



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE EMISIONES CONTAMINANTES  
PRODUCIDAS POR BUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO EN SANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ALBERTO ANDRÉS ARROYO MEJÍAS

PROFESORA GUÍA:  
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MAURICIO OSSES ALVARADO  
ROBERTO CORVALÁN PAIVA

SANTIAGO DE CHILE  
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: ALBERTO ANDRÉS ARROYO MEJÍAS  
FECHA: 2017  
PROF. GUÍA: SRA. MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE EMISIONES CONTAMINANTES PRODUCIDAS POR BUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO EN SANTIAGO

La polución del aire en Santiago de Chile ha sido un tema importante en los últimos años, el cual ha llevado a adoptar acciones de mitigación con el fin de prevenir efectos adversos sobre la población. En particular, el transporte terrestre es uno de los principales contribuyentes al problema, por lo que es relevante caracterizar su impacto e integrar esta información en una herramienta que asista la toma de decisiones.

Este trabajo busca estimar la distribución espacio-temporal de emisiones contaminantes producidas por los buses del sistema de transporte público de Santiago (Transantiago) por pasajero transportado, con énfasis en los gases monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos y material particulado.

El análisis se realiza para una semana del mes de marzo del 2016 y está basado en datos recolectados directamente desde los buses. En el estudio se utiliza la información obtenida directamente desde los sistemas GPS implementados en los buses, la cual se complementa con estimaciones del factor de carga del vehículo, lo que permite calcular las emisiones generadas por pasajero transportado.

La metodología desarrollada calcula emisiones calientes cada 30 minutos en tramos de 500 metros, para cada bus en servicio. Estas son obtenidas mediante factores de emisión proporcionados por la metodología COPERT 4, los cuales entregan información de cuantos gramos de contaminante se generan por kilómetro recorrido bajo ciertas condiciones de conducción. Estas emisiones son caracterizadas por su velocidad promedio, pendiente del camino y factor de carga del vehículo. Además, el análisis se extiende a emisiones por cada contaminante y por pasajero de cada expedición. Cabe mencionar que para la puesta en marcha de la metodología COPERT 4 se plantean cuatro implementaciones diferentes, con el fin de observar el efecto que hay sobre las emisiones por parte de las variables antes mencionadas.

Los resultados del estudio indican que Santiago es la comuna donde más emisiones se liberan a la atmósfera con un porcentaje de contribución entre 9% y 10% del total de emisiones en la región. Dióxido de carbono es lo que más se genera por la actividad del transporte público, llegando a alcanzar las 5.800 toneladas a la semana, mientras que los óxidos de nitrógeno alcanzan las 54 toneladas. Además, las emisiones generadas siguen un patrón temporal con tres máximos diarios coincidentes con periodos de gran flujo vehicular en la ciudad. Finalmente se muestra que las emisiones por pasajero transportado son altas y fluctuantes durante la madrugada, pero después de las 04:00 am son bajas y constantes.

*A mi familia ...*

# Agradecimientos

Primero que todo, quiero dar las gracias a toda mi familia por el amor incondicional que me han brindado durante toda mi vida. Por haberme dado la oportunidad de recibir la educación privilegiada que he tenido, la cual me ha entregado los conocimientos y valores que me permiten ser la persona que soy ahora. Realmente es algo que aprecio y se que no todos tienen la oportunidad de tenerla en este país.

Asimismo estoy agradecido de haber podido pertenecer a una institución tan prestigiosa como es la Universidad de Chile. Un lugar en donde se está en búsqueda constante de conocimiento para poder resolver los problemas que aquejan a nuestra sociedad; un espacio en donde se aprende a pensar y formar tu propia opinión sobre distintas materias; un momento en el que conoces amigos y compañeros dispuestos a trabajar contigo para mejorar nuestro país. En esta institución he conocido a muchas personas que de una u otra forma han pasado a formar parte de mi vida, quiero también agradecer a cada uno de ustedes por haberme dado la oportunidad de compartir un café, una cerveza, una pichanga o una conversación.

Sin duda alguna, lo que me más me marcó durante mi estancia en la facultad fue haber formado parte de un grupo organizado de amigos llamado Oikos: por un campus sustentable. Personas con grandes ideales que han sabido heredar y transmitir sus motivaciones desde y hacia otros, con el fin de lograr formar un mundo sostenible, donde hombre y naturaleza puedan convivir juntos. Gracias chicos y chicas por motivarme a seguir con lo que me gusta y sobretodo por haber compartido conmigo tantos momentos mágicos.

También quiero dar las gracias a cada uno de los miembros de mi comisión por toda la ayuda, buena voluntad y buen trato que me brindaron a lo largo de este trabajo. Realmente fui afortunado de ser guiado por ustedes.

Para terminar, quiero dar gracias a la vida por haberme cruzado con una maravillosa persona que me ha ayudado a volar y a volar cada vez más alto en búsqueda de nuevas aventuras que me llevan a ser cada vez más feliz; la persona que quiero abrazar todos los días y que ha sabido entregarme su cariño por un largo tiempo. Muchas gracias mi Eve!

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
<b>2. Antecedentes Específicos</b>	<b>3</b>
2.1. Sistema de transporte público en Santiago . . . . .	3
2.2. Normas de emisiones para vehículos diésel pesados . . . . .	5
2.3. Matrices Origen-Destino . . . . .	6
2.3.1. Buses . . . . .	8
2.3.2. Metro . . . . .	9
2.3.3. Estación de bus . . . . .	9
2.4. Estimación de velocidad comercial promedio . . . . .	9
2.5. Emisiones Contaminantes . . . . .	13
2.5.1. Emisiones en motores diésel . . . . .	14
2.5.2. Sistemas de control de emisiones diésel . . . . .	16
2.5.3. Inventarios de Emisiones . . . . .	19
2.5.4. COPERT 4 . . . . .	21
<b>3. Metodología</b>	<b>26</b>
3.1. Actividades . . . . .	26
3.2. Recursos Disponibles . . . . .	28
<b>4. Estudio, pre-procesamiento y utilización de datos</b>	<b>29</b>
4.1. Bases de datos . . . . .	29
4.1.1. COPERT 4 . . . . .	29
4.1.2. <i>diccionarioPatentes</i> . . . . .	30
4.1.3. <i>rutaTramada</i> . . . . .	30
4.1.4. <i>secuenciaParadas</i> en servicio-sentido . . . . .	31
4.1.5. <i>diccionarioServicio</i> . . . . .	31
4.1.6. <i>velocidadesFull</i> . . . . .	32
4.1.7. <i>perfilCarga</i> . . . . .	32
4.2. Pre-procesamiento de datos . . . . .	32
4.2.1. Filtro sobre datos de velocidad . . . . .	32

4.2.2.	Correspondencia entre bases de datos velocidadesFull y perfilCarga . . . . .	33
4.3.	Utilización de datos: implementaciones . . . . .	34
4.3.1.	Implementación 1: caso base . . . . .	34
4.3.2.	Implementación 2: efecto de la pendiente . . . . .	34
4.3.3.	Implementación 3: efecto de la carga . . . . .	35
4.3.4.	Implementación 4: final . . . . .	35
<b>5.</b>	<b>Resultados y Discusiones</b>	<b>37</b>
5.1.	Factores de emisión . . . . .	37
5.1.1.	Efecto de las variables de entrada . . . . .	37
5.1.2.	Comparación de tecnologías . . . . .	38
5.2.	Emisiones de la flota completa de buses . . . . .	47
5.2.1.	Distribución temporal de emisiones . . . . .	47
5.2.2.	Distribución espacial de emisiones . . . . .	49
5.3.	Emisiones del servicio 506I . . . . .	57
5.3.1.	Distribución temporal de emisiones . . . . .	58
5.3.2.	Distribución temporal de emisiones por pasajero . . . . .	63
5.3.3.	Distribución espacial de emisiones . . . . .	66
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>70</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>72</b>
<b>A.</b>	<b>Emisiones calculadas para la flota completa</b>	<b>74</b>
A.1.	Distribución temporal . . . . .	74
A.2.	Distribución espacial . . . . .	77
<b>B.</b>	<b>Emisiones del servicio 506I</b>	<b>80</b>
B.1.	Distribución temporal . . . . .	80

# Índice de Figuras

2.1. Códigos alfanuméricos de servicios. Fuente: [1] . . . . .	4
2.2. Ejemplo pintura carrocería de los buses e información de recorrido. Fuente: [2]	5
2.3. Proyección de pulsos GPS sobre los caminos. Fuente:[3]. . . . .	10
2.4. Ejemplo de resultados de simplificación de ruta, con verde la ruta simplificada sobre la ruta azul original. Fuente: [4] . . . . .	10
2.5. Diagrama tiempo-espacio para un sistema de buses. Fuente:[3]. . . . .	11
2.6. Procedimiento de interpolación basado en datos GPS. Fuente:[3]. . . . .	12
2.7. Método de reconciliación propuesto en la aplicación de enfoques bottom-up y top-down durante la construcción de un inventario de emisiones urbano. Fuente: [5] . . . . .	20
2.8. Diagrama de flujo de aplicación de la metodología para la línea de base. Fuente:[5]	23
3.1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada. . . . .	27
4.1. Diagrama de relación entre las bases de datos utilizadas. . . . .	36
5.1. Factores de emisión calculados a partir de la implementación 1 - caso base. .	39
5.2. Factores de emisión calculados a partir de la implementación 2 - efecto de la pendiente. . . . .	40
5.3. Factores de emisión calculados a partir de la implementación 3 - efecto de la carga. . . . .	41
5.4. Comparación de factores de emisión de las patentes FLXR-55 y FLXB-40 calculados a partir de la implementación 1 - caso base. . . . .	44
5.5. Comparación de factores de emisión de las patentes FLXB-40, CJRH-14 y XA-4095 calculados a partir de la implementación 1 - caso base. . . . .	45
5.6. Comparación de factores de emisión de MP para buses Euro III, con y sin filtro calculados a partir de la implementación 1 - caso base. . . . .	46
5.7. Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2. . . . .	50
5.7. Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2 (continuación). . . . .	51
5.8. Emisiones totales cada 30 minutos para la semana completa en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2. . . . .	52
5.8. Emisiones totales cada 30 minutos para la semana completa en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2 (continuación). . . . .	53
5.9. Emisiones totales por comuna para el día 14 de Marzo de 2016, calculadas mediante la implementación 1. . . . .	54

5.9. Emisiones totales por comuna para el día 14 de Marzo de 2016, calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	55
5.10. Porcentaje de contribución de las comunas a la emisión total de contaminantes, para el día 14 de Marzo de 2016. Cálculo realizado mediante la implementación 1. . . . .	56
5.11. Distribución de velocidades del servicio 506I durante la semana en estudio. . . . .	57
5.12. Distribución de pendientes de la ruta del servicio 506I. . . . .	57
5.13. Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4. . . . .	59
5.13. Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4 (continuación). . . . .	60
5.14. Emisiones totales del servicio 506I cada 30 minutos del día 14-03-2016, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4. . . . .	61
5.14. Emisiones totales del servicio 506I cada 30 minutos del día 14-03-2016, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4 (continuación). . . . .	62
5.14. Emisiones totales del servicio 506I cada 30 minutos del día 14-03-2016, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4 (continuación). . . . .	63
5.15. Emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1. . . . .	64
5.15. Emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	65
5.15. Emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	66
5.16. Ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45 realizando un recorrido del servicio 506I, con horario de inicio 17:00 el día 18-03-2016. . . . .	67
5.16. Ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45 realizando un recorrido del servicio 506I, con horario de inicio 17:00 el día 18-03-2016 (continuación). . . . .	68
5.16. Ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45 realizando un recorrido del servicio 506I, con horario de inicio 17:00 el día 18-03-2016 (continuación). . . . .	69
A.1. Emisiones totales de CO en Las Condes, Cerrillos y Pudahuel el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1. . . . .	74
A.1. Emisiones totales de CO en Las Condes, Cerrillos y Pudahuel el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación). . . . .	75
A.2. Emisiones totales de NO <sub>x</sub> en Las Condes, Cerrillos y Pudahuel el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1. . . . .	76
A.3. Emisiones totales por comuna el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1. . . . .	77
A.3. Emisiones totales por comuna el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación). . . . .	78
A.3. Emisiones totales por comuna el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación). . . . .	79



B.1. Correlación entre emisiones totales cada 30 minutos y número de buses en servicio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1. . . . .	80
B.1. Correlación entre emisiones totales cada 30 minutos y número de buses en servicio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	81
B.1. Correlación entre emisiones totales cada 30 minutos y número de buses en servicio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	82
B.2. Correlación entre emisiones promedio cada 30 minutos y velocidad promedio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1. . . . .	83
B.2. Correlación entre emisiones promedio cada 30 minutos y velocidad promedio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	84
B.2. Correlación entre emisiones promedio cada 30 minutos y velocidad promedio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación). . . . .	85
B.3. Emisiones promedio y emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante las implementaciones 1. . . . .	85
B.3. Emisiones promedio y emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación). . . . .	86
B.3. Emisiones promedio y emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación). . . . .	87

# Índice de Tablas

2.1. Detalle de empresas del Transantiago. . . . .	4
2.2. Estándares de emisiones Europeos para motores diésel pesados: prueba en estado estacionario . . . . .	6
4.1. Campos de la base de datos <i>diccionarioPatentes</i> . . . . .	30
4.2. Campos de la base de datos <i>rutaTramada</i> . . . . .	30
4.3. Campos de la base de datos <i>secuenciaParadas</i> . . . . .	31
4.4. Campos de la base de datos <i>diccionarioServicio</i> . . . . .	31
4.5. Campos de la base de datos <i>velocidadesFull</i> . . . . .	32
4.6. Campos de la base de datos <i>perfilCarga</i> . . . . .	33
5.1. Clasificación de buses del Transantiago según norma de emisiones, tamaño del bus y existencia de filtro. . . . .	42
5.2. Comparación de factores de emisión de un bus Euro II [6] con buses Euro III y V usados en el presente estudio. Los factores de emisión desplegados son para una velocidad de 20 km/h. . . . .	43
5.3. Comparación de emisiones anuales entre el inventario USACH2013 [7] y los resultados del presente estudio. . . . .	47
5.4. Comparación de emisiones anuales entre el inventario USACH2013 [7] y los resultados del presente estudio extrapolando los fines de semana. . . . .	48

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Hoy en día, los gases de efecto invernadero son un tema de interés mundial, ya que estos son los principales responsables del calentamiento global. Tanto así, que en Abril del 2016, 174 países y la Unión Europea firmaron el acuerdo de París, en el cual se comprometen a tomar acciones de mitigación para no incrementar la temperatura global del planeta en más de 2°C, de aquí al 2100.

Sumado a lo anterior, existe una importante preocupación por parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre cómo la presencia de gases contaminantes afecta la salud de las personas. Por lo anterior, se está proporcionando apoyo técnico a los países mediante lineamientos de calidad del aire, que sirven como guía global en la reducción de los impactos de la polución sobre la salud.

Para cumplir con este tipo de metas y acciones de mitigación que son cada vez más exigentes, es necesario contar con inventarios de emisiones de gases cada vez más detallados, con el fin de mejorar la toma de decisiones entorno a estos.

En la región Metropolitana de Chile, el transporte es responsable de un 81 % de las emisiones de CO y 41 % de las emisiones de material particulado, además del 79 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> [7]. Estas corresponden a las emisiones de camiones, buses y vehículos particulares. Un sistema de transporte público bien organizado y operado, genera mucho menos contaminación por pasajero transportado que el vehículo particular. Sin embargo, estas tasas pueden variar mucho dependiendo de cómo se opere el sistema.

La llegada de nuevos dispositivos tecnológicos a la sociedad, cuya tendencia es estar conectados a internet, o bien a otros dispositivos, trae consigo nuevas oportunidades asociadas al análisis de la transferencia de información. Sin embargo, estas oportunidades presentan el desafío de manejar las grandes cantidades de datos pasivos que existen en las ciudades, con el fin de mejorar la toma de decisiones sobre las actividades que afecten la calidad de vida de las personas.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de título es realizar una estimación de la distribución espacio-temporal de emisiones contaminantes producidas por el transporte público en Santiago de Chile.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Estimación de la distribución espacio-temporal de las emisiones contaminantes generadas por la flota de buses del transporte público en Santiago, mediante el uso de la metodología COPERT 4.
- Cálculo de las emisiones por pasajero transportado.
- Análisis de la influencia de datos de velocidad, pendiente de ruta y carga del vehículo sobre la estimación de emisiones contaminantes generadas por el servicio 506I.

## 1.3. Alcances

Para este estudio se consideran los siguientes alcances:

- Los contaminantes que se consideran en el trabajo de título son: monóxido de carbono ( $CO$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), compuestos orgánicos volátiles ( $COV$ ), material particulado ( $MP$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).
- El estudio se realiza para una semana laboral del mes de Marzo del año 2016.
- La estimación de emisiones se realiza para toda la flota de buses del transporte público de Santiago, pero los resultados se discuten en torno a los buses del servicio 506.

# Capítulo 2

## Antecedentes Específicos

### 2.1. Sistema de transporte público en Santiago

El sistema de transporte público de Santiago, llamado **Transantiago**, integra física y tarifariamente a la totalidad de los buses de transporte público de la ciudad, operados por siete empresas concesionarias, además de Metro de Santiago. Tiene sobre 6.000 buses, todos equipados con aparatos GPS, operando diariamente en una red que contiene 70 km de vías segregadas de buses y sobre 11.000 paraderos. La red de metro tiene cinco líneas, 103 km de rieles, 108 estaciones, y actualmente se está expandiendo.


El sistema de pago depende de los viajes realizados por los usuarios, este consiste en una tarifa fija que es aplicada a viajes con un máximo de tres etapas y que tienen que ser realizadas dentro de 2 horas. Un pequeño recargo, el cual es mayor durante horas punta, es aplicado a viajes que usan la red de metro. Para efectuar el pago se utiliza una tarjeta inteligente llamada **bip!**, la cual es el único medio de pago aceptado en el sistema de buses y por lejos el método de pago más popular en el metro, representando el 97 % de las transacciones de pago de los 4,6 millones de viajes diarios en el transporte público. Para esta estructura de pago dada, un toque de validación no es necesario a la salida de buses o metro [8].

El Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) es la entidad gubernamental que regula, controla y supervisa el Sistema de Transporte Público de Santiago, el cual sirve a una población de 6,6 millones de habitantes.

Actualmente existen siete unidades de operación que componen el Transantiago, cada una con un color característico y servicios asociados. Las empresas concesionarias adjudicadas a las unidades de operación se muestran en la Tabla 2.1.

Los servicios de buses que forman parte del Sistema de Transporte Público se identifican con un código alfanumérico. Este código puede comprender tres dígitos o una letra mayúscula que antecede dos dígitos. Además, los códigos de servicio pueden tener una letra minúscula de sufijo que identifica el tipo de servicio, como se muestra en la Figura 2.1. Sumado a lo anterior, cada bus es pintado según el color de la unidad que se adjudicó cada empresa, la

Tabla 2.1: Detalle de empresas del Transantiago.

	Empresa	Responsable de los servicios
	INVERSIONES ALSACIA S.A.	100
	BUSES VULE S.A.	300, E, H e I
	SUBUS CHILE S.A.	200 y G
	EXPRESS DE SANTIAGO UNO S.A.	400 y D
	METBUS S.A.	500 y J
	REDBUS URBANO S.A.	B y C
	SERVICIO DE TRANSPORTE DE PERSONAS	F

Fuente: Transantiago <sup>1</sup>

cual se identifica con los colores antes especificados (ver Figura 2.2).

Los buses con que se efectúen servicios de locomoción colectiva urbana, atendiendo a su capacidad de transporte, se clasifican en los siguientes tipos [9]:

- Bus liviano (o Tipo L): bus con no más de 26 asientos, incluido el del conductor, y con un peso bruto vehicular inferior a 10 toneladas.
- Bus mediano (o Tipo M): bus con más de 26 asientos, incluido el del conductor, y peso bruto vehicular igual o superior a 10 toneladas pero inferior a 14 toneladas.
- Bus pesado (o Tipo P): bus con más de 26 asientos, incluido el del conductor, y peso bruto vehicular igual o superior a 14 toneladas.

Además, después de solicitar su primera inscripción en el Registro Nacional de Transporte Público de Pasajeros, en las fechas y en las ciudades que por Resolución disponga el Ministerio



Figura 2.1: Códigos alfanuméricos de servicios. Fuente: [1]

<sup>1</sup><https://www.transantiago.cl>



Figura 2.2: Ejemplo pintura carrocería de los buses e información de recorrido. Fuente: [2]

de Transportes y Telecomunicaciones, según su longitud los buses se clasifican de la siguiente manera:

- Bus clase A: bus de una longitud igual o superior a 8 metros e inferior a 11 metros. A su vez, los buses Clase A se clasifican de la siguiente manera:
  - Bus clase A1: bus perteneciente a la clase A, cuya longitud es inferior a 9 metros.
  - Bus clase A2: bus perteneciente a la clase A, cuya longitud es igual o superior a 9 metros.
- Bus clase B: bus de una longitud igual o superior a 11 metros e inferior a 14 metros.
- Bus clase C: bus de una longitud igual o superior a 14 metros. La longitud será considerada entre los extremos anterior y posterior del vehículo.

## 2.2. Normas de emisiones para vehículos diésel pesados

Las emisiones de vehículos terrestres han sido controladas por la legislación Europea desde los años 70. Con el fin de cumplir los requerimientos cada vez más estrictos de la legislación, los productores de vehículos han mejorado continuamente la tecnología de los motores y han introducido varios sistemas de control de emisiones. Como resultado, los vehículos modernos tienen niveles de emisiones para contaminantes regulados (CO, NO<sub>x</sub>, THC) los cuales son más de un orden de magnitud menor que las de vehículos que entraron en servicio dos décadas atrás.

Los vehículos terrestres son usualmente clasificados de acuerdo a sus niveles de tecnología de control de emisiones. lo cual es de hecho definido en términos de la legislación de emisiones

a la que obedecen.

Las emisiones de motores diésel usados en vehículos de peso nominal bruto sobre 3.5 toneladas fueron por primera vez regulados en 1988 con la introducción de la regulación ECE 49. Los vehículos que cumplen con la ECE 49, o versiones anteriores, son todos clasificados como “convencionales”. La directriz 91/542/EEC trajo dos conjuntos de límites de emisiones reducidas implementados en dos etapas, válidos desde 1992 a 1995 (Etapa 1 - Euro I) y desde 1996 a 2000 (Etapa 2 - Euro II). La directriz 1999/96/EC Etapa 1 (Euro III) fue válida desde el 2000, e introdujo un 30 % de reducción de todos los contaminantes con respecto a Euro II. La misma directriz incluyó un paso intermedio en 2005 (Euro IV), y un paso final en 2008 (Euro V). Los estándares Euro V son muy estrictos, requiriendo una reducción en NOx de más de 70 % y una reducción en MP de más de 85 % comparado con los estándares Euro II. Esto es logrado con ajustes del motor y catalizador de oxidación para control de material particulado, y mediante un reductor catalítico selectivo (SCR) para control de NOx.

En la Tabla 2.2 se muestran los factores de emisión límites de cada norma para los contaminantes CO, HC, MP y NOx. Se puede apreciar como los estándares de emisiones son cada vez más estrictos con el tiempo.

Tabla 2.2: Estándares de emisiones Europea para motores diesel pesados: prueba en estado estacionario.

Etapa	Fecha	CO	HC	NOx	PM
		g/kWh			
Euro I	1992, $\leq 85$ kW	4,50	1,10	8,00	0,61
	1992, $>85$ kW	4,50	1,10	8,00	0,36
Euro II	1996.10	4,00	1,10	7,00	0,25
	1998.10	4,00	1,10	7,00	0,15
Euro III	1999.10 EEV only	1,50	0,25	2,00	0,02
	2000.10	2,10	0,66	5,00	0,10 <sup>a</sup>
Euro IV	2005.10	1,50	0,46	3,50	0,02
Euro V	2008.10	1,50	0,46	2,00	0,02
Euro VI	2013.01	1,50	0,13	0,40	0,01

a - PM = 0.13 g/kWh para motores  $<0.75$  dm<sup>3</sup> una cilindrada por cilindro y una velocidad de potencia nominal  $>3000$  min<sup>-1</sup>

Fuente: DieselNet <sup>2</sup>

## 2.3. Matrices Origen-Destino

En esta sección se presenta una metodología para estimar matrices origen-destino del transporte público en Santiago de Chile [10].

En primer lugar se define un viaje como un movimiento desde un punto de origen a un punto de destino, cada uno de los cuales tiene uno o más segmentos, los que corresponden a movimientos de un servicio en particular (bus o Metro). Además, se definen origen y destino

<sup>2</sup><https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>



como las posiciones donde los viajes comienzan y terminan, y puntos de subida y bajada como las posiciones donde los segmentos comienzan y terminan, respectivamente. Dado el sistema de pago del Transantiago, solo combinaciones bus-bus y bus-Metro se reconocen como transbordos. Cuando un usuario hace un transbordo entre líneas de Metro el cambio no es registrado por el sistema de cobro automático y, por lo tanto, solo un segmento de viaje es tomado en cuenta.

Los datos de entrada del modelo provienen de tres fuentes principales que combinadas permiten obtener la posición de las transacciones en la ciudad para luego estimar los puntos de bajada de los pasajeros. Estas fuentes de datos son:

- Transacciones (de subida) obtenidas desde un sistema de cobro automático,
- Posición del vehículo generada por un sistema de localización automático,
- Una definición geocodificada de la red de transporte público.

El estudio se realizó para una semana de Marzo del 2009 y una semana de Junio del 2010, y fue posible identificar las posiciones de la ciudad donde las transacciones fueron hechas en 98,5% y 99,9% de los casos, respectivamente.

Ahora bien, ya que el sistema solo tienen validación de subida, es necesario estimar el punto de bajada siguiendo la secuencia de transacciones de los pasajeros y asumiendo que la siguiente transacción bip!, ocurre después de la bajada. Los supuestos considerados por la metodología son los siguientes:

- Cada tarjeta bip! corresponde a un usuario,
- Después de un viaje, los usuarios retornarán al destino de la estación de viaje previa,
- Al final del día, los usuarios retornarán a la estación donde ellos subieron en el primer viaje del mismo día,
- La distancia máxima de caminata (d) corresponde a la distancia que una persona está dispuesta a caminar, y depende del tipo de ciudad, tiempo, pendiente y otros factores. Para el estudio se estableció como 1000 m,
- Posibilidad de mirar al día siguiente e incluso a patrones de viaje semanales para completar información faltante.

La idea básica del modelo es seguir la cadena de viaje de una tarjeta e identificar la posición de bajada (estación de metro o parada de bus) mirando la posición y tiempo de la siguiente subida. Esto solo es posible cuando tanto la transacción actual como la que prosigue tienen información de posición, la cual es tomada de la base de datos de localización automática de vehículos. Para el caso de la última transacción del día, se asume que su destino está cerca del punto donde comenzó el primer viaje del día, terminando el ciclo de viaje diario para ese usuario en particular. Si hay solo un viaje por tarjeta, no es posible hacer ninguna inferencia con información de un solo día.

### 2.3.1. Buses

Para identificar los puntos de bajada de los usuarios desde los buses, se propone minimizar una función de tiempo generalizado ( $Tg_i$ ) en vez de la distancia. Los puntos de bajada son buscados a lo largo de la trayectoria de los buses, conocida a partir de la base de datos GPS.

La estimación de la posición-tiempo de bajada ( $x_a, y_a, t_a$ ) corresponde al punto sobre la trayectoria del bus que minimiza la distancia del tiempo generalizado con la posición-tiempo de la subida siguiente. En la ec. 2.1 se define el tiempo generalizado.

$$Tg_i = t_i + f_w \cdot \frac{d_{i-post}}{s_w} \quad (2.1)$$

Donde:

- $t_i$ : tiempo asociado a la posición  $i$
- $f_w$ : factor de penalización
- $d_{i-post}$ : distancia entre la posición  $i$  y la posición de la siguiente subida
- $s_w$ : velocidad de caminata

El factor de penalización ( $f_w$ ) se obtiene a partir de modelos de elección discreta, como la desutilidad del tiempo de caminata sobre el tiempo de viaje en el vehículo. El tiempo de viaje asociado con la posición  $i$  puede ser obtenido como  $t_i$  menos el tiempo de subida.

Luego se lleva a cabo la búsqueda sobre todas las posiciones  $i$  de la trayectoria del bus que están en la distancia de caminata ( $d$ ) de la siguiente posición de transacción. Por lo tanto, el problema de optimización puede ser escrito como se presenta en la ec. 2.2.

$$\begin{aligned} & \underset{i}{\text{mín}} Tg_i \\ & s.t \\ & d_{i-post} < d \end{aligned} \quad (2.2)$$

Para implementar el método de una manera eficiente y factible, se define una ventana de tiempo para realizar la búsqueda en la trayectoria del bus desde el instante en que el usuario sube al vehículo. Este es un parámetro del modelo que puede ser ajustado a diferentes niveles para rutas de troncales y alimentadores, dependiendo de las características de ambos tipos de servicio.

Si no se encuentra una solución para la ec. 2.2, dentro del límite de distancia máxima, luego se asume que hay un viaje o segmento faltante, el cual probablemente es hecho en otro medio de transporte o con otra tarjeta bip!. En ese caso, ese viaje se etiqueta como “sin estimación del punto de bajada”.

### 2.3.2. Metro

En el caso de segmentos de viaje en Metro, los puntos de subida y bajada son estaciones de Metro. La estación de subida del usuario se conoce directamente a partir de los datos y la estación de bajada se estima como la más cercana (en distancia) a la siguiente subida, dentro de un radio definido como la distancia de caminata ( $d$ ). Si no hay estación dentro de este radio se asume que hay información faltante y que el punto de bajada no puede ser estimado.

Cuando logra encontrar una bajada de estación de Metro dentro del radio  $d$ , se debe estimar el instante en que esta ocurre. Como solo se conoce la estación de subida, se implementa un procedimiento de búsqueda del camino más corto, para estimar la ruta seguida por el usuario entre la estación de subida y de bajada.

El tiempo de viaje entre estaciones, el tiempo de espera en estaciones y el tiempo de caminata dentro de las estaciones son parámetros de estos procedimientos, los cuales son obtenidos desde el plan de operación de Metro. El tiempo total de viaje es calculado como la suma de los componentes correspondientes.

### 2.3.3. Estación de bus

Las estaciones de bus, también llamadas zonas pagas, son los paraderos en los cuales se pueden realizar transacciones bip!. Es el caso más difícil en el estudio, ya que los usuarios validan sus viajes fuera de los buses, y pueden subir a cualquiera de los buses que paran en esas estaciones. Por lo tanto, en este caso hay un problema adicional a resolver: asignar un bus a cada transacción realizada en la estación de bus. Una vez que el bus ha sido asignado se aplica el procedimiento mencionado anteriormente.

## 2.4. Estimación de velocidad comercial promedio

A continuación se presenta un método basado en datos generados por GPS para monitorear sistemáticamente la velocidad promedio de buses [3]. Esta metodología está basada en un cálculo de velocidades que permite la detección de segmentos y periodos con condiciones de circulación pobres.

Primero, con el fin de evitar cualquier problema relacionado a la geometría de los caminos, se procede a realizar una proyección de las observaciones GPS sobre la ruta, de tal manera que se trabaja en base al concepto de distancia sobre la ruta. En la Figura 2.3, se muestra el proceso de proyección sobre los caminos, en el cual cada par  $(\bar{p}_i, t_i)$  denota la posición (en coordenadas bidimensionales) que es instantáneamente grabada por un pulso GPS  $i$ . El par  $(d_i, t_i)$  corresponde a la nueva descripción del pulso GPS  $i$ , en el cual la posición es trasladada a una medida de distancia relativa al origen del trayecto de la ruta asociada al pulso.

Posteriormente, se realiza un proceso de simplificación de la ruta original de cada servicio,

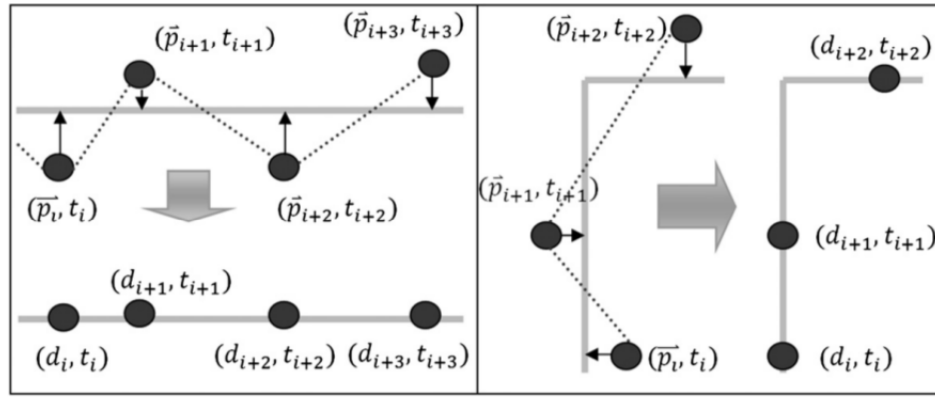


Figura 2.3: Proyección de pulsos GPS sobre los caminos. Fuente:[3].

con el fin de hacer los cálculos venideros más rápidos. Esto se lleva a cabo aplicando un algoritmo de simplificación de polígonos, el cual disminuye el número de nodos de la ruta utilizando un criterio de selección que permite que la ruta (con los nodos que son eliminados) no se deforme más de 4 metros con respecto a la ruta original, lo cual permite mayor eficiencia en los algoritmos posteriormente utilizados en conjunto con la eliminación de algunos problemas en la geometría de las rutas dadas por su construcción [4]. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de ruta simplificada, siendo la ruta verde la simplificada y la azul la original.



