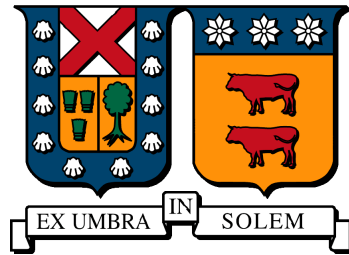


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**EXPOSICIÓN DE CICLISTAS A MATERIAL
PARTICULADO Y CARBONO NEGRO EN
SANTIAGO**

MIGUEL ÁNGEL SALVATIERRA REYES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : DR. MAURICIO OSSES
PROFESOR CORREFERENTE : DR. ARTURO GONZÁLEZ
PROFESOR CORREFERENTE : ING. MARIO REYES

2 de noviembre de 2016

Dedicado a mis mejores compañeros de estudio
Bossy y Roky,
y a Luna, que sin ella
hubiese terminado antes este trabajo.

Resumen

El número de ciclistas en Santiago ha crecido rápidamente en los últimos años, y no existe mucha información en profundidad sobre los contaminantes a los que están expuestos, en especial sobre el carbono negro.

Estudios demuestran que dentro de los distintos medios de transporte, la bicicleta es donde se tiene la menor exposición a $MP_{2,5}$ ($33,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), junto con los peatones ($27,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en comparación con buses ($34,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y vehículos particulares ($38 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Al considerar la elevada tasa de respiración del ciclista, la deposición de material particulado en los pulmones puede ser hasta un 64 % mayor. Además, la ruta seleccionada y el horario de circulación tienen mayor impacto que efectos atmosféricos y es preferible elegir una ruta más larga pero con menor congestión vehicular, lo que puede disminuir en un 30 % la exposición a material particulado. En Latinoamérica, existen menos estudios sobre exposición a contaminantes, pero se tiene suficiente información para saber que su uso está en expansión y para Santiago existe un plan concreto para incrementar en más de 600 kilómetros las ciclovías disponibles.

Para este trabajo se definieron 15 rutas a estudiar, donde 6 de éstas son ciclovías independientes, 5 segregadas y 4 corresponden a calles sin ciclovías. Estos recorridos se realizaron durante la hora punta de la mañana, hora punta de la tarde y horario valle entre el 3 de mayo y 7 de junio de 2016. Se utilizaron una serie de instrumentos, incluyendo un analizador para medir carbono negro y una unidad GPS para tener la ubicación geográfica.

Los resultados obtenidos para el carbono negro muestran una exposición promedio de $12.844 \text{ ng}/\text{m}^3$ y una desviación estándar de $35.480 \text{ ng}/\text{m}^3$ para todos los recorridos, indicando gran variabilidad de los datos. Las ciclovías independientes presentaron la menor exposición promedio, con $9.779 \text{ ng}/\text{m}^3$, seguidas por las calles sin ciclovías ($14.085 \text{ ng}/\text{m}^3$), y las ciclovías segregadas ($15.102 \text{ ng}/\text{m}^3$). Respecto a los horarios no se tienen diferencias significativas entre las horas punta, con $12.665 \text{ ng}/\text{m}^3$ promedio para el horario punta de mañana y $12.863 \text{ ng}/\text{m}^3$ para el horario punta de la tarde, pero hay una menor exposición promedio para el horario valle, con $10.332 \text{ ng}/\text{m}^3$. La contaminación de fondo no influye en la exposición de carbono negro para el ciclista. Por último, existen instancias con niveles muy superiores a lo normal, ocurriendo la mayoría de estos casos en mediciones realizadas después la puesta del sol. La causa de éstos se puede atribuir a camiones y vehículos con motor Diesel y a intersecciones donde se espera el cruce frente a una calle altamente transitada. La exposición más alta

registrada fue de 633.011 [ng/m^3], para la hora punta de la tarde.

Como conclusión, la distancia a la fuente es el factor más relevante en la exposición del ciclista, por lo que las ciclovías independientes son las menos expuestas al estar más alejadas de los vehículos. En el horario valle también se tiene una menor exposición respecto a las horas puntas. La calidad de aire no tiene efecto sobre la exposición del ciclista en comparación con el contexto inmediato en el que se encuentra el ciclista, como flujo vehicular, cercanía a la fuente y el tiempo de espera en intersecciones altamente transitadas.

Abstract

The amount of cyclists in Santiago has been growing very quickly during the last few years, and there is not much information about the pollutants they are exposed, especially black carbon.

Studies prove the bicycle is one of the means of transportation with the least amount of $MP_{2,5}$ exposition ($33,5 [\mu g/m^3]$), next to pedestrian ($27,5 [\mu g/m^3]$) compared with buses $34,5 [\mu g/m^3]$ and private vehicles ($38 [\mu g/m^3]$). If we consider the cyclist's higher breath rate, the pollutant deposition in the lungs can be 64 % higher. Also, the selected route and the schedule have more impact than atmospheric effects, and is better to choose the long and less congested route, which can lower up to 30 % the exposition to particulate material. There are fewer studies about pollutant exposition in latinamerica, but there's enough data to know that cycling is growing, and Santiago has solid plans to increase in more than 600 kilometers the available bikeways.

For this study, 15 routes were selected to be analyzed, where 6 of them are bikepaths, 5 are bikelanes, and 4 are streets with no bikeway. These routes were done during the morning rush hour, afternoon rush hour, and with no rush hour between May 3rd and June 7th of 2016. A series of instruments were used, including an aethalometer to measure black carbon and a GPS unit to record the geographic location.

Results show a $12.844 [ng/m^3]$ average exposition for black carbon, with a standard deviation of $35.480 [ng/m^3]$ for all the routes made, pointing a large variability in the data, which means there are several different levels of exposition during the travels. Bikepaths are the ones with the lowest exposition, with an average of $9.779 [ng/m^3]$, followed by streets without bikeways, with $14.085 [ng/m^3]$, and bikelanes have the highest exposition, with $15.102 [ng/m^3]$. There isn't much difference in exposition between the morning and the afternoon rush hour, with an average of $12.665 [ng/m^3]$ and $12.863 [ng/m^3]$ respectively, but there's a lower exposition outside the rush hours, with an average of $10.332 [ng/m^3]$. Also, the results show that background pollution does not influence black carbon exposition for the cyclist. Lastly, there are situations where hotspots are present, meaning much higher levels of exposition. The majority of these cases are registered after the sunset. The cause of these hotspots can be assigned to trucks and Diesel motor vehicles, and intersections where it is needed to wait besides high traffic. The highest exposition was $633.011 [ng/m^3]$.

As conclusion, the distance from the source of pollutant is the principal factor associated with the cyclist exposition, and that's why bikepaths have the lowest exposure.

tion, by being the farthest from the vehicles. Non rush hour schedules are the ones with the least exposition of black carbon for the cyclist. Background pollution has no effect compared to the closest surroundings of the cyclist, like vehicle traffic, distance to the traffic, and waiting time in dense intersections.

Índice general

Introducción	1
1. Estado del arte	3
1.1. Revisión de antecedentes internacionales	3
1.1.1. Exposición a contaminantes para usuarios en distintos modos de transporte	3
1.1.2. Exposición a contaminantes para usuarios de bicicleta	7
1.2. Ciclovías en Latinoamérica	10
1.2.1. Inclusión en la ciudad	14
1.2.2. Regulación	16
1.3. Ciclovías en Santiago	17
1.3.1. Situación Actual	17
1.3.2. Problemas de infraestructura	19
1.3.3. Accidentes con participación de bicicletas en Santiago	20
1.3.4. Complementos para las ciclovías	20
1.3.5. Plan para el futuro	22
2. Metodología	23
2.1. Instrumentos y equipos	23
2.1.1. MicroAeth AE51	23
2.1.2. Unidad VAM	24
2.1.3. GPS Visualizer	25
2.1.4. GoPro	25
2.1.5. Google Earth	26
2.1.6. Equipos de seguridad	26
2.2. Tipología de ciclovías	27
2.2.1. Selección de rutas	27

2.2.2.	Tiempo de medición	28
3.	Resultados	30
3.1.	Mapa de exposición	34
3.2.	Tipo de ciclovía	36
3.3.	Calidad de aire	37
3.4.	Horarios de medición	40
3.5.	Combinación de ciclovías y horario	43
3.6.	Flujo de ciclistas	44
3.7.	Puntos de alta exposición	46
3.8.	Impacto de motores Diesel	47
3.9.	Impacto de intersecciones	48
4.	Conclusiones	50
4.1.	Tipo de ciclovía	51
4.2.	Horario de circulación	52
4.3.	Calidad del aire	53
4.4.	Mediciones nocturnas	53
4.5.	Hotspots	54
4.6.	Recomendaciones	57
A.	Exposición en ciclovías seleccionadas	62
B.	Ciclovías en Santiago	66

Índice de figuras

1.1. Niveles de exposición para distintos medios de transporte en distintas rutas.	4
1.2. Variación de concentración de contaminantes según la hora.	6
1.3. Absorción de material particulado en distintas partes del pulmón para varias formas de transporte.	8
1.4. Tipos de ciclovías	11
1.5. Viajes diarios en distintas ciudades de Latinoamérica	13
1.6. Porcentaje de viajes diarios en bicicleta y kilómetros de ciclovía.	14
1.7. Número de bicicletas públicas disponibles por ciudad.	15
1.8. Ciclistas heridos anualmente por cada 100.000 habitantes	16
1.9. Ciclovías Santiago 2015	17
1.10. Proyectos de ciclovías en Chile	18
1.11. Aumento de ciclovías y ciclistas entre los años 2001 y 2012.	19
1.12. Proporción de las causas de accidentes de tránsito en bicicletas en 2012.	21
1.13. Infraestructura proyectada al 2025	22
2.1. Equipo etalómetro microAeth AE51 con manguera.	24
2.2. Unidad GPS VAM.	25
2.3. Cámara Go Pro.	26
2.4. Equipo completo para realizar las mediciones.	27
2.5. Ciclovías seleccionadas para este estudio. En verde se indican las ciclovías independientes, en azul las segregadas, y en rojo las compartidas.	28
3.1. Frecuencia de datos dentro de un cierto rango	32
3.2. Exposición relativa de carbono negro para Santiago. Datos tomados entre el 3 y 9 de mayo de 2016.	34

