

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

Alberto Arroyo

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile

Marcela Munizaga

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

Mauricio Osse

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María

RESUMEN

Este trabajo busca estimar la distribución espacio-temporal de emisiones contaminantes producidas por los buses del sistema de transporte público Transantiago. Las emisiones 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 (velocidad promedio, pendiente del camino y factor de carga del vehículo). Todo esto es posible mediante la utilización de datos pasivos de posición y transacciones de pagos provenientes de los sistemas de localización y sistemas de pago automático instalados en los vehículos.

El modelo permite detectar patrones temporales de generación de emisiones y emisiones por pasajero. Asimismo, entrega las emisiones por comuna en la Región Metropolitana de Chile, como también las emisiones en ruta de una expedición de bus.

Palabras clave: COPERT 4, Inventario de emisiones, Transantiago

ABSTRACT

This paper reports on a methodology to estimate hot road emissions from the public transport system in Santiago of Chile. Emissions are calculated from emission factors provided by the model COPERT 4, which say how many grams of a pollutant are generated per kilometer on a driving cycle (commercial speed, road slope and load factor). All of this is possible through the use of GPS and payment transactions data coming from the GPS systems and automatic payment systems installed on the buses.

The model allows finding temporary patterns of generated emissions and emissions per passenger. Likewise, it shows the emissions per zones of the city, as well as the emissions on routes during a bus trip.

Keywords: COPERT 4, Emissions Inventory, Transantiago.

1. INTRODUCCIÓN

Los inventarios de emisiones, desagregados temporal y espacialmente, son herramientas que permiten facilitar la toma de decisiones en cuanto a acciones de mitigación para frenar el cambio climático. Para poder desarrollar este tipo de herramientas es necesario analizar las distintas fuentes involucradas en la generación de emisiones. En particular, en Santiago de Chile, el transporte terrestre es responsable del 81% de las emisiones de monóxido de carbono (CO), 41% de las emisiones de material particulado (MP), y además del 79% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), según Gramsch et al., (2014).

Dentro de los medios de transporte terrestres en Santiago, el sistema de transporte público de esta ciudad, llamado Transantiago, ofrece la oportunidad de estudiar distintas variables de su operación, como velocidad, tiempos de viajes y cantidad de transacciones de pago, mediante el uso de datos pasivos proporcionados por sistemas de localización y de pago automático instalados dentro de cada uno de los buses que componen el sistema (Gschwender et al., (2016)). En particular, se ha detectado la posibilidad de estimar las emisiones generadas por cada uno de los vehículos que componen la flota de buses del Transantiago.

En este documento se presenta una metodología para estimar la distribución espacio-temporal de emisiones contaminantes producidas por el transporte público en Santiago de Chile, además de las emisiones por pasajero transportado. Dentro del estudio se estiman las emisiones de cuatro contaminantes: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y material particulado (MP); además de un gas de efecto invernadero (CO₂), durante una semana laboral (Lunes a Viernes) del mes de Marzo de 2016. Sumado a lo anterior, la metodología permite analizar los efectos que tienen las variables de velocidad promedio, pendiente de la ruta y los factores de carga (razón entre cantidad de pasajeros y capacidad de pasajeros del vehículo) sobre la estimación de las emisiones.

2. METODOLOGÍA

2.1. Enfoque General

La metodología desarrollada calcula emisiones calientes cada media hora en tramos de ruta de 500 metros para cada patente del Transantiago circulando en la semana analizada mediante la ecuación 1:

$$E_{h,i,r,k} = EF_{i,k,\lambda,s}(v) \cdot L_r \quad (1)$$

Donde $E_{h,i,r,k}$ son emisiones calientes de escape del contaminante i , en gramos, producidas por vehículos de tecnología k , en un tramo de ruta r , en el periodo h ; $EF_{i,k,\lambda,s}(v)$ son los factores de emisión, en g/km, para el contaminante i , producidas por vehículos de tecnología k , operando en una ruta con pendiente s , con un factor de carga λ , con una velocidad promedio v ; L_r es el largo, en km, del tramo de ruta r .

Los factores de emisión son calculados a partir de una base de datos para vehículos pesados de la metodología COPERT 4 (Ntziachristos & Samaras, (2013)). Esta base de datos entrega funciones dependientes de la velocidad para obtener los factores de emisión de un vehículo de tecnología k , cuya pendiente de ruta es s , y con un factor de carga λ . La tecnología k viene dada tanto por la norma de emisión bajo la que se rigen, en este caso los buses, y además por el tamaño de estos. Cabe señalar que la metodología COPERT 4 acepta siete pendientes (0%, ±2%, ±4%, ±6%) y tres factores de carga (0, 50 y 100), por lo que los datos a utilizar deben ser aproximados a los valores aceptados más cercanos.

Los datos de velocidad promedio utilizados en este estudio son calculados mediante la metodología presentada en Cortés et al., (2011), la cual permite estimar dicha velocidad mediante el uso de pulsos GPS. Esta define una grilla espacio-tiempo típica, en donde cada elemento de grilla está definido por un rectángulo de bordes D y T como se muestra en la Figura 1. Para el caso de este estudio la distancia D de la grilla son 500 metros y el tiempo T son 30 minutos. Los puntos grises de la Figura 1 representan los pulsos GPS proyectados a las rutas de los buses, los cuales son obtenidos cada 30 segundos. Dentro de un elemento de grilla g , la velocidad promedio (s_g) se calcula como la división entre la suma de la distancia total viajada por cada bus y la suma del tiempo total de los buses dentro del elemento de grilla, como se muestra en la ecuación 2. Este tipo de agregación es necesaria, ya que al recibir los pulsos GPS cada 30 segundos, no es posible conocer el comportamiento de la velocidad de cada vehículo en la ruta durante ese intervalo de tiempo.

