

Chapter Title: LA CADENA CAUSAL: DE EMISOR A RECEPTOR

Book Title: Introducción a la contaminación atmosférica

Book Author(s): Héctor Torquera González

Published by: Ediciones UC

Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1bhkqvz.4>

JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content in a trusted digital archive. We use information technology and tools to increase productivity and facilitate new forms of scholarship. For more information about JSTOR, please contact support@jstor.org.

Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use, available at <https://about.jstor.org/terms>



Ediciones UC is collaborating with JSTOR to digitize, preserve and extend access to *Introducción a la contaminación atmosférica*

JSTOR

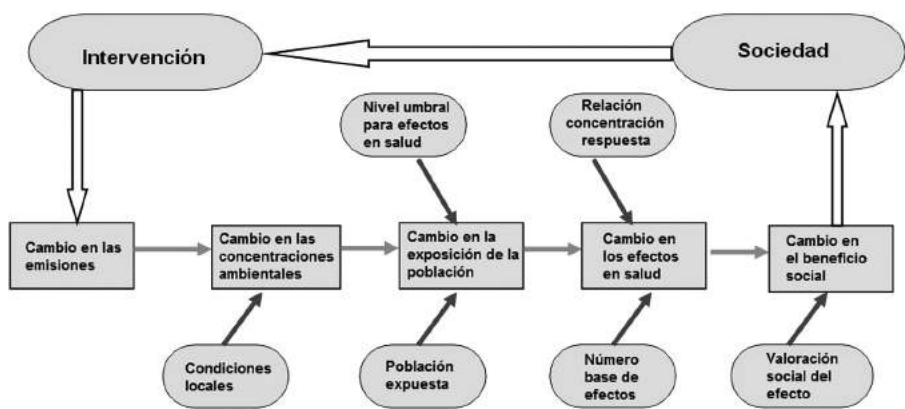
Capítulo 1

La cadena causal: de emisor a receptor

LA CADENA CAUSAL: DE EMISOR A RECEPTOR

En este capítulo se presenta una metodología para analizar el problema de la contaminación atmosférica, mediante un enfoque de análisis secuencial de impactos que se puede resumir en la siguiente figura.

FIGURA 1.1
Esquema del método de análisis: cadena causal de la contaminación



En este esquema se puede apreciar que el problema de la mala calidad del aire en una cierta zona (urbana, industrial, rural) se debe al incremento excesivo en las emisiones de contaminantes, las que llevan a mayores concentraciones de contaminantes en la atmósfera. Esto a su vez ocasiona varios efectos negativos, que se pueden clasificar, dependiendo del receptor afectado, en:

- Efectos en la salud de la población
- Alteración en ecosistemas y agricultura
- Daños a materiales y patrimonio cultural
- Resultados estéticos (pérdida de visibilidad)

Estos efectos han sido ampliamente estudiados en la literatura especializada (Vedal, 1997; Wilson y Spengler, 1996; Ayres y otros, 2006; Pope y Dockery, 2006). De todas las consecuencias, sin duda las más importantes son los efectos en la salud de la población expuesta, por lo que nos concentraremos solo en ellos, especialmente en el caso del material particulado en suspensión.

Por otro lado, la **Figura 1.1** nos indica que para poder mejorar la calidad del aire la única solución viable es reducir las cantidades de contaminantes liberados a la atmósfera. Hacer esto tiene un costo, tanto para los privados (evaluaciones de impacto ambiental, implementación de procesos de reducción de emisiones, etc.) como para el sector público (monitoreo ambiental, fiscalización de emisores, generación de normativa ambiental, etc.).

Las intervenciones hechas por la sociedad pueden variar desde mejoras en la eficiencia energética, mejora de los combustibles, hasta estándares de emisión, normas de calidad, instrumentos económicos, etc., que se representan como retroalimentaciones que intentan reducir las emisiones.

Hasta qué punto es racional gastar en reducción de emisiones va a depender de los beneficios sociales aportados por la mejor calidad del aire conseguida. Históricamente, los errores que se han cometido han sido sobreestimar la capacidad de autodepuración de la atmósfera o de políticas de abatimiento de emisiones mal focalizadas (Elsom, 1996).

En este texto vamos a seguir el esquema analítico descrito en la **Figura 1.1**, y veremos cómo se analiza cada etapa de la secuencia, desde el cambio en emisiones de contaminantes, a los cambios en concentraciones ambientales, cambio en los efectos en salud, hasta la valoración económica (social) de dichos impactos a la salud, tal como se muestra en la **Figura 1.1**.

En los siguientes capítulos se desarrolla la metodología para cada etapa del método, partiendo con las emisiones y llegando hasta la evaluación de beneficios en salud pública asociados a medidas de mejoramiento de la calidad del aire. En este capítulo nos dedicaremos a revisar dos aspectos del problema: síntomas y causas.

1.1 Los síntomas del problema: calidad del aire

Las primeras preguntas que uno puede hacerse al analizar una situación dada de calidad del aire son:

- a) ¿Existe realmente un problema de calidad del aire?
- b) ¿La calidad del aire está mejorando o empeorando?

Para hacer esto se emplea el monitoreo ambiental de los contaminantes más abundantes que se encuentran en la atmósfera y se recurre a utilizar instrumental especializado para medir los impactos a la calidad del aire en la zona de estudio, los que se comparan con estándares de calidad del aire, para diagnosticar la magnitud del problema y su evolución en el tiempo.

Los contaminantes que se miden en forma rutinaria son los que más daño causan a la salud de las personas (Capítulo 2), y normalmente son los que más abundan en zonas urbanas o industriales. A continuación se describen los contaminantes regulados en todo el mundo.

- a) Material particulado respirable total (MP_{10}): se trata de partículas sólidas suspendidas en el aire, de tamaño aerodinámico¹ menor a $10\ \mu m$, emitidas por el uso de combustibles fósiles (transporte, industria, comercio y residencia), por el procesamiento de grandes volúmenes de materiales sólidos en la minería, construcción y agricultura, y por la industria de manufactura en general. Pueden penetrar en las vías respiratorias sin mayor resistencia.
- b) Se ha encontrado que la fracción fina del MP_{10} ($MP_{2.5}$) está asociado a daños severos a la salud de las personas, como incrementos en mortalidad prematura, bronquitis crónica, etc. (ver capítulo 2); esta fracción más pequeña en tamaño puede penetrar hasta nivel alveolar en los pulmones. Debido a esto es que esa fracción fina se ha incluido en la lista de contaminantes regulados, en forma adicional al caso del MP_{10} .
- c) Monóxido de carbono (CO): es un gas incoloro e inodoro generado en procesos de combustión incompleta, principalmente asociado a los vehículos propulsados a gasolina.
- d) Óxidos de nitrógeno (NOx): se trata del óxido nítrico y del dióxido de nitrógeno (NO y NO_2), los que se generan principalmente en procesos de combustión a través de la combinación del nitrógeno y oxígeno del aire a elevadas temperaturas.

¹ Este aspecto se va a especificar en mayor detalle en el Capítulo 3.

- e) Compuestos orgánicos volátiles (COV): a las temperaturas ambientales se presentan habitualmente en forma de vapores. Están asociados a las emisiones de procesos de combustión, al uso de solventes en operaciones de pintado de superficies, uso de limpiadores, y evaporación de combustibles líquidos principalmente.
- f) Óxidos de azufre (SO_x): provienen de la oxidación del azufre contenido en el combustible que se quema; la mayoría corresponde al dióxido de azufre (SO₂), aunque también es posible que se emita el trióxido de azufre (SO₃) en algunos casos (caso de fundiciones de cobre).
- g) Ozono: se forma en el ambiente a partir de la combinación de COV y de NO_x, a través de un ciclo de reacciones químicas y fotoquímicas. Luego es un contaminante secundario (Capítulo 6).

Adicionalmente, si se estudian problemas a escala global como el cambio climático² se reportan gases de efecto invernadero (GEI), tales como CO₂, CH₄, SF₆ o N₂O. Si se analiza la evolución del ozono estratosférico, entonces se reportan los gases que dañan la capa de ozono, tales como refrigerantes, propelentes y pesticidas que contienen cloro, bromo o flúor en su composición química, respectivamente.

Aunque no siempre se reportan, el calor y el ruido emitido también constituyen contaminación atmosférica, aunque por su naturaleza física distinta se les trata de otra forma.

1.2 Evolución de la calidad del aire en ciudades chilenas

La calidad del aire en las ciudades chilenas se puede clasificar, en una primera aproximación, en base a la ubicación geográfica de ellas:

- a) Zona norte, donde hay alta contribución natural al material particulado respirable total MP₁₀, y un alto impacto de la minería y de la generación de energía eléctrica.
- b) Zona central, con altas concentraciones de MP_{2.5} y ozono, y alto impacto del sector transporte.
- c) Zona sur, altas concentraciones de MP_{2.5} por uso residencial de leña.

A continuación presentamos una breve mirada a la calidad del aire en diversas ciudades del país, afectadas por distintos problemas de calidad del aire.

² Ver Capítulo 4 para más detalles respecto al cambio climático.

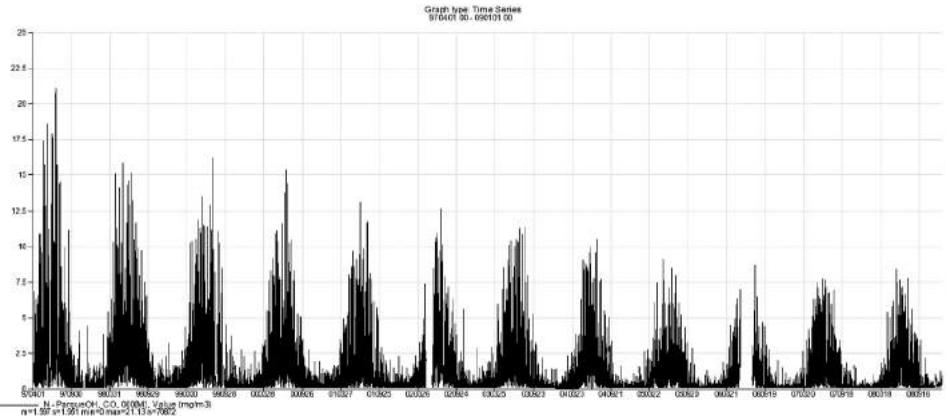
1.2.1 Evolución de la calidad del aire en Santiago

En la ciudad de Santiago (33,5 °S, 70,6°W), las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂) se han reducido significativamente entre 1997 y 2008, como se puede apreciar en las siguientes figuras.

En el caso del monóxido de carbono (cuya norma de calidad para el promedio móvil de 8 h es de 10 mg/m³), la reducción evidente en la **Figura 1.2** se explica por la introducción, a partir de 1991, de los vehículos a gasolina con convertidor catalítico, dispositivo muy eficiente en reducir el CO que sale por el tubo de escape de los vehículos (Capítulo 9). A esto se le agrega la renovación de la flota de vehículos livianos, efecto que toma tiempo en concretarse, pero que va retirando del parque a los vehículos más contaminantes³. Nótese que se cumple con la norma de 8 h del CO en dicha estación a partir del 2004.