Figura 2.4: Ejemplo de resultados de simplificación de ruta, con verde la ruta simplificada sobre la ruta azul original. Fuente: [4]

Luego, se define una grilla espacio-tiempo típica para cada ruta dada, donde cada elemento de grilla está definido por un rectángulo de bordes  $D$  y  $T$ . En la Figura 2.5 se muestra la grilla propuesta y se destacan sus elementos básicos. Los puntos grises representan los pulsos GPS que son proyectados en los caminos rectificadas.

Dentro de un elemento de grilla  $g$  se calcula una medida representativa de la velocidad comercial promedio ( $s$ ), la cual es igual a la suma de la distancia total viajada por cada bus dentro del elemento de grilla, dividido por la suma del tiempo total de los buses dentro del elemento dado. Analíticamente, para un elemento de grilla  $g$ , la expresión para calcular la velocidad viene dada por la ec. 2.3.

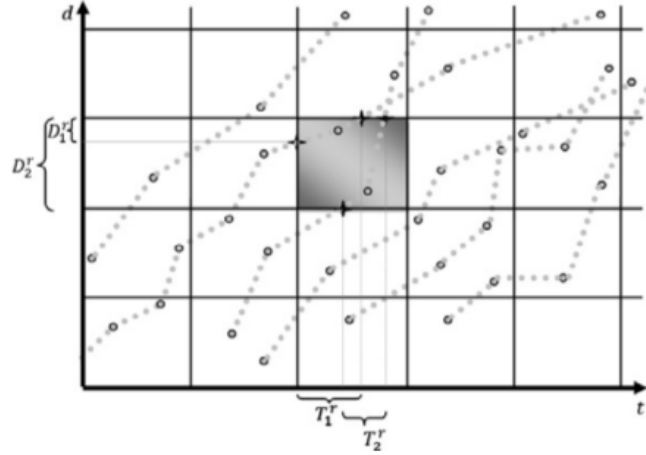


Figura 2.5: Diagrama tiempo-espacio para un sistema de buses. Fuente:[3].

$$\bar{s}_g = \frac{\sum_i D_i^g}{\sum_i T_i^g} \quad (2.3)$$

Donde:

- $\bar{s}_g$ : velocidad comercial promedio dentro del elemento de grilla  $g$
- $D_i^g$ : distancia que recorre el bus  $i$  dentro del elemento de grilla  $g$
- $T_i^g$ : intervalo de tiempo que el bus  $i$  está dentro del elemento de grilla  $g$

Cabe notar que solo se incluyen aquellos buses que son observados dentro de los elementos de grilla. Si no hay buses registrados dentro de un elemento se asigna un valor nulo a la velocidad.

Para identificar la malla se divide cada trayecto de ruta simplificado en segmentos de largo  $D$  en el espacio (medido a lo largo del camino), y en periodos de tiempo de duración  $T$ . Para generar tales segmentos exclusivamente dependientes de  $D$  y  $T$ , se define un procedimiento automático. En la dimensión espacial, la división es llevada a cabo por medio de un algoritmo que proporciona un conjunto de puntos separados por un distancia igual a  $D$ . El siguiente paso en el cálculo de la velocidad asociada con cada elemento de grilla, es determinar la intersección de la trayectoria de los buses con los bordes de cada elemento. Se usa la información GPS correspondiente a la posición de los buses registrados en un intervalo de tiempo fijo y proyectado en los caminos. A partir de estos datos, se necesita interpolar el instante, o la posición en la cual cada bus entra y sale de un segmento específico, ya que la información del GPS no necesariamente calza con ese instante.

En la Figura 2.6, cada par  $(d_i^k, t_i^k)$  denota la posición e instante grabado por un pulso GPS  $i$  transmitido por el bus  $k$ . A partir de la información del GPS, se pueden calcular las coordenadas asociadas a la intersección entre el trayecto del bus y el borde del elemento de grilla (representado por estrellas en la Figura 2.6). La forma del segmento de trayectoria conlleva una interpolación en el espacio y tres en el tiempo, y los límites son calculados

analíticamente usando las ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.

$$t_{11}^* = t_1^1 + \frac{(d_0 - d_1^1)}{(d_2^1 - d_1^1)} \cdot (t_2^1 - t_1^1) \quad (2.4)$$

$$t_{12}^* = t_2^1 + \frac{(d_1 - d_2^1)}{(d_3^1 - d_2^1)} \cdot (t_3^1 - t_2^1) \quad (2.5)$$

$$t_{22}^* = t_2^2 + \frac{(d_1 - d_2^2)}{(d_3^2 - d_2^2)} \cdot (t_3^2 - t_2^2) \quad (2.6)$$

$$d_{21}^* = d_1^2 + \frac{(t_0 - t_1^2)}{(t_2^2 - t_1^2)} \cdot (d_2^2 - d_1^2) \quad (2.7)$$

Donde:

- $d_0, d_1, t_0$  y  $t_1$ : vértices del elemento de grilla
- $t_{11}^*$ : tiempo en que el bus 1 entra en la grilla.
- $t_{21}^*$ : tiempo en que el bus 1 sale de la grilla.
- $d_{21}^*$ : distancia a la que el bus 2 entra en la grilla.
- $t_{22}^*$ : tiempo en que el bus 2 sale de la grilla.

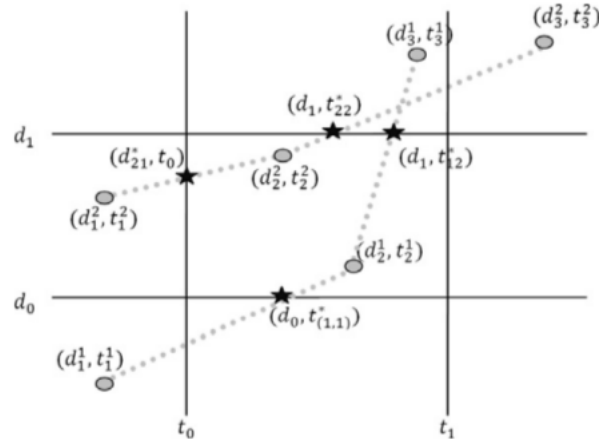


Figura 2.6: Procedimiento de interpolación basado en datos GPS. Fuente:[3].

Finalmente, a partir de la ec. 2.3, se obtiene la estimación de la velocidad comercial promedio asociada a un elemento de grilla específico  $g$ , la que viene dada por la ec. 2.8.

$$\bar{s}_g = \frac{D_1^g + D_2^g}{T_1^g + T_2^g} = \frac{(d_1 - d_{21}^*) + (d_1 - d_0)}{(t_{22}^*) + (t_{12}^* - t_{11}^*)} \quad (2.8)$$

Cabe señalar que en algunos casos, se requiere extrapolación en lugar de interpolación, lo cual se realiza con un procedimiento análogo. Además, para efectos de este estudio se utilizará un grilla cuya distancia  $D$  es 500 [m] y cuyo periodo  $T$  es 30 minutos.

## 2.5. Emisiones Contaminantes

El proceso de combustión produce  $CO_2$  y  $H_2O$  como productos principales. Desafortunadamente, la combustión también genera muchos subproductos los cuales son originados, o bien por la oxidación incompleta del combustible ( $CO$ , hidrocarburos, material particulado), o por la oxidación de especies no combustibles presentes en la cámara de combustión ( $NO_x$  a partir de  $N_2$  en el aire,  $SO_x$  a partir de  $S$  en el combustible y lubricante, etc.). Con el fin de cumplir con la legislación de emisiones, los productores de vehículos han instalado varios aparatos postratamiento - tales como convertidores catalíticos y filtros de partículas para motores diésel - para reducir las emisiones contaminantes. Sin embargo, tales dispositivos pueden, como resultado de su acción, producir también pequeñas cantidades de contaminantes como lo son el  $NH_3$  y el  $N_2O$ .

Los motores a gasolina son usados en vehículos pequeños de hasta 3,5 toneladas de peso bruto, ante todo por su potencia superior (razón de peso y un rango operacional más amplio) comparado con motores diésel, aunque también por razones tales como bajo ruido y una operación más refinada. Para vehículos muy pequeños (scooters y motocicletas), los motores de dos tiempos han sido favorecidos especialmente en el pasado, debido a que ellos proporcionan la mayor potencia. Sin embargo, tales motores se han vuelto cada vez menos populares en los años recientes debido a las estrictas regulaciones de emisiones. Por otro lado, los motores diésel dominan en aplicaciones pesadas por sus grandes eficiencias de combustible y torque comparado con motores a gasolina. No obstante, en los años recientes ha habido un cambio significativo hacia motores diésel en el mercado de automóviles de pasajeros, y en muchos países europeos los automóviles a diésel tienen la mayor parte de las nuevas inscripciones. Estadísticas publicadas por la “European Automobile Manufacturers Association”, muestran que 48,3 % de los automóviles de pasajeros vendidos en Europa el 2005 fueron de diésel, con inscripciones alcanzando el 70 % en países como Austria, Bélgica y Francia. Esto es resultado de la mayor eficiencia de combustible de los motores diésel y mejoras tecnológicas, las cuales han llevado a un incremento de la potencia de salida para un tamaño de motor dado [5].

Varias nuevas tecnologías han sido diseñadas para reducir tanto el consumo de energía, como las emisiones contaminantes. Estas tecnologías incluyen lo siguiente:

- Nuevos tipos de motores de combustión interna, como por ejemplo los de inyección directa de gasolina, autoencendido controlado, carga homogénea y encendido por compresión.
- Nuevos combustibles, tales como gas natural comprimido e hidrógeno.
- Trenes de potencia alternativos, tales como una combinación de un motor de combustión interna y un motor eléctrico, vehículos de celdas de combustible, etc.

Algunas de estas tecnologías ya han cobrado creciente popularidad, mientras otras están

aún en fase de desarrollo.

Dada la diversidad en conceptos de propulsión, el cálculo de emisiones de vehículos terrestres es un procedimiento complicado y exigente, el cual requiere datos de actividad de buena calidad y factores de emisión<sup>3</sup>. Estos últimos se definen como:

- Datos de actividad: de acuerdo a las directrices revisadas del IPCC de 1996 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, estos se definen como datos sobre la magnitud de la actividad humana que resultan en emisiones o absorciones tomando lugar durante un periodo de tiempo dado.
- Factores de emisión: se define como la tasa de emisiones promedio de un gas dado para una fuente dada, relativo a unidades de actividad. Para efectos de este estudio, los factores de emisión tienen unidades de gramos por kilómetro.

### 2.5.1. Emisiones en motores diésel

El motor diésel es un motor de auto-ignición en el cual el combustible y el aire son mezclados dentro del motor. El aire necesario para la combustión es altamente comprimido dentro de la cámara de combustión. Esto genera altas temperaturas, las cuales son suficientes para que el diésel se encienda espontáneamente cuando es inyectado dentro del cilindro. De esta forma, el motor diésel usa calor para liberar la energía química contenida en combustible diésel y para convertirla en fuerza mecánica [11].

Las emisiones contaminantes tienen una tasa de menos de 1 % en los gases de escape diésel. Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) tienen la mayor proporción de las emisiones contaminantes diésel con una tasa de más del 50 %. Después de las emisiones  $\text{NO}_x$ , el material particulado (MP) tiene la segunda mayor proporción en las emisiones contaminantes. Dado que los motores diésel son motores de combustión pobre, la concentración de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) es mínima [12].

En esta sección se explican los cuatro contaminantes principales provenientes de motores diésel (CO, HC, MP y  $\text{NO}_x$ ). Cada tipo de emisión es explicada individualmente como se presenta en [12].

**Monóxido de carbono (CO)** El monóxido de carbono es resultado de una combustión incompleta, donde el proceso oxidación no ocurre completamente.

Su concentración es ampliamente dependiente de la mezcla aire-combustible y es mayor cuando el factor de exceso de aire ( $\lambda$ ) es menor que uno, lo cual es clasificado como mezcla rica. Puede ser causado especialmente en los arranques y en las aceleraciones espontáneas del motor donde las mezclas ricas son necesarias. En las mezclas ricas, debido a la deficiencia de aire y la concentración reactante, no todo el carbono puede ser convertido en  $\text{CO}_2$  y se forma concentración de CO. Aunque el CO es producido durante operaciones en mezclas ricas, una

---

<sup>3</sup>UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change: Definitions, Julio 2015, url: [http://unfccc.int/ghg\\_data/online\\_help/definitions/items/3817.php](http://unfccc.int/ghg_data/online_help/definitions/items/3817.php)



pequeña proporción de CO se produce bajo condiciones de mezcla pobre debido a efectos cinéticos químicos.

Los motores diésel son motores de mezclas pobres los cuales tienen una alta razón aire-combustible ( $\lambda > 1$ ). Por ende, la formación de CO es mínima en motores diésel. No obstante, el CO se produce si las gotitas en el motor diésel son muy grandes o si no hay suficiente turbulencia en la cámara de combustión.

**Hidrocarburos (HC)** Las emisiones de hidrocarburos están compuestas de combustible no quemado como resultado de una temperatura insuficiente, la cual ocurre cerca de la pared del cilindro. En esta zona, la temperatura de la mezcla aire-combustible es significativamente menor que en el centro del cilindro.

Los motores diésel normalmente emiten bajos niveles de hidrocarburos. Las emisiones de hidrocarburos diésel ocurren principalmente a bajas cargas. La mayor fuente de emisión a baja carga es una mezcla pobre de aire-combustible, debido a que la velocidad de la llama puede ser muy baja para que la combustión sea completada durante la carrera del pistón, o bien la combustión puede no ocurrir, y estas condiciones causan altas emisiones de hidrocarburos.

**Material particulado (MP)** Las emisiones de material particulado en los gases de escape son resultado del proceso de combustión. Estos pueden ser originados por la aglomeración de partículas muy pequeñas de combustible parcialmente quemado, lubricante parcialmente quemado, contenido de cenizas en el combustible, y lubricante de cilindro, o azufre y agua. La mayor parte del material particulado es resultado de una combustión incompleta de los hidrocarburos en el combustible y en el lubricante.

La composición típica del MP de un motor diésel pesado es 41 % carbono, 7 % combustible no quemado, 25 % aceite no quemado, 14 % azufre y agua, 13 % de cenizas y otros componentes.

El proceso de formación del MP depende de varios factores, como el proceso de combustión y expansión, la calidad del combustible (contenido de ceniza y azufre), calidad de los aceites lubricantes, temperatura de combustión, enfriamiento de los gases de escape, etc.

**Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )** Los motores diésel usan aire caliente altamente comprimido para encender el combustible. El aire, compuesto principalmente de oxígeno y nitrógeno, es inicialmente empujado a la cámara de combustión. Luego es comprimido, y el combustible es inyectado directamente en el aire comprimido al principio de la carrera de compresión en la cámara de combustión. El combustible es quemado, y el calor es liberado. Normalmente en este proceso, el nitrógeno en el aire no reacciona con oxígeno en la cámara de combustión y es emitido intacto fuera del motor. Sin embargo, las altas temperaturas sobre los 1.600 °C en los cilindros causan que el nitrógeno reaccione con oxígeno y se genere  $\text{NO}_x$ . Por lo tanto, no es erróneo decir que las mayores influencias en la formación de  $\text{NO}_x$  son la temperatura y la concentración de oxígeno en la combustión.

La cantidad de  $\text{NO}_x$  producida es función de la temperatura máxima en el cilindro, concentración de oxígeno, y tiempo de residencia. La mayoría del  $\text{NO}_x$  emitido es formado tempranamente en el proceso de combustión, cuando el pistón está cerca en la parte superior de su carrera, ya que es cuando la temperatura de la llama está en su punto más alto. Incrementar la temperatura de combustión incrementa el  $\text{NO}_x$  hasta tres veces por cada 100 °C.

Los óxidos de nitrógeno son conocidos como óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). El NO constituye el 85-95 % de  $\text{NO}_x$ . Estos son gradualmente convertidos en  $\text{NO}_2$  en la atmósfera.

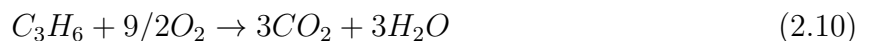
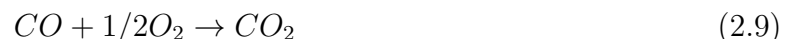
El transporte terrestre es la mayor causa de  $\text{NO}_x$  urbano alrededor del mundo contribuyendo al 40-70 % del  $\text{NO}_x$ . Entre los varios tipos de vehículos, los vehículos diésel son los mayores contribuidores de emisiones de  $\text{NO}_x$ , debido a que requieren más altas temperaturas. Los motores diésel son responsables de aproximadamente 85 % de todas las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de fuentes móviles, principalmente en forma de NO.

### 2.5.2. Sistemas de control de emisiones diésel

Existen dos maneras de reducir las emisiones de material particulado (MP) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en grandes motores. El primero es con recirculación de gases de escape refrigerados (EGR) en conjunto con un filtro de escape, de esta manera se bajan los niveles de  $\text{NO}_x$  al tiempo que el filtro de escape reduce los MP.

La segunda manera es con una reducción catalítica selectiva (SCR) que disminuye los  $\text{NO}_x$  junto a un catalizador de oxidación diésel (DOC) que reduce el MP restante. Las máquinas también pueden usar una combinación de EGR refrigerado, un filtro de escape y un SCR para alcanzar niveles extremadamente bajos de emisiones. A continuación se explican cada uno de estos sistemas de control de emisiones.

**Catalizador de oxidación diésel (DOC)** La función principal de los DOCs es oxidar las emisiones de HC y de CO. Además, los DOCs juegan un rol en la disminución de masa de las emisiones de partículas diésel mediante la oxidación de algunos hidrocarburos que son absorbidos en las partículas de carbono. Como se mencionó anteriormente, los DOCs pueden ser usados en conjunto con un catalizador SCR para oxidar NO en  $\text{NO}_2$  e incrementar la razón  $\text{NO}_2:\text{NO}_x$ . Existen tres reacciones principales que ocurren en los DOCs, estas son:



Los CO y HC se oxidan para formar CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en los DOC (ver ec. 2.9 y 2.10). Los gases de escape diésel generalmente contienen O<sub>2</sub>, fluctuando entre 2 y 17% por volumen, lo cual no reacciona con el combustible en la cámara de combustión. Este O<sub>2</sub> es consumido permanentemente en el DOC.

Otra reacción química que toma lugar en los DOCs, es la oxidación de NO para formar NO<sub>2</sub> como se muestra en la ec. 2.11. Las concentraciones de NO<sub>2</sub> en los NO<sub>x</sub> son de gran importancia para los dispositivos posteriores a los DOCs, como los filtros y SCR. Una alta concentración de NO<sub>2</sub> en los NO<sub>x</sub> generan un incremento de la eficiencia de los filtros de partículas y los SCR. En los gases de escape del motor no tratado, la componente NO<sub>2</sub> en los NO<sub>x</sub> es solo el 10% en la mayor parte de los puntos de operación. Con la función del DOC, la tasa NO<sub>2</sub>:NO<sub>x</sub> es incrementada induciendo equilibrio termodinámico.

Todos los motores diésel nuevos montados en autos de pasajeros, vehículos diésel livianos y pesados vienen equipados con DOCs. La reducción en emisiones por el uso de DOC es de alrededor de 60 – 90% para HC y CO [12].

**Filtro de partículas diésel (DPF)** Los filtros de partículas son usados para remover las emisiones de MP de los gases de escape mediante la filtración física. Usualmente están hechos de cordierita (2MgO–2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–5SiO<sub>2</sub>) o carburo de silicio en forma de panal de abeja. Los conductos de la estructura poseen alternadamente una de las entradas bloqueadas, lo que fuerza al material particulado a fluir a través de las paredes. Como las partículas de hollín pasan a través de las paredes, ellas son transportadas al muro de poros por difusión, donde quedan adheridas.

Las paredes de los filtros están diseñadas para tener una porosidad óptima, permitiendo que los gases de escape pasen a través de sus murallas sin ningún obstáculo, siendo al mismo tiempo suficientemente impermeables para recoger las especies particuladas. Como el filtro se satura cada vez más con hollín, se forma una capa de hollín en la superficie de los canales de las murallas, lo cual proporciona una filtración de superficie altamente eficiente para la siguiente fase de operación. No obstante, se debe prevenir la saturación excesiva. Cuando los filtros acumulan material particulado, esto genera una contrapresión que tiene muchos efectos negativos, tales como incremento en el consumo de combustible, fallas de motor y esfuerzos en el filtro. Para prevenir estos efectos negativos, los filtros de partículas diésel tienen que regenerarse, mediante la quema del MP atrapado [12].

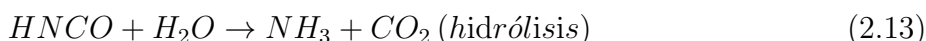
**Reducción catalítica selectiva (SCR)** La SCR es usada para minimizar las emisiones de NO<sub>x</sub> en los gases de escape mediante la utilización de amoníaco (NH<sub>3</sub>) como reductor. Se liberan agua y gas nitrógeno como resultados de la conversión catalítica de NO<sub>x</sub> en los gases de escape. Debido a los efectos tóxicos del amoníaco, y para prevenir la quema de este en la atmósfera caliente antes de la reacción, el amoníaco es proporcionado a partir de una solución acuosa de urea. Esta solución es obtenida de la mezcla de 33% urea (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO y 67% de agua pura.

Con el fin de obtener altas eficiencias, la cantidad de NH<sub>3</sub> almacenada en los catalizadores SCR deberían ser controladas tanto como sea posible. Sin embargo, un alto almacenamiento

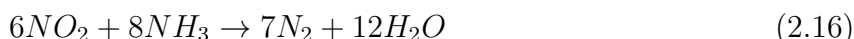
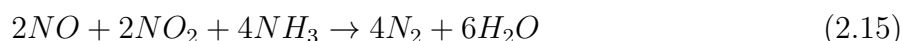
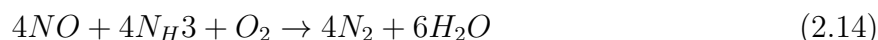
de  $\text{NH}_3$  puede conllevar a amoniaco indeseado. Esparciendo la solución sobre los gases de escape, como resultado de la vaporización de agua pura, las partículas de urea solida comienzan a disolverse y ocurre una termólisis, como se muestra en la ec 2.12.



Se forman amoniaco y ácido isociánico en la reacción de termólisis. El amoniaco toma lugar en la reacción del catalizador SCR, mientras que el ácido es convertido con el agua en la reacción de hidrólisis. Más aún, también se genera amoniaco a partir de la hidrólisis como se ve en la ec. 2.13.



Las reacciones de termólisis e hidrólisis ocurren más rápidamente que la reacción de SCR. Dos moléculas de amoniaco son producidas en una urea molecular mediante las reacciones de termólisis e hidrólisis. La eficiencia de la reacción para producir amoniaco a partir de la urea depende ampliamente de la temperatura de los gases de escape. Luego de la termólisis e hidrólisis, las reacciones químicas que ocurren en el catalizador SCR son:



La tasa de las reacciones SCR puede ser enlistada como ec. 2.15 > 2.14 > 2.16. La reacción de 2.14 ocurre en la ausencia de cualquier catalizador de oxidación antes del SCR. En el caso de usar un DOC de gran tamaño y capacidad antes de un SCR, las emisiones de  $\text{NO}_x$  se convierten en forma de NO y la ec. 2.16 es llevada a cabo, por lo tanto, la tasa de reacción decrece y ocurre una disminución en la eficiencia de conversión de  $\text{NO}_x$ . La reacción de la ec. 2.15 toma lugar si el tamaño y la cantidad de carga del catalizador de oxidación es optimizada. Debido a la alta tasa de la reacción, la conversión de las emisiones de  $\text{NO}_x$  es llevada a cabo efectivamente. 1:1 de la razón  $\text{NO}:\text{NO}_2$  muestra el máximo rendimiento de un SCR [12].

**Recirculación de gases de escape (EGR)** La recirculación de gases de escape es un método efectivo para control de  $\text{NO}_x$ . Los gases de escape consisten principalmente en dióxido de carbono, nitrógeno, etc., y la mezcla tiene un mayor calor específico comparado con el aire atmosférico. Los gases de escape recirculados desplazan aire fresco que entra en la cámara de combustión con dióxido de carbono y vapor de agua presentes en el escape del motor. Como consecuencia del aire desplazado, se dispone de menor cantidad de oxígeno en la mezcla de

entrada para la combustión. El oxígeno reducido disponible para la combustión disminuye la razón efectiva de aire-combustible, lo cual afecta sustancialmente a las emisiones de escape. Adicionalmente, la mezcla de los gases de escape con el aire de entrada, aumenta el calor específico de la mezcla de admisión, lo cual resulta en la reducción de la temperatura de la llama. Así, la combinación de una menor cantidad de oxígeno en el aire de entrada y la temperatura de llama reducida, reduce la tasa de reacciones de formación de  $\text{NO}_x$  [13].

### 2.5.3. Inventarios de Emisiones

Los modelos “top-down” y “bottom-up” son dos enfoques básicos para examinar los vínculos entre la economía y sectores específicos que contribuyen a las emisiones de contaminantes hacia la atmósfera, tales como el sistema energético. Los modelos top-down evalúan el sistema a partir de variables económicas agregadas, mientras que los modelos bottom-up consideran opciones tecnológicas o proyectos específicos de políticas de mitigación de cambio climático.

Ahora bien, los inventarios de emisiones desagregados temporal y espacialmente son necesarios para predicciones confiables y precisas de la calidad del aire. Por ejemplo, las concentraciones ambientales de emisiones en un lugar urbano concurrido no pueden ser calculadas usando datos anuales promedio, dado que las concentraciones dependen tanto del perfil de la tasa de emisiones y de las condiciones meteorológicas (temperatura, velocidad y dirección del viento). Esto sigue un perfil temporal. Adicionalmente, las concentraciones dependen principalmente de las emisiones producidas en el área cercana y no de las emisiones nacionales o de la ciudad. Las condiciones de tráfico pueden diferir en varias partes de la ciudad, dadas por la hora del día, ya que pueden atender diferentes necesidades de transporte. Por lo tanto, la resolución espacial y temporal de las emisiones del transporte terrestre, es particularmente importante en relación a las evaluaciones de la calidad del aire. Este perfil temporal requeriría un enfoque bottom-up más que uno top-down.

Más aún, los inventarios bottom-up son importantes cuando se intenta asignar las emisiones nacionales a territorios individuales en el país. La mayoría del tiempo esto se logra usando representantes de la actividad de transporte para asignar emisiones agregadas, tales como la población de ciudadanos en diferentes áreas, el largo de los caminos, etc. No obstante, este enfoque puede llevar a mayores o menores emisiones para una región particular en cuanto tales representantes no sean característicos de la actividad de tráfico real. Por ejemplo, la población permanente en el distrito industrial de la ciudad puede ser muy limitada, pero el tráfico puede ser muy denso. Además, las áreas industriales están vinculadas a la actividad de vehículos comerciales pesados los cuales no están presentes en las áreas más domésticas de la ciudad. Usar la población como un representante para estimar la actividad de transporte terrestre en el área industrial puede, por ende, subestimar las emisiones. En tales casos, los inventarios bottom-up necesitan ser realizados en los diferentes territorios y cualquier resultado agregado (top-down) debería ser asignado en proporción a los cálculos del inventario bottom-up.

En la Figura 2.7 se ilustra un enfoque metodológico que puede ser seguido con el fin de hacer un máximo uso de ambos enfoques en la creación de un inventario de emisiones. En principio, las estimaciones top-down y bottom-up de emisiones de vehículos motorizados son

llevadas a cabo independientemente. En cada caso la información más confiable (tal como el recuento de tráfico, estadísticas de registros de vehículos y factores de emisión medidos) forma la base del cálculo. Los parámetros inciertos son luego evaluados de acuerdo a conocimiento relevante y supuestos razonables. Después que las estimaciones independientes han sido llevadas a cabo, la actividad estimada y los datos de emisión de los dos enfoques (en términos de los kilómetros anuales totales de los vehículos, los kilómetros anuales en partida en frío de los vehículos y los factores de emisión) son comparados, y cualquier discrepancia que sea identificada es resuelta. Este procedimiento de reconciliación lleva a una re-estimación de los parámetros más inciertos de cada enfoque. Habiendo sido reconciliados los datos de actividad y emisión, el próximo paso es calcular el consumo total de combustible y emisiones con ambos enfoques, y comparar los resultados agregados. El consumo de combustible calculado y estadístico no deberían variar mayormente.

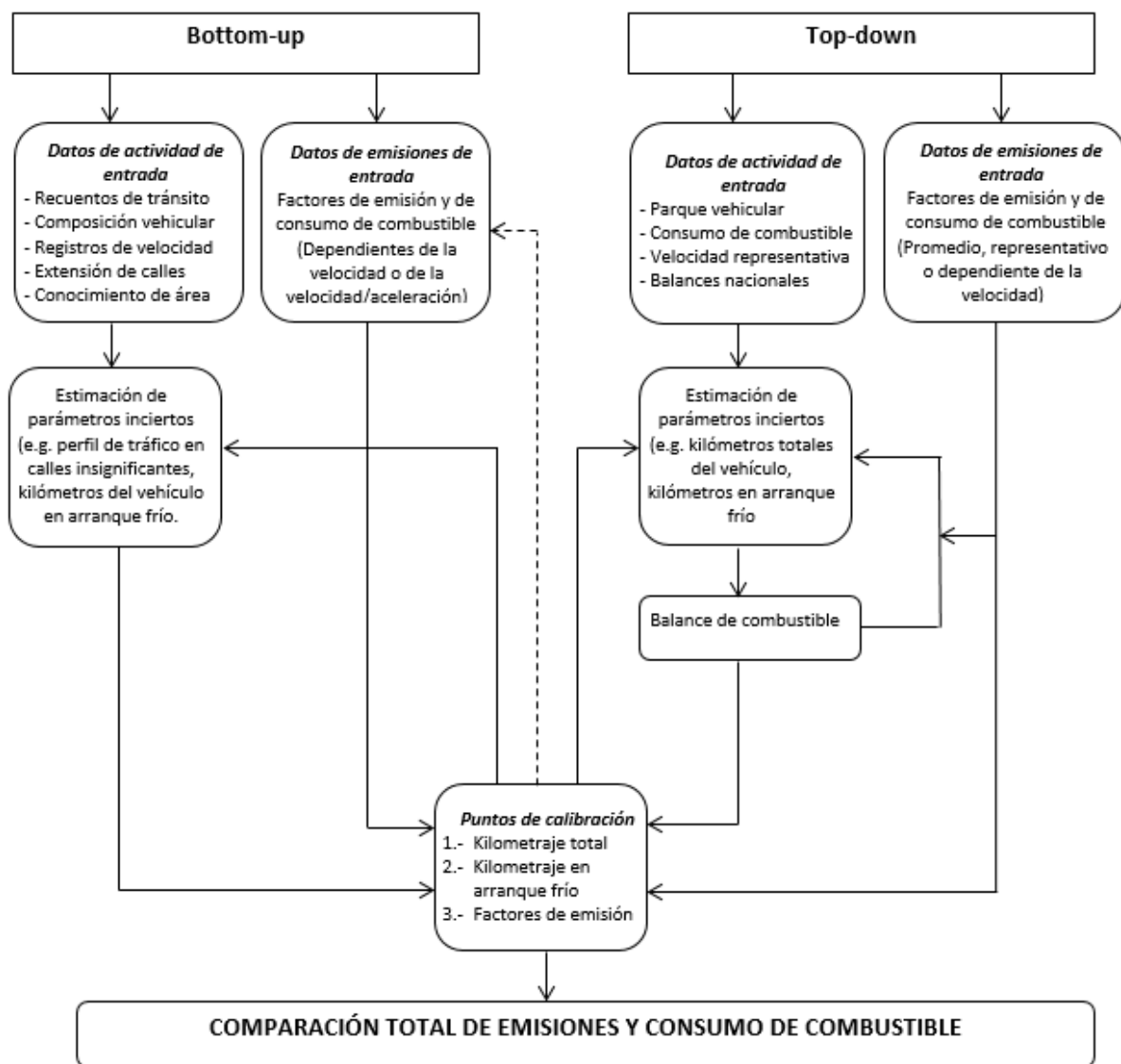


Figura 2.7: Método de reconciliación propuesto en la aplicación de enfoques bottom-up y top-down durante la construcción de un inventario de emisiones urbano. Fuente: [5]

Además, en la Figura 2.7 se entrega un panorama de la información requerida para cada

enfoque. Un aspecto que no debería ser pasado por alto, es el conocimiento del área y sus patrones de tráfico, de modo que se puedan realizar supuestos apropiados. Es por lo tanto necesario crear inventarios con una cooperación cercana a expertos locales.

