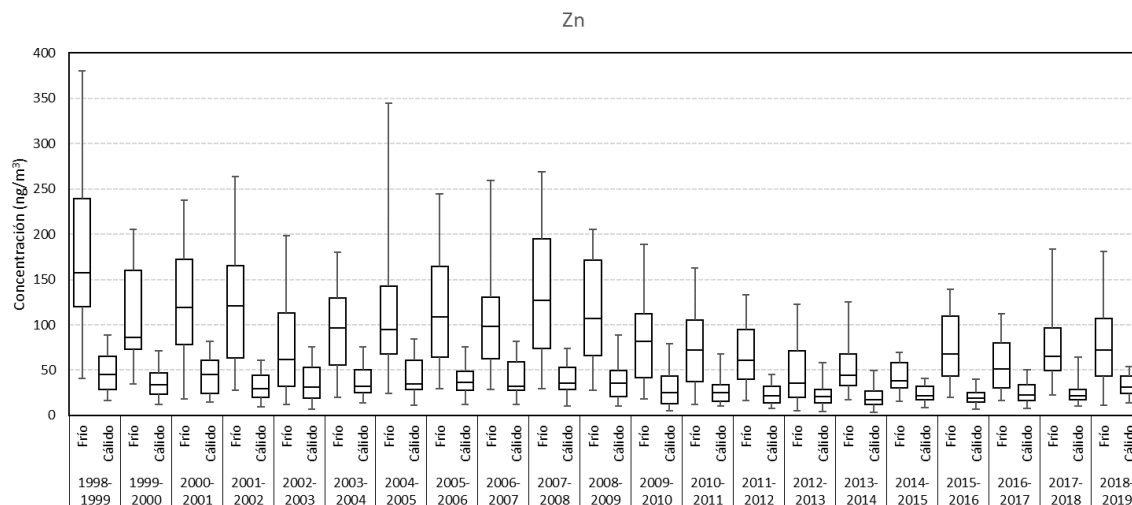


Figura 124: Gráficos de caja de concentración de Zn. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

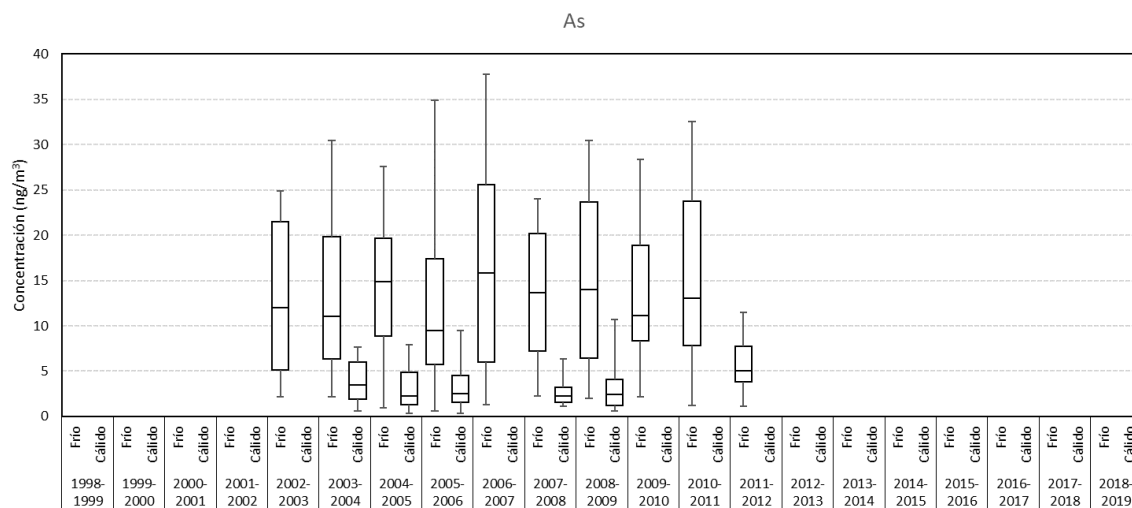


Figura 125: Gráficos de caja de concentración de As. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

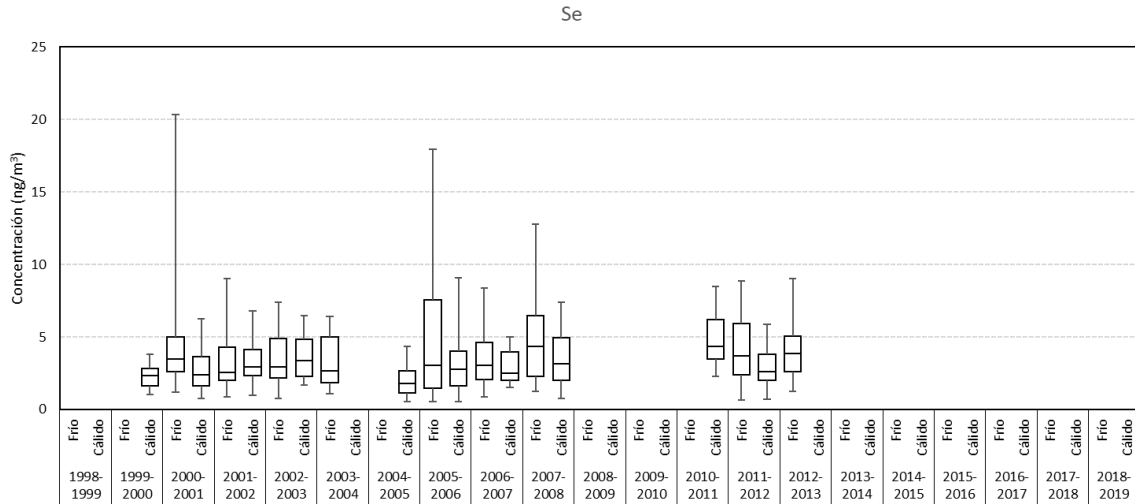


Figura 126: Gráficos de caja de concentración de Se. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

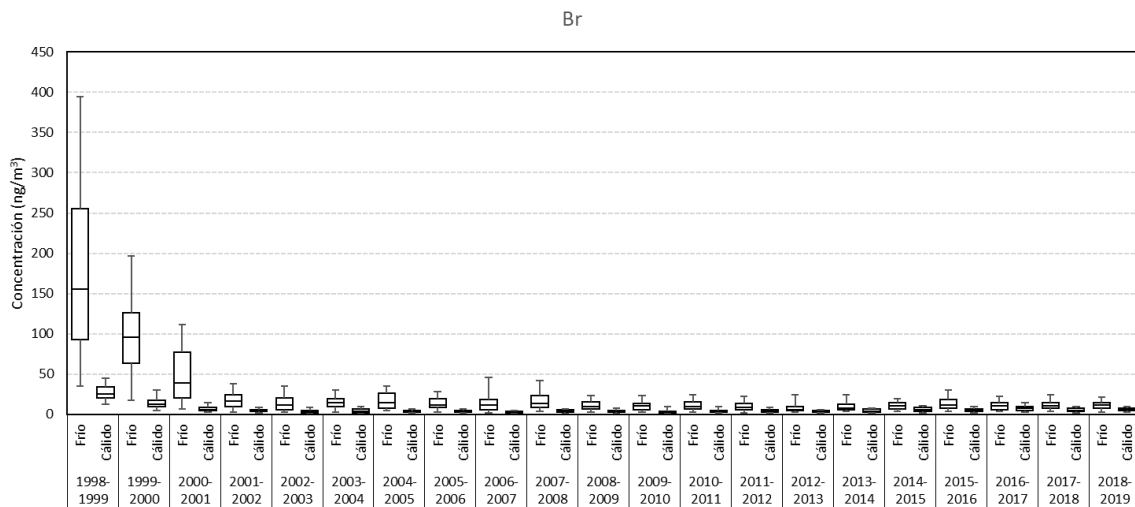


Figura 127: Gráficos de caja de concentración de Br. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

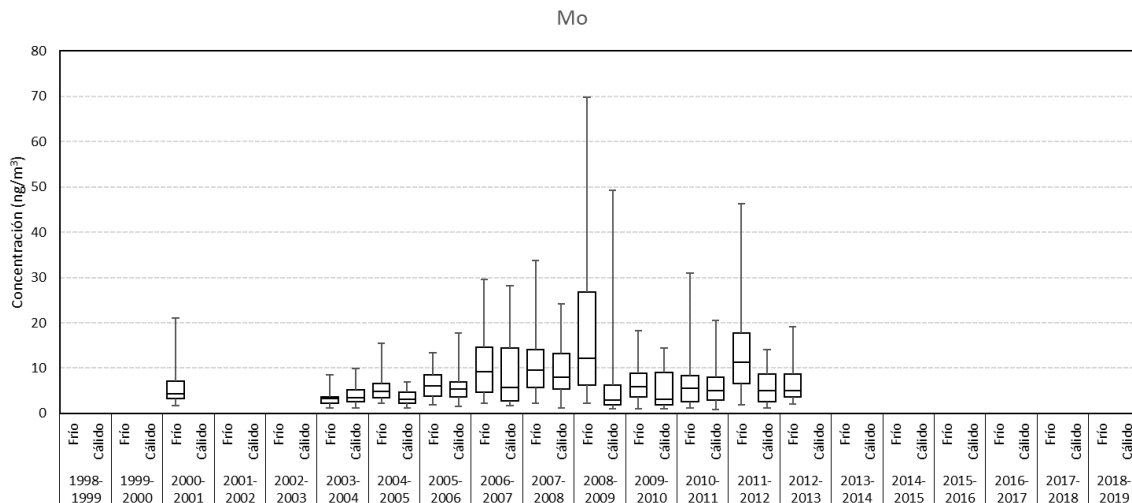


Figura 128: Gráficos de caja de concentración de Mo. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

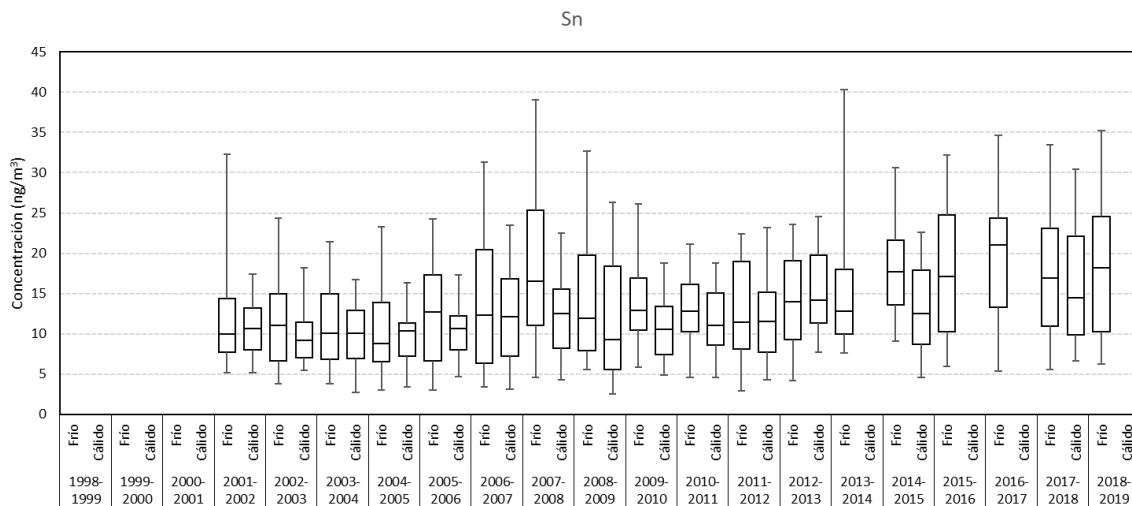


Figura 129: Gráficos de caja de concentración de Sn. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

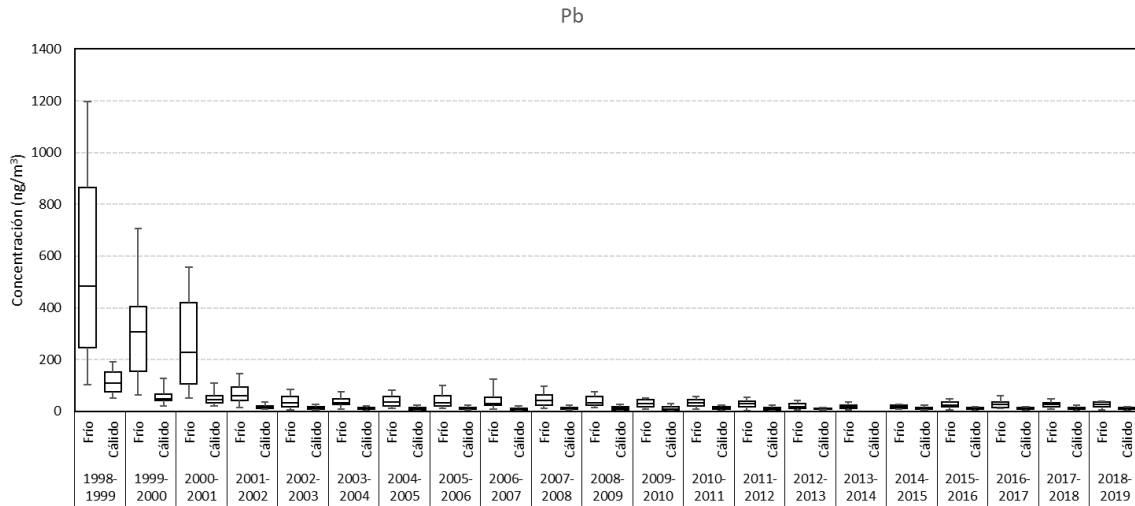


Figura 130: Gráficos de caja de concentración de Pb. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

MP grueso

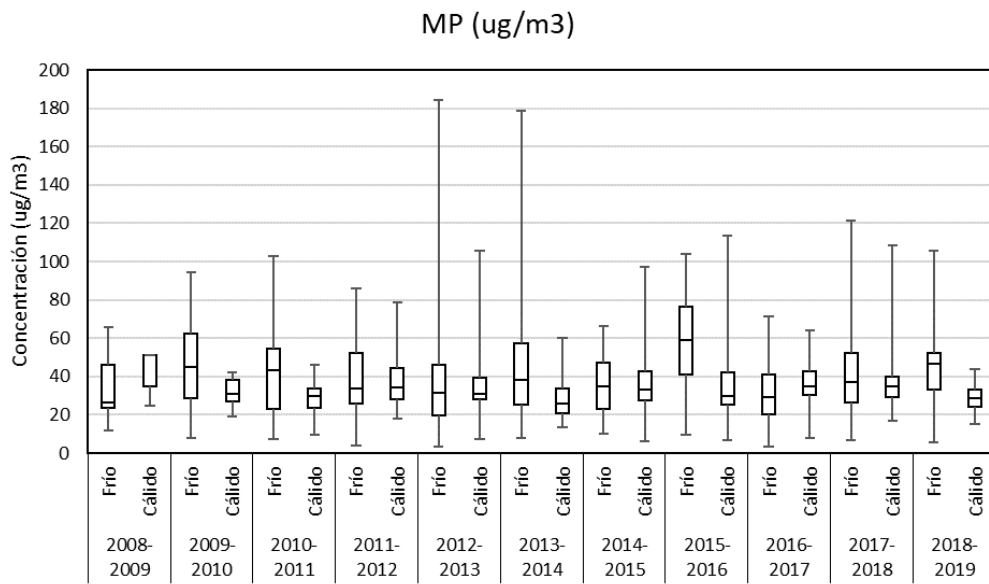


Figura 131: Gráficos de caja de concentración de MP grueso. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