3.3.	Exposición relativa de carbono negro para Santiago. Datos tomados entre el 13 y 19 de mayo de 2016.	35
3.4.	Exposición relativa de carbono negro para Santiago. Datos tomados entre el 26 de mayo y 7 de junio de 2016.	35
3.5.	Promedio de carbono negro para cada ciclovía en este estudio.	36
3.6.	Promedio de exposición para cada tipo de ciclovía para los tres horarios definidos en este estudio.	37
3.7.	Promedio para nivel de exposición de carbono negro por ciclovía en azul y promedio de calidad de aire según material particulado 2.5 en rojo.	38
3.8.	Calidad de aire para cada recorrido realizado en este estudio en rojo y nivel de exposición de carbono negro en azul.	39
3.9.	Calidad de aire promedio en línea roja y promedio de carbono negro en azul según horario.	40
3.10.	Promedio de exposición para cada ciclovía según el horario.	41
3.11.	Ranking de exposición en ciclovías en el horario punta de la mañana. . .	41
3.12.	Ranking de exposición en ciclovías en el horario punta de la tarde. . . .	42
3.13.	Ranking de exposición en ciclovías en el horario valle.	42
3.14.	Diagrama de caja para ciclovías en horario punta mañana.	43
3.15.	Diagrama de caja para ciclovías en horario punta tarde.	44
3.16.	Diagrama de caja para ciclovías en horario valle.	44
3.17.	Flujo de ciclistas y exposición a carbono negro.	45
3.18.	Cantidad de veces que se presentan hotspots para cada ciclovía, separado por horarios.	46
3.19.	Exposición de 162.441 [ng/m^3]	47
3.20.	Exposición de 152.706 [ng/m^3]	48
3.21.	Casos donde se espera un cruce y se presenta mayor exposición.	49
4.1.	Alameda con General Bulnes. Pese a la gran congestión, se tienen niveles inferiores a los 8000 [ng/m^3].	51
4.2.	Diagrama de caja para los tres tipos de ciclovía para cada horario. . . .	52
4.3.	Exposición de 14.000 [ng/m^3] detrás de un bus de Transantiago.	54
4.4.	Hotspots más representativos encontrados en este estudio. En gris están aquellos reiterados y en morado aquellos que se encontraron una sola vez. El tamaño del círculo representa el nivel de la exposición.	55
4.5.	Rotonda Grecia, 491.020 [ng/m^3].	55

4.6. Antonio Varas con Eliodoro Yañez, 425.829 [ng/m³]. 56

Índice de tablas

1.1. Proporción de exposición en distintos modos de transporte.	6
1.2. Comparación entre la tasa de respiración de un ciclista y un peatón.	8
2.1. Ciclovías seleccionadas para este estudio.	28
2.2. Cantidad de datos tomados por cada instrumento.	29
3.1. Valores estadísticos de exposición a carbono negro en $[ng/m^3]$ para ciclovías en horario punta de la mañana.	31
3.2. Valores estadísticos de exposición a carbono negro en $[ng/m^3]$ para ciclovías en horario punta de la tarde.	31
3.3. Valores estadísticos de exposición a carbono negro en $[ng/m^3]$ para ciclovías en horario valle.	31
3.4. Cantidad de recorridos para cada ciclovía, ordenadas primero por tipo y luego en orden alfabético. Las columnas indican los horarios: mañana, valle y tarde, respectivamente.	33
A.1. Promedio de exposición, desviación estándar y calidad de aire en $MP_{2,5}$ y MP_{10} para cada recorrido.	62
B.1. Red de ciclovías existente en Santiago en 2015.	66

Introducción

Motivación

Existen diversos estudios y trabajos que buscan explicar el nivel de exposición a contaminantes de una persona en distintos medios de transporte, comparando los niveles de material particulado o componentes orgánicos volátiles emitidos por los vehículos, dando un entendimiento global de la situación y de los factores que influyen dentro del nivel de exposición. Sin embargo, son pocos los estudios que se dedican a entender el fenómeno en detalle para un medio de transporte en específico.

El uso de la bicicleta como medio de transporte en Santiago se ha incrementado con el pasar de los años y es necesario entender a qué se expone un ciclista en una ciudad con los estándares de calidad de aire como los que existen en Santiago. Este estudio busca crear un mejor entendimiento a la exposición a los contaminantes que recibe un ciclista en distintas zonas de la ciudad, considerando factores como la congestión vehicular y condiciones ambientales y poder entregar estos datos para ser considerados en la base de datos de estudios similares realizados en otras regiones del mundo y también para la futura expansión de la infraestructura de las ciclovías en Santiago.

Descripción del problema

Los ciclistas están expuestos a distintos contaminantes, los cuales pueden tener efectos negativos sobre su salud y la mayoría de ellos lo desconoce. Se han realizado diversos estudios en distintas ciudades del mundo, analizando el nivel de exposición a contaminantes que tienen los usuarios por distintos modos de transporte, pero los estudios específicos a los ciclistas no son muchos y, en Santiago, no existen estudios realizados a fondo sobre la exposición de los ciclistas durante un periodo significativo de tiempo.

Objetivos

General

- Analizar la exposición de ciclistas a material particulado y carbono negro en Santiago.

Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de antecedentes internacional.
- Realizar una campaña experimental para la medición de exposición de material particulado y carbono negro en ciclistas.
- Analizar los resultados de campaña experimental.
- Crear un mapa de Santiago mostrando los niveles relativos de exposición a contaminantes utilizando los datos de exposición tomados en la campaña.

Estructura

En el estado del arte, se analizan estudios relacionados a este trabajo, respecto a la exposición personal de distintos contaminantes, haciendo énfasis a la bicicleta como modo de transporte. Se explica cuáles son los contaminantes a los que se está expuesto, sus fuentes y posibles consecuencias en la salud y el medioambiente. Además, se muestra la situación actual de los ciclistas en Latinoamérica, respecto a la cantidad de usuarios y porcentaje de uso como medio de transporte. Se da especial atención al caso de Santiago, actualizando los datos entregados en la sección 1.2.

En la metodología se indican los procedimientos e instrumentos utilizados en este estudio, incluyendo las ciclovías donde fueron tomadas las muestras, los horarios y fechas de éstas.

En resultados se presentan de manera estructurada los principales resultados de este estudio, separados por distintos casos para entregar un análisis más profundo. Se realiza un análisis de estos resultados para comprender la diferencia entre los tipos de ciclovías, horarios y factores que pueden influir en ellos.

Por último, en la sección conclusión se realizan afirmaciones obtenidas a partir de los resultados y se comparan con aquellas conclusiones establecidas en el estado del arte.

Capítulo 1

Estado del arte

1.1. Revisión de antecedentes internacionales

Existen diversos estudios respecto al nivel de exposición de contaminantes en distintos medios de transporte, entre ellos material particulado (MP_{10} y $MP_{2,5}$), material particulado fino (UFP), carbón elemental (CE) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs).

1.1.1. Exposición a contaminantes para usuarios en distintos modos de transporte

Desde que comenzaron a conocerse los efectos de los gases invernadero y el calentamiento global, ha entrado en la mente del ser humano las consecuencias que significan emitir grandes cantidades de desechos a la atmósfera. Para el caso del transporte, en la década de los 90 surgieron una serie de restricciones que limitaban la cantidad de gases de escape que podían emitir los vehículos, como una medida para reducir el calentamiento global. Al mismo tiempo, comenzaron a realizarse estudios para entender el efecto que tienen estas emisiones sobre los usuarios al utilizar estos medios de transporte.

Desde comienzos del siglo XXI, los estudios de exposición a usuarios comenzaron a tomar más fuerza y a usar una metodología distinta. Se consideraron factores como la ruta utilizada, factores meteorológicos, hora a la cual se realiza la medición, densidad vehicular, proximidad a la fuente y, finalmente, el modo de transporte. Determinar el peso de estos factores en la exposición personal de los usuarios ha traído varios resul-

tados.

Un estudio llevado entre los años 1999 y 2000 en Londres [2] busca determinar la exposición de los usuarios a material particulado $MP_{2,5}$, utilizando distintos modos de transporte: bus, vehículo particular, bicicleta y metro. Se toman cerca de 400 muestras en rutas distintas y se llega a la conclusión de que el modo de transporte no es el factor que causa las mayores fluctuaciones de exposición, si no, la ruta utilizada, donde las rutas con mayores congestiones vehiculares muestran ser aquellas donde se está más expuesto a material particulado. Al año siguiente se repite el estudio [1], pero considerando ahora el carbón elemental (CE) como contaminante, además del material particulado. Nuevamente se concluye que la ruta es un factor que influye en el nivel de exposición de los usuarios, pero ahora el modo de transporte también entrega esta misma conclusión. La figura 1.1 muestra el nivel de exposición en tres rutas distintas para tres modos de transporte y en todas se ve que el automóvil es aquel que tiene mayor exposición, pese a que la estructura entrega una protección que, por ejemplo, el usuario de bicicleta no tiene. En promedio, los ciclistas son los menos expuestos, con una concentración de $11,2[\mu g/m^3]$ de partículas en el verano, seguidos por el usuario del bus, con $13,6[\mu g/m^3]$ y, finalmente, el automovilista, con $21,6[\mu g/m^3]$.

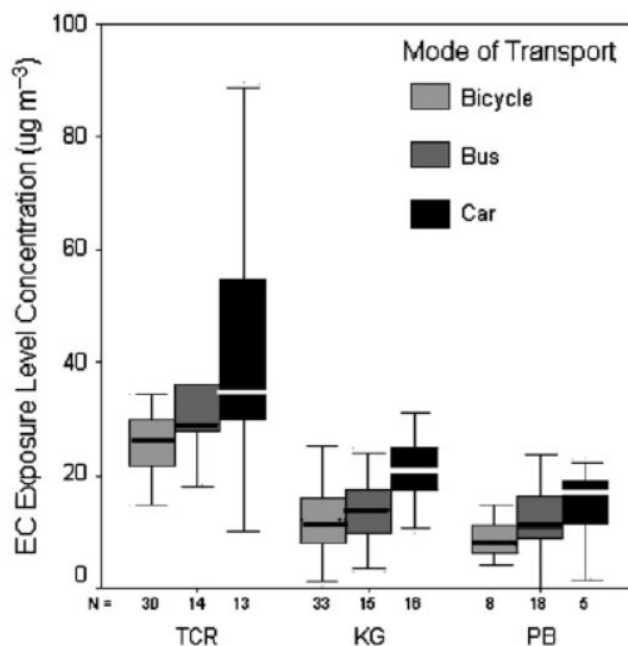


Figura 1.1: Niveles de exposición para distintos medios de transporte en distintas rutas.

Fuente: [1].

La ruta seleccionada muestra ser un factor determinante en el nivel de exposición de los usuarios y varios estudios lo demuestran. Hertel realiza un estudio de exposición en Copenhague en el año 2007 [13] para bicicletas y buses, proponiendo tres rutas distintas: una ruta rápida, pero con mayor congestión vehicular; una ruta larga, pero con menor congestión y la ruta más directa posible utilizando el bus. El estudio muestra que los niveles de exposición a contaminantes primarios (NO_x y CO), son entre un 10-30 % más bajos en la ruta larga respecto a la ruta corta. Al mismo tiempo, los usuarios de bus tienen un 115 % de mayor exposición a estos elementos que la ruta más corta en bicicleta. Kaur realiza un estudio en Londres ese mismo año [16], analizando el nivel de exposición para usuarios de bicicleta, bus, vehículo particular, taxi y además, considerando la exposición en estaciones de monitoreo fijas en distintas zonas de la ciudad. Los contaminantes a estudiar son material particulado $MP_{2,5}$, carbón elemental, material particulado ultra fino UFP y CO . De los resultados obtenidos, se tiene que los peatones y ciclistas son los que están menos expuestos a material particulado ($MP_{2,5} = 27,5[\mu g/m^3]$ y $MP_{2,5} = 33,5[\mu g/m^3]$, respectivamente), mientras que en bus, vehículo y taxi, se recibe una mayor exposición ($MP_{2,5} = 34,5[\mu g/m^3]$, $MP_{2,5} = 38[\mu g/m^3]$ y $MP_{2,5} = 41,5[\mu g/m^3]$, respectivamente). Respecto al monóxido de carbono, se ven niveles similares para todos los modos de transporte, pero sí se ve una disminución respecto a años anteriores, lo cual se debe a la modernización de los motores y el control de emisiones. La proximidad de la fuente impacta sustancialmente a los niveles de exposición y esto se debe a la ruta seleccionada, donde la ruta con menos congestión vehicular es aquella con menor exposición. Por último, en este estudio se concluye que las mediciones tomadas por las estaciones de monitoreo fijo no tienen correlación con aquellas tomadas a nivel personal. Adams llegó a la misma conclusión en su estudio del año 2001 [2].