#### 2.5.4. COPERT 4

COPERT 4 es un software que ha sido desarrollado como una herramienta para el cálculo de emisiones provenientes del sector de transporte terrestre. Las emisiones calculadas incluyen contaminantes regulados ( $CO$ ,  $NO_x$ , compuestos orgánicos volátiles, material particulado), no regulados ( $N_2O$ ,  $NH_3$ ,  $SO_2$ ) e incluye el cálculo del consumo de combustible. Este software es construido en base a una metodología bottom-up de nivel tres, es decir, es muy detallada y requiere como información de entrada la tecnología de los vehículos, velocidad promedio, categoría de los vehículos y kilometraje por tipo de camino.

En la metodología COPERT 4, las emisiones de escape totales provenientes del transporte terrestre son calculadas como la suma de emisiones calientes (cuando el motor está en su temperatura de operación normal) y las emisiones durante operaciones de motor térmicamente transitoria (denominadas emisiones de partida en frío). Cabe señalar que en este contexto, la palabra “motor” es usada como una abreviatura para “motor y cualquier dispositivo postratamiento de escape”. La distinción entre emisiones durante la fase estabilizada ‘caliente’ y la fase transiente ‘de calentamiento’ es necesaria por la substancial diferencia en el rendimiento de emisiones de vehículos durante estas dos condiciones. Las concentraciones de algunos contaminantes durante el periodo de calentamiento son muchas veces más grandes que durante operaciones en caliente y es necesario un enfoque metodológico diferente para estimar las emisiones adicionales durante este periodo. Para resumir, las emisiones totales pueden ser calculadas por medio de la ecuación 2.17.

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD} \quad (2.17)$$

Donde:

- $E_{TOTAL}$ : emisiones totales (g) de cualquier contaminante para la resolución espacial y temporal de la aplicación,
- $E_{HOT}$ : emisiones (g) durante operaciones de motor estable (caliente),
- $E_{COLD}$ : emisiones (g) durante operaciones de motor térmicamente transitorias.

Las emisiones de vehículos son altamente dependientes de las condiciones de operación. Diferentes situaciones de conducción imponen diferentes condiciones de operación del motor y, por lo tanto, un rendimiento de emisiones diferente. En este sentido, se hace necesaria una distinción entre conducción urbana, rural y en carretera.

Diferentes datos de actividad y factores de emisión son atribuidos a cada situación de conducción. Las emisiones de partida en frío son atribuidas principalmente a la conducción urbana (secundariamente a conducción rural), dado que se espera que un número limitado

de viajes comience en condiciones de autopista. Por tanto, en lo que respecta a condiciones de conducción, las emisiones totales pueden ser calculadas por medio de la ecuación 2.18.

$$E_{TOTAL} = E_{URBAN} + E_{RURAL} + E_{HIGHWAY} \quad (2.18)$$

Donde:

- $E_{URBAN}$  son las emisiones totales (g) de cualquier contaminante para las situaciones de conducción urbana,
- $E_{RURAL}$  son las emisiones totales (g) de cualquier contaminante para las situaciones de conducción rural,
- $E_{HIGHWAY}$  son las emisiones totales (g) de cualquier contaminante para las situaciones de conducción en autopista.

Las emisiones totales son calculadas combinando los datos de actividad para cada categoría de vehículo con los factores de emisión apropiados, los cuales varían de acuerdo a los datos de entrada (condiciones de conducción, condiciones climáticas). Además, se requiere información de consumo de combustible y especificación de combustible para mantener un balance de combustible entre las figuras proporcionadas por el usuario y el cálculo. Un resumen de las variables necesarias se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.8.

**Emisiones calientes** Las emisiones de escape calientes dependen de una variedad de factores, como la distancia que cada vehículo viaja, su velocidad (o tipo de camino), edad, tamaño de motor y peso.

La fórmula básica para estimar las emisiones calientes para un periodo de tiempo dado usando factores de emisión obtenidos experimentalmente, se presenta en la ecuación 2.19.

$$E_{HOT;i,k,r} = N_k \cdot M_{k,r} \cdot e_{HOT;i,k,r} \quad (2.19)$$

Donde:

- $E_{HOT;i,k,r}$ : emisiones de escape caliente del contaminante  $i$  [g], producidas por vehículos del tipo  $k$  conduciendo en la ruta del tipo  $r$ ,
- $N_k$ : número de vehículos [veh] de tecnología  $k$  en operación en el periodo concerniente,
- $M_{k,r}$ : kilometraje por vehículo [km/veh] conducido en rutas del tipo  $r$  y por vehículos de tecnología  $k$ ,
- $e_{HOT;i,k,r}$ : factor de emisión [g/km] para el contaminante  $i$ , relevante para el vehículo de tecnología  $k$ , operado en rutas del tipo  $r$ .

La velocidad del vehículo introducida en el cálculo mediante los tres modos de conducción tiene una importante influencia en las emisiones de escape, por lo que se han desarrollado diferentes enfoques de estudio. Para los factores de emisión presentados se pueden utilizar dos métodos alternativos:



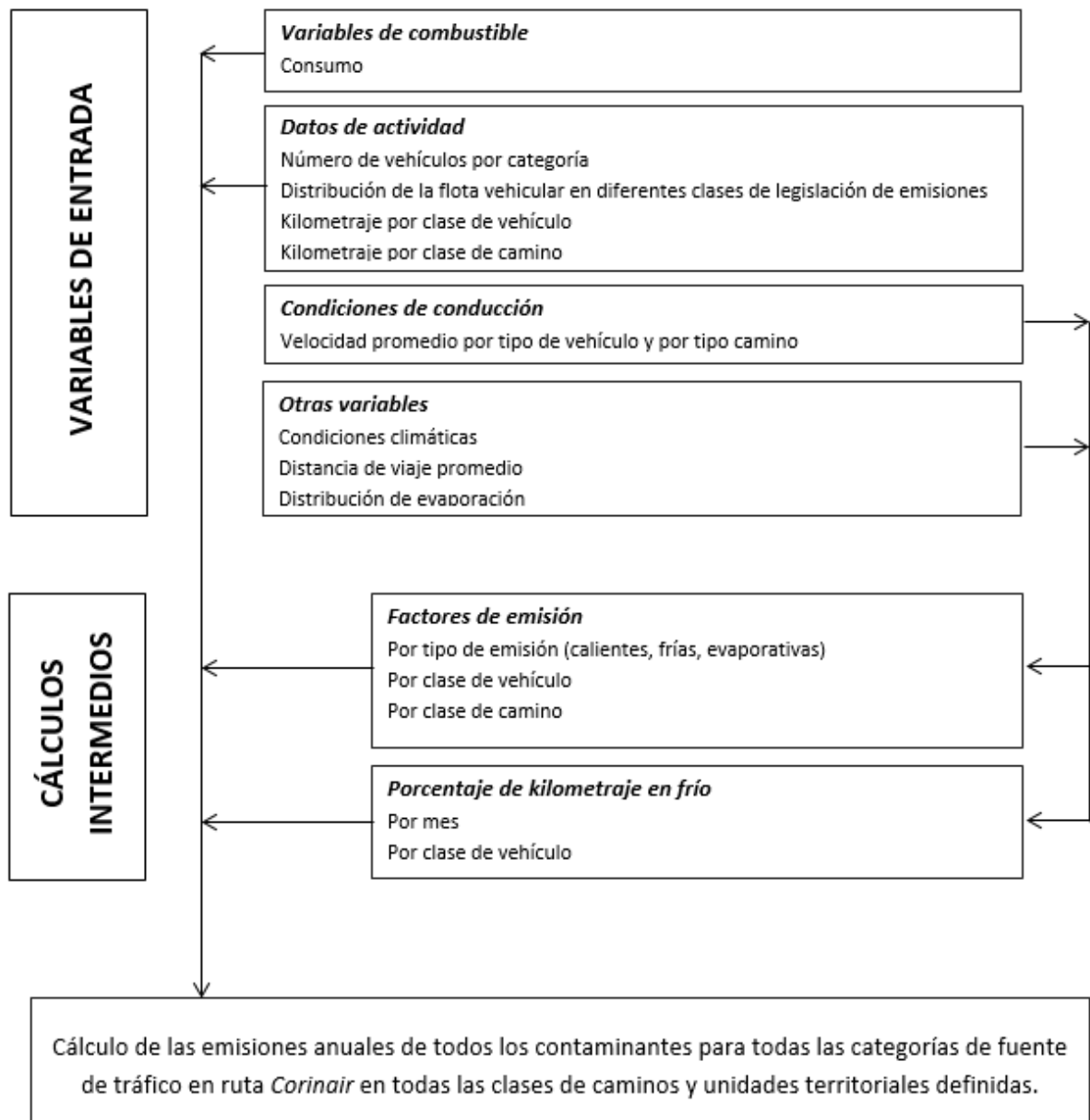


Figura 2.8: Diagrama de flujo de aplicación de la metodología para la línea de base. Fuente:[5]

- seleccionar una única velocidad promedio la cual representa a cada tipo de ruta: urbana, rural y carretera (por ejemplo: 20 km/h, 60 km/h y 100 km/h, respectivamente),
- definir curvas de distribución de velocidad promedio  $f_{j,k}(V)$  e integrar sobre las curvas de emisión, tal como se muestra en la ec. 2.20.

$$e_{HOT;i,k,r} = \int [e(V) \cdot f_{k,r}(V)] dV \quad (2.20)$$

Donde:

- $V$ : velocidad de los vehículos en rutas de clase rural, urbana, carretera,

- $e(V)$ : expresión de la dependencia de velocidad de  $e_{HOT;i,k,r}$ ,
- $f_{k,r}(V)$ : ecuación que describe la distribución de frecuencias de la velocidad media, la cual corresponde a patrones de conducción de vehículos en rutas de clase rural, urbana, carretera. El término  $f_{k,r}(V)$  es una función de la tecnología de vehículo  $k$  y tipo de ruta  $r$ .

**Emisiones de partida en frío** Las partidas en frío derivan en emisiones de escape adicionales. Ellas tienen lugar bajo las tres condiciones de conducción, sin embargo, parecen más probables en conducción urbana y rural, dado que el número de partidas en condiciones de autopista es relativamente limitado (en principio comienzan de un estacionamiento cercano a la autopista). En esencia, estas ocurren para todas las categorías de vehículos, pero los factores de emisión están solo disponibles, o pueden ser razonablemente estimados, para automóviles a gasolina, diésel y gas licuado (vehículos de pasajeros) y vehículos ligeros, por lo tanto solo estas categorías son cubiertas por la metodología. Además, ellas no son consideradas como función de la edad del vehículo.

Debido a que la presente metodología no considera las emisiones de partida en frío para buses no se despliega el método para el cálculo de este tipo de emisiones. El método se puede revisar en [5].

**Emisiones de CO<sub>2</sub> dependientes del consumo de combustible** Las emisiones de CO<sub>2</sub> son estimadas en la base del consumo de combustible, asumiendo que el contenido de carbono del combustible es totalmente oxidado en  $CO_2$ .

En el caso de un combustible oxigenado, descrito por una fórmula química genérica  $C_xH_yO_z$ , la razón entre átomos de hidrógeno y oxígeno, y la razón átomos de oxígeno y carbono son, respectivamente:

$$r_{H:C} = \frac{y}{x} \quad (2.21)$$

$$r_{O:C} = \frac{z}{x} \quad (2.22)$$

Si la composición del combustible es conocida del análisis químico fundamental, entonces las fracciones de masa de carbono, hidrogeno y oxigeno en el combustible son  $c$ ,  $h$ , y  $o$ , donde  $c + h + o = 1$ . En este caso, las razones de hidrógeno sobre carbono, y oxígeno sobre carbono en el combustible, son calculados con la ec. 2.23 y la ec. 2.24, respectivamente.

$$r_{H:C} = 11,916 \cdot \frac{h}{c} \quad (2.23)$$

$$r_{O:C} = 0,7507 \cdot \frac{o}{c} \quad (2.24)$$

Con estas razones, la masa de  $CO_2$  emitida por vehículos de tecnología k, usando combustible m puede ser calculado mediante la ec. 2.25.

$$E_{CO_2,k,m}^{CALC} = 44,011 \cdot \frac{FC_{k,m}^{CALC}}{12,011 + 1,008 \cdot r_{H:C,m} + 16,000 \cdot r_{O:C,m}} \quad (2.25)$$

Donde:

- $E_{CO_2,k,m}^{CALC}$ : emisiones de  $CO_2$  estimadas en base a los cálculos de consumo de combustible del vehículo de clase k, operando con combustible m,
- $FC_{k,m}^{CALC}$ : consumo de combustible del tipo m del vehículo con tecnología k.

# Capítulo 3

## Metodología

En el presente capítulo se discute la metodología a utilizar para llevar a cabo el trabajo de título, la cual considera las actividades a realizar y los recursos con los que se cuenta.

### 3.1. Actividades

Las actividades consideradas para el estudio son las siguientes:

- Revisión del estado del arte.
  - Análisis de metodologías para obtener velocidad comercial promedio de los buses del Transantiago, además de los paraderos de subida y bajada de los pasajeros a través de la información de transacciones de la tarjeta inteligente bip!.
  - Análisis de estudios basados en factores de emisión, principalmente en la región Metropolitana, Chile.
  - Estudio de las metodologías COPERT 4.
- Análisis de la estructura de la base de datos disponible para el desarrollo del estudio.
  - Identificación de los campos necesarios para llevar a cabo el estudio.
  - Almacenamiento de los datos en una base datos NoSQL.
- Pre-procesamiento de datos.
  - Filtro de datos.
  - Correspondencia de las bases de datos, es decir, entrelazar la información de las distintas fuentes de datos.
- Utilización de datos de velocidad comercial promedio de buses, paraderos de subida y bajada de pasajeros e información del modelo de vehículo de los buses, para a través de la metodología COPERT 4 estimar la distribución espacio-temporal de los contaminantes generada por la flota de buses del transporte público de Santiago.
  - Estudio del efecto de la pendiente de las calles sobre la generación de emisiones.
  - Estudio del efecto de la carga de los buses sobre la generación de emisiones.

- Despliegue de resultados en mapas utilizando herramientas de visualización tales como OpenStreetMap y folium.

En la Figura 3.1 se presenta un diagrama de flujo con las actividades consideradas. Se puede apreciar que el flujo de las tareas es lineal, es decir, una tarea comienza solo cuando la tarea anterior ha finalizado.

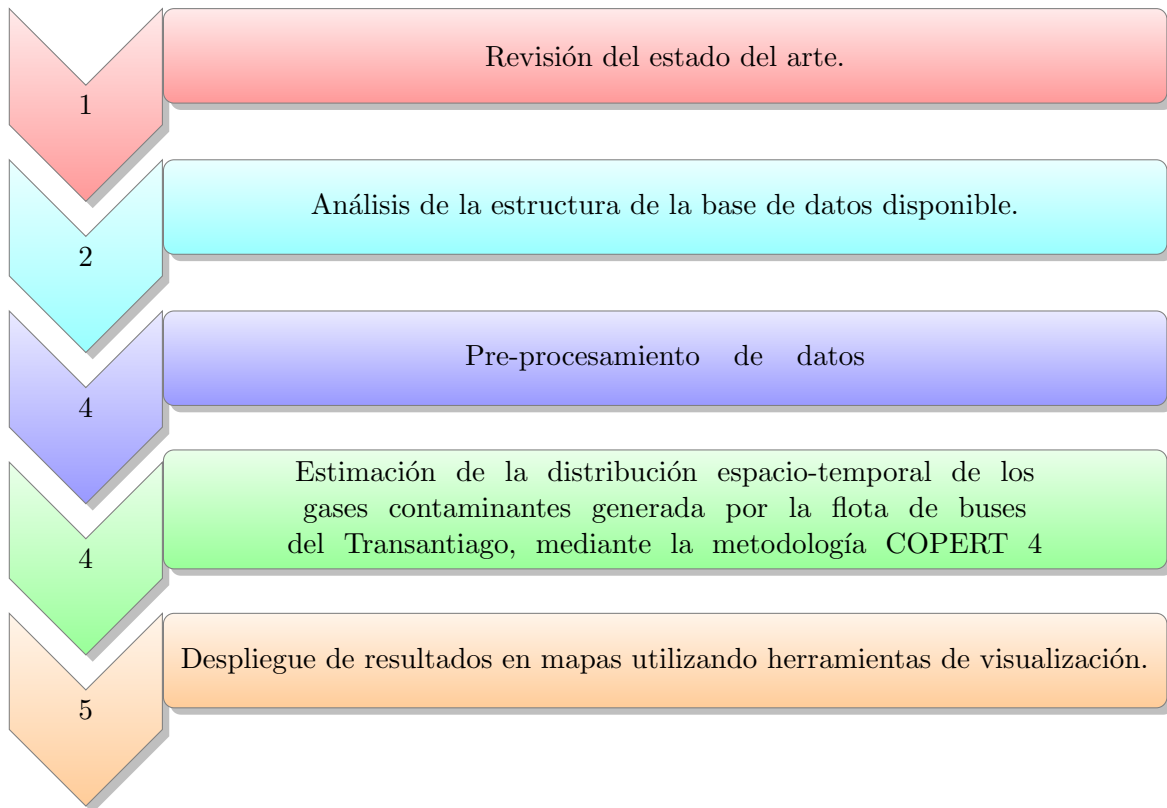


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

## 3.2. Recursos Disponibles

Los recursos presentes para llevar a cabo el estudio son:

- Datos de la velocidad comercial promedio de toda la flota de buses del transporte público de Santiago entre los años 2011 y 2016.
- Matrices Origen-Destino (OD) entre los años 2011 y 2016, las cuales entregan los paraderos de subida y bajada de los pasajeros del transporte público de Santiago.
- Información sobre los vehículos de toda la flota de buses del transporte público de Santiago (tipo de vehículo, norma de emisiones, tipo de chasis, etc).
- Información sobre los recorridos de los servicios del transporte público de Santiago (rutas, paraderos, etc).
- Financiamiento del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>.

# Capítulo 4

## Estudio, pre-procesamiento y utilización de datos

En este capítulo se presentan las bases de datos disponibles para el trabajo, luego se explica el tipo de filtro y la correspondencia de datos realizados y finalmente se muestran los distintos análisis que se realizarán utilizando estos datos.

### 4.1. Bases de datos

A continuación se describen los campos de información de las distintas bases de datos a utilizar en este estudio.

#### 4.1.1. COPERT 4

Para el caso particular de vehículos pesados, se cuenta con una tabla de datos que permite estimar los factores de emisión de los contaminantes en estudio. Los parámetros de entrada necesarios para obtener los factores de emisión de un contaminante dado son:

- Tipo de vehículo,
- Norma de emisión del vehículo,
- Velocidad comercial promedio,
- Pendiente del camino por donde circula el vehículo,
- Factor de carga del vehículo.

### 4.1.2. *diccionarioPatentes*

Este diccionario contiene información sobre cada uno de los buses que componen la flota del Transantiago. En la Tabla 4.1 se muestran los campos que componen esta base de datos, dentro de los cuales tienen mayor relevancia el número de placa, el tipo de vehículo, las plazas, la norma y la presencia de filtros en el bus.

Tabla 4.1: Campos de la base de datos *diccionarioPatentes*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
PLACA	Número de patente del bus
MARCA	Marca del chasis
MODELO	Modelo del chasis
MARCA_C	Marca de la carrocería
MODELO_C	Modelo de la carrocería
ANO	Año del bus
PLAZAS	Capacidad de pasajeros
TIPO_VEH	Tipo de bus
NORMA	Norma de emisiones del bus
Filtro_FAB_INC	Indica si el bus posee filtro de partículas
Fecha_Instalación_Filtro_INC	Fecha de instalación del filtro, si corresponde
Marca_Filtro_INC	Marca del filtro, si corresponde

Fuente: Elaboración Propia.

### 4.1.3. *rutaTramada*

Esta base de datos contiene la información de los tramos de 500 m que conforman la ruta de cada uno de los servicios del transporte público de Santiago. En la Tabla 4.2 se muestran los campos que componen *rutaTramada*.

Tabla 4.2: Campos de la base de datos *rutaTramada*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
servicio	Código de servicio sentido
tramo	Número del tramo de 500 m
correlativo	Correlativo que indica el orden de los segmentos
lat1	Latitud del nodo 1 que forma el segmento
lon1	Longitud del nodo 1 que forma el segmento
lat2	Latitud del nodo 2 que forma el segmento
lon2	Longitud del nodo 2 que forma el segmento
dist	Distancia entre los nodos 1 y 2
slope	Pendiente del segmento

Fuente: Elaboración Propia.



#### 4.1.4. *secuenciaParadas* en servicio-sentido

Esta base de datos contiene información sobre la secuencia de paraderos de cada servicio-sentido. En la Tabla 4.3 se presentan y describen los campos presentes en la base de datos.

Tabla 4.3: Campos de la base de datos *secuenciaParadas*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
correlativo	Correlativo que indica el orden de la secuencia
serviciosentidovariante	Código de servicio sentido
codigo	Código del paradero
nombre	Nombre del paradero
secuencia	Correlativo del paradero
x	Coordenada X UTM zona 19H
y	Coordenada Y UTM zona 19H
comunats	Comuna a la que pertenece el paradero
latitud	Latitud en la que se encuentra el paradero
longitud	Longitud en la que se encuentra el paradero
distaruta	Distancia más corta entre la ruta y el paradero
distenruta	Distancia en ruta del paradero

Fuente: Elaboración Propia.

En los datos se ha detectado un problema que causa ciertas perturbaciones, el cual es que hay paraderos con código “SIN DEFINIR”, los cuales no traen información del paradero.

#### 4.1.5. *diccionarioServicio*

Tanto la base de datos de *secuenciaParadas*, como la de *rutaTramada* contienen el campo servicio, pero con distinta nomenclatura. Este diccionario contiene la nomenclatura de servicios usada en cada una de las bases de datos. En la Tabla 4.4 se presentan y describen los campos presentes, siendo rutas y secuenciaparadas los únicos relevantes para el presente estudio.

Tabla 4.4: Campos de la base de datos *diccionarioServicio*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
r22	Código de servicio sentido para reporte 2.2
r196	Código de servicio sentido para reporte 1.96
rutas	Código de servicio sentido para rutas
secuenciaparadas	Código de servicio sentido para secuencia de paradas

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.1.6. *velocidadesFull*

Los datos de velocidad comercial de los buses están almacenados en la base de datos *velocidadesFull*. Estas velocidades están almacenadas para cada tramo de 500 m y cada 30 minutos. Los campos que componen esta base de datos se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Campos de la base de datos *velocidadesFull*

Campo	Descripción
servicio	Código de servicio sentido
tramo	Número del tramo en la ruta
mts	Distancia en ruta del tramo
#tramosTotales	Número total de tramos en la ruta
periodo	Periodo de la observación
distancia	Distancia de la observación
tiempo	Tiempo de la observación
velocidad	Velocidad de la observación
patente	Patente del bus de la observación
tini	Tiempo inicio de la observación
tfin	Tiempo fin de la observación
fecha	Día de la observación

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.1.7. *perfilCarga*

La base de datos *perfilCarga* entrega información sobre la cantidad de pasajeros que sube y baja en cada paradero para cada servicio. En la Tabla 4.6 se muestran los campos que la componen.

## 4.2. Pre-procesamiento de datos

En esta sección se exponen los pre-procesamientos de datos utilizados en el estudio, los cuales corresponden a la aplicación de filtros sobre los datos de velocidad y una correspondencia o conexión entre la base de datos que contiene las velocidades promedio de los buses y la que contiene los factores de carga.

### 4.2.1. Filtro sobre datos de velocidad

El campo distancia de la tabla de datos *velocidadesFull* entrega un valor entre 0 y 500, el cual refleja la validez de la información proveniente de los sistemas GPS de los buses. Un valor 500 significa que a lo largo de los 500 metros del tramo en análisis se obtiene

Tabla 4.6: Campos de la base de datos *perfilCarga*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
idExpedicion	Número identificar del viaje
Serviciosentido	Código de servicio sentido
Patente	Número de patente del bus
Paradero	Código del paradero
NombreParada	Nombre del paradero
Hini	Tiempo de inicio de la expedición
Hfin	Tiempo de fin de la expedición
Correlativo	Correlativo del paradero
DistEnRuta	Distancia en ruta del paradero
Subidas	Número de transacciones registradas en el paradero
SubidasLejanas	Número de transacciones registradas lejos del paradero
Subidastotal	Número total de subidas asociadas al paradero
SubidasExpandidas	Número de subidas adheridas por factor de expansión
Bajadas	Número de bajadas estimadas
BajadasLejanas	Número de bajadas lejos de la ruta
Bajadastotal	Número total de bajadas
BajadasExpandidas	Número de bajadas adheridas por factor de expansión
Carga	Carga de pasajeros del bus
Capacidad	Capacidad del bus

Fuente: Elaboración Propia.

información confiable de los GPS, mientras que un valor 0 equivale a que no hay información GPS fidedigna. Para este estudio, se decide considerar todas las velocidades que tengan asociadas valores del campo distancia igual a 500 y descartar todas las demás. Lo anterior se debe a que la información GPS no confiable lleva a estimaciones de velocidad erróneas y a veces sin sentido.

El filtro aplicado permite una utilización del 83,37% de las velocidades de la base de datos *velocidadesFull*.

#### 4.2.2. Correspondencia entre bases de datos *velocidadesFull* y *perfilCarga*

No existe ningún identificador que permita conectar directamente las bases de datos *velocidadesFull* y *perfilCarga*, pero si existen campos dentro de estas tablas que facultan la correspondencia entre las bases de datos. Los campos *Hini* y *Hfin* pertenecientes a *perfilCarga*, muestran el tiempo de inicio y fin de cada expedición de bus, mientras que los campos *tini* y *tfin*, que son parte de la tabla *velocidadesFull*, entregan el tiempo de inicio y fin de las observaciones GPS para la estimación de la velocidad en cada tramo. Por ende, para hacer corresponder estas dos bases de datos hay que encontrar para cada patente, los tiempos *tini* y *tfin* que están dentro de los tiempos *Hini* y *Hfin* del viaje del bus. Luego,

mediante este procedimiento, se logra hacer un emparejamiento del 96,34% de los datos.

### 4.3. Utilización de datos: implementaciones

Para poder identificar los efectos de cada uno de los parámetros de entrada considerados por la metodología COPERT 4, se plantean distintas implementaciones las cuales se describen a continuación.

#### 4.3.1. Implementación 1: caso base

Como se ha mencionado en la sección 4.1.1, los parámetros de entrada necesarios para obtener los factores de emisión a partir de la metodología COPERT 4 son: el tipo de vehículo, su norma de emisión, su velocidad promedio, la pendiente de la calle por donde circula y el factor de carga del vehículo.

La primera fase del proyecto considera la implementación de la metodología COPERT 4 para la flota completa de buses del Transantiago, tomando en cuenta su velocidad comercial y asumiendo que las calles por donde circula el vehículo tienen pendiente cero, y que su factor de carga es cero. Con esto se obtienen los factores de emisión en cada segmento de la ruta. Luego, al contar con los factores de emisión es posible calcular las emisiones en ruta, y además las emisiones por pasajero para cada viaje realizado.

La base de datos *diccionarioPatentes* contiene datos del tipo de vehículo y norma de cada bus de la flota, mientras que *velocidadesFull* tiene información de la velocidad comercial promedio de los buses en servicios. Como se muestra en la Figura 4.1, estas fuentes de datos se pueden relacionar mediante la conexión de los campos *PLACA* y *patente*, permitiendo así obtener los factores de emisión. Para calcular las emisiones en ruta se requiere de la distancia de cada segmento de tramo, la cual está almacenada en el campo *dist* de la base de datos *rutaTramada*. Finalmente, la cantidad total de pasajeros por viaje se obtiene de la tabla *perfilCarga*, con lo cual se calculan las emisiones por pasajero.

#### 4.3.2. Implementación 2: efecto de la pendiente

La segunda implementación es similar a la implementación 1, pero considerando la pendiente real de las calles por las que circula cada bus.

Como ya se ha explicado en la descripción de la implementación 1, el tipo de vehículo, su norma de emisión y la velocidad promedio se pueden obtener mediante la relación de las bases de datos *diccionarioPatentes* y *velocidadesFull*. Luego, cada fila de datos de *velocidadesFull* tiene asociado un servicio y un tramo para el cual se calcula la velocidad, y a la vez este servicio tiene asociado tramos cuya información está en *rutaTramada*. De esta forma se puede utilizar la pendiente y distancia de cada tramo almacenada en *ruTramada*.

En la Figura 4.1 se puede apreciar la relación de las bases de datos a utilizar para esta implementación.

### 4.3.3. Implementación 3: efecto de la carga

La tercera implementación es similar a la implementación 1, pero considerando el factor de carga estimado para cada bus del servicio 506 a lo largo de su expedición. Para poder añadir el factor de carga a los buses es necesario saber tanto la carga del bus, como la posición de los paraderos de cada servicio, ya que es en estos puntos donde la cantidad de pasajeros cambia. La posición de los paraderos está almacenada en la fuente de datos *secuenciaParadas*, mientras que la carga se encuentra en *perfilCarga*. Cada servicio tiene asignado una secuencia de paraderos, por lo que los datos de *velocidadesFull* se pueden vincular con los de *secuenciaParadas* mediante el campo servicio y el campo serviciosentidovariable, respectivamente. Hay que tener claro que la nomenclatura de estas bases de datos son distintas, por lo cual se utiliza *diccionarioServicios* para hacer la traducción. Posteriormente, la carga de los buses presentes en *perfilCarga* están asociadas a los paraderos presentes en la ruta del servicio, entonces las bases de datos de *secuenciaParada* y *perfilCarga* se comunican igualando los identificadores de los paraderos. Finalmente, es necesario que los tiempos de la expedición del bus almacenadas en *velocidadesFull* y *perfilCarga* calcen. Todas estas asociaciones se muestran en la Figura 4.1.

### 4.3.4. Implementación 4: final

Mediante la cuarta implementación se obtienen los factores de emisión en cada segmento de la ruta para cada bus del servicio 506, considerando su velocidad comercial promedio, la pendiente de las calles que recorre y el factor de carga estimado para el bus a lo largo de su expedición. Además, se calculan las emisiones para cada uno de los cinco contaminantes en estudio y las emisiones por pasajero.

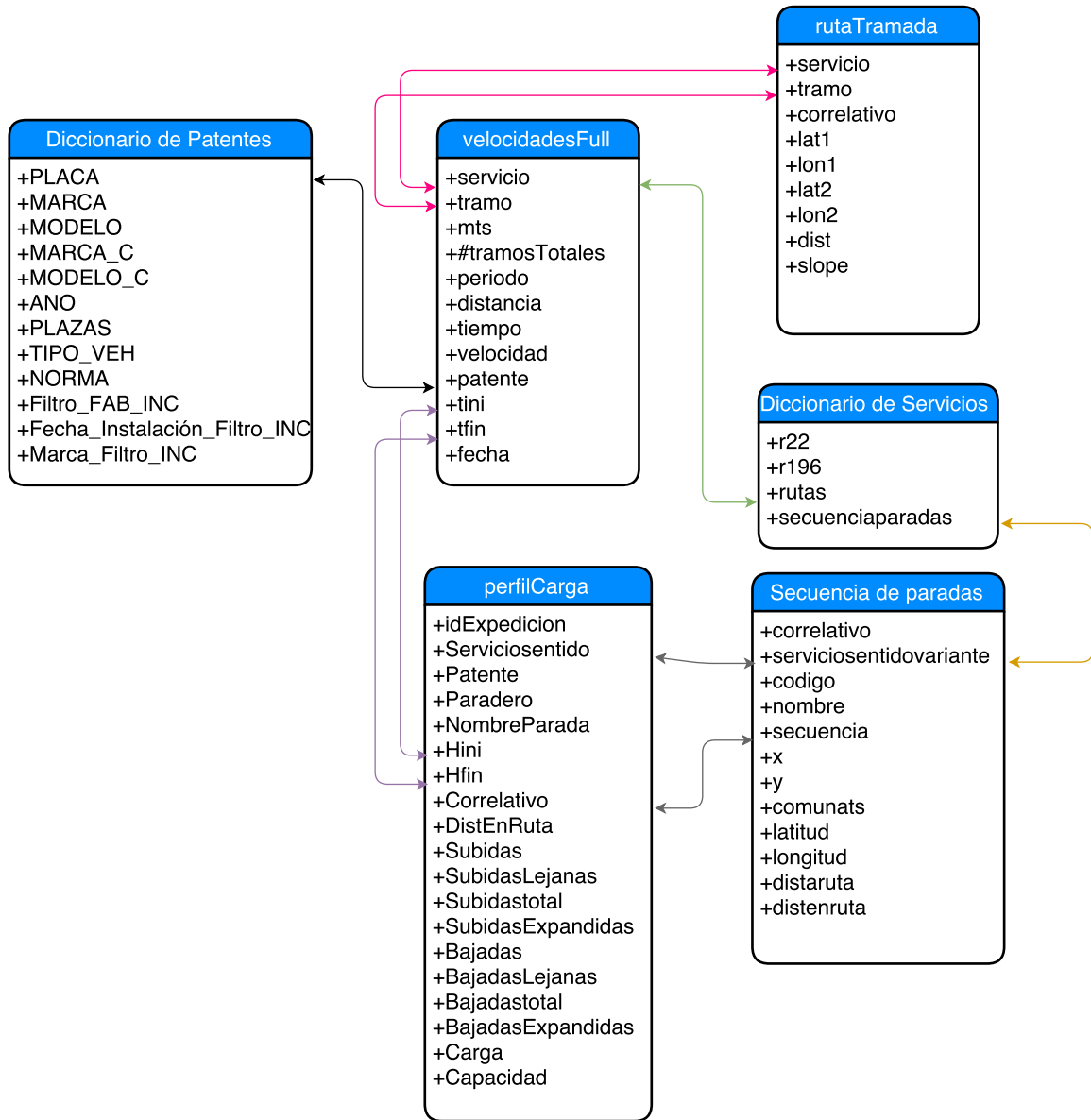


Figura 4.1: Diagrama de relación entre las bases de datos utilizadas.