FIGURA 1.2

Evolución de las medias móviles de 8 h de CO [mg/m³] medidas en la estación de monitoreo Parque O'Higgins (1997-2008). Fuente: Sistema I-Airviro MMA Región Metropolitana. La línea de segmentos representa la norma anual, expresada como percentil 99 de los máximos valores diarios



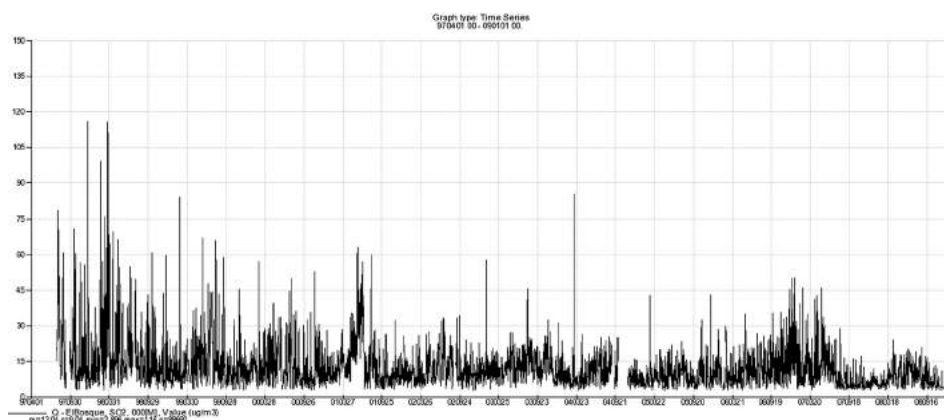
Por otra parte, en el caso del SO₂ (la norma de calidad diaria es de 250 [µg/m³], expresada como percentil 99 de un año de datos) la reducción mostrada en la **Figura 1.3** se debe a la introducción del gas natural en la industria,

³ De hecho, una inspección técnica con requisitos de mantención de los vehículos es una medida costo efectiva para reducir las emisiones del sector transporte.

combustible con un contenido de azufre despreciable; es decir, en este caso se hizo una sustitución por combustibles más limpios. Simultáneamente en el sector transporte se redujo el contenido de azufre en el diésel a 300 ppm el 2001, a 50 ppm el 2004, y el 2011 pasó solo a tener como máximo 15 ppm, con lo cual se pueden exigir estándares Euro V (ver Capítulo 9) a los vehículos diésel. Notar que el 2008 no se superó el valor diario de 30 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ para el SO_2 en dicha estación de monitoreo. Además, el promedio anual en el mismo periodo 1997-2008 se redujo de 18 a 8,5 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, siendo la norma anual de 80 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

FIGURA 1.3

Evolución de las medias móviles de 24 h del SO_2 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, medidas en la estación de monitoreo El Bosque (1997-2008). Fuente: Sistema I-Airviro MMA, Región Metropolitana



Con respecto al ozono y al NO_2 , ambos gases irritantes y fuertemente oxidantes, característicos del esmog fotoquímico (Capítulo 6), las siguientes figuras muestran los resultados en la estación Las Condes, ubicada en el sector oriente de Santiago, viento abajo de las mayores fuentes de precursores de ozono en la zona metropolitana. Se aprecia en la **Figura 1.4** que el ozono excede rutinariamente la norma anual para el promedio móvil de 8 h.

La **Figura 1.5** muestra que los promedios horarios del NO_2 en la estación Las Condes han disminuido sostenidamente en los últimos años, cumpliendo siempre con la norma del percentil 99 de las máximas diarias en un año, la que estipula un valor de 400 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Si bien se aprecia una cierta tendencia a la

FIGURA 1.4

Evolución de los promedios móviles de 8 h de ozono en la estación de monitoreo Las Condes (1997-2009). Fuente: Sistema I-Airviro MMA, Región Metropolitana. La línea de segmentos representa la norma anual, expresada como percentil 99 de los máximos valores diarios

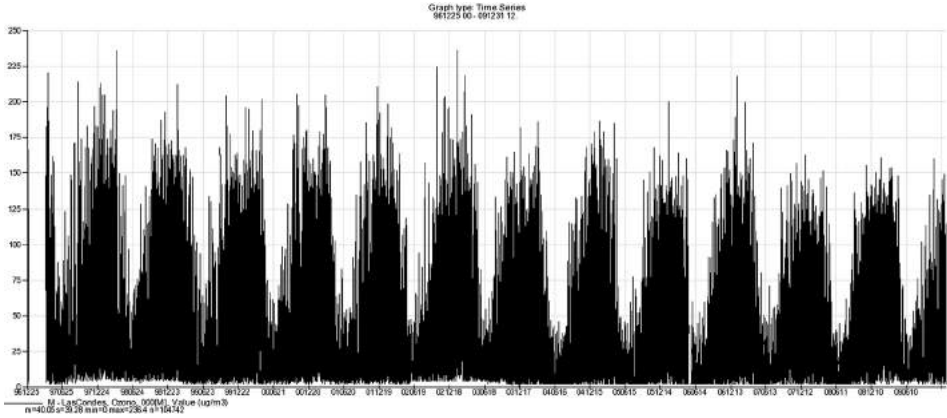
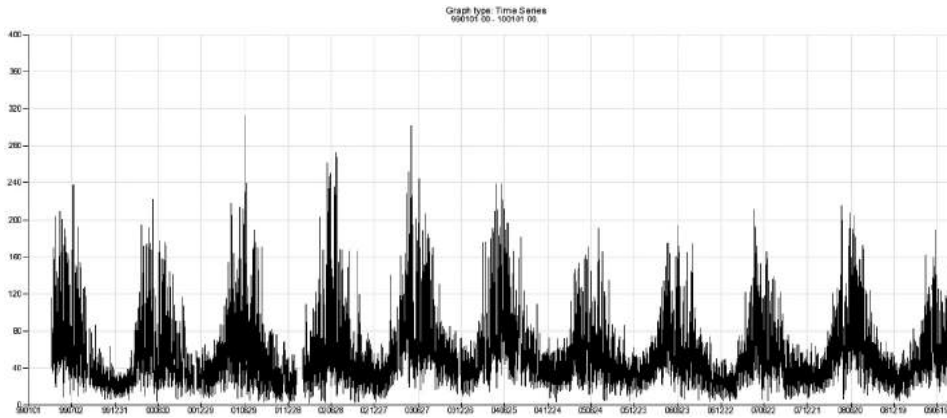


FIGURA 1.5

Evolución de los promedios horarios de NO_2 en la estación de monitoreo Las Condes. (1999-2009). Fuente: Sistema I-Airviro MMA, Región Metropolitana



baja en los últimos años para ambos gases oxidantes, una posible explicación para esta tendencia es que ya el sector oriente no tenga un máximo tan marcadamente superior para el ozono en la ciudad como sí ocurría en la década 1990-2000 (Jorquera, Palma y Tapia, 2000); en efecto, los datos más recientes

indican que los niveles de ozono en la ciudad se han asemejado entre sí y que hay más estaciones de monitoreo que tienen niveles de ozono que superan el 80% del valor de la norma. Es complejo establecer las causas que explican estos comportamientos, ya que el ozono es generado en la atmósfera a partir de reacciones químicas entre gases precursores, y esta es una relación no lineal entre distintos contaminantes, tales como COV y NO_x. En el Capítulo 6 abordaremos en detalle esos procesos y cómo se puede definir medidas de abatimiento para el ozono.

En el caso del material particulado respirable, tanto el total (MP₁₀) como su fracción fina (MP_{2.5}) han disminuido considerablemente en los últimos 20 años. En la **Figura 1.6**, se aprecia que el MP₁₀ ha disminuido sosteniblemente, aunque en los últimos años la tendencia no está clara sino que se aprecia más bien un estancamiento. Posiblemente esto se deba al incremento de los vehículos que circulan por la ciudad, que son los mayores emisores de la fracción gruesa del MP₁₀ a través del polvo suspendido en la red vial, y también al crecimiento sostenido de la actividad de construcción. Se observa que prácticamente en toda la ciudad se excede la normativa anual de 50 [µg/m³], como promedio móvil de tres años sucesivos.

FIGURA 1.6

Evolución de los promedios anuales del MP10 [µg/m³], medidos en las estaciones de monitoreo Parque O'Higgins y Las Condes, y comparación con la norma de calidad chilena y la Guía de la OMS. Fuente: Sistema I-Airviro MMA, Región Metropolitana.

Los datos 2010-2012 no están aún validados, por lo que se trata de mediciones preliminares

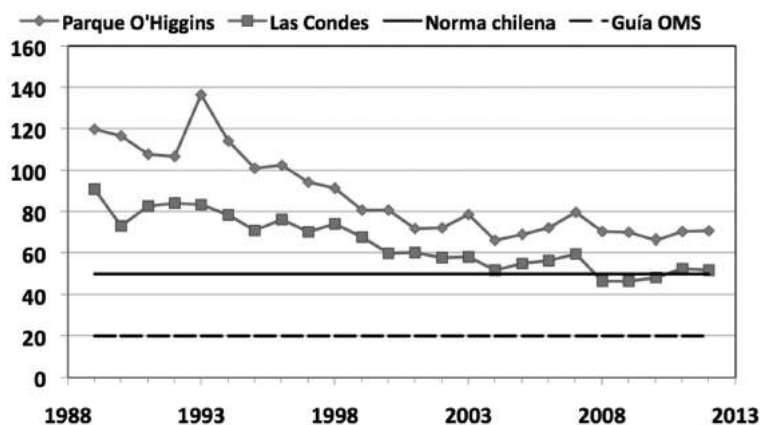
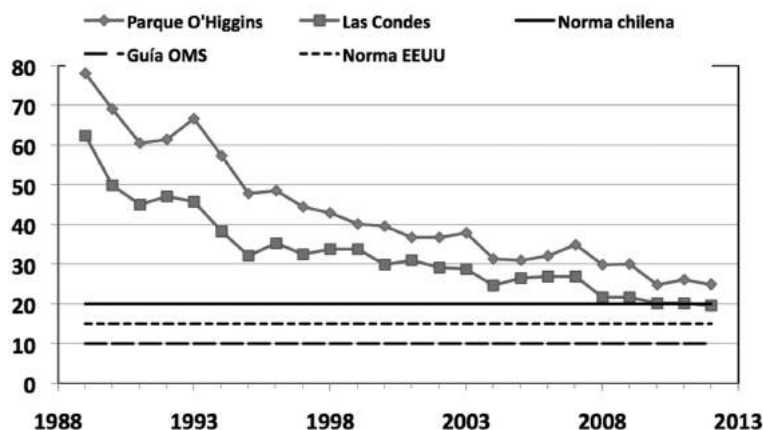


FIGURA 1.7

Evolución de los promedios anuales del $MP_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], medidos en las estaciones de monitoreo Parque O'Higgins y Las Condes, y comparación con la norma de calidad chilena, la de EE.UU. y la Guía de la OMS. Fuente: Sistema I-Airviro MMA, Región Metropolitana. Los datos 2010-2012 no están aún validados, por lo que se trata de mediciones preliminares



En el caso de la fracción fina ($MP_{2.5}$), los resultados muestran una tendencia persistente a la reducción de las concentraciones ambientales, con el monitor de Las Condes mostrando un promedio móvil 2010-2012 muy cercano al valor de la norma chilena de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio móvil de tres años sucesivos (**Figura 1.7**). En el sector céntrico de la ciudad (Parque O'Higgins) el promedio móvil 2010-2012 está cercano a los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, hay que señalar que los datos han sido medidos usando instrumentos TEOM, en los cuales hay pérdida de componentes volátiles, por lo que los valores de $MP_{2.5}$ en la figura anterior están probablemente subestimados.

