

2019-06

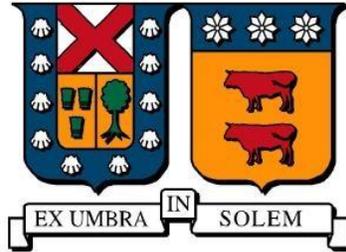
DESAGREGACIÓN QUÍMICA, ESPACIAL Y TEMPORAL DE EMISIONES VEHICULARES PRECURSORAS DE OZONO TROPOSFÉRICO

MARIQUEO SALAZAR, GONZALO YERKO

<https://hdl.handle.net/11673/49281>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO - CHILE



DESAGREGACIÓN QUÍMICA, ESPACIAL Y
TEMPORAL DE EMISIONES VEHICULARES
PRECURSORAS DE OZONO TROPOSFÉRICO.

GONZALO YERKO MARIQUEO SALAZAR

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO OSSES ALVARADO.

PROFESOR CORREFERENTE: DRA. MARÍA PAZ DOMÍNGUEZ.

Junio - 2019

Agradecimientos

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

A Dios, mi fortaleza y mi esperanza cada día.

A mi familia, especialmente a mis abuelos Lucía y Manuel.

A mis amigos y compañeros que han sido parte de este proceso.

Al programa USM de incentivo a la iniciación científica Multidisciplinario PIIC 2018 “Diseño y validación de un modelo predictivo de ozono troposférico basado en la distribución espacial y temporal de emisiones de contaminantes” por el apoyo otorgado.

Al FONDAP 15110009 “Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2” por su interés en este trabajo.

Dedicatoria

Dedicatoria especial para mi padre Gonzalo Mariqueo, el ángel que me cuida desde el cielo.

Resumen

La formación de Ozono a partir de COV y NO_x es un tema que requiere mucha atención en nuestro país, ya que el ozono troposférico presenta un gran riesgo para el medio ambiente, la salud de las personas, animales y vegetales, pero al ser un tema poco conocido es que en Chile no se ha desarrollado ningún modelo predictivo oficial para el ozono.

Por lo tanto, este trabajo se realiza en el marco del proyecto interno multidisciplinario realizado por la USM titulado: “Desarrollo e implementación de un modelo fotoquímico predictivo de formación de ozono troposférico en Santiago de Chile mediante modelación inversa”. El objetivo general de este trabajo es determinar la desagregación química, espacial y temporal de emisiones vehiculares precursoras de ozono troposférico.

Para lograr este objetivo se recurrió a la base de datos de COPERT para obtener información sobre la especiación de COVs y NO_x según distintas categorías vehiculares y tecnologías; se obtuvieron los perfiles vehiculares para distintos sectores de Santiago, así como la distribución de los vehículos por cada sector de estudio; se definieron las rutas, y finalmente, mediante el software QGIS se modeló la información para obtener la distribución tanto temporal como espacial.

Con respecto a la especiación de los COVs se puede concluir que las categorías vehiculares que más contribuyen con emisiones son los vehículos a gasolina de 4 tiempos, siendo los convencionales los que más aportan (1467,20 [ton/año]) y los vehículos con norma Euro-I en adelante con 1168,82 [t/año]). Con respecto a la especiación de NO_x se observa que los principales emisores de NO_x son los vehículos pesados los cuales generan 15023,88 [ton/año] de las 31516,71 [ton/año] totales.

A partir de los resultados de la distribución espacial de los precursores del ozono, se puede apreciar que la mayor congestión de contaminantes se encuentra principalmente en el sector nororiente de Santiago, en la zona central y en las principales autopistas, lo cual es acertado, ya que se trata de zonas comerciales, que cuenta con una gran cantidad de calles principales y vías exclusivas de buses.

A partir de los resultados de la distribución temporal de emisiones, se observa que hay dos momentos donde la contaminación alcanza un peak. El primer peak ocurre entre las 6 y 7 A.M. Mientras que el segundo ocurre posterior a las 18:00 horas.

Abstract

The formation of Ozone from VOCs and NO_x is a topic that requires a lot of attention in our country, that tropospheric ozone presents a great risk to the environment, the health of people, animals and plants, even with that in mind no official predictive model for ozone has been developed.

Therefore, this work is carried out within the framework of the multidisciplinary internal project carried out by the USM entitled: "Development and implementation of a predictive photochemical model of tropospheric ozone formation in Santiago, Chile through inverse modeling". The general objective of this work is to determine the chemical, spatial and temporal disaggregation of vehicle emissions precursors of tropospheric ozone.

To achieve this objective, the COPERT database is used to obtain information on the specification of VOCs and NO_x according to the different categories of vehicles and technologies; The profiles of vehicles for different sectors of Santiago were obtained, as well as the distribution of the vehicles for each sector of study; The routes were defined, and finally, using the QGIS software, the information was modeled to obtain both temporal and spatial distribution.

With respect to the specification of the VOCs, it is observed that the main emitters are the conventional 4-stroke gasoline vehicles, being those that contribute the most (1467.20 [ton/year]) and vehicles with Euro-I standard and 1168.82 [ton/year]). With respect to the NO_x specification, it is observed that the main NO_x emitters are heavy vehicles, which generate 15023.88 [t / year] of the total of 31516.71 [ton/year].

Based on the results of the spatial distribution of ozone precursors, it is possible to appreciate the greater congestion of pollutants found mainly in the northeastern sector of Santiago, in the central zone and in the main highways, which is correct, since that these are commercial areas, which has a large number of main streets and exclusive bus routes.

From the results of the temporary distribution of the emissions, it is observed that there are two moments where the contamination reaches a peak. The first peak occurs between 6 and 7 a.m. While the second occurs after 18:00 hours.

Glosario

CH₄: Metano

COV: Compuestos orgánicos Volátiles

DI: Direct Injection (inyección directa)

EOD: Encuesta Origen-Destino

GEI: Gases de efecto invernadero

HDV: Heavy Duty Vehicle (vehículo pesado)

IDI: Indirect Injection (inyección indirecta)

LCV: Light Commercial Vehicle (vehículo comercial ligero)

NMVOC: Compuestos orgánicos volátiles no metánicos

NO_x: Óxidos de Nitrógeno

NO: Monóxido de Carbono

NO₂: Dióxido de Carbono

OH: Hidroxilo

PC: Passenger Cars (vehículo de pasajeros)

ton: Toneladas

QGIS: Sistema de información geográfica

Índice de contenidos

| | |
|--|-----|
| Agradecimientos..... | II |
| Dedicatoria..... | III |
| Resumen | IV |
| Abstract..... | V |
| Glosario | VI |
| Índice de contenidos | VII |
| Índice de Tablas..... | IX |
| Índice de Figuras | X |
| Introducción..... | 5 |
| Objetivos..... | 7 |
| Objetivos generales..... | 7 |
| Objetivos específicos | 7 |
| 1. Marco teórico | 9 |
| 1.1. Proceso de formación del ozono..... | 9 |
| 1.1.1. Reseña del ozono [4] | 9 |
| 1.1.2. Óxidos de Nitrógeno [4]..... | 11 |
| 1.1.3. Compuestos orgánicos volátiles | 13 |
| 1.1.4. Importancia del ratio COV/NO _x [7]..... | 15 |
| 1.2. Antecedentes internacionales que contienen información sobre la especiación de los precursores de ozono | 18 |
| 1.2.1. Especiación COVS y NO _x [9]..... | 18 |
| 1.2.2. Distribución espacial y temporal de emisiones provenientes de fuentes móviles [11] | 22 |
| 1.2.3. Factores de emisión de NO _x para vehículos diesel [12] | 27 |
| 1.2.4. Normas de emisión europea para automóviles y camiones de NO ₂ [13] | 29 |
| 1.3. Antecedentes nacionales de distribución espacial y temporal en Chile..... | 31 |
| 1.3.1. Distribución espacial y temporal de emisiones en Chile [14] | 31 |
| 1.3.2. Evaluación de un modelo simplificado para la distribución especial de emisiones vehiculares en ciudades medianas [15] | 37 |
| 1.3.3. Evaluación de un modelo simplificado para la distribución especial de un inventario de emisiones en ciudades grandes [16]..... | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2. | Metodología | 42 |
| 2.1 | Metodología para la especiación de COVs y NO _x | 42 |
| 2.1.1 | Obtención de datos del inventario de emisiones de Santiago..... | 42 |
| 2.1.2 | Obtención de datos de fracciones másicas de especiación | 42 |
| 2.2 | Metodología para la desagregación espacial..... | 46 |
| 2.2.1 | Clasificación de las vías y creación ruta de vehículos pesados..... | 46 |
| 2.2.2 | Categorización de la ciudad en tres sectores según perfil vehicular y ponderación de vías..... | 47 |
| 2.2.3 | Utilización del software QGIS | 52 |
| 2.3 | Metodología para la distribución temporal | 54 |
| 3. | Resultados | 60 |
| 3.1 | Resultados especiación COVs | 60 |
| 3.2 | Resultados especiación NO _x | 65 |
| 3.3 | Resultados distribución espacial de COV y NO _x | 68 |
| 3.4 | Resultados distribución temporal de COV y NO _x | 71 |
| 4. | Conclusiones | 73 |
| 4.1 | Conclusiones generales..... | 73 |
| 4.2 | Conclusiones específicas | 73 |
| 4.2.1 | Marco teórico..... | 74 |
| 4.2.2 | Metodología..... | 74 |
| 4.2.3 | Resultados..... | 75 |
| 4.3 | Recomendaciones | 76 |
| | Referencias | 78 |

Índice de Tablas

| | |
|--|--|
| Tabla 1-1. Valores de KOH para varios hidrocarburos y CO a 298[K]. | 15 |
| Tabla 1-2. Categorías vehiculares en COPERT | 19 |
| Tabla 1-3. Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT | 20 |
| Tabla 1-4. Contaminantes considerados en COPERT | 20 |
| Tabla 1-5. Insumos demandados por COPERT | 21 |
| Tabla 1-6. Inventario de emisiones en la ciudad de Bogotá, Colombia | 23 |
| Tabla 1-7. Compuestos orgánicos volátiles más relevantes en la formación de ozono troposférico | 26 |
| Tabla 1-8. Factores de emisión para las distintas normas Euro en Países Bajos | 28 |
| Tabla 1-9. Nuevos valores de los factores de emisión para vehículos de pasajeros diésel | 28 |
| Tabla 1-10. Factores de emisión actualizados de NO ₂ para vehículos de pasajeros diésel | 29 |
| Tabla 1-11. Factores de emisión para NO _x y NO ₂ en condiciones de manejo en autopistas para el año 2015 | 30 |
| Tabla 1-12. Factores de emisión para NO _x y NO ₂ en condiciones de manejo en ciudades para el año 2015 | 31 |
| Tabla 1-13. Categorías vehiculares utilizadas en el modelo SEEM | 38 |
| Tabla 1-14. Inventario de Emisiones para la ciudad de Santiago, Chile | 40 |
| Tabla 2-1. Emisiones COVs según las categorías utilizadas en COPERT para el año 2016 | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tabla 2-2. Emisiones NO _x según las categorías utilizadas en COPERT para el año 2016 | 65 |
| Tabla 2-3. Fracciones másicas de los COVs no metánicos según la base de datos de COPERT | 43 |
| Tabla 2-4. Especiación NO _x para las distintas categorías vehiculares propuestas por COPERT | 44 |
| Tabla 2-5. Categorización de las comunas de Santiago según perfil vehicular | 48 |
| Tabla 2-6. Ponderación de las vías en la zona I | 51 |
| Tabla 2-7. Ponderación de las vías en la zona II | 52 |
| Tabla 2-8. Ponderación de las vías en la zona III | 52 |
| Tabla 3-1. Especiación química de los COVs para distintas categorías vehiculares | 61 |
| Tabla 3-2. Especiación COVs según familias para las distintas categorías vehiculares | 63 |
| Tabla 3-3. Especiación NO _x para las distintas categorías vehiculares en la Región Metropolitana | 66 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1-1. Distribución del ozono en altura. Extraído de [5]..... | 10 |
| Figura 1-2. Variación de la concentración de contaminantes en una atmósfera urbana a lo largo del día. Extraído de [8]...... | 16 |
| Figura 1-3. Fracción de tráfico diario para cada hora y categoría vehicular. Extraído de [11]. | 23 |
| Figura 1-4. Contribución de las distintas categorías vehiculares estudiadas en el inventario de emisiones de Bogotá. Extraído de [11]...... | 24 |
| Figura 1-5. Comportamiento temporal de los distintos contaminantes del inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá, Colombia. Extraído de [11]..... | 25 |
| Figura 1-6. Emisiones de CO para las 08:00. Extraído de [11]...... | 25 |
| Figura 1-7. Distribución temporal de los COVs emitidos por fuentes móviles. Extraído de [11]. | 27 |
| Figura 1-8. Factores de emisión de NOx en Países Bajos en comparación con el límite permitido. Extraído de [13]. | 29 |
| Figura 1-9. Modelo de demanda para el cálculo de emisiones de CO ₂ , NOx, MP2.5, BC, CH ₄ , HC y CO. Extraído de [14]. | 32 |
| Figura 1-10. Emisiones de CO ₂ por tipo de vehículo desde el año 2000 hasta el 2050. Extraído de [14]. | 33 |
| Figura 1-11. Red vial para cada una de las regiones de Chile. Extraído de [14]. | 34 |
| Figura 1-12. Clasificación de las distintas calles de la zona de estudio. Extraído de [14]. | 35 |
| Figura 1-13. Distribución espacial del contaminante CO ₂ en la Región Metropolitana. Extraído de [14]. | 35 |
| Figura 1-14. Perfil de flujo vehicular en horario laboral para buses. Extraído de [14]. | 36 |
| Figura 1-15. Perfil de flujo vehicular en horario laboral para vehículos livianos personales. Extraído de [14]. | 36 |
| Figura 1-16. Zona urbana de la ciudad de Concepción, Chile. Extraído de [15]. | 37 |
| Figura 1-17. Estimación de emisiones utilizando el modelo SEEM. Extraído de [15]. | 38 |
| Figura 1-18. Nivel de actividad anual para la ciudad de Concepción mediante el modelo SEEM | 39 |
| Figura 1-19. Distribución espacial de las emisiones en la ciudad de Concepción utilizando el modelo SEEM. Extraído de [15]. | 39 |
| Figura 1-20. Distribución espacial para la ciudad de Santiago. Extraído de [16]. | 41 |
| Figura 2-1. Ruta de vehículos pesados en la ciudad de Santiago | 47 |
| Figura 2-2. Fracción vehicular diaria para la zona I de Santiago | 48 |
| Figura 2-3. Fracción vehicular diaria para la zona II de Santiago | 49 |
| Figura 2-4. Fracción vehicular para la zona III de Santiago | 49 |
| Figura 2-5. Importación de las capas de la red vial. | 53 |
| Figura 2-6. Creación de la malla | 54 |
| Figura 2-7. Puntos de control para mediciones de flujo vehicular, Rancagua-Machalí. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 2-8. Flujo vehicular por punto y tipo de día, Rancagua-Machalí. Extraído de [21]. | 59 |
| Figura 2-9. Evolución horaria del flujo vehicular total, Rancagua-Machalí. Extraído de [21]. | 59 |
| Figura 3-1. Distribución espacial de emisiones de vehículos pesados en la zona II de estudio | 68 |
| Figura 3-2. Distribución espacial de COV en Santiago. Elaboración propia. | 69 |
| Figura 3-3. Distribución espacial NOx en Santiago. Elaboración propia. | 70 |
| Figura 3-4. Distribución temporal COV y NOx en Santiago para un día entre lunes y jueves. Elaboración propia- | 71 |
| Figura 3-5. Distribución temporal de las familias de COVs para un día entre lunes y jueves. Elaboración propia. | 72 |
| Figura 3-6. Emisiones de vehículos pesados (incluyendo buses) en un día viernes en Santiago. Elaboración propia. | 72 |

Introducción

Chile se ha transformado en una de las economías de más rápido crecimiento en Latinoamérica en las últimas décadas, lo que le ha permitido al país reducir de manera importante la pobreza: entre 2000 y 2015, la proporción de la población considerada pobre (USD 4 por día) se redujo del 26 a 7,9%. [1]

Si bien entre 2014 y 2017, el crecimiento desaceleró por el impacto de la caída de los precios del cobre sobre la inversión privada y las exportaciones, el 2018 volvió a reactivarse. El primer semestre del 2018, Chile alcanzó una expansión económica del 4,8%, y calificó como el país de mayor crecimiento entre sus pares latinoamericanos.

Es por este crecimiento, en conjunto con otras condiciones económicas favorables, que se está experimentando el mejor año para la industria automotriz desde el año 2013. En noviembre de 2017 (en pleno periodo de desaceleración) se acumuló un aumento de ventas de autos nuevos de 19,1% a/a, superando incluso las expectativas del propio sector automotriz [2]. Según el Instituto Nacional de Estadísticas, más de 5,1 millones de vehículos circularon en el país durante 2017. Solamente en la Región Metropolitana circularon 2.041.854 vehículos (39,3% del total) de todo el parque automotriz [3].

Este crecimiento del parque automotriz conlleva a un aumento de consumo de combustibles fósiles, y a una mayor emisión de contaminantes a la atmósfera deteriorando la calidad del aire de la ciudad, ya que desde el año 2010 a la actualidad en Santiago se decretaron 28 preemergencias y una emergencia ambiental. Según reveló el informe Estado Global del Aire 2017 publicado por la ONG estadounidense Health Effects Institute (HEI) las muertes en Chile debido a la contaminación atmosférica alcanzaron la cifra de 5.900 durante el año 2015.

Uno de los principales componentes del smog es el ozono troposférico, que se forma debido a la interacción de sus precursores (COV y NO_x) con altos índices de radiación ultravioleta, estos precursores se liberan en el proceso de combustión de los vehículos. Este es un problema que se considera “sin umbral”, ya que incluso en pequeñas cantidades en el aire tiene efectos nocivos en la salud humana, vegetación e incluso materiales.

A finales de la década del 90, debido a los eventos críticos de contaminación atmosférica, se puso en marcha el “Plan de Prevención y Descontaminación para la Región Metropolitana” (D.S N° 16 de 1998), desde entonces se han desarrollado distintas herramientas que permiten controlar eventos críticos de contaminación. Sin embargo, hasta la fecha no existe un modelo predictivo oficial para el ozono.

Es por esto, que este trabajo de titulación se realiza en el marco del proyecto interno multidisciplinario realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María titulado: “Desarrollo e implementación de un modelo fotoquímico predictivo de formación de ozono troposférico en Santiago de Chile mediante modelación inversa”. Específicamente, siendo

material complementario al trabajo de titulación del tesista Ignacio Suarez “Distribución espacial y temporal del sector transporte en ruta en Chile”.

Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo, se presenta el objetivo global o general y posteriormente los objetivos específicos.

Objetivos generales

Determinar la desagregación química, espacial y temporal de emisiones vehiculares precursoras de ozono troposférico.

Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica nacional e internacional sobre precursores de ozono, metodologías de especiación para fuentes móviles y estudios previos sobre la concentración de ozono en Santiago.
- Determinar la especiación de COV para la flota vehicular existente en Santiago.
- Determinar la desagregación espacial de NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COV) totales generados por fuentes móviles en Santiago.
- Determinar la desagregación temporal de NO_x y COV totales generados por fuentes móviles en Santiago, incluyendo la especiación química de COV.

Para lograr este objetivo, la siguiente memoria se dividió en 4 capítulos:

Capítulo 1 - Marco teórico: Este capítulo se dividió en 3 partes. En la primera se aborda la información general sobre el ozono y su química de formación. En la segunda parte se encuentra información sobre los modelos de emisiones los cuales incluyen especiación química de los precursores del ozono. Finalmente, la tercera parte se subdivide en antecedentes nacionales e internacionales sobre la desagregación espacial y temporal de COVs y NOx.

Capítulo 2 – Metodologías: En este capítulo se detallan las metodologías necesarias para el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados en este trabajo de título.

Capítulo 3 – Resultados: En este capítulo se muestran los resultados obtenidos utilizando la metodología explicada en el capítulo anterior y se finalizan los objetivos planteados en este trabajo.

Capítulo 4 – Conclusiones: En este capítulo se encuentran las conclusiones generales y particulares obtenidas a lo largo del desarrollo del trabajo de título.

1. Marco teórico

El siguiente capítulo se divide en tres secciones: en la primera se aborda el proceso de formación del ozono; en la segunda se revisan los antecedentes internacionales sobre precursores del ozono; en la tercera se revisan los antecedentes nacionales sobre distribución espacial y temporal de ozono.

1.1. Proceso de formación del ozono

El siguiente apartado se divide en cuatro secciones: una breve reseña del ozono; una breve reseña de los óxidos de nitrógeno; una reseña de los COVs; y finalmente, la relación que existe entre los COVs y NOx en la formación del ozono.

1.1.1. Reseña del ozono [4]

El ozono es un gas incoloro e inestable formado por tres átomos de oxígeno (O_3) que se encuentra naturalmente en la atmósfera, se caracteriza por ser un oxidante fuerte, muy fácil de producir, pero a la vez muy frágil y fácil de destruir. Es uno de los muchos gases que componen la atmósfera (aunque su proporción es muy pequeña en comparación al resto de compuestos), y se caracteriza por ser un gas que reacciona fácilmente con muchos compuestos químicos y ser explosivo en pequeñas cantidades.

Es fuertemente oxidante (el mayor después del flúor), esto se debe a su alta capacidad de cesión electrónica en donde uno sólo de los tres átomos de oxígeno interviene de modo activo, mientras que los otros dos se desprenden en estado molecular.

El ozono se presenta desde la superficie de la tierra hasta altura aproximada de 70 kilómetros. El ozono que se encuentra en la estratósfera (capa que se extiende entre los 18 y 50 kilómetros de altitud medidos desde el ecuador) constituye el 90% total del ozono total, y encuentra su mayor concentración entre los 18 y 25 kilómetros. Por otro lado, el 10% restante se encuentra en la tropósfera (capa que se extiende entre la superficie de la tierra y los 17 kilómetros de altitud medidos desde las regiones ecuatoriales), encontrando su mayor concentración en los primeros 10 kilómetros.

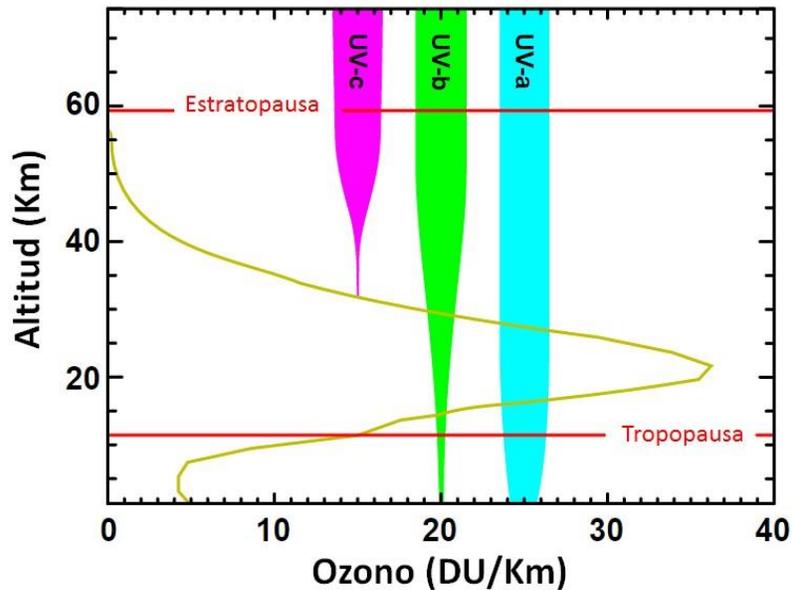
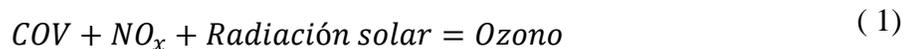


Figura 1-1. Distribución del ozono en altura. Extraído de [5].

Si bien todas las moléculas de ozono son químicamente idénticas, el ozono en la alta atmósfera tiene consecuencias ambientales muy diferentes para la vida terrestre que el ozono en la baja atmósfera. El ozono estratosférico (denominado capa de ozono) es de vital importancia porque protege la vida del planeta de los rayos ultravioleta (UV-B) procedentes del sol, los cuales son peligrosos para la salud humana, para los animales y plantas, incluyendo al plancton marino. Sin embargo, el ozono troposférico tiene un efecto nocivo para la salud humana, vegetal e incluso en materiales.

El ozono troposférico es un contaminante secundario que se forma mediante reacciones fotoquímicas en presencia de óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles (COV) y altos índices de radiación ultravioleta. Debido a que la luz solar desempeña un papel fundamental en su formación, es que este tipo de ozono es un gran problema diurno durante los días soleados. La reacción general se puede apreciar en la ecuación (1):



Las fuentes principales de emisiones de sus precursores son principalmente: los gases de la combustión de la gasolina, las centrales eléctricas y los solventes químicos. Aunque también puede formarse a niveles bajos por medio de emisiones naturales de COV, NO_x y CO, provenientes de emisiones de plantas y suelos, incendios forestales y rayos producidos durante las tormentas eléctricas, así como del ozono estratosférico que en ocasiones desciende a la superficie terrestre.

Debido a lo reactivo de este gas, y su capacidad para destruir o alterar otras moléculas, es que resulta tóxico para la salud humana, produciendo daños principalmente en los sistemas

cardiovascular y respiratorios. La exposición al ozono se ha vinculado con la mortalidad prematura y de cuestiones de morbilidad, como admisiones en hospitales y síntomas de asma.

El ozono también presenta efectos nocivos sobre la vegetación, deteriorando las hojas de los árboles y las plantas, así como reduciendo el rendimiento de los cultivos y el crecimiento de los bosques. También deteriora materiales de uso común tales como el nylon, caucho, plásticos, entre otros.