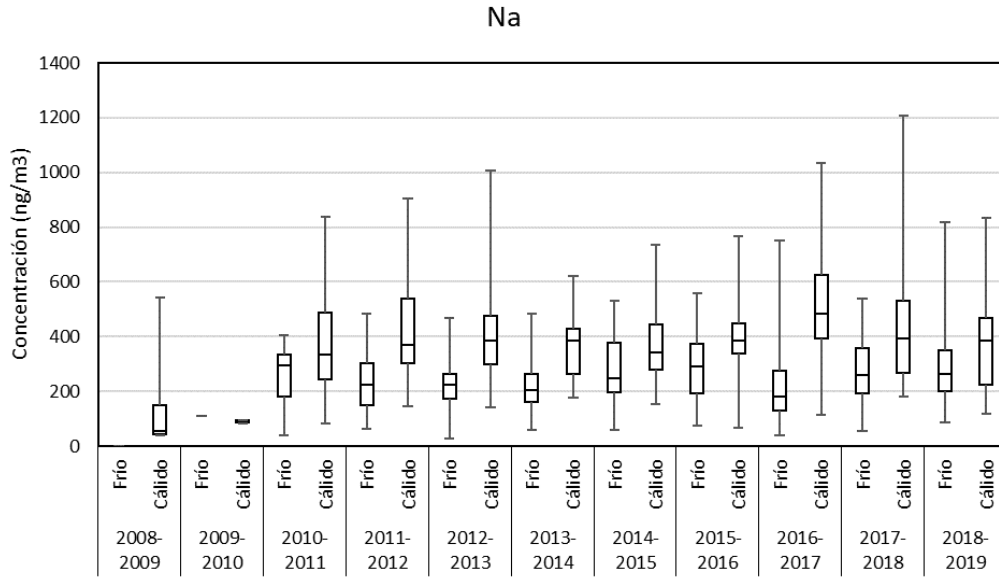


Figura 132: Gráficos de caja de concentración de Na. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

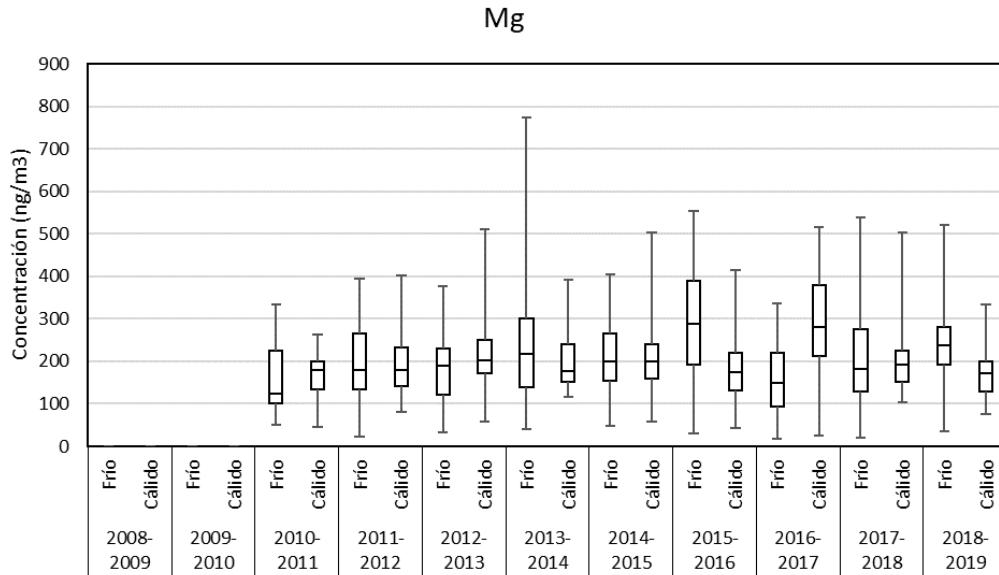


Figura 133: Gráficos de caja de concentración de Mg. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

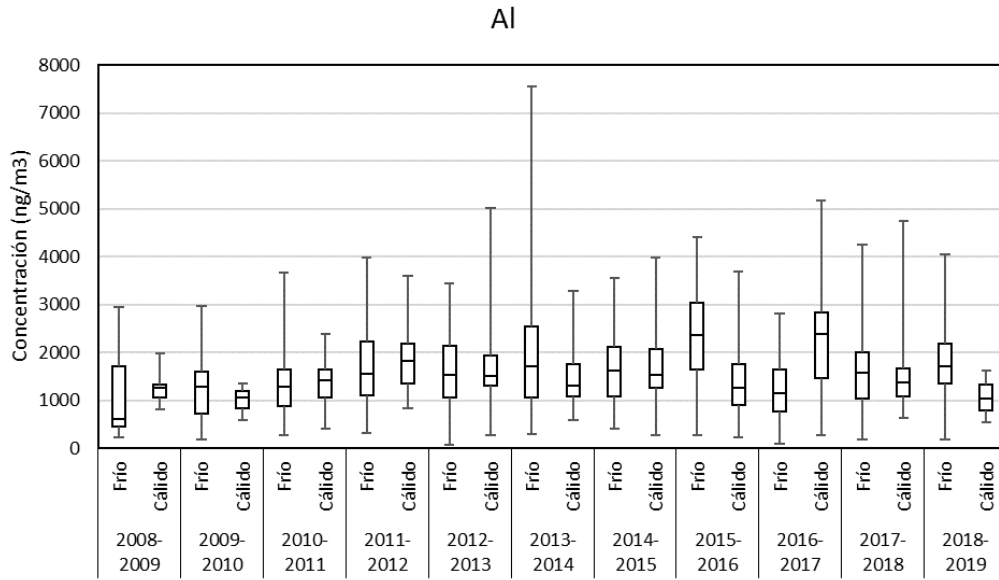


Figura 134: Gráficos de caja de concentración de Al. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

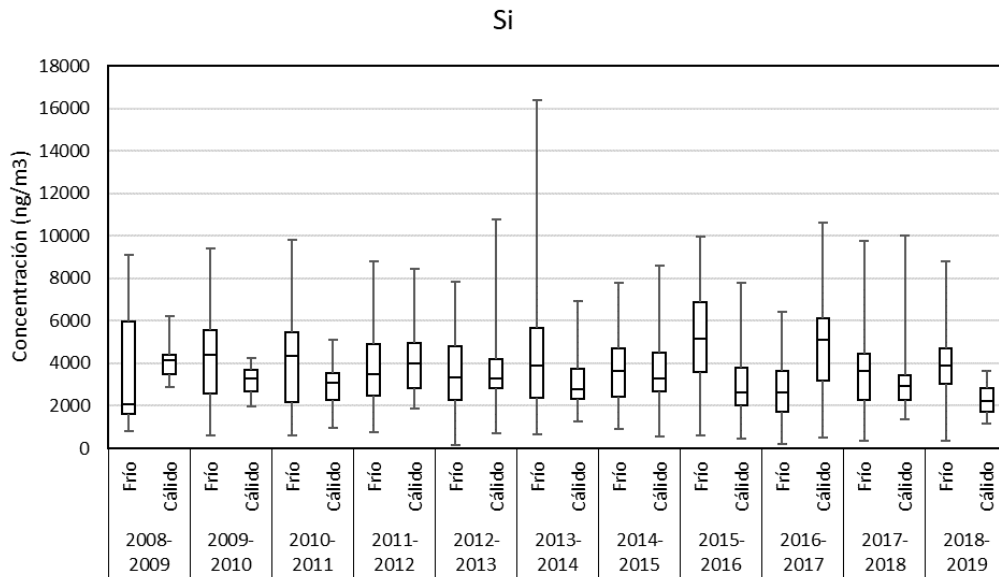


Figura 135: Gráficos de caja de concentración de Si. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

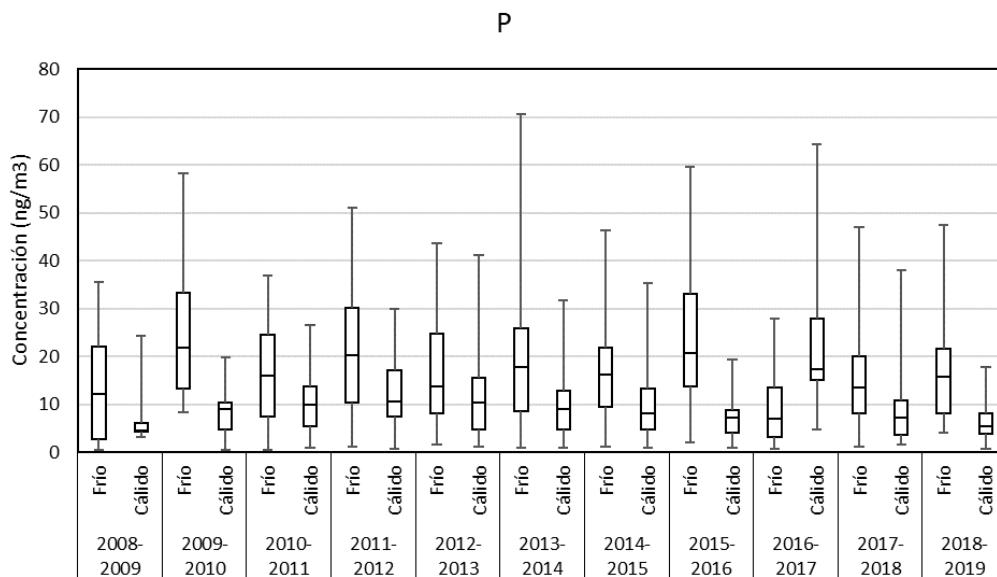


Figura 136: Gráficos de caja de concentración de P. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

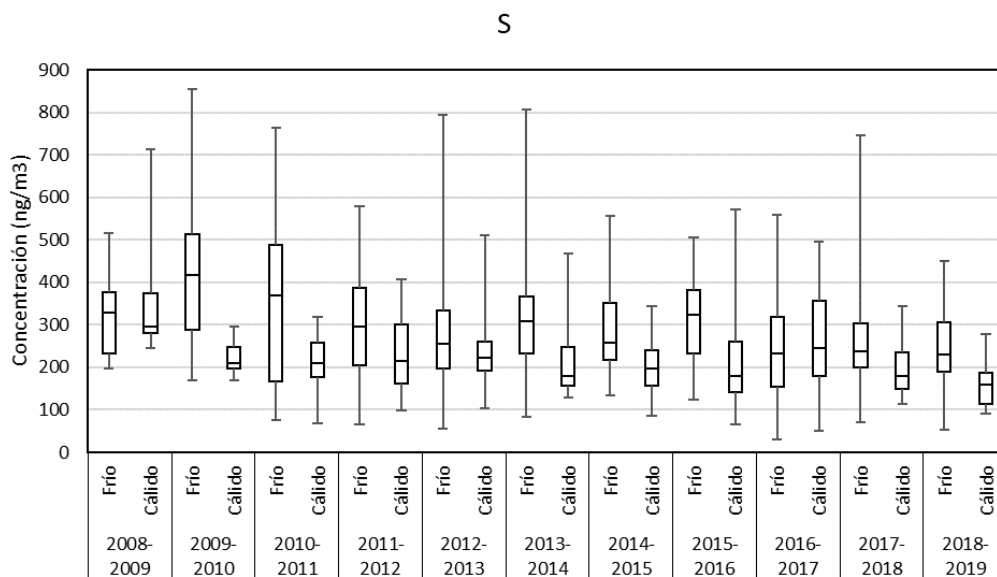


Figura 137: Gráficos de caja de concentración de S. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

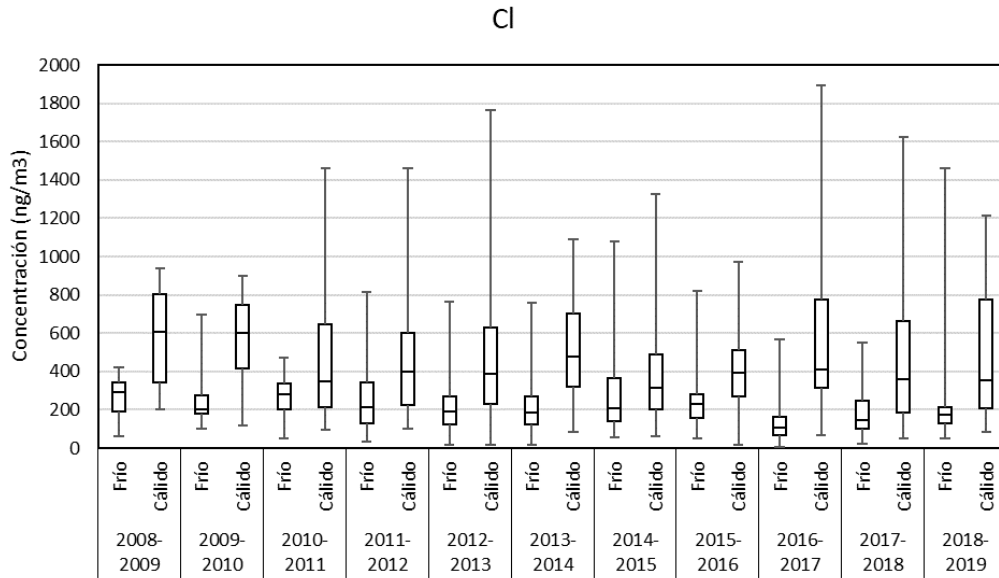


Figura 138: Gráficos de caja de concentración de Cl. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

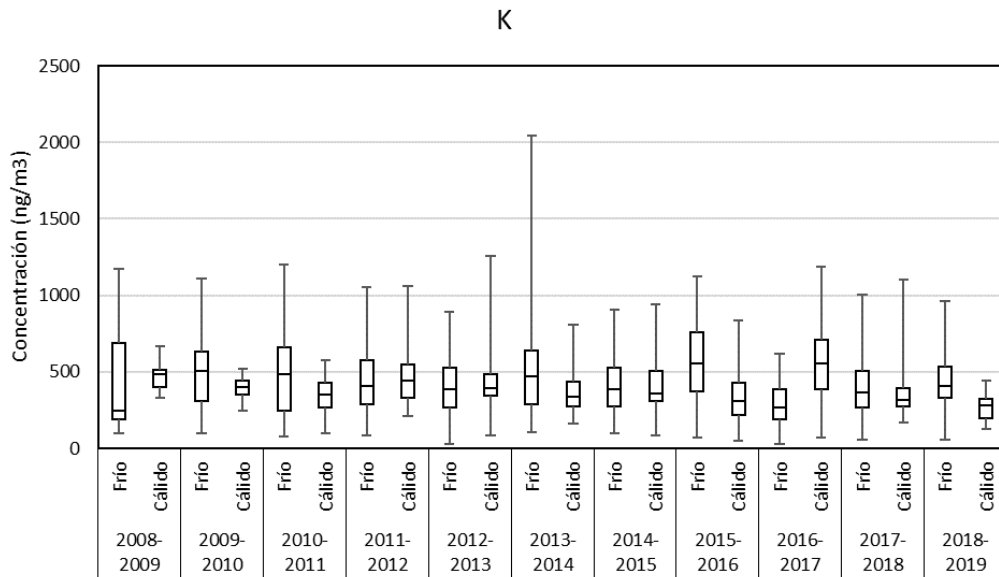


Figura 139: Gráficos de caja de concentración de K. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