# Capítulo 5

## Resultados y Discusiones

### 5.1. Factores de emisión

#### 5.1.1. Efecto de las variables de entrada

El objetivo de esta sección es mostrar el efecto que tienen los parámetros de entrada (aceptados por la metodología COPERT 4) sobre los factores de emisión. Para esto se presentan los gráficos de las figuras 5.1, 5.2, 5.3, correspondientes a los factores de emisión para los contaminantes de estudio, obtenidos mediante la implementación 1, 2 y 3, respectivamente. Cabe señalar que se consideraron todos los registros de velocidad del bus de patente FLXD-45, entre el 14 de Marzo de 2016 y 18 de Marzo de 2016. Este bus tiene una norma de emisión Euro V y clasificación de tamaño B2.

De acuerdo a lo mostrado en la Figura 5.1, cuando la velocidad aumenta los factores de emisión disminuyen, lo cual refleja la importancia de utilizar registros de velocidades reales, o bien una distribución de velocidad que se ajuste a los flujos vehiculares de la ciudad, para hacer un inventario de emisiones. Cabe señalar que en este tipo de curvas existe un punto de inflexión, a partir del cual los factores de emisión comienzan a aumentar nuevamente. El punto de inflexión para buses es una velocidad mayor a los 60 km/h, por ende, como los registros de velocidad de los buses del Transantiago raramente alcanzan esos valores, es difícil apreciar este efecto. No obstante, en la curva de la Figura 5.1b, correspondiente a los factores de emisión del material particulado, es posible apreciar levemente este fenómeno.

Sin considerar al  $\text{CO}_2$ , el contaminante cuyos factores de emisión son más altos es el óxido de nitrógeno, dado que los motores diésel trabajan a altas temperaturas ( $\approx 1600$  °C) y a altas concentraciones de oxígeno, factores que afectan directamente a la producción de este. Las emisiones de hidrocarburos son muy bajas en motores diésel, ya que al trabajar a altas temperaturas la mayor parte de los hidrocarburos son quemados. Con relación al monóxido de carbono, se aprecia que sus factores de emisión son también bajos, puesto que los buses trabajan con motores de mezcla pobre, es decir, la razón de masa entre el aire y el combustible es mayor a la razón estequiométrica, por ende hay más aire que combustible en la

mezcla. Dado lo anterior, es más probable que los átomos de carbono, que son producto de la combustión, formen más dióxido de carbono y menos monóxido de carbono. Finalmente, los factores de emisión del material particulado son los más bajos, pero esto se debe netamente a la utilización de un sistema de recirculación de gases de escape y a los sistemas de filtro de partículas diesel presente en los buses con norma Euro V y Euro III, respectivamente.

En la Figura 5.2 se muestran los factores de emisión usados en la implementación 2, los cuales se clasifican de acuerdo a la pendiente de la ruta por donde circula el bus en análisis. Cabe mencionar que la metodología COPERT 4 acepta siete valores de pendientes, los cuales son: -6 %, -4 %, -2 %, 0 %, 2 %, 4 %, 6 %. Para este caso, como los factores de emisión tienen un comportamiento distinto para cada tipo de emisión, es necesario analizar cada caso por separado. El efecto de la pendiente es muy pronunciado para el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y material particulado (MP), lo cual se debe a que a medida que aumenta la pendiente el vehículo necesita más potencia, lo que implica un aumento en la combustión y por ende de combustible, que se relaciona directamente con la generación de estas emisiones. La generación de monóxido de carbono no se ve mayormente influenciada por la variación de la pendiente, debido a que esta variable favorece la generación de  $\text{CO}_2$ , y por tanto desfavorece la del CO. Por otro lado, al aumentar la pendiente, la mezcla de combustión presente en los motores se hace cada vez más rica, lo cual resulta en que la generación de óxidos de nitrógeno se ve frenada. Asimismo, como la temperatura de combustión no se ve afectada en demasía con el cambio de pendiente, tampoco se ven afectados los factores de emisión de los hidrocarburos.

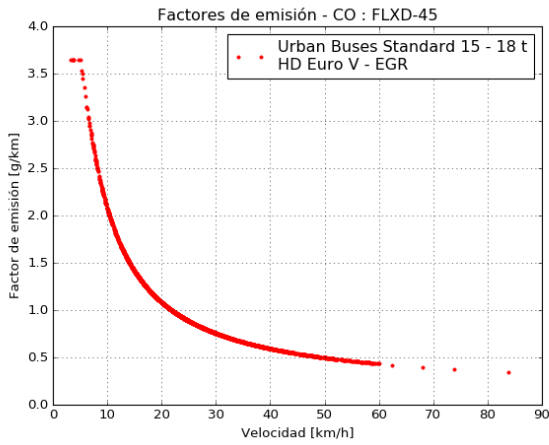
La metodología COPERT 4 acepta tres factores de carga, los cuales son 0, 50 y 100, por tanto, es necesario aproximar el factor de carga real a uno de estos tres valores aceptados. El efecto de los factores de carga sobre los factores de emisión se muestra en la Figura 5.3, en donde cada gráfico corresponde a los valores usados para la implementación 3 de la patente FLXD-45. Lo primero que cabe señalar es que son muy pocos los momentos en los que este vehículo va completamente lleno, lo cual se puede apreciar por los pocos puntos negros en los gráficos. Otro punto importante es que el efecto de aumentar la carga de los buses es menos significativo que aumentar la pendiente, con excepción del dióxido de carbono en donde existe un impacto considerable. Para el resto de los contaminantes, la diferencia entre los valores obtenidos para distintas cargas es muy pequeño e incluso prácticamente nulo.

### 5.1.2. Comparación de tecnologías

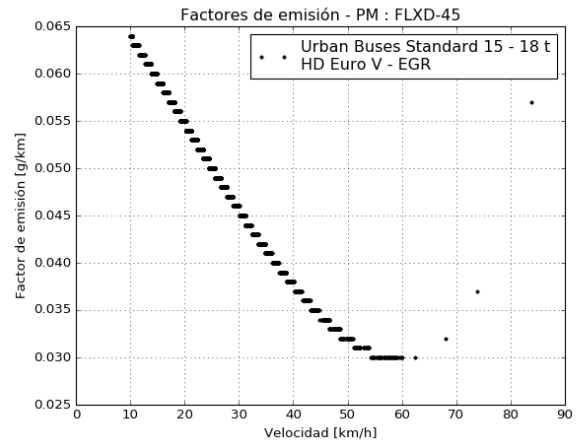
Si se clasifican los buses del Transantiago de acuerdo a su norma de emisión, tamaño y existencia de filtro, se obtienen 8 categorías distintas. En la Tabla 5.1 estas categorías son presentadas, incluyendo una patente de ejemplo para cada una de ellas.

Es importante identificar cómo cambian los factores de emisión de los buses de acuerdo a su norma de emisión, tamaño y dispositivos post-tratamiento. Para lograr lo antes mencionado, en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se despliegan los factores de emisión para cada una de las patentes presentadas. Cabe señalar que sólo se considera la implementación 1, de esta manera se simplifica el análisis.

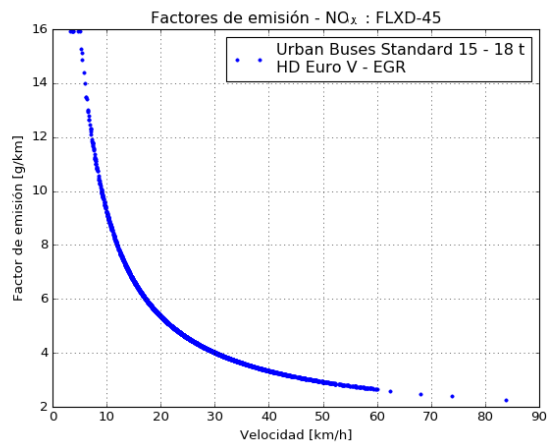




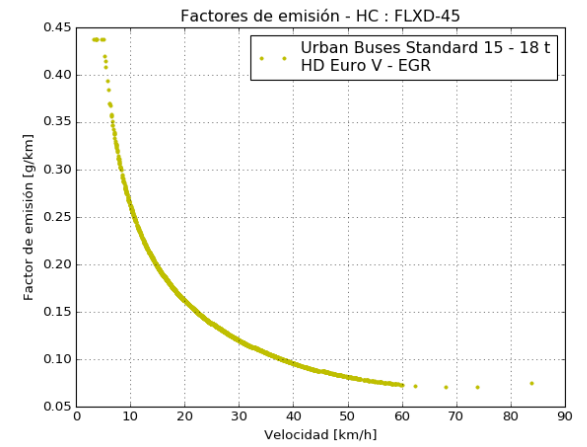
(a) CO



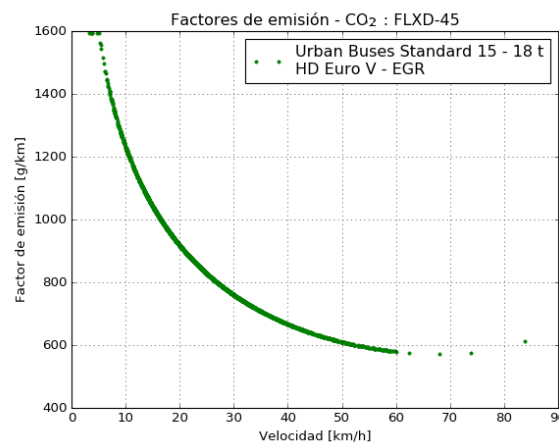
(b) MP



(c) NO<sub>x</sub>

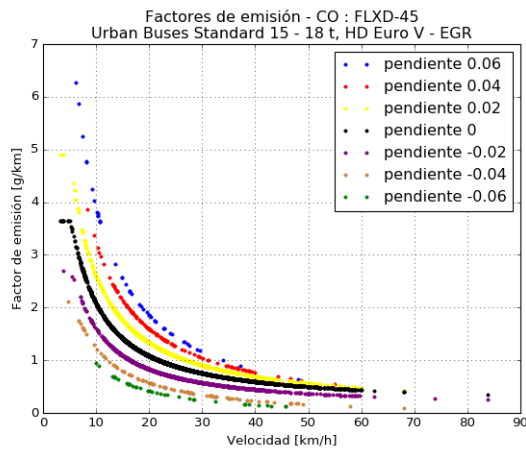


(d) HC

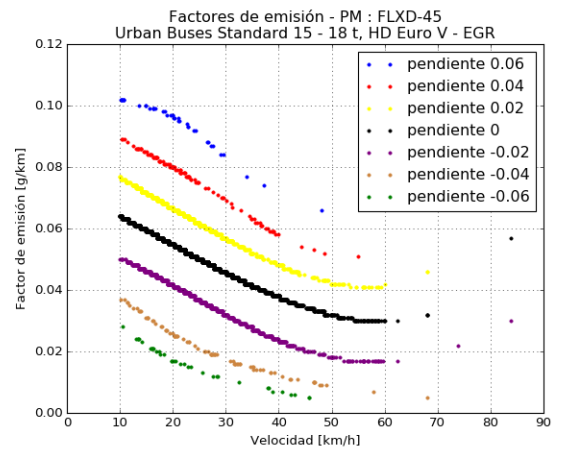


(e) CO<sub>2</sub>

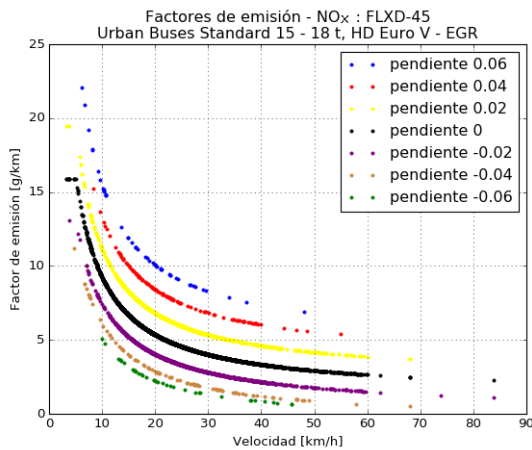
Figura 5.1: Factores de emisión calculados a partir de la implementación 1 - caso base.



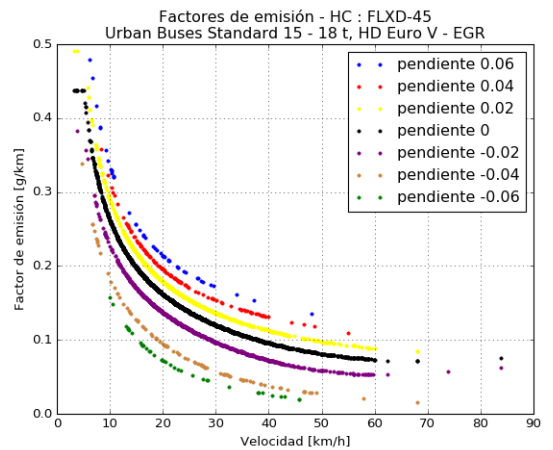
(a) CO



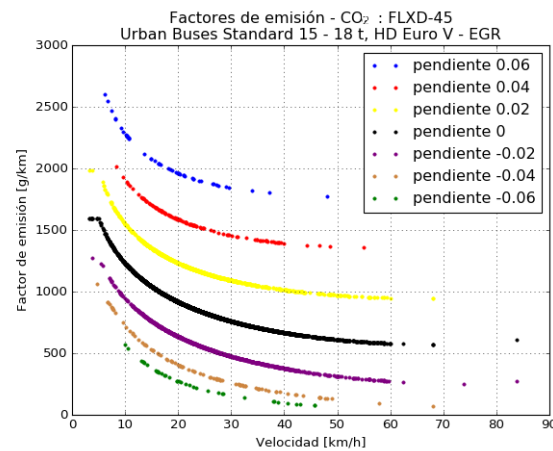
(b) MP



(c) NO<sub>x</sub>

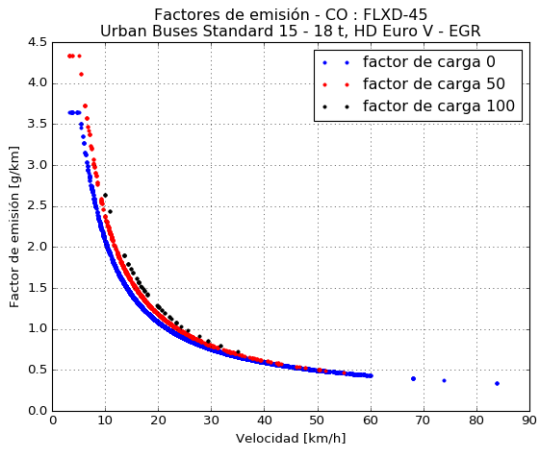


(d) HC

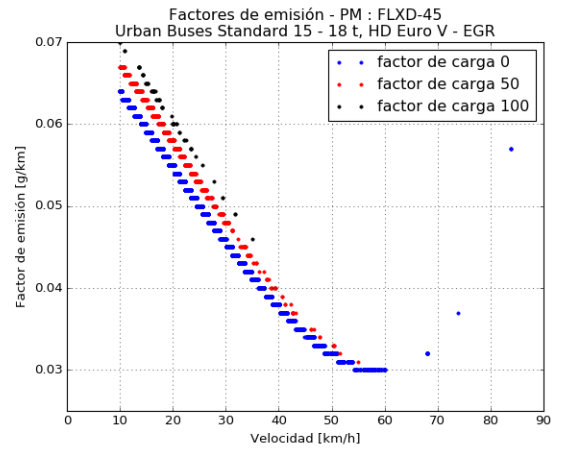


(e) CO<sub>2</sub>

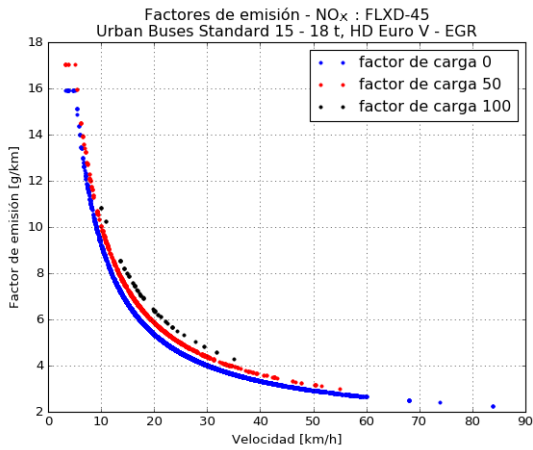
Figura 5.2: Factores de emisión calculados a partir de la implementación 2 - efecto de la pendiente.



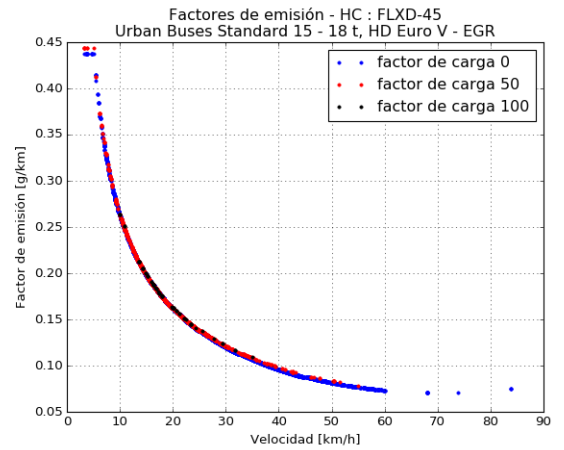
(a) CO



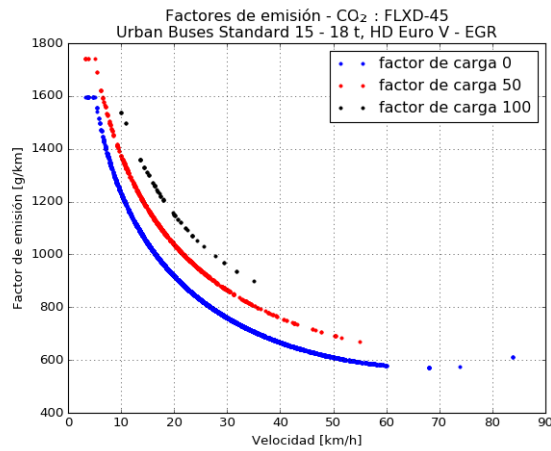
(b) MP



(c) NO<sub>x</sub>



(d) HC



(e) CO<sub>2</sub>

Figura 5.3: Factores de emisión calculados a partir de la implementación 3 - efecto de la carga.

Tabla 5.1: Clasificación de buses del Transantiago según norma de emisiones, tamaño del bus y existencia de filtro.

Patente	Tecnología	Subsector	Filtro
FLXB-40	Euro III	Urban Buses Midi $\leq 15$ t , clase A	No
CJRH-14	Euro III	Urban Buses Standard 15 - 18 t, clase B	No
XA-4095	Euro III	Urban Buses Articulated $>18$ t, clase C	No
FLXC-12	Euro III	Urban Buses Midi $\leq 15$ t, clase A	Si
CJRP-28	Euro III	Urban Buses Standard 15 - 18 t, clase B	Si
WA-9778	Euro III	Urban Buses Articulated $>18$ t, clase C	Si
FLXR-55	Euro V	Urban Buses Midi $\leq 15$ t, clase A	No
FZJL-65	Euro V	Urban Buses Standard 15 - 18 t, clase B	No

Fuente: Elaboración Propia.

**Norma de emisión** Para entender el efecto de las normas de emisión sobre los factores de emisión se comparan las patentes FLXB-40 y FLXR-55, las cuales corresponden a buses clase A, sin filtro y con norma de emisión Euro III y Euro V, respectivamente. En la Figura 5.4 se despliegan los factores de emisión de CO, MP, NO<sub>x</sub>, HC y CO<sub>2</sub> en función de la velocidad para las dos patentes mencionadas. Aquí es importante notar cómo el estándar Euro es cada vez más estricto para numeraciones mayores, especialmente para las emisiones de material particulado. Por otro lado, mientras la diferencia de los valores de factores de emisión de CO entre ambas patentes se mantiene relativamente constante a medida que aumenta la velocidad, para los HC, NO<sub>x</sub> y MP la diferencia es mayor a bajas velocidades, pero a medida que esta aumenta, la diferencia entre los factores de emisión disminuye. Particularmente, los factores de emisión del HC tienden a converger a altas velocidades, mientras que para el MP existe una intersección de las curvas. Este fenómeno es poco probable que ocurra, ya que rara vez los buses alcanzan velocidades superiores 60 km/h.

**Subsector o tamaño del bus** Para apreciar el impacto del tamaño de los buses sobre los factores de emisión se comparan las patentes FLXB-40, CJRH-14 y XA-4095. Todos estos buses son de tecnología Euro III y no cuentan con filtro, como se muestra en la Tabla 5.1. En la Figura 5.5 se presentan los factores de emisión de CO, MP, NO<sub>x</sub>, HC y CO<sub>2</sub> en función de la velocidad, para las tres patentes consideradas en esta comparación. Como es de esperarse, el comportamiento de los factores de emisión del CO, NO<sub>x</sub> y MP es tal que, a mayor tamaño de los buses, mayores son los factores de emisión. Para el caso del HC ocurre algo bastante particular, y es que para velocidades entre 0 y 6 km/h, los factores de emisión del bus clase B son menores que los del bus clase A. Además para velocidades cercanas a los 20 km/h, la diferencia de factores de emisión entre los buses de clase B y C es prácticamente nula.

**Filtro de partículas** La metodología COPERT 4 no considera el impacto de la presencia de filtros de partículas sobre la generación de emisiones. Dentro de la flota de buses del Transantiago existen buses Euro III con filtro de partículas diésel, llamados CRT, los cuales sólo afectan las emisiones de material particulado. De acuerdo a [14], estos filtros logran reducciones de al menos 97% de las emisiones. Por otro lado, en el estudio experimental de

factores de emisión llevado a cabo en [15], la reducción lograda por los CRT es de aproximadamente el 85 %. En este trabajo de título se considera que los filtros reducen en un 90 % la emisión de material particulado.

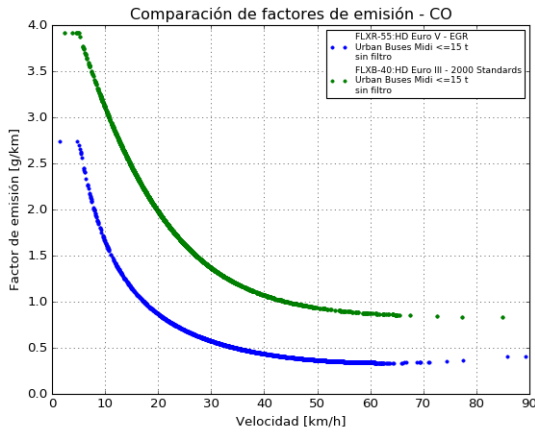
El la Figura 5.6 se muestra una comparación de factores de emisión de material particulado entre buses Euro III, con y sin filtro. En las Figuras 5.6a, 5.6b y 5.6c se despliegan los resultados para buses clases A, B y C, respectivamente, en donde se puede apreciar el factor de reducción considerado en este trabajo.

Finalmente, para corroborar que los factores de emisión utilizados en este trabajo tengan sentido, en la Tabla 5.2 se despliegan los factores de emisión de CO, HC, NO<sub>x</sub> y MP usados en [6] para un bus de norma Euro II, en donde se lleva a cabo un estudio de emisiones móviles en Santiago de Chile, y se compara con los factores de las patentes CJRH-14 y FLXD-45, cuyas normas de emisión son Euro III y V, respectivamente. Cabe notar que los valores son cercanos y que las diferencias se deben a las distintas normas de emisión de los buses y las distintas metodologías usadas en los estudios. Con respecto a los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, y de acuerdo a [16], el valor típico para buses diésel es 1.034,61 g/km, lo cual está dentro de los valores utilizados en este estudio (ver Figura 5.1e).

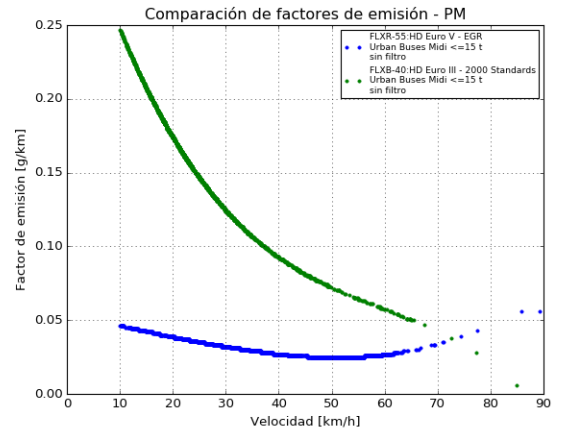
Tabla 5.2: Comparación de factores de emisión de un bus Euro II [6] con buses Euro III y V usados en el presente estudio. Los factores de emisión desplegados son para una velocidad de 20 km/h.

	CO	HC	NO <sub>x</sub>	MP
Euro II	2,54	1,40	9,43	0,35
Euro III	2,64	0,63	10,4	0,22
Euro V	1,07	0,16	5,25	0,05

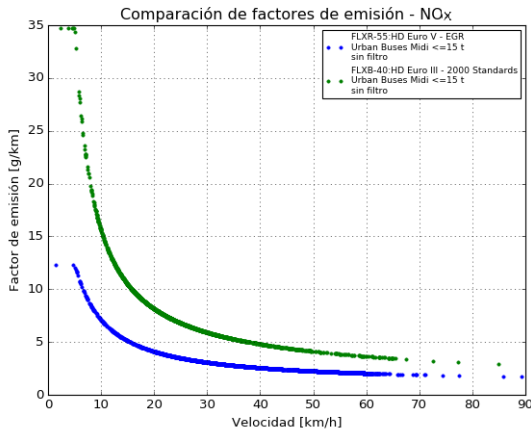
Fuente: Elaboración Propia.



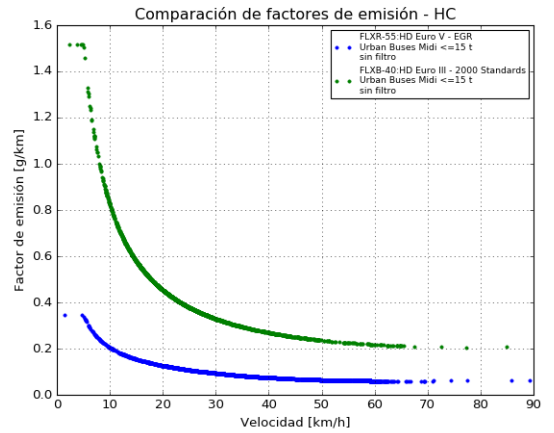
(a) CO



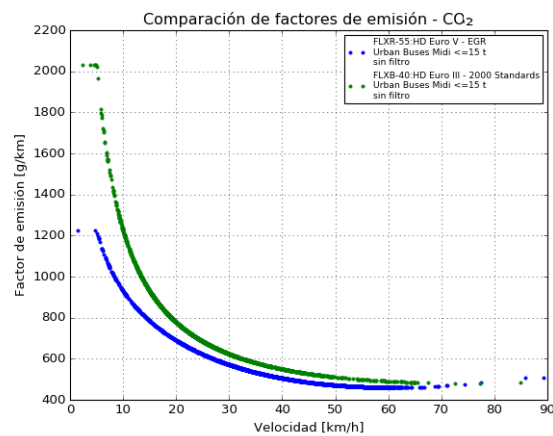
(b) MP



(c) NO<sub>x</sub>

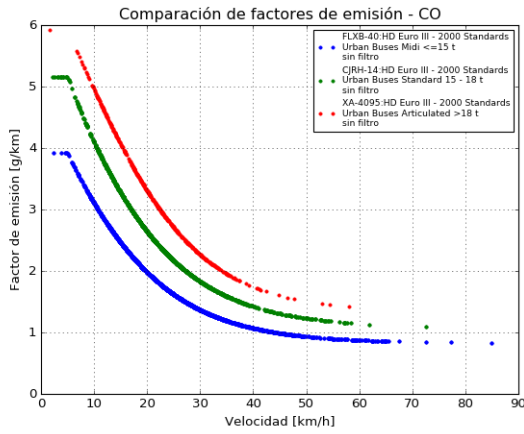


(d) HC

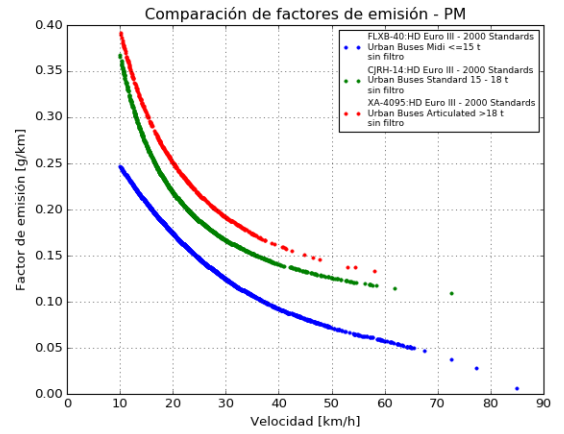


(e) CO<sub>2</sub>

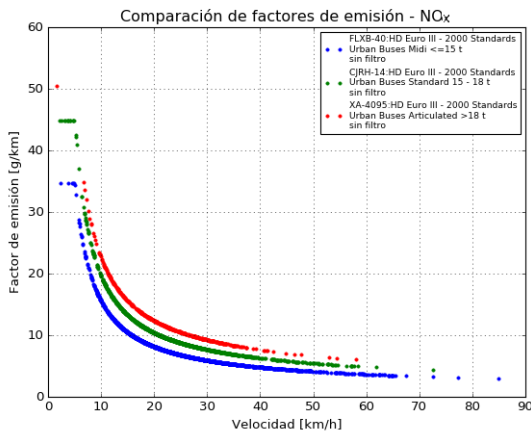
Figura 5.4: Comparación de factores de emisión de las patentes FLXR-55 y FLXB-40 calculados a partir de la implementación 1 - caso base.



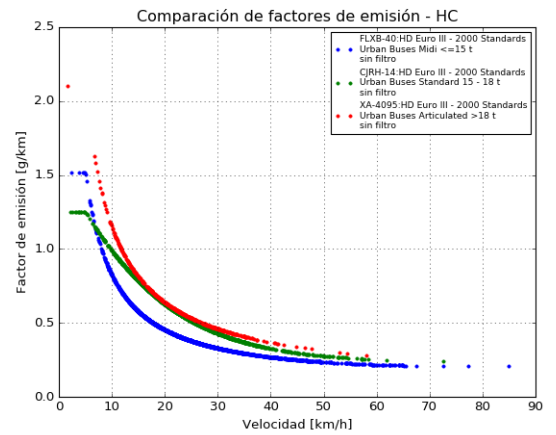
(a) CO



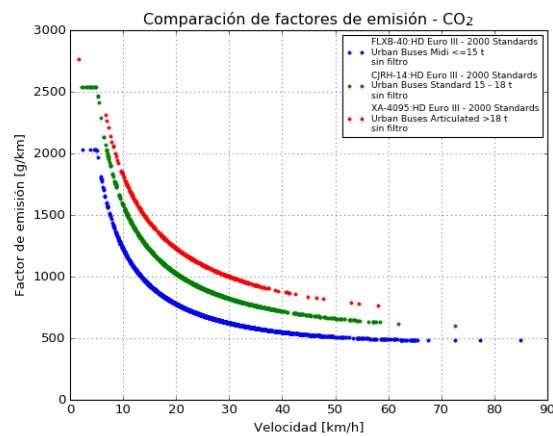
(b) MP



(c) NO<sub>x</sub>

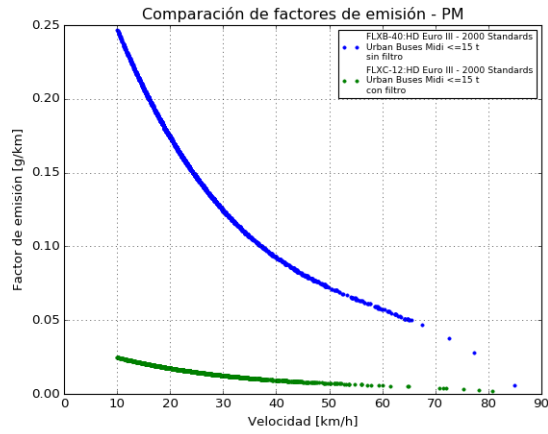


(d) HC

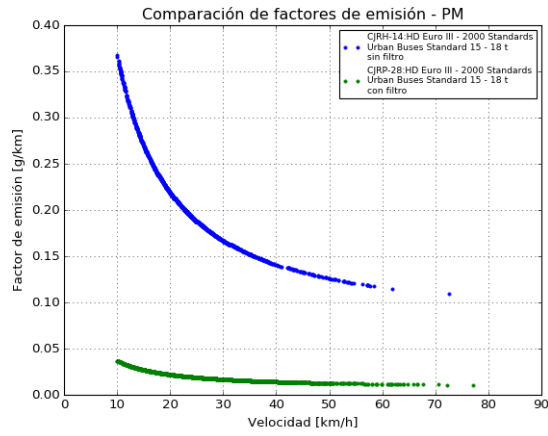


(e) CO<sub>2</sub>

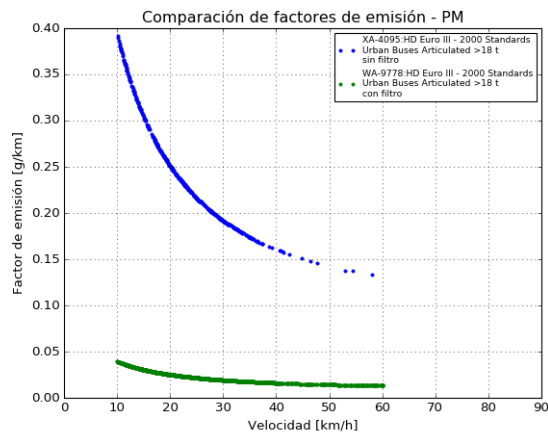
Figura 5.5: Comparación de factores de emisión de las patentes FLXB-40, CJRH-14 y UA-4095 calculados a partir de la implementación 1 - caso base.