Respecto al material particulado ultra fino¹, un estudio realizado por Berghmans en 2009 en Flanders, Bélgica [4], muestra que no hay correlación entre la exposición a material particulado ultra fino y $MP_{2,5}$ y MP_{10} , pero sí existe correlación entre $MP_{2,5}$ y MP_{10} . Esto significa que no se verán mayores niveles de UFP mientras aumenten los de MP_{10} o $MP_{2,5}$.

El nivel de exposición también depende de la hora en la que se realizan las mediciones y de la época del año. En la hora punta de la mañana se tienen mayores niveles de exposición a contaminantes respecto a la hora punta de la tarde ([4] [13]), como se

¹Material particulado con diámetro menor a $0,1[\mu g/m^3]$.

indica en la figura 1.2. Finalmente, un estudio indica que en invierno se presenta mayor exposición respecto a verano [1].

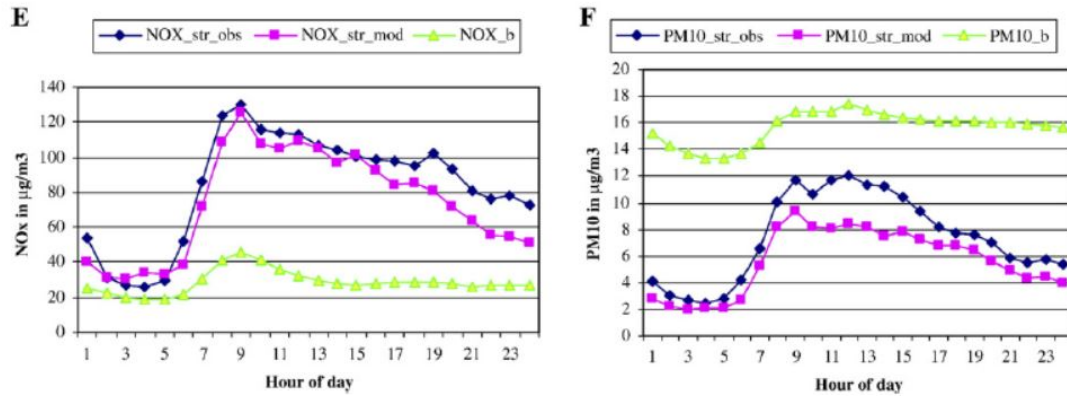


Figura 1.2: Variación de concentración de contaminantes según la hora.

Fuente: [13]

Otro factor que influye en los niveles de exposición es el viento. En días que se presentaron mayores velocidades de viento, se vieron menores niveles de exposición ([2] [16] [4]), ya que el viento mueve las partículas, alterando la exposición personal que se tiene de éstas.

Finalmente, se presenta como resumen los niveles relativos de exposición en distintos modos de transporte en la tabla 1.1, realizada en un estudio por McNabola el año 2008 [19].

Pollutant	Route1				Route 2			
	Bus	Car	Cyc	Ped	Bus	Car	Cyc	Ped
PM _{2.5}	3.25	1.66	1.62	1	3.92	2.32	1.26	1
Benzene	1.44	2.33	1.35	1	1.67	3.02	1.48	1
Butadiene	1.56	2.79	1.39	1	1.97	3.47	1.49	1
Ethylene	1.55	2.2	1.38	1	4.19	8.93	3.31	1
Acetylene	1.48	2.84	1.67	1	2.64	5.73	2.75	1

Tabla 1.1: Proporción de exposición en distintos modos de transporte.

Fuente: [19].

Conclusión: considerando los estudios presentados en esta sección, se puede concluir lo siguiente:

- La exposición a distintos contaminantes depende de una variedad de factores, de los cuales se puede descartar el viento si se toma una muestra suficientemente grande. Estos factores son: ruta elegida, modo de transporte, hora y, en menor grado, época del año.
- Tanto los ciclistas como los peatones están menos expuestos a contaminantes en comparación a pasajeros de bus y de automóviles, pese a no tener la protección de la estructura de estos últimos.
- No existe correlación entre el nivel personal de exposición a contaminantes y la exposición medida por estaciones de puntos fijos, por lo que estos últimos no sirven como un modelo para estimar los índices de exposición de una persona.

1.1.2. Exposición a contaminantes para usuarios de bicicleta

Como se vio en los estudios de exposición por distintos modos de transporte en la sección 1.1.1, tanto los ciclistas como los peatones son los menos expuestos a los contaminantes, pese a no tener la protección al ambiente que tiene, por ejemplo, un automóvil. Pero estos estudios no consideran un factor importante, que es la tasa de respiración de un ciclista.

McNabola indica en su estudio del año 2007 [20] que la tasa de respiración de un ciclista es mayor que la de un peatón y ésta aumenta mientras se vaya a mayor velocidad. Pese a esto, su estudio muestra que, aunque a mayores velocidades la tasa de respiración es mayor, el tiempo al que se está expuesto a contaminantes es menor, por lo que la absorción de elementos contaminantes por los pulmones es menor, absorbiendo un 17 % menos benceno. Para el caso del material particulado, un estudio [11] indica lo contrario: que a un mayor esfuerzo, es decir, con mayor tasa de respiración, el ciclista puede absorber hasta un 64 % más de $MP_{2,5}$ respecto a un ciclista en descanso. Hay que destacar que este último estudio se realizó en la ciudad de Bogotá, con condiciones atmosféricas más adversas, ya que está a una mayor altura respecto a nivel del mar y la ciudad en sí tiene mayores índices de contaminación, con un promedio de $60 [\mu g/m^3]$ de MP_{10} . Por lo tanto, es necesario considerar que los estudios de la sección 1.1.1 no toman en cuenta la mayor tasa de respiración y el esfuerzo físico del ciclista.

Al año siguiente, McNabola realizó un estudio en Dublin [19], donde los resultados muestran que el pasajero de bus fue el más expuesto a material particulado $MP_{2,5}$ y el conductor de automóvil el más expuesto a emisiones vehiculares (benceno, etano,

etileno, acetileno, entre otros). Se puede ver en la tabla 1.1 que el ciclista es, después del peatón, el usuario menos expuestos a los contaminantes. Pero ahora, considerando la tasa de respiración mostrada en la tabla 1.2, la absorción de contaminantes es mayor para el ciclista. En la figura 1.3, se ve el caso particular de $MP_{2,5}$, donde la mayor exposición fue para el pasajero de bus, pero la mayor absorción en el pulmón fue para el ciclista.

Speed (mph)	Mode	Breathing rate (m^3/h)	Frequency (min^{-1})	Volume (mL)
3	Pedestrian	1.3	16	1050
5		1.6	21	1375
5	Cyclist	1.5	20	1250
12		3	26	1920

Tabla 1.2: Comparación entre la tasa de respiración de un ciclista y un peatón.

Fuente : [20].

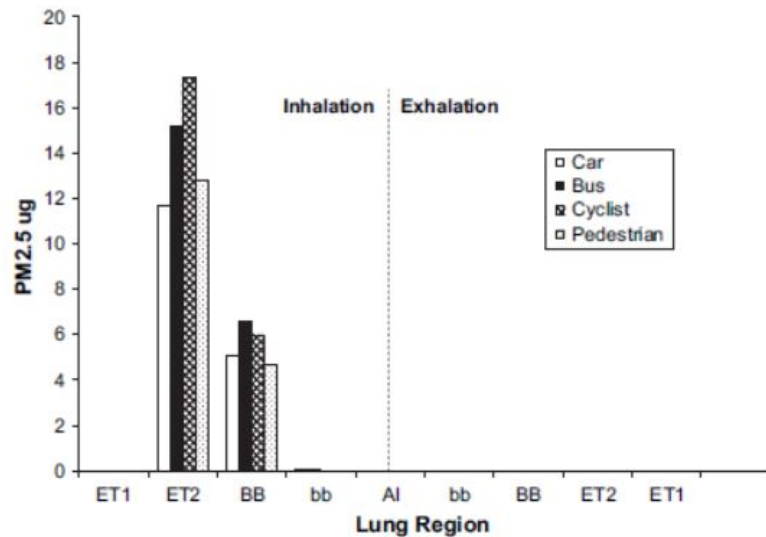


Figura 1.3: Absorción de material particulado en distintas partes del pulmón para varias formas de transporte.

Fuente: [19].

Ahora, existe un contaminante que no se ha estudiado en previos trabajos: el carbono negro.

Carbono Negro

El carbono negro es un material proveniente de la combustión incompleta de combustibles fósiles y significan una parte importante de la composición de material particulado. Muchas veces este componente se ignora o se presenta como material particulado, sin considerar que es un componente independiente y que los efectos sobre la salud no son los mismos que los del material particulado.

Origen:

Un estudio realizado en el año 2000, indica que de todas las fuentes, se emiten un total de 7,7 tetagramos de carbono negro [17], de las cuales el 19 % se le atribuye a medios de transporte por superficie y “shipping” internacional. El transporte vehicular corresponde al 9 % de las emisiones globales de carbono negro y de éstas, el 99 % corresponde a vehículos con motor Diesel [26].

Efectos sobre la salud:

Las enfermedades relacionadas con este compuesto van desde los problemas respiratorios, como asma y bronquitis y esto está asociado a una muerte prematura. Algunos estudios demuestran que un incremento de $1[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ de carbón negro significa una mayor probabilidad de causa de mortalidad que $1[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ de $MP_{2,5}$ o MP_{10} ([14] [15]).

Efectos sobre el clima:

Este componente absorbe la luz solar fácilmente, lo cual lo calienta y le permite mezclarse con aerosoles. Al emitirse, éstas persisten en la atmósfera por un tiempo promedio mayor a una semana antes de entrar en contacto con una superficie o son precipitadas en la atmósfera. Es por esto que se atribuye a este componente como el segundo responsable del calentamiento global, después del dióxido de carbono [24]. Esto se complementa con la deposición del carbono negro en los polos del planeta, lo que disminuye la capacidad del hielo polar de reflejar la luz del sol y al mismo tiempo aumenta la absorción de calor de éste [3].

Se realizó un estudio buscando la relación entre material particulado ultra fino y carbono negro [23] y se encontró mucha variabilidad en los niveles de exposición, incluso para la misma ruta a la misma hora, por lo que no se puede determinar una relación coherente entre estos contaminantes para una medición promedio, similar a lo indicado por Berghmans [4]. Pese a esto, se encuentra que para los puntos de alta concentración, el incremento de *UFP* y carbono negro son similares. Finalmente, estos estudios específicos de bicicleta ([5], [18], [23]) arrojan las mismas conclusiones que los estudios de la sección 1.1.1, donde la cercanía a las fuentes de emisión muestra ser el causante de la mayor variabilidad en la exposición, lo cual se refleja en la ruta utilizada para realizar el viaje. Aquellos viajes donde se está más lejos de los automóviles son aquellos donde se tiene menos exposición. Incluso para las ciclovías, aquellas que están más lejanas a los automóviles presentan menor exposición. Las ciclovías segregadas² tienen concentraciones de carbono negro y *NO₂* 33 % más altos que las ciclovías independientes [18].