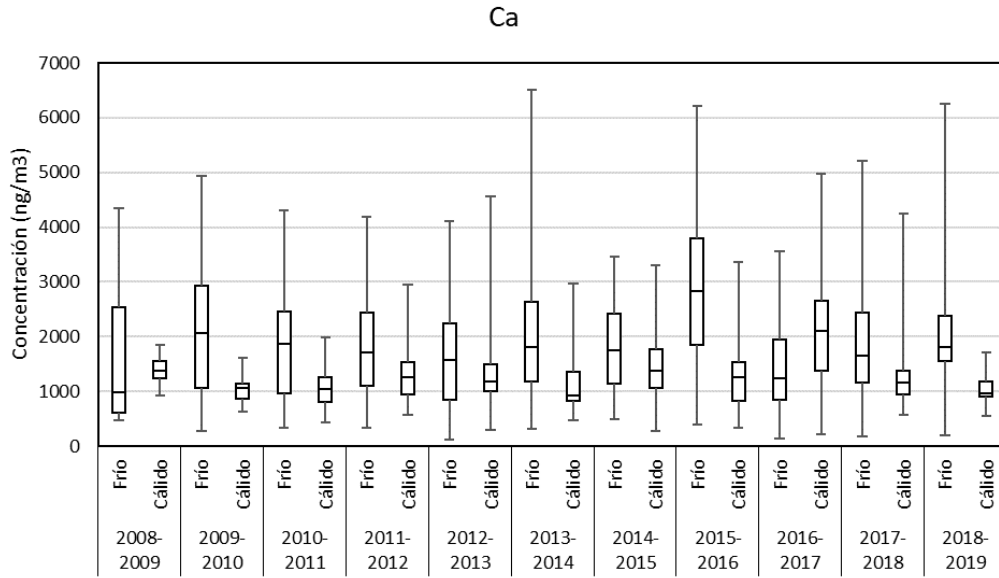


Figura 140: Gráficos de caja de concentración de Ca. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

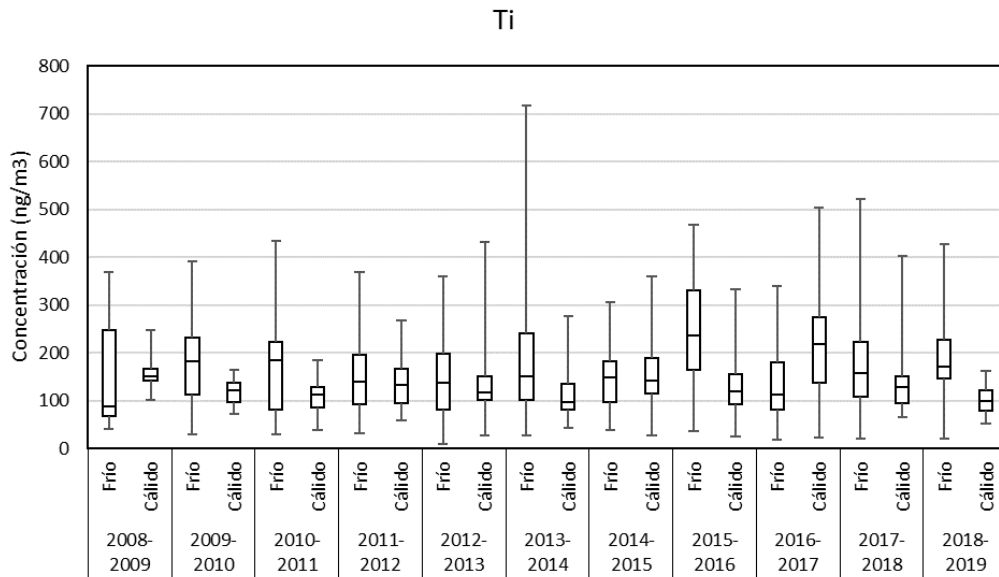


Figura 141: Gráficos de caja de concentración de Ti. Se han descartado aquellos periodos con una completitud menor al 75%.

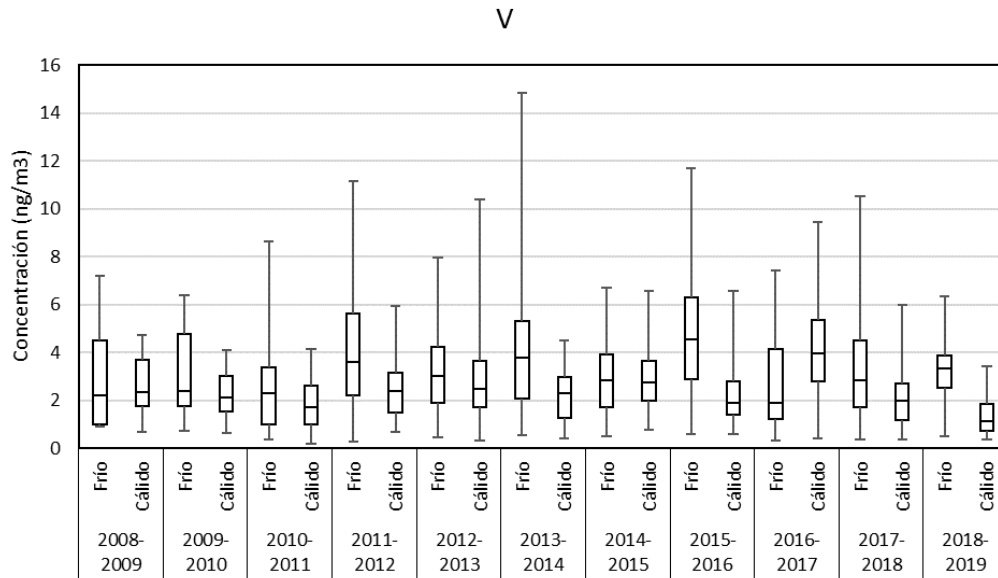


Figura 142: Gráficos de caja de concentración de V. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

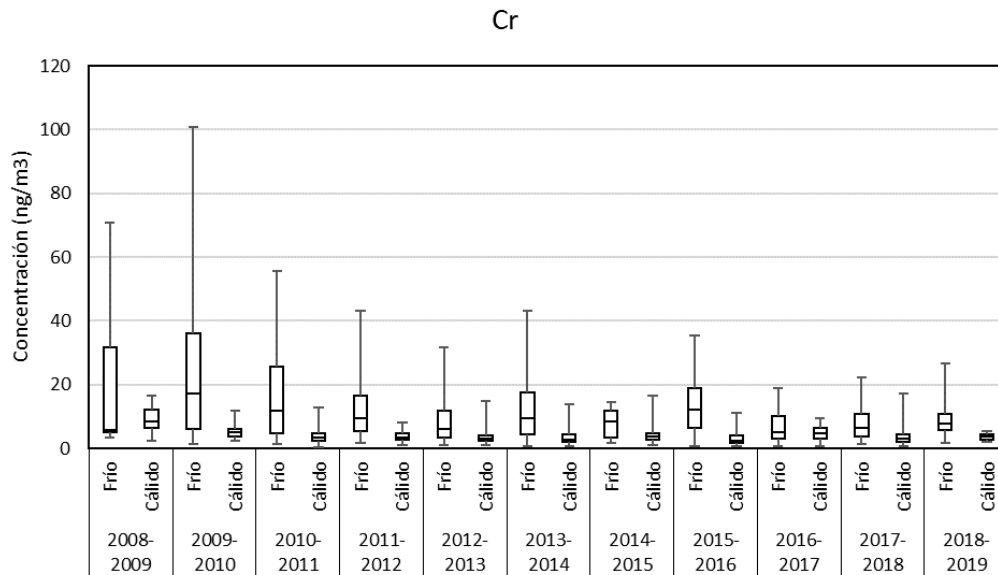


Figura 143: Gráficos de caja de concentración de Cr. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

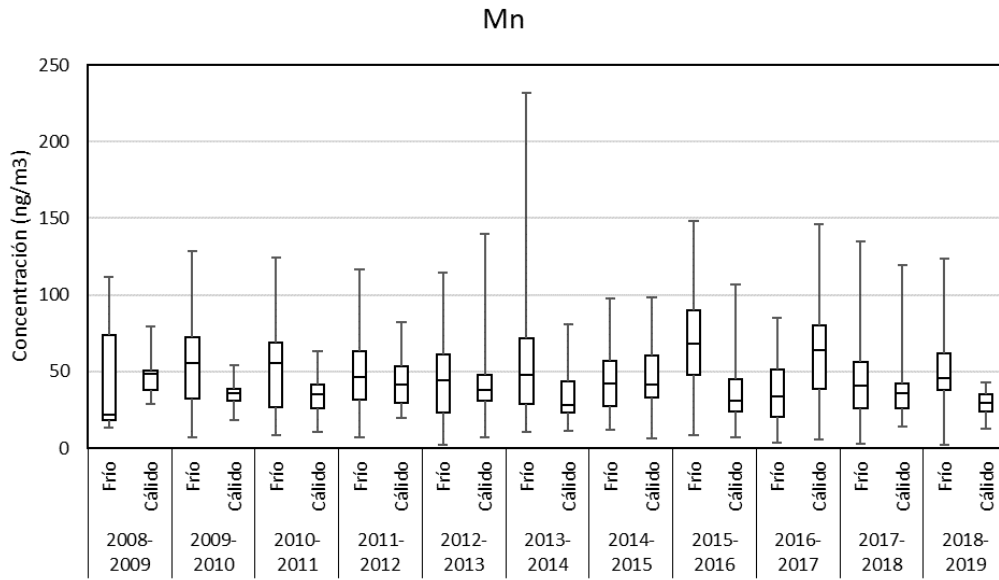


Figura 144: Gráficos de caja de concentración de Mn. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

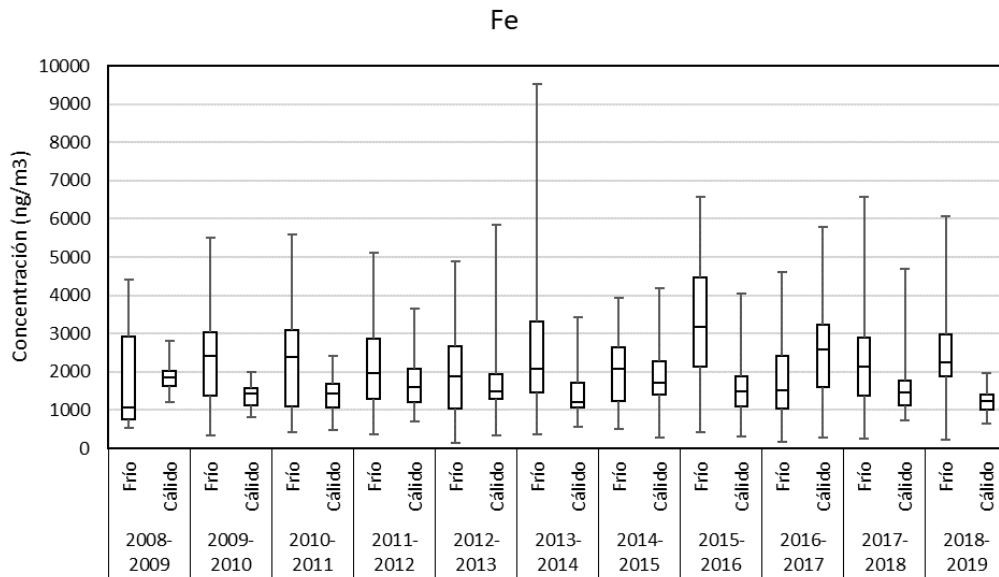


Figura 145: Gráficos de caja de concentración de Fe. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

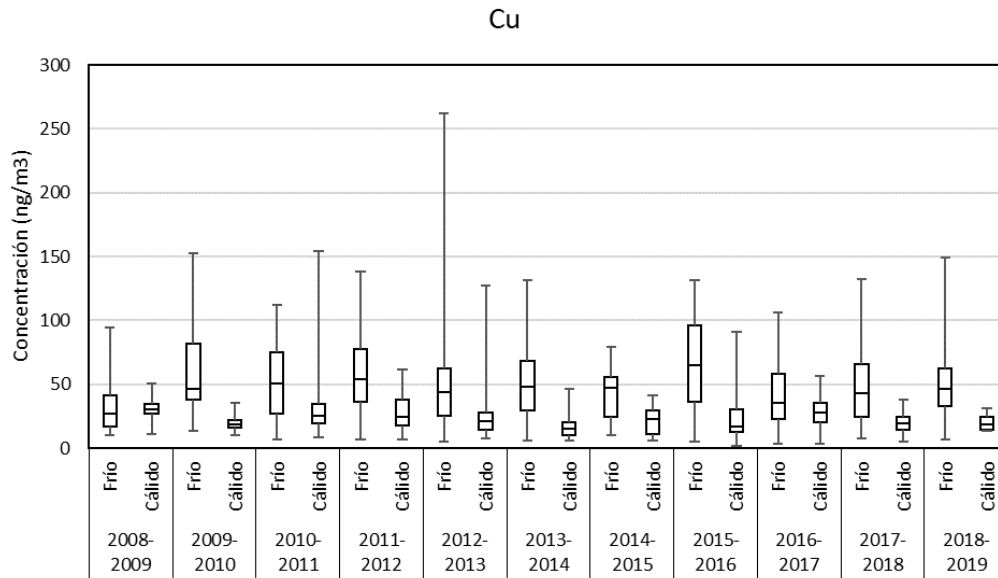


Figura 146: Gráficos de caja de concentración de Cu. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

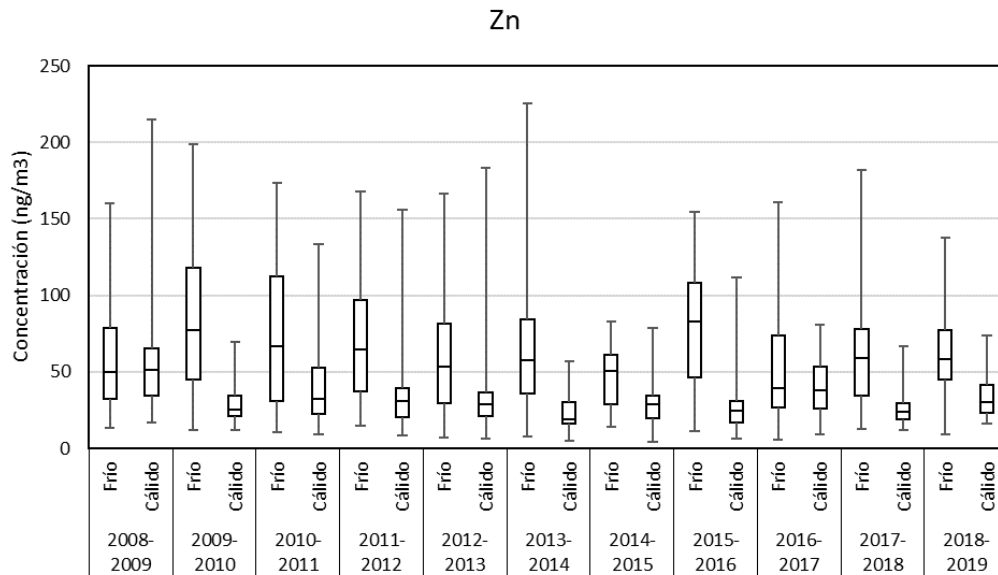


Figura 147: Gráficos de caja de concentración de Zn. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