(a) Buses clase A



(b) Buses clase B



(c) Buses clase C

Figura 5.6: Comparación de factores de emisión de MP para buses Euro III, con y sin filtro calculados a partir de la implementación 1 - caso base.



## 5.2. Emisiones de la flota completa de buses

En esta sección se presenta la estimación de emisiones de CO, HC, NO<sub>x</sub>, MP y CO<sub>2</sub> para la flota completa de buses del Transantiago, calculada a partir de la implementación 1 y 2. En primer lugar se despliega una distribución temporal (diaria y cada 30 minutos) de las emisiones, para luego mostrar una distribución espacial por comuna.

### 5.2.1. Distribución temporal de emisiones

En la Figura 5.7 se exponen las emisiones diarias (en toneladas) por contaminante durante la semana laboral analizada, calculadas a partir de la implementación 1 (color azul) y 2 (color gris). Dentro de estos resultados destaca el hecho de que las emisiones son menores al considerar las pendientes de las calles. Adicionalmente, otro punto destacable es que el total de emisiones diarias se comporta regular a lo largo de la semana.

Para validar los resultados obtenidos, se procede a realizar una comparación con un inventario de emisiones realizado previamente en Santiago por la Universidad de Santiago de Chile (USACH) el año 2013 [7]. Este estudio entrega las emisiones de cada contaminante en toneladas anuales, por lo cual, para hacer una comparación efectiva, se presenta una aproximación gruesa de las emisiones obtenidas en el estudio en valores anuales. La comparación se observa en la Tabla 5.3, que entrega además la diferencia porcentual de emisiones anuales por cada contaminante.

Tabla 5.3: Comparación de emisiones anuales entre el inventario USACH2013 [7] y los resultados del presente estudio.

Contaminante	Emisiones USACH 2013 [toneladas/año]	Emisiones [toneladas/año]	Diferencia %
CO	908	663,8	-26,9
CO <sub>2</sub>	447.739	303.456,9	-32,2
NO <sub>x</sub>	4.514	2.858,9	-36,7
HC	158	145,8	-7,7
MP	60	52,0	-13,7

Fuente: Elaboración Propia.

La principal causa de la diferencia con el inventario de emisiones de la USACH, es que contrario al presente estudio, este sí considera las emisiones generadas durante los fines de semana, por lo tanto, para poder hacer una comparación justa se realiza una extrapolación de las emisiones producidas durante los fines de semana en función del nivel de actividad de los buses, el cual viene dado por los kilómetros recorridos por día. En la Tabla 5.4 se muestra nuevamente una comparación entre el presente estudio y el inventario de emisiones USACH esta vez considerando los días sábado y domingo. Se aprecia que las toneladas por año estimadas mediante la metodología COPERT 4 para el monóxido de carbono, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, son menores que las estimadas por el inventario USACH, mientras que las emisiones de hidrocarburos y material particulado son mayores. Si bien

Tabla 5.4: Comparación de emisiones anuales entre el inventario USACH2013 [7] y los resultados del presente estudio extrapolando los fines de semana.

Contaminante	Emisiones USACH 2013 [toneladas/año]	Emisiones Extrapoladas [toneladas/año]	Diferencia %
CO	908	901,4	-0,7
CO <sub>2</sub>	447.739	405.792,9	-9,4
NO <sub>x</sub>	4.514	3880,8	-14,0
HC	158	196,6	24,,4
MP	60	69,5	15,9

Fuente: Elaboración Propia.

la diferencia entre los resultados de monóxido de carbono y dióxido de carbono son bajos (menos del 10 %), la diferencia entre las estimaciones de los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y material particulado no es menor, pero se puede explicar debido a diversos factores, los cuales son:

- Diferente metodología de cálculo de emisiones. En el inventario USACH se ocupa el software AIRVIRO, mientras acá se usa la metodología COPERT 4.
- Diferente metodología de cálculo de velocidades. La metodología de cálculo de velocidades usada en el inventario de la USACH se basa en estimación de velocidades mediante pulsos GPS provenientes de los buses del Transantiago el mes de Mayo del año 2012, la cual considera lo siguiente:
  - Si en un arco existe un único registro GPS la velocidad es nula.
  - Si en un arco el número de pulsos es par, entonces se calculan las distancias entre pulsos, luego se suman y se divide por el tiempo total de viaje.
  - Si en un arco el número de pulsos es impar, entonces el último pulso no se utiliza y se calculan distancias usando el resto de los pulsos, para luego dividir por el tiempo que tardó el vehículo en recorrer esa distancia.
- Cambios en los recorridos y frecuencias de los servicios.
- Recambio de vehículos que hayan ocurrido entre el año 2013 y 2016.

En la Figura 5.8 se muestra una distribución temporal de las emisiones en estudio cada 30 minutos para la semana completa bajo análisis. La curva azul representa las emisiones calculadas mediante la implementación 1, mientras que la curva naranja representa los resultados de la implementación 2. Como se mencionó anteriormente, los valores obtenidos mediante la implementación 2, considerando todos los buses del Transantiago, son menores a los valores obtenidos a partir de la implementación 1. El punto más relevante de estos gráficos es que se aprecia un patrón diario de generación de emisiones, con dos máximos bien pronunciados, uno en la mañana y uno en la tarde, y además de un tercer máximo que ocurre después del mediodía. Los máximos de la mañana y la tarde para todos los contaminantes suceden a las 8:30 am y 8:00 pm, respectivamente, entretanto el máximo que ocurre posterior al mediodía fluctúa entre las 01:30 pm y 02:00 pm, dependiendo del contaminante.

En [17] se desarrolla una evaluación de inventarios de emisiones vehiculares para monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno en cuatro ciudades de Sudamérica, entre ellas Santiago. En el

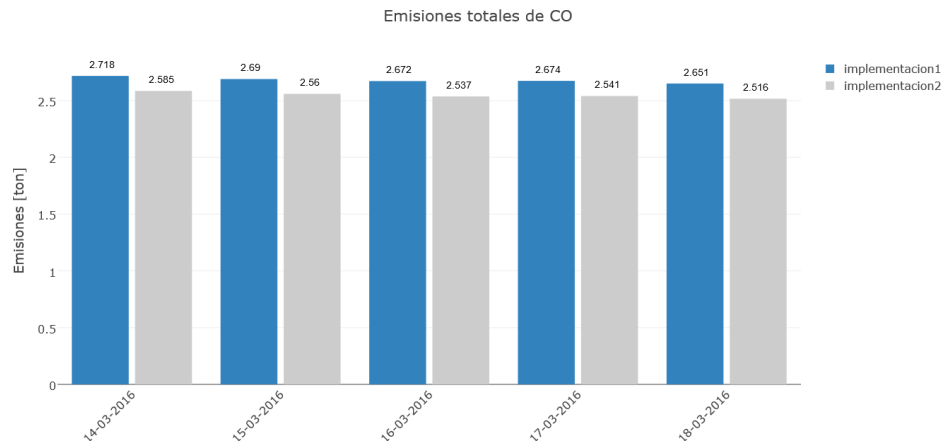
estudio se establece una relación entre emisiones móviles y mediciones de los contaminantes en estudio en tres estaciones meteorológicas de Santiago, las cuales están ubicadas en las comunas de Las Condes, Cerrillos y Pudahuel. En las Figuras A.1 y A.2 del Anexo A, se presentan las emisiones de CO y NO<sub>x</sub> para las tres comunas antes mencionadas. Comparando con los resultados del estudio [17], existe concordancia en los siguientes puntos:

- En Las Condes existe un máximo local de emisiones a las 09:00 am para ambos contaminantes.
- En el estudio [17] se menciona que en Cerrillos y Pudahuel existe un máximo pronunciado de emisiones alrededor de las 08:00 am. Según los resultados de la implementación 1, el máximo de emisiones durante la mañana se da a las 08:30 am y 07:30 am en las comunas de Cerrillos y Pudahuel, respectivamente.
- Según el estudio, el máximo local de emisiones producidas en la tarde ocurren a las 07:00 pm en Cerrillos y Pudahuel, mientras que de acuerdo al presente trabajo, el horario de emisiones punta de la tarde sucede a las 08:00 pm en ambas comunas.
- El último punto es que en ambos estudios se logra apreciar un máximo local amplio de emisiones después del mediodía en Cerrillos.

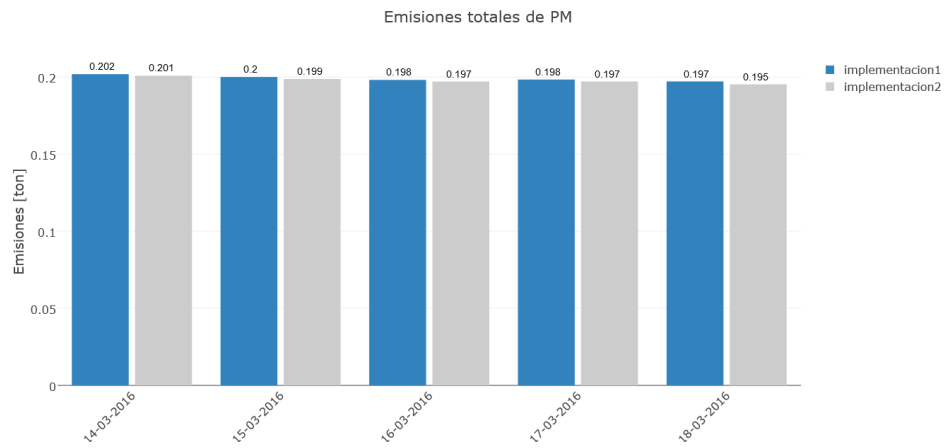
### 5.2.2. Distribución espacial de emisiones

En la siguiente sección se procede a mostrar los resultados de las emisiones producidas por todos los vehículos del Transantiago, diferenciadas por comuna. En la Figura 5.9 se presentan las emisiones (en gramos) producidas el día 14 de marzo de 2016 en cada comuna de la región Metropolitana de Chile, ordenadas de mayor a menor por cantidad de contaminante generado. Además la Figura 5.10 muestra para cada tipo de emisión el porcentaje de contribución de cada comuna a su generación.

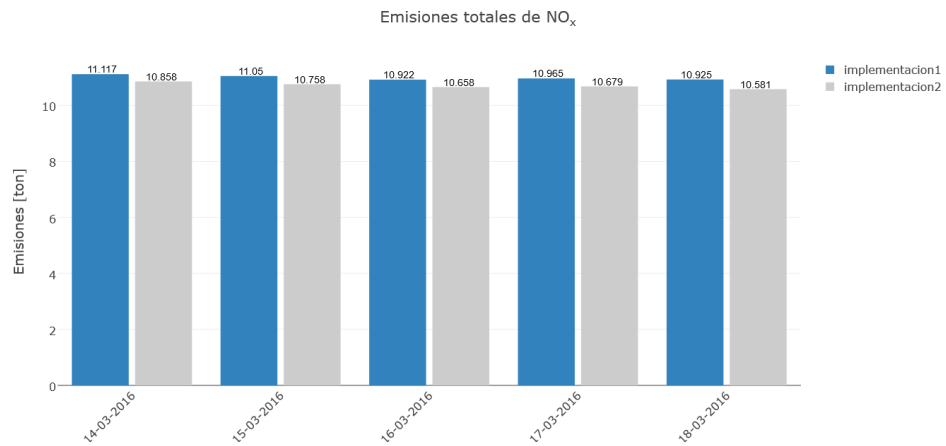
Analizando estos dos resultados, es posible notar que Santiago es la comuna que más aporta a la generación de contaminantes, llegando así a contribuir entre el 9% y 10% de las emisiones. El resto de las comunas que tiene un aporte significativo en la generación de emisiones son Las Condes, Quilicura, Maipú y Puente Alto aportando entre un 4,7% y 6,8% a la polución de la atmósfera. Estos resultados se pueden proyectar también en un mapa, para tener una mejor visión de como se distribuyen las emisiones en la región. La Figura A.3 del Anexo A muestra un mapa de las emisiones por comuna para el día 14 de marzo, calculadas mediante la implementación 1.



(a) CO

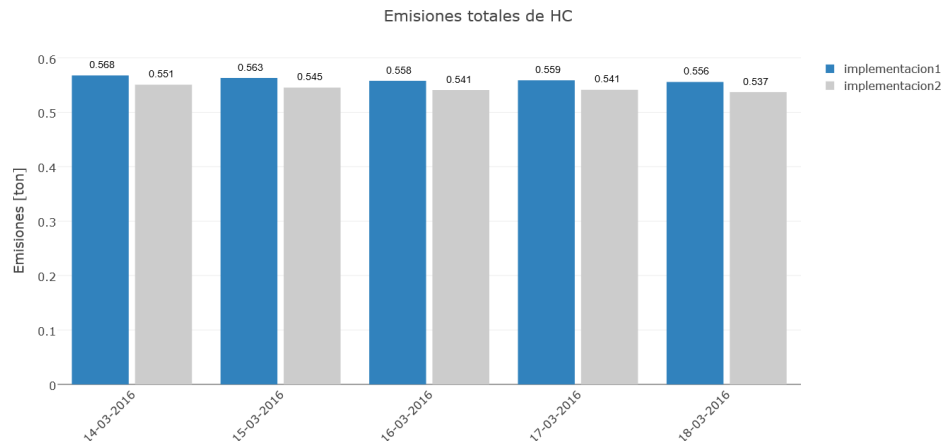


(b) MP

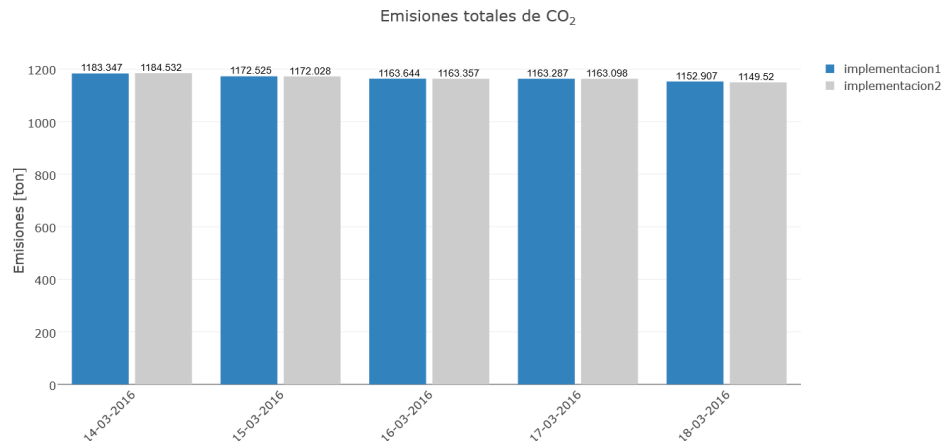


(c) NO<sub>x</sub>

Figura 5.7: Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2.

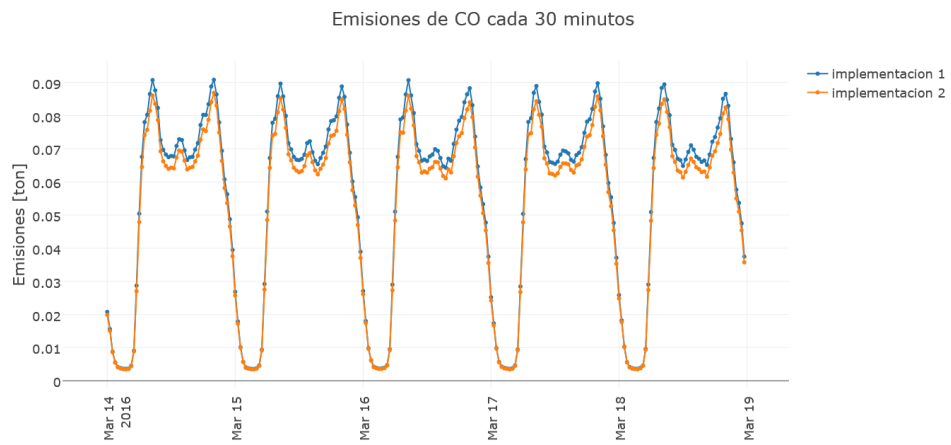


(d) HC

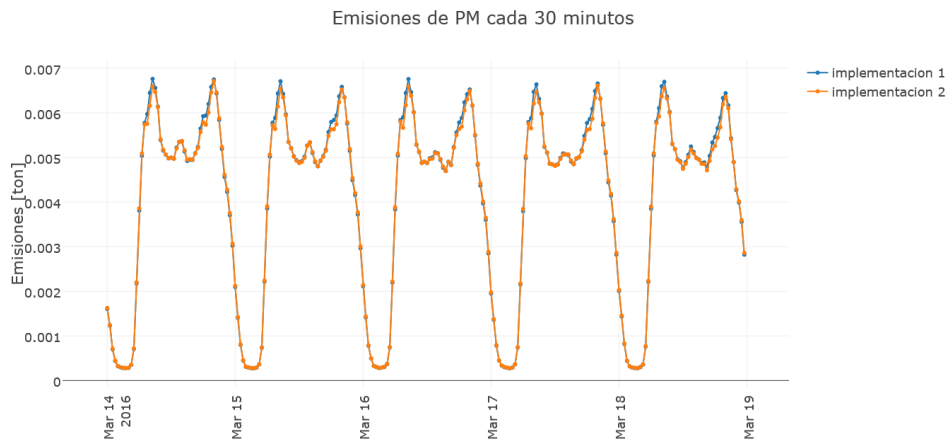


(e) CO<sub>2</sub>

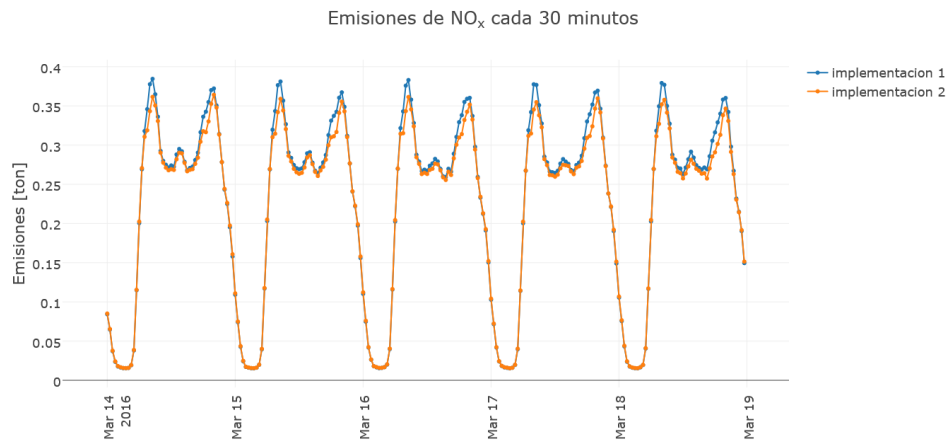
Figura 5.7: Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2 (continuación).



(a) CO



(b) MP



(c) NO<sub>x</sub>

Figura 5.8: Emisiones totales cada 30 minutos para la semana completa en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2.

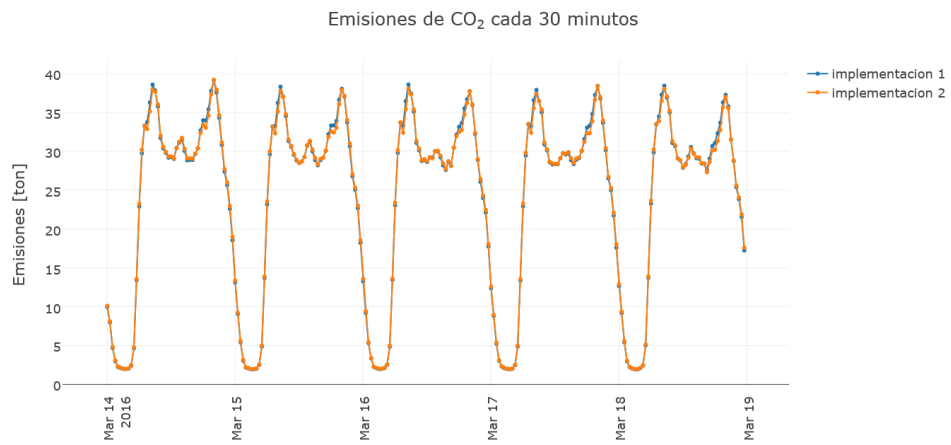
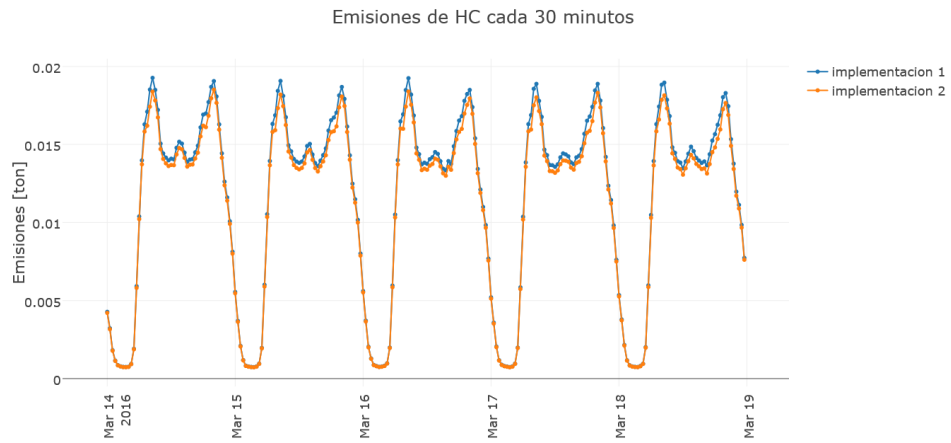
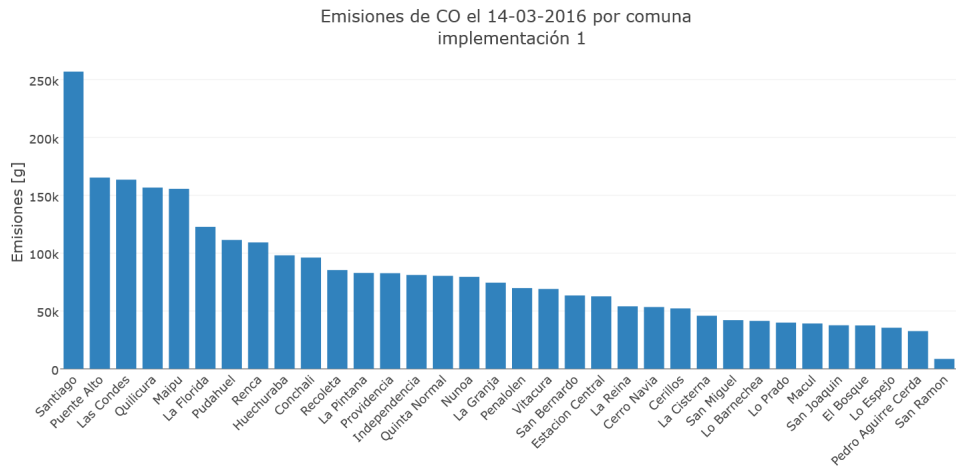
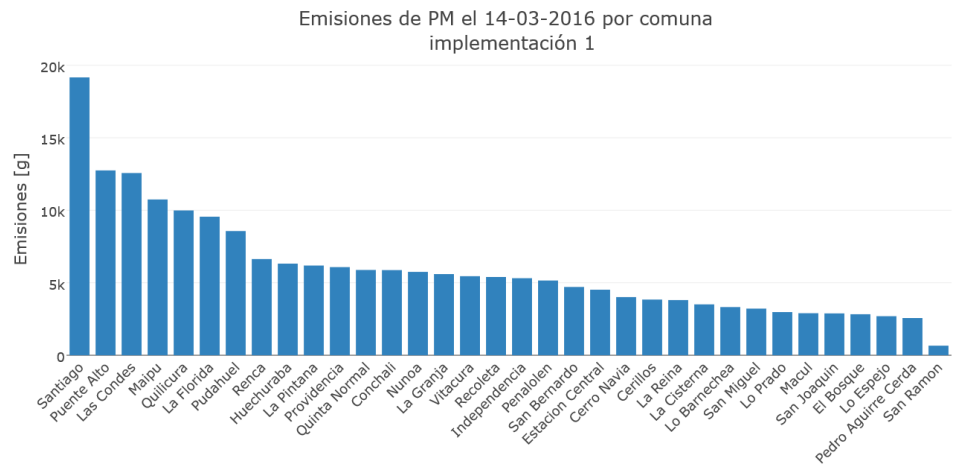


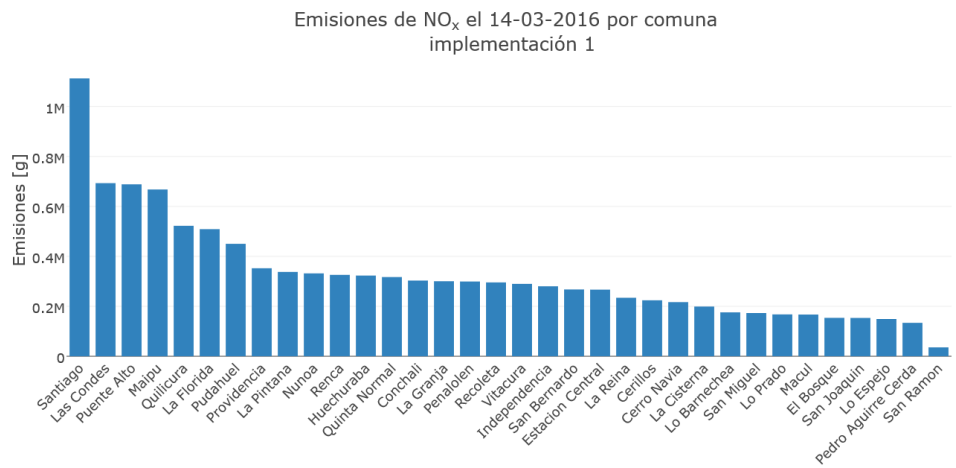
Figura 5.8: Emisiones totales cada 30 minutos para la semana completa en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1 y 2 (continuación).



(a) CO



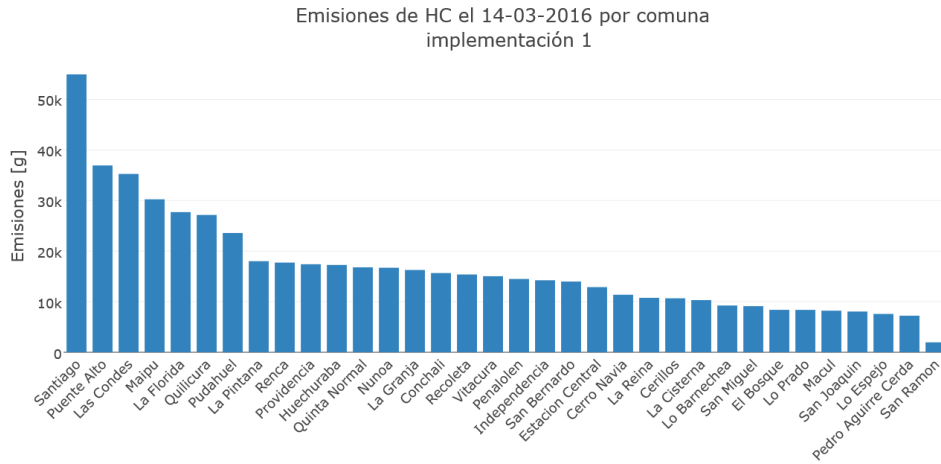
(b) MP



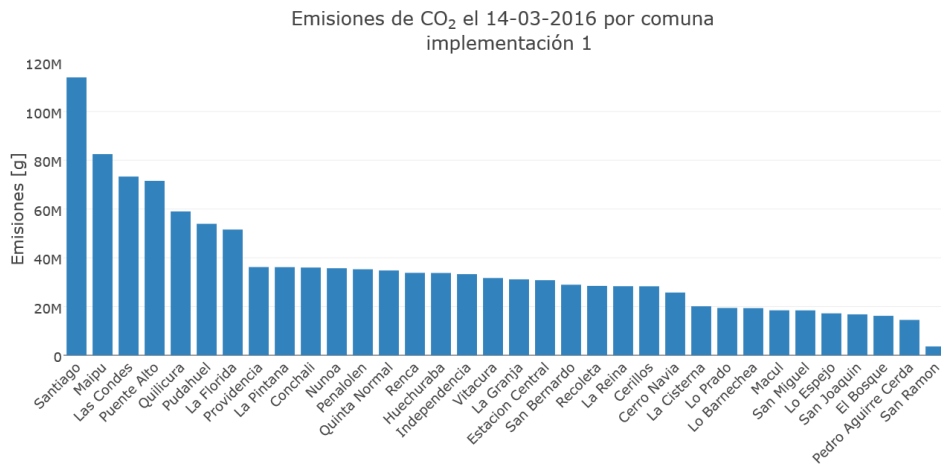
(c) NO<sub>x</sub>

Figura 5.9: Emisiones totales por comuna para el día 14 de Marzo de 2016, calculadas mediante la implementación 1.





(d) HC



(e) CO<sub>2</sub>

Figura 5.9: Emisiones totales por comuna para el día 14 de Marzo de 2016, calculadas mediante la implementación 1 (continuación).