1.2. Ciclovías en Latinoamérica

El estudio “Ciclo-Inclusión en América Latina y el Caribe” del Banco Interamericano de Desarrollo, muestra el panorama sobre la bicicleta como modo de transporte en distintas ciudades de Latinoamérica y el Caribe. El objetivo de esta guía es fomentar el uso de la bicicleta como modo de transporte, señalando factores a considerar dentro de la infraestructura de la ciudad para facilitar la inclusión de la bicicleta en el sistema de transporte. Cabe destacar que este estudio presenta datos desactualizados sobre Santiago, los cuales se corrigen en la sección 1.3.

Según la SECRTA, los tipos de ciclovía se pueden separar en dos categorías [6]:

- **Segregada:** ciclovía físicamente segregada del tránsito vehicular por elementos permanentes, como barandas, bandejones, u otro. A éstas también se le conocen como **ciclopistas**. A su vez, éstas pueden ser clasificadas como ciclopistas de tipo **calzada** o **acera**, dependiendo de su ubicación. Ver figura 1.4b.
- **No segregada:** ciclovía sin separación física del tránsito vehicular. De estas se

²Se entra en más detalle respecto a los tipos de ciclovía en la sección 1.2.

pueden identificar dos subcategorías:

- **Ciclobanda:** ciclovía segregada por un medio visual, ya sea una demarcación por línea o cambio de color de pavimento. Ver figura 1.4a
- **Ciclocalle:** vía demarcada para el uso tanto de vehículos motorizados como para bicicletas. La velocidad máxima de circulación es de 30 [km/hr]. Ver figura 1.4c.

Finalmente, se les denomina como **compartida sin ciclovía** a todas aquellas calles donde circula un ciclista sin estar presentes las ciclovías mencionadas anteriormente. Ver figura 1.4d.



(a) Ciclobanda en Las Condes



(b) Ciclista tipo acera en Providencia



(c) Ciclocalle en Chicago, EE.UU



(d) Calle compartida sin ciclovía en La Reina

Figura 1.4: Tipos de ciclovías

Fuente: Google Street View.

Estas definiciones son dadas según el tipo de construcción de las ciclovías, pero para este estudio se les va a definir según su cercanía al tránsito vehicular:

- **Segregada:** la vía es compartida entre vehículos de motor y la bicicleta, donde la ciclovia es delimitada por un elemento físico, como bandejones, barandas, murillos, o pintura. Son afectas a intersecciones, y según estudios [8], son aquellas donde es más probable sufrir un accidente como ciclista.
- **Verdes o independientes:** son aquellas ciclovias encontradas en parques o plazas, donde no se permite la circulación de automóviles.
- **Compartida:** son aquellas donde los ciclistas y vehículos motorizados comparten la calle. A diferencia de las vías segregadas, la esta ciclovia se comporta como un carril de tránsito normal, es decir, de ser necesario, un automóvil puede hacer uso de esta vía.

Para dar una idea de la cantidad de usuarios de bicicleta, en la figura 1.5 se muestra la cantidad de viajes diarios realizados en distintas ciudades de Latinoamérica. De estos datos se pueden ver tres grandes concentraciones de viajes: en Bogotá, donde se tiene la mayor cantidad de viajes diarios en bicicleta en Latinoamérica, con 611.472, seguido por Santiago, con 510.569 (cerca a 750.000 en 2014) y México D.F, con 433.981 en su área metropolitana.



Figura 1.5: Viajes diarios en distintas ciudades de Latinoamérica

Fuente: [25].

Ahora, ¿cómo se representan estas cantidades de viajes en bicicleta respecto a otros medios de transporte? en la figura 1.6 se muestra la participación porcentual de los viajes en bicicleta respecto a otros modos de transporte. Además, se puede ver la cantidad de kilómetros de ciclovía que hay en cada ciudad. Bogotá, además de ser la ciudad con más viajes diarios realizados en bicicleta, también es aquella con mayor cantidad de kilómetros construidos de ciclovía, lo que indica que la bicicleta es un método de transporte implementado tanto en la ciudad como sus ciudadanos. En contraste, en Lima, un 0,3 % de los viajes se realizan en bicicleta, pese a tener 141 kilómetros de ciclovía dedicados a este medio de transporte. Ciudades como Rosario tienen menos infraestructura pero mayor participación de ciclistas, lo que indica que en Lima la bicicleta no es un medio de transporte muy utilizado, pese a que existe suficiente infraestructura para su fomento.

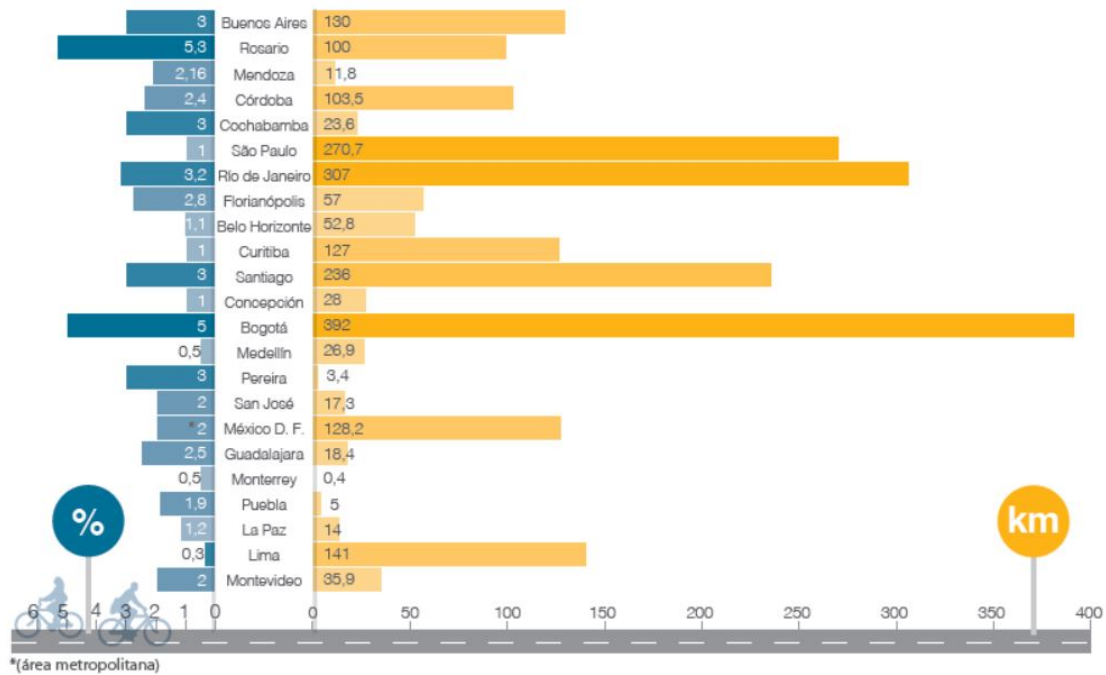


Figura 1.6: Porcentaje de viajes diarios en bicicleta y kilómetros de ciclovía.

Fuente: [25].

1.2.1. Inclusión en la ciudad

Para poder fomentar el uso de la bicicleta se debe tener una infraestructura inclusiva, es decir, dar las facilidades necesarias para que la bicicleta esté adaptada al sistema de transporte. Es necesario que las ciclovías estén en buen estado, considerando la calidad del terreno, el acceso a rampas y la eliminación de obstáculos. La ruta debería ser lo más homogénea posible y sin interrupciones.

El diseño de la ciclovía debe incluir elementos que complementan el viaje, como lo son los estacionamientos para las bicicletas. Rosario tiene 2.100 estacionamientos para las bicicletas (139 por cada 100.000 habitantes) y Buenos Aires 5.400 (42 por cada 100.000 habitantes). Los estacionamientos para bicicletas en estaciones de metro y bus permiten realizar el viaje en bicicleta y en transporte público. En Bogotá, el 9% de las estaciones de metro cuentan con este tipo de estacionamiento, mientras que en Santiago es un 8%.

Otra forma de complementar y fomentar el viaje, es con una gestión de bicicletas

públicas. En ciudades como São Paulo, Río de Janeiro y Ciudad de México, se tienen los sistemas de bicicleta pública más grandes de Latinoamérica (ver figura 1.7), donde se tienen hasta 4 bicicletas públicas por cada 100.000 habitantes, para el caso de Río de Janeiro.

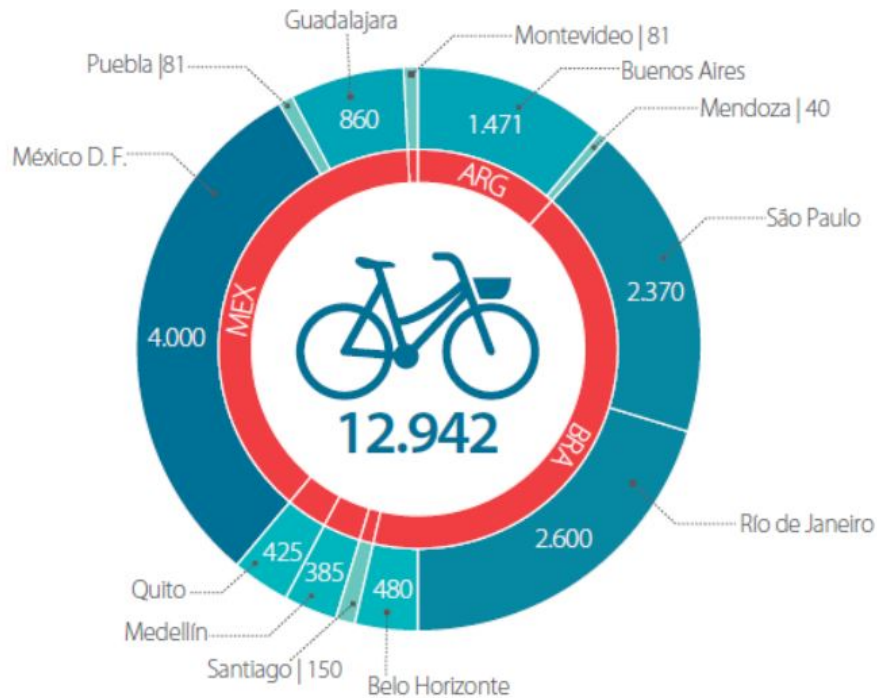


Figura 1.7: Número de bicicletas públicas disponibles por ciudad.

Fuente: [25].

La promoción de este medio de transporte es fundamental para la inclusión en la ciudad. En ciudades como Medellín, Bogotá y Buenos Aires, existen cartillas de fácil acceso que le entregan a los usuarios información sobre las ciclovías y el uso de la bicicleta, entregando además consejos de seguridad. Campañas como “Al trabajo en bici”, del Plan de Movilidad Sustentable en Buenos Aires, o “Al colegio en Bici”, de la alcaldía de Bogotá, donde se dejan a disposición 4.200 bicicletas para que los estudiantes se muevan al colegio en bicicleta, son iniciativas realizadas por instituciones públicas que trabajan en la promoción de la bicicleta.

1.2.2. Regulación

Es necesario crear normas y leyes que regulen el uso de la bicicleta, cuya función principal es hacer los viajes en bicicleta más seguros. Bogotá tiene una política de movilidad donde la bicicleta es la preferencia por sobre otros medios de transporte y cuenta con organismos que formulan proyectos y coordinan actividades. Buenos Aires cuenta con la Oficina de la Bicicleta y Santiago está modificando la normativa de construcción vial para darle mayor importancia a la bicicleta, en especial a las vías segregadas.