$$s_g = \frac{\sum_i D_i^g}{\sum_i T_i^g} \quad (2)$$

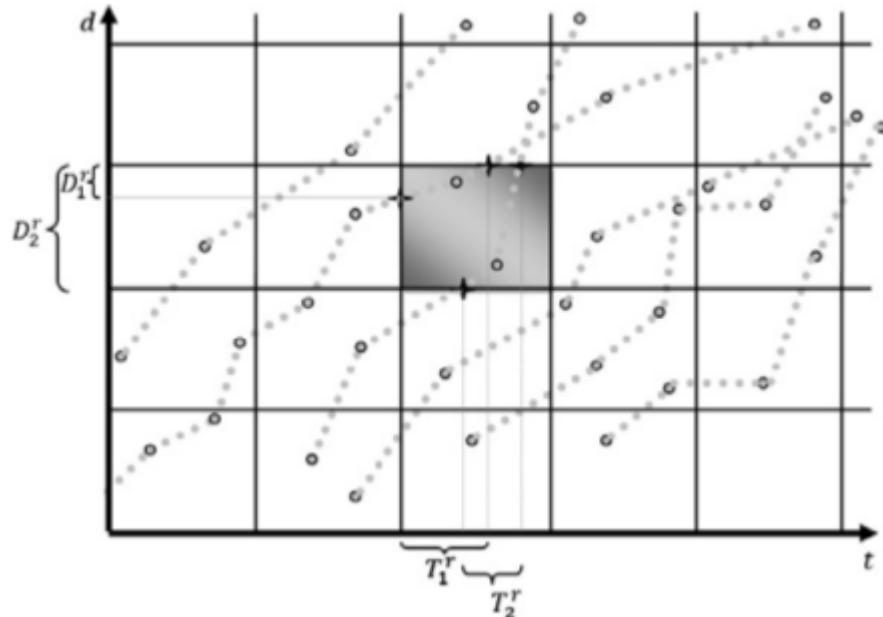


Figura 1 Diagrama espacio-tiempo para calcular velocidad promedio de un sistema de buses.
Fuente: Cortés et al., 2011

Por otro lado, los datos de la carga de pasajeros en los buses y los factores de carga de estos, se calculan usando la metodología presentada en Munizaga & Palma, (2012), en donde se estiman matrices origen-destino del transporte público en Santiago de Chile a partir de información proveniente de transacciones (de subida) de su sistema de cobro automático, y además de la posición de los vehículos generada por su sistema de localización automático.

Con el fin de estudiar el efecto de la velocidad promedio de los buses, la pendiente de las rutas y los factores de carga de los vehículos se realizan cuatro implementaciones, cuyos supuestos son:

- Implementación 1: Los buses circulan por calles planas (pendiente cero) y además que estos van sin pasajeros.
- Implementación 2: Los buses no llevan pasajeros.
- Implementación 3: Los buses circulan por calles planas (pendiente cero).
- Implementación 4: Se consideran las pendientes de las calles y la carga de pasajeros de los buses.

Cabe señalar que cada una de estas implementaciones tiene un número distinto de nodos de cálculo. La implementación 1 es la que cuenta con menos nodos de cálculo, siendo estos los puntos de inicio de cada uno de los tramos de 500 metros antes mencionados. Luego, para la implementación 2 se consideran segmentos de los tramos de 500 metros, ya que dentro de estos tramos existen calles con distintas pendientes. El punto de inicio de cada tramo y cada segmento representan en este caso un nodo de cálculo. Para el caso de la implementación 3, los nodos de cálculo vienen dados por los puntos de inicio de los tramos de 500 metros, y además por los paraderos proyectados en la ruta dentro de cada tramo. Finalmente, los nodos para la implementación 4 son los puntos de inicio de los tramos y segmentos de tramo, además de la posición proyectada de los paraderos en la ruta. Por lo tanto, se pueden distinguir tres tipos distintos de nodos, como se muestra en la Figura 2: los puntos de inicio de un tramo (círculos negros), los cuales indican un cambio de velocidad promedio; los puntos de inicio de un segmento de tramo (círculos verdes), los cuales muestran un cambio en la pendiente en la ruta; y los paraderos proyectados (círculos rojos), los que marcan un cambio en la carga de los buses, ya que es aquí donde los pasajeros suben y bajan del vehículo. La incorporación de los nodos rojos en las implementaciones causa un aumento significativo del tiempo de cálculo de modelo, por lo que para las implementaciones 3 y 4 solo se calculan las emisiones generadas por el servicio 506I. La elección del servicio 506I se debe a que la ruta por la cual circulan sus buses permite observar distintas condiciones de conducción de estos vehículos. Esta ruta posee múltiples variaciones de pendiente, puntos de alta congestión vehicular y la presencia de vías exclusivas de buses. Por otro lado, para las implementaciones 1 y 2 se estiman las emisiones producidas por la flota completa de buses.

Un último punto importante es que la metodología COPERT 4 no considera la presencia de filtros de partículas diésel. Sin embargo, en este trabajo se asume que la eficiencia de los filtros de partículas es tal que reduce en un 90% las emisiones de material particulado, lo cual es coherente con Acevedo (2007) y Ministerio de Medio Ambiente (2011). Es necesario dejar claro que los operadores de Transantiago tienen por deber el hacerse cargo de la limpieza de los filtros de partículas de los buses, con el fin de reducir las emisiones de material particulado.

2.2. Categoría de los vehículos

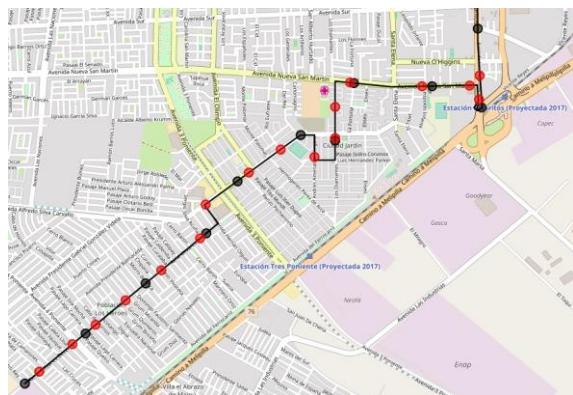
Los buses analizados en el presente estudio son categorizados de acuerdo a su norma de emisión, su tamaño y a la presencia de filtro de partículas diésel. Dentro del sistema de transporte público de Santiago hay ocho de categorías de buses, los cuales se muestran en la Tabla 1. Acá es posible ver que dentro de las categorías existen dos normas de emisión: Euro III y Euro V; tres tamaños



(a) Ejemplo de nodos usados en la implementación 1



(b) Ejemplo de nodos usados en la implementación 2



(c) Ejemplo de nodos usados en la implementación 3



(d) Ejemplo de nodos usados en la implementación 4

Figura 2 Visualización de los tres tipos de nodos usados en cada una de las implementaciones del estudio. Los nodos de inicio de los tramos, los de inicio de los segmentos y los nodos de los paraderos son representados por los puntos negros, verdes y rojos, respectivamente.

de buses: clase A, clase B y clase C; y además se puede o no contar con un filtro de partículas. Las clases A, B y C, corresponden a buses midi, estándar y articulados, respectivamente.

Tabla 1 Clasificación de buses del Transantiago según norma de emisiones, tamaño del bus y existencia de filtro.