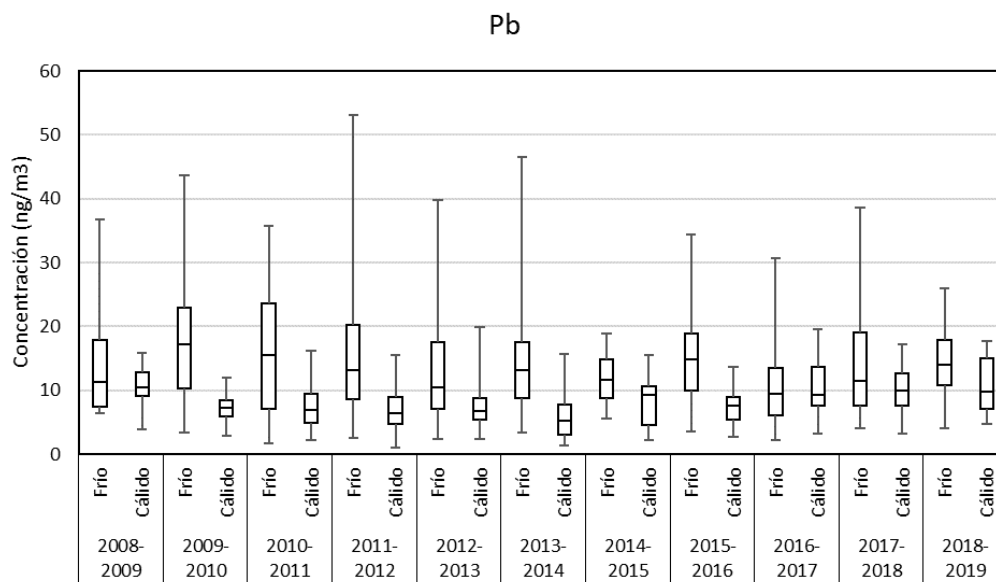


Figura 148: Gráficos de caja de concentración de Pb. Se han descartado aquellos períodos con una completitud menor al 75%.

ANEXO IV: Tabla de valores obtenidos por metodología FIC regional y su significancia estadística

Región Metropolitana

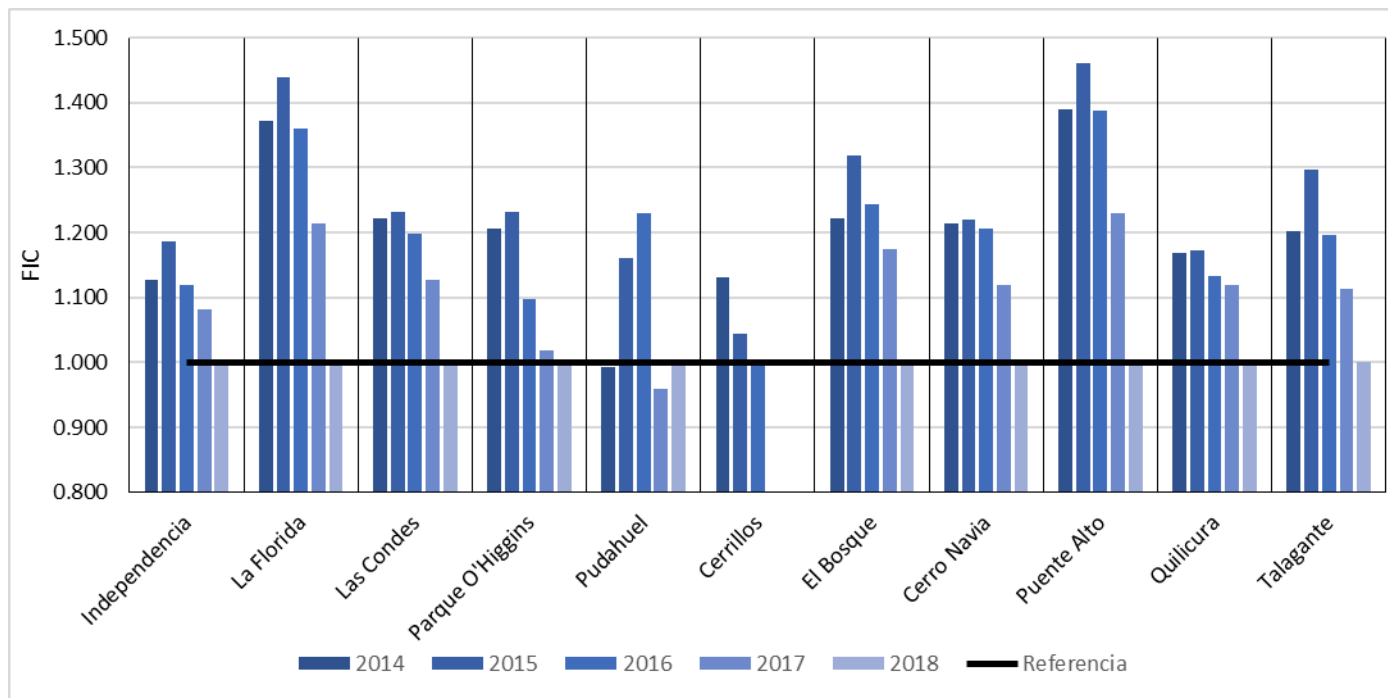
Tabla 45. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región Metropolitana, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

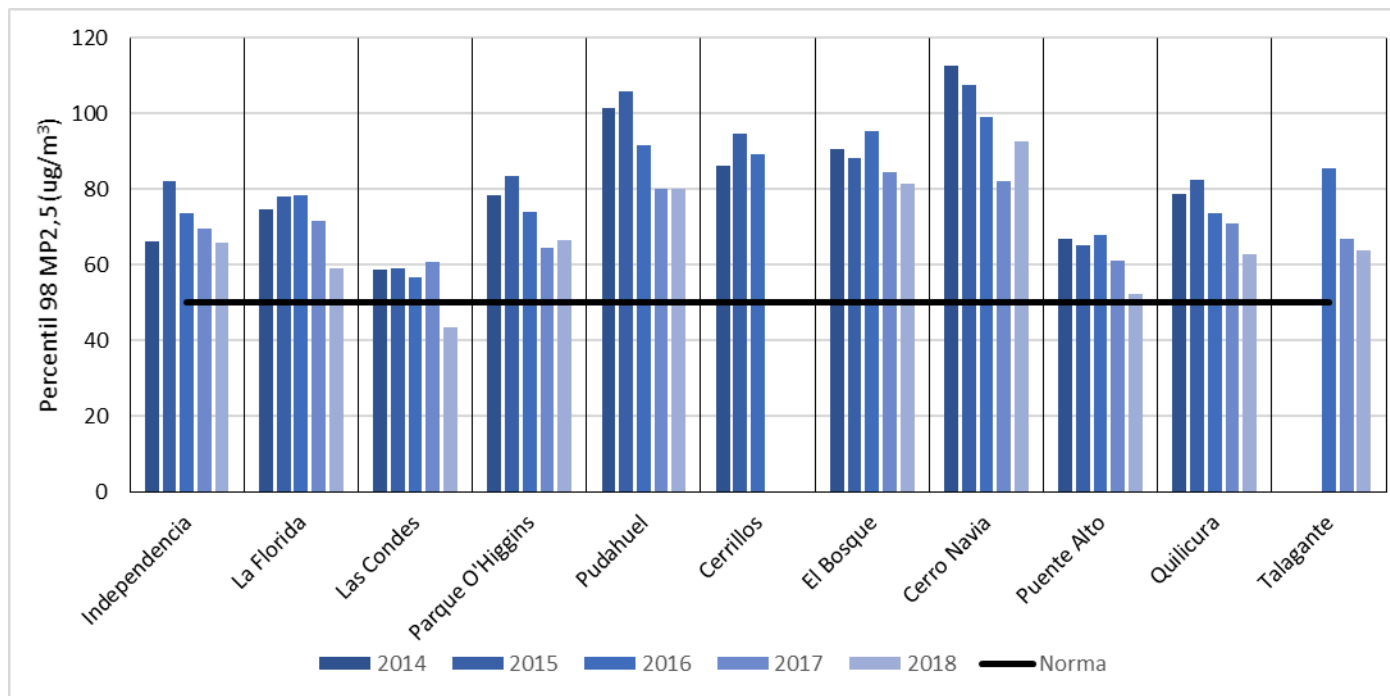
Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	26.903	< 2e-16	11.128	< 2e-16
Independencia	1.000		1.000	
La Florida	1.019	0.438	0.986	0.186
Las Condes	0.901	0.695	1.009	1.09E-08
P. O'Higgins	1.047	0.638	1.008	5.49E-04
Pudahuel	1.124	8.67E-06	1.089	1.35E-14
Cerrillos	1.294	< 2e-16	1.325	< 2e-16
El Bosque	1.155	< 2e-16	1.321	< 2e-16
Cerro Navia	0.985	< 2e-16	1.168	0.269
Pte. Alto	1.116	6.79E-11	1.133	8.68E-13
Talagante	0.775	< 2e-16	0.727	< 2e-16
Quilicura	1.327	0.010	1.056	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	1.056	1.57E-06	1.058	2.43E-09
Año 2016	1.042	0.795	1.003	2.85E-05
Año 2017	1.027	4.48E-07	0.932	1.44E-02
Año 2018	0.919	< 2e-16	0.857	1.20E-15
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	1.498	< 2e-16	1.891	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.105	1.25E-08	1.089	< 2e-16
Miércoles	1.106	1.48E-13	1.118	< 2e-16
Jueves	1.099	2.79E-10	1.099	1.49E-15
Viernes	1.128	< 2e-16	1.163	< 2e-16
Sábado	1.050	< 2e-16	1.185	3.65E-05
Domingo	0.858	0.001	1.049	< 2e-16
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	1.445	2.21E-14	1.080	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.195	2.37E-16	1.094	< 2e-16

VV \geq 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8[m/s] < VV < 1.6[m/s]	1.169	< 2e-16	1.301	< 2e-16
0.8 [m/s] \geq VV	1.545	< 2e-16	1.890	< 2e-16

Región Metropolitana (FIC Individuales).

Región	Estación	Promedio Trianual			Percentil 98					FIC					p-value				
		2014-2016	2015-2017	2016-2018	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016	2017	2018
Región Metropolitana	Independencia	30	29	28	66	82	74	70	66	1.127	1.186	1.120	1.082	1.000	0.128	0.848	0.229	<0.001	ref.
	La Florida	29	29	27	75	78	78	71	59	1.373	1.439	1.359	1.214	1.000	0.230	0.765	0.002	2.65E-15	ref.
	Las Condes	25	24	23	59	59	57	61	44	1.223	1.232	1.198	1.127	1.000	0.832	0.568	0.023	8.35E-08	ref.
	Parque O'Higgins	30	29	27	78	83	74	64	66	1.205	1.232	1.097	1.019	1.000	0.492	0.003	4.89E-07	2.29E-08	ref.
	Pudahuel	32	35	32	101	106	91	80	80	0.992	1.161	1.230	0.960	1.000	0.001	8.07E-05	0.505	0.875	ref.
	Cerrillos	35	SV	SV	86	95	89	SV	SV	1.762	1.625	1.556	1.464	1.000	0.045	0.001	0.25	0.254	ref.
	El Bosque	34	34	32	91	88	95	84	81	1.222	1.318	1.244	1.175	1.000	0.028	0.612	0.281	2.01E-05	ref.
	Cerro Navia	33	32	32	113	107	99	82	93	1.213	1.221	1.206	1.118	1.000	0.865	0.868	0.021	3.10E-07	ref.
	Puente Alto	27	26	24	67	65	68	61	52	1.389	1.461	1.389	1.229	1.000	0.127	0.991	0.067	<2e-16	ref.
	Quilicura	29	28	27	79	82	74	71	63	1.169	1.173	1.134	1.120	1.000	0.932	0.368	0.214	7.93E-06	ref.
	Talagante	SV	SV	25	SV	SV	86	67	64	1.201	1.297	1.197	1.113	1.000	0.324	0.958	0.33	0.018	ref.





Región de O'Higgins

Tabla 46. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región de O'Higgins, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	28.706	< 2e-16	12.126	< 2e-16
Rengo	1.000		1.000	
San Fernando	0.978	0.089	1.025	0.367
Rancagua I	1.397	< 2e-16	0.919	0.002
Rancagua II	1.425	< 2e-16	1.371	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	0.933	1.940E-06	1.014	0.640
Año 2016	0.838	< 2e-16	0.890	0.0000215
Año 2017	0.783	< 2e-16	0.778	< 2e-16
Año 2018	0.750	< 2e-16	0.751	< 2e-16
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	1.480	< 2e-16	2.239	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.072	5.250E-05	1.075	0.010
Miércoles	1.117	1.720E-10	1.137	5.050E-06
Jueves	1.095	1.640E-07	1.113	1.440E-04
Viernes	1.113	6.780E-10	1.133	9.700E-06
Sábado	1.035	4.440E-02	1.116	9.400E-05
Domingo	0.882	3.380E-13	0.981	0.496
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	1.214	< 2e-16	0.878	1.440E-11
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.193	< 2e-16	0.980	0.336
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.364	< 2e-16	1.561	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	1.613	< 2e-16	2.117	< 2e-16

Región del Maule

Tabla 47. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región del Maule, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	27.792	< 2e-16	12.011	< 2e-16
Curicó	1.000		1.000	
Linares	sv		1.060	0.017
La Florida	0.919	1.66E-07	0.892	6.650E-08

U.C. Maule	0.716	< 2e-16	0.679	< 2e-16
U. de Talca	0.713	< 2e-16	0.473	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	1.040	2.898E-02	0.908	3.76E-05
Año 2016	0.864	1.05E-15	0.878	1.27E-08
Año 2017	0.825	< 2e-16	0.760	< 2e-16
Año 2018	0.723	< 2e-16	0.724	< 2e-16
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	1.610	< 2e-16	2.608	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.079	3.240E-04	1.049	0.061
Miércoles	1.117	1.760E-07	1.095	3.890E-04
Jueves	1.111	7.100E-07	1.108	6.750E-05
Viernes	1.126	2.420E-08	1.110	4.710E-05
Sábado	1.001	9.481E-01	1.065	1.415E-02
Domingo	0.851	3.270E-14	0.950	0.045
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	1.113	2.47E-10	0.729	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.221	< 2e-16	1.131	5.35E-10
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.455	< 2e-16	1.674	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	1.967	< 2e-16	2.330	< 2e-16