En general, dentro de Latinoamérica, la regulación sobre la bicicleta es poco clara y restrictiva y es necesario incluir este medio de transporte dentro de la infraestructura de las ciudades. El no tener vías exclusivas es uno de los factores principales en la cantidad de accidentes sufridos por ciclistas.

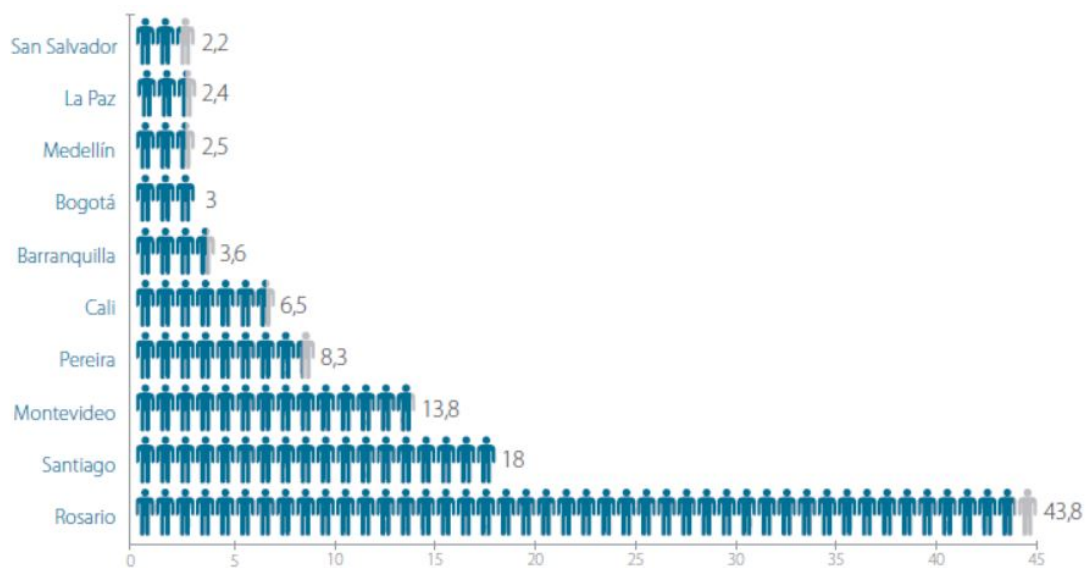


Figura 1.8: Ciclistas heridos anualmente por cada 100.000 habitantes

Fuente: [25].

1.3. Ciclovías en Santiago

1.3.1. Situación Actual

Según la información más reciente [7], Santiago presenta un total de 255 kilómetros de ciclovías construidas, los que están repartidos en 137 ciclovías divididas en 304 tramos (ver figura 1.9). Además de estas ciclovías, a nivel nacional existen proyectos para la construcción de más de 400 kilómetros en nuevas ciclovías (ver figura 1.10).

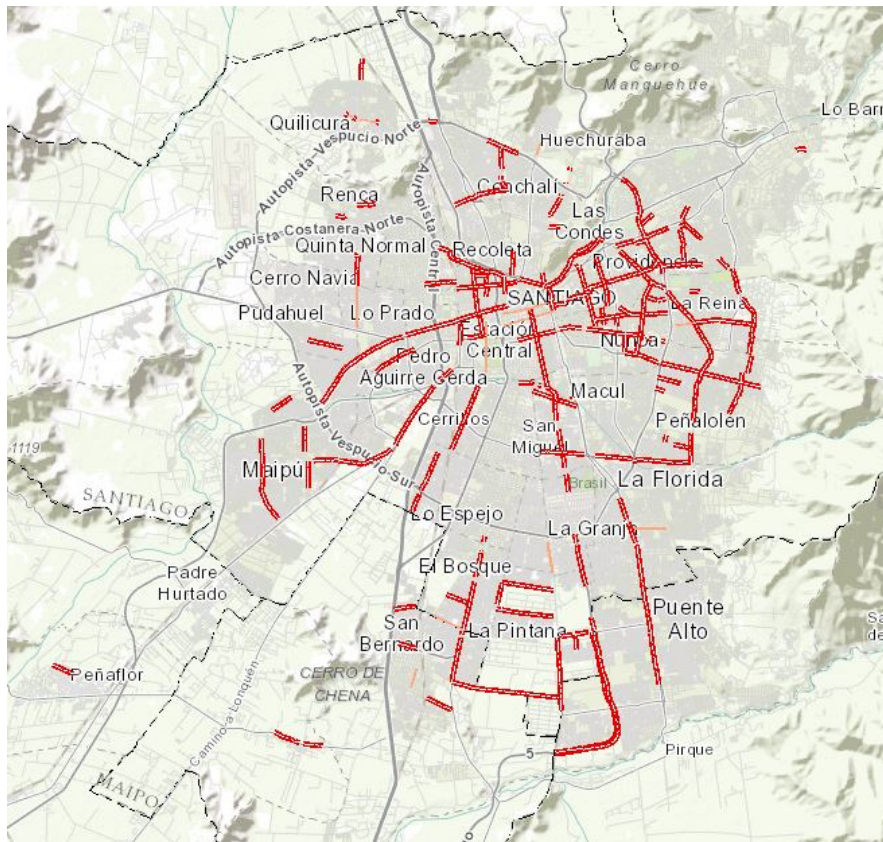


Figura 1.9: Ciclovías Santiago 2015

Fuente: IDE Chile.

En los últimos años, se ha visto un aumento en el uso de la bicicleta como medio de transporte. Según la encuesta Origen-Destino realizada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, el número de viajes totales realizados en Santiago entre los años 2001-2012, han aumentado en un 13 %, sumando un total de 18.461.134. Del total, un 4 % de los viajes se realiza en bicicleta, lo que significa 747.123 viajes diarios. Si se comparan la cantidad de viajes en bicicletas realizados en un día laboral, en 2001 se

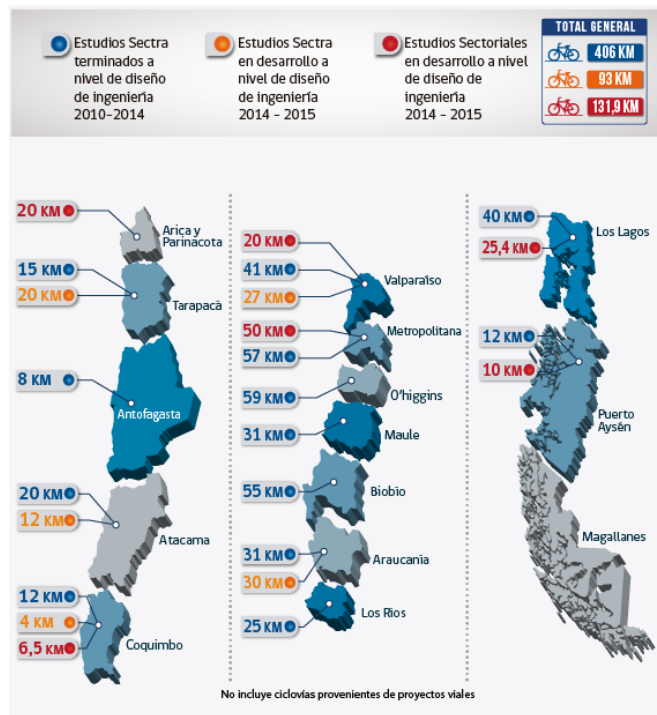


Figura 1.10: Proyectos de ciclovías en Chile

Fuente: Secretaría de Planificación de Transporte.

tenían 328.979 viajes, mientras que en 2012 se tienen 676.007 viajes, un incremento del 105 %. En promedio, significa un aumento de un 9.4 % anual [27].

Paralelamente, el número de ciclovías construidas en Santiago ha aumentado significativamente. Según La Tercera [21], en el año 2003 se tenían aproximadamente 30 kilómetros de ciclovías construidas en Santiago, mientras que en el 2013 se tienen 230 kilómetros, con un crecimiento anual de 24,9 %, como se ve en la figura 1.11. Gracias a este incremento en el número de ciclovías y el fomento al uso de la bicicleta, el aumento de viajes diarios en bicicleta sube en un 6,8 % anual, según el estudio.

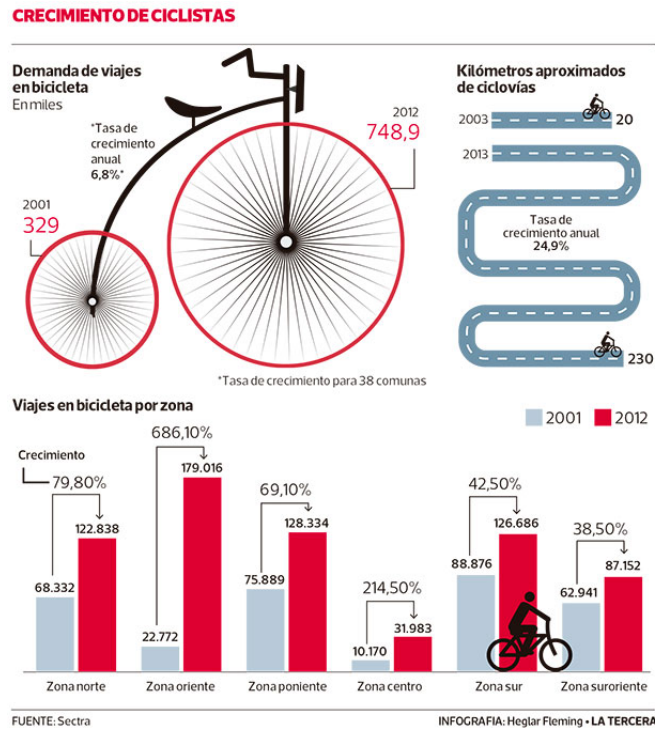


Figura 1.11: Aumento de ciclovías y ciclistas entre los años 2001 y 2012.

Fuente: [21].

1.3.2. Problemas de infraestructura

Como se había mencionado en la sección 1.2, las ciclovías de Santiago presentan discontinuidad. El 50 % de las ciclovías tiene dos o más tramos, e incluso en la Alameda, la ciclovía presenta 9 tramos [7]. Esto significa un problema para los ciclistas, ya que la ciclovía debería ser un tramo continuo exclusivo para el ciclista, pero al existir discontinuidad, debe hacer uso de la calle transitada por vehículos, aunque sea por un período breve, lo que aumenta el tiempo del viaje y el riesgo a un accidente.

Una estudio indica que cuando una ciclovía presenta discontinuidad de más de dos tramos, el 60 % de los usuarios prefieren no usar la ciclovía [6], si no que utilizan la vereda o calzada. De este mismo estudio, se señalan los problemas que presenta la infraestructura: 65 % de los tramos de ciclovía presentan buen estado, 24 % presentan estado regular y 11 % presentan mal estado. El mal estado de las ciclovías puede aumentar la probabilidad de sufrir un accidente.

1.3.3. Accidentes con participación de bicicletas en Santiago

Con una participación del 4 % del total de los viajes en Santiago y más de 700.000 viajes diarios, es esperable que existan accidentes relacionados con los ciclistas. Un diagnóstico realizado por el Ministerio de Transporte indica lo siguiente:

CONASET (2012) Según la base de datos proporcionada por Carabineros de Chile, en el área se registran un total de 14.062 accidentes de tránsito con participación de bicicletas durante el período 2002-2011 con un saldo de 345 víctimas fatales y de 13.568 lesionados de diversa consideración (2.349 graves, 1.451 menos graves y 9.768 leves). El 77,4 % de éstos, ocurrió en intersecciones de calles.