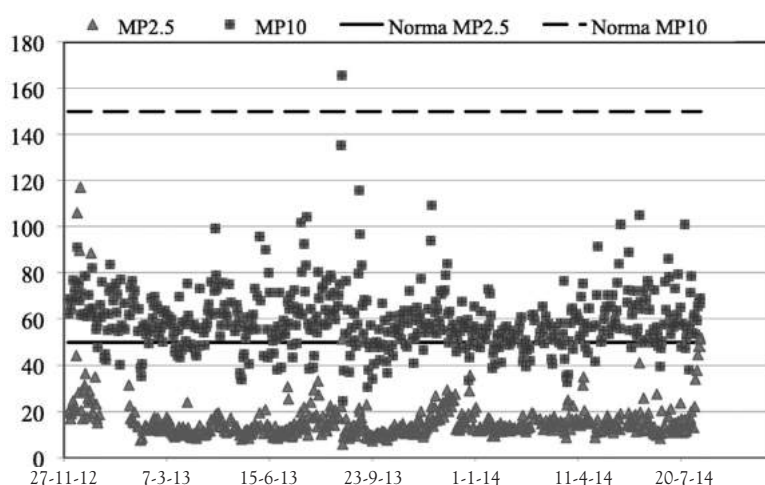
En resumen, el monitoreo de calidad del aire en Santiago nos indica que se ha avanzado considerablemente en la reducción de la contaminación en la ciudad. Sin embargo, aún falta por avanzar en el cumplimiento de la normativa ambiental del material particulado, ya que todavía se puede reducir el riesgo a la salud de la población (Capítulo 2) si se cumpliera con ambas normas de calidad del aire (MP_{10} y $MP_{2.5}$).

1.2.2 Calidad del aire en Calama, Región de Antofagasta

La ciudad de Calama ($22,45^{\circ}\text{S}$, $68,9^{\circ}\text{S}$) se encuentra ubicada en el desierto de Atacama y cerca de las faenas mineras de Chuquicamata y Radomiro Tomic, ambas pertenecientes a Codelco. La siguiente figura muestra los promedios diarios de $\text{MP}_{2.5}$ y MP_{10} medidos en la estación Colegio Pedro Vergara Keller en los últimos años; se aprecia que ambas fracciones de tamaño no presentan problemas de cumplimiento de la norma diaria.

FIGURA 1.8

Evolución de los promedios diarios de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], medidos en la estación de monitoreo Colegio Pedro Vergara Keller, Calama. Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>



Sin embargo, respecto a la norma anual, el MP_{10} claramente supera el valor de $50 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$, mientras que el $\text{MP}_{2.5}$ cumple con la norma anual de $20 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Luego, el aporte natural al MP_{10} está contribuyendo a que los niveles de MP_{10} sean elevados en la ciudad; en el caso del $\text{MP}_{2.5}$ los niveles de concentración medidos llegan a 75% del valor de la norma anual, y se trata exclusivamente de aportes antropogénicos, ya que el aporte natural al $\text{MP}_{2.5}$ es bajo. Este tipo de situaciones es característico de la zona norte del país.

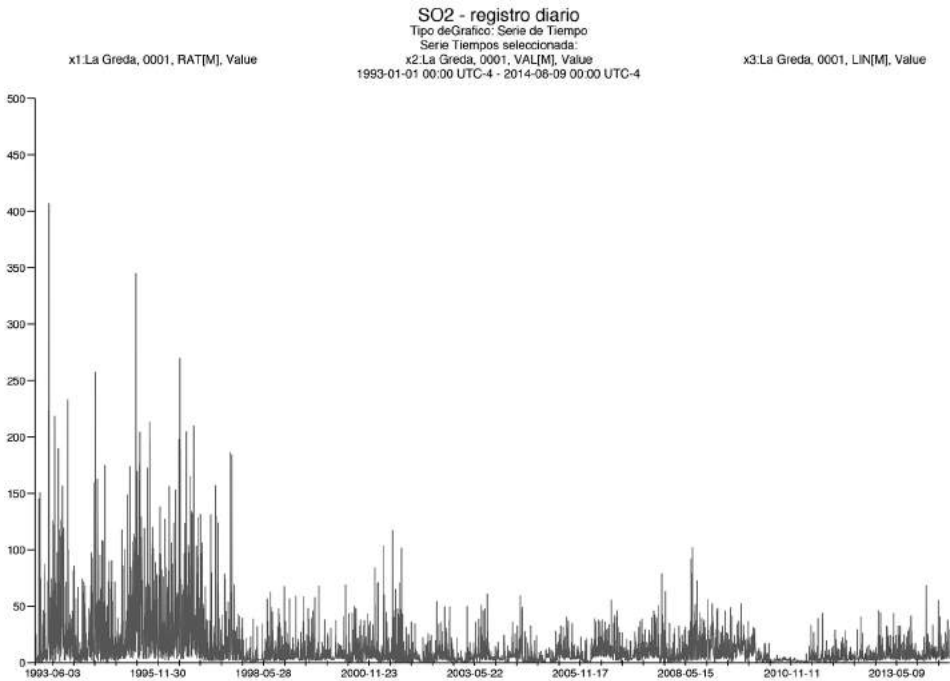
1.2.3 Calidad del aire en La Greda, V Región

La zona de La Greda en la V Región de Valparaíso está cercana al complejo industrial Ventanas, donde está ubicada la refinería de cobre de Codelco

del mismo nombre, centrales termoeléctricas a carbón, actividad portuaria, terminales de combustible, etcétera. La zona ha estado sometida al Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica desde 1993 en adelante, debido a los elevados niveles de anhídrido sulfuroso (SO_2) y material particulado respirable total MP_{10} . La siguiente figura muestra las concentraciones diarias de SO_2 medidas en la estación de monitoreo de La Greda, ubicada a unos 2 km al NNE de la fundición de cobre Ventanas. Se constata una reducción importante de las concentraciones diarias (el valor de la norma es de 96 ppb), pero en términos de concentraciones de corto plazo los valores siguen siendo altos respecto a la guía de la OMS, que recomienda una concentración límite de 10 minutos de 500 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

FIGURA 1.9

Evolución de las concentraciones diarias de SO_2 (ppb) en la estación de monitoreo de La Greda, V Región. Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>

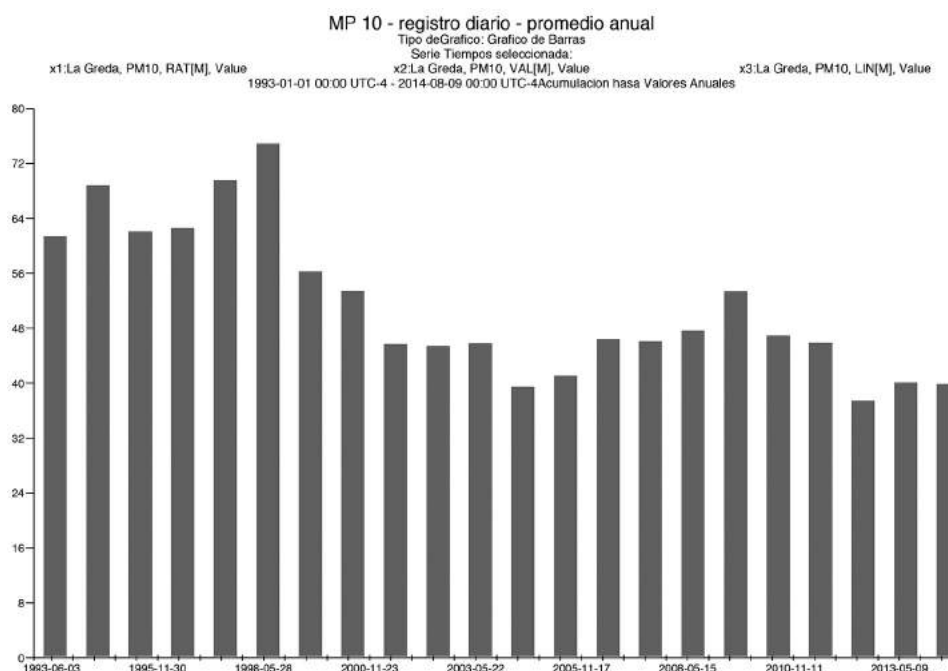


La siguiente figura muestra la evolución, en el mismo período, del promedio anual de MP_{10} . Aunque se ha reducido dicho promedio anual y se cumple

con la norma anual, todavía los promedios anuales son elevados y cercanos a 80% del valor de la norma, lo que se denomina “condición de latencia” en la regulación chilena de calidad del aire.

FIGURA 1.10

Evolución de las concentraciones anuales de MP_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en la estación de monitoreo de La Greda, V Región. Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>



1.2.4 Calidad del aire en Temuco, IX Región

La zona urbana de Temuco-Padre Las Casas, ubicada en la IX Región de la Araucanía, es una zona donde el uso intensivo de leña, junto con sus condiciones climáticas, viviendas con poca aislación térmica, equipos de baja eficiencia de combustión y leña con alta humedad, han llevado a que las emisiones residenciales hayan crecido rápidamente, alcanzándose altos niveles de concentraciones de material particulado, especialmente la fracción fina $MP_{2.5}$. Las siguientes figuras muestran las concentraciones diarias y anuales de $MP_{2.5}$ medidas en la estación de monitoreo de Las Encinas, un sector residencial de Temuco. Tanto en la **Figura 1.11** como en la **Figura 1.12** se aprecia que las

concentraciones superan ampliamente las normas vigentes en el país y las recomendaciones de la OMS. Esta situación se repite en ciudades como Valdivia, Osorno, Coyhaique, etcétera, donde el consumo de leña está extendido en toda la población.