El ozono troposférico contribuye al calentamiento de la superficie terrestre. El incremento del ozono en la baja atmósfera, al igual que del dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los gases que contienen compuestos halogenados, considerados como gases de efecto invernadero (GEI), están generando un cambio en el balance radiativo de la atmósfera de la Tierra entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente. Los GEI cambian generalmente el balance absorbiendo la radiación saliente, generando un calentamiento de la superficie terrestre.

En las siguientes páginas se abordará más en detalle el proceso de formación del ozono troposférico a partir de los contaminantes precursores mencionados en la ecuación (1). Primero se describirán cada uno por separado, para finalmente como se relacionan en conjunto en la formación de ozono.

1.1.2. Óxidos de Nitrógeno [4]

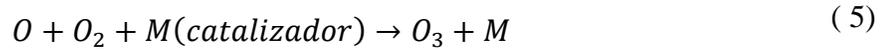
Existen ocho óxidos de nitrógeno diferentes, pero generalmente sólo dos de ellos intervienen en los procesos de formación de ozono: el óxido de nitrógeno (NO), gas incoloro, poco soluble en agua, inodoro, no inflamable y tóxico; y, el dióxido de nitrógeno (NO₂), gas pardo rojizo, tóxico, irritante y de olor asfixiante. En las siguientes páginas se utilizará la notación NO_x para referirse a ambos óxidos.

Las principales fuentes de emisión antrópica de estos contaminantes son los procesos de combustión de materia carbonosa, tanto en fuentes fijas como en fuentes móviles, y por los procesos industriales. La mayor parte de los óxidos de nitrógeno se forman por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas: el oxígeno y el nitrógeno del aire reaccionan para formar NO, el cual al oxidarse da paso al NO₂:



A su vez, cuando se expone al NO₂ a una radiación con longitud de onda menor a los 424[nm] sin la injerencia de COVs, se favorece la formación de ozono según las siguientes reacciones:





Mientras que el NO_2 participa en la formación del ozono (ecuaciones 4 y 5), el NO lo destruye para formar oxígeno y dióxido de nitrógeno (ecuación 6), por lo que la formación neta de ozono es poco significativa. Por esta razón los niveles de ozono no son tan altos en áreas urbanas (donde los altos niveles de NO son emitidos desde los vehículos) como en áreas rurales. Como los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos son transportados fuera de las áreas urbanas por las corrientes de viento, el NO que no participó en reacciones de destrucción de ozono es oxidado a NO_2 , el cual, participa en la formación de ozono y que conjuntamente con el ozono ya formado pueden persistir durante varios días y ser trasladados cientos de kilómetros contaminando otras regiones.

Cuando intervienen los hidrocarburos se modifica el ciclo natural de los NO_x . Los sumideros de los NO_x varían temporalmente, encontrándose durante el día el principal sumidero de NO_2 en la reacción:



Los sumideros de NO se originan en los radicales OH , los cuáles pueden reaccionar bien con moléculas orgánicas o con el monóxido de carbono. Es importante destacar el rol clave de los radicales OH en la cadena de reacciones, ya que es el precursor de los radicales que intervienen en la formación de NO_x . Los radicales OH continuamente se va creando y destruyendo, esto es debido al electrón desapareado que posee que lo hace altamente inestable y por tanto en búsqueda de su estabilidad atómica.

Cuando los radicales OH reaccionan con hidrocarburos (RH), se produce la formación de alquilperoxiradicales $RO_2\cdot$, como se observa en las ecuaciones (8) y (9):



Los peroxiradicales reaccionan rápidamente con NO para formar NO_2 y otros radicales libres como el alcoxil ($RO\cdot$), los cuales reaccionan produciendo el radical hidroperoxil ($HO_2\cdot$) y compuestos carbonílicos.



El NO_2 a su vez se convierte en HNO_3 según la reacción (7), el cual puede ser convertido otra vez en NO_x mediante el proceso de fotólisis:



En el caso que los radicales OH reacciones con el monóxido de carbono se generan las siguientes reacciones que también generan NO₂ como producto final.



Es necesario destacar que los radicales libres iniciales son el resultado de reacciones de fotólisis. La más importante corresponde a la descomposición fotolítica del ozono para generar oxígeno atómico (O) y molecular (O₂) y la formación posterior del OH[·], como se muestra en las siguientes reacciones:



Durante la noche el ácido nítrico (HNO₃) se genera mediante las siguientes reacciones:



Este NO₃[·] y N₂O₅ se pueden convertir en HNO₃ mediante las reacciones (20) y (21) respectivamente:



1.1.3. Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente o que son muy volátiles a esa temperatura. Se puede considerar como COV a aquel compuesto orgánico que a 20[°C] tiene una presión de 0.01[kPa], o una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso [6].

Su origen puede ser biogénico o antrópico. En el primer caso es emitido por vegetales y entre los productos más importantes que originan se encuentran el isopreno y los terpenos (α -pineno, β -pineno). Entre las fuentes antrópicas destacan las emisiones de hidrocarburos.

No todos los COVs se comportan de igual manera en las reacciones fotoquímicas: su participación dependerá de su estructura química y su reactividad. Destacarán las olefinas, altamente reactivas en la formación de oxidantes, mientras que los hidrocarburos aromáticos presentarán una reactividad intermedia y los alifáticos una reactividad muy baja.

Los hidrocarburos no metánicos (NMHC) suelen tomarse como los más representativos dentro de los COVs, principalmente por ser contaminantes primarios entre los hidrocarburos y por reflejar mejor sus concentraciones las emisiones locales.

Dado que la oxidación de hidrocarburos suele iniciarse mediante la reacción con radicales OH, puede definirse una relación de producción de ozono $P_{O_3}(J)$ a partir de las especies de hidrocarburos J como:

$$P_{O_3}(J) = C_J C_{OH} K_{OH}(J) \phi(J) \quad (22)$$

En donde:

C_J : Concentración de hidrocarburos en ppb.

C_{OH} : Densidad atmosférica del radical.

$K_{OH}(J)$: Constante de velocidad para la reacción entre especies J y OH.

$\phi(J)$: Número de moléculas de ozono producidas por cada átomo de carbono de J especies oxidadas.

De esta manera, la importancia relativa de una u otra especie de hidrocarburos dependerá de las magnitudes relativas incorporadas al producto de las tres variables C_J , K_{OH} y ϕ [7]. Esto quiere decir, que si una especie se encuentra en altas concentraciones no será necesariamente un precursor si no es reactivo con radicales OH y/o ineficaz en la producción de ozono; de la misma manera, especies en pequeña concentración pueden ser extremadamente reactivas. Se puede mencionar como ejemplo el metano, el hidrocarburo más importante en la atmósfera, pero de importancia despreciable en la producción de ozono a causa de su baja reactividad.

A continuación, se muestra una Tabla con los valores más típicos para K_{OH} :

Tabla 1-1. Valores de K_{OH} para varios hidrocarburos y CO a 298[K].

| Especies | K_{OH} $\text{cm}^3 \text{molécula}^{-1} \text{s}^{-1}$ | K_{OH} (especies)/ K_{OH} (propeno) |
|----------------------------|--|--|
| Isopreno | $9,7 \times 10^{-11}$ | 3,9 |
| Ciclohexeno | $6,6 \times 10^{-11}$ | 2,6 |
| Cis-2-buteno | $6,2 \times 10^{-11}$ | 2,5 |
| Propeno | $2,5 \times 10^{-11}$ | 1,0 |
| m-y p-xileno | $2,4 \times 10^{-11}$ | 0,96 |
| Tolueno | $6,0 \times 10^{-12}$ | 0,24 |
| Butano | $2,5 \times 10^{-12}$ | 0,10 |
| Etano | $2,7 \times 10^{-13}$ | 0,011 |
| Monóxido de carbono | $2,4 \times 10^{-13}$ | 0,010 |
| Metano | 8×10^{-15} | 0,00032 |

La variabilidad de C_j y K_{OH} serán los factores que determinen la contribución de las diferentes especies de hidrocarburos en la producción de ozono.

Como en las relaciones de destrucción de los NO_x dependen fuertemente de las concentraciones de estos productos y de los hidrocarburos no metánicos (NMHCs), el incremento en la producción de ozono no es proporcional linealmente al incremento de los precursores, observándose de hecho en ciertas circunstancias que la producción de ozono decrece con el incremento de las concentraciones de los precursores.

1.1.4. Importancia del radio COV/ NO_x [7]

La contaminación fotoquímica se produce al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de radiación ultravioleta proveniente de los rayos solares. La formación de los oxidantes se favorece en situaciones estacionarias de altas presiones (anticiclones) asociadas a una fuerte insolación y vientos débiles que dificultan la dispersión de los contaminantes primarios.

El proceso se inicia en las primeras horas de la mañana como consecuencia de la intensa emisión de hidrocarburos y NO derivada del comienzo de la actividad en las grandes ciudades (ver Figura 1-2). El óxido nítrico se oxida a dióxido de nitrógeno aumentando la concentración de este último en la atmósfera (ecuación 6). Las concentraciones superiores de NO_2 unido a la radiación solar más intensa ponen en marcha el proceso fotolítico de este producto (ecuación 4), generando oxígeno atómico que al transformarse en ozono incrementando su concentración, así como la de radicales libres procedentes de hidrocarburos. Éstos al combinarse con cantidades apreciables de NO impiden que se

complete dicho ciclo aumentando rápidamente la concentración de ozono (recordar que el NO destruye el ozono según la ecuación 6).

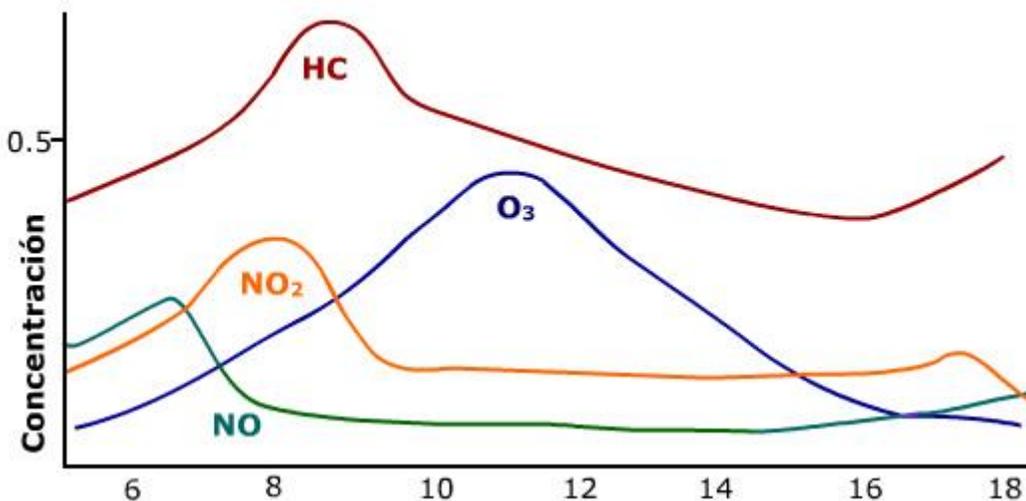


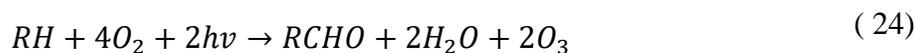
Figura 1-2. Variación de la concentración de contaminantes en una atmósfera urbana a lo largo del día. Extraído de [8].

La relación:

$$[NO]_t [O_3]_t / [NO_2]_t \quad (23)$$

Describe razonablemente bien las interrelaciones entre las concentraciones de óxido nítrico, dióxido de nitrógeno y ozono para atmósferas moderadas y altamente contaminadas.

Sin embargo, en el aire urbano existe una amplia variedad de hidrocarburos que generan radicales oxigenados capaces de competir con el ozono para reaccionar con el óxido nítrico, consumiéndolo y favoreciendo la acumulación de ozono en la baja atmósfera. El mecanismo que lo explica se inicia con la reacción (8) y siguientes, y cuyo resultado final es la formación de NO₂. Es seguida por las reacciones (4) y (5), llegando finalmente a la reacción (24):



De tal manera que a partir de una reacción inicial entre un hidrocarburo y un radical OH (reacción 8) resultan dos moléculas de ozono y compuesto carbonilo (reacción 24) que, fotoquímicamente, produciría moléculas adicionales de ozono. Sin la presencia de hidrocarburos en la atmósfera la formación de ozono podría reducirse en un factor de 5.

Debido a que constantemente compiten entre COVs y NO_x por el radical OH es que resulta importante destacar que la formación de ozono no solo depende de las

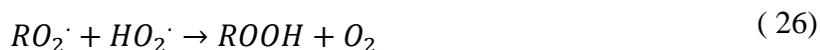
concentraciones absolutas de sus precursores, sino también de su cociente. En una proporción alta de concentración de COVs sobre NO_x, el OH reaccionará principalmente con los COV; en una proporción baja, la reacción de NO_x puede predominar.

Puede ocurrir que el radical hidroxilo reaccione con los COVs y NO₂ a una misma tasa cuando la relación de concentración de COV sobre NO₂ es un cierto valor; este valor depende del COV particular o la mezcla de COVs presentes, ya que las constantes de la tasa de OH de los COV difieren para cada especie de COV (Tabla 1-1).

Considerando que en condiciones ambientales la constante de velocidad de segundo orden para la reacción (7) es, en unidades de relación de mezcla, aproximadamente $1,74 \times 10^4$ [$ppm^{-1} min^{-1}$]; Que se trata de una mezcla urbana promedio de COVs, con una constante de velocidad promedio para la reacción OH-COV, expresada en una base de átomo de carbono, de aproximadamente $3,1 \times 10^3$ [$ppmC^{-1} min^{-1}$]. Se obtiene que la relación de la constante de velocidad de OH-NO₂ sobre OH-COV es aproximadamente 5.5.

Cuando la relación de concentración COV:NO₂ es aproximadamente 5.5:1, con la concentración de COV expresada en una base de átomos de carbono, las velocidades de reacción de COV y NO₂ con OH son iguales. Si la relación COV:NO₂ es menor que 5.5: 1, la reacción de OH con NO₂ predomina sobre la reacción de OH con COV, eliminando así los radicales OH del ciclo de oxidación de COV activo, retardando la producción adicional de O₃. Por otro lado, cuando la relación excede de 5,5: 1, el OH reacciona de manera preferencial con los COVs, favoreciendo la generación de nuevos radicales (debido a la fotólisis de productos intermedios generados por la reacción OH-COV), acelerando así la producción de O₃.

Debido a que el OH reacciona aproximadamente 5,5 veces más rápido con el NO₂ que con los COVs, los NO_x tienden a eliminarse del sistema más rápido que los COVs¹. En ausencia de nuevas emisiones de NO_x, a medida que el sistema reacciona, los NO_x se agotan más rápidamente que los COVs, y la proporción instantánea de COVs:NO₂ aumentará con el tiempo. Cuando la concentración de NO_x se vuelve lo suficientemente baja como resultado de la eliminación continua de NO_x por la reacción OH-NO₂ el radical hidroxilo reacciona con los COVs para mantener el ciclo de formación de ozono en marcha. Pero cuando las concentraciones de NO_x son demasiado bajas los peroxi-radicales comienzan a reaccionar entre sí, tomando como ejemplos las reacciones siguientes:



Mientras que, en general, el aumento de las concentraciones de COV significa más ozono, el aumento de NO_x puede llevar a una mayor o menor cantidad de ozono, según la proporción de COV a NO_x predominante. Por lo tanto, la tasa de producción de ozono no es simplemente

¹ La proporción de COVs/NO₂ de 5,5 que se ha utilizado aplica a una mezcla urbana de COVs promedio. Debido a que las constantes individuales varían significativamente, esta proporción también variará individualmente si esta presente un solo tipo de COV.

proporcional a la cantidad de NO_x presente. A un nivel dado de COV, existe una concentración de NO_x a la cual se produce una cantidad máxima de ozono, una relación óptima de COV a NO_x . Para proporciones menores que esta relación óptima, el NO_x aumenta su ventaja y el ozono disminuye.

Las proporciones de COV: NO_x suficientemente bajas para retardar la formación de ozono a partir de la proporción óptima suelen ocurrir en ciudades centrales. Mientras que en los entornos rurales tienden a caracterizarse por relaciones de COV: NO_x bastante altas debido a la eliminación relativamente rápida de NO_x de fuentes distantes en comparación con la de los COV (junto con la ausencia habitual de fuentes de NO_x locales fuertes).

Debido a que las tasas de eliminación de NO_x y los radicales libres dependen de forma compleja de las concentraciones de VOC y NO_x , la producción de ozono no aumenta linealmente con un aumento en las concentraciones de precursor.

Después de estudiar la química de formación del ozono troposférico, se llegó a la conclusión que debido a que las tasas de eliminación de NO_x y los radicales libres dependen de forma compleja de las concentraciones de VOC y NO_x , la producción de ozono no aumenta linealmente con un aumento en las concentraciones de precursor.

1.2. Antecedentes internacionales que contienen información sobre la especiación de los precursores de ozono

El siguiente apartado se dividió en cuatro secciones: Especiación de COVs y NO_x ; distribución espacial y temporal de un inventario de emisiones; y dos estudios sobre el NO_x sobre las normas de emisión de éstos.

1.2.1 Especiación COVS y NO_x [9]

El sistema de modelación de emisiones vehiculares llamado Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT) es un programa elaborado en Visual Studio.NET 2003 de Microsoft. Fue desarrollado como herramienta europea para calcular las emisiones provenientes tanto de vehículos en circulación como de vehículos fuera de ruta (equipos con motores de combustión interna empleados en agricultura, silvicultura, residencial, industria, barcos y ferrocarriles). Es importante destacar que COPERT fue diseñado específicamente para estimar emisiones de vehículos fabricados de acuerdo con la legislación europea.

El desarrollo de COPERT fue financiado por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA, por sus siglas en inglés), en el marco de las actividades del centro europeo de asuntos del aire y cambio climático. Si bien existen varios métodos y herramientas utilizadas en el cálculo de

emisiones del transporte en carretera, la mayoría de los países de la UE27² (22 de ellos) utilizaron el modelo COPERT IV en sus cálculos [10].

El año 2016 se lanzó COPERT 5 cuya última versión es la 0.1067 publicada en octubre del mismo año, cuyas principales mejoras respecto a la versión anterior son: reducción en los tiempos de cálculos, análisis a mayores periodos de tiempo (40 años en un mismo archivo), y bastantes mejoras y optimización en el diseño del software.

La metodología de COPERT permite la compilación de inventarios nacionales anuales; sin embargo, se ha demostrado que también se puede utilizar, con un suficiente grado de certeza, para la compilación de inventarios de emisiones urbanos hasta con una resolución espacial de 1x1 [km²] y una resolución temporal de 1 hora.

Categorías vehiculares

COPERT estima emisiones generadas por vehículos a gasolina (con y sin plomo), diesel y GLP para seis categorías básicas de vehículos, los cuales se muestran en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Categorías vehiculares en COPERT

| Categoría vehicular | Descripción |
|------------------------|---|
| Vehículos de pasajeros | Vehículos para el transporte de pasajeros que no poseen más de 8 asientos en adición al del conductor |
| Vehículos ligeros | Vehículos para el transporte de bienes y con un peso no mayor a 3.5 toneladas |
| Vehículos pesados | Vehículos para el transporte de bienes y con un peso mayor a 3.5 toneladas |
| Autobuses urbanos | Vehículos para el transporte de pasajeros, con más de 8 asientos en adición al del conductor |
| Motonetas | Vehículo de 2 o 3 ruedas con motor menos de 50[cm ³] y diseñado para no exceder una velocidad de 40[km/h] |
| Motocicletas | Vehículos de 2 o 3 ruedas con motor de más de 50[cm ³] y diseñado para correr a una velocidad superior a 40[km/h] |

Con el objeto de hacer una estimación de emisiones vehiculares más precisa, a partir de las categorías indicadas anteriormente, COPERT puede construir subcategorías vehiculares con base en criterios tales como: tipo de combustible, peso del vehículo, tamaño del motor,

² Estos datos corresponden al año 2010. Actualmente, son 28 países pertenecientes a la Unión Europea, el año 2013 se incorporó Croacia.

tecnología del motor, etc. La Tabla 1-3 muestra algunas consideraciones específicas, dentro de cada criterio, que se emplean en la construcción de las subcategorías en COPERT.

Tabla 1-3. Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT

| Tipo de combustible | Peso del vehículo [ton] | Tamaño del motor [L] | Tecnología del motor |
|---------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Gasolina | <3,5 | <1,4 | PRE ECE* |
| | >3,5 | 1,4-2,0 | ECE 15/00-01 |
| Diesel | >7,5 | >2,0 | ECE 15/02 |
| | 7,5-16 | | EURO III |
| GLP | 16-32 | | EURO IV |
| | >32 | | EURO V |

*Comité Económico para Regulaciones Europeas (ECE, por sus siglas en inglés)

Con este esquema de agregación de la flota vehicular, una subcategoría podría quedar conformada por todos los vehículos ligeros a gasolina, con motor de menos de 1,4 litros que cumple con la legislación establecida para los vehículos con tecnología EURO IV.

Contaminantes

Las emisiones calculadas incluyen contaminantes regulados (CO, NO_x, COVs, MP) y no regulados (N₂O, NH₃, SO₂, especiación de COVDM, etc), y también se calcula el consumo de energía. La Tabla 1-4 muestra la lista completa de especies químicas para las cuales COPERT es capaz de estimar el inventario de emisiones de fuentes vehiculares. Una característica de este modelo es su capacidad para proporcionar información desagregada por especie sobre las emisiones de hidrocarburos (propano, butano, isobutano, etileno, etc.).

Tabla 1-4. Contaminantes considerados en COPERT

| Contaminante | Descripción |
|------------------|--|
| COV | Compuestos Orgánicos Volátiles |
| CO | Monóxido de carbono |
| NO _x | Óxidos de nitrógeno |
| PM | Partículas (diferentes diámetros) |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| CH ₄ | Metano |
| N ₂ O | Óxido nitroso |
| NH ₃ | Amoníaco |
| SO ₂ | Dióxido de azufre |
| HAP | Hidrocarburos Aromáticos Poli-cíclicos |

| | |
|-----------------------------|--|
| COP | Contaminantes Orgánicos Persistentes |
| Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se y Zn | Metales pesados: plomo, cadmio, cromo, cobre, níquel, selenio y zinc, respectivamente. |

Insumos generales

Para estimar el inventario de emisiones para la región de interés, COPERT demanda que le sean suministrados los insumos que se muestran en la Tabla 1-5.

Tabla 1-5. Insumos demandados por COPERT

| Insumo | Insumo |
|--|--|
| Temperatura máxima y mínima mensual | Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo y vía |
| Características del combustible (presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, contenido de plomo, relación hidrógeno-carbón, etc.) | Distribución de velocidad promedio por tipo de vehículo y vía |
| Datos sobre consumo de combustible | Distribución del número de arranques por tipo de vehículo |
| Descripción del programa de inspección y mantenimiento | Distribución de la longitud promedio de los viajes |
| Distribución de la flota vehicular por clase | |

Especiación COVs

La especiación de los COVs en diferentes compuestos se muestra en la Tabla 2-3 del capítulo 2. Las fracciones propuestas se obtuvieron de la literatura (BUWAL, 1994; TNO, 1993; Volkswagen, 1989; Umweltbundesamt, 1996). Las fracciones mostradas en la Tabla se aplican a las emisiones totales de VOC_{DM} de los vehículos de pasajeros y vehículos comerciales ligeros convencionales (pre-Euro 1) o de ciclo cerrado (Euro-1 y posteriores), vehículos de pasajeros y comerciales diésel, independiente del concepto de combustión (ID o IDI).

Especiación NO_x

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) en los vehículos consisten principalmente de NO y NO₂. La fracción de masa de NO₂ del NO_x total (NO₂ primario) es de particular importancia debido a la mayor toxicidad del NO₂ en comparación con el NO. Esta fracción de masa se cita como f-NO₂, en coherencia con el informe AQEG (2006). La Tabla 2-4 (mostrada en el capítulo

siguiente) proporciona el rango de valores f-NO₂ (expresado como porcentaje) desarrollado en el marco de dos estudios relevantes en Europa. El estudio AEAT (2007) se realizó en nombre de la DG de Medio Ambiente dentro de un proyecto destinado a evaluar los objetivos de calidad del aire para el futuro. El estudio TNO se refiere a los datos nacionales utilizados para la evaluación de emisiones de NO₂ en los Países Bajos (Smit, 2007). La misma Tabla incluye los valores sugeridos para su uso.

En general, los estudios TNO y AEAT no difieren significativamente para las tecnologías de vehículos más antiguos. Se podría considerar que la diferencia es menor que la incertidumbre esperada en cualquiera de los valores propuestos, dada la muestra limitada de mediciones disponibles y la incertidumbre de medición para el NO₂.

Al revisar los modelos de emisiones se puede concluir que son muy pocos los modelos de emisiones que contienen información sobre especiación de los precursores del ozono, y los pocos que hay no todos son detallados con respecto a las categorías vehiculares y tipo de tecnología. Sobre la especiación de NO_x la información es casi nula, ya que se suele asumir una distribución 90-10% sin entrar en detalles. Por esta razón es que se utilizaron los datos propuestos por COPERT a pesar de que no estén actualizados.

1.2.2 Distribución espacial y temporal de emisiones provenientes de fuentes móviles [11]

El año 2010, Nelson Peñaloza elaboró la distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de Bogotá, en su investigación llamada “Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá, D.C.”. En este estudio también se obtuvo la especiación de los compuestos orgánicos volátiles más relevantes en la formación de ozono troposférico y su distribución temporal. Esto se realizó en una malla de 55 x 55 [km], con resolución de celdas de 1 x 1 [km]. La distribución temporal se hizo con una resolución horaria a partir del inventario anual. Se empleó una combinación de herramientas que incluyeron Microsoft Excel, ArcGIS y el código fortran EMISENS.