De los accidentes registrados, sólo el 17,3 % se localizaron dentro de una distancia de 50 metros de una ciclovía.

La mayoría de los accidentes (91,3 %), ocurren en las intersecciones y el resto en un tramo de la vía. Incluso, considerando los 24 puntos críticos donde ocurren los accidentes, sólo 7 de esos puntos se encuentran dentro de una ciclovía.

Respecto a la causa de los accidentes, un estudio realizado por la CONASET [9] revela que la mayoría de los accidentes ocurren por una colisión con un automóvil (85,6 %) y que la causa se debe en más de la mitad de los casos a la imprudencia del conductor. El detalle se ve en la figura 1.12.

Por lo tanto, se puede ver la importancia de la infraestructura de las ciclovías. Al ocurrir la mayoría de los accidentes fuera de las ciclovías, indica que existe una demanda mayor de infraestructura para los ciclistas. Además, si la ciclovía es de tipo independiente, se reduce la probabilidad de cruzarse con una intersección o automóvil, lo que puede reducir la cantidad de accidentes.

1.3.4. Complementos para las ciclovías

Desde el 2013, *Bikesantiago* comenzó a operar un sistema de bicicletas compartidas, donde los usuarios inscritos a este sistema pueden hacer uso de sus 300 bicicletas públicas disponibles en 30 distintas estaciones. Actualmente, cuenta con 1.881 bicicletas disponibles en 132 estaciones [12] y el proyecto contempla un total de 2.100

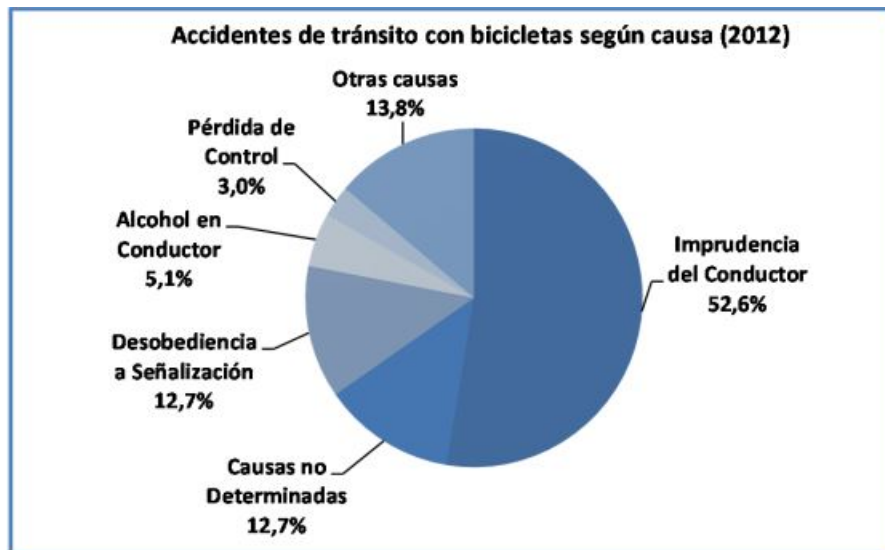


Figura 1.12: Proporción de las causas de accidentes de tránsito en bicicletas en 2012.

Fuente: [9]

bicicletas en 140 estaciones. Además de este proyecto, *Bici Las Condes* contempla 500 bicicletas repartidas en 50 estaciones de Las Condes ³.

Además de bicicletas públicas, existen estacionamientos para bicicletas. En el metro de Santiago, 9 estaciones cuentan con estacionamiento para bicicletas, con un costo de \$300 diarios. Según datos entregados por *Mapcity*, existen 184 estacionamientos de bicicletas disponibles en la ciudad de Santiago.

³Fuente: Bici Las Condes.

1.3.5. Plan para el futuro

El Plan Maestro de Transporte Santiago 2025 [10] es un instrumento de planificación para el transporte en Santiago para el año 2025, donde se proyecta la cantidad de viajes y la infraestructura que tendrá Santiago en el futuro. Este plan contempla una inversión total de 22.510 millones de dólares, entre concesiones viales, transporte público, red de metros y otras tecnologías y ciclovías, entre otras.

La inversión proyectada para la ciclovías es de 398 millones de dólares, separado en 5 etapas, aumentando la cantidad de ciclovías a 856 kilómetros (ver figura 1.13).

Se puede ver que existen planes concretos para expandir la infraestructura de las ciclovías en Santiago, mostrando la importancia que tiene este medio de transporte y el uso diario que se le da.

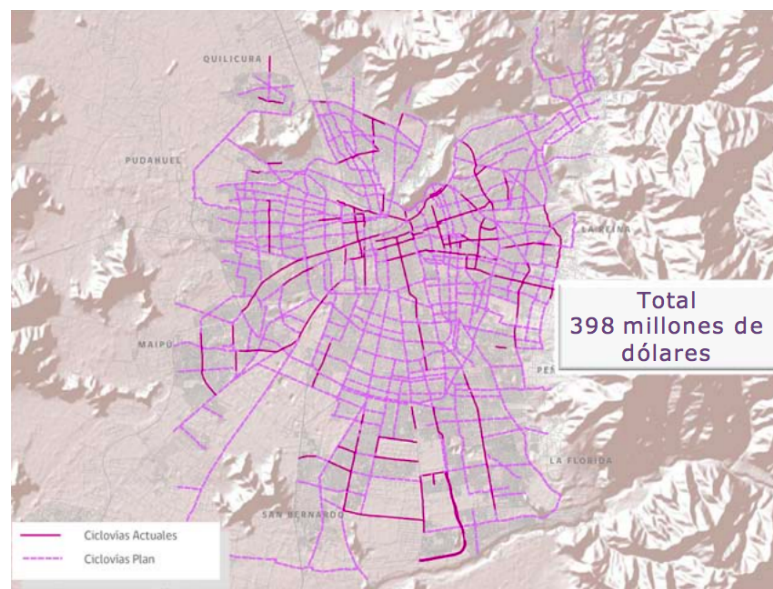


Figura 1.13: Infraestructura proyectada al 2025

Fuente: PMTS 2025

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se detalla cómo se realiza este estudio, comprendiendo los instrumentos a utilizar, ciclovías elegidas para estudiar y cómo se utiliza la información obtenida. Se define un tiempo de muestreo de 8 semanas, tiempo suficiente para reducir errores aleatorios en las mediciones y obtener la información necesaria para este estudio.

2.1. Instrumentos y equipos

A continuación se presentan los instrumentos, equipos y accesorios utilizados al realizar las mediciones.

2.1.1. MicroAeth AE51

El etalómetro (figura 2.1)¹ es el más importante para el estudio, ya que es el monitor de carbono negro. Su función es tomar muestras de aire y analizarlas en tiempo real. Su principio de funcionamiento es tomar una muestra de aire, la cual es depositada en un filtro, del cual se mide el cambio de absorción de luz transmitida, debido a la colección continua del carbono negro en el filtro. La unidad de medición es masa de carbono negro por unidad de volumen de aire ($[ng/m^3]$).

- **Rango:** 0 – 1 $[mg/m^3]$.

¹microAeth AE51 Operating Manual



Figura 2.1: Equipo etalómetro microAeth AE51 con manguera.

- **Resolución:** $0,001[\mu g/m^3]$.
- **Precisión:** $\pm 0,1[\mu g/m^3]$.
- **Frecuencia de medición:** 1 segundo, 1 minuto, 5 minutos, según elección de usuario.
- **Flujo de muestra:** 50, 100, 150 $[mL/min]$ de aire, entregado por la bomba interna.
- **Manejo de datos:** 4 MB de memoria interna (1 semana de datos con muestras de 1 minuto de frecuencia).
- **Dimensiones:** 117 mm x 66 mm x 38 mm.
- **Peso:** 280[g].

Este equipo se conecta a un computador utilizando un puerto USB y se utiliza el software entregado por *microAethCOM*, el cuál maneja la información y permite configurar el equipo.

2.1.2. Unidad VAM

Es necesario saber en qué ubicación se tomaron las mediciones y el GPS (*Global Positioning System*) es el que se encarga de registrar la ubicación geográfica asociada a

la medición. La unidad VAM (figura 2.2) ² es un instrumento que incluye GPS, antena de comunicación y sensores de movimiento, como acelerómetro, todo lo cual permite conocer la latitud, longitud y velocidad del usuario.



Figura 2.2: Unidad GPS VAM.

2.1.3. GPS Visualizer

Utilidad *on-line*³, la cual permite agregar información fácilmente a un archivo de coordenadas GPS. Agrupa la información entregada por el equipo microAeth AE51 y la unidad VAM y la entrega en un archivo de texto. Además, esta información se puede ver utilizando Google Maps⁴.

2.1.4. GoPro

Cámara portátil utilizada para registrar las observaciones realizadas durante las mediciones (ver figura 2.3). Es útil ya que puede asociar un evento específico a una variación considerable de carbono negro y registrarlo en video.

²VAM Instruction Booklet

³<http://www.gpsvisualizer.com/>

⁴<https://maps.google.com>



Figura 2.3: Cámara Go Pro.

2.1.5. Google Earth

Este programa se utiliza para poder representar gráficamente los datos entregados por GPS Visualizer. Contiene una serie de herramientas las cuales permiten manejar los datos y adaptarlos de manera cómoda a un mapa en 3D.

2.1.6. Equipos de seguridad

Debido a la cantidad de horas que se transita por la calle y el riesgo que esto conlleva, se está equipado con una serie de medidas de seguridad, las cuales incluyen un chaleco reflectante, guantes protectores, máscara con filtro de material particulado, cintas reflectantes y por supuesto, casco. Todos estos implementos, más los equipos de medición llevados en una mochila, se pueden ver en la figura 2.4.



Figura 2.4: Equipo completo para realizar las mediciones.

2.2. Tipología de ciclovías

2.2.1. Selección de rutas

Como ya se explicó en la sección 1.2, existen tres tipos de ciclovías: **independientes**, **segregadas** y **compartidas**, y la exposición a contaminantes entre ellas es distinto producto de la cercanía a las fuentes de emisión. Es por esto que, para este estudio, es necesario analizar la exposición para los tres tipos de ciclovías.

En la tabla 2.1 se muestra las ciclovías seleccionadas para este estudio. En total, son 78 kilómetros de ciclovías, repartidas en 42,63 kilómetros de ciclovías independientes, 12,64 kilómetros de ciclovías segregadas y 22,77 kilómetros de ciclovías compartidas. Cabe destacar que no todas estas ciclovías son de un sólo tipo, ya que en algunas hay secciones donde se cambia el tipo de ciclovía. Se indica el tipo de ciclovía que corresponde al mayor tramo. La figura 2.5 muestra un mapa de las ciclovías seleccionadas, donde se diferencian los tipos de ciclovía según el color: verde para ciclovías independientes, azul para las segregadas y rojo para calles compartidas sin ciclovía.

Nombre	Tipo	Longitud [km]
Alameda	Independiente	9,7
Las Perdices	Independiente	8,46
Grecia	Independiente	8,24
Costanera	Independiente	7,21
Sánchez Fontecilla	Independiente	6,28
Pocuro	Independiente	2,74
Antonio Varas	Segregada	3,86
Ricardo Lyon	Segregada	3,72
General Bulnes	Segregada	2,18
Latadia	Segregada	1,93
Isabel La Católica	Segregada	0,955
Americo Vespucio	Compartida	9,91
Macul	Compartida	6,09
Príncipe de Gales	Compartida	3,49
Agustinas	Compartida	3,28

Tabla 2.1: Ciclovías seleccionadas para este estudio.