FIGURA 1.11

Evolución de las concentraciones diarias de $MP_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en la estación de monitoreo Las Encinas, Temuco, IX Región. Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>

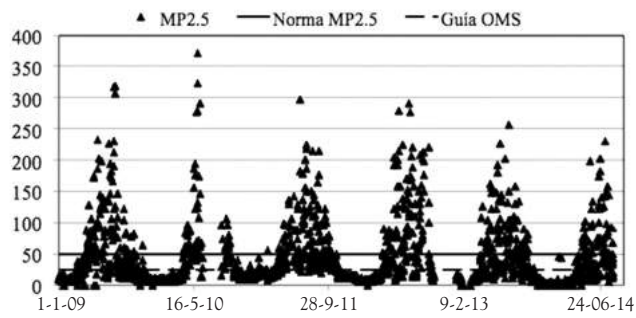
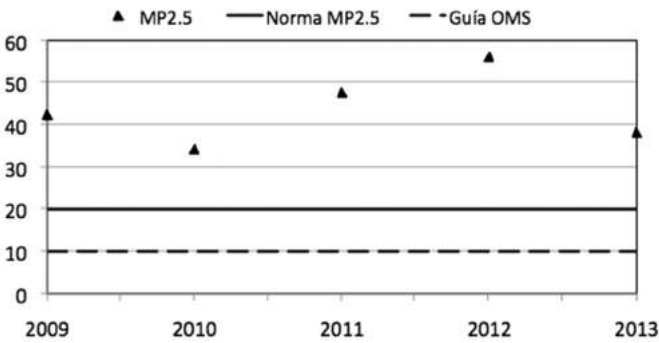


FIGURA 1.12

Evolución de las concentraciones anuales de $MP_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en la estación de monitoreo Las Encinas, Temuco, IX Región. Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>

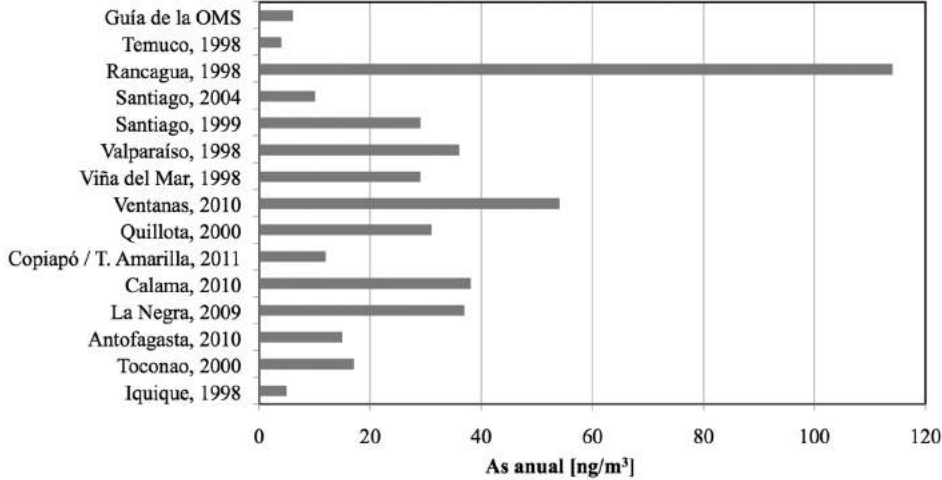


1.2.5 Zonas urbanas impactadas por fundiciones de cobre

Las fundiciones de cobre, además de emitir SO_2 , también emiten arsénico (As), un metaloide que está asociado al desarrollo de ciertos tipos de cáncer al estómago y a la vejiga. En el caso de Chile, las fundiciones de cobre se encuentran

cercanas a zonas pobladas, por lo que se ha medido las concentraciones ambientales en dichas zonas urbanas. La siguiente figura muestra mediciones del promedio anual de arsénico [ng/m³] medido; por comparación se ha incluido la Guía de la OMS que recomienda un valor máximo de 6 [ng/m³]. Lo que está claro es que hay numerosas zonas urbanas afectadas por este contaminante y la única solución es poner normas de emisión más estrictas para el arsénico que proviene de las fundiciones.

FIGURA 1.13
Promedios anuales de As, en [ng/m³], en distintas zonas urbanas.
Fuente: <http://www.sinia.cl/1292/w3-article-52008.html>

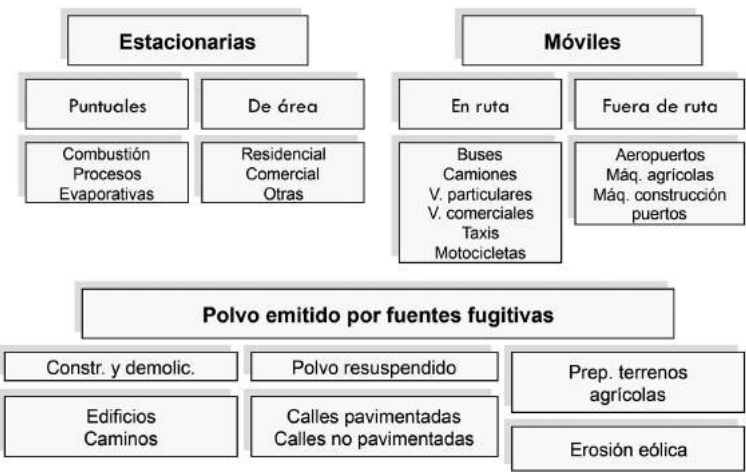


1.3 Las causas del problema: las emisiones atmosféricas

Para poder diagnosticar cuáles son las fuentes emisoras que más contribuyen en una zona dada al deterioro de la calidad del aire, es necesario disponer de un inventario de emisiones atmosféricas, que es una estimación de todos los contaminantes de interés emitidos a la atmósfera por las diversas actividades humanas y fuentes de origen natural, para un período y área geográfica determinada. La siguiente figura muestra un esquema de clasificación de las emisiones en el contexto de construir un inventario.

FIGURA 1.14

Esquema de construcción de un inventario de emisiones atmosféricas



1.3.1 Clasificación de fuentes emisoras

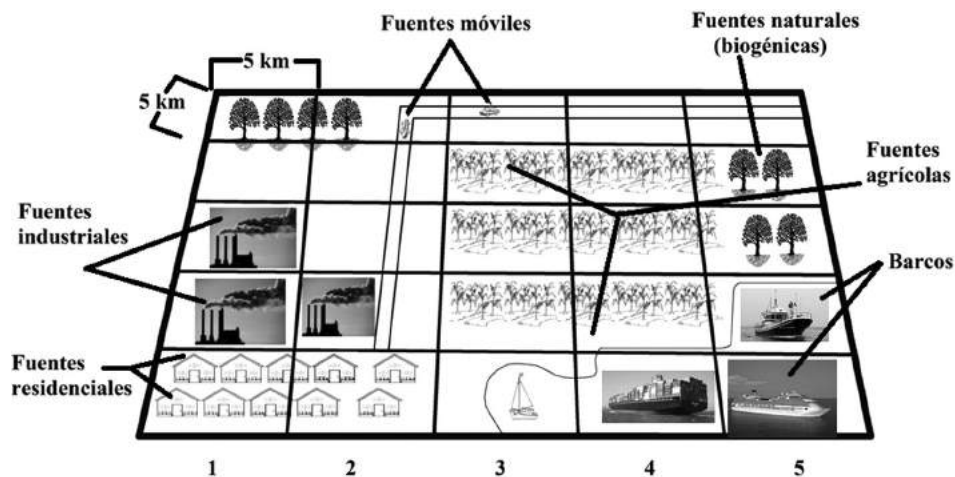
En general, conviene distinguir entre los distintos tipos de fuentes que contribuyen con sus emisiones a la mala calidad del aire, y es así como podemos distinguir:

- a) Emisiones de fuentes puntuales: corresponden a actividades industriales o comerciales que se caracterizan por emitir los contaminantes a la atmósfera en forma muy localizada, a través de una o más chimeneas o conductos de descarga. Ejemplos típicos: chimeneas de centrales termoeléctricas, de hornos de grandes industrias, etcétera.
- b) Fuentes móviles: corresponde a todos los vehículos de transporte de carga y pasajeros, públicos y privados, así como la maquinaria asociada a sus actividades (maquinaria vial, por ejemplo). Incluye también el transporte aéreo y los ferrocarriles.
- c) Fuentes de área: corresponden a todas aquellas fuentes que, por su naturaleza, son de carácter difuso, su posición no está muy bien definida en el espacio, y su intensidad tampoco está muy clara en el tiempo. Ejemplos: emisiones de polvo erosionado por el viento, emisiones de olores (crianza de animales, rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas), quemas agrícolas e incendios forestales, emisiones naturales o biogénicas provenientes de la vegetación, evaporación de combustibles y solventes,

etcétera. Asimismo se incluye en esta categoría a los barcos y las fuentes fijas muy pequeñas existentes en una zona (caso de calefacción comercial y residencial, por ejemplo), las que se agrupan para dar origen a una sola fuente de área por cada celda espacial, tal como se aprecia en la **Figura 1.15**.

FIGURA 1.15

Esquema de agrupamiento de fuentes pequeñas como fuentes de área



1.3.2 ¿Cómo se calculan los inventarios de emisiones?

Hay dos enfoques que se aplican para estimar emisiones atmosféricas: enfoque desde arriba (*top-down*) y enfoque desde abajo (*bottom-up*).

El enfoque desde arriba significa que las emisiones se estiman a partir de datos nacionales o regionales; por ejemplo: cantidad de combustible consumido, de productos manufacturados o la distancia recorrida por los vehículos en ruta. Luego los datos nacionales o regionales son escalados para el área del inventario usando alguna medida de actividad directa o indirectamente relacionada a las emisiones: datos demográficos, estadísticas de empleo, volúmenes de venta, etcétera. Por ejemplo, si se conocen las ventas totales de pintura a escala regional y la superficie construida en el área de estudio se pueden utilizar para escalar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), producto de la evaporación de los solventes empleados en las pinturas.

En el enfoque desde abajo, las estimaciones se hacen para cada fuente y los resultados se suman para obtener la emisión en toda el área geográfica.

Las características de ambas metodologías se presentan en la **Tabla 1.1**. El número de fuentes cuyas emisiones se monitorean en forma continua es muy limitado, por lo que para la mayoría de las fuentes es necesario estimar las emisiones usando indicadores de actividad, tales como consumos de combustibles, kilómetros recorridos por los vehículos en ruta, producción industrial o alguna otra medida de actividad asociada a las emisiones. Las distintas alternativas que se pueden seguir se resumen en la Tabla 1.2.

TABLA 1.1
Características de las metodologías de estimación de emisiones

Enfoque desde arriba	Enfoque desde abajo
Se usan para fuentes de área. Se necesitan recursos relativamente bajos para agregar todo un tipo de fuentes en una zona dada.	Se usan normalmente solo para fuentes puntuales, aunque cuando hay recursos suficientes y la emisión es relevante (caso del sector transporte), entonces se justifica dedicar recursos a estimar esa emisión a partir de datos detallados del tráfico en la zona.
Se emplean cuando no hay datos locales y es costoso recopilarlos, o bien el uso final no justifica mucho detalle espacial.	Se necesitan más recursos para recopilar información local sobre niveles de actividad, tipos de fuentes de emisión y sus factores de emisión representativos.
Se utilizan factores de emisión promedio o totales nacionales de emisiones (ya compilados) para estimar emisiones en una zona, escalando por población total, población empleada, etc.	Los resultados son más precisos debido a que son recolectados para cada fuente individual, sin hacer un proceso de extrapolación espacial.
Un problema potencial es la pérdida de precisión en la estimación debido al proceso de extrapolación.	Un problema potencial es que dejen de considerarse algunas fuentes en la recopilación, ya que no se consiguen todos los datos locales específicos (caso de actividades informales como venta de leña).