Norma de emisión	Tamaño	Filtro
Euro III	Clase A	No
Euro III	Clase B	No
Euro III	Clase C	No
Euro III	Clase A	Sí

Euro III	Clase B	Sí
Euro III	Clase C	Sí
Euro V	Clase A	No
Euro V	Clase B	No

2.3. Factores de emisión

La metodología COPERT 4 entrega en su base de datos coeficientes y funciones que permite calcular factores de emisión bajo ciertas condiciones de conducción (velocidad, pendiente, factor de carga). Las ecuaciones 3-12 corresponden a las funciones proporcionadas por la base de datos COPERT 4 que se utilizan en el presente trabajo. La selección de la función para calcular los factores de emisión viene dada por la tecnología del vehículo, la pendiente del camino y por el factor de carga.

$$f(v) = a \cdot b^v \cdot v^c \quad (3)$$

$$f(v) = a \cdot v^b + c \cdot v^d \quad (4)$$

$$f(v) = (a + b \cdot v)^{-c} \quad (5)$$

$$f(v) = e + a \cdot \exp(-b \cdot v) + c \cdot \exp(-d \cdot v) \quad (6)$$

$$f(v) = \frac{1}{c \cdot v^2 + b \cdot v + a} \quad (7)$$

$$f(v) = a - \exp(-c \cdot v^d) \quad (8)$$

$$f(v) = a + \frac{b}{1 + \exp(-c + d \cdot \ln(v) + e \cdot v)} \quad (9)$$

$$f(v) = \exp((a + b/v) + c \cdot \ln(v)) \quad (10)$$

$$f(v) = a \cdot v^3 + b \cdot v^2 + c \cdot v + d \quad (11)$$

$$f(v) = \frac{a + b \cdot v + c \cdot v^2 + d/v}{e + f \cdot v + g \cdot v^2} \quad (12)$$

Donde v corresponde a la velocidad promedio; $f(v)$ a los factores de emisión; a, b, c, d, e, f y g son constantes que varían según la ecuación y la condición de conducción escogida. Por ejemplo, se puede dar el caso que la metodología COPERT 4 diga que para calcular las emisiones de un bus de norma Euro V se utilice la ecuación 12, pero si este bus está circulando por rutas con distinta pendiente, o bien, con un factor de carga distinto, entonces las constantes utilizadas serán distintas. Es importante recalcar que estas constantes, entregadas por el COPERT 4, son obtenidas mediante estudios experimentales y no consideran la mantención de los vehículos, es decir, la presente metodología asume que durante todo momento los vehículos bajo análisis están como nuevos.

Cabe destacar además que las ecuaciones 3-11 se utilizan para obtener los factores de emisión para vehículos con norma de emisión Euro III y mientras que la ecuación 12 se utiliza para calcular los factores de emisión de los buses con norma Euro V.

2.4. Condiciones de conducción

Para este estudio, la condición de conducción se define por la velocidad y carga del vehículo, además la pendiente de la ruta por donde este circula. Conociendo estos tres parámetros es posible estimar las emisiones calientes de transporte terrestre usando la base de datos COPERT 4, antes presentada. En esta sección se presentan los datos utilizados para llevar a cabo este estudio, los cuales permiten caracterizar las condiciones de conducción de los buses.

En la Figura 3 se muestra la distribución de velocidades promedio de la flota completa de los buses que componen el sistema entre el 14 de Marzo y 18 de Marzo de 2016, en la cual se logra apreciar que el 40% del tiempo los vehículos circulan con una velocidad entre 15 y 25 km/h. Por otro lado, en la Figura 4 se presenta un ejemplo de la variación temporal de la velocidad promedio de un bus viajando entre las 10 AM y 12 PM, y en la Figura 5 se presenta como varía el número de pasajeros a lo largo de la ruta para una expedición del mismo servicio. Sumado a lo anterior, se cuenta con las pendientes de todas las rutas perteneciente a la red de transporte público de Santiago; en la Figura 6 se muestra la distribución de pendientes de la ruta del servicio 506I.

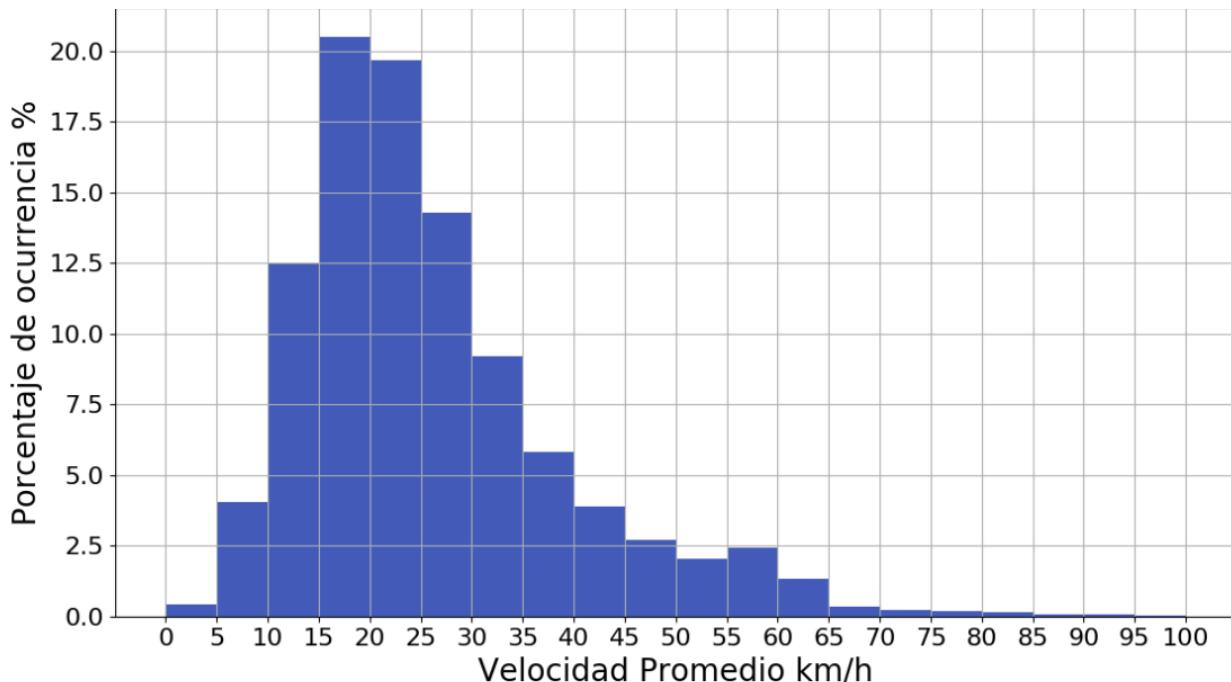


Figura 3 Distribución de velocidades de los buses del Transantiago entre los días 14 de Marzo de 2016 y 18 de Marzo de 2016.