En primer lugar, se obtuvo la distribución en el tiempo para las distintas categorías vehiculares en las vías principales, tal como se observa en la Figura 1-3.

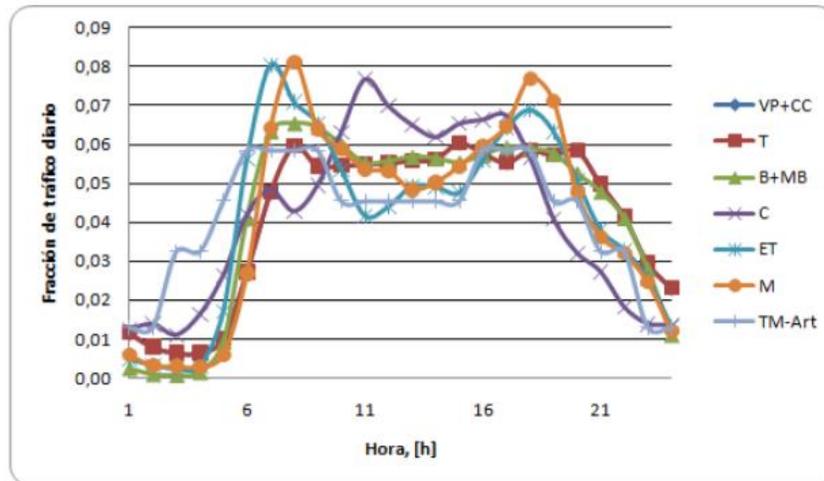


Figura 1-3. Fracción de tráfico diario para cada hora y categoría vehicular. Extraído de [11].

En donde:

- M = Motos
- TM-Alim = Transmilenio Alimentador
- TM-Art = Transmilenio Articulado
- ET = Escolar y Turismo
- C = Camiones
- B_MB = Buses y Minibuses
- T = Taxis
- VP_CC = Vehículo de pasajeros camperos y camionetas

Se observa que los momentos de mayor afluencia vehicular ocurre alrededor de las 07:00 en la mañana y a las 18:00 por la tarde.

Con respecto al inventario de emisiones en Bogotá se obtuvieron las siguientes emisiones en toneladas anuales:

Tabla 1-6. Inventario de emisiones en la ciudad de Bogotá, Colombia

| Contaminantes | Cantidad [ton/año] |
|-----------------|--------------------|
| CO | 706.925 |
| NO _x | 57.658 |
| SO ₂ | 13.009 |
| PM | 1.594 |
| COV | 108.011 |

A partir de la Tabla 1-6 se puede observar que los mayores contaminantes emitidos por las fuentes móviles en el dominio modelado son los siguientes: monóxido de carbono (CO) y

compuestos orgánicos volátiles (COVs), con emisiones de 706.925[ton/año] y 108.011 [ton/año], respectivamente. Mientras que el compuesto químico con una menor descarga a la atmosfera es el material particulado (PM) con una emisión de 1.594[ton/año].

En la Figura 1-4 se puede observar la contribución de cada una de las categorías estudiadas al inventario:

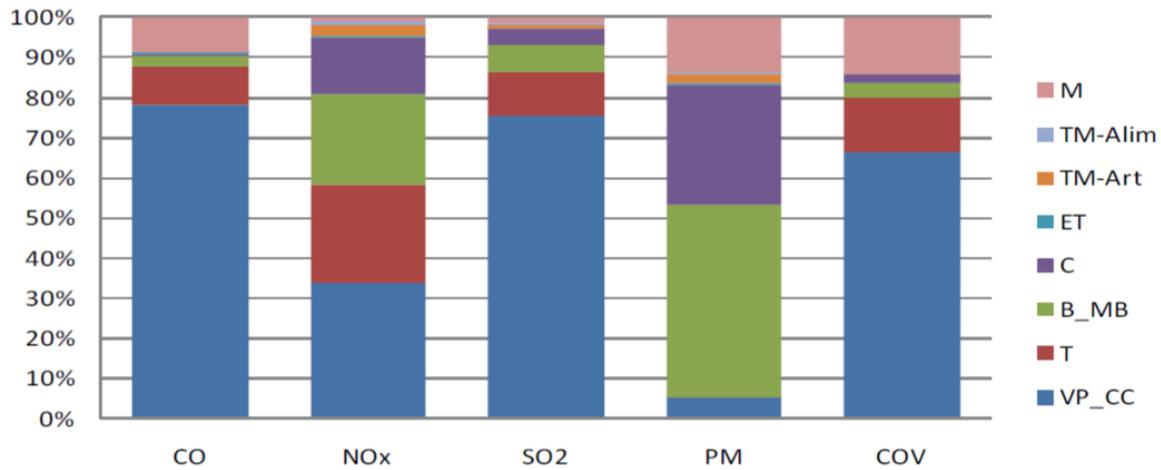


Figura 1-4. Contribución de las distintas categorías vehiculares estudiadas en el inventario de emisiones de Bogotá. Extraído de [11].

De la Figura 1-4 se observa que la categoría vehicular que domina las emisiones de CO, SO₂ y COVs es la VP_CC, con porcentajes del 78,18%, 75,30% y 66,63%, respectivamente. En esta categoría también se puede observar una contribución notoria del NO_x con un porcentaje del 33,80%.

Seguidamente, se obtuvo el comportamiento temporal de las emisiones por fuentes móviles, tal como se muestra en la Figura 1-5, en la cual se resaltan las horas de mayor concentración de cada contaminante.

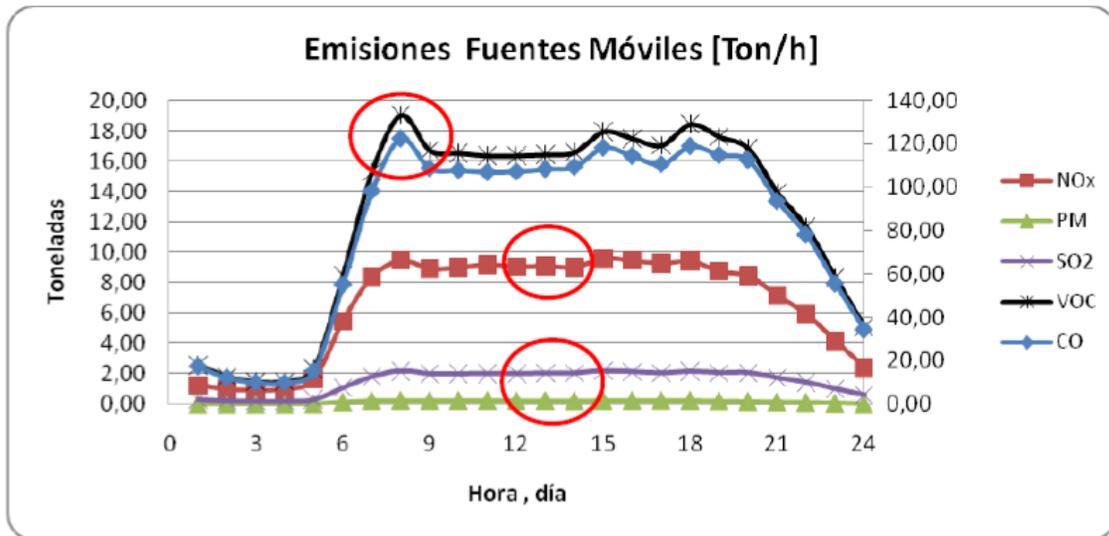


Figura 1-5. Comportamiento temporal de los distintos contaminantes del inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá, Colombia. Extraído de [11].

En la Figura 1-6 se muestra la distribución espacial del contaminante CO a las 08:00 (hora donde alcanza su mayor concentración).

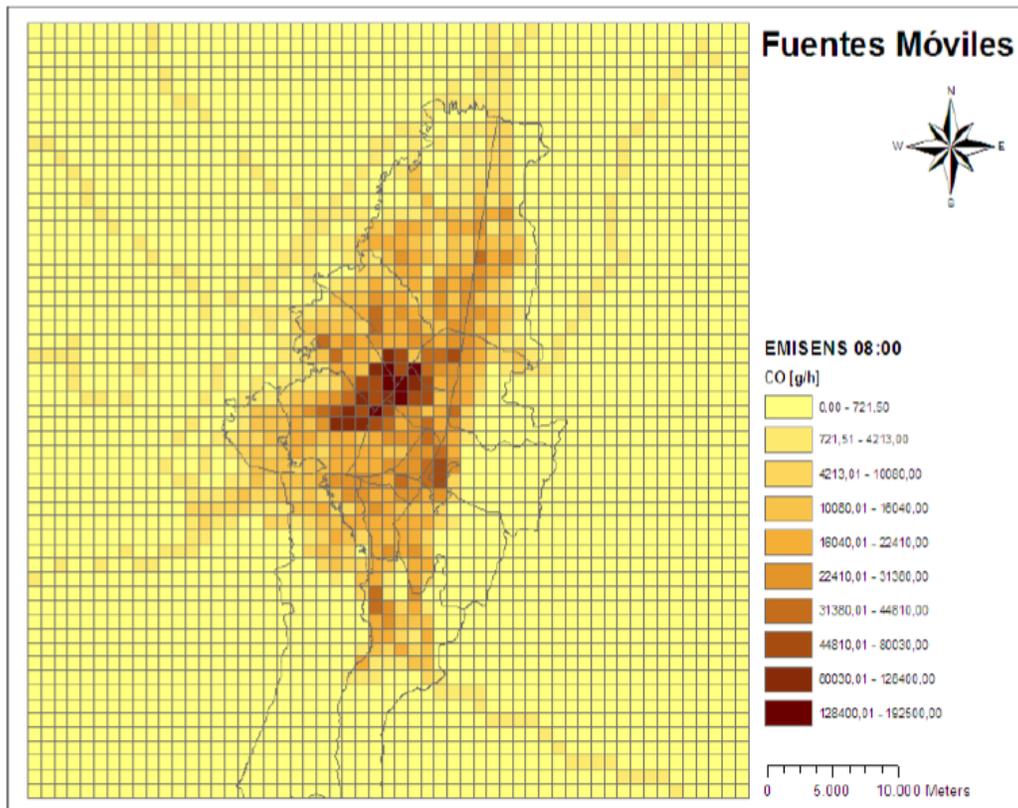


Figura 1-6. Emisiones de CO para las 08:00. Extraído de [11]

Seguidamente, se realizó la especiación química de los COVs, tal como se muestra en la Tabla 1-7:

Tabla 1-7. Compuestos orgánicos volátiles más relevantes en la formación de ozono troposférico

| Especie | Definición | Fracción Másica |
|-------------------|---|-----------------|
| Alcanos | | |
| ETH | Etano | 1,13E-02 |
| HC3 | Alcanos, alcoholes, ésteres y alquinos con una constante de tasa de reacción OH menor a 3.4×10^{-12} cm ³ /s | 1,31E-01 |
| HC5 | Alcanos, alcoholes, ésteres y alquinos con una constante de tasa de reacción OH entre 3.4×10^{-12} cm ³ /s y 6.8×10^{-12} cm ³ /s | 9,66E-02 |
| HC8 | Alcanos, alcoholes, ésteres y alquinos con una constante de tasa de reacción OH mayor a 6.8×10^{-12} cm ³ /s | 6,82E-02 |
| Alquenos | | |
| ETE | Eteno | 9,03E-02 |
| OLT | Alquenos terminales | 9,61E-02 |
| OLI | Alquenos internos | 4,51E-02 |
| Aromáticos | | |
| TOL | Tolueno y otros aromáticos menos reactivos | 1,86E-01 |
| XYL | Xileno y otros aromáticos más reactivos | 1,86E-01 |
| Carbonilos | | |
| HCHO | Formaldehído | 1,85E-02 |
| ALD | Acetaldehído y aldehídos mayores | 7,08E-02 |
| KET | Cetonas | 5,00E-04 |

Finalmente, se obtuvo la distribución temporal para las especies químicas más relevantes que conforman los COVs emitidos por las fuentes móviles que operan con motores alimentados con gasolina, tal como se muestra en la Figura 1-7.

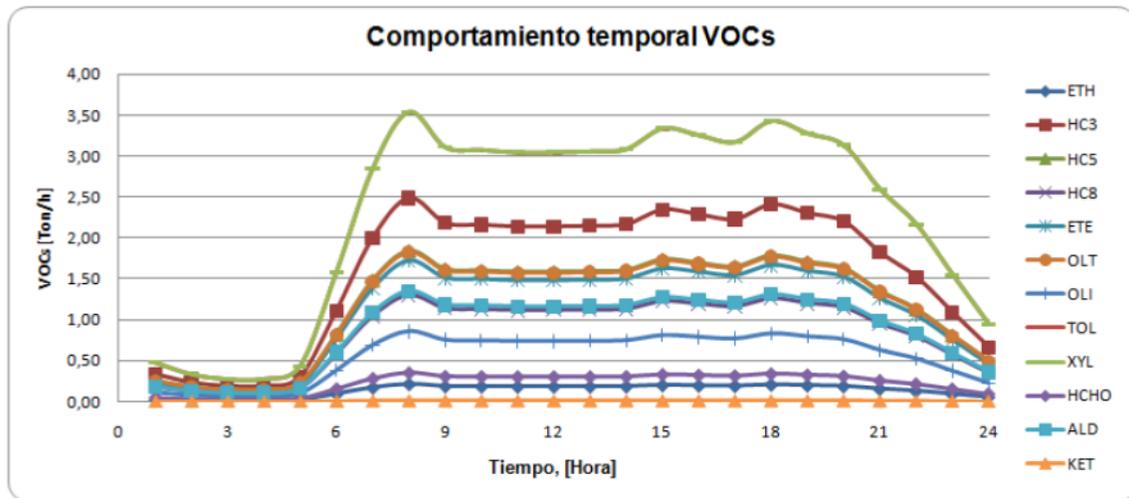


Figura 1-7. Distribución temporal de los COVs emitidos por fuentes móviles. Extraído de [11].

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que las celdas en las que se generan las mayores descargas de contaminantes se encuentran superpuestas en los sectores de la ciudad con mayores concentraciones de contaminantes. Las mayores emisiones de fuentes móviles ocurren a las 08:00.

Estudios sobre el NO_x en Países Bajos

A continuación, se presentan dos estudios relacionados a la especiación de los NO_x en Países Bajos. El primero, realizado por la agencia de investigación independiente TNO sobre la determinación de los factores de emisión para los vehículos Euro-5 diésel holandeses. El segundo, realizado por el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos sobre las normas de emisión Euro para los vehículos y camiones en relación con el valor límite de NO₂ regulado en Países Bajos.

1.2.3 Factores de emisión de NO_x para vehículos diesel [12]

Debido a que la emisión de NO_x durante la operación en el mundo real no ha disminuido significativamente a pesar de los límites de emisión más estrictos en la prueba NEDC para cada clase de Euro que se ha ido implementando en el tiempo. (ver Tabla 1-8). Es que la agencia TNO realizó el estudio llamado “Determination of Dutch NO_x emission factors for Euro-5 diesel passenger cars (Norbert E. Ligterink, 2012)” para presentar la actualización de los valores y analizar los problemas emergentes con el NO_x. Este estudio pone énfasis en

los vehículos con motor diésel, ya que son los principales contribuyentes en las emisiones de los NO_x, y se centra específicamente en los motores con norma Euro-5.

En la tabla 1-8 se muestran los factores de emisiones implementados según el año.

Tabla 1-8. Factores de emisión para las distintas normas Euro en Países Bajos

| Emission limit | NO _x [g/km] | Introduction year |
|----------------|------------------------|-------------------|
| Euro-1 | 0,97 | 1993 |
| Euro-2 | 0,70 | 1996 |
| Euro-3 | 0,50 | 2000 |
| Euro-4 | 0,25 | 2005 |
| Euro-5 | 0,18 | 2009 |
| Euro-6 | 0,08 | 2014 |

El problema radica en el valor de los factores de emisión de las distintas normas, ya que las emisiones de NO_x provenientes de los vehículos diésel suele ser mayor a los valores estimados inicialmente (ver Tabla 1-9). Este no es el caso de las otras emisiones ni para los vehículos a gasolina, para el resto de las categorías las emisiones en el mundo real suelen ser menores al límite de prueba. Por lo tanto, en la tabla 1-9 se establece un nuevo valor para la categoría Euro-5 que es más realista con las mediciones obtenidas.

Tabla 1-9. Nuevos valores de los factores de emisión para vehículos de pasajeros diésel

| NO _x [g/km] | Urban | Rural | Motorway |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Euro-0 | 0,86 | 0,66 | 0,63 |
| Euro-1 | 0,76 | 0,45 | 0,56 |
| Euro-2 | 1,02 | 0,55 | 0,50 |
| Euro-3 | 0,89 | 0,55 | 0,54 |
| Euro-4 | 0,51 | 0,38 | 0,39 |
| Euro-5 old | 0,37 | 0,27 | 0,28 |
| Euro-5 new | 0,63 | 0,34 | 0,61 |
| Euro-6 | 0,16 | 0,12 | 0,12 |

A partir de estos datos se pudo encontrar la fracción de NO₂ presente en los NO_x totales. Cabe destacar que una disminución en las emisiones totales de NO_x no necesariamente produce una disminución en la concentración local de NO₂. La fracción de NO₂ se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 1-10. Factores de emisión actualizados de NO₂ para vehículos de pasajeros diésel

| NO ₂ [g/km] | Urban | Rural | Motorway |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Euro-0 | 0,13 | 0,10 | 0,09 |
| Euro-1 | 0,11 | 0,07 | 0,08 |
| Euro-2 | 0,15 | 0,08 | 0,07 |
| Euro-3 | 0,40 | 0,25 | 0,24 |
| Euro-4 | 0,28 | 0,21 | 0,22 |
| Euro-5 old | 0,20 | 0,15 | 0,16 |
| Euro-5 new | 0,19 | 0,10 | 0,20 |
| Euro-6 | 0,09 | 0,07 | 0,07 |

A partir de los resultados anteriores se puede concluir que el diésel es el principal contribuyente a la contaminación de NO_x, y es un tema que requiere cuidado, ya que por lo general las mediciones de NO_x tienden a ser mayores a los valores estimados, por lo que es necesario establecer límites que ayuden a reducir la cantidad emitida al ambiente.

1.2.4 Normas de emisión europea para automóviles y camiones de NO₂ [13]

Basado en la problemática mencionada en el punto 1.3.2.1 es que se realizó un segundo estudio llamado “The Euro emisión standards for cars and trucks in relation to NO₂ limit value exceedances in the Netherlands (Ministry of Health, Welfare and Sport, 2013) aplicado a los vehículos diésel de pasajeros, debido a que sus emisiones de NO_x superan el valor límite permitido (ver Figura 1-8):

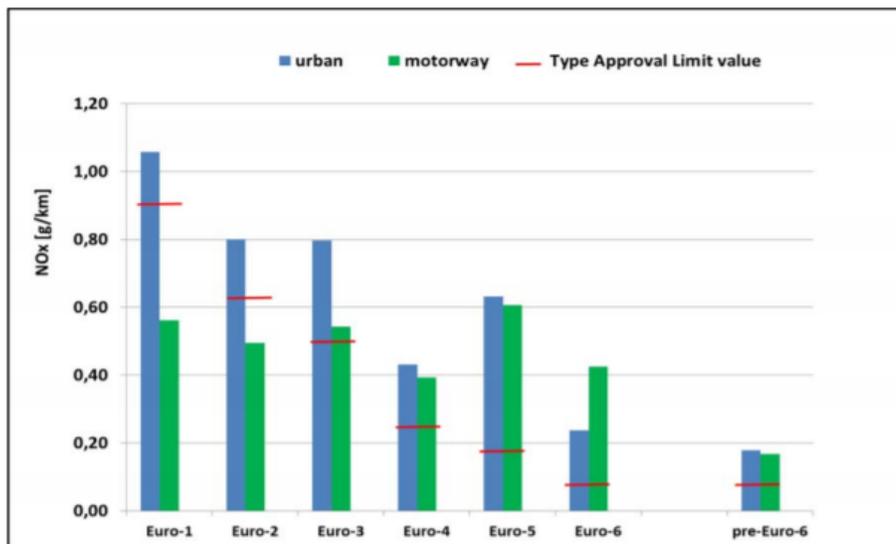


Figura 1-8. Factores de emisión de NO_x en Países Bajos en comparación con el límite permitido. Extraído de [13].

De este estudio es importante destacar la diferencia entre los factores de emisión estimados y medidos, en los cuales se encontraron diferencias superiores al 90%. A continuación, se muestran los factores de emisión de NO_x y NO₂ para vehículos pesados y ligeros en autopistas y ciudades (Tablas 1-11 y 1-12), basado en los datos de conducción reales para el año 2015.

Tabla 1-11. Factores de emisión para NO_x y NO₂ en condiciones de manejo en autopistas para el año 2015

| | Stagna nt ¹ | 80 km/h MSH ² | 80 km/h | 100 km/h MSH ² | 100 km/h | 120 km/h | 130 km/h |
|--|---------------------------|--------------------------------|------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Based on type approval tests | | | | | | | |
| NO_x | | | | | | | |
| Light-duty | 0.18 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.18 |
| Heavy-duty <20 t | 2.60 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 |
| Heavy-duty >20 t | 2.81 | 2.35 | 2.35 | 2.35 | 2.35 | 2.35 | 2.35 |
| NO₂ | | | | | | | |
| Light-duty | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Heavy-duty <20 t | 0.17 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| Heavy-duty >20 t | 0.19 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| Based on real-world driving conditions: Reference | | | | | | | |
| NO_x | | | | | | | |
| Light-duty | 0.47 | 0.22 | 0.23 | 0.25 | 0.27 | 0.34 | 0.39 |
| Heavy-duty <20 t | 5.89 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 |
| Heavy-duty >20 t | 8.57 | 3.08 | 3.08 | 3.08 | 3.08 | 3.08 | 3.08 |
| NO₂ | | | | | | | |
| Light-duty | 0.15 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.13 |
| Heavy-duty <20 t | 0.37 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| Heavy-duty >20 t | 0.32 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| Difference type approval tests vs. real-world emission factors | | | | | | | |
| NO_x | | | | | | | |
| Light-duty | -62% | -29% | -34% | -39% | -41% | -48% | -55% |
| Heavy-duty <20 t | -56% | -29% | -29% | -29% | -29% | -29% | -29% |
| Heavy-duty >20 t | -67% | -24% | -24% | -24% | -24% | -24% | -24% |
| NO₂ | | | | | | | |
| Light-duty | -93% | -84% | -85% | -87% | -88% | -90% | -92% |
| Heavy-duty <20 t | -55% | -47% | -47% | -47% | -47% | -47% | -47% |
| Heavy-duty >20 t | -40% | -20% | -20% | -20% | -20% | -20% | -20% |

1) Stagnant traffic is defined as an intensity-capacity ratio of 0.8 or more

2) Speed limit with strict enforcement.

Tabla 1-12. Factores de emisión para NOx y NO2 en condiciones de manejo en ciudades para el año 2015

| | IA | IB | IC | II |
|--|-------|------|------|------|
| Based on type approval tests | | | | |
| NO_x | | | | |
| Light-duty | 0.23 | 0.19 | 0.20 | 0.16 |
| Heavy-duty <20 t | 5.29 | 3.79 | 2.98 | 2.54 |
| Heavy-duty >20 t | 7.50 | 5.18 | 4.01 | 3.17 |
| Buses | 4.41 | 4.31 | 3.94 | 2.95 |
| NO₂ | | | | |
| Light-duty | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Heavy-duty <20 t | 0.31 | 0.23 | 0.18 | 0.15 |
| Heavy-duty >20 t | 0.44 | 0.31 | 0.24 | 0.17 |
| Buses | 0.30 | 0.27 | 0.23 | 0.17 |
| Based on real-world driving conditions: Reference | | | | |
| NO_x | | | | |
| Light-duty | 0.50 | 0.29 | 0.34 | 0.22 |
| Heavy-duty <20 t | 11.82 | 7.21 | 4.98 | 4.22 |
| Heavy-duty >20 t | 16.09 | 9.84 | 6.81 | 5.19 |
| Buses | 9.49 | 5.93 | 4.25 | 3.77 |
| NO₂ | | | | |
| Light-duty | 0.12 | 0.08 | 0.08 | 0.07 |
| Heavy-duty <20 t | 0.56 | 0.33 | 0.22 | 0.20 |
| Heavy-duty >20 t | 0.63 | 0.38 | 0.25 | 0.20 |
| Buses | 0.90 | 0.56 | 0.40 | 0.38 |
| Difference type approval tests vs. real-world emission factors | | | | |
| NO_x | | | | |
| Light-duty | -54% | -36% | -41% | -26% |
| Heavy-duty <20 t | -55% | -47% | -40% | -40% |
| Heavy-duty >20 t | -53% | -47% | -41% | -39% |
| Buses | -54% | -27% | -7% | -22% |
| NO₂ | | | | |
| Light-duty | -91% | -87% | -87% | -86% |
| Heavy-duty <20 t | -44% | -31% | -16% | -25% |
| Heavy-duty >20 t | -30% | -18% | -5% | -13% |
| Buses | -67% | -52% | -44% | -54% |

1) IA is stagnant traffic, IB is normal flow traffic, IC is free flow traffic, II is traffic on rural roads

A partir de los resultados de este estudio se puede concluir que es necesario establecer nuevos límites para disminuir las emisiones de NO_x, ya que las diferencias entre los valores estimados y medidos son de más del 90%.