Cuando se disponen de factores de emisión (**Tabla 1.2**) y niveles de actividad de la fuente, la emisión se estima mediante la expresión:

Emisión = Nivel de Actividad x Factor de Emisión Específico **Ecuación 1.1**

Para la mayoría de los contaminantes, la mayor fuente de emisión es el consumo de combustibles. Luego, la recopilación y análisis de datos de ventas de combustible es una parte significativa del procesamiento de la información para construir el inventario de emisiones. Un aspecto relevante es el análisis de combustibles que se almacenan, como es el caso de carbón y madera, donde las ventas no están necesariamente equiparadas temporalmente con los consumos. En el caso de los combustibles del transporte puede haber diferencias geográficas significativas entre el punto de distribución y donde se utiliza; el ejemplo típico son los puertos y aeropuertos.

En cuanto sea posible, se deberían emplear factores de emisión medidos localmente, que reflejan las condiciones locales y la práctica industrial. Sin embargo, esa información solo existe en detalle en países desarrollados, ya que en países en desarrollo el número de fuentes medidas en forma continua es limitado para producir estimadores robustos de factores de emisión. En esos casos solo queda como alternativa usar factores de emisión extranjeros, lo cual tiene las limitaciones implícitas en todo proceso de extrapolación: las condiciones de aplicación no son necesariamente las mismas que en las condiciones en que se obtuvieron los factores de emisión.

TABLA 1.2
Métodos de estimación de emisiones

Monitoreo continuo de emisiones	Estos monitores (CEMS) miden con alta frecuencia las emisiones, las registran y entregan directamente el valor buscado (por ejemplo, con frecuencia horaria). También se pueden usar para estimar emisiones en distintas condiciones de operación, o para totales diarios, semanales, etc. Ejemplo: termoeléctricas.
Muestreos discretos en la fuente	Las tasas de emisión se miden a partir de muestreos realizados en chimeneas o ductos de descarga de gases. Con esas tasas instantáneas se pueden extrapolar las tasas anuales utilizando información de la fuente (% de horas anuales en operación, etc.). Ejemplo: chimeneas de calderas de procesos industriales.
Balances de masa	La emisión se estima a partir de datos de las entradas y salidas de una sustancia en un proceso dado. Ejemplo: SO ₂ de fundiciones de cobre.

Factores de emisión	<p>Un factor de emisión es el cociente de la emisión de un contaminante a un nivel de actividad de la planta que se puede medir fácilmente, como el consumo de combustible o la cantidad de producto obtenido, de manera de aplicar la ecuación 1.1. Ejemplo: emisión de MP10 por tonelada de cemento producido.</p> <p>Los factores de emisión se determinan haciendo campañas de medición específicas dentro de una categoría de fuentes (ejemplo: plantas de celulosa), por lo que representan valores promedio típico de una categoría industrial, pero no necesariamente a una fuente específica. Se han publicado factores de emisión para muchas categorías de fuentes.⁴</p>
Análisis de combustibles	<p>El contenido de ciertos elementos en un combustible permite estimar su presencia en la corriente gaseosa de salida mediante un balance de masa. Por ejemplo, la emisión de SO₂ causada por la combustión de petróleo se puede calcular conociendo el porcentaje en masa del azufre en el petróleo, de manera que por cada kg de azufre quemado se forman 2 kg de SO₂.</p>
Modelos de estimación de emisiones	<p>Se trata de expresiones empíricas que incluyen parámetros de un proceso industrial para estimar las emisiones. Ejemplo: modelo de estimación de emisiones evaporativas de COV almacenados en estanques, que usa la presión de vapor del COV almacenado en función de la temperatura del estanque.</p>
Encuestas y cuestionarios	<p>Se emplean frecuentemente para obtener datos específicos de una industria, identificando sus fuentes emisoras y las emisiones. Ejemplo: formulario anual de muestreo isocinético de chimeneas de calderas y procesos industriales.</p>
Criterio de ingeniería	<p>Se hace una estimación experta cuando no hay información sobre factores de emisión específicos, y la hace usualmente un profesional familiarizado con el proceso en cuestión.</p>

Ejemplo 1.1

Para la ciudad de Valdivia en el 2011 se ha medido una concentración promedio anual de 45 (µg/m³) de MP_{2,5}, y se ha estimado que 60% de esta concentración ambiental se debe a MP_{2,5} directamente emitido por calefacción con leña, siendo el resto originado por vehículos o por aportes de fuera de la ciudad

⁴ Ver por ejemplo la compilación de la EPA de EE.UU.: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>

(*background*). Se asume que el 2011, el 75% de la leña se quema en calefactores convencionales y 25% en calefactores modernos.

Calcule cuáles hubieran sido las emisiones anuales de $MP_{2,5}$ en Valdivia (relativas al valor del 2011) si se hubiesen tomado las siguientes medidas (sin considerar medidas para los vehículos o para las fuentes ubicadas fuera de la ciudad):

- Sustituir todos los calefactores de leña convencionales por equipos modernos con leña seca.
- Sustituir todos los calefactores de leña convencionales por equipos a gas licuado.

Para leña (calefactores convencionales y modernos) y gas licuado se conocen los siguientes factores de emisión.

Combustible	Factor de emisión de $MP_{2,5}$	Poder calorífico del combustible
Leña, convencional	15 g /kg	4.000 kcal/kg
Leña seca, moderno	4 g/kg	6.000 kcal/kg
Gas licuado	0,15 g /kg	11.500 kcal/kg

Respuesta: se trabaja en una base de energía consumida, ya que se trata de equipos de calefacción. Sea X (kg/año) la cantidad de leña consumida el 2011. Luego la energía total utilizada en calefacción ese año fue:

$$E_{2011} = 0,75X \cdot 4.000 + 0,25X \cdot 6.000 = 4.500 X$$

Usando los factores de emisión de la tabla, la emisión de $MP_{2,5}$ por consumo residencial de leña es:

$$Q_{2011,base} = 0,75X \cdot 15 + 0,25X \cdot 4 = 12,25 \cdot X$$

- Sea Y el consumo de leña en los nuevos equipos; igualando los requerimientos de energía se obtiene que $3.000 \cdot X = 6.000 \cdot Y$ o sea $Y = X/2$. Entonces la emisión de $MP_{2,5}$ residencial es:

$$Q_{2011,a)} = Y \cdot 4 + 0,25X \cdot 4 = 3 \cdot X = 0,245 Q_{2011,base}$$

Luego las emisiones residenciales se reducen en 75%.

- b) Sea Z (kg/año) el consumo de gas licuado de calefacción en Valdivia; igualando nuevamente los requerimientos de energía: $3.000 X = 11.500 Z$ o sea $Z = 0,26X$. Ahora la emisión de $MP_{2,5}$ residencial es:

$$Q_{2011,b)} = Z \cdot 0,15 + 0,25X \cdot 4 = 1,039 \cdot X = 0,085Q_{2011,base}$$

En este caso las emisiones se reducen en 91,5% con respecto al escenario base.

1.3.3 Emisiones del transporte

El sector transporte es normalmente un sector dominante en las emisiones de una zona urbana. Una primera característica de la flota de vehículos en una ciudad es su gran variabilidad, lo que requiere de una clasificación previa para poder manejar la información relativa a factores de emisión, por lo que se suele establecer categorías tales como:

- a) tipo de vehículos (motocicleta, automóvil, camión) y subclases por tamaño del motor o peso del vehículo.
- b) combustible usado (diésel, gasolina, mezclas con biocombustibles, gas natural).
- c) tecnología de abatimiento de emisiones existente (o no) en el vehículo.

Además de esta variabilidad tecnológica, hay otros factores que influyen en las emisiones de cada vehículo:

- i) condiciones del tráfico: velocidad media, pendiente del camino, frecuencia de aceleración y frenadas.
- ii) condiciones del vehículo: edad, frecuencia de mantenimiento, eficiencia del motor,
- iii) comportamiento del conductor,
- iv) temperatura y condiciones meteorológicas,

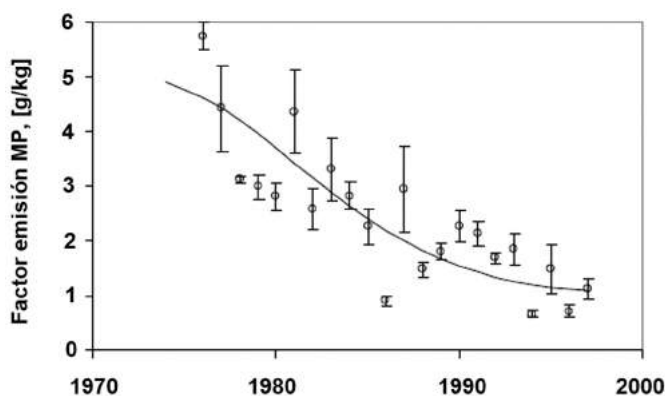
Debido a la gran cantidad de factores y a la dificultad de predecir algunos de ellos, normalmente las emisiones se estiman midiendo las emisiones de los vehículos en condiciones de conducción controlada (ensayos de dinamómetro), ejecutando “ciclos de conducción” que representan condiciones promedio de manejo en ruta, de manera de construir factores de emisión para las categorías

a)-c) descritas anteriormente en diferentes modos de conducción que incorporan en promedio los factores i) a iv) antes resumidos. La **Figura 1.16** muestra la evolución en el tiempo de factores de emisión de material particulado (g/km), medidos en vehículos pesados diésel en EE.UU. usando ensayos en dinamómetro. Para un ejemplo más reciente de la variabilidad de este tipo de factores de emisión, así como detalles de desarrollo de factores de emisión, consultar Franco y otros (2013).

Las compilaciones de factores de emisión más utilizadas en los países desarrollados corresponden a los sistemas Mobile en EE.UU.⁵ y Copert en Europa (Kouridis y otros, 2000; Ntziachristos & Samaras, 2000); el primero comienza los cálculos usando la cantidad de kilómetros recorridos por cada vehículo en un año y el segundo parte por la cantidad de combustible utilizado.

FIGURA 1.16

Evolución de los factores de emisión de MP en vehículos pesados en EE.UU., expresados en [g/kg]. Fuente: Yanowitz y otros, 2000



Ahora bien, para estimar las emisiones del transporte en una ciudad dada, idealmente necesitaríamos datos de las distancias recorridas por todas las categorías de vehículos en toda la red vial de la ciudad. Esta información tan detallada raramente está disponible. Para simplificar el problema, se considera que las emisiones del transporte se puede ordenar en las siguientes tres categorías:

⁵ Disponible en: <http://www.epa.gov/otaq/m6.htm>

- 1) Emisiones de la red vial donde hay mediciones y/o modelaciones del tráfico. En muchas ciudades las autoridades mantienen modelos de transporte para fines de planificación; estos modelos son calibrados con observaciones de flujos y por ello representan el comportamiento del tráfico en los caminos principales dentro de la ciudad. Constituyen un buen punto de partida para estimar las emisiones totales.
- 2) Emisiones de caminos secundarios, donde no hay un modelo de tráfico representando los flujos. Esta información se debe repartir por la zona urbana, ya sea en base a conteos de flujo específicos u otros criterios de ingeniería. Debido a esto normalmente se les trata como fuentes de área y no de línea como el caso anterior.
- 3) Emisiones asociadas con el origen y destino de los viajes. Las fuentes móviles de las dos categorías anteriores suponen condiciones normales de conducción. Hay dos casos en los cuales esos supuestos no se cumplen: a) emisiones de las partidas con el motor frío, al comienzo de un viaje; b) la emisión cuando se finaliza un viaje (o se hace una detención intermedia) y el motor se mantiene caliente por un cierto lapso después de su detención.