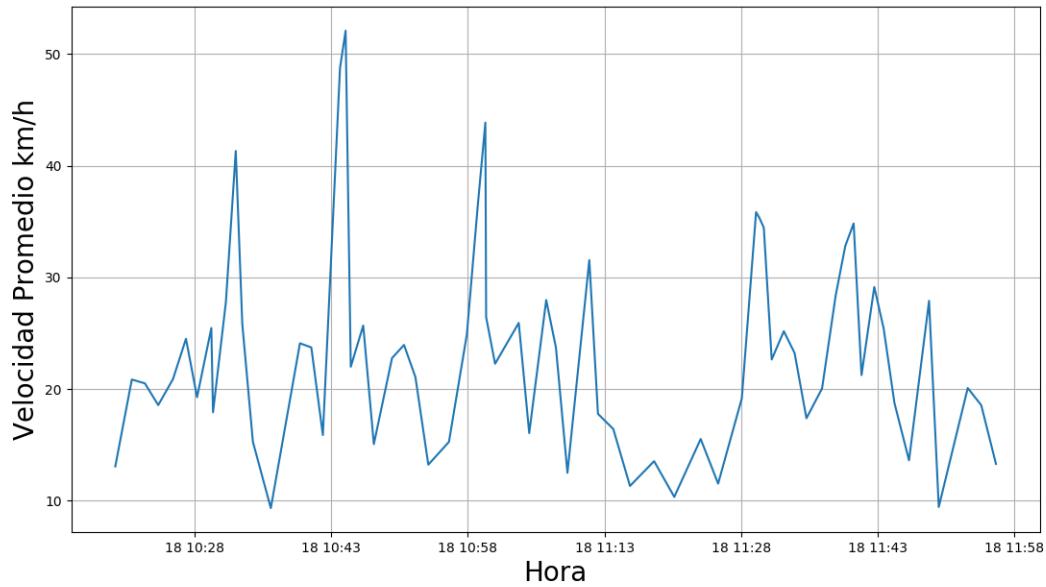


Figura 4 Ejemplo de la variación de la velocidad en el tiempo de una patente circulando el día viernes 18 de Marzo entre las 10 AM y las 12 PM.

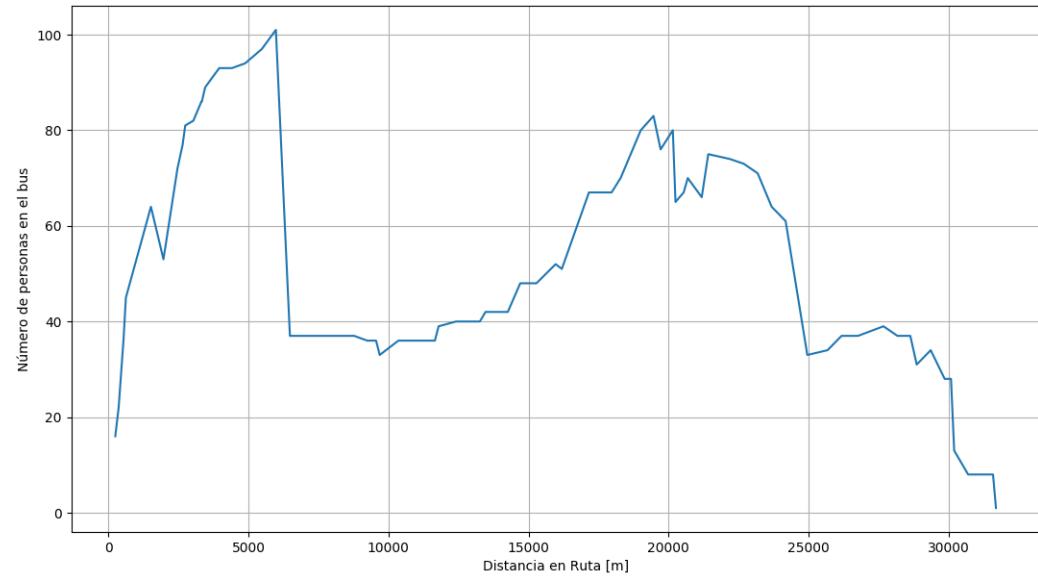


Figura 5 Ejemplo de la variación del número de pasajeros en un viaje correspondiente al servicio llamado 506I