Región de Ñuble

Tabla 48. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región de Ñuble, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	17.640	< 2e-16	9.361	< 2e-16
Inia Chillán	1.000		1.000	
Purén	1.504	< 2e-16	1.260	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	1.043	0.183	1.183	2.70E-06
Año 2016	0.934	1.44E-02	0.986	7.01E-01
Año 2017	0.824	1.44E-12	0.876	4.15E-04
Año 2018	0.891	2.63E-05	0.767	2.42E-13
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	1.799	< 2e-16	2.754	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.030	0.354	1.008	0.860

Miércoles	1.110	0.001	1.080	0.075
Jueves	1.086	0.011	1.064	0.149
Viernes	1.116	6.790E-04	1.057	0.195
Sábado	1.018	0.572	1.014	0.744
Domingo	0.890	3.340E-04	0.929	0.089
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	1.083	< 2e-16	0.757	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.155	2.25E-08	1.115	0.002
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.542	< 2e-16	1.688	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	2.310	< 2e-16	2.473	< 2e-16

Región del Biobío

Tabla 49. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región del Biobío, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	28.560	< 2e-16	12.326	< 2e-16
21 de Mayo	1.000		1.000	
B. Curanilahue	SV		1.238	6.22E-13
Cerro Merquín	0.645	< 2e-16	1.020	0.452
C. San Vicente	1.043	0.010	0.978	0.463
KC	0.726	< 2e-16	1.016	0.564
Los Ángeles	SV		1.255	< 2e-16
LP	0.674	< 2e-16	0.855	1.58E-08
Punteras	0.612	< 2e-16	0.610	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	1.092	1.65E-08	1.260	2.84E-11
Año 2016	1.133	1.72E-15	1.117	3.99E-04
Año 2017	0.957	0.008	0.864	2.19E-06
Año 2018	1.007	0.664	0.888	1.29E-04
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	1.462	< 2e-16	2.021	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.063	0.001	1.034	0.202
Miércoles	1.039	0.043	1.018	0.507
Jueves	1.049	0.011	1.011	0.684
Viernes	1.042	0.027	1.017	0.519
Sábado	0.933	2.03E-04	0.969	0.231
Domingo	0.846	< 2e-16	0.920	0.001

HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	1.300	< 2e-16	0.935	2.210E-04
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.230	< 2e-16	1.107	6.88E-06
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.253	< 2e-16	1.405	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	1.718	< 2e-16	2.188	< 2e-16

Región de la Araucanía

Tabla 50. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región de La Araucanía, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP₁₀	p	MP_{2,5}	p
Concentración Promedio	27.033	< 2e-16	10.194	< 2e-16
PLC	1.000		1.000	
LET	0.819	< 2e-16	0.657	< 2e-16
MF	0.731	< 2e-16	0.601	0.452
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	1.059	0.010	1.062	0.056
Año 2016	1.071	0.002	1.130	7.94E-05
Año 2017	0.847	7.80E-13	0.862	4.28E-06
Año 2018	1.024	0.356	1.100	0.008
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	2.007	< 2e-16	4.008	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.039	0.158	1.027	0.489
Miércoles	1.046	0.096	1.043	0.267
Jueves	1.030	0.277	1.035	0.365
Viernes	1.016	0.567	1.000	0.993
Sábado	0.939	0.020	0.982	0.637
Domingo	0.857	1.220E-08	0.895	0.004
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	0.921	1.590E-04	0.646	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.106	0.096	0.655	1.23E-06
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.413	< 2e-16	1.693	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	1.911	< 2e-16	2.289	< 2e-16

Región de Los Ríos

Tabla 51. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región de Los Ríos, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	24.933	< 2e-16	13.936	< 2e-16
Valdivia I	1.000		1.000	
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	1.185	3.85E-05	1.309	3.19E-07
Año 2016	1.118	0.008	0.879	0.017
Año 2017	0.770	1.19E-09	0.812	1.17E-04
Año 2018	0.817	2.23E-06	0.867	0.008
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	2.108	< 2e-16	2.697	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.036	0.469	1.017	0.781
Miércoles	1.060	0.230	1.051	0.420
Jueves	0.993	0.886	1.012	0.853
Viernes	1.013	0.798	1.001	0.989
Sábado	0.957	0.371	0.967	0.584
Domingo	0.921	0.091	0.943	0.343
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	0.773	3.130E-13	0.601	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	0.920	0.331	0.479	2.95E-12
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.250	< 2e-16	1.236	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	1.812	< 2e-16	2.032	< 2e-16

Región de Los Lagos

Tabla 52. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región de Los Lagos, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	23.205	< 2e-16	17.076	< 2e-16
Alerce	SV		1.000	
Mirasol	SV		0.870	0.003
Osorno	1.000	< 2e-16	0.842	4.06E-04
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	0.869	0.002	0.906	0.062
Año 2016	0.703	8.71E-14	0.615	< 2e-16

Año 2017	0.745	8.34E-11	0.797	1.77E-06
Año 2018	0.761	1.01E-08	0.834	1.79E-04
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	2.038	< 2e-16	2.361	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.039	0.467	1.017	0.715
Miércoles	1.071	0.193	1.008	0.867
Jueves	1.060	0.268	1.023	0.616
Viernes	0.978	0.677	0.985	0.733
Sábado	0.900	0.045	0.986	0.755
Domingo	0.803	3.21E-05	0.909	0.033
HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	1.000	0.990	0.588	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	1.053	0.646	0.628	< 2e-16
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.396	< 2e-16	1.445	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	2.413	< 2e-16	2.665	< 2e-16

Región de Aysén

Tabla 53. Valores de FIC obtenidos para las variables de la Región de Aysén, donde P es el parámetro estadístico que indica la significancia, el valor del FIC se considera estadísticamente significativo cuando $P < 0.05$.

Variables	MP ₁₀	p	MP _{2,5}	p
Concentración Promedio	38.476	< 2e-16	21.480	< 2e-16
Coyhaique I	1.000		1.000	
Coyhaique II	0.937	9.78E-05	1.242	< 2e-16
Año 2014	1.000		1.000	
Año 2015	0.968	0.228	0.823	2.34E-08
Año 2016	0.815	2.22E-14	0.669	< 2e-16
Año 2017	0.680	< 2e-16	0.618	< 2e-16
Año 2018	0.723	< 2e-16	0.654	< 2e-16
Primavera-Verano	1.000		1.000	
Otoño-Invierno	2.226	< 2e-16	3.101	< 2e-16
Lunes	1.000		1.000	
Martes	1.035	0.266	1.033	0.423
Miércoles	1.009	0.774	0.996	0.926
Jueves	0.978	0.461	0.958	0.289
Viernes	1.001	0.966	0.997	0.945
Sábado	0.953	0.122	0.940	0.128
Domingo	0.864	2.36E-06	0.883	0.002

HR ≥ 70%	1.000		1.000	
HR < 70%	0.893	1.44E-07	0.721	< 2e-16
T ≤ 20 °C	1.000		1.000	
T > 20 [°C]	0.927	0.434	0.451	1.02E-11
VV ≥ 1.6 [m/s]	1.000		1.000	
0.8 [m/s] < VV < 1.6 [m/s]	1.822	< 2e-16	2.057	< 2e-16
0.8 [m/s] ≥ VV	2.470	< 2e-16	2.910	< 2e-16

ANEXO V: Tablas de factor de impacto para MP fino y grueso y composición elemental

Tablas de Factor de Impacto y su significancia estadística para el MP_{2.5} y su composición elemental

Tabla 54. Factores de impacto para el MP_{2.5} y su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	MP _{2.5}
Intercepto	70.007***
Invierno	1.000
Verano	0.457***
1998	1.000
1999	0.986
2000	0.924
2001	0.967
2002	0.834*
2003	0.800**
2004	0.735***
2005	0.715***
2006	0.680***
2007	0.847*
2008	0.745***
2009	0.608***
2010	0.602***
2011	0.590***
2012	0.511***
2013	0.542***
2014	0.565***
2015	0.545***
2016	0.531***
2017	0.559***
2018	0.521***
Lunes	1.000
Martes	1.064
Miércoles	1.107*
Jueves	1.127**
Viernes	1.145**
Sábado	1.161***
Domingo	0.978
VV<0.8	1.000

0.8≤VV<1.6	0.663***
VV≥1.6	0.557***
T≥20	1.000
T<20	0.924*
HR>70	1.000
HR≤70	0.999

Tabla 55. Fic para elementos asociados a la resuspensión de polvo para el MP_{2.5} con su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	Al	Ca	Mn	Si	Ti
Intercepto	144.146***	182.062***	24.759***	386.759	28.034***
O-I	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
P-V	0.950	0.691***	0.528***	0.934	0.720***
1998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1999	0.851*	0.892	0.784**	0.952	1.045
2000	0.782***	0.883	0.937	0.977	0.923
2001	0.617***	0.797**	0.914	0.777	0.742**
2002	0.451***	0.562***	0.642***	0.550	0.635**
2003	0.893	0.802**	0.923	0.789	0.638***
2004	1.050	0.859.	0.982	0.759	0.628***
2005	1.178*	0.950	1.057	0.881	0.684***
2006	0.733***	0.836*	1.031	0.593	0.605***
2007	0.878.	0.960	1.079	0.750	0.664***
2008	0.950	1.018	1.080	0.890	0.656***
2009	0.772***	0.778**	1.052	0.651	0.504**
2010	0.962	0.821**	0.827*	0.717	0.485***
2011	1.424***	1.034	0.939	1.091	0.641***
2012	1.113	0.800**	0.844.	0.763	0.542***
2013	1.225*	0.883	0.815*	0.837	0.579***
2014	1.164.	0.918	0.790*	0.732	0.663***
2015	0.893	0.726***	0.715***	0.533	0.562***
2016	0.765***	0.522***	0.642***	0.422	0.472***
2017	1.466***	1.120	0.741***	0.922	0.900
2018	1.243**	0.903	0.783*	0.724	0.774**
Lunes	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Martes	1.061	1.123*	1.185**	1.096	1.130**
Miércoles	1.109*	1.142**	1.253***	1.141	1.206**
Jueves	1.076.	1.103*	1.199***	1.114	1.160***
Viernes	1.071	1.117*	1.144***	1.124	1.137**
Sábado	0.997	0.943	0.970**	0.963	1.001**
Domingo	0.830***	0.740***	0.720***	0.778	0.771***

VV<0.8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.8<VV<1.6	0.723***	0.657***	0.713***	0.663	0.664***
VV>1.6	0.696***	0.586***	0.516***	0.612	0.616***
T>20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T<20	0.764***	0.845***	1.086	0.773	0.840***
HR>70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
HR<70	1.649***	1.698***	1.187***	1.798	1.527***

Tabla 56. FIC para elementos asociados emisiones industriales para MP_{2.5} con si significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	Cu	S
Intercepto	45.966***	1610.564***
O-I	1.000	1.000
P-V	0.511***	0.846***
1998	1.000	1.000
1999	1.078	0.870
2000	1.001	0.875
2001	0.855.	0.864
2002	0.497***	0.608***
2003	0.710***	0.663***
2004	0.687***	0.589***
2005	0.863.	0.642***
2006	0.711***	0.721***
2007	0.711***	0.818*
2008	0.662***	0.753**
2009	0.538***	0.556***
2010	0.660***	0.565***
2011	0.656***	0.485***
2012	0.529***	0.456***
2013	0.476***	0.430***
2014	0.501***	0.469***
2015	0.458***	0.377***
2016	0.367***	0.385***
2017	0.508***	0.422***
2018	0.503***	0.395***
Lunes	1.000	1.000
Martes	1.185**	1.000
Miércoles	1.253***	1.071
Jueves	1.199***	1.063

Viernes	1.144**	1.038.
Sábado	0.970	1.090
Domingo	0.720***	0.991
VV<0.8	1.000	1.000
0.8<VV<1.6	0.713***	0.978
VV>1.6	0.516***	0.975
T>20	1.000	1.000
T<20	1.086.	0.983
HR>70	1.000	1.000
HR<70	1.187***	0.870***

Tabla 57. Factores de Impacto para elementos asociados a emisiones vehiculares del MP_{2.5}, con su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	Br	Fe	Pb	Zn
Intercepto	107.559***	512.818***	330.078***	161.672***
O-I	1.000	1.000	1.000	1.000
P-V	0.435***	0.567***	0.456***	0.484***
1998	1.000	1.000	1.000	1.000
1999	0.708**	0.937	0.671***	0.687***
2000	0.310***	0.984	0.554***	0.752**
2001	0.160***	0.896	0.177***	0.692***
2002	0.126***	0.653***	0.108***	0.511***
2003	0.144***	0.905	0.100***	0.628***
2004	0.141***	0.999	0.103***	0.731***
2005	0.139***	1.132	0.117***	0.758**
2006	0.108***	0.941	0.096***	0.662***
2007	0.119***	0.934	0.093***	0.593***
2008	0.106***	0.898	0.098***	0.622***
2009	0.091***	0.742***	0.083***	0.434***
2010	0.119***	0.770***	0.087***	0.417***
2011	0.116***	0.940	0.076***	0.384***
2012	0.099***	0.722***	0.067***	0.337***
2013	0.105***	0.775**	0.053***	0.325***
2014	0.147***	0.847 .	0.070***	0.334***
2015	0.136***	0.681***	0.070***	0.350***
2016	0.131***	0.627***	0.073***	0.322***
2017	0.128***	1.033	0.077***	0.401***
2018	0.118***	0.919	0.065***	0.423***
Lunes	1.000	1.000	1.000	1.000

Martes	1.030	1.108*	1.168**	1.263***
Miércoles	1.062	1.178***	1.230***	1.395***
Jueves	1.101.	1.132**	1.190***	1.320***
Viernes	1.087	1.156**	1.238***	1.284***
Sábado	1.158*	0.909*	1.099.	0.939
Domingo	1.028	0.670***	0.837***	0.632***
VV<0.8	1.000	1.000	1.000	1.000
0.8<VV<1.6	0.705***	0.590***	0.709***	0.629***
VV>1.6	0.497***	0.478***	0.487***	0.495***
T>20	1.000	1.000	1.000	1.000
T<20	1.007	0.880***	1.090*	1.060
HR>70	1.000	1.000	1.000	1.000
HR<70	0.929.	1.442***	1.059	1.077*

Tabla 58. Valores FIC para elementos asociados a Sal Marina (Cl y Na) y Quema de Biomasa (K) del MP_{2.5} y su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	Cl	Na	K
Intercepto	776.903***	141.846***	542.167***
O-I	1.000	1.000	1.000
P-V	0.287***	1.193***	0.565***
1998	1.000	1.000	1.000
1999	1.011***	0.865.	0.945.
2000	0.248***	0.900	0.871
2001	0.297***	2.575***	0.915***
2002	0.334***	2.234***	0.700***
2003	0.220***	2.410***	0.855***
2004	0.249***	2.484***	0.838***
2005	0.338***	2.426***	0.818***
2006	0.291***	1.603***	0.754***
2007	0.348***	2.064***	0.924***
2008	0.233***	2.689***	0.936***
2009	0.318***	2.235***	0.748***
2010	0.242***	2.019***	0.731***
2011	0.237***	1.452***	0.724***
2012	0.133***	1.323***	0.569***
2013	0.176***	1.730***	0.641***
2014	0.220***	1.533***	0.619***
2015	0.122***	1.157***	0.595.
2016	0.124***	1.327***	0.534***
2017	0.139***	1.733***	0.585***
2018	0.202***	1.371***	0.557***

Lunes	1.000	1.000	1.000
Martes	1.165	1.041	1.082
Miércoles	1.361**	1.010	1.202
Jueves	1.138	0.978	1.187
Viernes	1.186	0.986	1.192
Sábado	1.046	0.965	1.238
Domingo	0.965	0.997	1.035
VV<0.8	1.000	1.000	1.000
0.8<VV<1.6	0.562***	0.991	0.704
VV>1.6	0.554***	1.086	0.633
T>20	1.000	1.000	1.000
T<20	0.763***	0.771***	0.703***
HR>70	1.000	1.000	1.000
HR<70	0.796**	1.039	1.252

Tablas de Factor de Impacto y su significancia estadística para el MP_{grueso} y su composición elemental.