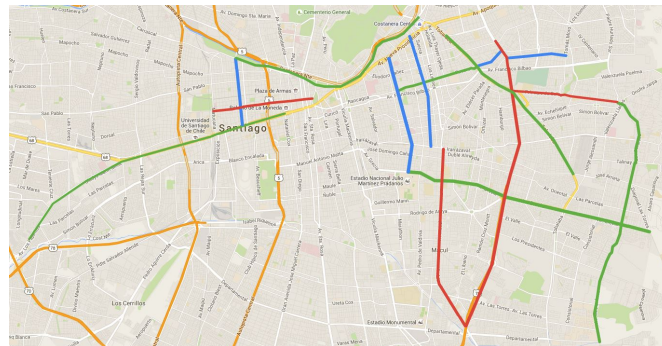


Figura 2.5: Ciclovías seleccionadas para este estudio. En verde se indican las ciclovías independientes, en azul las segregadas, y en rojo las compartidas.

Fuente: Google Maps

2.2.2. Tiempo de medición

La exposición a contaminantes del ciclista no será la misma durante todo el día, ya que la concentración de vehículos y, por lo tanto, de fuentes de contaminantes, varía durante el día. Como se vio en el capítulo anterior, existe una mayor concentración de contaminantes durante la hora punta de la mañana (07:00 - 09:00 hrs), la cual disminuye con el pasar de las horas y vuelve a aumentar levemente a la segunda hora punta del

día (17:00 - 19:00). Estos horarios son los más importantes al momento de realizar las mediciones porque son aquellos con mayor concentración de contaminantes.

Se define entonces mediciones a realizar desde el 3 de mayo, hasta el 7 de junio de 2016, fecha donde se devuelven los instrumentos de medición. Se toman mediciones por lo menos día por medio, con un mínimo de 4 horas por día (cubriendo ambas horas punta), realizando un total de 43 horas donde se toman las muestras de aire. Dentro de este rango de fechas se incluyen dos semanas dedicadas a tomar muestras durante el horario valle, para completar el espectro entre la hora punta de la mañana y de la tarde. El total de datos recolectados se puede ver en la tabla 2.2

Equipo	Total de eventos muestreados	Tasa de muestreo	Horas de medición
Vam	146.225	1 segundo	40,61
AE51	154.769	1 segundo	42,99

Tabla 2.2: Cantidad de datos tomados por cada instrumento.

La cantidad de datos es menor al total que se estimó originalmente, ya que se tuvieron que devolver los instrumentos prematuramente por motivos de fuerza mayor. Pese a esto se tiene una gran cantidad de datos y redundancia en los recorridos, por lo que se puede realizar un análisis de los resultados.

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las muestras tomadas entre el 3 de mayo y 7 de junio de 2016 en las ciclovías seleccionadas (ver tabla 2.1.

Las mediciones realizadas entregan cuatro campos de información: **latitud**, **longitud**, **hora** y **exposición** de carbono negro. Estos datos fueron procesados y complementados con información adicional, con lo que quedaron los siguientes campos como resultados:

- **TimeWhen:** Fecha y hora del evento
- **Latitud**
- **Longitud**
- **BC:** Exposición de carbono negro en ng/m^3
- **color :** Utilizado para la visualización en Google Maps
- **Ciclovía:** Ciclovía o calle donde se realiza la medición.
- **Horario:** Horario punta de mañana, tarde, u horario valle
- **Tipo:** Corresponde al tipo de ciclovía, ya sea ciclopista, ciclobanda, ciclocalle, o compartida sin ciclovía
- **Peak:** Aquellos valores por sobre los $100,000[ng/m^3]$ de carbono negro. Utilizado para encontrar valores particularmente elevados

- **MP 2.5** : Promedio diario de material particulado 2,5 de la estación de monitoreo más cercana
- **MP 10** : Promedio diario de material particulado 10 de la estación de monitoreo más cercana

Se realizaron más de 42 horas de medición, lo que entrega más de 154.000 datos. De estos datos, se tienen los siguientes resultados:

Las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 muestran los valores estadísticos sobre la exposición para los tipos de ciclovía, separado por horario.

Horario AM	Independiente	Segregada	Compartida
n	24.714	8.574	9.050
Min	457	3.362	2.547
Mediana	8.582	11.215	13.800
Max	149.576	52.136	303.287

Tabla 3.1: Valores estadísticos de exposición a carbono negro en $[ng/m^3]$ para ciclovías en horario punta de la mañana.

Horario PM	Independiente	Segregada	Compartida
n	24.869	10.257	10.824
Min	100	100	477
Mediana	6.657	9.853	9.122
Max	592.550	637.755	96.015

Tabla 3.2: Valores estadísticos de exposición a carbono negro en $[ng/m^3]$ para ciclovías en horario punta de la tarde.

Horario AM	Independiente	Segregada	Compartida
n	15.702	10.395	9.926
Min	100	100	1.381
Mediana	5.297	9.846	11.401
Max	104.349	239.597	178.667

Tabla 3.3: Valores estadísticos de exposición a carbono negro en $[ng/m^3]$ para ciclovías en horario valle.

En la figura 3.1 se puede ver el 95 % de los datos, estando el otro 5 % repartidos entre los 30.000 y 3.235.000 $[ng/m^3]$.

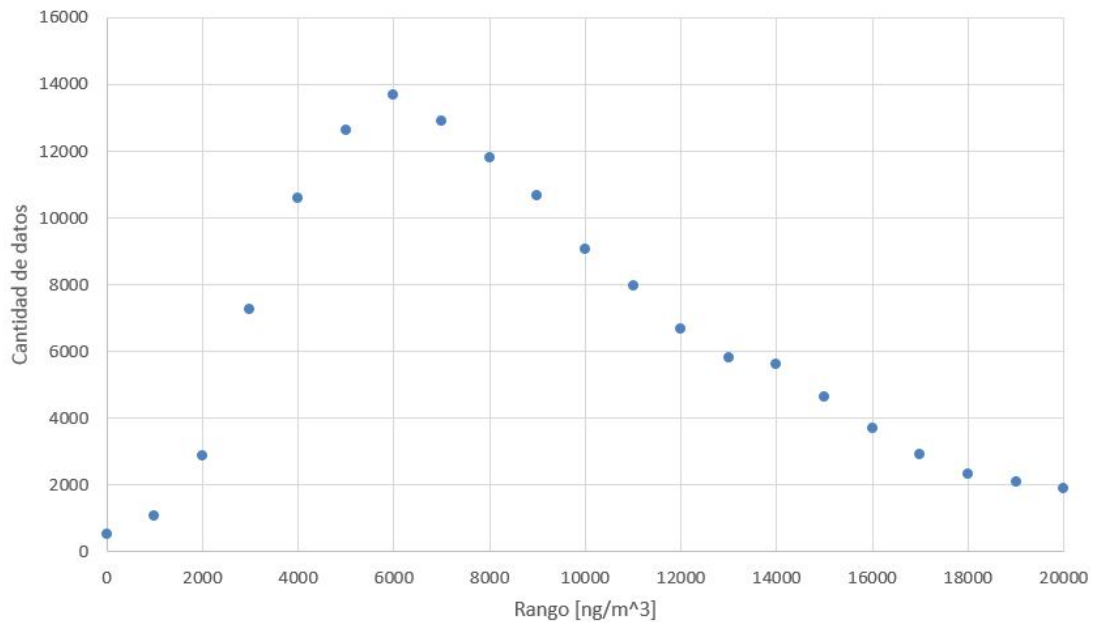


Figura 3.1: Frecuencia de datos dentro de un cierto rango

- **Promedio:** 12.844,13 [ng/m^3]
- **Mediana:** 8.360,63 [ng/m^3]
- **Desviación estándar:** 35.480,55 [ng/m^3]

Se puede ver que la desviación estándar de las mediciones es muy alta, indicando que existen una gran cantidad de datos muy alejados de la media. Este valor corresponde a la desviación estándar de todos los recorridos del estudio, mientras que para cada recorrido individual la desviación estándar disminuye considerablemente.

En la tabla 3.4 se presenta la cantidad de recorridos realizados entre el 3 de mayo y 7 de julio de 2016. El detalle de fechas, promedio de exposición y distribución estándar, se puede encontrar en la tabla A.1 en el anexo.

En total, se cumple con el objetivo de recorrer todas las ciclovías en los tres horarios reiteradas veces, excepto en el caso de Alameda, Costanera y General Bulnes, donde no se logró realizar el recorrido en el horario valle, y Agustinas, donde se decidió no realizar el recorrido por ser una calle muy estrecha y transitada, siendo un riesgo para el ciclista.

Ciclovia	M	V	T	Total
Agustinas	0	0	1	1
Americo Vespucio	1	2	2	5
Macul	1	2	2	5
Principe de Gales	2	2	1	5
Alameda	1	0	2	3
Costanera	1	0	2	3
Grecia	2	1	2	5
Las Perdices	3	1	1	5
Pocuro	3	1	2	6
Sanchez Fontecilla	3	3	3	9
Antonio Varas	3	2	3	8
General Bulnes	1	0	2	3
Isabel La Católica	3	8	2	13
Latadia	2	5	5	12
Ricardo Lyon	1	2	2	5
Total	27	29	32	88

Tabla 3.4: Cantidad de recorridos para cada ciclovia, ordenadas primero por tipo y luego en orden alfabético. Las columnas indican los horarios: mañana, valle y tarde, respectivamente.

3.1. Mapa de exposición

A continuación se presentan una serie de imágenes mostrando la exposición relativa al carbono negro, mostrando en color verde las ciclovías independientes, azul las segregadas y en rojo las compartidas. Estas imágenes sirven como un resumen de la exposición, sin necesariamente entrar en detalles sobre concentración.

Cabe mencionar que cada punto está alejado en 10 segundos del siguiente, de tal manera que se puedan ver con mayor facilidad.