1.3 Antecedentes nacionales de distribución espacial y temporal en Chile

En el siguiente apartado se divide en tres secciones: distribución espacial y temporal de un inventario de emisiones en Chile; distribución espacial de emisiones en ciudades medianas; y finalmente, distribución espacial en ciudades de emisiones en ciudades grandes.

1.3.1 Distribución espacial y temporal de emisiones en Chile [14]

Actualmente, el tesista Ignacio Suarez de la Universidad Técnica Federico Santa María está trabajando en un modelo de emisiones para desagregar espacial y temporalmente los principales contaminantes producidos por fuentes móviles a lo largo de todo Chile, en su trabajo de titulación “Distribución espacial y temporal del sector transporte en ruta en Chile”

Este trabajo utiliza una proyección de emisiones a nivel nacional del sector transporte entre los años 2000-2050 (ver Figura 1-9). Las emisiones se distribuyen espacialmente en una malla de 0,1[°] x 0,1[°] a través de todo el país, las ciudades y los caminos como objetos principales de distribución espacial diferenciando entre zonas urbanas e interurbanas de cada región y para distintos tipos de vehículos. La desagregación espacial en las zonas urbanas está determinada por la población de los centros urbanos de cada región y luego, utilizando la clasificación de las rutas más los comportamientos de los distintos tipos de vehículos con respecto a estas. La actividad interurbana se distribuye utilizando información de peajes interurbanos más conteos vehiculares en distintas rutas dentro del país. La resolución temporal se estima a partir de los peajes urbanos e interurbanos, encuestas origen-destino con distintos niveles de resolución: anual, mensual, diario y horario.

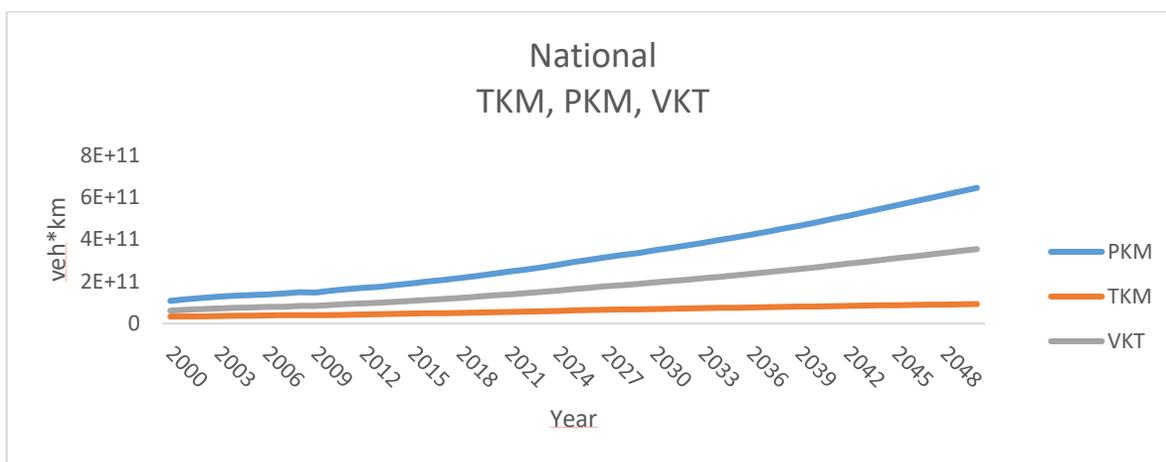


Figura 1-9. Modelo de demanda para el cálculo de emisiones de CO₂, NO_x, MP_{2.5}, BC, CH₄, HC y CO. Extraído de [14].

Los datos anteriores se obtuvieron mediante un modelo de demanda que calcula la demanda de pasajeros-kilómetros (PKM) y toneladas-kilómetros (TKM) y con ambas se obtuvo la actividad del sector transporte de todo el país, a saber VKT.

En este trabajo los contaminantes estudiados son: MP_{2.5}, NO_x, CO, CO₂, CH₄, N₂O y black carbon. Este trabajo utiliza una combinación de software GIS libre, QGIS, el lenguaje de programación R e información las rutas de OpenStreetMaps. De esta manera se obtuvo la distribución de los contaminantes a lo largo de las carreteras del país y dentro de sus ciudades, otorgando información de las zonas más expuestas a emisiones de compuestos contaminantes.

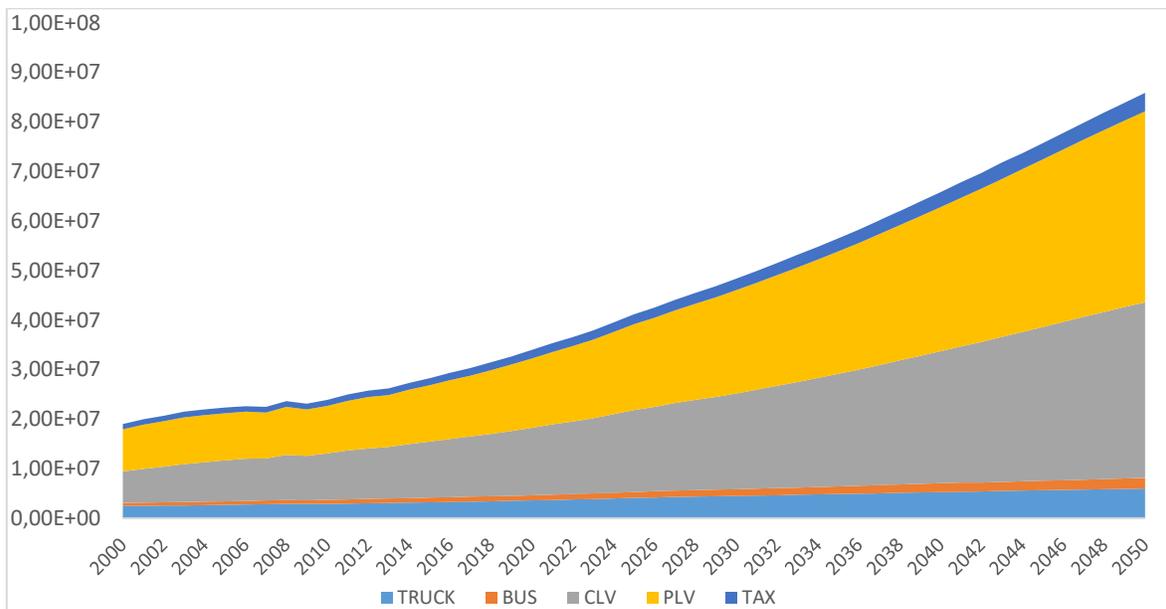


Figura 1-10. Emisiones de CO₂ por tipo de vehículo desde el año 2000 hasta el 2050. Extraído de [14].

En la Figura 1-10 se muestran las emisiones de CO₂ por tipo de vehículo desde el año 2000 hasta el 2050. Las categorías estudiadas son:

- Camiones
- Autobuses
- Vehículos ligeros comerciales
- Vehículos ligeros personales
- Taxis

Se puede observar el aumento constante de las emisiones debido al aumento de la demanda relacionada con la proyección del crecimiento económico.

Por medio de la herramienta Open Streets Maps (OSM) se obtuvo la red vial para cada una de las regiones de Chile (ver Figura 1-11). Posteriormente, utilizando la metodología top-down se distribuyeron las emisiones calculadas anteriormente utilizando la información de la red de carreteras más datos detallados tales como: peaje, población, tipo de carretera, etc.

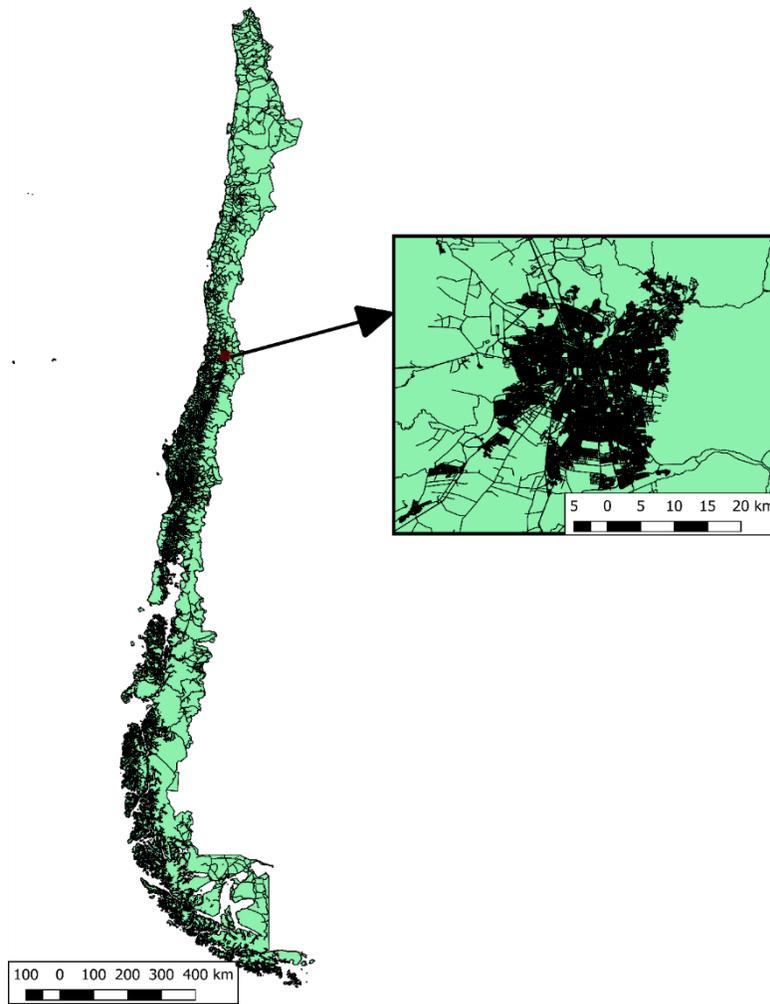


Figura 1-11. Red vial para cada una de las regiones de Chile. Extraído de [14].

Para distribuir correctamente los contaminantes se clasificaron las calles en distintas categorías, como se muestra a continuación:



Figura 1-12. Clasificación de las distintas calles de la zona de estudio. Extraído de [14].

Con estos datos se obtuvo la distribución espacial, tal como se muestra en la Figura 1-15.

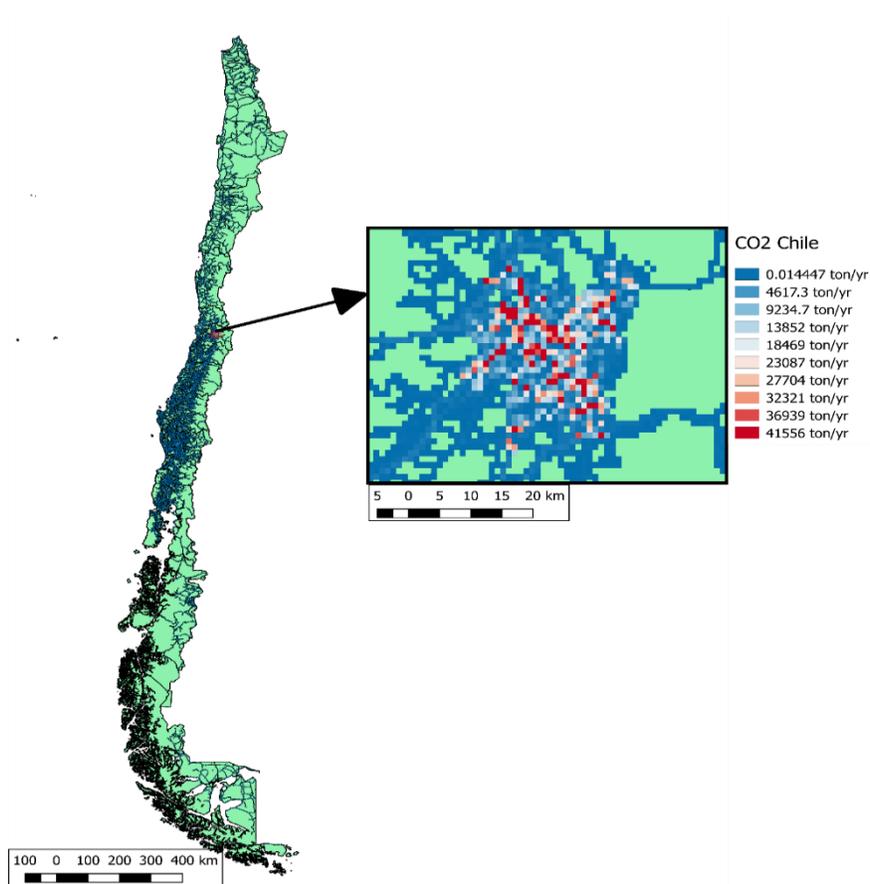


Figura 1-13. Distribución espacial del contaminante CO2 en la Región Metropolitana. Extraído de [14].

Para obtener la distribución temporal, se utilizaron los siguientes perfiles de flujo vehicular:

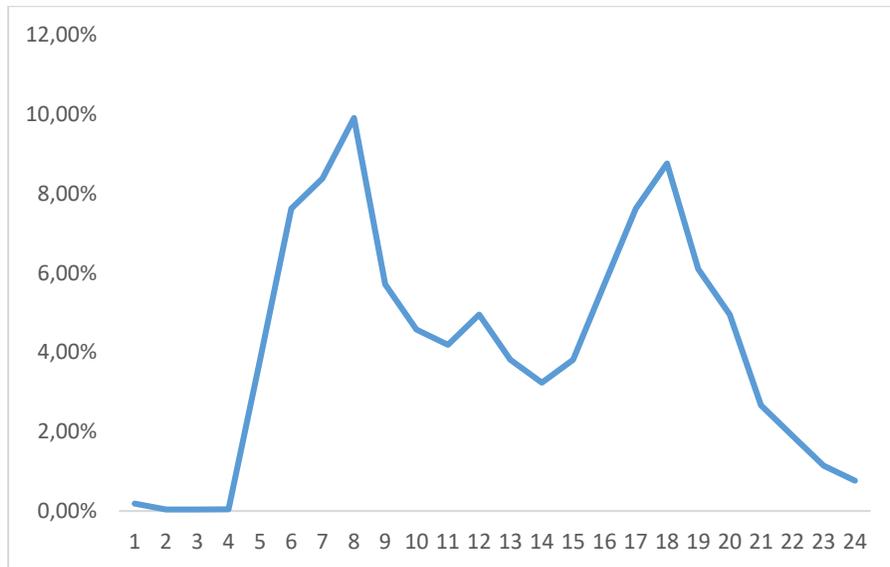


Figura 1-14. Perfil de flujo vehicular en horario laboral para buses. Extraído de [14].

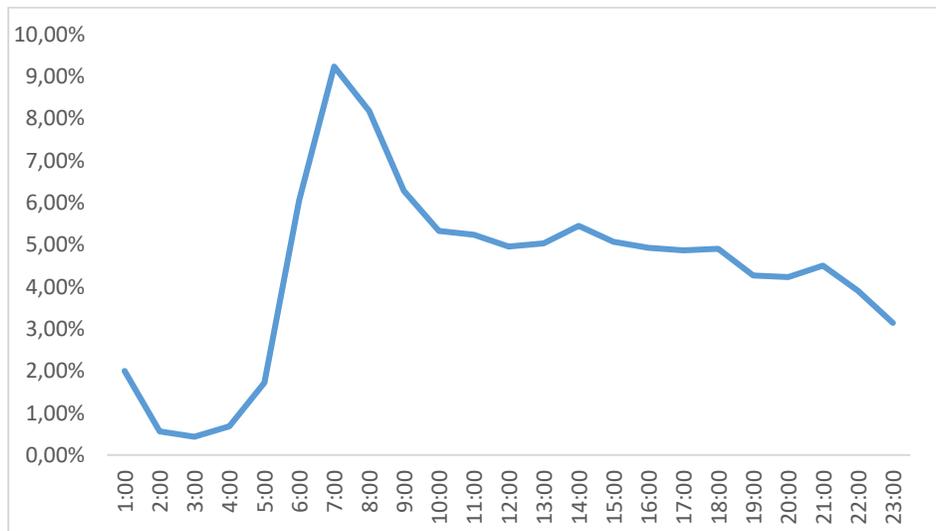


Figura 1-15. Perfil de flujo vehicular en horario laboral para vehículos livianos personales. Extraído de [14].

Con estos perfiles se pudo obtener la desagregación en el tiempo de los distintos contaminantes.

Finalmente, en este estudio se obtuvieron los siguientes resultados totales para el año 2013 en todo el país: 21,5[Gton] de CO₂, 4056[ton] de PM_{2,5}, 2522[ton] de BC, 103[kton] de NO_x. Los resultados nacionales de CO₂ del año 2013 son 21,5[Gton], en comparación con 19,5[Gton] (Agencia Internacional de Energía), 22,2[Gton] (SNI Chile) o 24,1[Gton] (inventario CEDS).

A partir de los resultados del inventario de emisiones es posible observar diferencias de un 9,3% con respecto a los resultados medidos por la Agencia Internacional de Energía; 3,3% con respecto a las mediciones de SNI Chile; y un 12,1% con respecto al inventario CEDS.

1.3.2 Evaluación de un modelo simplificado para la distribución especial de emisiones vehiculares en ciudades medianas [15]

La estimación de las emisiones de tráfico en los países en desarrollo es un tema clave para la gestión de la contaminación en el aire. En la mayoría de los casos, las metodologías arriba-abajo no se pueden aplicar en ciudades medianas debido al costo de los recursos relacionados con su aplicación. En este estudio titulado “Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities (2006)” realizado por académicos de distintas nacionalidades (Mauricio Osses, Devis Tuia, Rainer Zah, entre otros) se evalúa un modelo de estimación de emisiones simplificado (SEEM por sus siglas en inglés).

Para este estudio se pone especial atención a la calidad de los datos de tráfico de entrada. La calidad de estos datos se evalúa aplicando el modelo SEEM en el área urbana de la ciudad de Concepción en Chile según los datos hasta el año 2000 (Figura 1-16).

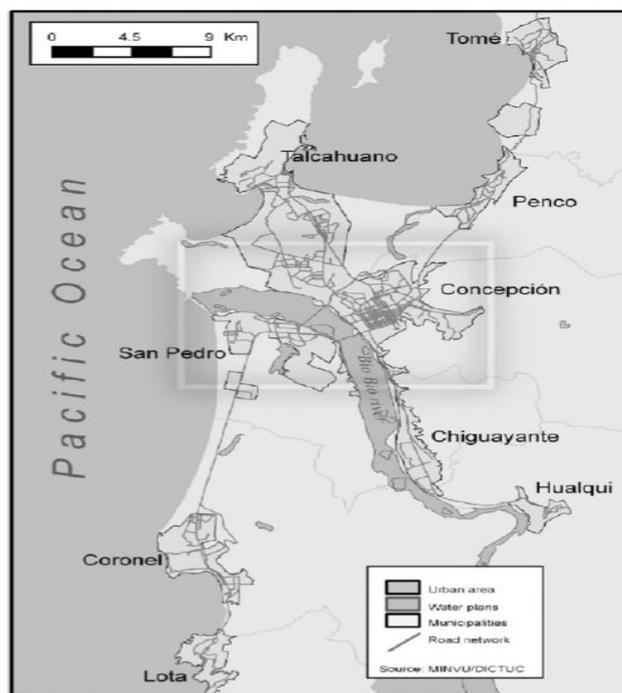


Figura 1-16. Zona urbana de la ciudad de Concepción, Chile. Extraído de [15].

En este modelo se trabajan con las siguientes categorías de vehículos:

Tabla 1-13. Categorías vehiculares utilizadas en el modelo SEEM

| Name | Number of classes | Description |
|------------------------|-------------------|--|
| Passenger cars | 2 | Private passenger cars |
| Taxis | 2 | Basic and collective taxis |
| Commercial vehicles | 3 | Cars or light commercial vehicles |
| Motorcycles | 2 | Motorcycles |
| Public transport buses | 3 | Urban buses |
| Other buses | 2 | Interurban, interregional, interprovincial and rural buses |
| Light trucks | 2 | Light and middle trucks |
| Heavy trucks | 2 | Heavy trucks |

El modelo SEEM estima las emisiones con una precisión cercana al 20%, además de que permite un ahorro significativo de recursos. Los factores de emisión se obtuvieron utilizando la metodología COPERT, obteniendo así las siguientes emisiones:

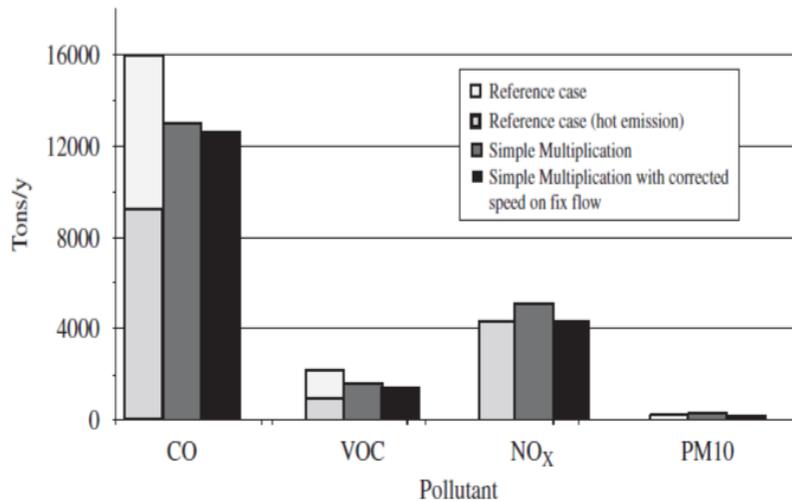


Figura 1-17. Estimación de emisiones utilizando el modelo SEEM. Extraído de [15].

Seguidamente, se obtuvo la actividad anual mediante el modelo SEEM:

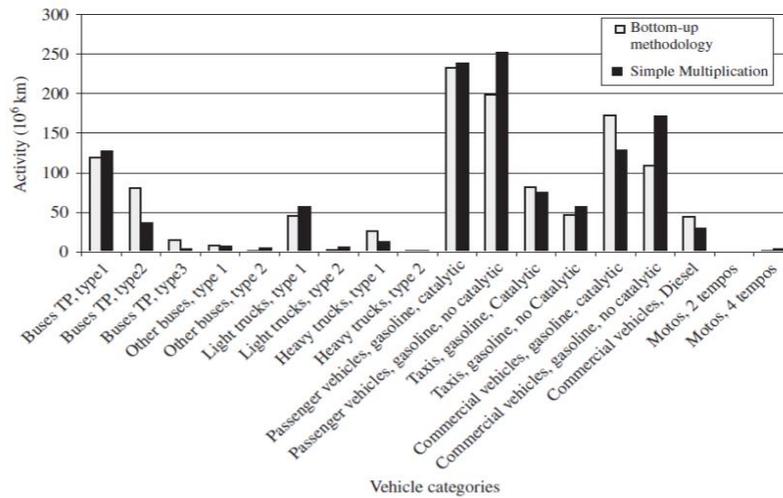


Figura 1-18. Nivel de actividad anual para la ciudad de Concepción mediante el modelo SEEM

Finalmente, para la desagregación de los datos en el espacio se utilizaron técnicas SIG, considerando para ello la distribución en los caminos principales de la ciudad. Obteniendo la Figura 1-19:

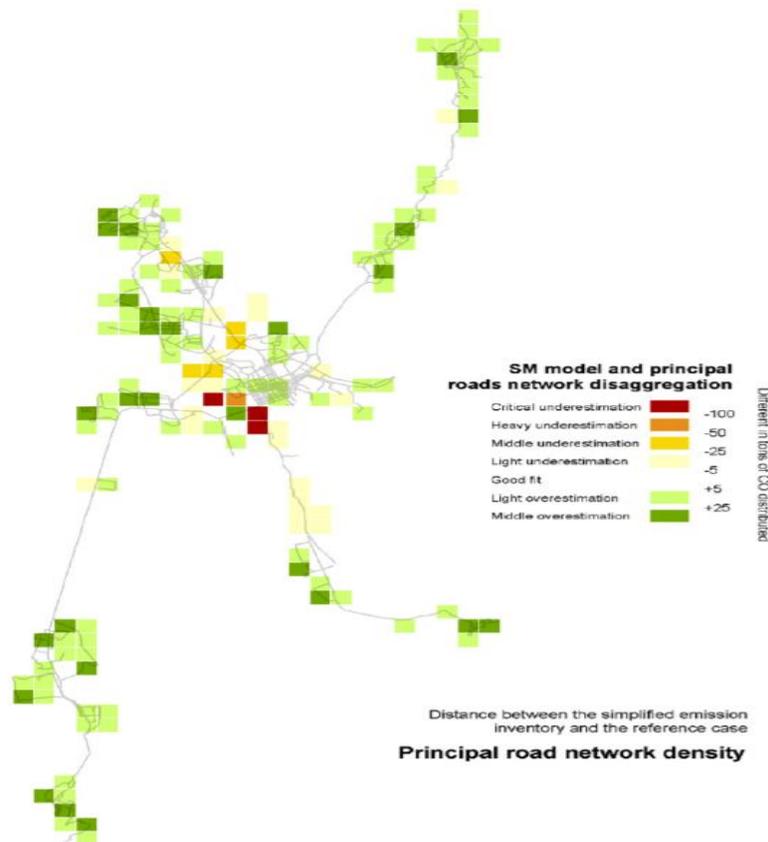


Figura 1-19. Distribución espacial de las emisiones en la ciudad de Concepción utilizando el modelo SEEM. Extraído de [15].

A partir de este trabajo, se puede concluir que el modelo SEEM es altamente dependiente de la calidad de los datos de entrada y en las características particulares de la zona de estudio. Si los datos de entrada son elegidos de manera precisa se pueden obtener buenas estimaciones de emisiones globales a partir del modelo simplificado arriba-abajo, con errores entre 20-30% según la referencia.