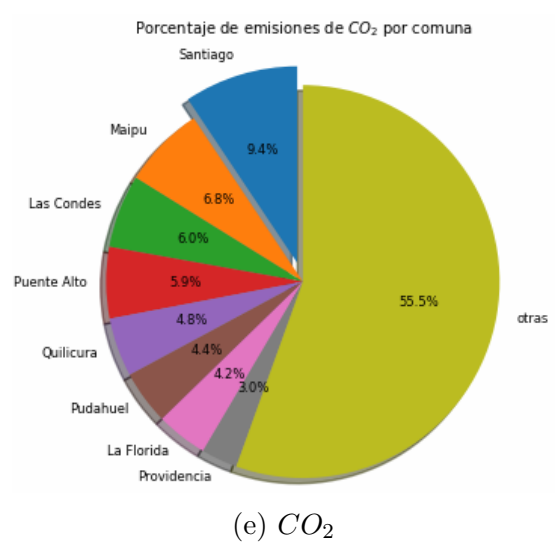
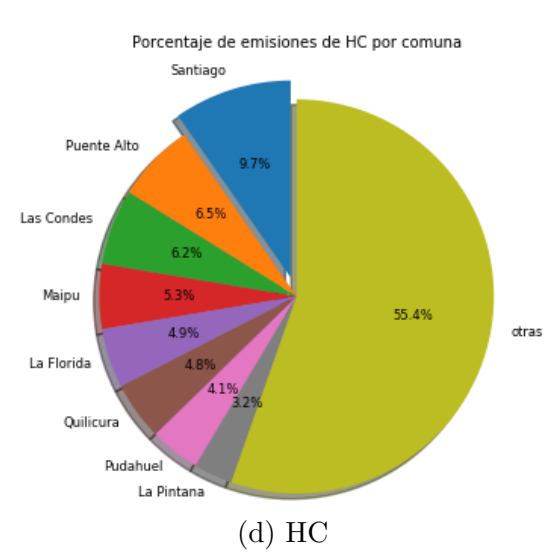
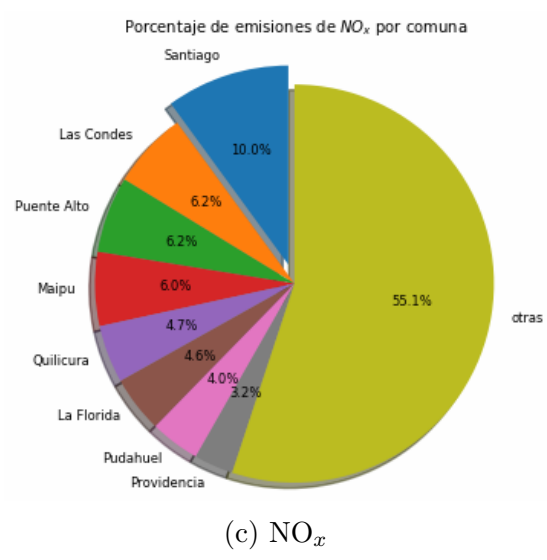
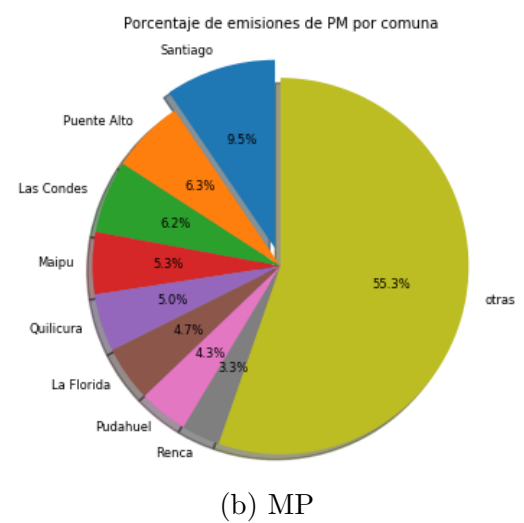
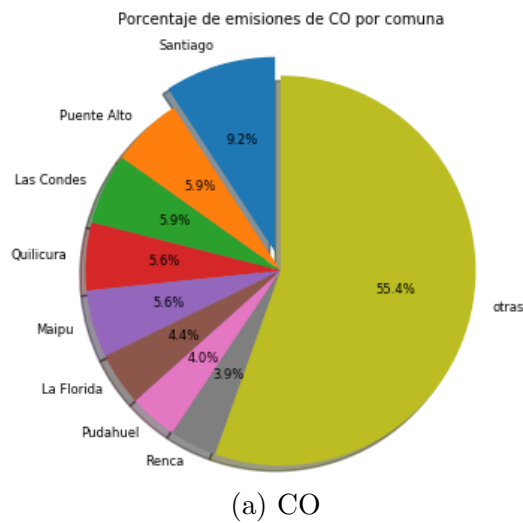


Figura 5.10: Porcentaje de contribución de las comunas a la emisión total de contaminantes, para el día 14 de Marzo de 2016. Cálculo realizado mediante la implementación 1.

### 5.3. Emisiones del servicio 506I

El servicio 506I corresponde a un recorrido que comienza en la comuna de Maipú y termina en Peñalolén. La distancia de su ruta es aproximadamente 33 km y su tiempo de viaje varía entre una hora y dos horas con diez minutos, aproximadamente. De acuerdo a la distribución de velocidades mostrada en la Figura 5.11, la mayor parte del tiempo los buses de este servicio circulan a velocidades entre 15 y 25 km/h. Además, más del 60 % de la ruta es plana, 30 % posee pendiente positiva y un 10 % de la ruta tiene pendiente negativa. En la Figura 5.12 se despliega la distribución de pendientes de la ruta del servicio 506I.

En esta sección se presentan las emisiones estimadas por los buses del servicio 506I durante la semana en estudio.

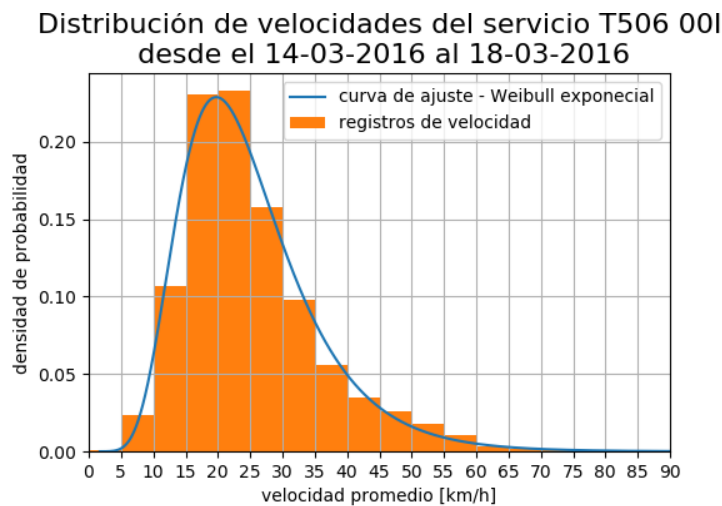


Figura 5.11: Distribución de velocidades del servicio 506I durante la semana en estudio.

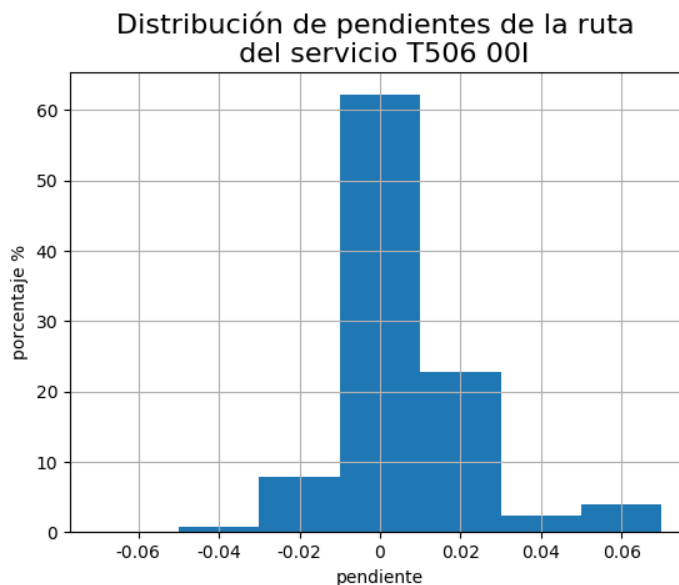


Figura 5.12: Distribución de pendientes de la ruta del servicio 506I.

### 5.3.1. Distribución temporal de emisiones

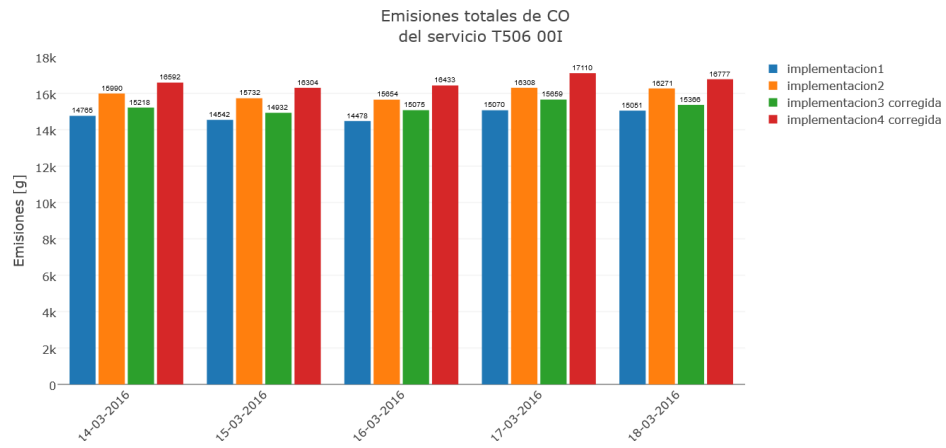
A continuación se exponen las distribuciones temporales del servicio 506I, realizadas por medio de las implementaciones 1, 2, 3 y 4. En primer lugar, en la Figura 5.13 se despliega una distribución diaria por contaminante (en gramos) para cada implementación. Las implementaciones 1, 2, 3 y 4, corresponden a los colores azul, naranja, verde y rojo, respectivamente. Cabe mencionar que a los resultados entregados por la implementación 3 y 4 se le ha aplicado un factor de corrección del 3,7 %, lo cual es el equivalente a los datos de velocidad perdidos al realizar la correspondencia de las bases de datos *velocidadesFull* y *perfilCarga*.

Es importante notar que, para las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y MP, las emisiones diarias de las implementaciones 2, 3 y 4 son mayores que las de la implementación 1, como era de esperarse para este servicio, ya que la implementación 1 considera que los buses circulan por calles planas y sin carga, mientras que en el resto de las implementaciones se considera la integración de los valores reales o estimados de pendientes y factores de carga. Adicionalmente, se aprecia que los resultados de la implementación 2 son considerablemente mayores que los de la implementación 3, por lo cual la variable pendiente tiene un mayor impacto que la carga de los buses en las emisiones de este servicio. De hecho, al comparar las emisiones de la implementación 1 y 3, se puede ver que la diferencia de las emisiones producidas es pequeña.

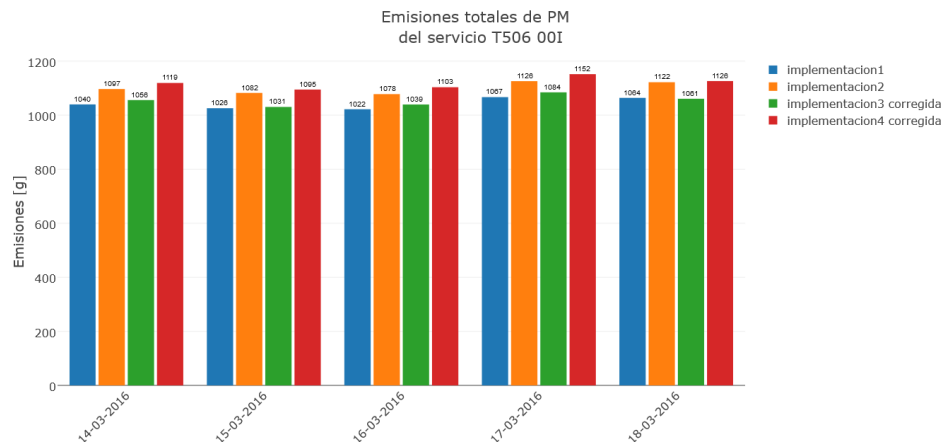
Los resultados de los HC no se comportan de igual manera que las demás emisiones, debido a que sus factores de emisión son prácticamente iguales independiente de la carga del vehículo (ver Figura 5.3d), y tampoco se ven afectados en demasía por la pendiente de la ruta (ver Figura 5.2d). Por esta razón las diferencias entre las emisiones totales por día entregadas por cada implementación son prácticamente nulas. Hay que señalar que, al momento de analizar las emisiones de HC, el factor de corrección aplicado a las implementaciones 3 y 4 no es suficiente para suplir la pérdida de datos de velocidad, debido a que los resultados de la implementación 3 siempre deben ser mayores a los de la implementación 1. Como se ve en la Figura 5.13d, los resultados de la implementación 3 (color verde) son menores que los de la implementación 1 (color azul), aunque su diferencia es mínima.

Posteriormente, en la Figura 5.14 se presenta una distribución temporal de emisiones totales cada 30 minutos para el día lunes 14 de marzo. Las implementaciones 1, 2, 3 y 4 son representadas en color azul, naranja, verde y rojo, respectivamente.

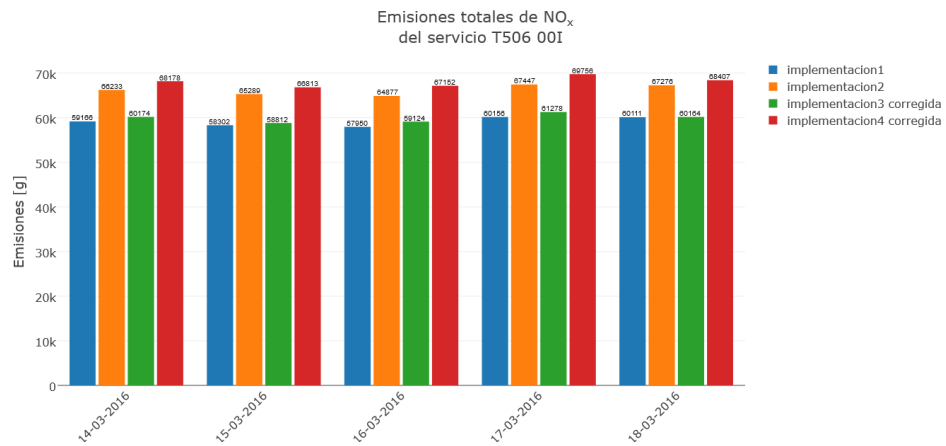
Lo primero que hay que destacar, es que la máxima cantidad de emisiones se da a las 09:30 am para todos los contaminantes, lo cual es explicado por el hecho que a esa hora es donde existen más buses del servicio en operación, como se muestra en la correlación entre emisiones totales y número de buses en operación de la Figura B.1, en el Anexo B. En la misma Figura, se puede apreciar que después de este horario el número de buses operando en el servicio 506I disminuye, habiendo 26 % menos cantidad de buses entre las 04:00 pm y 09:00 pm que a las 09:30 am. Luego, los máximos locales de emisiones entre las 04:00 pm y 09:00 pm se deben principalmente a las bajas velocidades de los vehículos. En la Figura B.2 del Anexo B se muestra una correlación entre velocidad promedio y emisiones promedio cada 30 minutos del servicio 506I, en la cual se ve que la máxima generación de emisiones promedio, tanto en la mañana como en la tarde, coinciden con flujos vehiculares pobres. Otro punto importante es que el mayor impacto del factor de carga sobre la generación de emisiones



(a) CO

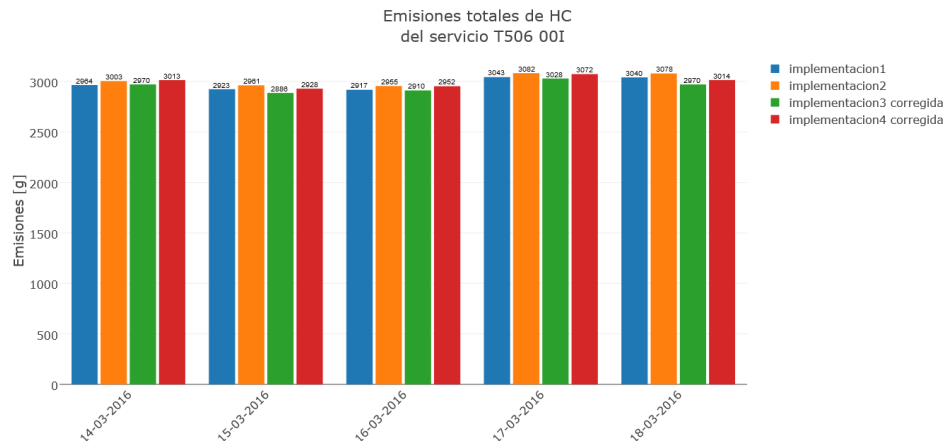


(b) MP

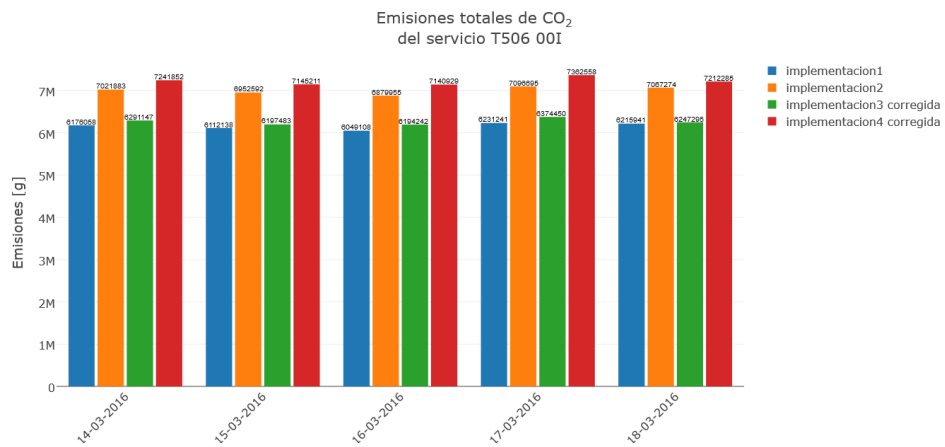


(c) NO<sub>x</sub>

Figura 5.13: Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4.



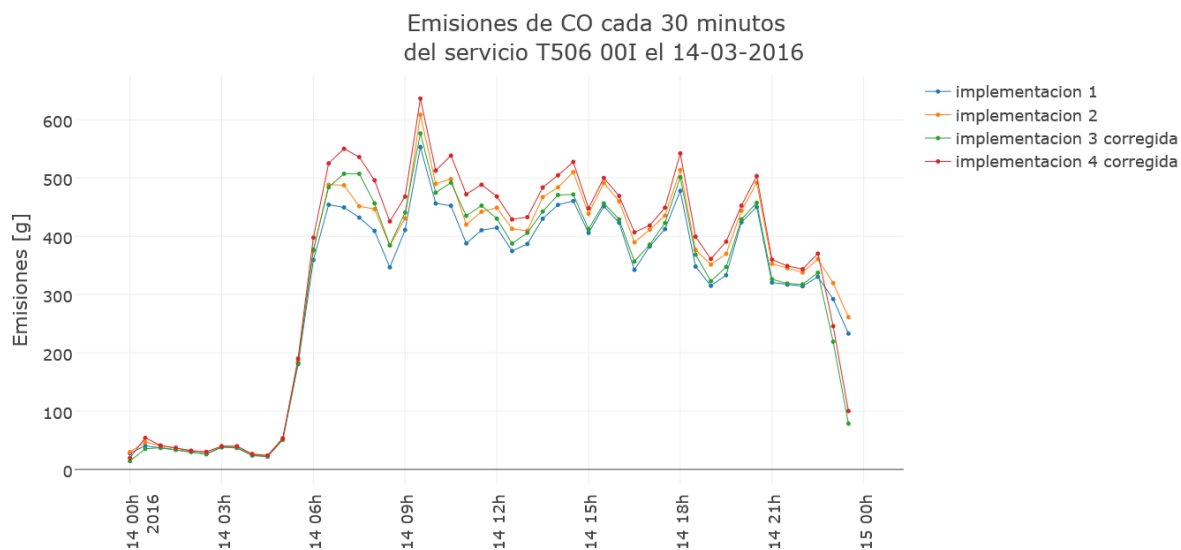
(d) HC



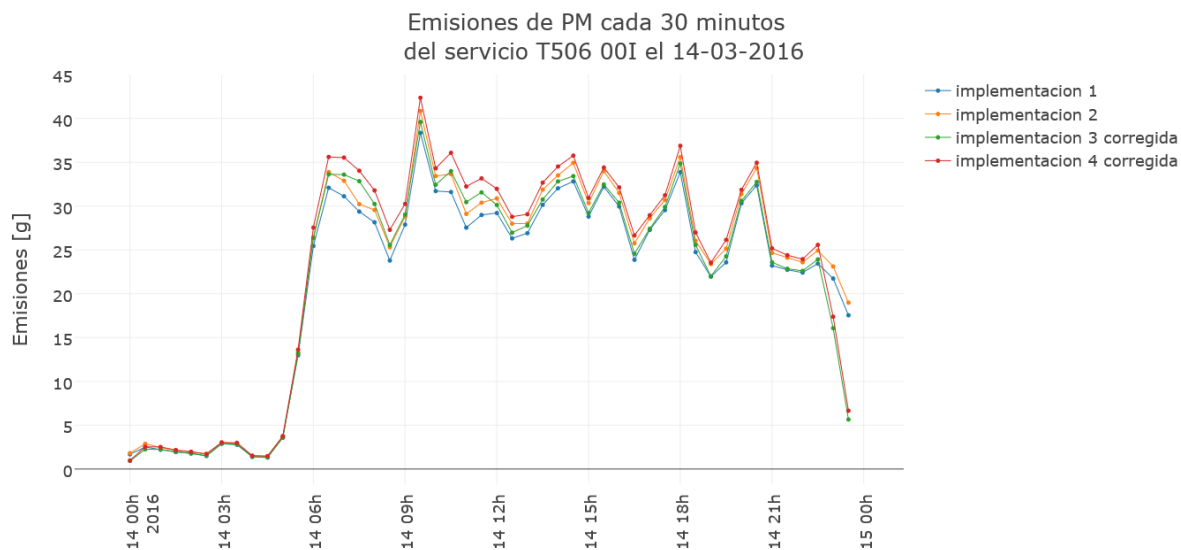
(e) CO<sub>2</sub>

Figura 5.13: Emisiones totales para cada día de la semana en estudio, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4 (continuación).

ocurre entre las 06:00 am y las 08:30 am, lo cual coincide con el horario punta matutino de la ciudad. El resto del tiempo, la pendiente domina por sobre el factor de carga, es decir, las emisiones calculadas mediante la implementación 2 son mayores que la implementación 3. Cabe destacar que la carga de los buses del servicio 506I no juega un rol importante en la tarde, dado que en ese horario es el servicio 506R (sentido contrario al 506I) el que cuenta con mayor demanda.



(a) CO



(b) MP

Figura 5.14: Emisiones totales del servicio 506I cada 30 minutos del día 14-03-2016, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4.

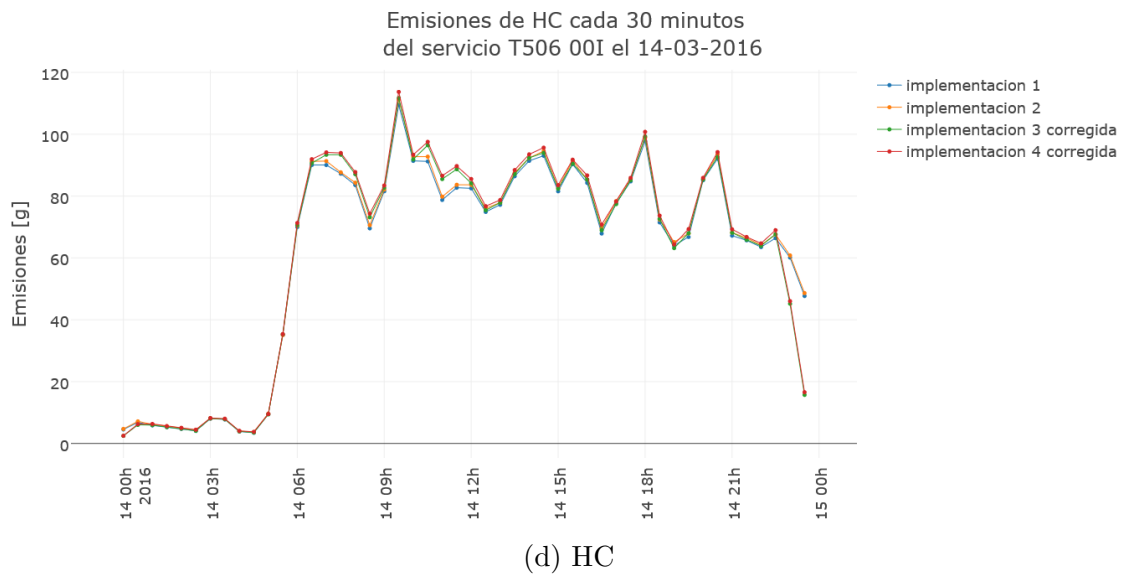
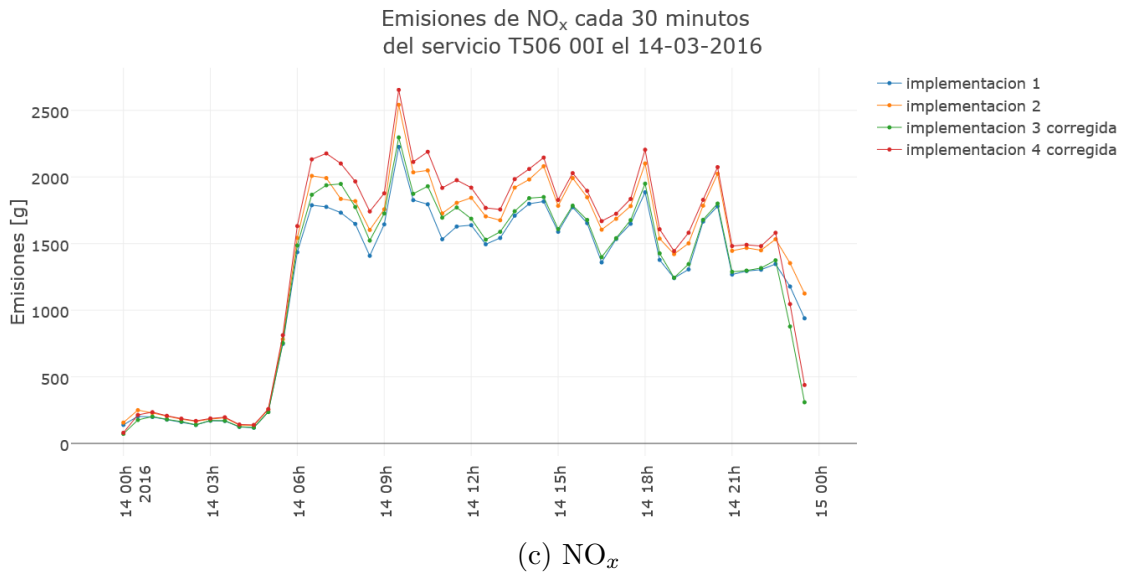


Figura 5.14: Emisiones totales del servicio 506I cada 30 minutos del día 14-03-2016, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4 (continuación).



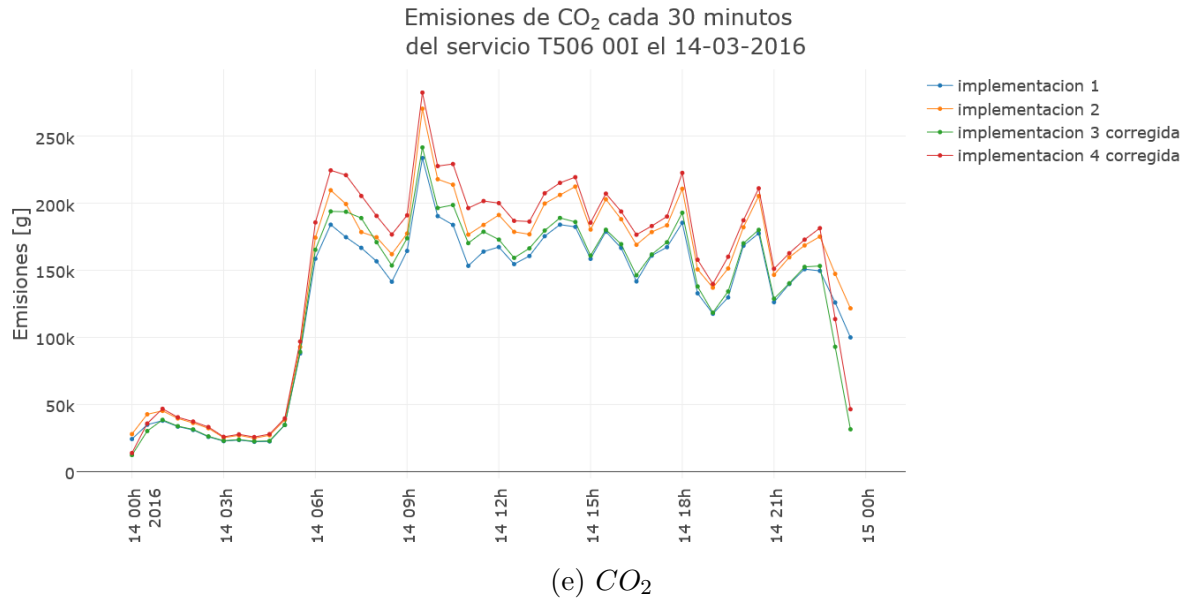


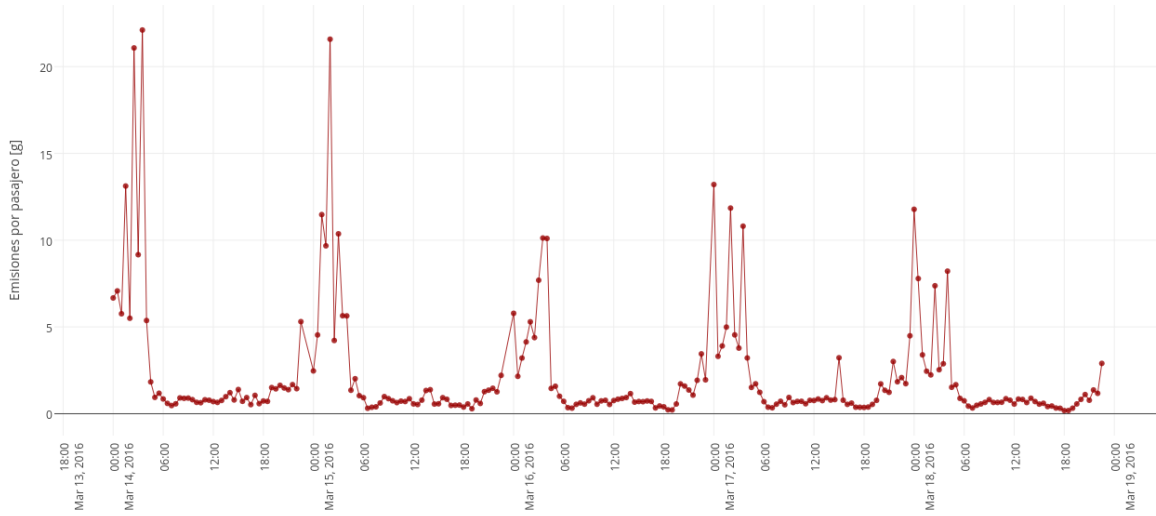
Figura 5.14: Emisiones totales del servicio 506I cada 30 minutos del día 14-03-2016, calculadas mediante las implementaciones 1, 2, 3 y 4 (continuación).

### 5.3.2. Distribución temporal de emisiones por pasajero

Teniendo en cuenta la cantidad total de emisiones por expedición de bus sumado a los pasajeros transportados en la misma, se procede a calcular las emisiones por pasajero transportado. Por consiguiente, en la Figura 5.15 se presentan las emisiones promedio por pasajero transportado como función del tiempo de inicio de la expedición, calculadas mediante la implementación 1. Los resultados son desplegados cada 30 minutos para la semana completa en estudio.

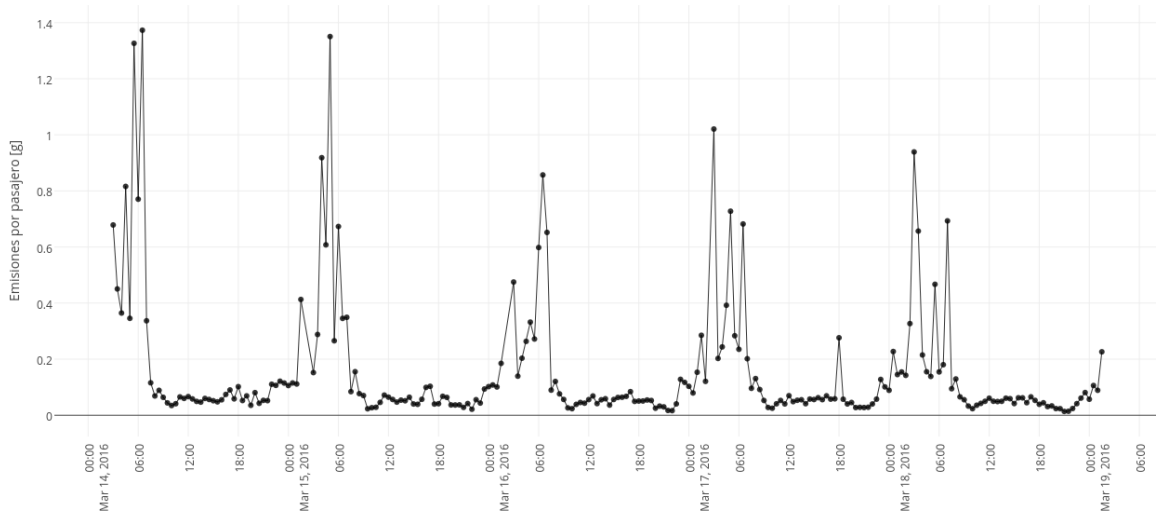
En todos los tipos de emisiones se aprecia un patrón, el cual refleja que entre las 00:00 am y las 04:00 am las emisiones por pasajero son muy elevadas y variables. Posterior a este horario las emisiones por pasajero son bajas y prácticamente invariantes, solo desde las 10:00 pm se comienza a apreciar un aumento de ellas. En la Figura B.3 del Anexo B se realiza un acercamiento a los resultados del día lunes 14 de marzo y se contrastan los resultados con las emisiones promedio por expedición del servicio (en naranja). Es posible ver que las emisiones promedio por expedición son bajas durante la madrugada, por consecuencia, la alta tasa de emisiones por pasajero a esa hora se debe a la poca cantidad de personas que utilizan el servicio. Además, a pesar de que las emisiones promedio por viaje fluctúan durante el día, las emisiones por pasajero no lo hacen debido al ajuste de la demanda del servicio Transantiago.