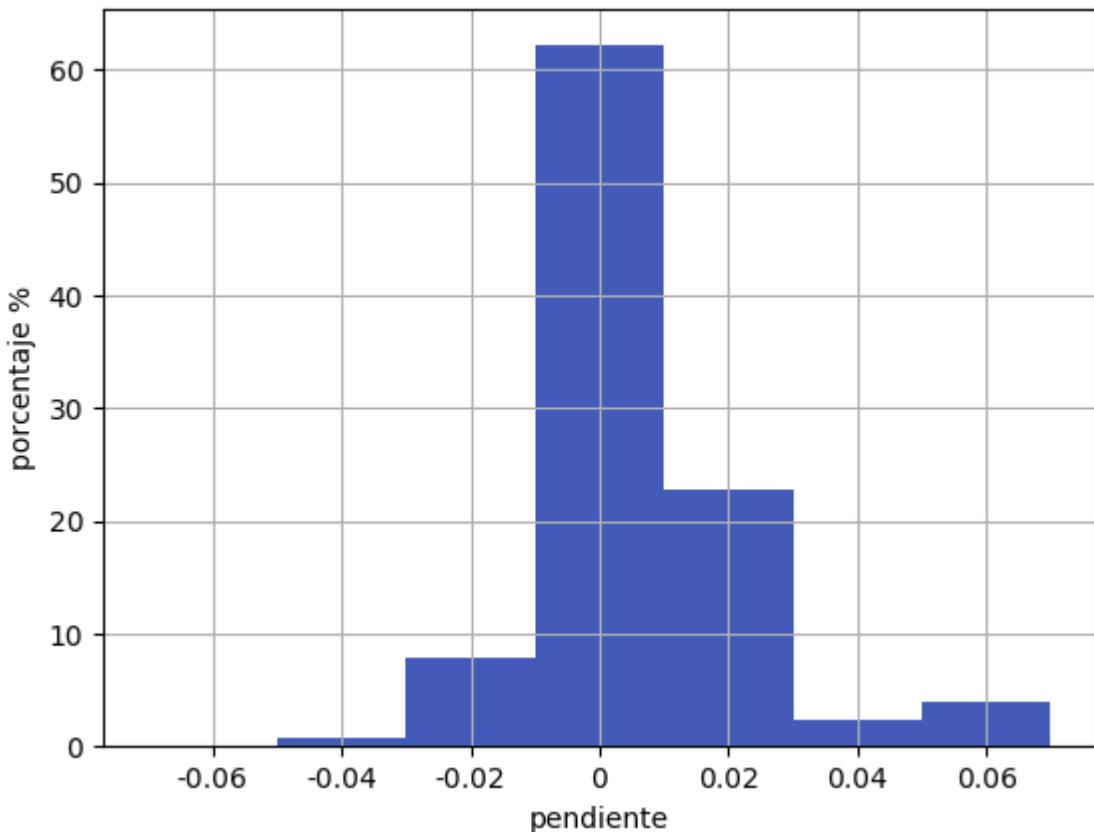
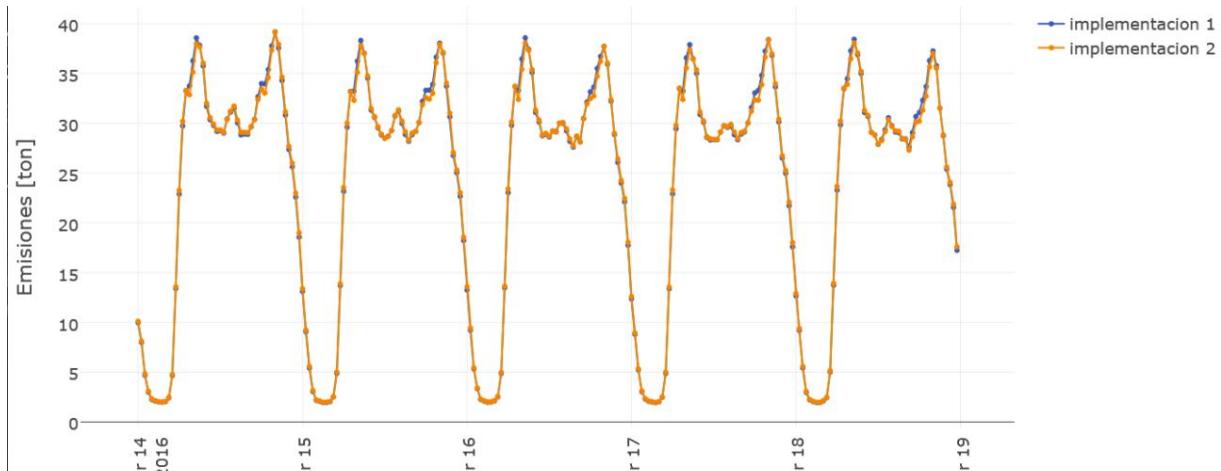


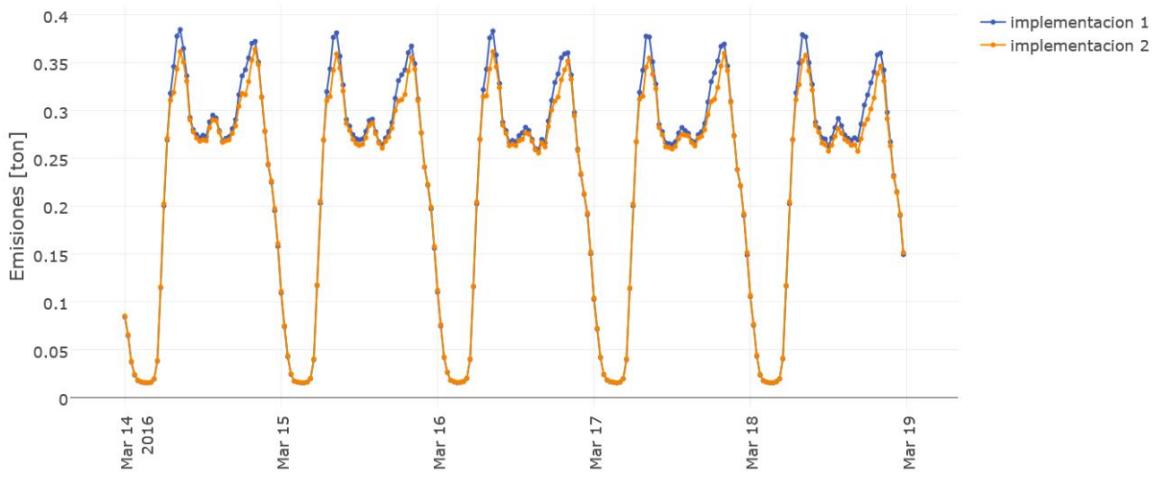
Figura 6 Distribución de pendientes de la ruta perteneciente al servicio llamado 506I

3. RESULTADOS

El modelo de emisiones calientes desarrollado es capaz de calcular cada 30 minutos las emisiones de CO, NO_x, HC, MP y CO₂ en tramos de ruta de 500 metros para cada patente de bus perteneciente al sistema de transporte público de Santiago. Como ejemplo de esto, en la Figura 7, se muestran las emisiones cada 30 minutos de CO₂ y NO_x calculadas a partir de las implementaciones 1 y 2 (curvas azul y naranja, respectivamente) de la flota completa de buses de Transantiago. Lo primero que destaca en esta gráfica es el patrón temporal diario, para cada uno de los contaminantes y para cada implementación, el cual muestra que existen tres máximos locales durante un día, uno en la mañana a las 8:30 AM, otro después del mediodía entre las 1:30 PM y 2:00 PM, y el último a las 8:00 PM. Este comportamiento se repite también para las emisiones de CO, HC y MP. Por otro lado, es posible apreciar que los resultados de las emisiones estimadas a partir de la implementación 2 son menores que los estimados por la implementación 1, aunque muy levemente. Esta diferencia se debe a que los buses circulan por rutas con pendiente negativa, más tiempo que por pendientes positivas, generando así menos emisiones, ya que a menor pendiente del camino, menores son los factores de emisión.



(a) Emisiones de CO₂



(b) Emisiones de NO_x

Figura 7 Emisiones totales de CO₂ y NO_x cada 30 minutos de la flota completa de buses del Transantiago.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los valores diarios estimados para cada contaminante a partir de la implementación 1. Lo interesante de este resumen es que como se mencionó anteriormente existe un patrón diario de generación de emisiones que indica que el total de emisiones diario es prácticamente invariante durante la semana. Además, dentro de los cuatro contaminantes en análisis, son las emisiones de NO_x las que más se generan, ascendiendo a un total de 55 toneladas a la semana aproximadamente. Esto se debe a que las emisiones de óxidos de nitrógeno son altas en motores diésel, como se sugiere en Reşitoğlu et al., (2015).