1.3.3 Evaluación de un modelo simplificado para la distribución espacial de un inventario de emisiones en ciudades grandes [16]

Este estudio al igual que el anterior, es realizado por académicos de distintas nacionalidades (Mauricio Osses, Devis Tuia, Rainer Zah, entre otros), se titula “Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods (2009)”. El objetivo de este estudio es encontrar un método simple, económico y preciso para evaluar la distribución espacial de las emisiones de tráfico en ciudades sudamericanas. En este estudio, diversos espacios métodos de desagregación de las emisiones de tráfico de monóxido de carbono se presentan y evalúan para la ciudad de Santiago de Chile.

Debido a que en estudios anteriores debido a la utilización de una red de carreteras simplificadas para la distribución de las emisiones es que se obtuvieron datos subestimados en centros urbanos, zonas industriales y carreteras altamente congestionadas, mientras que zonas residenciales resultaron sobreestimadas.

Es por esto, que este estudio utiliza datos más exactos para determinar emisiones (conteos de tráfico, velocidad media de vehículos, etc.), resolviendo parcial o completamente los problemas indicados.

Para poder obtener la distribución en el espacio es necesario en primer lugar conocer el inventario de emisiones de la ciudad de Santiago, el cual se presenta a continuación:

Tabla 1-14. Inventario de Emisiones para la ciudad de Santiago, Chile

| | CO | VOC | NOx |
|--------------------|---------|--------|--------|
| Traffic emissions | 167 000 | 20 000 | 35 000 |
| Stationary sources | 12 000 | 55 000 | 10 000 |
| Total emissions | 179 000 | 75 000 | 45 000 |

Posteriormente, se eligió la red de calles ESTRAUS de la ciudad de Santiago disponible.

Finalmente, se aplicaron distintos métodos simplificados de distribución espacial (según densidad de las calles; según la información obtenida directamente de los modelos de transporte; utilizando clasificación de conteos de tráficos; según el tipo de uso de suelo)

Después de un análisis se proponen dos metodologías que destacan más que las otras: conteo de tráfico y utilizando un mapa de uso de suelo, ambos combinados con una red de carreteras simplificada, ambos con enfoque top-down. Obteniendo así, la siguiente distribución espacial de CO en la ciudad de Santiago:

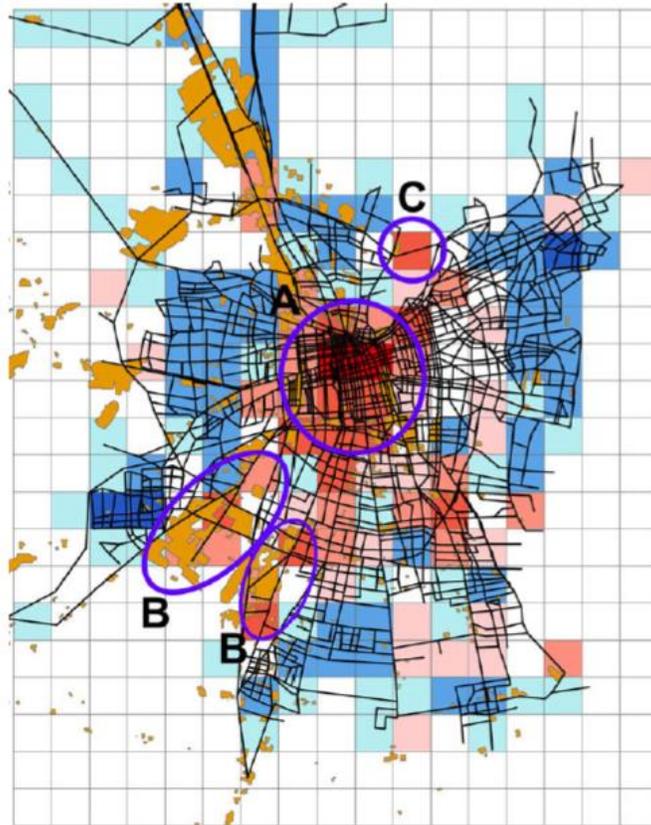


Figura 1-20. Distribución espacial para la ciudad de Santiago. Extraído de [16].

A partir de este trabajo es posible concluir que, utilizando los datos de conteo de tráfico y mapas de uso de suelo, se solucionaron la mayor cantidad de problemas que existían al realizar una distribución espacial de emisiones a una ciudad grande, los cuales se debían principalmente a una sobreestimación de ciertos datos. sobreestimación de ciertos datos, esto combinado con los datos de uso de suelo se solucionaron los problemas. Además de que este método es bastante simple y preciso.

2. Metodología

El siguiente capítulo se divide en tres secciones: en la primera se explica la metodología para la especiación de COVs y NO_x; en la segunda se explica la metodología utilizada para la desagregación espacial de los precursores de ozono: y en la tercera se explica la metodología para la distribución temporal de los contaminantes estudiados.

2.1 Metodología para la especiación de COVs y NO_x

El siguiente apartado se divide en 2 secciones: Obtención de datos del inventario de emisiones de Santiago, y en la obtención de los datos de fracciones másicas de especiación.

2.1.1 Obtención de datos del inventario de emisiones de Santiago

Para la realización de este trabajo los datos sobre el inventario de emisiones relevante para la Región Metropolitana se obtuvieron del estudio “Distribución espacial y temporal del sector transporte en ruta en Chile”, realizado por el tesista Ignacio Suarez de la Universidad Técnica Federico Santa María (en el apartado 1.4.1 se describe brevemente la metodología utilizada para la obtención de este inventario).

En el inventario se encuentran los datos de los siguientes contaminantes: MP_{2.5}, NO_x, CO, CO₂, CH₄, N₂O y black carbon en cada una de las regiones de Chile. Para este estudio solo se utilizarán los datos de los precursores del ozono troposférico (COVs y NO_x) en la región metropolitana para el año 2016, los cuales se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 2-1. Emisiones de NO_x y COV anuales en Santiago

| Contaminante | Emisiones [ton/año] |
|-----------------|---------------------|
| NO _x | 31516,70 |
| COV | 3758,19 |

2.1.2 Obtención de datos de fracciones másicas de especiación

Por otra parte, las fracciones másicas de los componentes de la especiación de los COVs y NO_x se obtuvieron de la base de datos del inventario de emisiones COPERT. A continuación, se presenta la especiación de los COVs según las distintas familias y especies:

Tabla 2-2. Fracciones másicas de los COVs no metánicos según la base de datos de COPERT. Datos extraídos de [17]

| Group | Species | NMVOC Fraction (%wt.) | | | |
|--------------|-----------------|-----------------------|-------------|-----------------|-------|
| | | Petrol 4 Strokes | | Diesel PC & LCV | HDV |
| | | Convent | Euro I & on | IDI & DI | |
| Alkanes | Ethane | 1,65 | 3,19 | 0,33 | 0,03 |
| | Propane | 0,47 | 0,65 | 0,11 | 0,1 |
| | Butane | 2,90 | 5,24 | 0,11 | 0,15 |
| | Isobutane | 1,29 | 1,59 | 0,07 | 0,14 |
| | Pentane | 1,78 | 2,15 | 0,04 | 0,06 |
| | Isopentane | 4,86 | 6,81 | 0,52 | |
| | Hexane | 1,29 | 1,61 | | |
| | Heptane | 0,36 | 0,74 | 0,20 | 0,30 |
| | Octane | 0,56 | 0,53 | 0,25 | |
| | 2-Methylhexane | 0,80 | 1,48 | 0,45 | 0,63 |
| | Nonane | 0,06 | 0,16 | 0,67 | |
| | 2-Methylheptane | | 0,57 | 0,12 | 0,21 |
| | 3-Methylhexane | 0,56 | 1,14 | 0,22 | 0,35 |
| | Decane | 0,22 | 0,19 | 1,18 | 1,79 |
| | 3-Methylheptane | 0,40 | 0,54 | 0,20 | 0,27 |
| | Alkanes C10-C12 | 0,03 | 1,76 | 2,15 | |
| | Alkanes C > 13 | 0,06 | 1,45 | 17,91 | 27,50 |
| Cycloalkanes | All | 0,88 | 1,14 | 0,65 | 1,16 |
| Alkenes | Ethylene | 8,71 | 7,30 | 10,97 | 7,01 |
| | Propylene | 4,87 | 3,82 | 3,60 | 1,32 |
| | Propadiene | | 0,05 | | |
| | 1-Butene | 0,50 | 0,73 | | |
| | Isobutene | 4,21 | 2,22 | 1,11 | 1,70 |
| | 2-Butene | 1,27 | 1,42 | 0,52 | |
| | 1,3-Butadiene | 1,42 | 0,91 | 0,97 | 3,3 |
| | 1-Pentene | 0,09 | 0,11 | | |
| | 2-Pentene | 0,23 | 0,34 | | |
| | 1-Hexene | | 0,17 | | |
| | Dimethylhexene | | 0,15 | | |
| Alkynes | 1-Butine | 0,05 | 0,21 | | |
| | Propine | 0,76 | 0,08 | | |
| | Acetylene | 5,5 | 2,81 | 2,34 | 1,05 |
| Aldehydes | Formaldehyde | 2,08 | 1,7 | 12 | 8,4 |
| | Acetaldehyde | 0,59 | 0,75 | 6,47 | 4,57 |
| | Acrolein | 0,16 | 0,19 | 3,58 | 1,77 |
| | Benzaldehyde | 0,60 | 0,22 | 0,86 | 1,37 |
| | Crotonaldehyde | 0,02 | 0,04 | 1,1 | 1,48 |

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Methacrolein | | 0,05 | 0,77 | 0,86 |
| | Butyraldehyde | | 0,05 | 0,85 | 0,88 |
| | Isobutanaldehyde | | | 2,09 | 0,59 |
| | Propionaldehyde | 0,11 | 0,05 | 1,77 | 1,25 |
| | Hexanal | | | 0,16 | 1,42 |
| | I-Valeraldehyde | | | 0,11 | 0,09 |
| | Valeraldehyde | | 0,01 | 0,41 | 0,4 |
| | O-Tolualdehyde | 0,19 | 0,07 | 0,24 | 0,8 |
| | M-Tolualdehyde | 0,38 | 0,13 | 0,34 | 0,59 |
| | P-Tolualdehyde | 0,19 | 0,06 | 0,35 | |
| Ketones | Acetone | 0,21 | 0,61 | 2,94 | |
| | Methylethylketone | 0,11 | 0,05 | 1,20 | |
| Aromatics | Toluene | 12,84 | 10,98 | 0,69 | 0,01 |
| | Ethylbenzene | 4,78 | 1,89 | 0,29 | |
| | M,P-Xylene | 6,66 | 5,43 | 0,61 | 0,98 |
| | O-Xylene | 4,52 | 2,26 | 0,27 | 0,40 |
| | 1,2,3 Trimethylbenzene | 0,59 | 0,86 | 0,25 | 0,30 |
| | 1,2,4 Trimethylbenzene | 2,53 | 4,21 | 0,57 | 0,86 |
| | 1,3,5 Trimethylbenzene | 1,11 | 1,42 | 0,31 | 0,45 |
| | Styrene | 0,57 | 1,01 | 0,37 | 0,56 |
| | Benzene | 6,83 | 5,61 | 1,98 | 0,07 |
| | C9 | 3,12 | 4,21 | 0,78 | 1,17 |
| | C10 | | 3,07 | | |
| | C > 13 | 6,01 | 3,46 | 13,37 | 20,37 |
| Totals (all NMVOC Species) | Totals (all NMVOC Species) | 99,98 | 99,65 | 99,42 | 96,71 |

En la siguiente Tabla se muestra la especiación de los NO_x y la fracción de cada uno de ellos, según las distintas categorías vehiculares y tecnologías:

Tabla 2-3. Especiación NO_x para las distintas categorías vehiculares propuestas por COPERT. Datos extraídos de [17]

| Category | Emission Standard | f-NO ₂ (%) | | | f-NO (%) | | |
|------------|-------------------|-----------------------|-----------|-----------------|------------|-----------|-----------------|
| | | AEAT Study | TNO Study | Suggested Value | AEAT Study | TNO Study | Suggested Value |
| Petrol PCs | Pre-Euro | 4 | 5 | 4 | 96 | 95 | 96 |
| | Euro 1-Euro 2 | 4 | 5 | 4 | 96 | 95 | 96 |

| | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|----|-------|----|----|----|----|
| | Euro 3 - Euro 4 | 3 | 5 | 3 | 97 | 95 | 97 |
| | Euro 5 | 3 | 5 | 3 | 97 | 95 | 97 |
| | Euro 6 up to 2016 | - | - | 3 | - | - | 97 |
| | Euro 2017-2019 | - | - | 3 | - | - | 97 |
| Diesel PCs | Pre-Euro | 11 | 20 | 15 | 89 | 80 | 85 |
| | Euro 1-Euro 2 | 11 | 20 | 13 | 89 | 80 | 87 |
| | Euro 3 | 25 | 40 | 27 | 75 | 60 | 73 |
| | Euro 4 | 55 | 40-70 | 46 | 45 | - | 54 |
| | Euro 5 | 55 | 70 | 33 | 45 | 30 | 67 |
| | Euro 6 up to 2016 | - | - | 30 | - | - | 70 |
| | Euro 2017-2019 | - | - | 30 | - | - | 70 |
| Petrol LCVs | Pre-Euro | - | 5 | 4 | - | 95 | 96 |
| | Euro 1-Euro 2 | - | 5 | 4 | - | 95 | 96 |
| | Euro 3 - Euro 4 | - | 5 | 3 | - | 95 | 97 |
| | Euro 5 | - | 5 | 3 | - | 95 | 97 |
| | Euro 6 up to 2017 | - | - | 3 | - | - | 97 |
| | Euro 6 2018-2020 | - | - | 3 | - | - | 97 |
| Diesel LCVs | Pre-Euro | - | 20 | 15 | - | 80 | 85 |
| | Euro 1-Euro 2 | - | 20 | 13 | - | 80 | 87 |
| | Euro 3 | - | 40 | 27 | - | 60 | 73 |
| | Euro 4 | - | 40-70 | 46 | - | - | 54 |
| | Euro 5 | - | 70 | 33 | - | 30 | 67 |
| | Euro 6 up to 2017 | - | - | 30 | - | - | 70 |
| | Euro 6 2018-2019 | - | - | 30 | - | - | 70 |
| HDVs | Pre-Euro | 11 | 10 | 11 | 89 | 90 | 89 |
| | Euro 1-Euro 2 | 11 | 10 | 11 | 89 | 90 | 89 |
| | Euro 3 | 14 | 10 | 14 | 86 | 90 | 86 |
| | Euro 4 | 10 | 10 | 10 | 90 | 90 | 90 |
| | Euro 5 | - | 10 | 12 | - | 90 | 88 |
| | Euro 6 | - | - | 8 | - | - | 92 |

Como se adelantó en el capítulo anterior, la Tabla 2-3 proporciona el rango de valores f-NO₂ (expresado como porcentaje) desarrollado en el marco de dos estudios relevantes en Europa: El estudio AEAT (2007) y el estudio TNO (Smit, 2007). Además, la Tabla incluye los valores sugeridos para su uso.

2.2 Metodología para la desagregación espacial

El siguiente apartado se divide en 3 secciones: Clasificación de las vías; Categorización de la ciudad en tres sectores; y utilización del software QGIS.

2.2.1 Clasificación de las vías y creación ruta de vehículos pesados

Con el fin de evitar una subestimación o sobrestimación de emisiones en ciertas calles de Santiago, es que para efectos de este estudio que las vías de Santiago se dividen en 7 categorías:

- Rutas primarias
- Rutas secundarias
- Rutas terciarias
- Rutas residenciales
- Autopistas
- Rutas de buses
- Rutas de vehículos pesados

La información de las vías principales, secundarias, terciarias, residenciales y vías exclusivas de buses se obtuvieron de los mapas vectoriales disponibles en la página de la Biblioteca del Congreso Nacional, cuyos datos responden al año 2008, 2009, y en algunos casos al 2010. Sin embargo, el archivo referente al tránsito de vehículos pesados (principalmente camiones) fue creado por el autor, ya que no se encuentra una base de datos oficial al respecto, para ello se utilizó como guía el procedimiento explicado en el informe de la subsecretaría de transportes “Análisis de regulaciones sobre el transporte de carga urbano y su impacto en la cadena logística [18]”.

Es necesario destacar, que se desconoce el criterio utilizado por los encargados del informe de la Biblioteca del Congreso Nacional para clasificar las rutas en principales, secundarias y terciarias. Si se basaron en la longitud y velocidad promedio de circulación de cada vía, en ese caso se puede sobreestimar las emisiones en ciertos sectores de la ciudad, ya que puede haber zonas con alta densidad de vías secundarias, pero que se caracterizan por bajo flujo vehicular. En este sentido, el método más confiable sería categorizar las rutas según flujo vehicular.

Ahora bien, para la creación de la ruta de vehículos pesados se realizó un listado de ejes viales más utilizados y que fueron declarados como ruta simplificada por los conductores de los camiones encuestados en la Encuesta Origen Destino de viajes de Santiago del año 2012

(EOD-Santiago), este listado fue ordenado según la frecuencia de veces que fue mencionado. Complementariamente, se incorporaron los ejes que sirven como distribuidores de los principales accesos a la ciudad (Autopista Los Libertadores, Ruta 5 Norte, Ruta 68, Autopista del Sol, Camino a Melipilla y Ruta 5 Sur), considerando también las posibles rutas alternativas que utilizan para acceder a determinados sectores (camino a Lonquén, Pedro Aguirre Cerda, Rinconada, Los Morros).

Seguidamente, se analizaron los principales emplazamientos de centros industriales y comerciales (centros comerciales, mercados y grandes supermercados), y se identificaron los ejes importantes en donde se desplaza la carga.

Luego, se agregaron los ejes viales declarados como relevantes por 29 municipalidades utilizados para el transporte de carga (estos datos se obtuvieron directamente del informe de la subsecretaría de transportes).

Finalmente, se realizó una superposición de todos los datos mencionados anteriormente, obteniendo así la red que se muestra en la Figura 2-1.

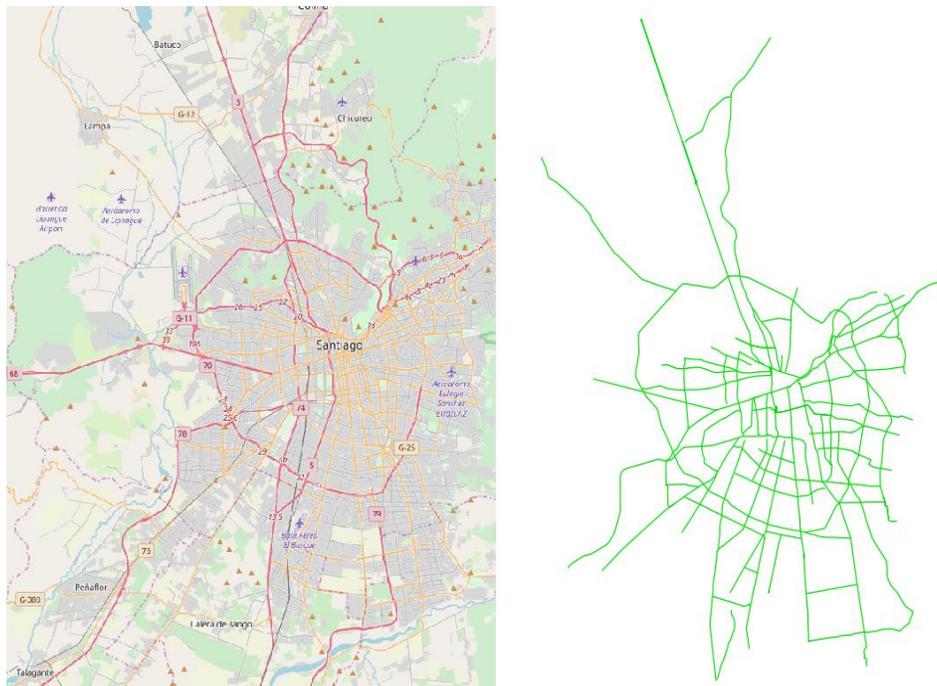


Figura 2-1. Ruta de vehículos pesados en la ciudad de Santiago

2.2.2 Categorización de la ciudad en tres sectores según perfil vehicular y ponderación de vías

La siguiente etapa de este trabajo consiste en dividir Santiago en 3 sectores, de acuerdo con el perfil vehicular diario en cada comuna. Para ello, se tomó como referencia el trabajo

“Análisis del impacto de la restricción vehicular en flujo vial, emisiones y calidad del aire en la Región Metropolitana de Santiago” (Gonzalo Antúnez Retamal, 2018) [19]”

Tabla 2-4. Categorización de las comunas de Santiago según perfil vehicular

| Zona | Características | Descripción del perfil de flujos | Comunas de la RM de Santiago |
|----------|---------------------------|--|--|
| Zona I | Sector comercial | Flujo casi constante durante gran parte del día | Santiago Centro |
| Zona II | Comuna promedio | Horario punta mañana y punta tarde definidos | Demás comunas de RM de Santiago más Puente Alto y San Bernardo |
| Zona III | Sector con altos ingresos | Horario punta mañana y punta tarde bien definidos, con un incremento en los flujos durante horario de almuerzo | Lo Barnechea, Vitacura y las Condes. |

Se pueden observar las fracciones vehiculares diarias para cada hora del día para cada uno de los sectores en las siguientes Figuras:

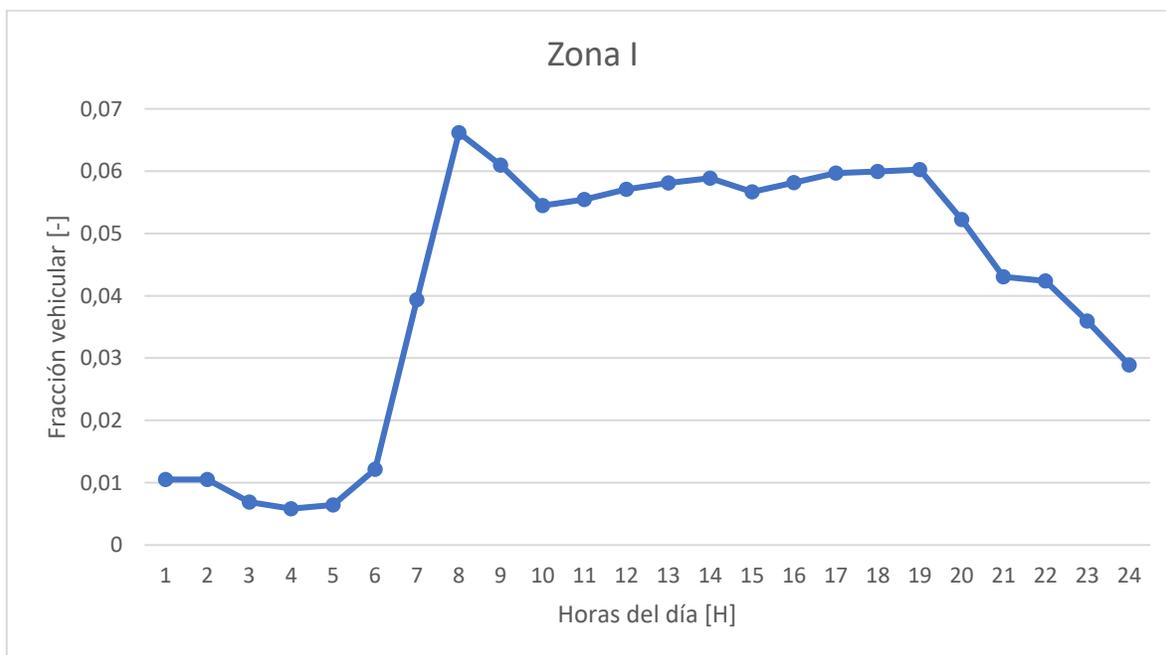


Figura 2-2. Fracción vehicular diaria para la zona I de Santiago

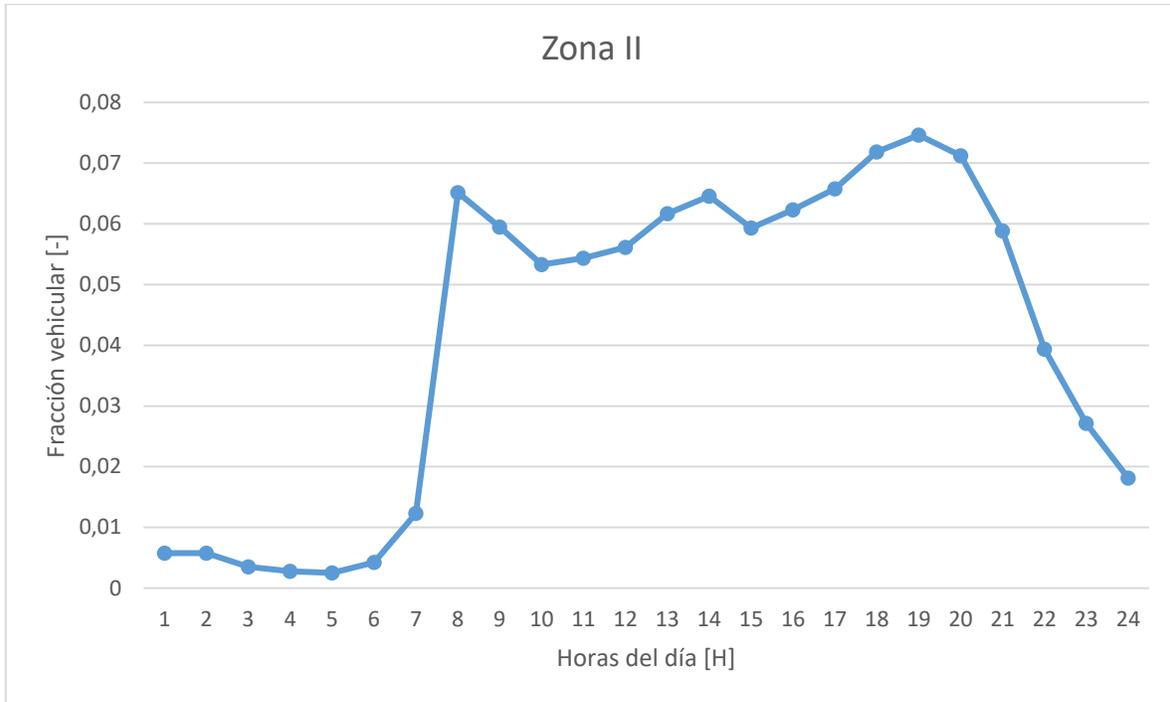


Figura 2-3. Fracción vehicular diaria para la zona II de Santiago

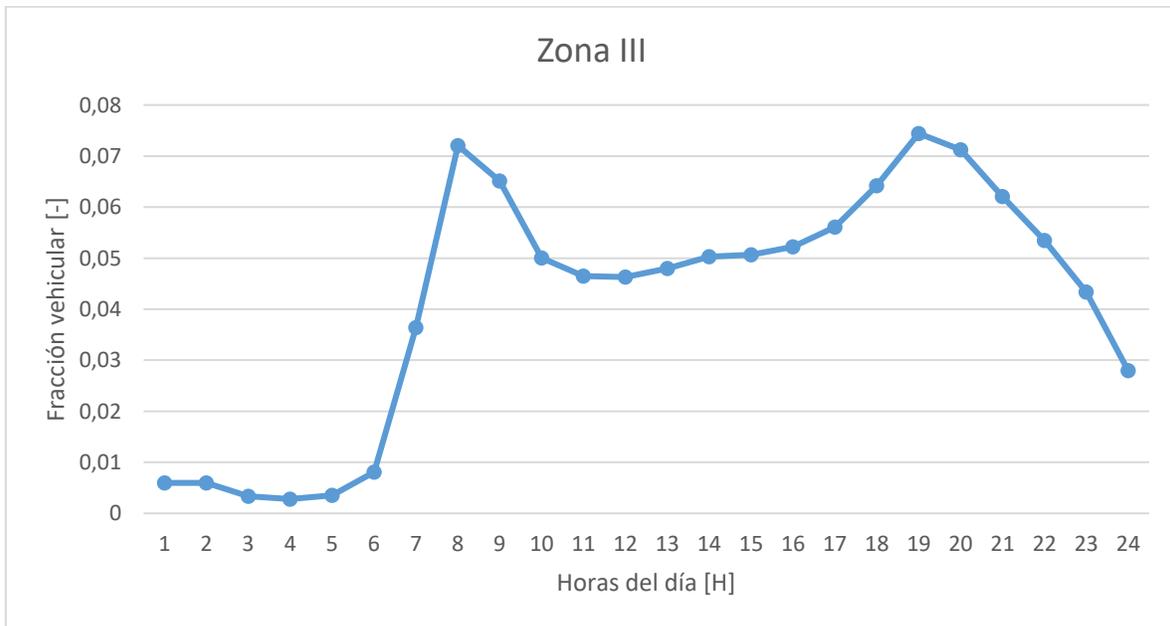


Figura 2-4. Fracción vehicular para la zona III de Santiago

Con el detalle de estos datos, y según la información obtenida del instituto nacional de estadística sobre el anuario del parque vehicular en Santiago para el año 2016 se calculó el porcentaje de vehículos por comuna como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 2-5. Número de vehículos por comunas de la Región Metropolitana. Datos extraídos de [20].