En el caso a), al motor le toma un cierto tiempo alcanzar la temperatura normal de operación, por lo que las emisiones son mayores que cuando el motor está temperado; esto es válido para vehículos a gasolina con o sin convertidor catalítico, ya que este no es efectivo hasta que el motor y el catalizador alcanzan su temperatura normal de operación. Por lo tanto, esto ocurre también cuando los vehículos recorren cortos tramos en condiciones de baja temperatura ambiental. Para estimar las emisiones asociadas a partidas en frío, se necesita información desagregada describiendo la distribución de viajes en el área estudiada; esta información se conoce normalmente a través de las matrices origen-destino.

En el caso b), se produce una emisión evaporativa de los hidrocarburos presentes en el sistema de distribución de combustible y en el motor mismo. Estas pérdidas ocurren en forma continua, tanto cuando el vehículo está en uso como cuando se estaciona; las primeras están consideradas en los factores de emisión de compuestos orgánicos volátiles y no necesitan añadirse. Las pérdidas evaporativas en detenciones se presentan porque el calor disipado por el motor promueve la evaporación de los compuestos orgánicos desde el sistema de inyección, los ductos y el filtro de aire; estas emisiones están asociadas también con términos de viajes, por lo que se distribuyen con la misma metodología que en el caso de las partidas en frío, solo que es el otro extremo del viaje el que se distribuye sobre la zona de estudio.

Estos dos resultados se combinan con las emisiones de la red vial modelada y no modelada para llegar a las emisiones totales de todos los vehículos en ruta causadas por el consumo de combustible.

Además de estas emisiones, hay otras emisiones asociadas a las fuentes móviles que no pueden calcularse como emisiones de segmentos lineales de la red vial, y que corresponden a:

- i) polvo suspendido de la superficie del camino por el paso del vehículo, más desgaste de frenos y neumáticos. Se suele estimar como fuente de área debido a que no es factible estimarlo individualmente para cada arco de la red vial.
- ii) Emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al proceso de carga de combustible del vehículo, tanto en forma individual en la estación de combustible como en forma grupal por el sistema de distribución de los combustibles líquidos. Estas fuentes se suelen agregar como fuentes de área.
- iii) Los modelos de transporte no consideran los vehículos fuera de ruta. Estos pueden ser tractores, maquinaria agrícola y otros vehículos que no usan la red vial como cargadores frontales, maquinaria de construcción, equipo de apoyo en puertos y aeropuertos, etcétera. Sus emisiones se estiman normalmente como fuentes de área en base a su consumo de combustible.

1.3.4 Emisiones de fuentes estacionarias de área

En esta categoría tenemos fuentes tales como calefacción residencial, construcción, actividad agrícola, fuentes naturales, entre otras, que solo se pueden definir sobre un área geográfica, ya que no hay suficiente información para desagregar las emisiones con mayor resolución espacial.

1.3.4.1 Emisiones por consumo de combustibles

Las emisiones provenientes de la calefacción residencial (incluyendo sector comercio) se tratan como fuentes de área, y la información sobre el consumo de combustibles se puede recopilar de alguno de los siguientes métodos:

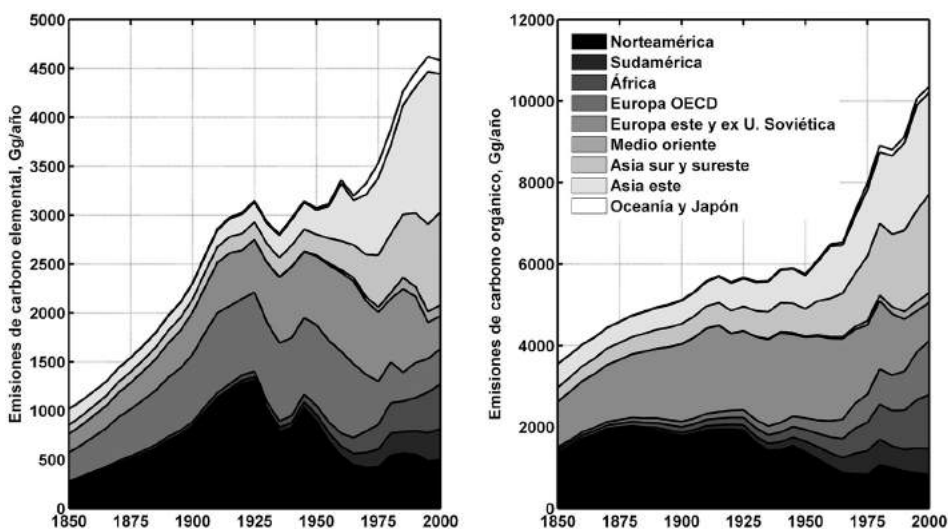
- 1) Un enfoque desde arriba donde los consumos de combustible a escala nacional o regional se usan para repartir los datos sobre un área en base a la cantidad de viviendas, datos de empleo u otras estadísticas económicas.
- 2) Un enfoque desde abajo basado en el número de viviendas y el número de actividades comerciales e industriales en la zona. Para esto se requiere conocer los consumos de combustibles desagregados en esas tres categorías.

- 3) Información sobre las ventas de los distintos tipos de combustible en una zona dada. Es información de buena calidad, aunque es probable que los distribuidores no estén dispuestos a hacerla pública.

Como ejemplo de este tipo de estimaciones, la siguiente figura muestra las emisiones globales de carbono elemental y orgánico por tipo de combustible y por región entre 1850 y 2000; para mayores detalles de cómo se generaron esas estimaciones, incluyendo especificación de factores de emisión y evolución de cambios tecnológicos, consultar el artículo de Bond y otros (2007).

FIGURA 1.17

Estimación de las emisiones globales históricas de carbono orgánico y elemental provenientes de procesos de combustión, 1850-2000. Fuente: Bond y otros, 2007



1.3.4.2 Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)

Estos compuestos tienen relevancia ambiental porque muchos de ellos son precursores del ozono (Capítulo 6) o bien poseen toxicidad para las personas (Capítulo 2). Existe una gran cantidad de actividades y sustancias de uso diario que producen emisiones de compuestos orgánicos volátiles, para las cuales es muy difícil recopilar información detallada sobre su ubicación espacial precisa. Como ejemplos tenemos la distribución de gasolina, el empleo de pinturas y adhesivos, lavasecos, cosméticos, pinturas, productos para automóviles. La utilización nacional de esas sustancias puede estar disponible en estadísticas agregadas, y las emisiones

de algunas de ellas están aproximadamente asociadas a la distribución espacial de la población. Luego, algunas emisiones se reparten de acuerdo a la población: productos de consumo doméstico, lavasecos, pintado arquitectónico, preparación de alimentos. Otras emisiones se distribuyen de acuerdo a estadísticas de empleo: emisión de imprentas, fotocopiado, amasanderías, empaçado de productos, etcétera.

1.3.4.3 Polvo fugitivo de actividades de construcción

La construcción es una fuente de altas emisiones de material particulado en zonas urbanas. Esto incluye construcción, demolición, remodelación y mantención rutinaria de edificios y casas. También se incluye aquí las obras

FIGURA 1.18

Ejemplo de emisiones fugitivas asociadas al manejo de sólidos. Panel superior: inicio de operación del equipo. Panel inferior: plena operación del equipo, sin control de emisiones



públicas como mantenimiento de caminos y carreteras. Estas fuentes se cambian de ubicación con cada proyecto, por lo que se distribuyen de acuerdo a la población residencial, cantidad de permisos de construcción emitidos por los municipios, o bien como un valor agregado en toda la ciudad. La **Figura 1.18** muestra un ejemplo de una emisión fugitiva asociada al movimiento de materiales sólidos.

1.3.4.4 *Polvo fugitivo suspendido por vehículos*

El polvo presente en los caminos (con o sin pavimento) se suspende por acción de la turbulencia generada en el aire por el paso de los vehículos. Estas emisiones dependen de la cantidad de material particulado fino (*silt*) presente en el camino, que corresponde a todas las partículas de diámetro físico menor a 75 μm . Sin embargo, la estimación de estas emisiones posee mucha incertidumbre. En particular, en el caso del modelo de emisiones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de EE.UU., las emisiones desde caminos pavimentados tienden a ser valores sobrestimados, mientras que las emisiones desde caminos no pavimentados suelen estar más cerca del valor correcto. Una parte de esta incertidumbre se debe a la naturaleza dinámica del contenido de finos sobre los caminos y a su amplia heterogeneidad espacial en cada zona urbana. La siguiente figura muestra un ejemplo de una emisión no controlada de polvo suspendido de un camino en una actividad minera.

FIGURA 1.19

Ejemplo de una emisión típica de polvo suspendido por el paso de camiones sobre un camino no pavimentado en una zona árida



1.3.4.5 Emisiones de la agricultura y de origen natural

Las emisiones originadas en las actividades agrícolas y por procesos naturales (denominadas biogénicas) pueden hacer una contribución significativa al total de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx). Se ha estimado que las emisiones biogénicas globales de isopreno están entre 500 y 750 Tg (Guenther y otros, 2006), por lo que es el compuesto orgánico volátil más emitido en el mundo después del metano, y proviene esencialmente de la vegetación (árboles) e incendios forestales. Por otra parte, las emisiones de amoníaco provienen actualmente en su gran mayoría de la aplicación de fertilizantes en la agricultura y de la crianza de animales (Lieven y otros, 2009). Del mismo modo, la aplicación de fertilizantes produce emisiones de NOx. Este tipo de emisiones se debe agregar a las fuentes urbanas e industriales para poder compilar un inventario de emisiones completo, ya que los COV biogénicos y el amoníaco contribuyen a la formación de partículas en la atmósfera (Capítulo 3) y los COV y NOx son precursores del ozono troposférico (Capítulo 6).

1.3.5 Emisiones de fuentes estacionarias puntuales

La mayoría de las emisiones atmosféricas provenientes de procesos industriales y de combustión no están distribuidas sobre un área dada, sino que están concentradas en puntos espaciales fijos, usualmente en la forma de descargas por chimeneas. Las fuentes más grandes de esta categoría (termoeléctricas, cementeras, siderúrgicas, etcétera) probablemente poseen medidores continuos de emisión (CEMS), por lo cual mantienen registros detallados de sus emisiones, lo que facilita estimar las cantidades anuales de contaminantes emitidos. También normalmente se trata de las actividades que requieren autorización especial de operación por parte de las agencias regulatorias, por lo que sus reportes son enviados al ente fiscalizador en forma periódica. En el caso de Chile, todas las grandes fuentes industriales están obligadas a reportar sus emisiones a través del llenado de un formulario ad hoc⁶.

1.3.6 ¿Cómo se evalúan los inventarios de emisiones?

De las secciones anteriores se desprende que las estimaciones de emisiones son cantidades inciertas, por lo cual surge la pregunta de cómo evaluar si es

⁶ Para más detalles: <http://www.declaracionemision.cl/>

que un inventario dado posee o no sesgos, y cuál es su incertidumbre (error) en las estimaciones.