Tabla 59: Factores de Impacto para el MP_{2,5-10} y su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

Variabes	MP10
Intercepto	30.575***
O-I	1.000
P-V	0.753***
2008	1.000.
2009	1.416.
2010	1.355.
2011	1.389.
2012	1.362
2013	1.296**
2014	1.285
2015	1.668*
2016	1.281
2017	1.536
2018	1.267
Lunes	1.000
Martes	1.113
Miércoles	1.143
Jueves	1.237**
Viernes	1.149.

Sábado	1.061
Domingo	0.939
VV≤0.8 [m/s]	1.000
0.8<VV<1.6	0.815***
VV≥1.6 [m/s]	0.674***
T>20 °C	1.000
T≤20 °C	0.853**
HR>70	1.000
HR<70	1.502***

Tabla 60. Factores de Impacto para los elementos relacionados a la resuspensión del polvo, para MP₁₀ y su significancia estadística, donde (***) indica p < 0.001, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	Al	Ca	Mn	Si	Ti
Intercepto	1.232***	1,815***	0,051***	4,196***	0,191***
O-I	1.000	1,527***	1,401***	1,280***	1,390***
P-V	0.848***	1,000	1,000	1,000	1,000
2008	1.000	1,148	1,296 .	1,318 .	1,231
2009	0.873	1,043	1,201	1,168	1,062
2010	1.176	1,066	1,156	1,159	1,045
2011	1.369 *	1,055	1,162	1,195	1,002
2012	1.286*	1,006	1,099	1,120	0,975
2013	1.271 .	0,991	1,058	1,093	0,957 .
2014	1.380*	1,115	1,143	1,170	1,060 .
2015	1.537*	1,363	1,341	1,296	1,290 .
2016	1.416*	1,293	1,314	1,228	1,287 .
2017	1.418*	1,206	1,211	1,205	1,222
2018	1.179	1,000	1,000	1,000	1,000
Lunes	1.000	1,154	1,166 .	1,090	1,131 .
Martes	1.043	1,260	1,259	1,145	1,213
Miércoles	1.175 .	1,360 .	1,398 .	1,286 .	1,359 .
Jueves	1.156 .	1,369 .	1,412*	1,278*	1,356*
Viernes	1.113 .	1,321 .	1,373*	1,224*	1,302*
Sábado	1.013	1,169	1,205	1,113	1,148*
Domingo	0.912	1,000 .	1,000	1,000	1,000
VV<0.8	1.000	1,571***	1,436**	1,412**	1,526***
0.8<VV<1.6	0.819***	1,306***	1,249***	1,206***	1,263***
VV>1.6	0.720***	1,000	1,000	1,000	1,000

T>20	1.000	1,079	1,139*	1,166**	1,158**
T<20	0.843***	1,000	1,000	1,000	1,000
HR>70	1.000	0,640***	0,626***	0,626***	0,654***
HR<70	1.611***	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabla 61. Factores de impacto para las especies relacionadas a las emisiones vehiculares, para MP₁₀ y su significancia estadística, donde (***) indica p < 0.001, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

	Br	Fe	Pb	Zn	Sn	Sr	Al
Intercepto	0,001 .	2,444***	0,018***	0,092***	0,004***	0,012***	1,232***
O-I	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
P-V	0,887	0,665***	0,599***	0,503***	0,543***	0,668***	0,848***
2008	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2009	0,949	0,901	0,872	0,694*	0,858	0,879	0,873
2010	1,871 .	0,921	0,865	0,807	0,864	0,765 .	1,176
2011	2,191*	0,895	0,642**	0,664**	1,156	0,735 .	1,369**
2012	1,289	0,865	0,647*	0,628**	1,178	0,817	1,286*
2013	1,561 .	0,844	0,626**	0,553***	1,375	0,877	1,271*
2014	1,711*	0,913	0,695 .	0,544***	1,183	0,705 .	1,380*
2015	2,619***	1,096	0,678*	0,636**	1,177	0,880	1,537**
2016	2,518***	1,080	0,683*	0,649**	0,882	0,818	1,416**
2017	2,398***	1,007	0,772	0,617**	1,127	0,739 .	1,418**
2018	2,478***	0,838	0,774	0,555***	1,296	0,625**	1,179*
Lunes	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Martes	1,229	1,040	1,062	1,200*	1,138	1,172*	1,043
Miércoles	1,124	1,152*	1,194 .	1,357***	1,212	1,319***	1,175*
Jueves	1,212	1,160*	1,086	1,226 *	1,163	1,309***	1,156*
Viernes	1,128	1,118 .	1,063	1,262**	0,924	1,266**	1,113 .
Sábado	1,095	0,982	0,904	1,003	1,008	1,119	1,013
Domingo	1,191	0,862*	0,762**	0,775**	1,021	1,018	0,912
VV<0.8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0.8≤VV<1.6	0,864	0,822***	0,841**	0,781***	1,174	0,904	0,819***
VV≥1.6	0,765 .	0,646***	0,610***	0,650***	1,163	0,723***	0,720***
T≥20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
T<20	0,983	0,882*	1,100	1,043	1,052	0,877*	0,843***

HR \geq 70	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
HR<70	0,863	1,557***	1,156*	1,298***	1,214 .	1,665***	1,611***

Tabla 62. Factores de Impacto para las especies relacionadas a emisiones industriales, para MP₁₀ y su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

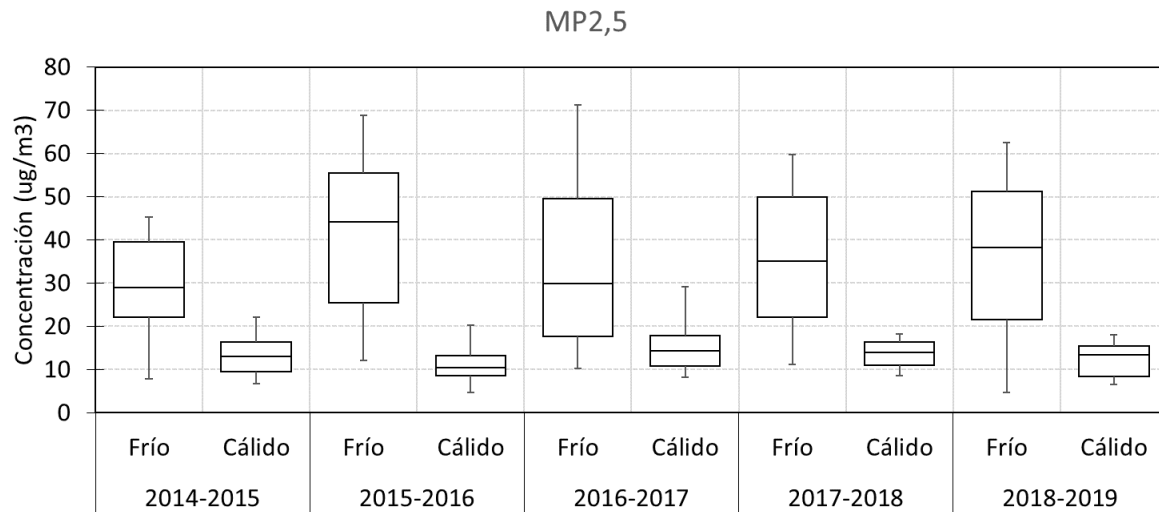
	Cu	S	P	Zr
Intercepto	0.055***	0.397***	0.015***	0.019***
O-I	1.000	1.000	1.000	1.000
P-V	0.532***	0.695***	0.528***	0.474***
2008	1.000	1.000	1.000	1.000
2009	0.873	0.902	1.254 .	0.750
2010	1.083	0.802 .	1.479 .	0.717 .
2011	0.972	0.754*	1.449	0.689 .
2012	0.895	0.737*	1.324	0.573***
2013	0.751 .	0.734*	1.203	0.473***
2014	0.789	0.703*	1.185	0.433***
2015	0.915	0.790 .	1.334	0.679 .
2016	0.880	0.797 .	1.402	0.571**
2017	0.827	0.677***	1.246	0.601**
2018	0.759 .	0.596***	0.940	0.499***
Lunes	1.000	1.000	1.000	1.000
Martes	1.049	1.121 .	0.813 .	0.884
Miércoles	1.175 .	1.198**	0.890	0.942
Jueves	1.151 .	1.135*	0.897	1.060
Viernes	1.161 .	1.144	0.839	0.985
Sábado	0.909	1.075	0.897	0.739**
Domingo	0.667***	0.954	0.864	0.757**
VV<0.8	1.000	1.000	1.000	1.000
0.8<VV<1.6	0.722***	0.979	0.786**	0.766***
VV>1.6	0.575***	0.937	0.497***	0.538***
T>20	1.000	1.000	1.000	1.000
T<20	1.084	0.948	0.736***	0.996
HR>70	1.000	1.000	1.000	1.000
HR<70	1.355***	1.019	2.061***	1.481***

Tabla 63. Factores de Impacto por concentración para elementos relacionados a aerosoles marinos (CI) y quema de biomasa (K), para MP_{10} y su significancia estadística, donde (***) indica $p < 0.001$, (**) 0.001, (*) 0,01 y (.) 0,1 y () 1.

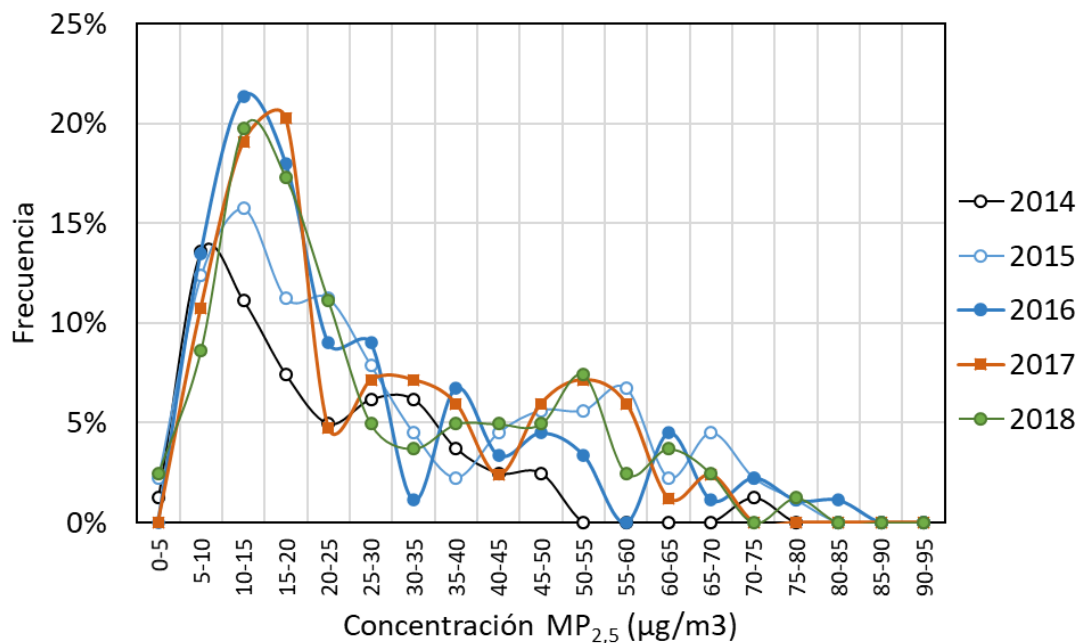
	CI	K
Intercepto	0.186***	0.486***
O-I	1.000	1.000
P-V	1.188 .	0.773***
2008	1.000	1.000
2009	0.925	0.916
2010	0.739	0.869
2011	0.767	0.882
2012	0.787	0.838
2013	0.771	0.842
2014	0.686 .	0.829
2015	0.863	0.946
2016	0.809	0.895
2017	0.606 .	0.852
2018	0.753	0.727*
Lunes	1.000	1.000
Martes	1.309**	1.067
Miércoles	1.355**	1.187**
Jueves	1.226*	1.171*
Viernes	1.270*	1.122 .
Sábado	0.990	1.038
Domingo	1.065	0.959
VV<0.8	1.000	1.000
0.8≤VV<1.6	1.279**	0.891*
VV≥1.6	1.429***	0.752***
T≥20	1.000	1.000
T<20	0.813**	0.845***
HR≥70	1.000	1.000
HR<70	1.516***	1.571***

ANEXO VI: Análisis de concentración de elementos en función del nivel de concentración de $MP_{2,5}$.

El análisis se ha centrado en los años 2014-2018 con la finalidad de identificar cambios solo en los períodos más recientes. Durante este período las concentraciones de $MP_{2,5}$ no muestra una tendencia clara, como se observa a continuación.



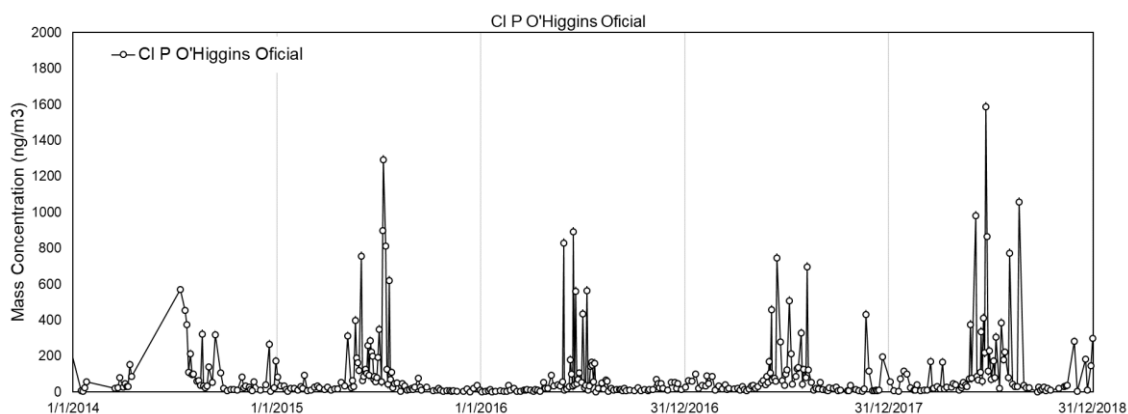
Al analizar la distribución de los valores de concentración, observamos que la mayoría está centrada entre valores entre 5 y 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y entre un 5 -7% de los registros de un año corresponde a valores mayores, como se observa en el gráfico de abajo.