| Provincia | Comunas | Vehículos |
|--------------|---------------------|------------------|
| Santiago | Santiago | 78.507 |
| | Cerrillos | 32.843 |
| | Cerro Navia | 20.811 |
| | Conchalí | 29.031 |
| | El Bosque | 34.474 |
| | Estación Central | 36.035 |
| | Huechuraba | 30.014 |
| | Independencia | 22.228 |
| | La Cisterna | 21.259 |
| | La Florida | 84.108 |
| | La Granja | 16.046 |
| | La Pintana | 22.950 |
| | La Reina | 47.218 |
| | Las Condes | 112.582 |
| | Lo Barnechea | 72.677 |
| | Lo Espejo | 14.528 |
| | Lo Prado | 21.185 |
| | Macul | 38.394 |
| | Maipú | 115.262 |
| | Ñuñoa | 59.709 |
| | Pedro Aguirre Cerda | 21.379 |
| | Peñalolén | 121.802 |
| | Providencia | 88.637 |
| | Pudahuel | 32.608 |
| | Quilicura | 54.582 |
| | Quinta Normal | 29.465 |
| | Recoleta | 28.189 |
| | Renca | 28.895 |
| | San Joaquín | 33.924 |
| | San Miguel | 34.468 |
| San Ramón | 22.231 | |
| Vitacura | 97.423 | |
| Cordillera | Puente Alto | 117.745 |
| Maipo | San Bernardo | 46.473 |
| Total | | 1.667.682 |

Estos resultados se resumieron para las tres zonas de estudio como se muestra en la Tabla 2-7:

Tabla 2-6. Porcentaje de vehículos por zona de estudio

| Zonas | Porcentaje de vehículos |
|----------|-------------------------|
| Zona I | 0,047 |
| Zona II | 0,783 |
| Zona III | 0,170 |

Además, mediante la información obtenida de la tesis “Distribución espacial y temporal del sector transporte en ruta en Chile” se conocen los porcentajes de circulación de vehículos por cada tipo de ruta, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 2-7. Porcentaje de circulación de vehículos por tipo de ruta

| Tipos de Ruta | Porcentaje de vehículos |
|---------------|-------------------------|
| Primaria | 0,454 |
| Secundaria | 0,199 |
| Terciaria | 0,096 |
| Autopista | 0,241 |
| Residencial | 0,009 |

Con los datos presentados en las Tablas 2-6, 2-7 y 2-8 se obtienen los pesos ponderados para cada tipo de vehículo según la vía en la que circulan:

Tabla 2-8. Ponderación de las vías en la zona I

| Tipo de vía – Zona I | Otros vehículos | Buses | Vehículos pesados |
|----------------------|-----------------|-------|-------------------|
| Primaria | 0,021 | 0,000 | 0,000 |
| Secundaria | 0,009 | 0,000 | 0,000 |
| Terciaria | 0,005 | 0,000 | 0,000 |
| Autopista | 0,011 | 0,000 | 0,000 |
| Residencial | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Buses | 0,000 | 0,047 | 0,000 |
| HDV | 0,000 | 0,000 | 0,047 |

Tabla 2-9. Ponderación de las vías en la zona II

| Tipo de vía – Zona II | Otros vehículos | Buses | Vehículos pesados |
|-----------------------|-----------------|-------|-------------------|
| Primaria | 0,356 | 0,000 | 0,000 |
| Secundaria | 0,156 | 0,000 | 0,000 |
| Terciaria | 0,075 | 0,000 | 0,000 |
| Autopista | 0,189 | 0,000 | 0,000 |
| Residencial | 0,007 | 0,000 | 0,000 |
| Buses | 0,000 | 0,783 | 0,000 |
| HDV | 0,000 | 0,000 | 0,783 |

Tabla 2-10. Ponderación de las vías en la zona III

| Tipo de vía – Zona III | Otros vehículos | Buses | Vehículos pesados |
|------------------------|-----------------|-------|-------------------|
| Primaria | 0,077 | 0,000 | 0,000 |
| Secundaria | 0,034 | 0,000 | 0,000 |
| Terciaria | 0,016 | 0,000 | 0,000 |
| Autopista | 0,041 | 0,000 | 0,000 |
| Residencial | 0,002 | 0,000 | 0,000 |
| Buses | 0,000 | 0,170 | 0,000 |
| HDV | 0,000 | 0,000 | 0,170 |

2.2.3 Utilización del software QGIS

Para poder distribuir espacialmente las emisiones por fuentes móviles se utiliza el software libre QGIS, ya que éste tiene la capacidad de entregar resultados sin la necesidad de información muy compleja. Cabe destacar que para la aplicación de este modelo se utilizó la aproximación top-down.

En primer lugar, se procese a importar cada una de las capas correspondientes a las distintas vías de la zona de estudio (Figura 2-2).

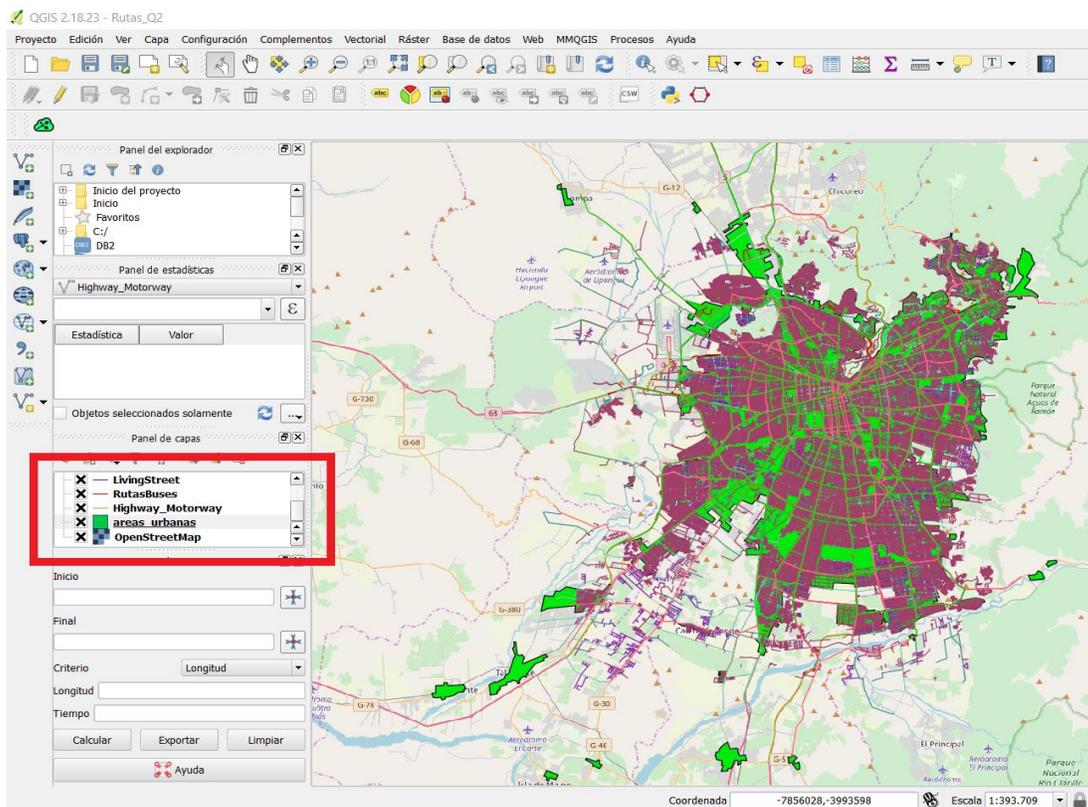


Figura 2-5. Importación de las capas de la red vial.

Para obtener la distribución espacial se creó una malla de $0,01 \times 0,01 [^\circ]$ sobre la ciudad de Santiago (Figura 2-6).

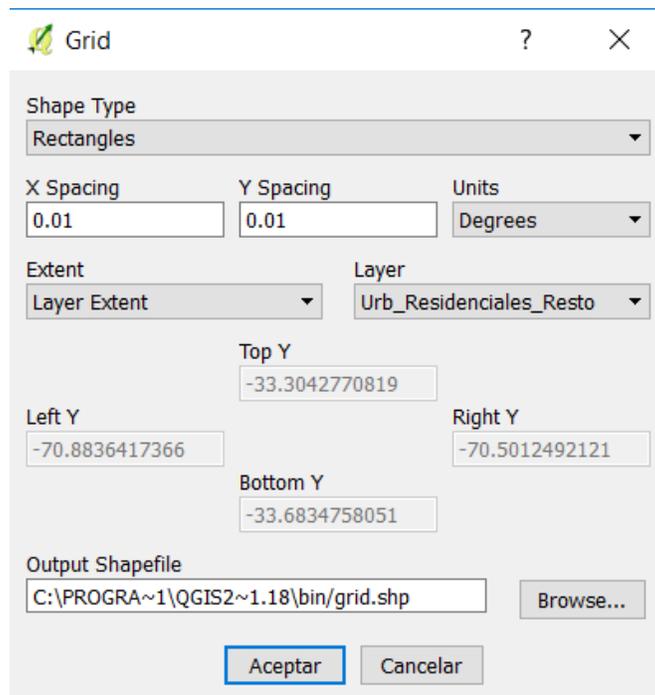


Figura 2-6. Creación de la malla

Una vez creada la malla, se procedió a utilizar la función “sumar longitudes de líneas” para obtener la longitud de las vías que se encuentran dentro de cada celda, cuyos valores se guardan internamente en forma matricial. Estas longitudes se comparan con la longitud total de la vía analizada, de manera de transformar cada celda en un factor. Este factor posteriormente se multiplica por la contribución de emisiones correspondiente a cada vía y categoría, obteniendo de esta manera la distribución espacial.

Finalmente, para poder sumar cada una de las contribuciones de cada categoría vehicular y cada una de las vías, es necesario transformar cada resultado anterior en un raster, ya que QGIS tiene una función para poder sumarlos, y de esta manera superponer cada una de las contribuciones.

2.3 Metodología para la distribución temporal

Para distribuir de manera temporal las emisiones se utilizó como base la información del inventario de emisiones resumido en las Tablas 2-1 y 2-2 y el perfil diario del flujo vehicular para cada día “tipo” detallado en el informe de la secretaría de planificación de transporte titulado como “Actualización de perfiles de flujo del modelo modem para el gran Santiago y regiones”, los cuales se presentan a continuación:

- Día laboral (de lunes a jueves);
- Viernes,
- Sábado, y

- Domingo.

Los datos utilizados son característicos de cinco conglomerados urbanos: Rancagua-Machalí, Valdivia, Osorno, Gran Valparaíso y Gran Santiago, siendo este último el que forma parte de este estudio [21].

En la siguiente Tabla se muestra el esquema de horario de medición. En esta Tabla se indica, además, la codificación asignada a los distintos periodos punta definidos según distintos intervalos horarios del día:

Tabla 2-11. Definición de periodos de medición y sus respectivos horarios. Datos extraídos de [21]

| Día | Período | Código | Horario de Medición |
|------------------------------|----------------|--------|---------------------|
| Laboral (incluyendo viernes) | Punta mañana | PM | 7:30 – 9:00 |
| | Fuera de Punta | FP | 10:30 – 12:00 |
| | Punta mediodía | PMD | 13:00 – 15:00 |
| | Punta tarde | PT | 18:30 – 20:30 |
| | Punta nocturna | PNoct | 22:00 – 00:00 |
| Sábado | Mañana | SM | 10:30 – 12:00 |
| | Tarde | ST | 17:00 – 19:00 |
| | Noche | SN | 20:00 – 22:00 |
| Domingo | Mañana | DM | 10:00 – 12:00 |
| | Noche | DN | 20:00 – 22:00 |

A continuación, se muestran los 30 puntos de mediciones de flujo vehicular, los cuales se distribuyen en la conurbación Rancagua-Machalí:

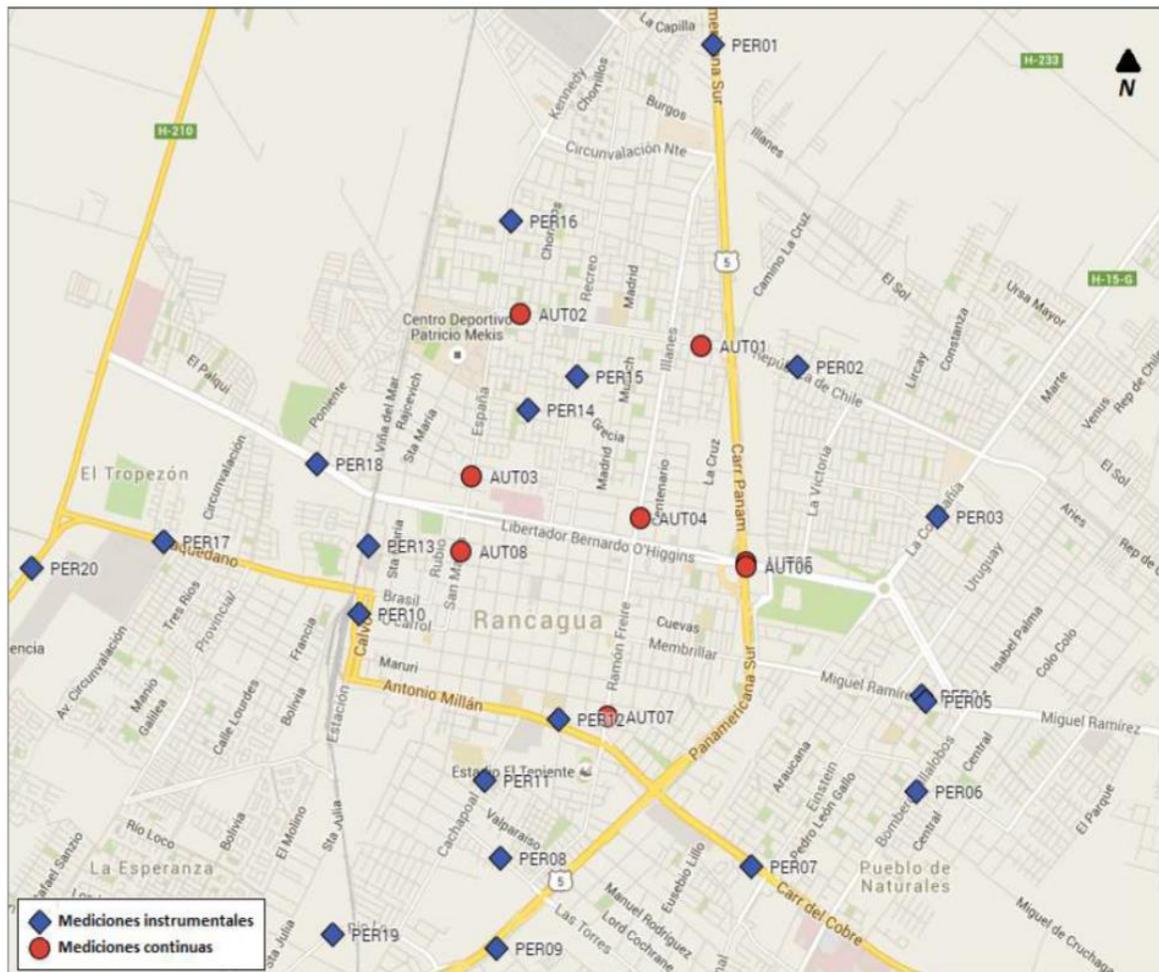


Figura 2-7. Puntos de control para mediciones de flujo vehicular, Rancagua-Machalí.

Los puntos de la Figura 2-7 se detallan en la siguiente Tabla:

Tabla 2-12. Puntos de medición de flujo vehicular, Rancagua-Machalí. Datos extraídos de [21].

| ID | Eje | Desde | Hasta | Sentido |
|-------|------------------------|------------------|----------------------|---------|
| AUT01 | Av. República de Chile | Centenario | Obispo Larraín | PO |
| AUT02 | Av. República de Chile | Chorrillos | Av. España | OP |
| AUT03 | Av. España | 1 y 2 de Octubre | Alameda B. O'Higgins | NS |
| AUT04 | Av. Illanes | Alameda | 1 y 2 de Octubre | SN |
| AUT05 | Alameda B. O'Higgins | La Cruz | La Victoria | PO |
| AUT06 | Alameda B. O'Higgins | La Victoria | La Cruz | OP |
| AUT07 | Freire | Ibieta | Millán | NS |
| AUT08 | Av. San Martín | Cuevas | Alameda B. O'Higgins | SN |
| AUT09 | Av. San Juan | 1 Norte | Lo Castillo | OP |

| | | | | |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|----|
| AUT10 | Av. San Juan | Lo Castillo | 1 Norte | PO |
| PER01 | Ruta 5 Sur | Kennedy | Burgos | NS |
| PER02 | Av. República de Chile | La Compañía | La Victoria | OP |
| PER03 | Av. La Compañía | Av. República de Chile | Alameda B. O'Higgins | NS |
| PER04 | Av. Miguel Ramirez | Av. Bombero Villalobos | Einstein | OP |
| PER05 | Av. Miguel Ramirez | Einstein | Av. Bombero Villalobos | PO |
| PER06 | Av. Bombero Villalobos | Carretera del Cobre | Av. Miguel Ramirez | SN |
| PER07 | Carretera el Cobre | Ruta 5 Sur | Av. Bombero Villalobos | PO |
| PER08 | Av. Las Torres | Ruta 5 Sur | Av. Cachapoal | OP |
| PER09 | Ruta 5 Sur | Av. Cachapoal | Av. Las Torres | SN |
| PER10 | Estación | Carrera Pinto | Baquedano | NS |
| PER11 | Av. Cachapoal | Millán | Av. Las Torres | NS |
| PER12 | Millán | Freire | Cachapoal | OP |
| PER13 | Viña del Mar | Alameda B. O'Higgins | Baquedano | NS |
| PER14 | Grecia | Av. Recreo | Av. España | OP |
| PER15 | Av. Recreo | Grecia | Alameda B. O'Higgins | NS |
| PER16 | Av. Kennedy | Av. República de Chile | Circunvalación | SN |
| PER17 | Baquedano | Salvador Allende | Provincial | PO |
| PER18 | Alameda B. O'Higgins | Circunvalación | Viña del Mar | PO |
| PER19 | Camino a Doñihue | Ruta H-190 | Ruta H-200 | SN |
| PER20 | Ruta H-30 | Independencia Airport | Baquedano | SN |

La Tabla 2-11 presenta el flujo total diario (24 horas) para cada estación instrumental, considerando un día promedio entre lunes y jueves, el viernes, el sábado y el domingo. Se observa que, en promedio para la ciudad, el día viernes es el que presenta un mayor flujo vehicular, con 191.998 vehículos contabilizados durante las 24 horas de medición.

Tabla 2-13. Flujo vehicular total por punto y tipo de día, Rancagua-Machalí. Datos extraídos de [21].

| ID | Eje | Sentido | Tipo día | | | |
|----------------------|------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | Lunes - Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
| AUT01 | Av. República de Chile | PO | 17.642 | 19.452 | 15.465 | 12.973 |
| AUT02 | Av. República de Chile | OP | 10.749 | 11.910 | 9.495 | 8.512 |
| AUT03 | Av. España | NS | 11.208 | 12.137 | 9.819 | 6.988 |
| AUT04 | Av. Illanes | SN | 11.406 | 12.704 | 9.865 | 7.606 |
| AUT05 | Alameda B. O'Higgins | PO | 30.962 | 34.531 | 30.559 | 25.641 |
| AUT06 | Alameda B. O'Higgins | OP | 24.480 | 27.601 | 23.081 | 21.208 |
| AUT07 | Freire | NS | 11.995 | 13.291 | 8.229 | 5.716 |
| AUT08 | Av. San Martín | SN | 20.434 | 22.263 | 18.631 | 11.900 |
| AUT09 | Av. San Juan | OP | 16.633 | 18.858 | 17.747 | 13.790 |
| AUT10 | Av. San Juan | PO | 17.238 | 19.251 | 17.745 | 13.774 |
| Total general | | | 172.747 | 191.998 | 160.636 | 128.108 |

El flujo total diario según tipo de día y punto se ilustra en la Figura 2-8. Se observa que, para casi todos los puntos, el día viernes (curva roja) representa el máximo flujo diario, y el día domingo (curva morada) el menor. En efecto, entre el viernes y el día promedio originado de los otros cuatro días hábiles de la semana se observa una disminución global del 10% del flujo diario. Por otro lado, comparando el domingo con el viernes, la disminución global alcanza un 33%.

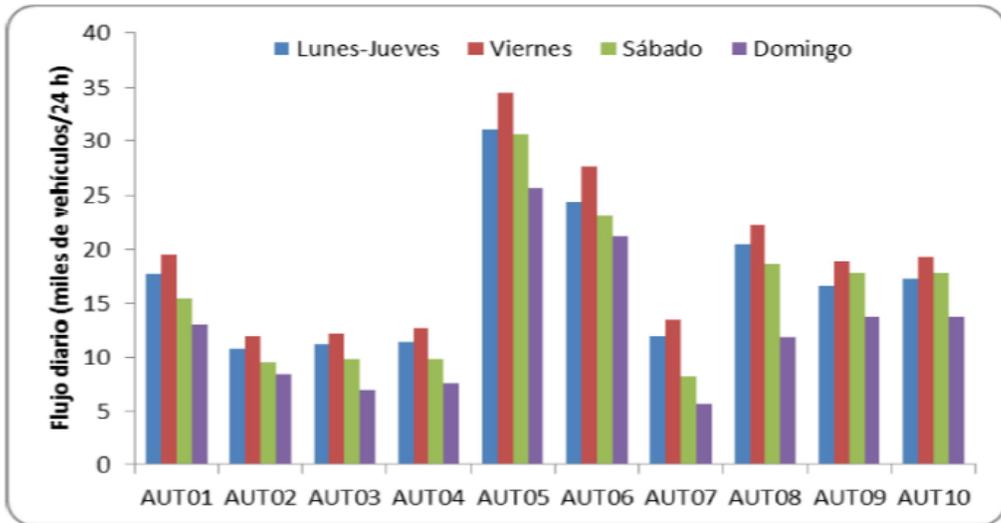


Figura 2-8. Flujo vehicular por punto y tipo de día, Rancagua-Machalí. Extraído de [21].