Como las emisiones no se miden en su totalidad, especialmente aquellas de fuentes pequeñas o de vehículos, es claro que no es posible comparar un inventario estimado con mediciones en fuentes. Para poder hacer una evaluación, es necesario entonces emplear la información del monitoreo ambiental, relacionando las emisiones con la calidad del aire en una zona dada. Para ello es necesario vincular de manera cuantitativa emisiones con concentraciones, lo cual se hace por medio de un modelo de dispersión (capítulos 3 y 5).

Un método sencillo consiste en graficar la variación en el tiempo de las emisiones de contaminantes atmosféricos junto con la calidad del aire, para detectar consistencias (o inconsistencias) en los distintos contaminantes. Esta es una técnica simple, pero solamente es capaz de comparar tendencias, no valores absolutos de emisiones.

Ejemplo 1.2

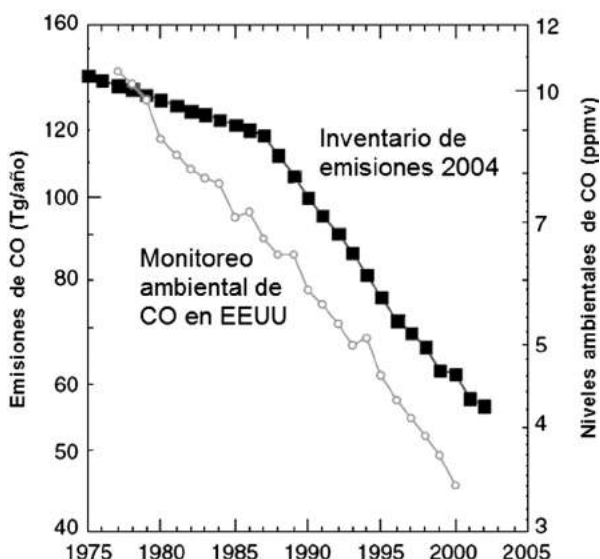
La **Figura 1.20** (Parrish, 2006) compara las emisiones de monóxido de carbono (CO) en Estados Unidos entre 1975 y 2003 (reportadas el 2004) con los datos del monitoreo de CO⁷ en aproximadamente trescientas zonas urbanas. Las tendencias temporales de emisiones estimadas y de monitoreo de CO concuerdan después de 1987. Los datos ambientales siguen un decaimiento exponencial, con una tasa de descenso de 4,6% anual en el período 1977-2000, lo cual corresponde a una disminución de 3 veces en 23 años. Las emisiones estimadas decrecen entre 1987 y 2002 a una tasa de 4,9% anual. Esto indica que los factores de emisión Mobile 6 de EE.UU. capturan adecuadamente la disminución de emisiones de CO. Sin embargo, hay diferencias para el período 1975-1986 debido a que los factores de emisión fueron generados en la versión Mobile 5 de la base de datos, la que no es capaz de explicar la tendencia temporal, pues las estimaciones indican una disminución anual de emisiones a una tasa de 2,5% anual, casi la mitad de la tendencia en los datos monitoreados en el mismo lapso.

Otra comparación que se puede hacer es con respecto al cociente CO/NO_x asociado a las emisiones del transporte. La **Figura 1.21** (Parrish, 2006) muestra el período 1985-2003, pero graficando el cociente CO/NO_x en

⁷ En términos precisos, se trata de la segunda máxima anual del promedio móvil de 8 horas de CO.

FIGURA 1.20

Comparación de inventarios de emisión de CO (cuadrados) y monitoreo ambiental de CO (círculos) en EE.UU., período 1975-2003. Fuente: D. Parrish (2006)



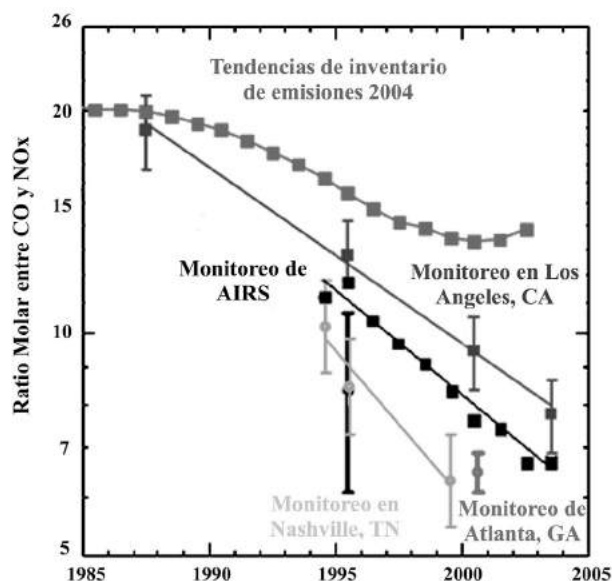
emisiones y en calidad del aire; este último corresponde a la pendiente en un gráfico de concentraciones de CO y NOx. Se han graficado mediciones para diversas zonas urbanas en EE.UU., así como la base de datos AIRS que incluye aproximadamente cien sitios urbanos (línea con símbolos cuadrados).

Se aprecia en la **Figura 1.21** que hay similitudes entre los datos ambientales; los datos de inventarios poseen cocientes significativamente mayores que los medidos, especialmente en los últimos años. Luego, para que haya consistencia entre ambos tipos de datos se debe cumplir que: a) las emisiones de CO están altas; b) las emisiones de NOx están bajas; o c) una combinación de a) y b). Además, los cocientes ambientales decrecen más rápidamente que lo que los inventarios predicen.

Considerando que la **Figura 1.20** indica que la tendencia de las emisiones recientes del CO está bien, esto permite concluir que las emisiones de NOx en EE.UU. están subestimadas, especialmente en los últimos años. En otras palabras, solamente emisiones crecientes de NOx en los últimos años permitirían llegar a una mejor concordancia entre monitoreo e inventarios.

FIGURA 1.21

Comparación del cociente CO/NO_x en inventarios y en monitoreo ambiental en EE.UU.. Fuente: D. Parrish (2006)



1.4 Resumen

- El problema de la contaminación atmosférica y su impacto en la sociedad se puede resumir en la **Figura 1.1**. Si bien la imagen es simple, la labor de evaluar los distintos componentes del problema en términos cuantitativos es laboriosa y a menudo se recurre a utilizar resultados obtenidos en estudios de otros países para completar el análisis secuencial. En cualquier caso, las estimaciones poseen bastante incertidumbre, con amplios intervalos de confianza para la valoración social del daño actual de la contaminación atmosférica.
- Tanto las concentraciones ambientales como las estimaciones de las emisiones atmosféricas nos entregan un diagnóstico de la situación de calidad del aire en una zona dada.
- Las concentraciones miden la magnitud del problema y las emisiones permiten estimar los aportes de las mayores fuentes que contribuyen al problema.

- d) La construcción de inventarios de emisiones atmosféricas es una tarea laboriosa y que consume muchos recursos.
- e) Las estimaciones de las emisiones se pueden verificar comparando con las concentraciones ambientales, tanto en la dimensión espacial como temporal.
- f) El proceso de generación de inventarios es iterativo, con un inventario que se puede mejorar en la medida en que se dispone de más datos del monitoreo ambiental⁸.

1.5 Referencias

- 1) Ayres, J., R. Maynard y R. Richards (eds). *Air Pollution and Health*. Londres: Imperial College Press, 2006.
- 2) Bond, T. C., E. Bhardwaj, R. Dong, R. Jogani, S. Jung, C. Roden, D. G. Streets y N. M. Trautmann. (2007). Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000, *Global Biogeochem. Cycles*, 21, GB2018.
- 3) Bond, T. C. y otros. "Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment", *J. Geophys. Res. Atmos.* (2013), 118, 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171.
- 4) CENMA: Informe final: "Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en las Regiones V, VI y IX de Chile", Capítulo V: Novena Región, Santiago, 2001.
- 5) Conama RM, "Evolución de la calidad del aire en Santiago 1997 / 2004", disponible en la dirección: <http://www.sinia.cl/1292/article-39731.html>.
- 6) Elsom, D. *Smog Alert. Managing Urban Air Quality*. Londres: Earthscan, 1996.
- 7) Franco, V., Kousoulidou, M., Muntean, M. Ntziachristos, L., Hausberger, S. y Dilara, P., "Road vehicle emission factors development: A review, *Atmospheric Environment*, 70 (2013), 84-97.
- 8) Gallardo, L., J. Escribano, L. Dawidowski, N. Rojas, M.F. Andrade y M. Osses. "Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo". *Atmospheric Environment* 47 (2012), 12-19.

⁸ Por ejemplo, mediante la aplicación de modelos de receptor (Capítulo 3) o de modelos de dispersión (Capítulo 5).

- 9) Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. Palmery, C. Geron. "Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)". *Atmos Chem Phys* 6 (2006), 3181-3210, doi: 10.5194/acp-6-3181-2006.
- 10) Huneus, N., F. Chevallier y O. Boucher. "Estimating aerosol emissions by assimilating observed aerosol optical depth in a global aerosol model". *Atmos Chem Phys*, 12 (2012), 4585-4606: www.atmos-chem-phys.net.
- 11) Jorquera, H., W. Palma y J. Tapia. "An Intervention Analysis of Air Quality Data at Santiago, Chile". *Atmospheric Environment*, 34 (2000), 4073-4084.
- 12) Junker, C. y C. Lioussé. "A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860-1997". *Atmos Chem Phys* 8 (2008), 1195-1207: www.atmos-chem-phys.net/8/1195/2008/
- 13) Parrish, D.P. "Critical evaluation of US on-road vehicle emission inventories". *Atmospheric Environment* 40 (2006), 2288-2300.
- 14) Pope, C.A. y D.W. Dockery. "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect". *Journal of the Air & Waste Management Association* 56 (2006), 709-742.
- 15) Seinfeld, J.H. y S.N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Nueva York: Wiley, 1998.
- 16) Vedal, S. "Ambient Particles and Health: Lines that Divide". *J Air & Waste Manage. Assoc* 47 (1997), 551-581.
- 17) Wilson, R. y J. Spengler. *Particles in our air*. Boston: Harvard University Press, 1996.
- 18) Yanowitz, J., R. L. McCormick y M. S. Graboski. In-use emissions from heavy-duty diesel vehicles, *Environ. Sci. Technol.*, 34(2000), 729-740.
- 19) Zannetti, P. *Air Pollution Modelling – Theories, Computational Methods and Available Software*. Nueva York: Computational Mechanics Publications, 1990.

1.6 Problemas propuestos

- 1) Lea los siguientes documentos e identifique las componentes de la cadena de riesgo (**Figura 1.1**) que aparecen en ellos, indicando en qué casos se tomaron elementos del análisis desde otros estudios y cuáles fueron los aportes originales de cada estudio:
 - a) Artículo de Jonathan I. Levy, Lisa K. Baxter y Joel Schwartz: "Uncertainty and Variability in Health-Related Damages from Coal-Fired Power Plants in the United States". *Risk Analysis* 29, No 7 (2007), 1000-1014.