Tabla 2 Emisiones diarias, en toneladas, calculadas mediante la implementación 1

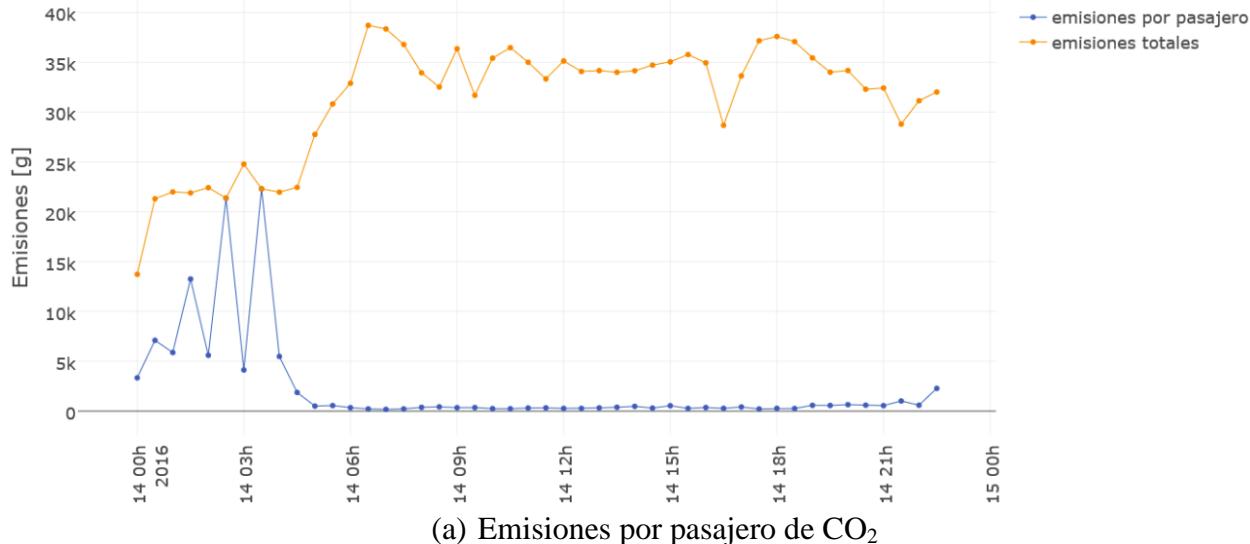
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
CO	2,72	2,69	2,67	2,67	2,65
NO _x	11,12	11,05	10,92	10,97	10,93
HC	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56
MP	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
CO ₂	1.183,35	1.172,53	1.163,64	1.163,29	1.152,91

Otro resultado del modelo son las emisiones por pasajero transportado calculadas para los cuatro contaminantes y para el gas de efecto invernadero. En la Figura 8 se muestran las emisiones y emisiones por pasajero (curvas azul y naranja) promedio de CO₂ y NO_x cada 30 minutos del servicio 506I de Transantiago durante el día lunes 14 de Marzo de 2016, calculadas a partir de la implementación 1. Es interesante notar que durante la madrugada las emisiones promedio son más bajas que las que se generan luego de las 6 AM, por el contrario de lo que pasa con las emisiones por pasajero transportado, donde en la madrugada los valores son altos y fluctuantes, y posterior a las 6 AM, son bajos y constantes. Al comparar estas dos curvas se deduce que las altas emisiones por pasajero durante la madrugada se deben a la baja demanda del servicio (baja cantidad de pasajeros), y que las emisiones por pasajero durante el día son constantes, aunque las emisiones varíen, debido a que la demanda se va ajustando. Este comportamiento se repite para todos los contaminantes y durante toda la semana.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de emisiones de NO_x en la ruta de operación del servicio 506I generadas por el bus de patente FLXD-45 cuya expedición comienza a las 5:00 PM. Mediante este tipo de visualizaciones es posible identificar los puntos de las rutas donde más se generan emisiones. En particular en este caso, se identifican dos focos, representados por las zonas rojas en el mapa, los cuales corresponden a puntos donde las velocidades de los buses son bajas, lo cual genera que los factores de emisión sean más altos.

Al realizar un análisis temporal por comuna, los resultados obtenidos concuerdan en su mayoría con los presentados en Gallardo et al., (2012), en el cual se estudian las emisiones de CO y NO_x en las comunas de Las Condes, Cerrillos y Pudahuel. Los resultados que coinciden en ambos estudios son:

- En Las Condes existe un máximo local de las emisiones a las 9:00 AM para ambos contaminantes.
- Según Gallardo et al., (2012), en Cerrillos y Pudahuel existe un máximo pronunciado de emisiones alrededor de las 8:00 AM. Según los resultados obtenidos por la implementación 1 y 2, el máximo de emisiones durante la mañana se da a las 8:30 AM y a las 7:30 AM en las comunas de Cerrillos y Pudahuel, respectivamente.



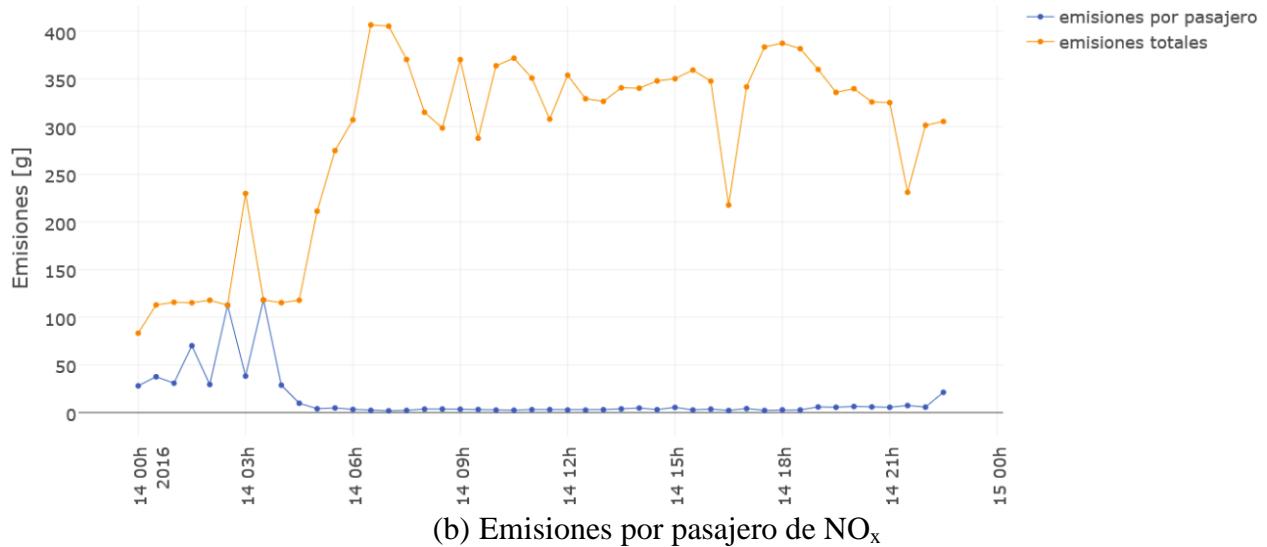


Figura 8 Emisiones y emisiones por pasajero promedio de CO₂ y NO_x cada 30 minutos de del servicio 506I del Transantiago durante el día lunes 14 de Marzo de 2016.