En general, la concentración de la gran mayoría de los elementos aumenta cuando aumenta la concentración de $MP_{2,5}$, sin embargo, el incremento no presenta la misma magnitud. Para analizarlo, se ha calculado la concentración promedio de cada elemento en función del rango de concentración de $MP_{2,5}$. Para visualizar los aumentos de mejor forma, la concentración elemental a diferentes rangos de concentración de $MP_{2,5}$ se han normalizado por el valor promedio del elemento del menor rango de concentración de $MP_{2,5}$ (0-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por ejemplo, para el Cl, el eje Y del gráfico corresponde al número de veces que aumenta la concentración de Cl con relación a la concentración promedio del menor rango de concentración de $MP_{2,5}$, en función del siguiente cálculo:

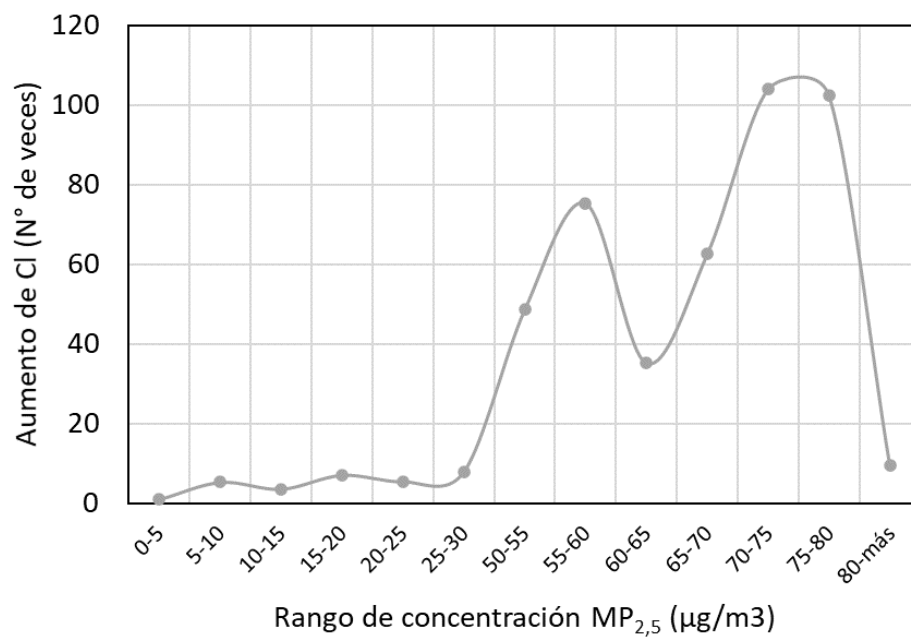
$$\text{Aumento de Cl} = \frac{\text{Concentración promedio de Cl en un rango determinado de concentración de } MP_{2,5}}{\text{Concentración promedio de Cl en el rango de } MP_{2,5} \text{ de } 0 - 5 \mu\text{g}/\text{m}^3}$$

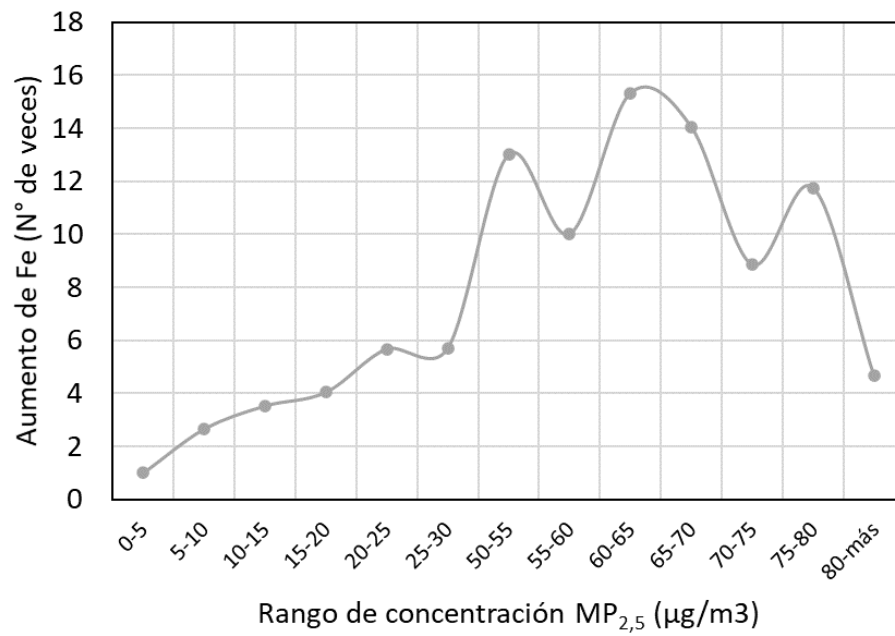
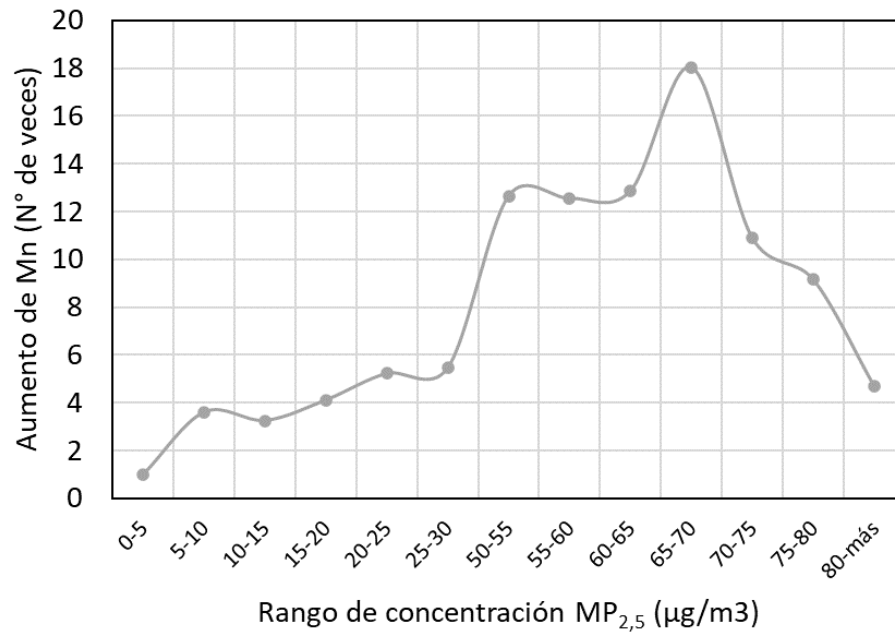
En base a este análisis, es posible identificar que los mayores incrementos se observan en el elemento Cl, que puede aumentar más de 100 veces cuando la concentración de $MP_{2,5}$ es alta. Esto se debe a que el Cl tiende a presentar máximos muy agudos y esporádicos durante época invernal que superan los $1000 \text{ ng}/\text{m}^3$.

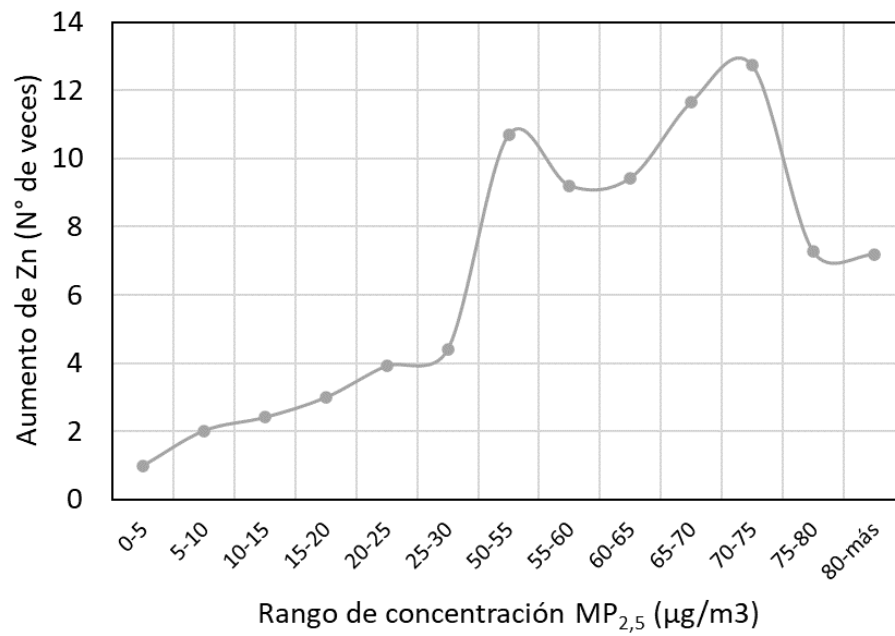
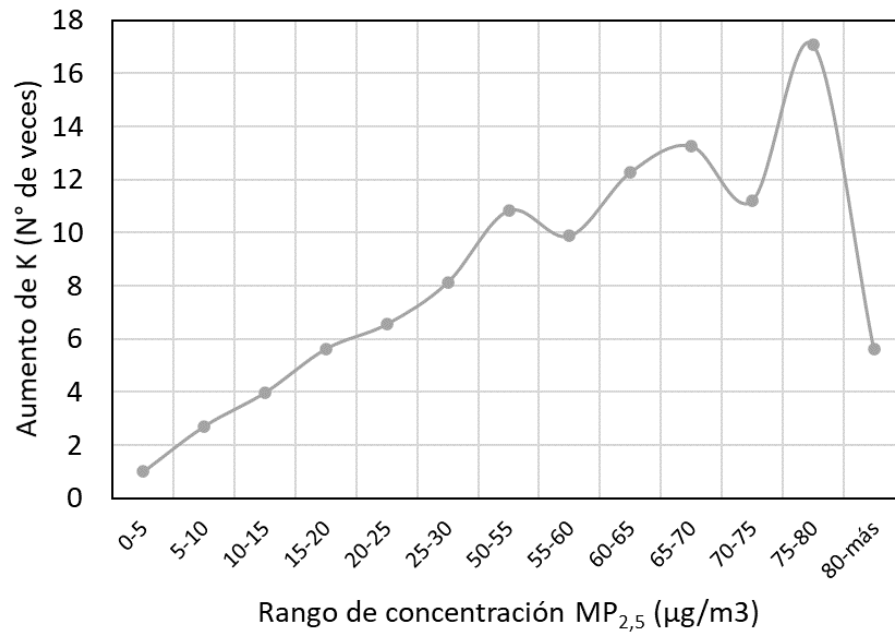


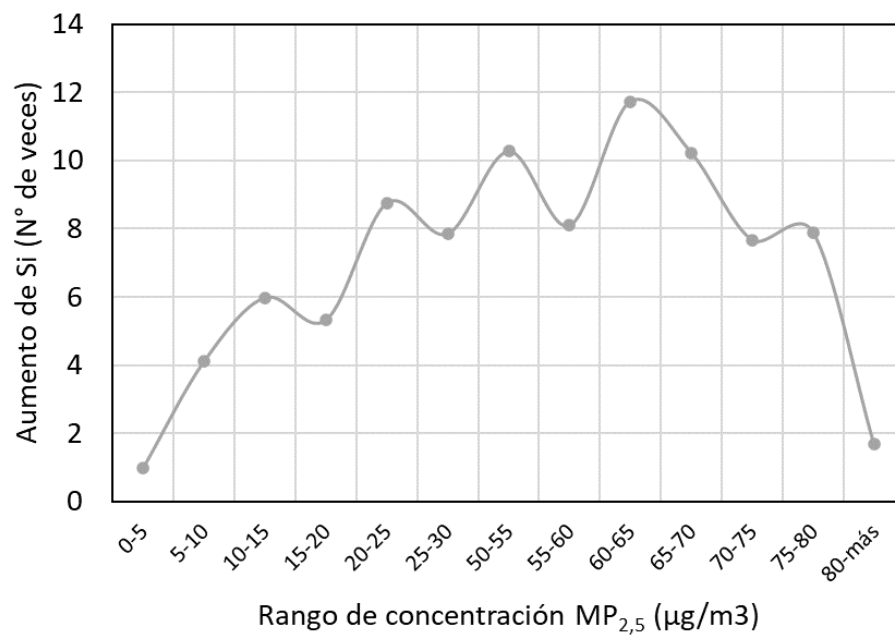
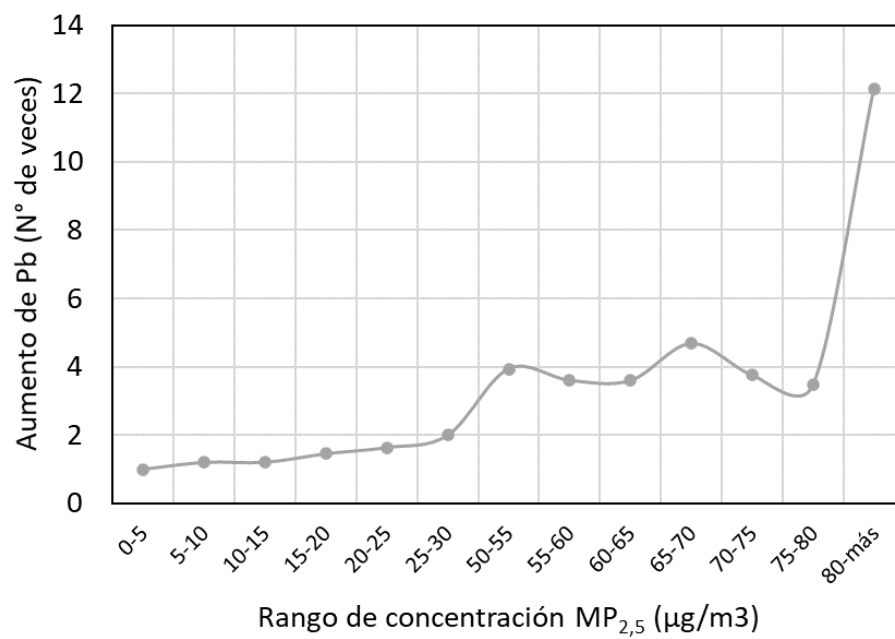
Existen otros elementos con menores aumentos, entre los que destaca Mn, Fe, K, Zn y Pb. Finalmente, los elementos Na, Ni, Al y Mg tienden a presentar valores más bien estables, e independientes de la concentración de $MP_{2,5}$. Los gráficos se entregan a continuación.