Respecto del horario del día, la Figura 2-9 ilustra la evolución global del flujo registrado en Rancagua, considerando todos los puntos en conjunto.

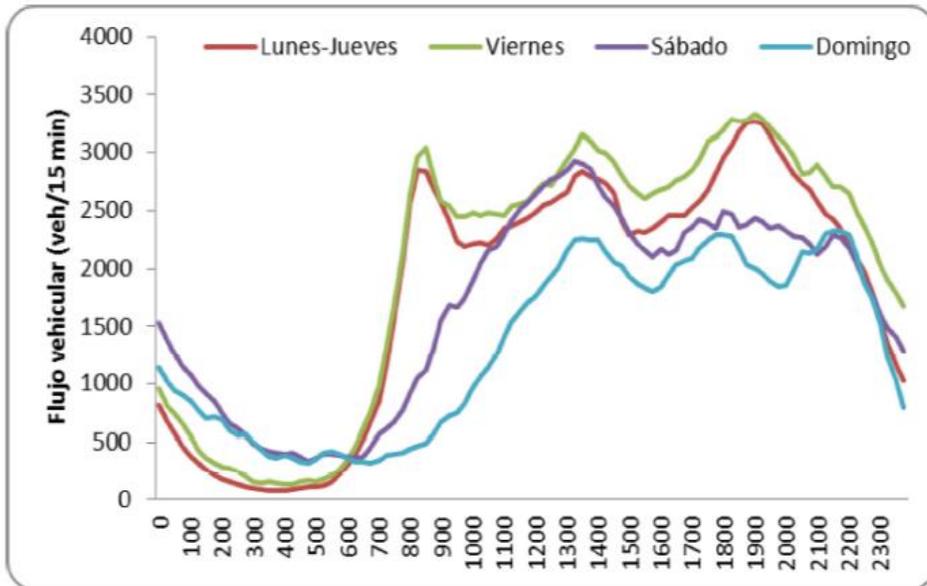


Figura 2-9. Evolución horaria del flujo vehicular total, Rancagua-Machalí. Extraído de [21].

3. Resultados

El siguiente capítulo se divide en cuatro secciones: en las secciones uno y dos se muestran los resultados de la especiación de COVs y NO_x respectivamente; en las secciones tres y cuatro se muestra la distribución espacial y la distribución temporal de los contaminantes respectivamente.

3.1 Resultados especiación COVs

A partir del inventario de emisiones y la especiación otorgada por la metodología de COPERT, es posible presentar las emisiones de COVs del año 2016 para la Región Metropolitana dividida en distintos grupos vehiculares. En el caso de las emisiones de COV la categorización es bastante general y no incluye la distinción entre los distintos tipos de Euro, ni tampoco para el tipo de inyección en el caso de los vehículos diésel. A continuación, se presentan las emisiones de COVs según las distintas categorías vehiculares:

Tabla 3-1. Emisiones COVs según las categorías utilizadas en COPERT para el año 2016

| Categoría Vehicular | Emisiones [ton/año] |
|----------------------------|---------------------|
| Petrol Conventional | 1467,49 |
| Petrol Euro I & On | 1172,93 |
| Diesel PC & LCV (DI & IDI) | 389,18 |
| HDV | 728,58 |
| Total COV | 3758,19 |

Al combinar los resultados anteriores con las fracciones másicas de los contaminantes entregadas por COPERT (Tabla 2-2) se presenta la especiación química de los COVs según tipo de vehículo y tecnología. Todos los datos son presentados en toneladas anuales:

Tabla 3-2. Especiación química de los COVs para distintas categorías vehiculares

| Group | Species | Petrol 4 Strokes [ton/año] | | Diesel PC & LCV [ton/año] | HDV [ton/año] |
|---------|-----------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|------------------|
| | | Convent | Euro I & on | IDI & DI | |
| Alkanes | Ethane | 24,21 | 37,42 | 1,28 | 0,22 |
| | Propane | 6,90 | 7,62 | 0,43 | 0,73 |
| | Butane | 42,56 | 61,46 | 0,43 | 1,09 |
| | Isobutane | 18,93 | 18,65 | 0,27 | 1,02 |
| | Pentane | 26,12 | 25,22 | 0,16 | 0,44 |
| | Isopentane | 71,32 | 79,88 | 2,02 | 0,00 |
| | Hexane | 18,93 | 18,88 | 0,00 | 0,00 |
| | Heptane | 5,28 | 8,68 | 0,78 | 2,19 |
| | Octane | 8,22 | 6,22 | 0,97 | 0,00 |
| | 2-Methylhexane | 11,74 | 17,36 | 1,75 | 4,59 |
| | Nonane | 0,88 | 1,88 | 2,61 | 0,00 |
| | 2-Methylheptane | 0,00 | 6,69 | 0,47 | 1,53 |
| | 3-Methylhexane | 8,22 | 13,37 | 0,86 | 2,55 |
| | Decane | 3,23 | 2,23 | 4,59 | 13,04 |
| | 3-Methylheptane | 5,87 | 6,33 | 0,78 | 1,97 |
| | Alkanes C10-C12 | 0,44 | 20,64 | 8,37 | 0,00 |
| | Alkanes C > 13 | 0,88 | 17,01 | 69,70 | 200,36 |
| | Cycloalkanes | All | 12,91 | 13,37 | 2,53 |
| Alkenes | Ethylene | 127,82 | 85,62 | 42,69 | 51,07 |
| | Propylene | 71,47 | 44,81 | 14,01 | 9,62 |
| | Propadiene | 0,00 | 0,59 | 0,00 | 0,00 |
| | 1-Butene | 7,34 | 8,56 | 0,00 | 0,00 |
| | Isobutene | 61,78 | 26,04 | 4,32 | 12,39 |
| | 2-Butene | 18,64 | 16,66 | 2,02 | 0,00 |
| | 1,3-Butadiene | 20,84 | 10,67 | 3,78 | 24,04 |

| | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|--------|-------|-------|
| | 1-Pentene | 1,32 | 1,29 | 0,00 | 0,00 |
| | 2-Pentene | 3,38 | 3,99 | 0,00 | 0,00 |
| | 1-Hexene | 0,00 | 1,99 | 0,00 | 0,00 |
| | Dimethylhexene | 0,00 | 1,76 | 0,00 | 0,00 |
| Alkynes | 1-Butine | 0,73 | 2,46 | 0,00 | 0,00 |
| | Propine | 11,15 | 0,94 | 0,00 | 0,00 |
| | Acetylene | 80,71 | 32,96 | 9,11 | 7,65 |
| Aldehydes | Formaldehyde | 30,52 | 19,94 | 46,70 | 61,20 |
| | Acetaldehyde | 8,66 | 8,80 | 25,18 | 33,30 |
| | Acrolein | 2,35 | 2,23 | 13,93 | 12,90 |
| | Benzaldehyde | 8,80 | 2,58 | 3,35 | 9,98 |
| | Crotonaldehyde | 0,29 | 0,47 | 4,28 | 10,78 |
| | Methacrolein | 0,00 | 0,59 | 3,00 | 6,27 |
| | Butyraldehyde | 0,00 | 0,59 | 3,31 | 6,41 |
| | Isobutanaldehyde | 0,00 | 0,00 | 8,13 | 4,30 |
| | Propionaldehyde | 1,61 | 0,59 | 6,89 | 9,11 |
| | Hexanal | 0,00 | 0,00 | 0,62 | 10,35 |
| | I-Valeraldehyde | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,66 |
| | Valeraldehyde | 0,00 | 0,12 | 1,60 | 2,91 |
| | O-Tolualdehyde | 2,79 | 0,82 | 0,93 | 5,83 |
| | M-Tolualdehyde | 5,58 | 1,52 | 1,32 | 4,30 |
| | P-Tolualdehyde | 2,79 | 0,70 | 1,36 | 0,00 |
| Ketones | Acetone | 3,08 | 7,15 | 11,44 | 0,00 |
| | Methylethylketone | 1,61 | 0,59 | 4,67 | 0,00 |
| Aromatics | Toluene | 188,43 | 128,79 | 2,69 | 0,07 |
| | Ethylbenzene | 70,15 | 22,17 | 1,13 | 0,00 |
| | M,P-Xylene | 97,73 | 63,69 | 2,37 | 7,14 |
| | O-Xylene | 66,33 | 26,51 | 1,05 | 2,91 |

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| | 1,2,3 Trimethylbenzene | 8,66 | 10,09 | 0,97 | 2,19 |
| | 1,2,4 Trimethylbenzene | 37,13 | 49,38 | 2,22 | 6,27 |
| | 1,3,5 Trimethylbenzene | 16,29 | 16,66 | 1,21 | 3,28 |
| | Styrene | 8,36 | 11,85 | 1,44 | 4,08 |
| | Benzene | 100,23 | 65,80 | 7,71 | 0,51 |
| | C9 | 45,79 | 49,38 | 3,04 | 8,52 |
| | C10 | 0,00 | 36,01 | 0,00 | 0,00 |
| | C > 13 | 88,20 | 40,58 | 52,03 | 148,41 |
| Totals (all NMVOC Species) | Totals (all NMVOC Species) | 1467,20 | 1168,82 | 386,92 | 704,61 |

La Tabla anterior se puede resumir para las distintas familias de COVs, según la siguiente Tabla:

Tabla 3-3. Especiación COVs según familias para las distintas categorías vehiculares

| Group | Petrol 4 Strokes [Ton/año] | | Diesel PC & LCV [ton/año] | HDV [ton/año] |
|--------------|----------------------------|----------------|---------------------------|---------------|
| | Convent | Euro I & on | IDI & DI | |
| Alkanes | 253,73 | 349,53 | 95,47 | 229,72 |
| Cycloalkanes | 12,91 | 13,37 | 2,53 | 8,45 |
| Alkenes | 312,58 | 201,98 | 66,82 | 97,12 |
| Alkynes | 92,60 | 36,36 | 9,11 | 7,65 |
| Aldehydes | 63,40 | 38,94 | 121,03 | 178,28 |
| Ketones | 4,70 | 7,74 | 16,11 | 0,00 |
| Aromatics | 727,29 | 520,90 | 75,85 | 183,38 |
| Total | 1467,20 | 1168,82 | 386,92 | 704,61 |

Para conocer cuántas son las emisiones totales de cada familia de COVs se realizó la Tabla 3-5:

Tabla 3-4. Emisiones vehiculares anuales de las distintas familias de COV

| Group | COV [ton/año] |
|--------------|----------------|
| Alkanes | 928,45 |
| Cycloalkanes | 37,27 |
| Alkenes | 678,50 |
| Alkynes | 145,72 |
| Aldehydes | 401,66 |
| Ketones | 28,55 |
| Aromatics | 1507,42 |
| Total | 3727,55 |

A partir de la Tabla 3-2 es posible jerarquizar los diez COV que más toneladas anuales aportan:

Tabla 3-5. Especies de COVs que más aportan toneladas anuales de emisiones

| Group | Species | COV [ton/año] |
|----------|--------------|---------------|
| Aromatic | C > 13 | 329,225 |
| Aromatic | Toluene | 319,972 |
| Alkene | Ethylene | 307,209 |
| Alkane | Alkanes C>13 | 287,950 |
| Aromatic | Benzene | 174,247 |
| Aromatic | M,P-Xylene | 170,939 |
| Aldehyde | Formaldehyde | 158,366 |
| Alkane | Isopentane | 153,220 |
| Alkene | Propylene | 139,900 |

De los resultados anteriores, se puede concluir que la familia de COV que tiene un mayor aporte de emisiones son los aromáticos con 1507,42 [ton/año], siendo un 40,44% del total de emisiones anuales (3727,55 [ton/año]), dentro de los cuales los que mayores contaminan son el Tolueno (188,43 [ton/año]) y el Benzeno (100,23 [ton/año]). Estas emisiones son generadas principalmente por vehículos de 4 tiempos.

Al jerarquizar los COV según la cantidad de toneladas anuales de emisiones se observa que los mayores contaminantes son los COVs aromáticos con C>13 con 329,225 [ton/año] y el Tolueno con 319,972 [ton/año], los que equivalen a un 8,83% y a un 8,58% respectivamente del total de emisiones de COV en Santiago.

Por otra parte, los vehículos a diésel emiten en su mayor parte Aldehídos, alcanzando emisiones de 121,03[ton/año], los cuales corresponden a un 32,18% del total de emisiones de este tipo de tecnología (386,92 [ton/año]), destacando las emisiones de Formaldehyde con 46,70 [ton/año]. En el caso de los vehículos pesados su mayor emisión de COVs son las familias de Alkanos con 229,72 [ton/año], equivalente al 32,60% del total de emisiones de

este tipo de vehículos (704,61 [ton/año]), y la familia de los aromáticos con 183,38 [ton/año], siendo el 26,03% del total de emisiones para vehículos pesados.

Cabe mencionar que las fracciones másicas propuestas por COPERT se obtuvieron de la literatura entre los años 1989 y 1996, por lo cual no está actualizada a lo que ocurre realmente en esta época, y a su vez es importante recordar que este es un modelo europeo de emisiones, por lo tanto, su implementación en países en vías de desarrollo no es tan trivial, debido al gran consumo de recursos que este requiere.

3.2 Resultados especiación NO_x

A partir del inventario de emisiones y la especiación otorgada por la metodología de COPERT, es posible presentar las emisiones de NO_x del año 2016 para la Región Metropolitana dividida en distintos grupos vehiculares. En el caso de las emisiones de NO_x se presentan con una categorización más detallada, según el tipo de combustible y norma Euro. A continuación, se presentan las emisiones de NO_x según las distintas categorías vehiculares:

Tabla 3-6. Emisiones NO_x según las categorías utilizadas en COPERT para el año 2016

| Categoría Vehicular | Tecnología | Emisiones [ton/año] |
|---------------------|-------------------|---------------------|
| Petrol PCs | Pre-Euro | 1154,02 |
| | Euro 1-Euro 2 | 2537,11 |
| | Euro 3 - Euro 4 | 915,75 |
| | Euro 5 | 144,73 |
| | Euro 6 up to 2016 | 0,05 |
| | Euro 2017-2019 | 0,00 |
| Diesel PCs | Pre-Euro | - |
| | Euro 1-Euro 2 | 131,32 |
| | Euro 3 | - |
| | Euro 4 | 2062,22 |
| | Euro 5 | 1856,94 |
| | Euro 6 up to 2016 | 507,39 |
| Euro 2017-2019 | 0,00 | |
| Petrol LCVs | Pre-Euro | 530,61 |
| | Euro 1-Euro 2 | 617,76 |
| | Euro 3 - Euro 4 | 427,69 |
| | Euro 5 | 79,80 |
| | Euro 6 up to 2017 | 0,02 |
| | Euro 6 2018-2020 | 0,00 |

| | | |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| Diesel LCVs | Pre-Euro | 4,73 |
| | Euro 1-Euro 2 | 2379,41 |
| | Euro 3 | 276,67 |
| | Euro 4 | 2127,02 |
| | Euro 5 | 739,59 |
| | Euro 6 up to 2017 | 0,00 |
| | Euro 6 2018-2019 | 0,00 |
| HDVs | Pre-Euro | 5601,90 |
| | Euro 1-Euro 2 | 2743,04 |
| | Euro 3 | 4293,65 |
| | Euro 4 | 1843,54 |
| | Euro 5 | 541,74 |
| | Euro 6 | 0,00 |
| Total NOx | | 31516,70 |

Al combinar los resultados de la Tabla 3-6 y la Tabla 2-3 de la especiación presentada por COPERT, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-7. Especiación NOx para las distintas categorías vehiculares y tecnologías en la Región Metropolitana

| Category | Emission Standard | NO ₂ [ton/año] | NO [ton/año] |
|--------------------|-------------------|---------------------------|-----------------|
| | | Suggested Value | Suggested Value |
| Petrol PCs | Pre-Euro | 46,16 | 1107,87 |
| | Euro 1-Euro 2 | 101,48 | 2435,63 |
| | Euro 3 - Euro 4 | 27,47 | 888,28 |
| | Euro 5 | 4,34 | 140,38 |
| | Euro 6 up to 2016 | 0,00 | 0,04 |
| | Euro 2017-2019 | 0,00 | 0,00 |
| Diesel PCs | Pre-Euro | - | - |
| | Euro 1-Euro 2 | 17,07 | 114,25 |
| | Euro 3 | - | - |
| | Euro 4 | 948,62 | 1113,60 |
| | Euro 5 | 612,79 | 1244,15 |
| | Euro 6 up to 2016 | 152,22 | 355,17 |
| | Euro 2017-2019 | 0,00 | 0,00 |
| Petrol LCVs | Pre-Euro | 21,22 | 509,39 |
| | Euro 1-Euro 2 | 24,71 | 593,05 |
| | Euro 3 - Euro 4 | 12,83 | 414,85 |

| | | | |
|--------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| | Euro 5 | 2,39 | 77,41 |
| | Euro 6 up to 2017 | 0,00 | 0,02 |
| | Euro 6 2018-2020 | 0,00 | 0,00 |
| Diesel LCVs | Pre-Euro | 0,71 | 4,02 |
| | Euro 1-Euro 2 | 309,32 | 2070,09 |
| | Euro 3 | 74,70 | 201,97 |
| | Euro 4 | 978,43 | 1148,59 |
| | Euro 5 | 244,07 | 495,53 |
| | Euro 6 up to 2017 | 0,00 | 0,00 |
| | Euro 6 2018-2019 | 0,00 | 0,00 |
| HDVs | Pre-Euro | 616,21 | 4985,69 |
| | Euro 1-Euro 2 | 301,74 | 2441,31 |
| | Euro 3 | 601,11 | 3692,54 |
| | Euro 4 | 184,35 | 1659,19 |
| | Euro 5 | 65,01 | 476,73 |
| | Euro 6 | 0,00 | 0,00 |
| Total | | 5346,97 | 26169,74 |

En la siguiente Tabla se resumen los datos para las distintas categorías vehiculares incluyendo cada tipo de tecnología:

Tabla 3-8. Especiación NO_x para las distintas categorías vehiculares en la Región Metropolitana

| Category | NO ₂ [ton/año] | NO [ton/año] |
|--------------------|---------------------------|-----------------|
| Petrol PCs | 179,46 | 4572,20 |
| Diesel PCs | 1730,70 | 2827,17 |
| Petrol LCVs | 61,16 | 1594,72 |
| Diesel LCVs | 1607,23 | 3920,20 |
| HDVs | 1768,42 | 13255,46 |
| Total | 5346,97 | 26169,74 |

A partir de los resultados anteriores, se puede concluir que el NO_x total generado en Santiago corresponde a 31516,71 [ton/año], de los cuales 5346,97 [ton/año] corresponden a NO₂ (16,97%) y 26169,74 [ton/año] corresponden a NO (83,03%).

En el caso del NO₂ el 33,07% de sus emisiones son generadas por vehículos pesados (1768,42 [ton/año]), el 32,37% generadas por vehículos de pasajeros diésel (1730,70 [ton/año]), el 30,06% generadas por vehículos livianos comerciales diésel (1607,23 [ton/año]), y solo el 4,5% restante son generadas por vehículos a gasolina. Por lo tanto, se puede concluir que los vehículos diésel son los principales contaminantes de NO₂ en la atmósfera en una mayor

proporción que otro tipo de combustible y tecnología, destacando principalmente los vehículos livianos de pasajeros y comerciales con norma Euro-4.

En el caso del NO el 50,65% de sus emisiones totales anuales son generadas por vehículos pesados, las cuales alcanzan un valor de 13255,46 [ton/año].

3.3 Resultados distribución espacial de COV y NO_x

A partir de los resultados anteriores de especiación del inventario de emisiones para los precursores del ozono según categoría vehicular y tecnología, y de la metodología presentada en el capítulo 2, es posible obtener la distribución espacial de COV para Santiago.

En primer lugar, se obtuvo el aporte de cada una de las categorías vehiculares para cada tipo de ruta y zona. En la Figura 3-1 se muestra como ejemplo, la creación de la malla con las emisiones de los vehículos pesados para la zona II del estudio:

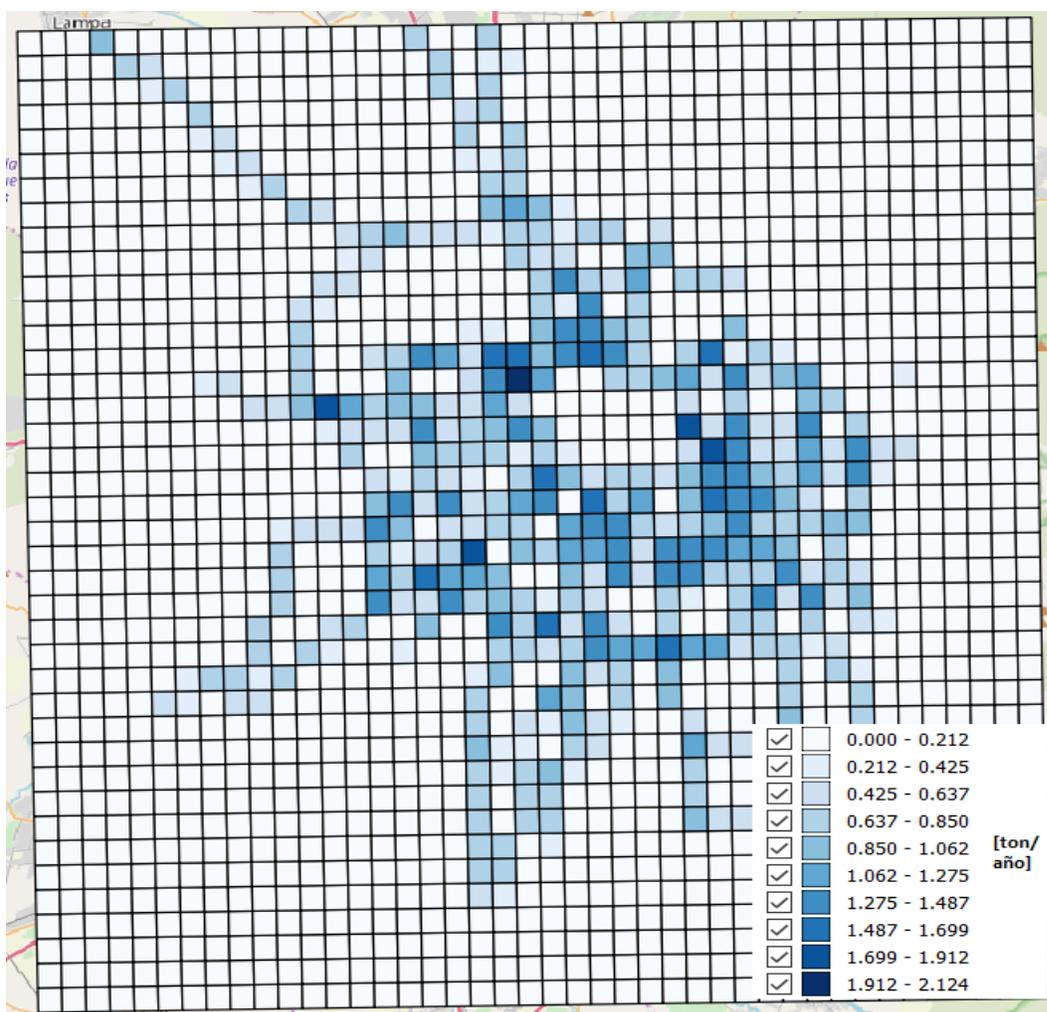


Figura 3-1. Distribución espacial de emisiones de vehículos pesados en la zona II de estudio

Seguidamente, se realiza este procedimiento para cada uno de los tipos de vehículos, tecnologías, rutas y zonas, para finalmente superponer las emisiones de cada uno. De esta manera se obtiene distribución espacial de COV para las distintas rutas y categorías vehiculares estudiadas anteriormente, tal como se muestran en la Figura 3-2:

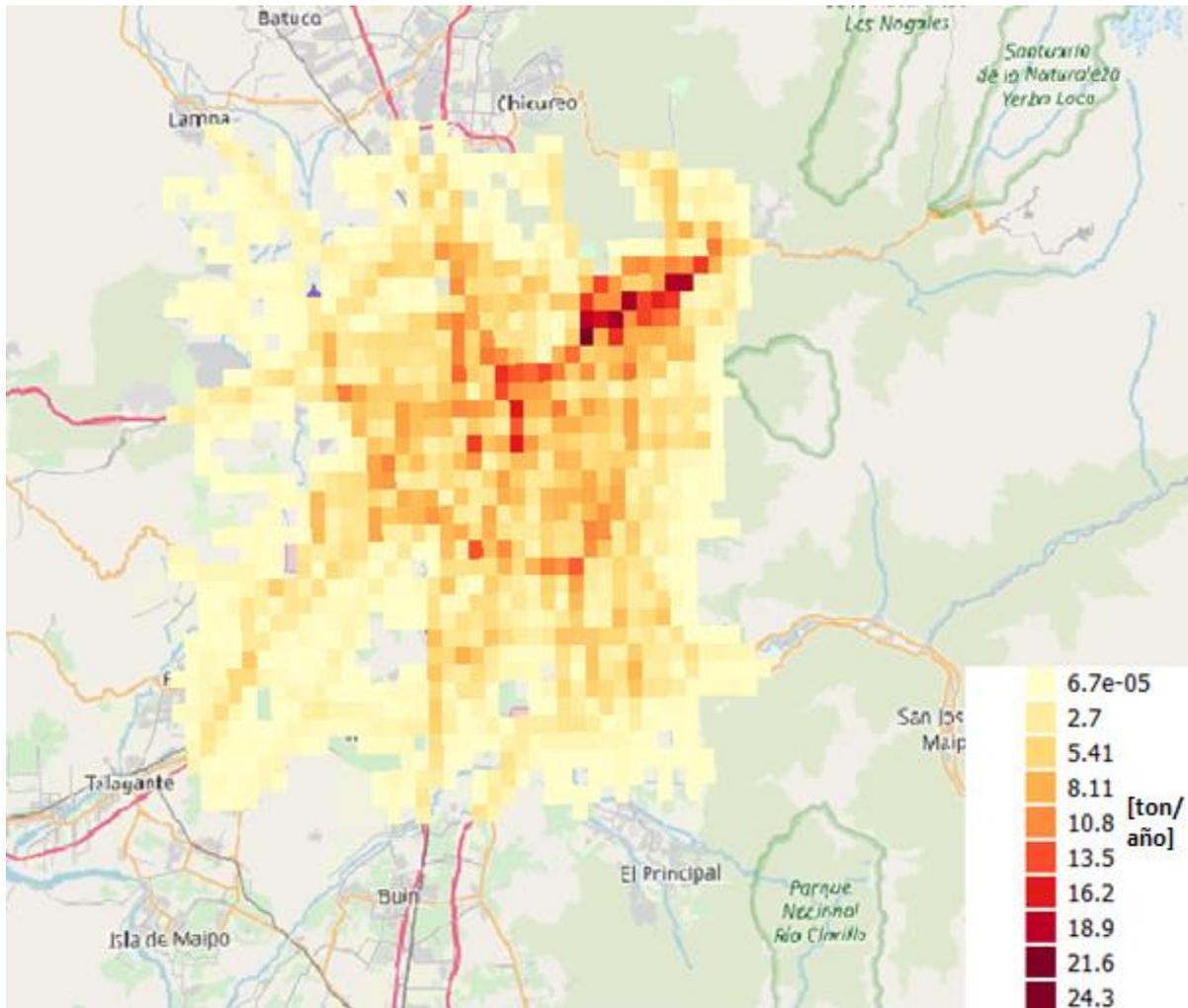


Figura 3-2. Distribución espacial de COV en Santiago. Elaboración propia.