- De acuerdo con Gallardo et al., (2012) existen máximos locales de emisiones a las 7:00 PM en Cerrillos y Pudahuel. Mientras que los resultados de este modelo muestra el máximo a las 8:00 PM.
- En ambos estudios se logra apreciar un máximo local amplio de emisiones después del mediodía en Cerrillos.

Asimismo, el modelo permite calcular las emisiones generadas por los buses en cada comuna de la Región Metropolitana de Chile. En la Figura 10 se despliegan las emisiones de CO₂ liberadas en cada comuna, calculadas mediante la implementación 1 el lunes 14 de marzo de 2016. Santiago, es la comuna con más nivel de actividad en la zona y por ende es donde más emisiones se liberan a la atmósfera, llegándose a producir entre el 9% y 10% del total de emisiones contaminantes producidas por los buses de Transantiago. Otras comunas con gran contribución a la liberación de emisiones a la atmósfera son Maipú, Quilicura, Puente Alto y Las Condes, cada uno aportando entre 4,7% y 6,8% del total de las emisiones de la región.

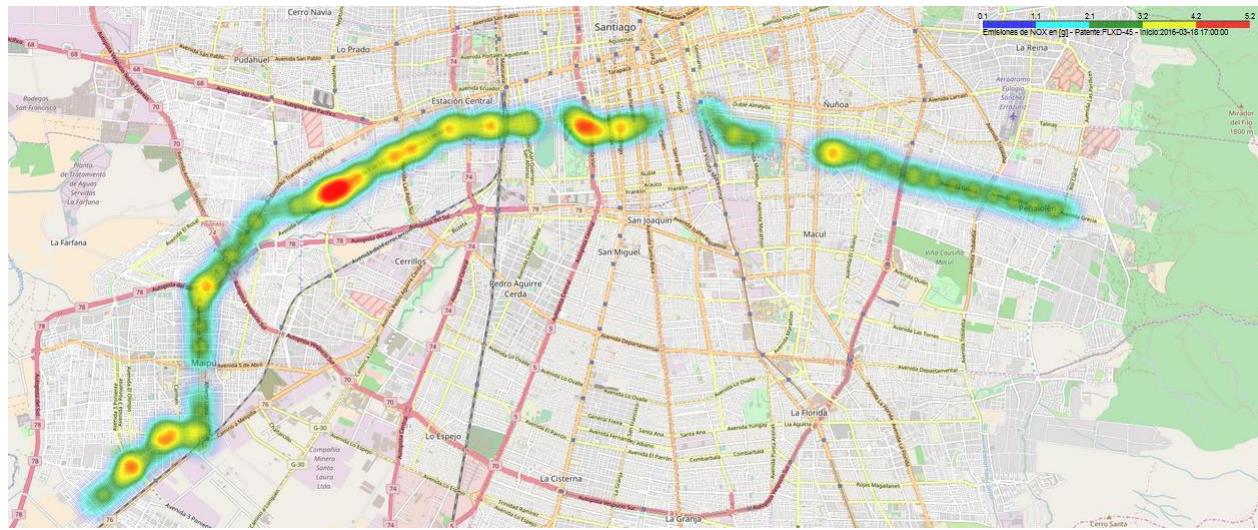


Figura 9 Emisiones en ruta de NO_x generadas por la patente FLXD-45 operando en el servicio 506I, cuyo viaje comienza a las 5:00 PM.

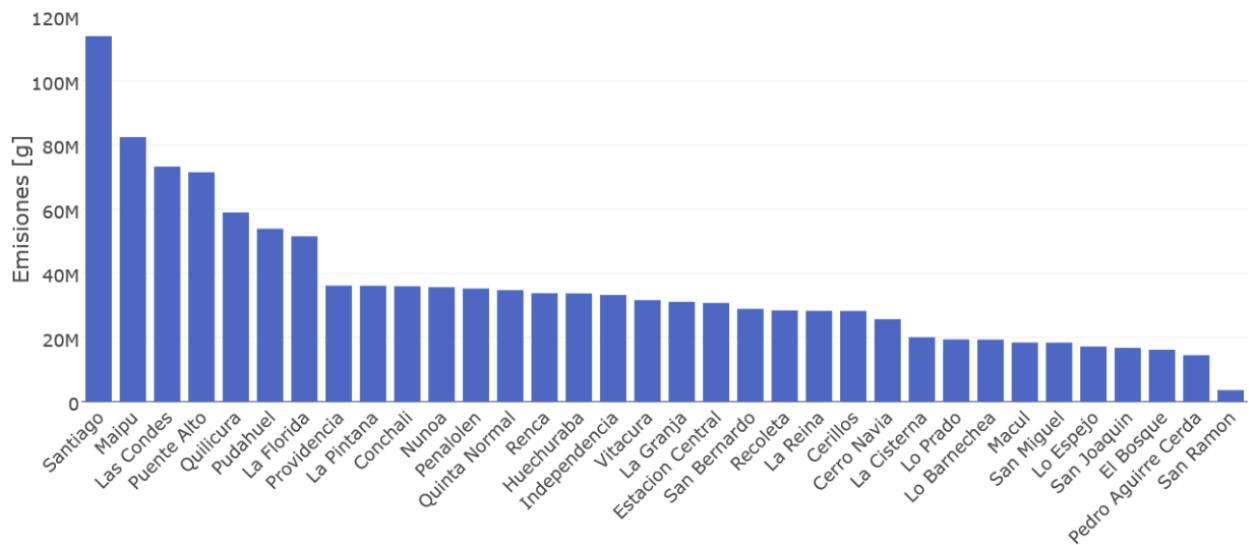


Figura 10 Emisiones de CO_2 por comuna calculadas mediante la implementación 1 para el día Lunes 14 de Marzo de 2016.