- b) El anteproyecto de norma de emisión de centrales termoeléctricas en Chile, disponible en la página web: http://www.sinia.cl/1292/articulos-44963_informe_final_term.pdf
- c) Artículo de X.R. Guo, S.Y. Cheng, D.S. Chen, Y. Zhou y H.Y. Wang: “Estimation of economic costs of particulate air pollution from road transport in China”. *Atmospheric Environment*, 44 (2010), 3369-3377.
- 2) Usando datos de la página web del SINCA: <http://sinca.mma.gob.cl>, verifique los gráficos de tendencias de calidad del aire mostrados en este capítulo para Santiago. Siga el método desarrollado por Parrish (2006) para analizar tendencias del CO y del cociente CO/NO_x, ambos dominados por las emisiones del sector transporte en Santiago. Use la estación de Pudahuel como referencia, y compare con los inventarios 1997, 2000, 2005 y 2010 para Santiago. ¿Qué concluye Ud. de este análisis? Lea el artículo de Gallardo y otros (2012) para más detalles.
- 3) A partir de la información en SINCA, grafique las concentraciones anuales de MP₁₀ y MP_{2.5} para las distintas ciudades del país. ¿Hay ciudades que muestren excedencias de las normas ambientales? ¿Cómo es la tendencia temporal de esas emisiones?
- 4) Evalúe el cumplimiento de las siguientes normas de calidad del aire: NO₂ (1 h), CO (8h), O₃ (8h), MP₁₀ (24 h), MP_{2.5} (24h) para Santiago, usando los datos más recientes disponibles en SINCA.
- 5) Para estimar la variación de las emisiones en el tiempo cuando se implementan cambios tecnológicos, en la mayoría de los casos se puede asumir un proceso difusivo en donde el factor de emisión $X(t)$ está dada por la expresión (Bond y otros, 2007):

$$X(t) = (X_0 - X_f) \exp \left[-\frac{(t - t_0)^2}{2s^2} \right] + X_f$$

Donde X_0 y X_f corresponden a los valores iniciales y finales del factor de emisión promedio de la actividad estudiada; t_0 es el momento en que se inicia el cambio tecnológico; y s es la escala temporal en la cual se produce el cambio. ¿Qué limitaciones tiene la ecuación anterior? Utilice la ecuación anterior para ajustar los datos de la **Figura 1.10** y encuentre los parámetros X_0 , X_f y s . Asuma que $t_0 = 1972$.

- 6) Aplique la ecuación anterior para estimar los parámetros del cambio de gasolina con plomo a sin plomo en la Región Metropolitana de Santiago⁹. En este caso, $X(t)$ representa la fracción de la gasolina consumida que no contiene plomo. ¿Se ajusta el modelo gaussiano a la realidad de Santiago? ¿Se puede repetir este análisis para el caso de la introducción de gas natural desde Argentina para consumo industrial y residencial en la Región Metropolitana?
- 7) La **Tabla 1.3** reporta resultados de las emisiones de vehículos en la Región Metropolitana para el año 2000.

TABLA 1.3
Fuentes móviles en ruta inventario 2000 PPDA

		MP ₁₀	CO	NOx	COV	SO ₂	veh-km
Categoría	Subcategoría	t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	miles/año
Buses	Pre-EPA91	521,2	2.454	7.205	811	431,1	395.031.000
	EPA91	191,5	1.054	4.334	523	370,4	339.434.000
	EPA94	85,2	599	2.197	346	262,9	240.920.000
	Interurbanos	235,1	1.101	3.549	323	219,9	238.956.000
	Pullman	174,9	812	3.143	475	222,3	200.095.407
Camiones	2 ejes	479,8	2.163	4.506	1.735	546,9	1.098.333.682
	Más de 2 ejes	329,8	1.170	4.703	653	348,3	448.219.860
Particulares	Catalíticos	100,3	19.371	5.397	2.590	237,3	7.644.743.252
	No catalíticos	33,8	88.183	4.439	8.925	86,4	2.193.769.880
Taxis	Catalíticos	29,4	6.959	1.747	976	70,5	2.239.197.000
	No catalíticos	3,3	10.638	481	1.114	8,8	248.674.000
Comerciales	Catalíticos	42,2	8.510	1.634	1.035	133,5	3.253.576.616
	No catalíticos	15,5	28.219	2.156	4.282	48,6	1.122.572.810
	Diésel	181,9	708	672	162	140,2	572.925.950
Motocicletas	2 tiempos	0,2	411	1	187	0,3	17.901.000
	4 tiempos	1,1	1.844	16	319	2,3	100.186.000
Totales	Móviles	2.425	174.196	46.180	24.456	3.130	20.354.536.457

⁹ Las estadísticas de consumos de combustibles en Chile por región están disponibles en www.sec.cl

- a) Estime factores de emisión promedio para distintas categorías de vehículos, expresadas en masa de contaminante por kilómetro recorrido. Ordene las categorías de mayor a menor en esta escala, para los distintos contaminantes que se han estimado en el inventario.
- b) La meta del Transantiago fue reducir las emisiones de los buses licitados a 6.580 toneladas de NO_x y 126 t de MP₁₀ al año, respectivamente. Si los veh-km recorridos por los buses licitados en esas condiciones corresponden a 550.000.000 (veh-km/año), ¿cuáles serían los máximos valores de factores de emisión (promedio de la flota) que permitirían cumplir con esas metas? Con respecto a la flota del año 2000, cuánto habría que reducir el factor de emisión promedio de NO_x y de MP₁₀ para cumplir con la meta de Transantiago? Nótese que los buses interurbanos y los regionales no están sometidos a reducciones de emisiones, ya que no se trata de “buses licitados”.
- c) Si las tecnologías de buses Euro 1 a Euro 4 para distintos combustibles tienen los factores de emisión que se indican en la **Tabla 1.4**, plantee un problema de optimización lineal que minimice el costo de armar una flota para presentarse a licitación al Transantiago, sujeto a que cumpla con las exigencias ambientales de reducción de emisiones del Transantiago. Asuma conocidos los costos de los buses, y que el total de veh-km recorridos es el mismo que en b).

TABLA 1.4
Factores de emisión de buses para MP₁₀ y NO_x

Categoría	MP ₁₀ (g/km)	NO _x (g/km)
Buses diésel Euro 1	0,494	11.530
Buses diésel Euro 2	0,304	8.236
Buses diésel Euro 3	0,217	5.765
Buses diésel Euro 1 con filtro de partículas	0,148	11.530
Buses diésel Euro 2 con filtro de partículas	0,091	8.236
Buses diésel Euro 3 con filtro de partículas	0,065	5.765
Buses diésel Euro 4	0,042	4.035
Buses GNC Euro 2	0,055	3.788
Buses GNC Euro 3	0,039	2.652
Buses híbridos Euro 3	0,018	3.169
Buses eléctricos	0,000	0,000

- 8) Lea el artículo de E. Gramsch, G. Le Nir, M. Araya, M.A. Rubio, F. Moreno y P. Oyola: “Influence of large changes in public transportation (Transantiago) on the black carbon pollution near streets”. *Atmospheric Environment* 65 (2013), 153-163. Analice las conclusiones del estudio y la metodología de comparación para los escenarios “sin proyecto” y “con proyecto” Considere que el año base (2005) fue más lluvioso que el año “con proyecto”.
- 9) Haciendo supuestos promedio sobre el rendimiento (km/litro) de los distintos tipos de vehículos, estimar los consumos por tipo de combustible para el año 2000 a partir de los vehículos-km del inventario presentados en la Tabla 1.4 y comparar con las cifras de ventas reportadas por la SEC (www.sec.cl). ¿Son similares ambos tipos de cifras? Repita el cálculo, pero ahora para el 2005.
- 10) En los inventarios para Santiago (y en toda zona urbana con suficientes vehículos) se estima que el polvo resuspendido de calles es un aporte significativo a las emisiones de MP_{10} , más estrictamente a la “fracción gruesa”, que corresponde a las partículas con tamaños entre 2,5 y 10 μm . Estime la tendencia del material particulado grueso en Santiago en los últimos años, e indique cómo debería reflejarse eso en los inventarios de emisiones. ¿Qué pasa si se grafica el promedio anual del MP grueso en función de los consumos anuales de combustible del transporte (indicador de los kilómetros recorridos)? Comente sus resultados.
- 11) La siguiente tabla muestra estadísticas de las Naciones Unidas de consumos de biocombustibles para el período 1970-1996, y estadísticas de la población mundial entre 1860 y 1980. Utilice el consumo de biocombustibles per cápita en 1970 para extrapolar los consumos de biocombustibles hacia el pasado hasta 1860. Grafique sus resultados y compare con la **Figura 2** del artículo de Junker y Liousse, 2008.

TABLA 1.5
Consumo de biocombustibles (Mt), 1970-1996

1970	1972	1974	1976	1978	1980	1982	1984	1986	1988	1990	1992	1994	1996
1.232	1.290	1.382	1.448	1.526	1.647	1.711	1.816	1.873	2.042	2.051	2.155	2.209	2.251

TABLA 1.6
Población mundial 1860-1980 (10⁹ habitantes)

1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980
1,25	1,32	1,42	1,51	1,59	1,75	1,82	2,06	2,26	2,52	2,99	3,68	4,44

- 12) La siguiente tabla muestra las estimaciones de emisiones de carbono elemental provenientes del consumo de biocombustibles (Junker y Liousse, 2008). Combine estos resultados con los del problema anterior para estimar el factor de emisión promedio global en [g/kg]. ¿Se aprecia cambios en dicho factor de emisión en el tiempo?

TABLA 1.7
Emisiones de carbono elemental (Mt) por uso de biocombustibles, 1860-2000

1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990
0,405	0,412	0,422	0,461	0,472	0,511	0,510	0,606	0,596	0,639	0,797	0,929	1,140	1,206

- 13) La siguiente tabla muestra las emisiones de carbono elemental (CE) a nivel regional estimadas por Bond y otros (2013), para distintas regiones en el año 2000, las que totalizan 7.600 Gg. Las observaciones satelitales del efecto de absorción del carbono elemental y las mediciones en lugares remotos entregan el cociente del CE observado y el modelado globalmente con las emisiones listadas en la segunda columna, los que se indican en la tercera columna de la tabla. Si las diferencias medidas en ella se atribuyen exclusivamente a las emisiones, ¿cuál sería una estimación más precisa de la emisión global de carbono elemental el año 2000 en Gg? Compare con la estimación global de CE para el año 2002 hecha por Huneus y otros (2012), que es de 15.000 Gg.

TABLA 1.8
Comparación de concentraciones modeladas y observadas

Región	Emisión año 2000, Gg	CE observado/ CE modelado*
Norteamérica	380	1,96
Sudamérica	1.150	2,49
África	1.690	3,29
Europa	470	1,59
EECCA**	400	1,68
Medio Oriente	80	2,63
Sur de Asia	710	6,20
Asia Suroriental	850	4,75
Asia oriental	1.550	2,84
Pacífico	320	3,57

* Modelo de dispersión global aplicado con las emisiones estimadas para el año 2000. Europa Oriental, Cáucaso y Asia Central.

** Europa Oriental, Cáucaso y Asia Central.