De la misma forma, se obtuvo la distribución en el espacio de los NO_x, tal como se muestra en la siguiente Figura:

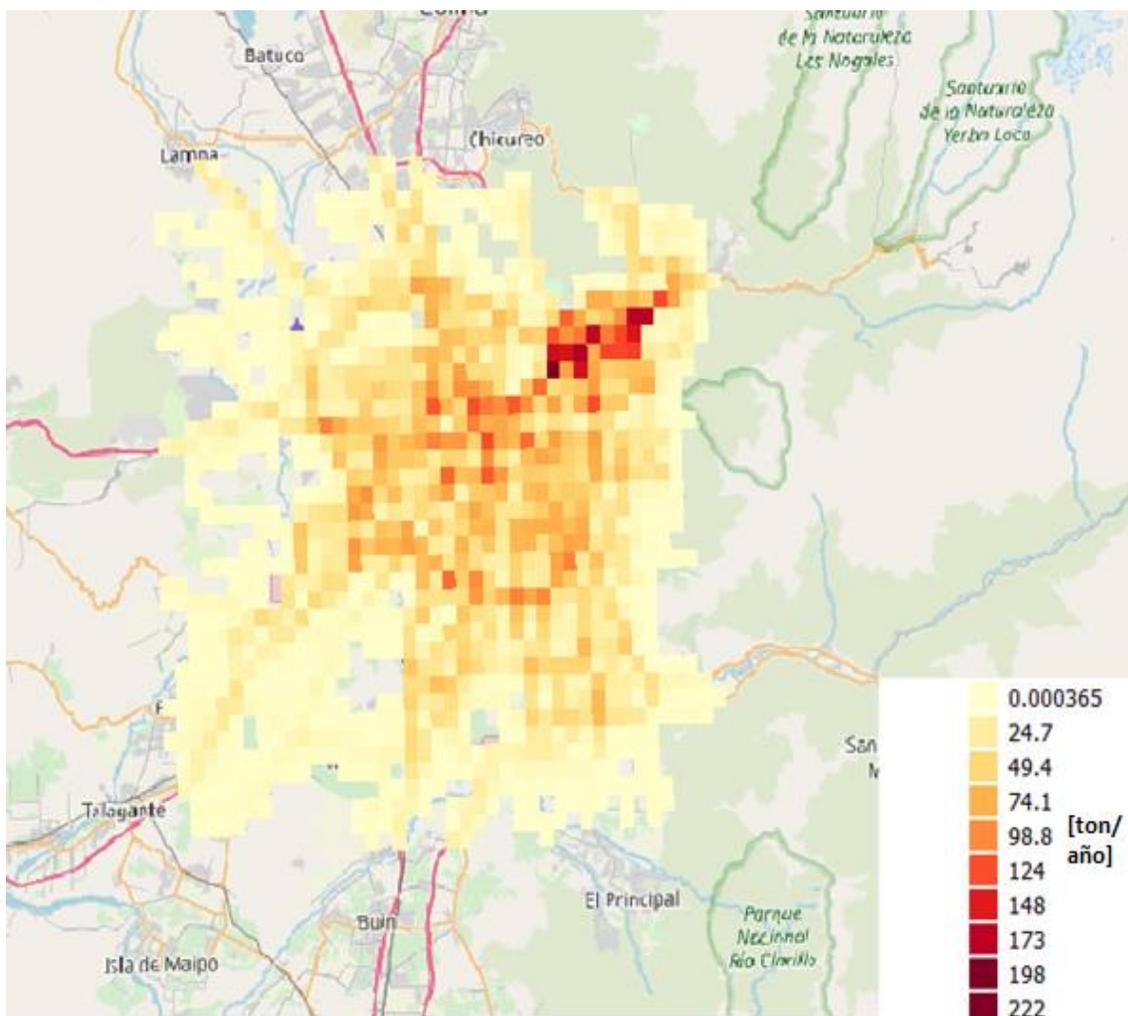


Figura 3-3. Distribución espacial NO_x en Santiago. Elaboración propia.

A partir de los resultados de la distribución espacial de los precursores del ozono, se puede apreciar que la mayor congestión de contaminantes se encuentra principalmente en el sector nororiente de Santiago, lo cual tiene sentido, ya que solo en las comunas de las Condes, Vitacura y Lo Barnechea se tiene el 17% del total de la flota vehicular existente en Santiago, además de ser un lugar de mucha afluencia de tráfico. A su vez, la zona central y las principales autopistas son zonas con marcada contaminación, lo cual también concuerda, ya que se trata de una zona comercial, que cuenta con una gran cantidad de calles principales y vías exclusivas de buses.

3.4 Resultados distribución temporal de COV y NOx

A continuación, se presenta la distribución en el tiempo de los distintos contaminantes en tres situaciones: primero, se consideraron las emisiones totales de COV y NOx para un día de semana de lunes a jueves; segundo, se calculó la distribución temporal para cada una de las familias de COVs para un día de lunes a jueves; tercero, se muestra la distribución temporal de las emisiones de vehículos pesados de COV, NO, NO₂ y NO_x total para un día viernes.

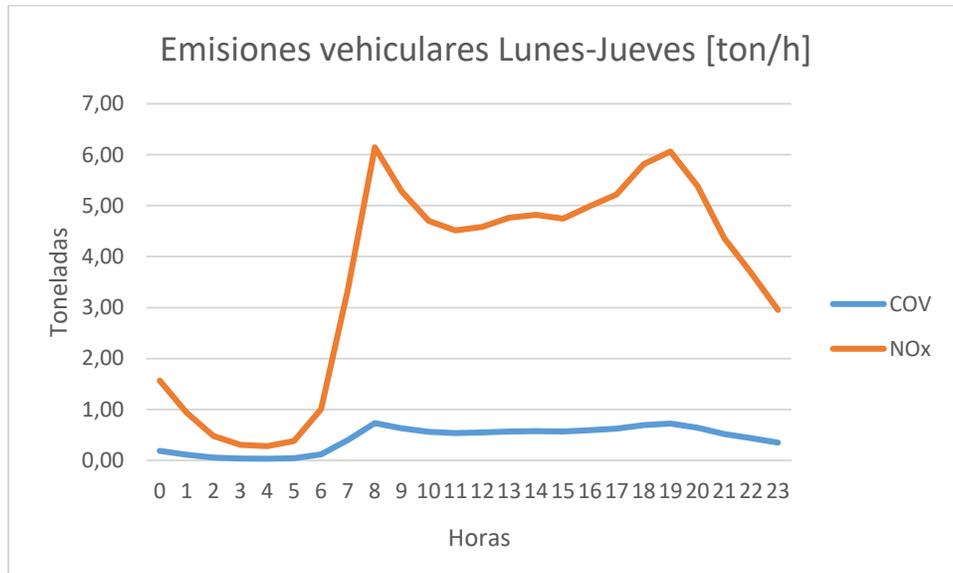


Figura 3-4. Distribución temporal COV y NOx en Santiago para un día entre lunes y jueves. Elaboración propia-

A partir de los resultados de la distribución temporal de emisiones, se observa que hay dos momentos donde la contaminación alcanza un peak. El primer peak ocurre entre las 6 y 7 A.M. Mientras que el segundo ocurre posterior a las 18:00 horas.

La distribución en el tiempo para cada una de las familias de los COVs se muestra en la siguiente Tabla:

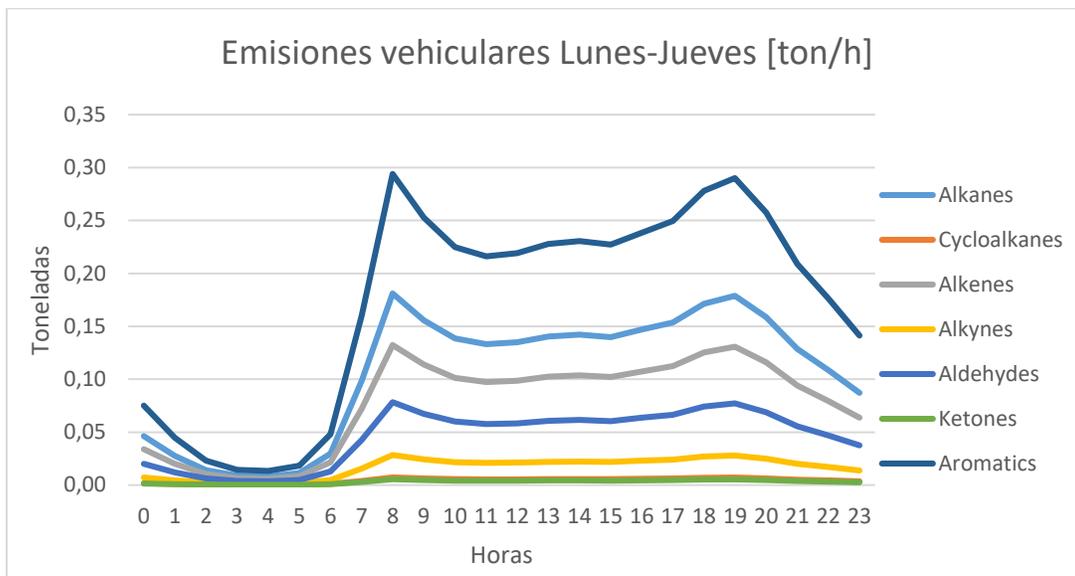


Figura 3-5. Distribución temporal de las familias de COVs para un día entre lunes y jueves. Elaboración propia.

En la Figura anterior se observa que el mayor aporte en las emisiones de COVs corresponde a la familia de los aromáticos, siendo un 40,44% del total de emisiones anuales de hidrocarburos.

Finalmente, se muestra la distribución temporal de los vehículos pesados para un día viernes:

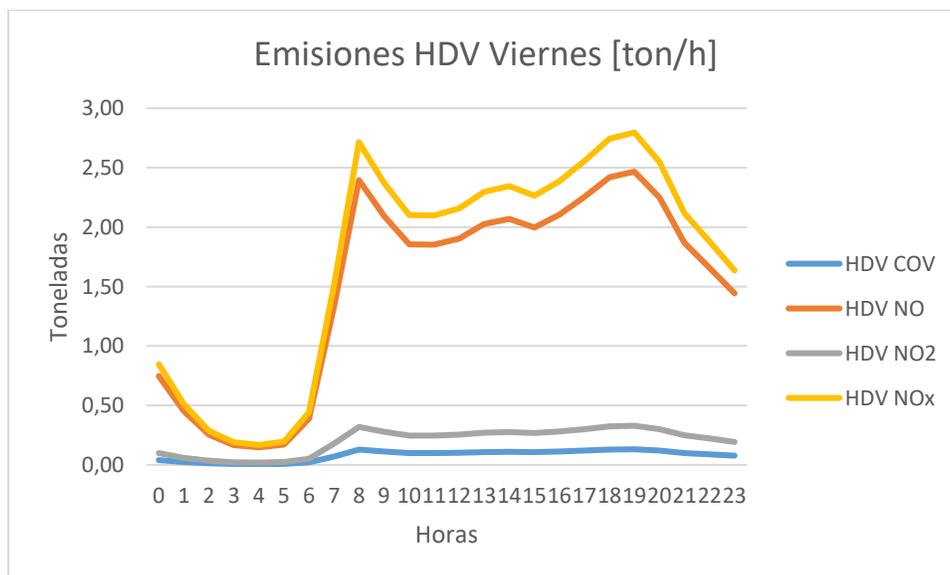


Figura 3-6. Emisiones de vehículos pesados (incluyendo buses) en un día viernes en Santiago. Elaboración propia.

De la Figura 3-5 se observa que las emisiones de vehículos pesados son los principales generadores de NO_x, principalmente NO que como se mencionó anteriormente el 50,65% de las emisiones totales de éste son generadas por los vehículos pesados.

4. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de título, las cuales se dividen en tres secciones: Conclusiones generales; conclusiones específicas; y recomendaciones.

4.1 Conclusiones generales

Con respecto a la especiación de los COVs se puede concluir que las categorías vehiculares que más contribuyen con emisiones son los vehículos a gasolina de 4 tiempos, siendo los convencionales los que más aportan (1467,20 [ton/año]) y los vehículos con norma Euro-I en adelante con 1168,82 [ton/año]). Si se hace el análisis por familias de COV, la que tiene un mayor aporte de emisiones son los aromáticos con 1507,42 [ton/año].

Con respecto a la especiación de NO_x se observa que los principales emisores de NO_x son los vehículos pesados los cuales generan 15023,88 [ton/año] de las 31516,71 [ton/año] totales.

Cabe mencionar que las fracciones máxicas propuestas por COPERT se obtuvieron de la literatura entre los años 1989 y 1996, por lo cual no está actualizada a lo que ocurre realmente en esta época, y a su vez es importante recordar que este es un modelo europeo de emisiones, por lo tanto, su implementación en países en vías de desarrollo no es tan trivial, debido al gran consumo de recursos que este requiere.

A partir de los resultados de la distribución espacial de los precursores del ozono, se puede apreciar que la mayor congestión de contaminantes se encuentra principalmente en el sector nororiente de Santiago, lo cual tiene sentido, ya que solo en las comunas de las Condes, Vitacura y Lo Barnechea se tiene el 17% del total de la flota vehicular existente en Santiago, además de ser un lugar de mucha afluencia de tráfico. A su vez, la zona central y las principales autopistas son zonas con marcada contaminación, lo cual también concuerda, ya que se trata de una zona comercial, que cuenta con una gran cantidad de calles principales y vías exclusivas de buses.

A partir de los resultados de la distribución temporal de emisiones, se observa que hay dos momentos donde la contaminación alcanza un peak. El primer peak ocurre entre las 6 y 7 A.M. Mientras que el segundo ocurre posterior a las 18:00 horas.

4.2 Conclusiones específicas

A partir de cada uno de los capítulos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

4.2.1 Marco teórico

Primeramente, se estudió la química de formación del ozono troposférico, y se llegó a la conclusión que debido a que las tasas de eliminación de NO_x y los radicales libres dependen de forma compleja de las concentraciones de VOC y NO_x , la producción de ozono no aumenta linealmente con un aumento en las concentraciones de precursor.

Al revisar los modelos de emisiones se puede concluir que son muy pocos los modelos de emisiones que contienen información sobre especiación de los precursores del ozono, y los pocos que hay no todos son detallados con respecto a las categorías vehiculares y tipo de tecnología. Sobre la especiación de NO_x la información es casi nula, ya que se suele asumir una distribución 90-10% sin entrar en detalles. Así mismo, son pocos los estudios de distribución espacial y temporal que involucren especiación de estos contaminantes.

Al revisar los estudios nacionales, se puede concluir que, debido a la cantidad de recursos necesarios para aplicar modelos más complejos, es que los países subdesarrollados requieren modelos simplificados que permitan estimar sus emisiones y tomar las medidas necesarias y realizar planificaciones en el ámbito ambiental. Se llegó a la conclusión de que para implementar un plan simplificado factible es necesario conocer el flujo vehicular y el uso de suelo mínimamente para que los datos sean utilizables.

4.2.2 Metodología

A partir de la metodología se puede concluir que muchos de los datos utilizados de otras fuentes son antiguos (Algunos datos tienen más de 20 años), por lo tanto, existe un grado de incertidumbre que se debe involucrar en la medición de los datos.

A su vez, en Chile no existe información detallada sobre las rutas vehiculares y sus categorías, la información disponible es ambigua y puede provocar la sobreestimación o subestimación de las emisiones en ciertas calles. Ya que no se explica el método utilizado para definir la clasificación de las vías en primarias, secundarias, etc. Si se basaron en la longitud y velocidad promedio de circulación de cada vía, en ese caso se puede sobreestimar las emisiones en ciertos sectores de la ciudad, ya que puede haber zonas con alta densidad de vías secundarias, pero que se caracterizan por bajo flujo vehicular. En este sentido, el método más confiable sería categorizar las rutas según flujo vehicular y tipo de uso de suelo.

Con lo que respecta al software utilizado en la distribución espacial de los contaminantes, influye de gran manera en los resultados obtenidos, debido a la complejidad y herramientas que aporta cada uno y que permite ser más o menos detallista, y por lo tanto obtener resultados más o menos acertados a la realidad.

4.2.3 Resultados

Se puede concluir que la familia de COV que tiene un mayor aporte de emisiones son los aromáticos con 1507,42 [ton/año], siendo un 40,44% del total de emisiones anuales (3727,55 [ton/año]), dentro de los cuales los que mayores contaminan son el Tolueno (188,43 [ton/año]) y el Benzeno (100,23 [ton/año]). Estas emisiones son generadas principalmente por vehículos de 4 tiempos.

Al jerarquizar los COV según la cantidad de toneladas anuales de emisiones se observa que los mayores contaminantes son los COVs aromáticos con C>13 con 329,225 [ton/año] y el Tolueno con 319,972 [ton/año], los que equivalen a un 8,83% y a un 8,58% respectivamente del total de emisiones de COV en Santiago. Tal como se muestra en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1. Especies de COVs que más aportan toneladas anuales de emisiones

| Group | Species | COV [ton/año] |
|----------|--------------|---------------|
| Aromatic | C > 13 | 329,225 |
| Aromatic | Toluene | 319,972 |
| Alkene | Ethylene | 307,209 |
| Alkane | Alkanes C>13 | 287,950 |
| Aromatic | Benzene | 174,247 |
| Aromatic | M,P-Xylene | 170,939 |
| Aldehyde | Formaldehyde | 158,366 |
| Alkane | Isopentane | 153,220 |
| Alkene | Propylene | 139,900 |

Por otra parte, los vehículos a diésel emiten en su mayor parte Aldehídos, alcanzando emisiones de 121,03[ton/año], los cuales corresponden a un 32,18% del total de emisiones de este tipo de tecnología (386,92 [ton/año]), destacando las emisiones de Formaldehyde con 46,70 [ton/año]. En el caso de los vehículos pesados su mayor emisión de COVs son las familias de Alkanos con 229,72 [ton/año], equivalente al 32,60% del total de emisiones de este tipo de vehículos (704,61 [ton/año]), y la familia de los aromáticos con 183,38 [ton/año], siendo el 26,03% del total de emisiones para vehículos pesados.

También se puede concluir que el NO_x total generado en Santiago corresponde a 31516,71 [ton/año], de los cuales 5346,97 [ton/año] corresponden a NO₂ (16,97%) y 26169,74 [ton/año] corresponden a NO (83,03%).

En el caso del NO₂ el 33,07% de sus emisiones son generadas por vehículos pesados (1768,42 [ton/año]), el 32,37% generadas por vehículos de pasajeros diésel (1730,70 [ton/año]), el 30,06% generadas por vehículos livianos comerciales diésel (1607,23 [ton/año]), y solo el 4,5% restante son generadas por vehículos a gasolina. Por lo tanto, se puede concluir que los vehículos diésel son los principales contaminantes de NO₂ en la atmósfera en una mayor

proporción que otro tipo de combustible y tecnología, destacando principalmente los vehículos livianos de pasajeros y comerciales con norma Euro-4.

En el caso del NO el 50,65% de sus emisiones totales anuales son generadas por vehículos pesados, las cuales alcanzan un valor de 13255,46 [ton/año].

A partir de los resultados de la distribución espacial de los precursores del ozono, se puede apreciar que la mayor congestión de contaminantes se encuentra principalmente en el sector nororiente de Santiago, lo cual tiene sentido, ya que solo en las comunas de las Condes, Vitacura y Lo Barnechea se tiene el 17% del total de la flota vehicular existente en Santiago, además de ser un lugar de mucha afluencia de tráfico. A su vez, la zona central y las principales autopistas son zonas con marcada contaminación, lo cual también concuerda, ya que se trata de una zona comercial, que cuenta con una gran cantidad de calles principales y vías exclusivas de buses.

A partir de los resultados de la distribución temporal de emisiones, se observa que hay dos momentos donde la contaminación alcanza un peak. El primer peak ocurre entre las 6 y 7 A.M. Mientras que el segundo ocurre posterior a las 18:00 horas.

4.3 Recomendaciones

- Las recomendaciones tienen que ver principalmente con la verificación de la información, ya que en este trabajo no se calcularon las emisiones de COV ni de NO_x en Santiago, se utilizó el inventario de emisiones calculado en otro trabajo de similares características.
- Como se mencionó anteriormente, es necesario verificar la categorización de las distintas calles según los criterios más adecuados que permitan obtener una mayor fidelidad en la distribución espacial de las emisiones.
- Es necesario generar y definir criterios de selección, categorización y priorización de las diferentes fuentes móviles a incluir dentro del desarrollo y/o actualización de los inventarios de emisión, permitiendo establecer trazabilidad, comparabilidad y continuidad de la información en el tiempo, facilitando así, la visualización de las fuentes que aportan mayoritariamente a la generación de contaminantes.
- Es necesario elaborar un modelo de emisiones adaptado a las necesidades del país que permita una mayor homogeneidad entre los estudios realizados de aquí en adelante, y junto con eso se requiere una actualización de los datos de especiación para los precursores del ozono, ya que son casi inexistentes en los estudios vehiculares.

- Finalmente, se podrían definir criterios de sectorización de Santiago más complejos, de manera de obtener mayor precisión en los pesos ponderados de los vehículos en los distintos tipos de vías, mejorando así la distribución de los contaminantes.

Referencias

- [1] **Banco mundial (2018)**. Chile panorama general.
(<http://www.bancomundial.org/es/country/chile/overview>)
- [2] **BBVA (2017)**. Situación automotriz Chile 2017-2018 (2017).
(<https://www.bbvaesearch.com/wp-content/uploads/2017/12/Situacion-Automotriz-Chile-2017.pdf>)
- [3] **INE (2018)**. Más de 5,1 millones de vehículos circularon en el país durante 2017.
(<http://www.ine.cl/prensa/detalle-prensa/2018/05/18/m%C3%A1s-de-5-1-millones-de-veh%C3%ADculos-circularon-en-el-pa%C3%ADs-durante-2017>)
- [4] **IDEAM (2004)**. El Ozono: Documento técnico de respaldo a la información en la página web del IDEM.
- [5] **Mito Revista Cultura (2008)**. La capa de ozono comenzó su recuperación.
- [6] **MITECO (2013)**. De compuestos orgánicos volátiles.
- [7] **UCM (1997)**. Modelización y análisis de las concentraciones de ozono troposférico.
- [8] **Ciencisfera**. Informe contaminación ciudad.
- [9] **Sebastian Tolvett (2009)**. Análisis de emisiones en ruta de vehículos diesel en ciudad de México, Santiago y Sao Paulo.
- [10] **Leonidas Ntziachristos (2010)**. Uncertainty and Sensitivity Analysis of National Road Transport Inventories Compiled with COPERT 4.
- [11] **Nelson Peñaloza (2010)**. Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá, D.C.
- [12] **TNO (2012)**. Determination of Dutch NOx emisión factors for Euro-5 diesel passenger cars.
- [13] **RIVM (2013)**. The Euro emisión standars for cars and trucks in relation to NO₂ limit value exceedances in the Netherlands.
- [14] **Ignacio Suarez (2019)**. Distribución espacial y temporal del sector transporte en ruta en Chile.
- [15] **Mauricio Osses (2006)**. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities.
- [16] **Mauricio Osses (2009)**. Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods.
- [17] **EEA (2017)**. Road Transport 2016.
- [18] **SECTRA (2009)**. Análisis de Regulaciones sobre el Transporte de Carga Urbano y su impacto en la Cadena Logística.

[19] **Gonzalo Antúnez (2018)**. Análisis del impacto de la restricción vehicular en flujo vial, emisiones y calidad del aire en la Región Metropolitana de Santiago.

[20] **INE (2017)**. Parque de vehículos en circulación 2016.

[21] **Sectra (2016)**. Actualización de perfiles de flujos del modelo MODEM para el gran Santiago y regions.