De la misma forma es posible obtener las emisiones de distintos servicios usando las cuatro implementaciones, como se muestra en la Figura 11, en donde se despliegan las emisiones totales del servicio 506I calculadas mediante la implementación 1, 2, 3 y 4, las cuales corresponden a las curvas azul, naranja, verde y roja, respectivamente. Por el contrario de los resultados de la flota completa, aquí las emisiones al considerar la pendiente (implementación 2) los valores de las emisiones son más altos que no al considerarlas (implementación 1). Esto se debe a que en la ruta existen más tramos con pendiente positiva que negativa, como se muestra en la distribución de pendientes de la Figura 6. Además al incorporar solo la pendiente y la velocidad al modelo (implementación 3) se muestra un diferencia con la implementación 1 principalmente en los horarios donde el servicio tiene más demanda, es decir, entre las 6:00 AM y las 9:00 AM. Finalmente, al considerar todos los parámetros de entrada (implementación 4), se puede ver que los valores de las emisiones estimadas son más altos que los obtenidos por las otras

implementaciones. Cuando las curvas verde y roja están por debajo de la curva azul y verde, es debido a una pérdida de datos al incorporar la base de datos de factores de carga de los vehículos.

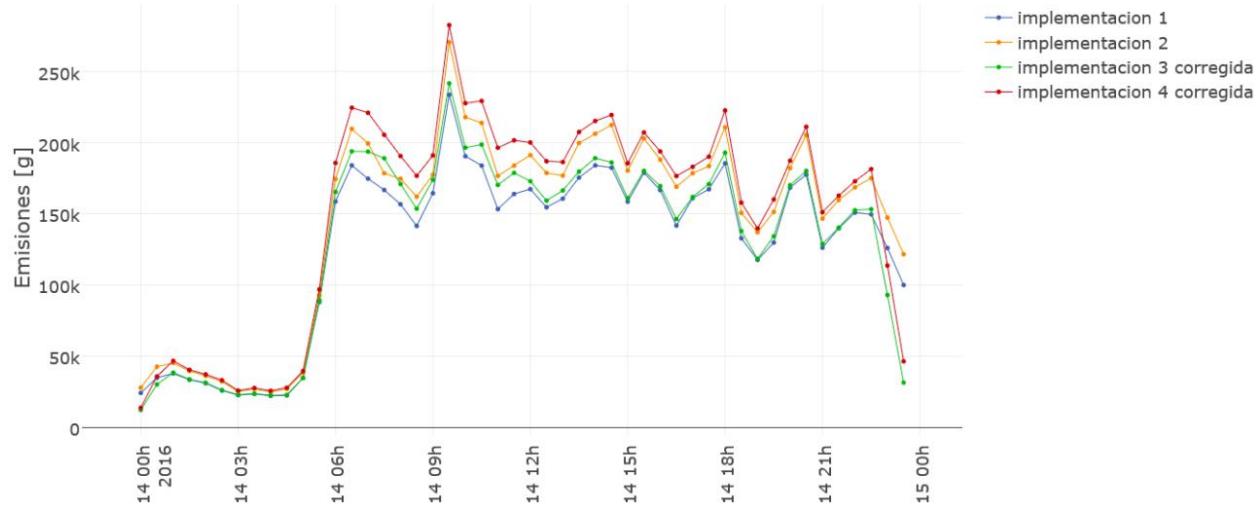


Figura 11 Emisiones de CO₂ por comuna calculadas mediante la implementación 1 para el día Lunes 14 de Marzo de 2016.

4. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

El modelo de emisiones calientes que se describe en el presente documento permite realizar un distribución espacio-temporal, la que entrega las emisiones cada 30 minutos en tramos de 500 metros de las rutas que componen la red de transporte de Santiago de Chile. Los datos de entrada del modelo son obtenidos a partir de información real de la localización de los buses que componen el sistema de transporte público Transantiago, además de información de transacciones de pago, obtenida del sistema de pago automático presente en cada uno de los vehículos.

Los resultados del modelo permiten reconocer un patrón temporal, el cual indica que las emisiones diarias de todos los contaminantes y del gas de efecto invernadero son prácticamente constantes a lo largo de la semana. Además, se identificaron diariamente tres puntos máximos de generación de emisiones, los cuales ocurren a las 8:30 AM, entre las 1:30 PM y 2:00 PM, y a las 8:00 PM. Estos horarios son períodos donde las velocidades alcanzan valores bajos, como también donde existe una gran cantidad de vehículos en operación.

Asimismo, se reconoce que las emisiones por pasajero son altas durante las horas de la madrugada debido a la baja demanda del servicio, mientras que las emisiones durante el día son bajas y constantes, a pesar que las emisiones totales varían, dado a que la demanda del servicio también varía.

La comuna donde más nivel de actividad existe es Santiago, por ende, es donde más emisiones se liberan a la atmósfera, representando entre el 9-10% de las emisiones de la Región Metropolitana de Chile.

Por último, es importante mencionar el efecto de los parámetros que caracterizan las condiciones de conducción de los vehículos. Los valores obtenidos muestran que a menor velocidad, mayores son los factores de emisión obtenidos (ver ecuaciones 3-12), lo cual se refleja en que los horarios en que se alcanzan máximos en la generación de emisiones, los cuales corresponden a periodos de alta demanda y alto tráfico vehicular. De la misma forma, la pendiente del camino influye en la estimación de emisiones, como se muestra en los resultados del servicio 506I, los cuales dicen que por el hecho de tener más porcentaje de segmentos de tramo con pendiente positiva que negativa, las emisiones son mayores. Finalmente la influencia del factor de carga se aprecia en los periodos donde la demanda de los servicio de Transantiago es alta, no obstante, la diferencia con los valores de emisiones al no considerar la carga es pequeña.

Agradecimientos

El trabajo de investigación presentado está parcialmente financiado por el Centro de Resiliencia y Clima (CR2) de la Universidad de Chile (FONDAP 15110009) y el Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería (CONICYT FB0816).

REFERENCIAS

- Acevedo, C. (2007) Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile.
- Cortés, C., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M., Zúñiga, M. (2011) Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19, 695-707.
- Gallardo, L., Escribano, J., Dawidowski, L., Rojas, N., Andrade, M., Osses, M., (2012) Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo. *Atmospheric Environment* 47, 12-19.
- Gramsch, E., López, G., Gidhagen, L. (2014) Estudio: Actualización y sistematización del inventario de emisiones contaminantes atmosféricos en la región metropolitana. Reporte Técnico. Universidad de Santiago de Chile, Santiago.
- Gschwender, A., Munizaga, M.A., Simonetti, C. (2016) Using smart card and GPS data for policy and planning: the case of Transantiago. *Research in Transport Economics* 59, 242-249.
- Munizaga, M.A., Palma, C. (2012) 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.
- Ministerio de Medio Ambiente (2011) 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. Reporte Técnico.

Ntziachristos, L., Samaras, Z. (2013) Exhaust emissions from road transport. En EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.

Reşitoğlu, İ.A., Altınışik, K., Keskin, A. (2015) The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. Clean Technologies and Environmental Policy 17, 15-27.