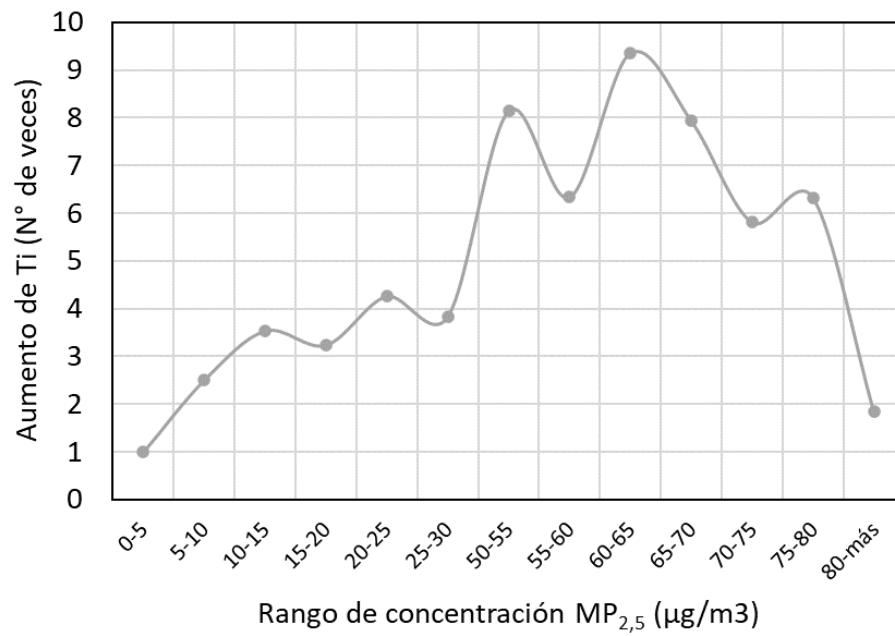
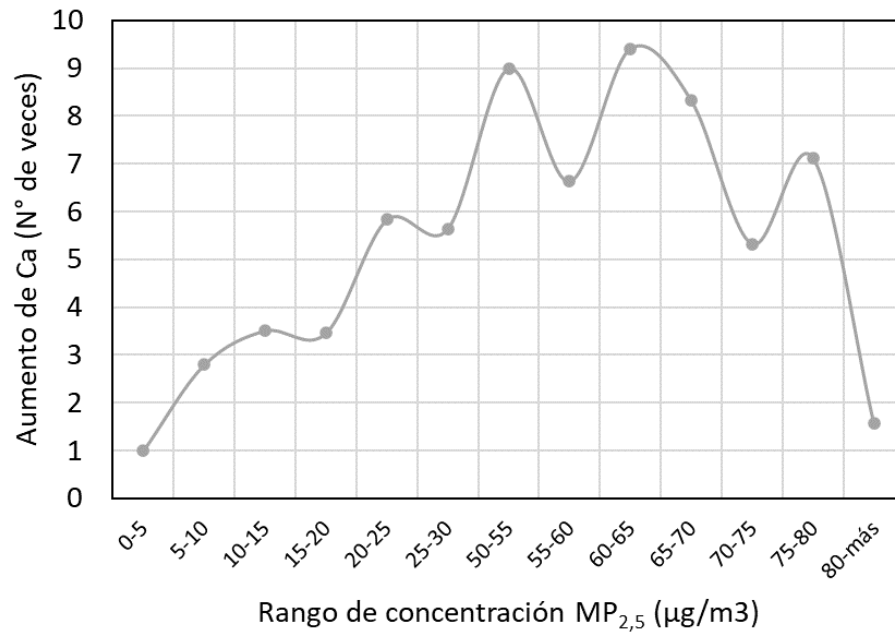
Elementos que aumentan significativamente con la concentración de $MP_{2,5}$:

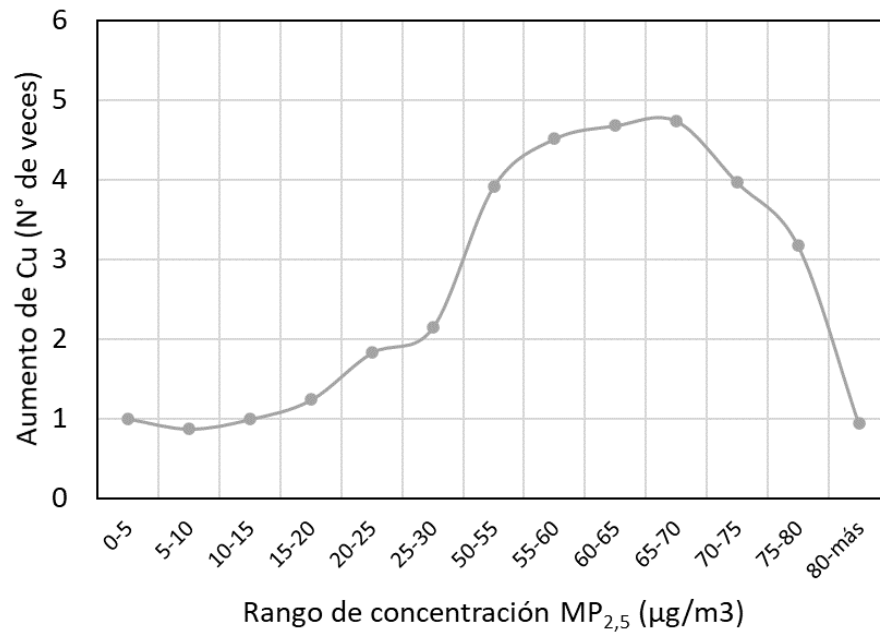




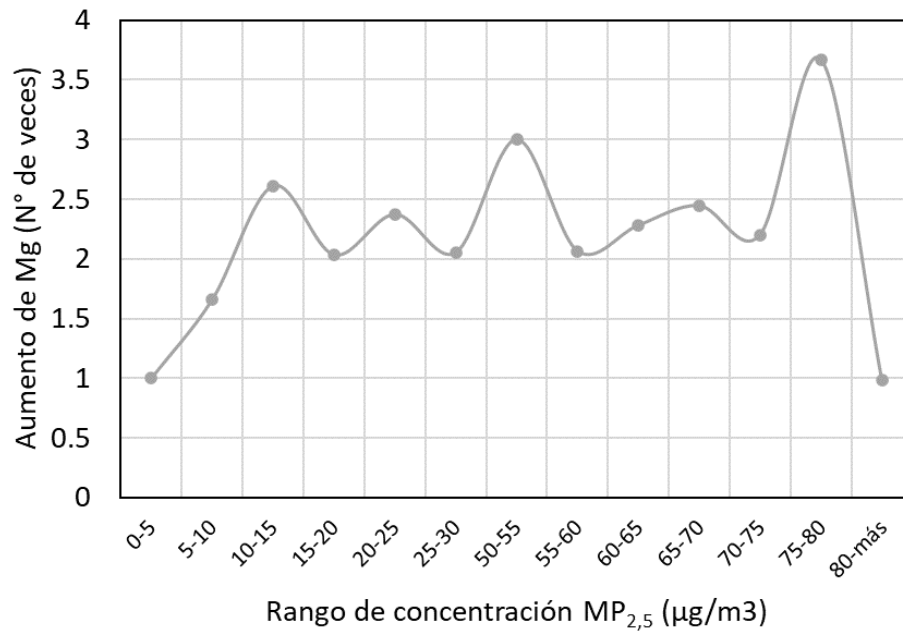
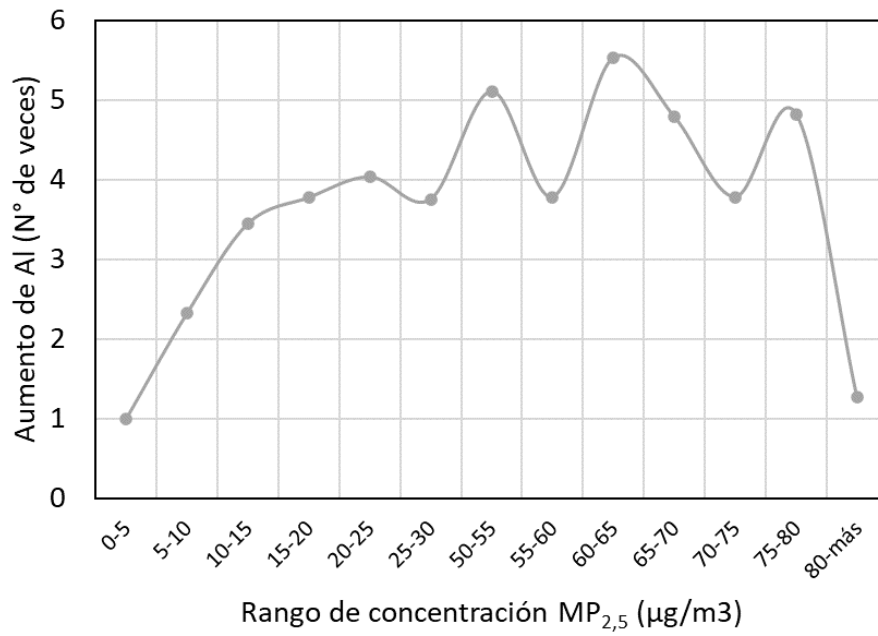


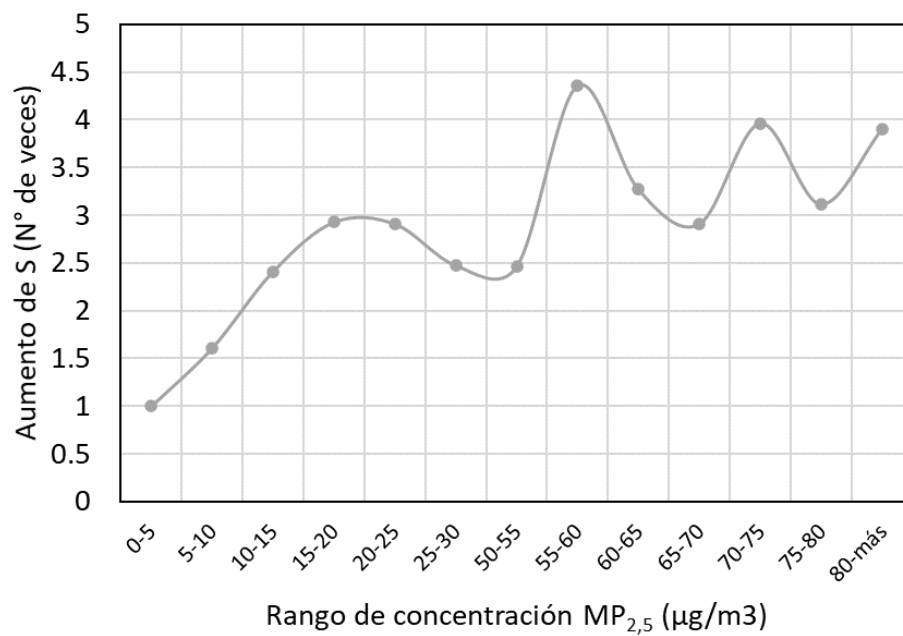
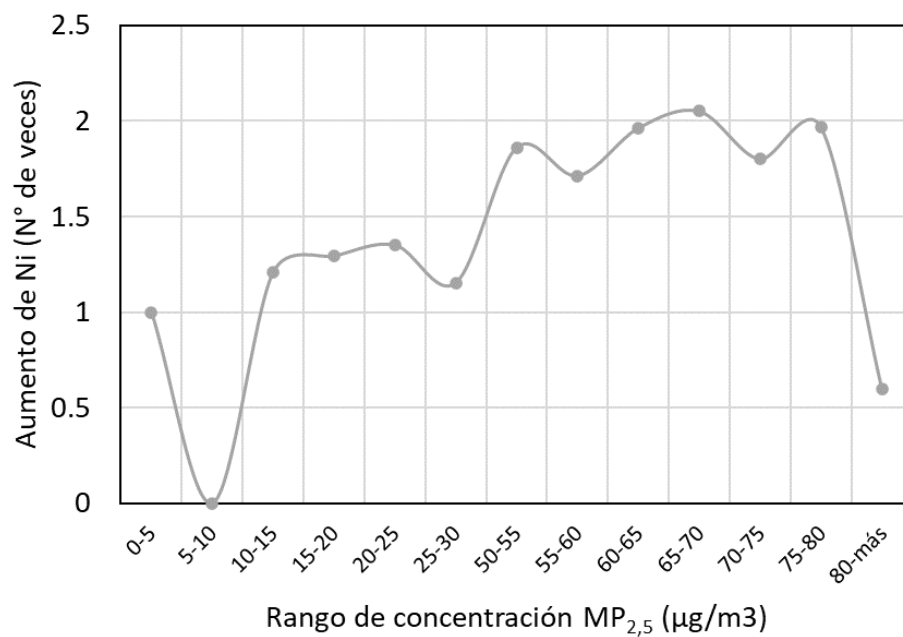


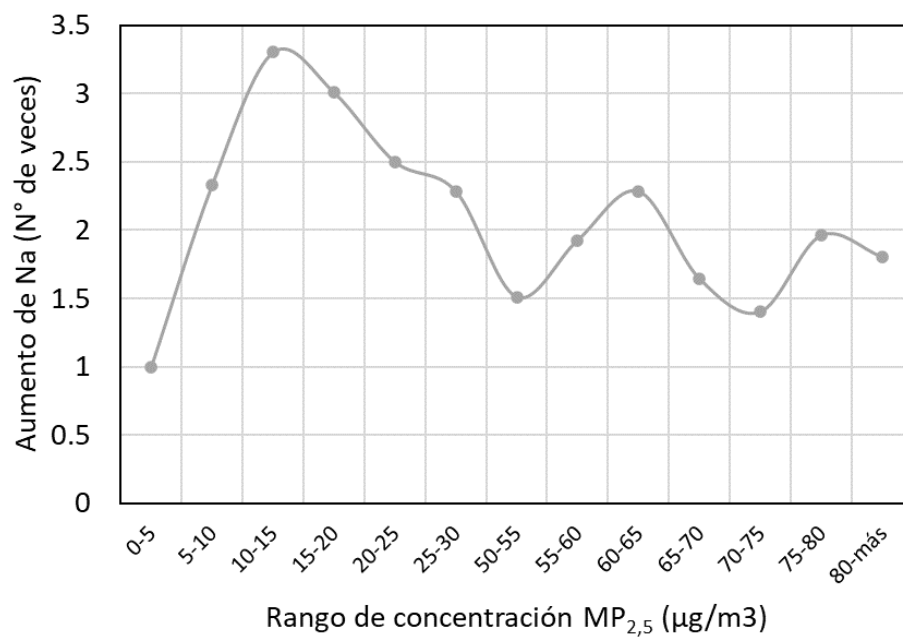




Elementos con menores o nulos aumentos significativos con la concentración de MP_{2,5}:







ANEXO VII: Abreviaciones

Elemento	Nombre
Na	sodio
Mg	magnesio
Al	aluminio
Si	silicio
P	fósforo
S	azufre
Cl	cloro
K	potasio
Ca	calcio
Sc	escandio
Ti	titanio
V	vanadio
Cr	cromo
Mn	manganeso
Fe	hierro
Co	cobalto
Ni	níquel
Cu	cobre
Zn	Zinc
Ga	galio
Ge	Germanio
As	arsénico
Se	selenio
Br	bromo
Rb	Rubidio
Sr	estroncio
Y	itrio
Zr	circonio
Nb	niobio
Mo	molibdeno
Pd	paladio
Ag	plata
Cd	cadmio
In	indio
Sn	estaño
Sb	antimonio
Cs	cesio
Ba	bario

La	lantano
Ce	cerio
Sm	samario
Eu	europio
Tb	terbio
W	Wolfram
Au	oro
Hg	mercurio
Tl	Talio
Pb	plomo



 www.cmmolina.cl

 cmmolina@cmmolina.cl

 (+56) 2 247 9650

 Antonio Bellet 292 int. 602
Providencia, Santiago