Emisiones promedio de CO cada 30 minutos del servicio T506 001



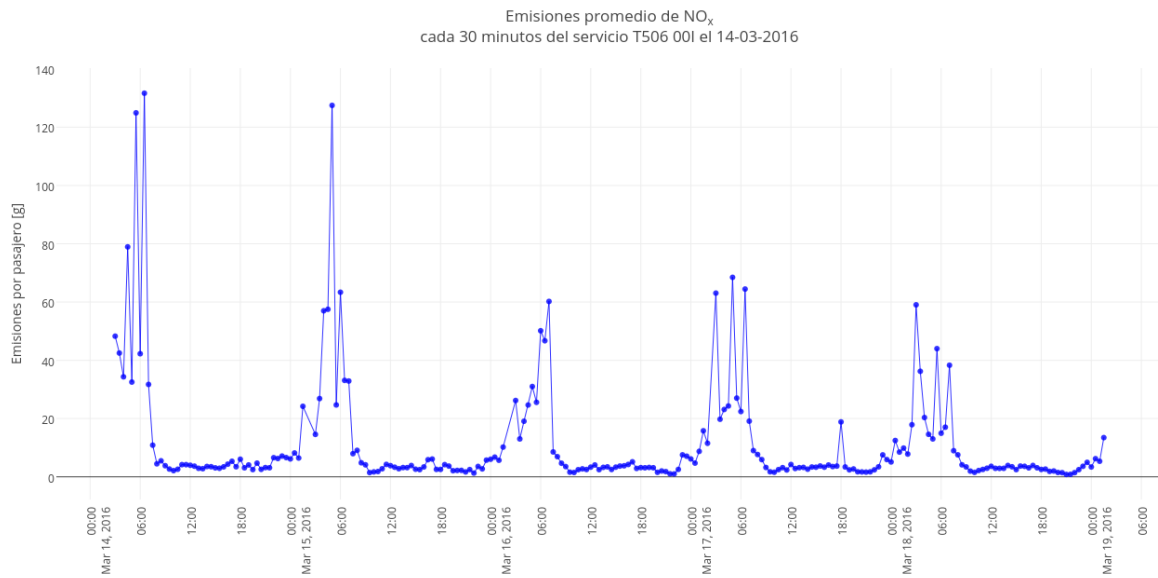
(a) CO

Emisiones promedio de PM cada 30 minutos del servicio T506 001 el 14-03-2016

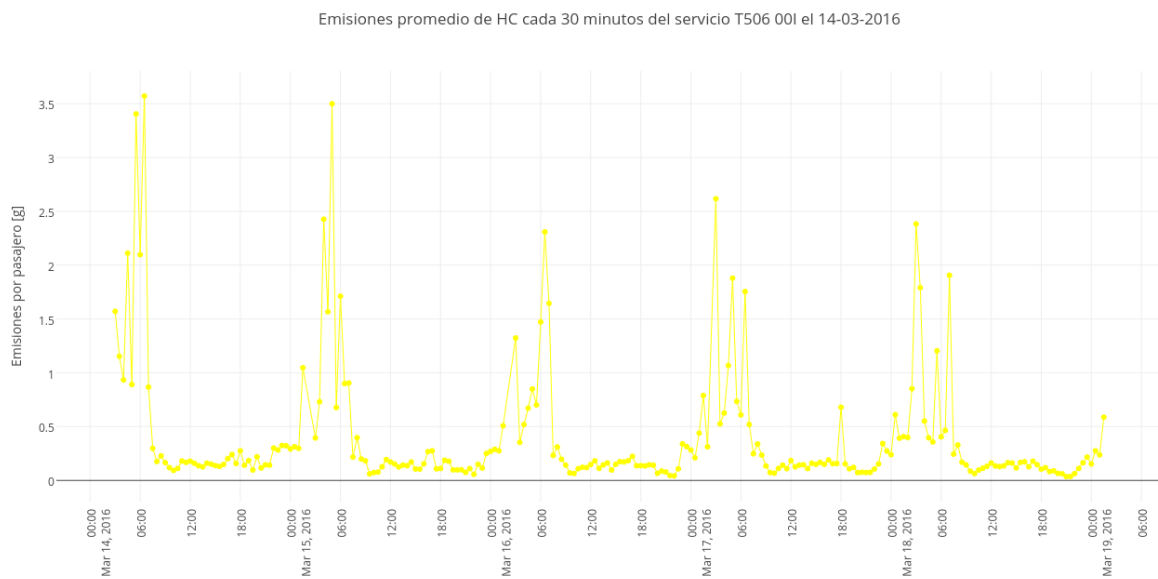


(b) MP

Figura 5.15: Emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1.



(c)  $\text{NO}_x$



(d) HC

Figura 5.15: Emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación).

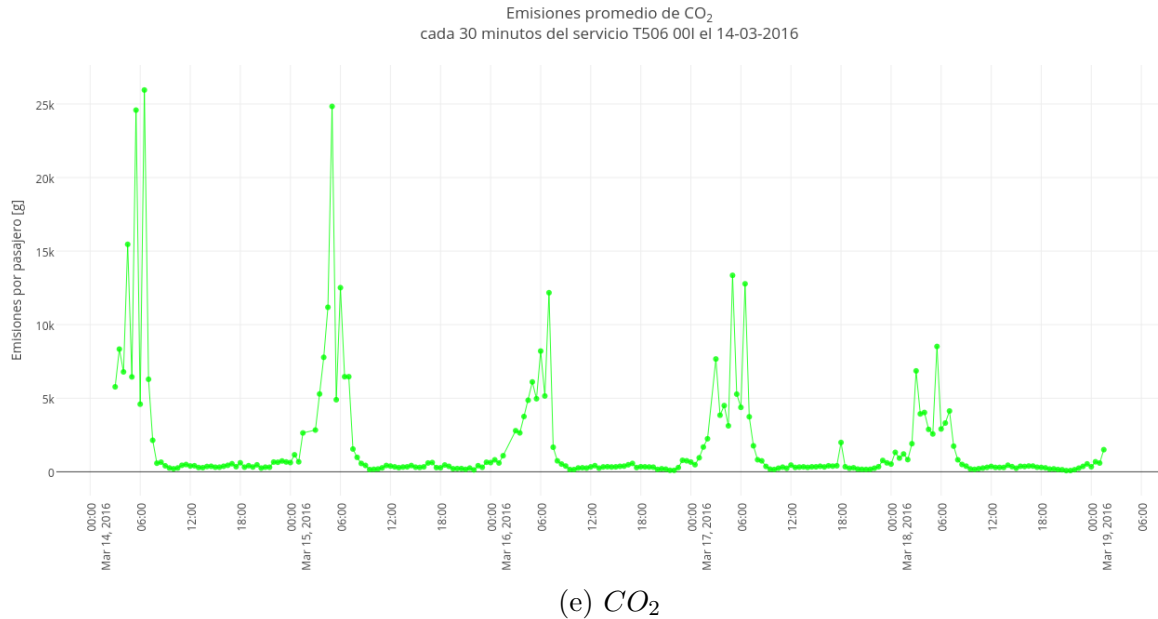


Figura 5.15: Emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación).

### 5.3.3. Distribución espacial de emisiones

Al estudiar emisiones provenientes del transporte terrestre es importante ser capaz de llevar las estimaciones realizadas a mapas. En particular, en esta sección se presenta un ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45, realizando una expedición del servicio 506I el día viernes 18 de marzo de 2016. En la Figura 5.16 se presentan las emisiones del viaje antes mencionado, cuyo horario de inicio es las 17:00 hrs. Este recorrido comienza en la comuna de Maipú (abajo a la izquierda) y termina en la comuna de Peñalolén (arriba a la derecha). Para los contaminantes en estudio (CO, NO<sub>x</sub>, HC y MP), la zona donde más se concentran las emisiones es en la intersección de Av. Simón Bolívar con Av. Santa Corina, lo cual se debe a que en esta zona el bus debe tomar un tipo de rotonda de calle estrecha, lo que hace que su tiempo de residencia en el punto sea mayor. Otras zonas que concentran altas emisiones son parque O'Higgins y lugares cercanos a la rotonda Los Pajaritos.

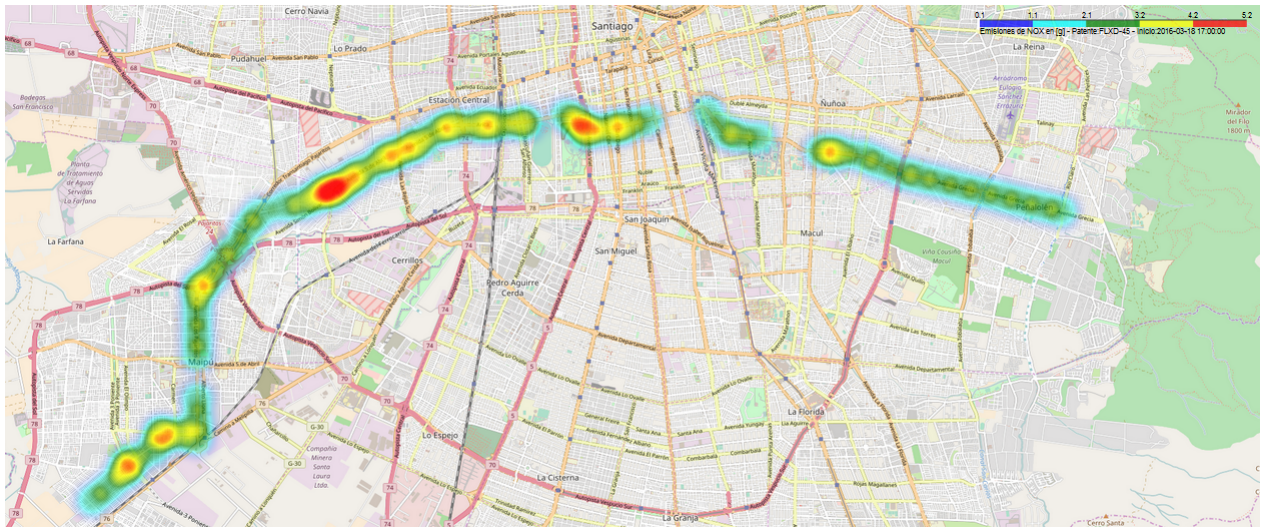


(a) CO



(b) MP

Figura 5.16: Ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45 realizando un recorrido del servicio 506I, con horario de inicio 17:00 el día 18-03-2016.

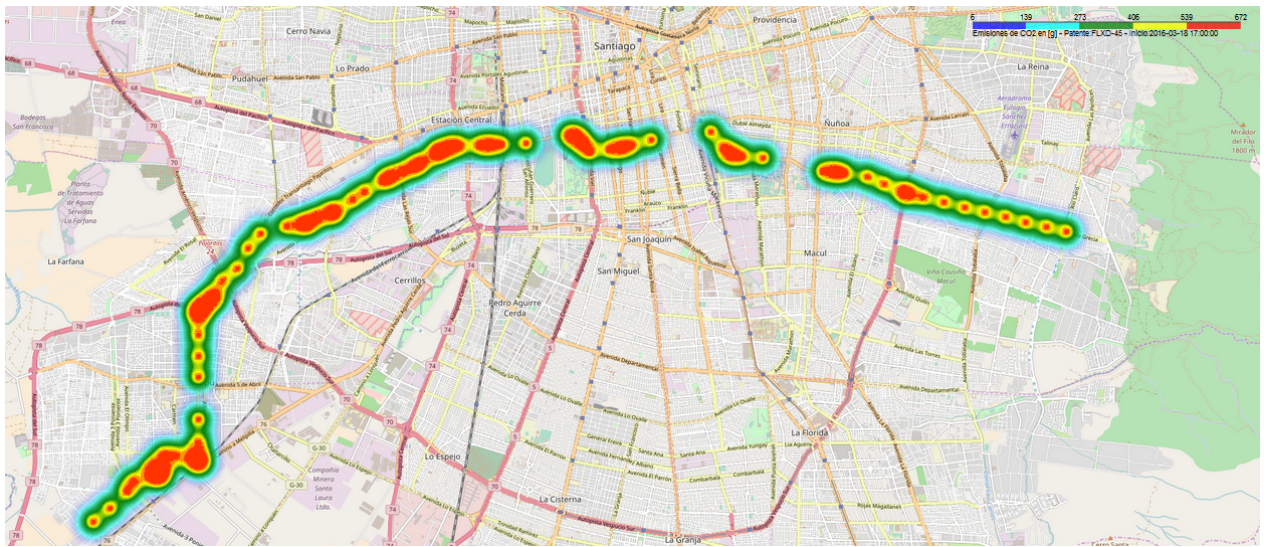


(c)  $\text{NO}_x$



(d) HC

Figura 5.16: Ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45 realizando un recorrido del servicio 506I, con horario de inicio 17:00 el día 18-03-2016 (continuación).



(e)  $CO_2$

Figura 5.16: Ejemplo de emisiones en ruta de la patente FLXD-45 realizando un recorrido del servicio 506I, con horario de inicio 17:00 el día 18-03-2016 (continuación).

# Capítulo 6

## Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones del presente trabajo de título:

- Las normas de emisión juegan un rol fundamental en la cantidad de contaminación que los vehículos emiten a la atmósfera, ya que como se ha mostrado existe mucha diferencia entre la cantidad de contaminantes generados en buses con normas de emisión antigua y buses con norma de emisión más nueva, siendo estos últimos los que menos aportan. Sumado a lo anterior, los dispositivos post-tratamiento también cumplen un papel importante en este asunto, ya que la buena utilización de éstos permite reducir considerablemente las emisiones provenientes del transporte terrestre. En particular, en este estudio se discute el uso del filtro de partículas diésel, dispositivo que permite reducir en más del 90 % las emisiones de material particulado. Esto último se cumple sólo si el filtro cuenta con un buen mantenimiento, dado que cada cierto tiempo hay que remover el material que atrapa el filtro de partículas.
- En cuanto a la masa de emisiones producida durante la semana en estudio por los buses del transporte público en Santiago, se tiene que la cantidad de  $\text{CO}_2$  es considerablemente mayor que la de  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{MP}$ . Considerando sólo estos tipos de emisiones, el  $\text{CO}_2$  representa el 98,78 % de la masa liberada a la atmósfera, mientras que el  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  y  $\text{MP}$  son el 0,93 %, 0,22 %, 0,05 % y 0,02 %, respectivamente. Sin tomar en cuenta al dióxido de carbono, que es un gas de efecto invernadero, los óxidos de nitrógeno son los contaminantes que más se liberan a la atmósfera, seguidos del monóxido de carbono, mientras que las emisiones de hidrocarburos y material particulado son mínimas.
- Las emisiones obtenidas para la flota vehicular completa del Transantiago muestran un patrón temporal bien notorio, el cual dice que a lo largo del día existen tres máximos puntos de liberación de contaminantes a la atmósfera. Dos de estos máximos son notoriamente marcados, ocurriendo el primero a las 08:30 am y el segundo a las 08:00 pm, mientras que el tercer máximo es menor que los otros dos y tiene lugar entre las 01:30 pm y 02:00 pm. Cabe destacar que los máximos de la mañana y la tarde coinciden con los horarios punta de la ciudad, lo cual significa que coinciden con un alto número de buses en las calles y con un lento flujo vehicular. Asimismo, cabe señalar que la cantidad total de emisiones diarias es prácticamente constante a lo largo de la semana laboral.



- En la región Metropolitana de Chile, Santiago es la comuna donde más se generan emisiones, contribuyendo entre un 9 % y 10 % a las emisiones totales de la región. Otras comunas con liberación significativa de contaminantes a la atmósfera son Las Condes, Quilicura, Maipú y Puente Alto, aportando entre un 4,7 % y 6,8 % a la polución de la atmósfera, dependiendo del tipo de contaminante.
- Las emisiones por pasajero transportado también tienen un patrón temporal que se manifiesta diariamente, mostrando valores altos y fluctuantes durante la noche y madrugada, comenzando a las 10 pm. Este comportamiento se extiende hasta las 04:00 am, hora a partir de la cual pasa a tener valores constantes. Lo anterior lleva a concluir un punto considerable, y es que a pesar de que entre las 04:00 am y las 10:00 pm las emisiones totales por expedición fluctúan, las emisiones por pasajero se mantienen invariantes debido al ajuste de demanda del Transantiago, por lo cual en términos de emisiones por pasajero, el servicio nocturno del Transantiago no es eficiente. Luego, mediante este estudio, se entrega una nueva variable a considerar al momento de estudiar la implementación de los servicios nocturnos de la ciudad.
- El impacto de incorporar la pendiente al momento de realizar un inventario de emisiones puede o no ser considerable, dependiendo del tipo de análisis que se quiera realizar. Como se muestra en los resultados de este estudio, al considerar la pendiente en la estimación de emisiones de la flota vehicular completa del Transantiago, los valores obtenidos son menores que al no considerar la pendiente, aunque la diferencia es pequeña. Por otro lado, al revisar los resultados del servicio 506I, en cuya ruta existe un gran porcentaje de pendientes positivas, los valores indican que al incorporar la pendiente en el cálculo las emisiones son significativamente mayores que al no incorporarlas. En cuanto a la inclusión del factor de carga de los buses en el análisis, se concluye que su impacto es prácticamente nulo al mirar el total de emisiones, pero al realizar análisis cada 30 minutos, se puede ver que este tiene una gran influencia en los horarios de mayor demanda del servicio. Más aún, los factores de emisión no se ven afectados mayormente al aumentar el factor de carga de un vehículo.

# Bibliografía

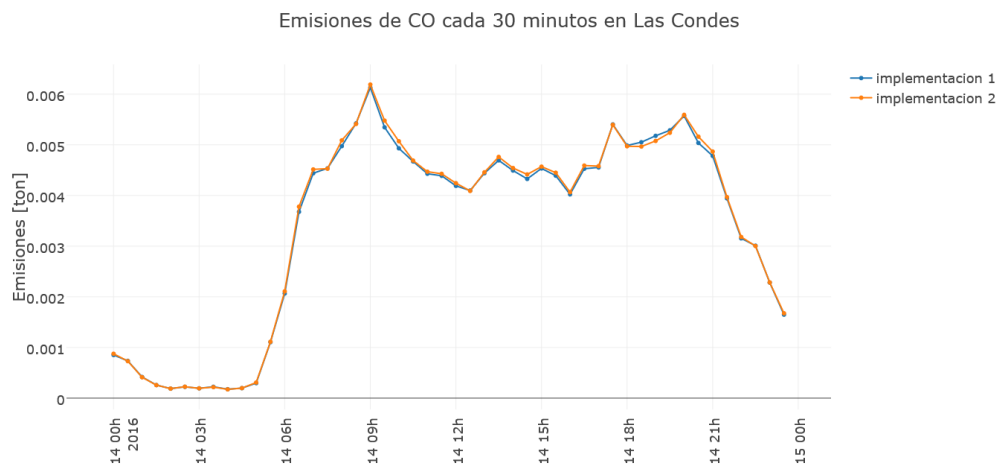
- [1] Manual de Normas Gráficas para el Sistema de Transporte Público de Santiago. Technical report, DTM, Santiago, 2013.
- [2] Manual de Normas Gráficas de Transantiago. Technical report, Gobierno de Chile, Santiago, 2004.
- [3] Cristian E. Cortés, Jaime Gibson, Antonio Gschwender, Marcela Munizaga, and Mauricio Zúñiga. Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4):695–707, 2011.
- [4] Marcela A. Munizaga and Mauricio Zúñiga. Descripción del sistema ADATRAP. Technical report, UNIVERSIDAD DE CHILE, Santiago, 2015.
- [5] L Ntziachristos and Z Samaras. Exhaust emissions from road transport. In *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009*. 2009.
- [6] Roberto M Corvalán, Mauricio Osses, and Cristian M Urrutia. Hot emission model for mobile sources: application to the metropolitan region of the city of Santiago, Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(May):167–74, 2002.
- [7] Ernesto Gramsch, Gianni López, and Lars Gidhagen. Estudio: Actualización y sistematización del inventario de emisiones contaminantes atmosféricos en la región metropolitana. Technical report, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, 2014.
- [8] Marcela A. Munizaga, César Nuñez, and Antonio Gschwender. Smart card data for wider transport system evaluation. In *PT planning with smart card*, chapter 9. 2016.
- [9] Decreto 122, fecha publicación 19-jul-1991, ministerio de transportes y telecomunicaciones; subsecretaria de transportes, fija requisitos dimensionales y funcionales a vehiculos que presten servicios de locomocion colectiva urbana que indica.
- [10] Marcela A. Munizaga and Carolina Palma. Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin-Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24:9–18, 2012.
- [11] T. Raatz, M. Klingebiel, K.H. Dietsche, Robert Bosch GmbH., and R. Müller. *Emissions-control Technology for Diesel Engines*. Bosch yellow jackets. Robert Bosch, 2005.
- [12] İbrahim Aslan Reşitoğlu, Kemal Altinişik, and Ali Keskin. The pollutant emissions

- from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1):15–27, 2015.
- [13] Jaffar Hussain, K Palaniradja, N Alagumurthi, and R Manimaran. Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emission characteristics of a Three Cylinder Direct Injection Compression Ignition Engine. *Alexandria Engineering Journal*, 51(4):241–247, 2012.
- [14] Ministerio de Medio Ambiente. The Santiago de Chile Diesel Particle Filter Program for Buses of Public Urban Transport: Model Case for Cities of Emerging Countries and Success Story of the Swiss-Chilean Cooperation. Technical Report November, 2011.
- [15] Cristián Acevedo Herrera. Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público. Technical report, 2007.
- [16] World Resources Institute and World Business Council on Sustainable Development. GHG Protocol - Mobile Guide: Calculating CO2 Emissions from Mobile Sources. Technical report, 2005.
- [17] Laura Gallardo, Jerónimo Escribano, Laura Dawidowski, Néstor Rojas, Maria de Fátima Andrade, and Mauricio Osses. Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and Sao Paulo. *Atmospheric Environment*, 47:12–19, 2012.

# Apéndice A

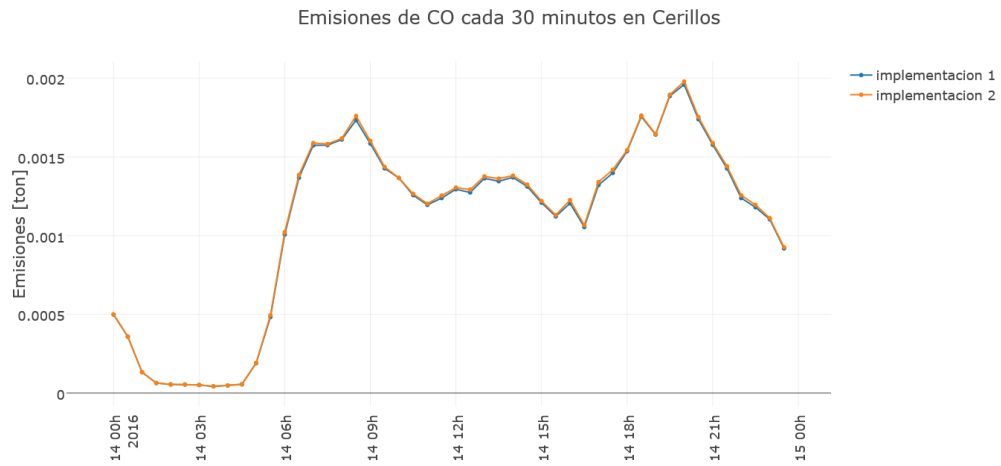
## Emisiones calculadas para la flota completa

### A.1. Distribución temporal

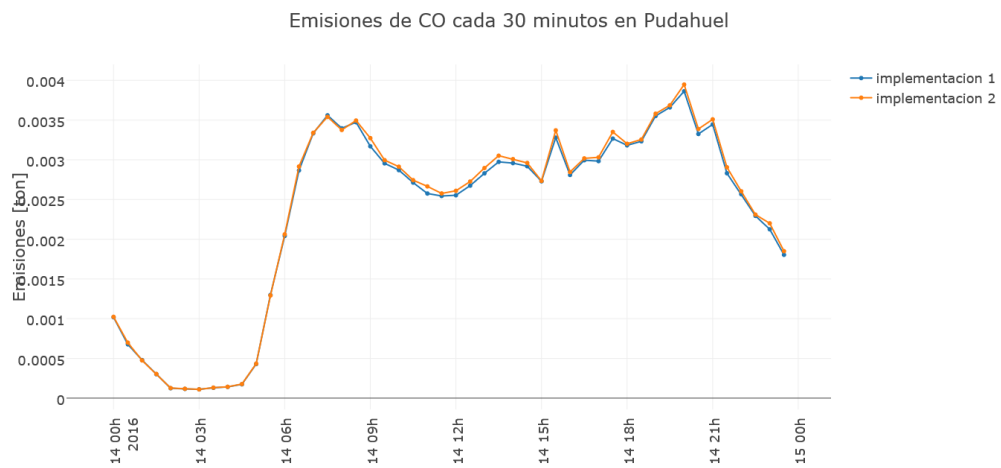


(a) Emisiones de CO en Las Condes.

Figura A.1: Emisiones totales de CO en Las Condes, Cerrillos y Pudahuel el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1.

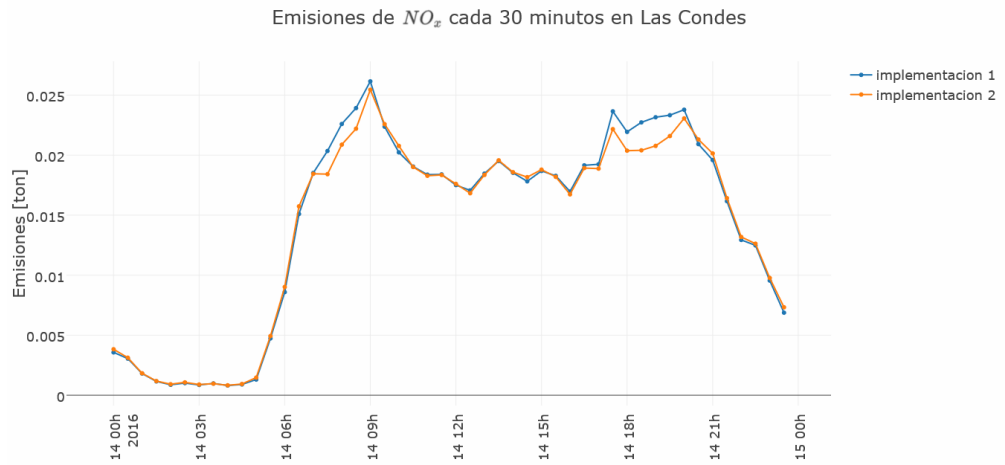


(b) Emisiones de CO en Cerrillos.

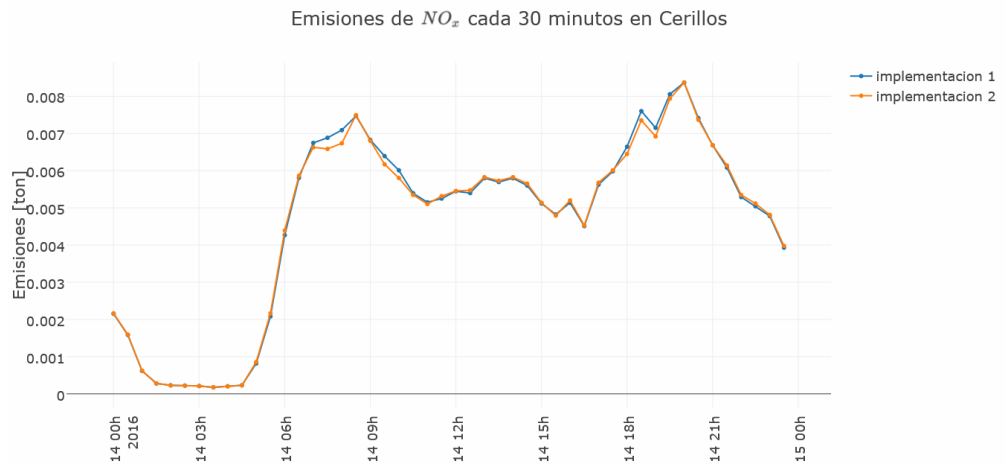


(c) Emisiones de CO en Pudahuel.

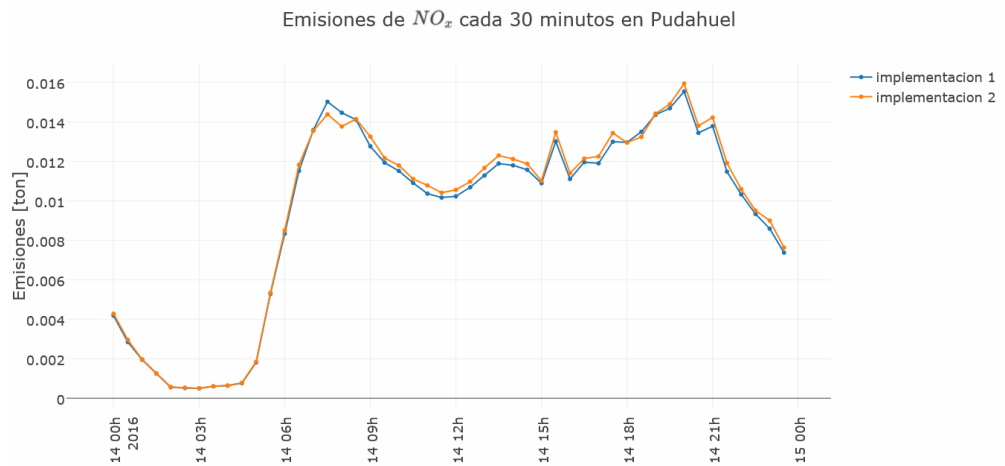
Figura A.1: Emisiones totales de CO en Las Condes, Cerrillos y Pudahuel el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación).



(a) Emisiones de  $NO_x$  en Las Condes.



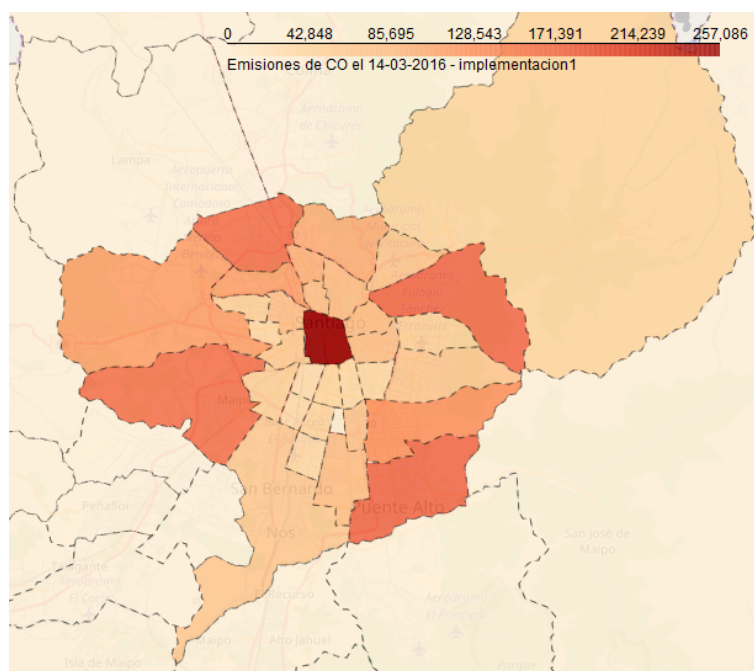
(b) Emisiones de  $NO_x$  en Cerrillos.



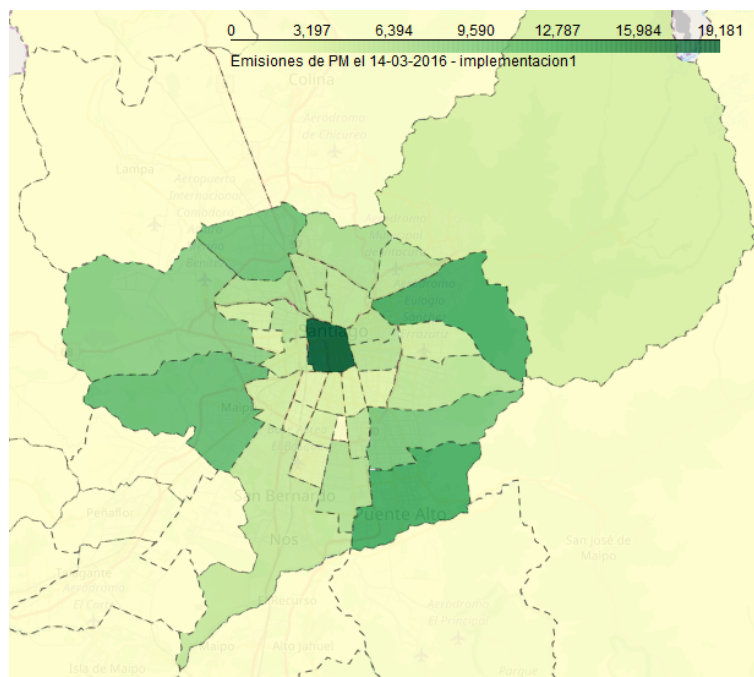
(c) Emisiones de  $NO_x$  en Pudahuel.

Figura A.2: Emisiones totales de  $NO_x$  en Las Condes, Cerrillos y Pudahuel el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1.

## A.2. Distribución espacial

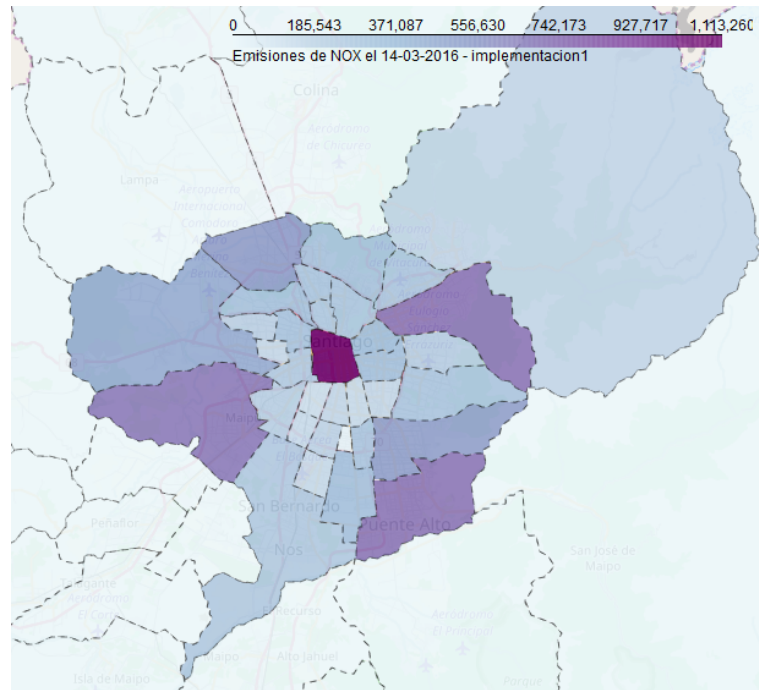


(a) CO

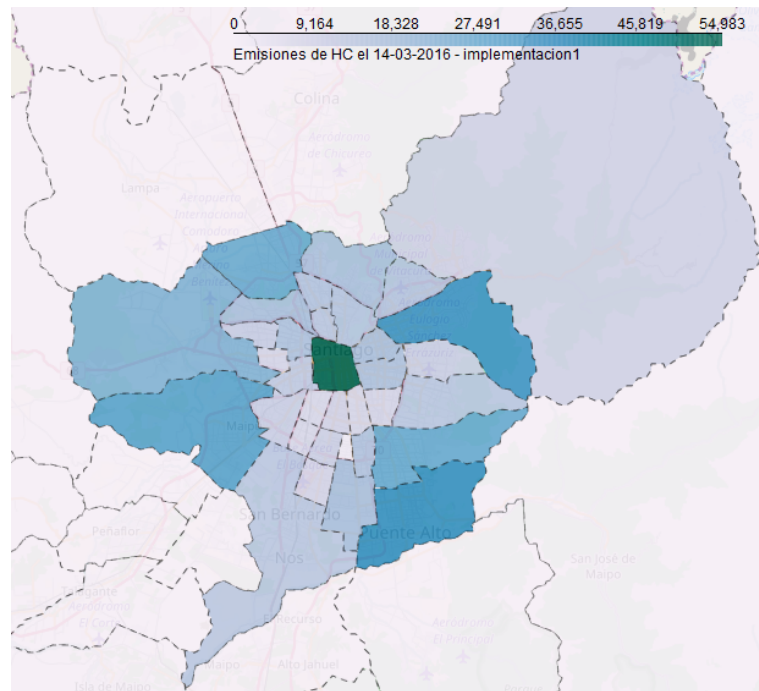


(b) MP

Figura A.3: Emisiones totales por comuna el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1.



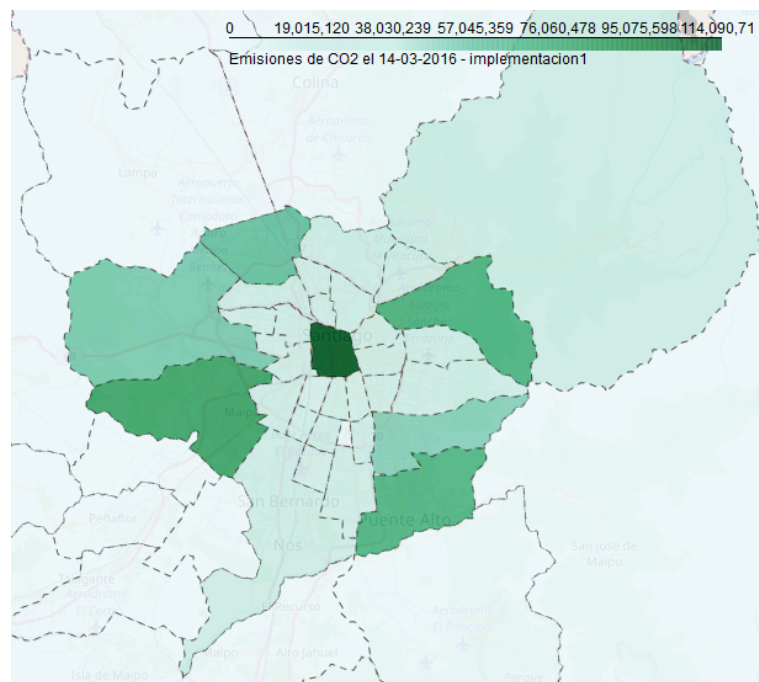
(c) NO<sub>x</sub>



(d) HC

Figura A.3: Emisiones totales por comuna el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación).





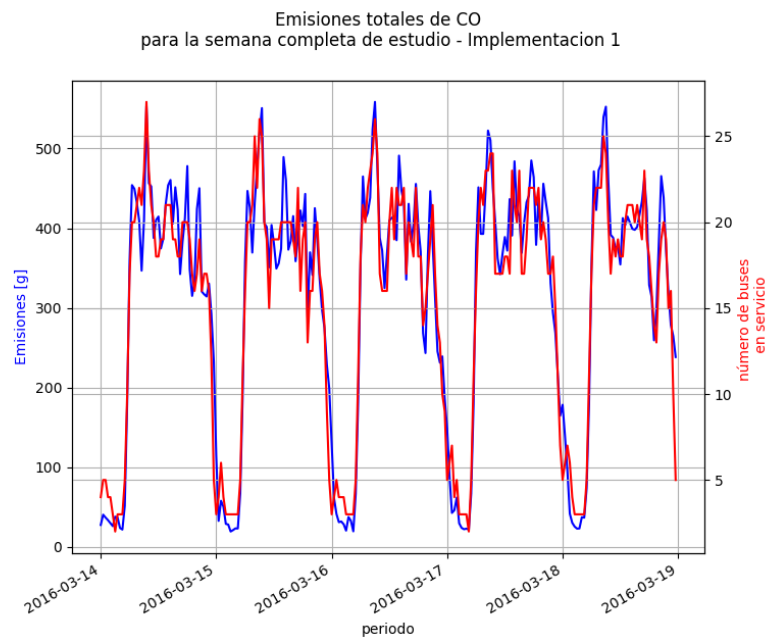
(e)  $CO_2$

Figura A.3: Emisiones totales por comuna el día 14-03-2016 calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación).

# Apéndice B

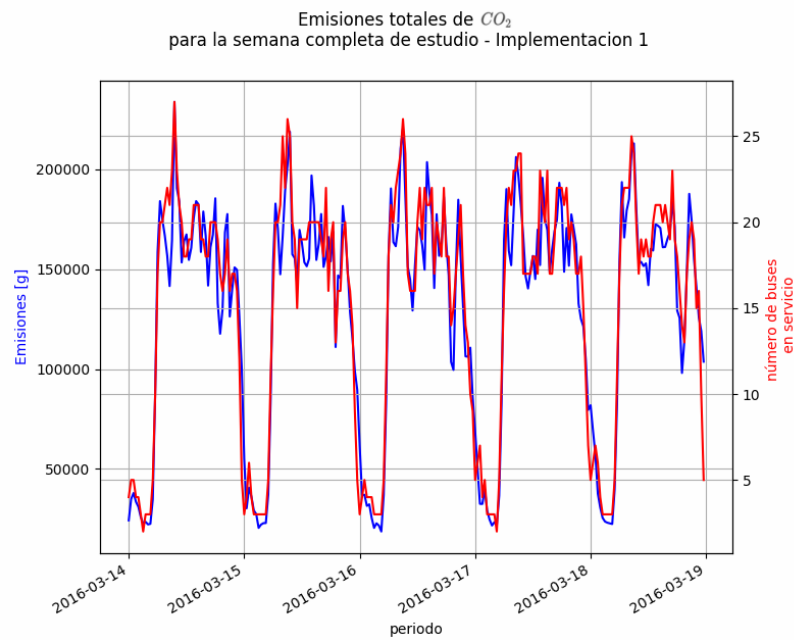
## Emisiones del servicio 506I

### B.1. Distribución temporal

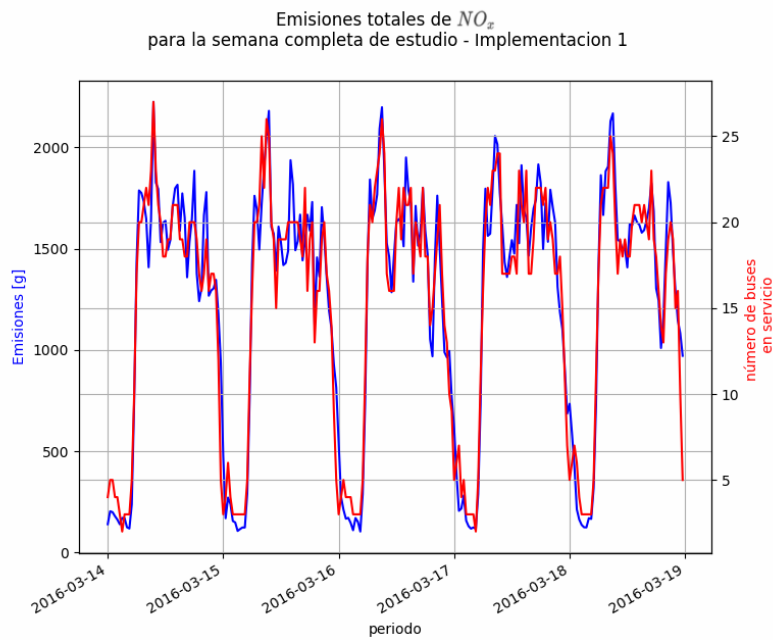


(a) CO

Figura B.1: Correlación entre emisiones totales cada 30 minutos y número de buses en servicio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1.



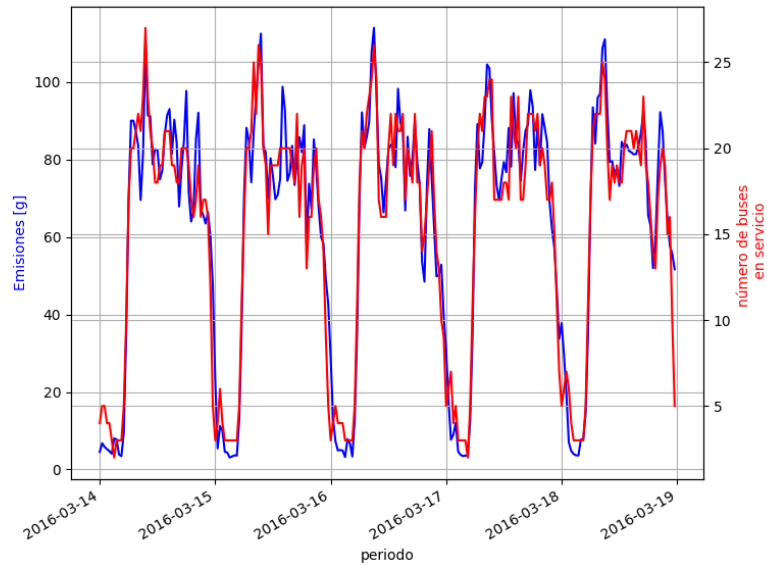
(b)  $CO_2$



(c)  $NO_x$

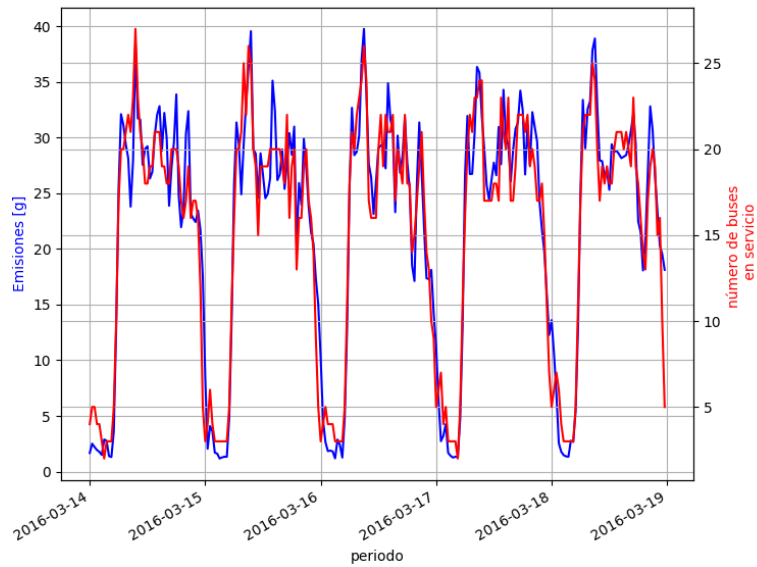
Figura B.1: Correlación entre emisiones totales cada 30 minutos y número de buses en servicio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación).

Emisiones totales de HC  
para la semana completa de estudio - Implementacion 1



(d) HC

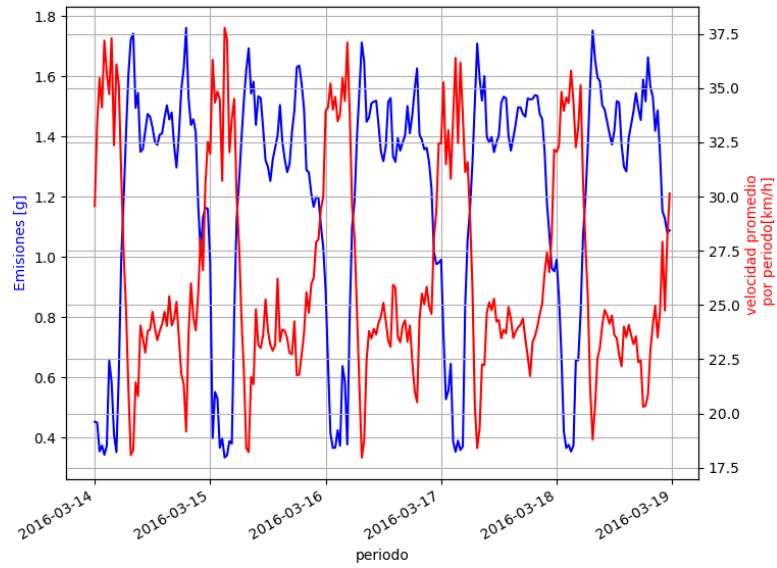
Emisiones totales de PM  
para la semana completa de estudio - Implementacion 1



(e) MP

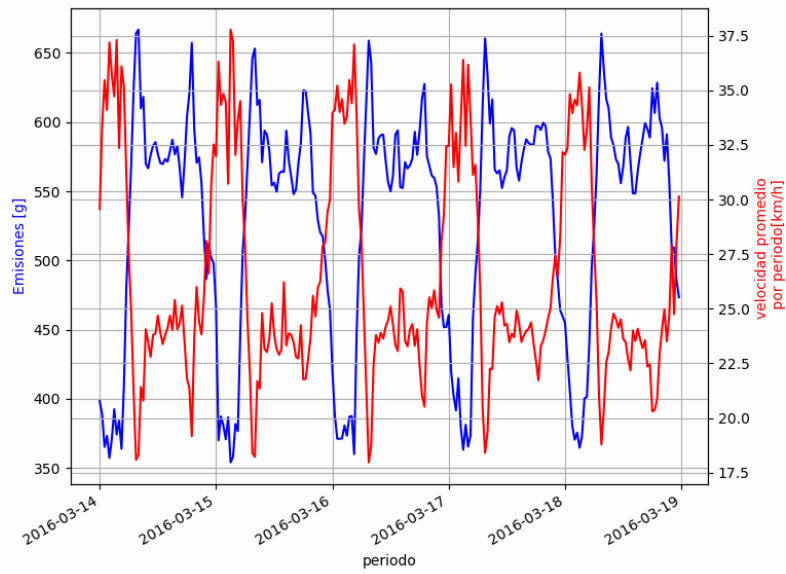
Figura B.1: Correlación entre emisiones totales cada 30 minutos y número de buses en servicio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación).

Emisiones promedio de CO  
para la semana completa de estudio - Implementacion 1



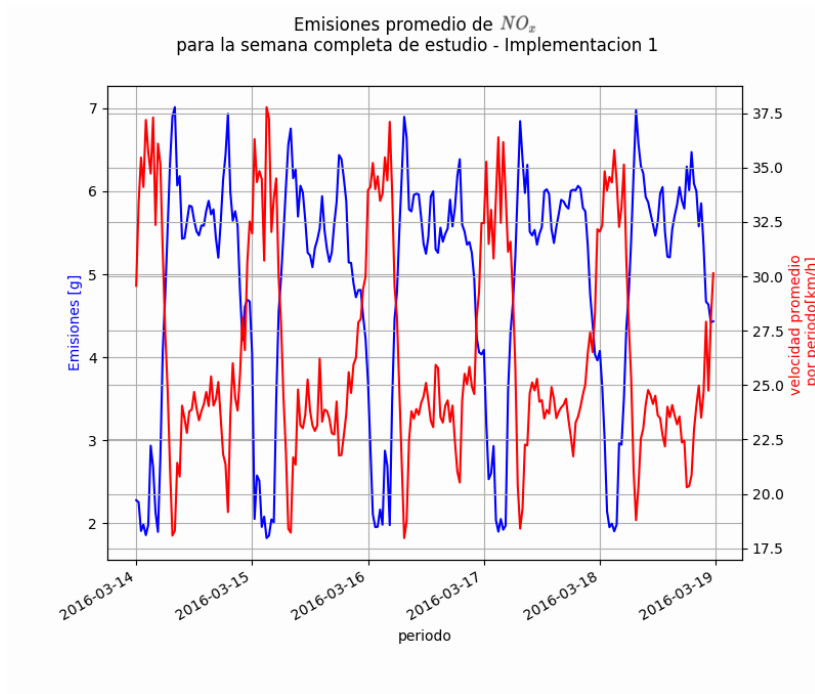
(a) CO

Emisiones promedio de  $CO_2$   
para la semana completa de estudio - Implementacion 1

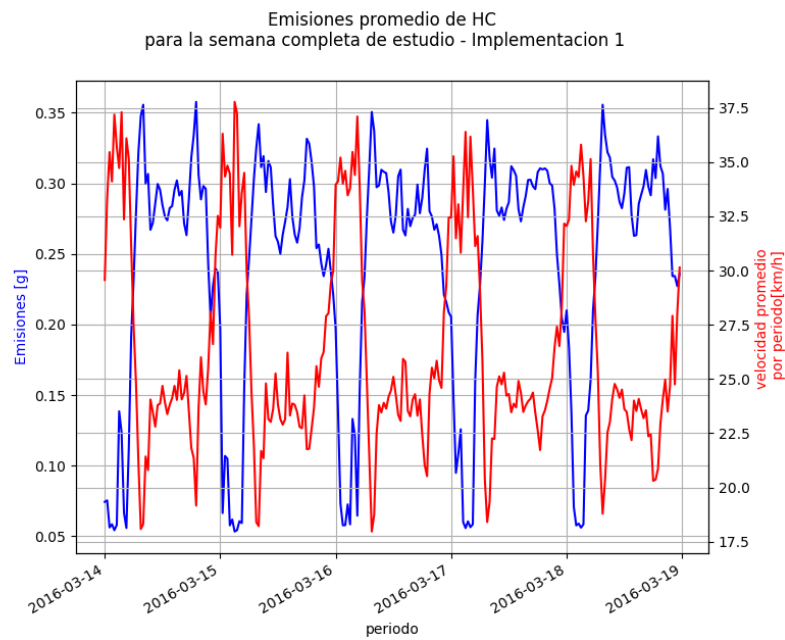


(b)  $CO_2$

Figura B.2: Correlación entre emisiones promedio cada 30 minutos y velocidad promedio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1.

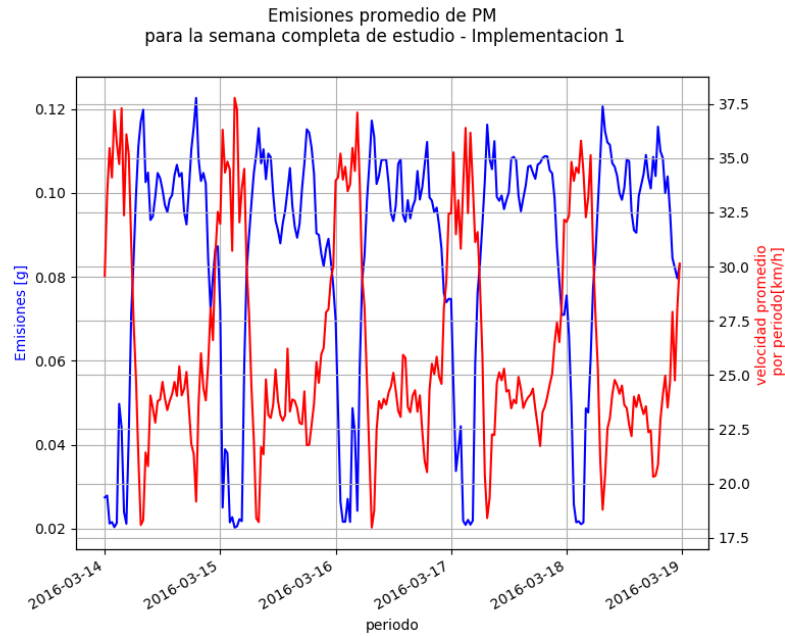


(c)  $NO_x$



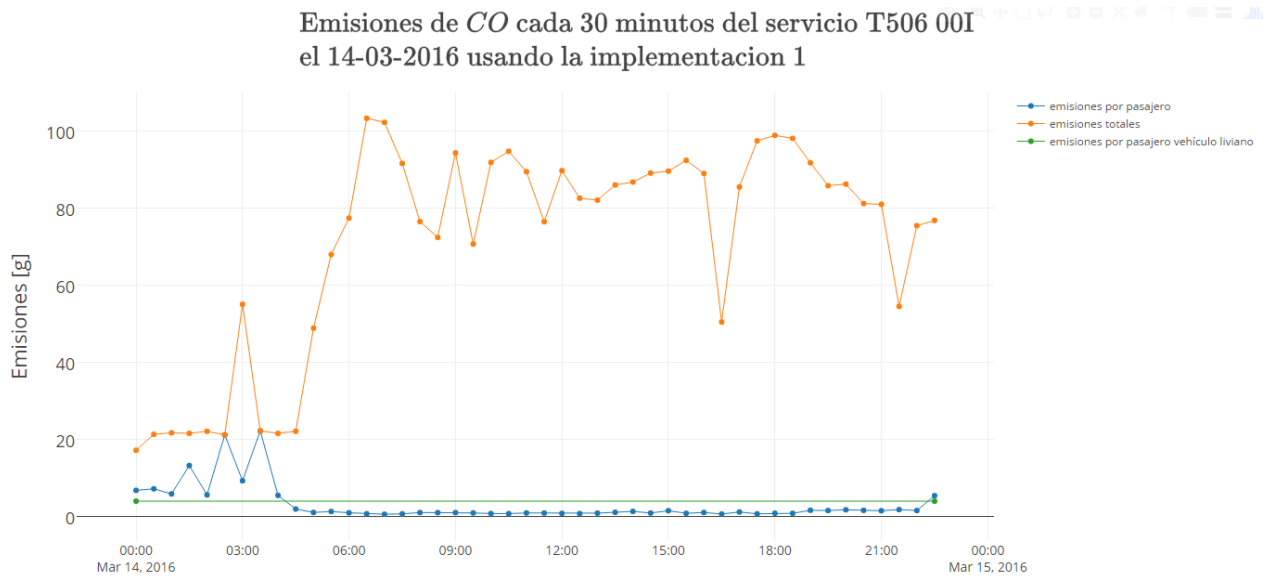
(d) HC

Figura B.2: Correlación entre emisiones promedio cada 30 minutos y velocidad promedio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación).



(e) MP

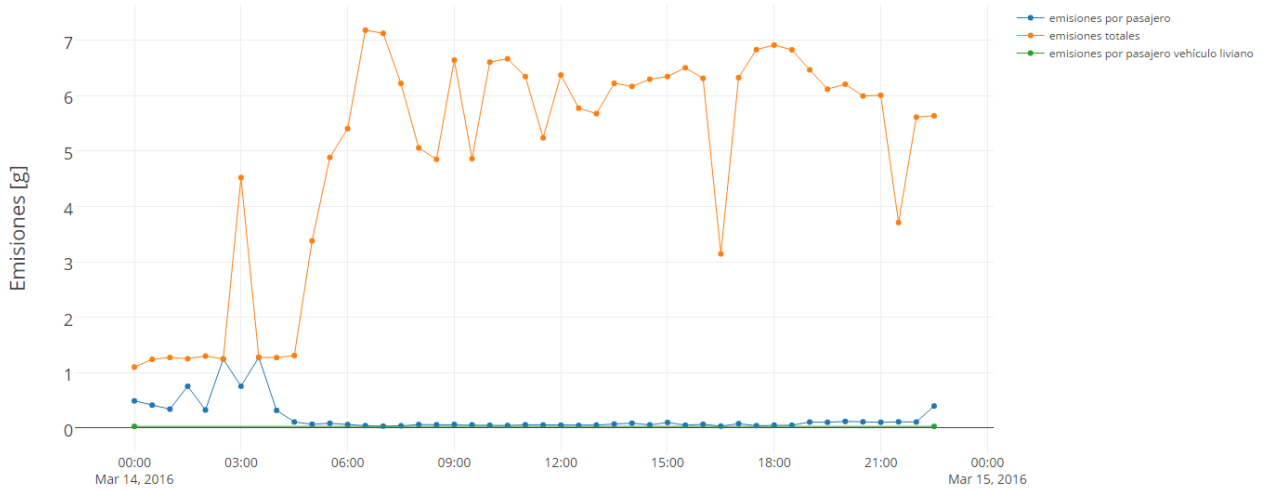
Figura B.2: Correlación entre emisiones promedio cada 30 minutos y velocidad promedio para el periodo completo de estudio. Las emisiones son calculadas mediante la implementación 1 (continuación).



(a) CO

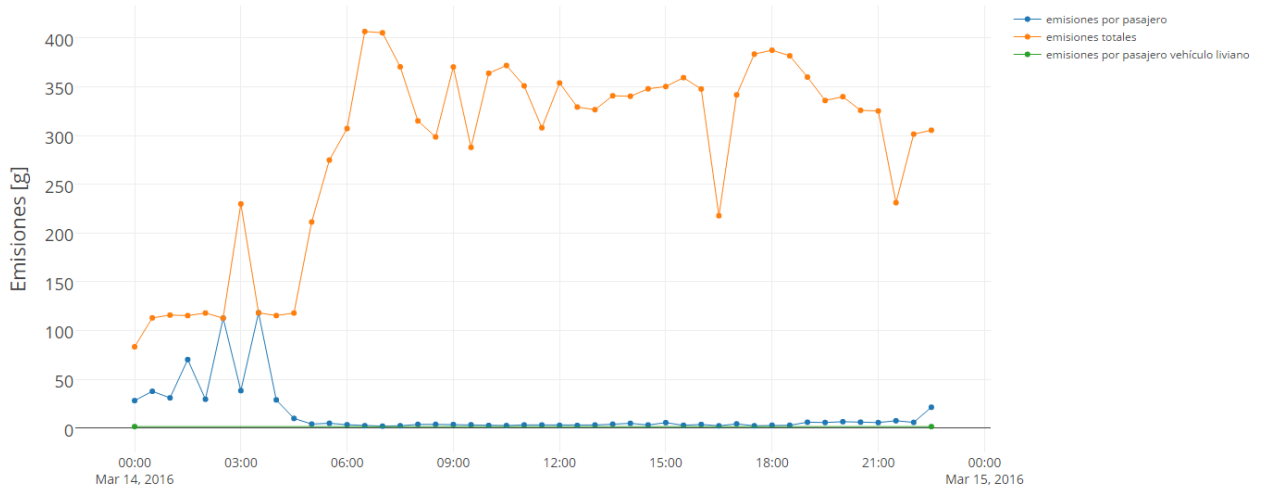
Figura B.3: Emisiones promedio y emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante las implementaciones 1.

Emisiones de  $PM$  cada 30 minutos del servicio T506 00I el 14-03-2016 usando la implementacion 1



(b) MP

Emisiones de  $NO_x$  cada 30 minutos del servicio T506 00I el 14-03-2016 usando la implementacion 1

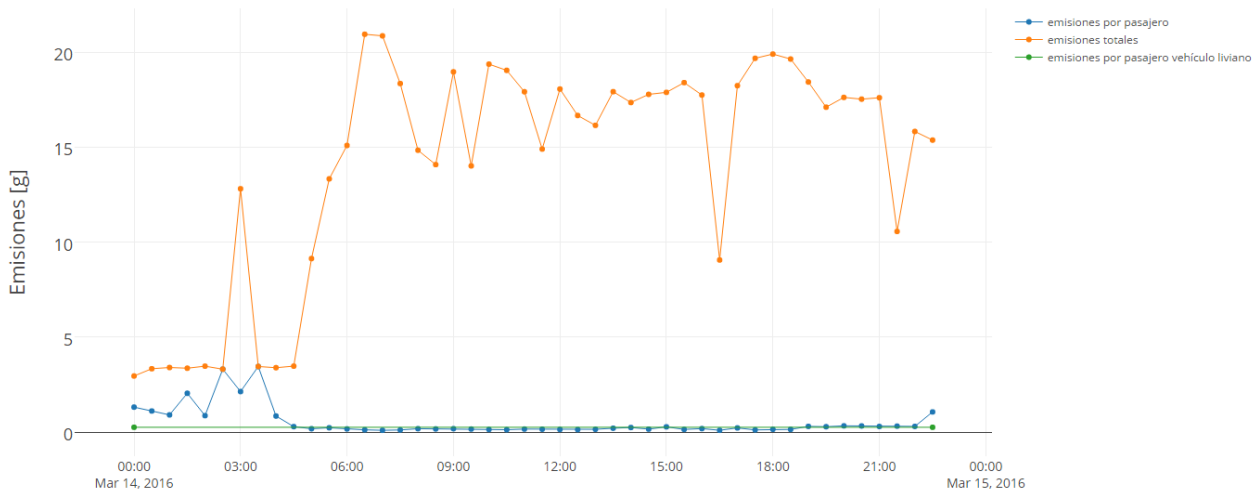


(c) NOx

Figura B.3: Emisiones promedio y emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación).

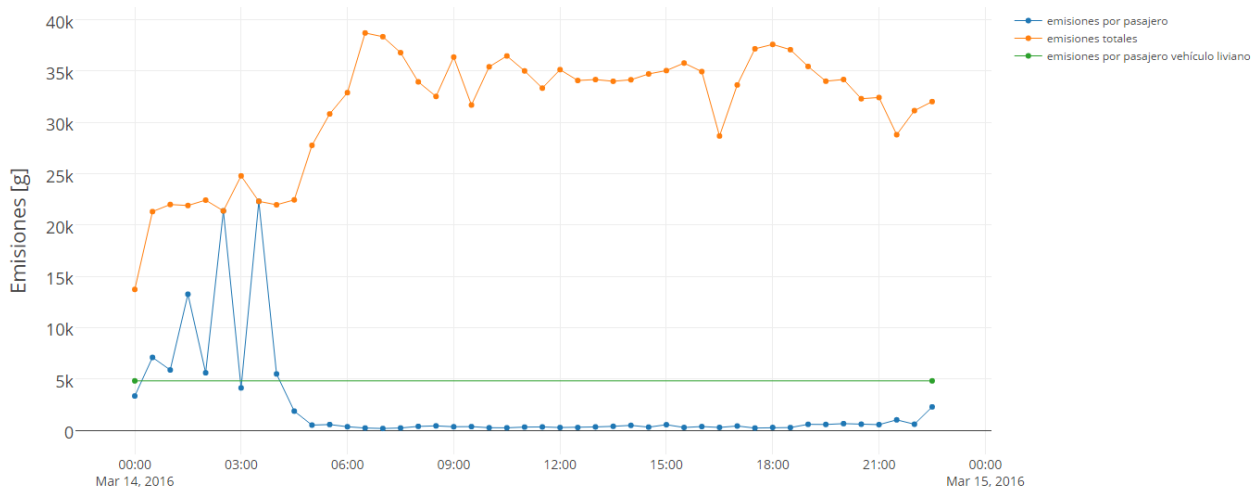


Emisiones de  $HC$  cada 30 minutos del servicio T506 00I el 14-03-2016 usando la implementacion 1



(d)  $HC$

Emisiones de  $CO_2$  cada 30 minutos del servicio T506 00I el 14-03-2016 usando la implementacion 1



(e)  $CO_2$

Figura B.3: Emisiones promedio y emisiones promedio por pasajero del servicio 506I como función del tiempo de inicio de la expedición. Las emisiones son calculadas mediante las implementaciones 1 (continuación).