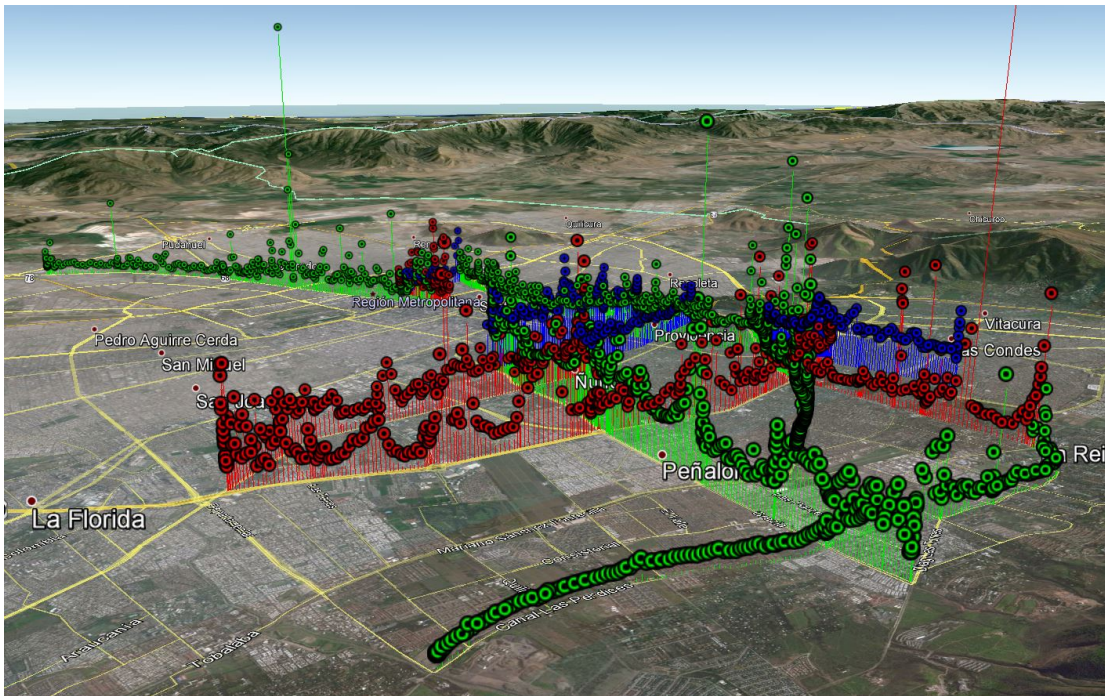


Figura 3.2: Exposición relativa de carbono negro para Santiago. Datos tomados entre el 3 y 9 de mayo de 2016.

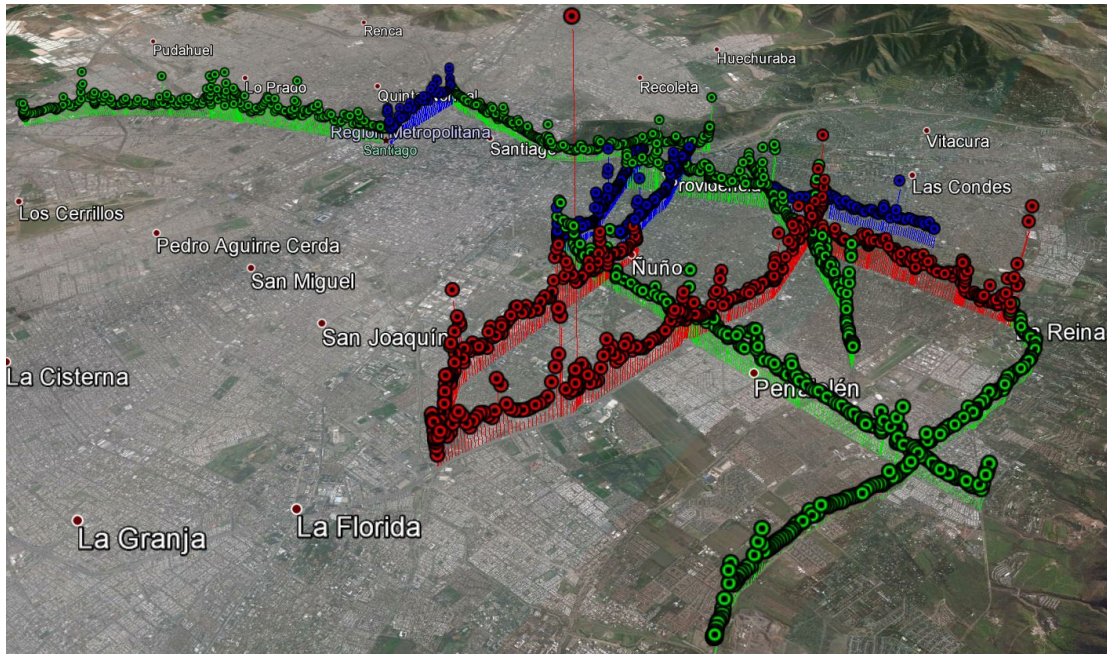


Figura 3.3: Exposición relativa de carbono negro para Santiago. Datos tomados entre el 13 y 19 de mayo de 2016.

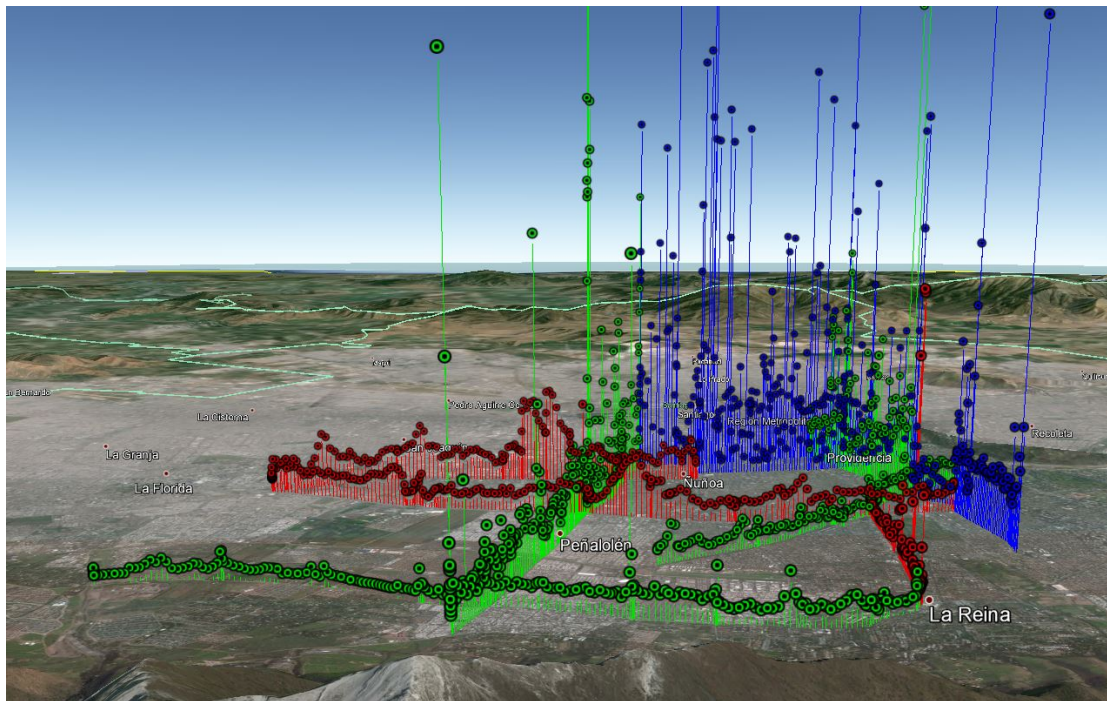


Figura 3.4: Exposición relativa de carbono negro para Santiago. Datos tomados entre el 26 de mayo y 7 de junio de 2016.

Se puede ver que existen grandes variaciones de exposición incluso dentro de un mismo recorrido, reflejo de la variabilidad que se mencionó en la sección ???. Esto es esperable, ya que durante el recorrido puede suceder una serie de eventos aleatorios, los cuales no necesariamente tengan relación con la geografía o geometría de la zona, sino con el contexto del recorrido, como por ejemplo, la densidad vehicular.

3.2. Tipo de ciclovia

La figura 3.5 corresponde al promedio de exposición para cada ciclovia, donde se incluyen los tres tipos de horario. En rojo se presenta el recorrido individual con menor exposición promedio, Las Perdices, el 5 de mayo, con una exposición promedio de $3.589 [ng/m^3]$.

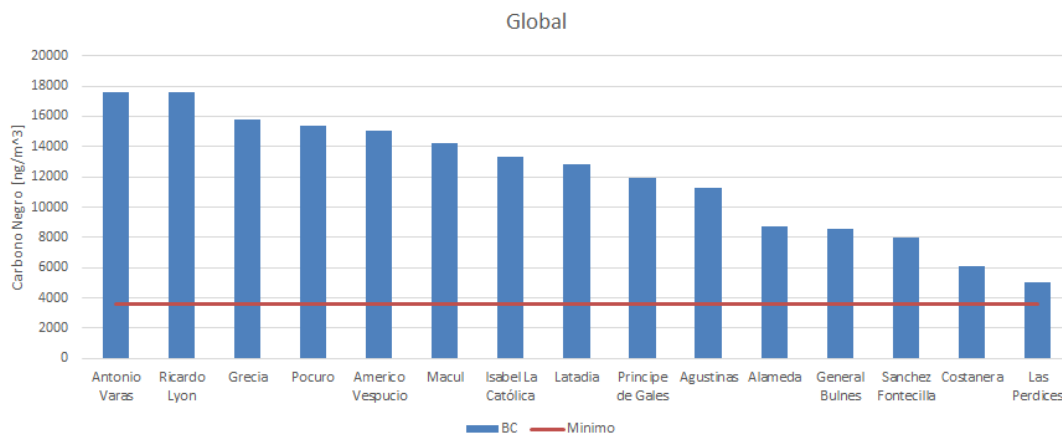


Figura 3.5: Promedio de carbono negro para cada ciclovia en este estudio.

La ciclovia con menor exposición promedio es Las Perdices, con $5.096,2 [ng/m^3]$ y aquella con mayor exposición promedio es Antonio Varas, con $17.615 [ng/m^3]$. El promedio de exposición para todas las ciclovías es de $12.062 [ng/m^3]$.

Como se mencionó en la sección 1.2, existen tres tipos de ciclovías: independientes, segregadas y compartidas. La disposición espacial de cada tipo influye en la exposición del ciclista, como se ve en la figura 3.6.

Se puede ver que las ciclovías independientes tienen la menor exposición de carbono negro para el ciclista, teniendo un promedio de $9.778,6 [ng/m^3]$, mientras las

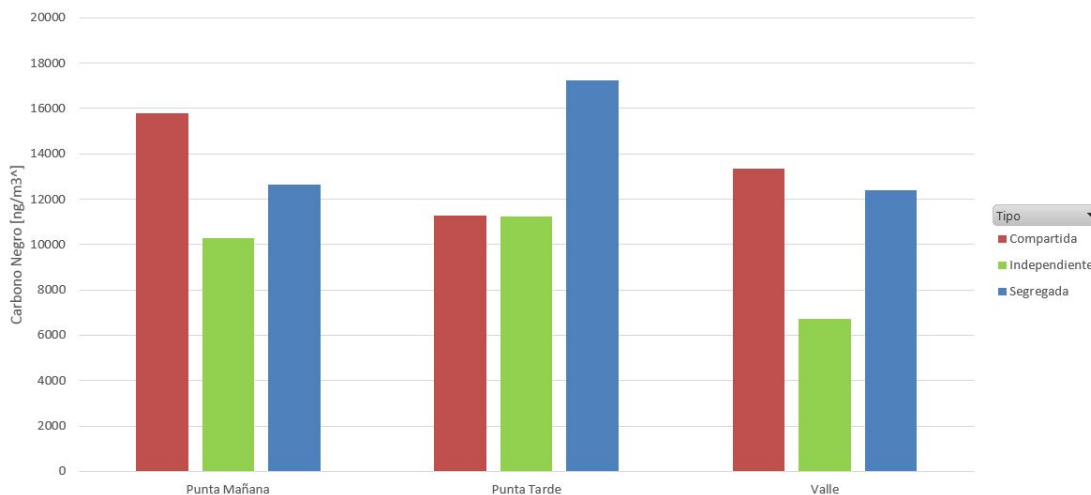


Figura 3.6: Promedio de exposición para cada tipo de ciclovía para los tres horarios definidos en este estudio.

ciclovías segregadas y calles compartidas sin ciclovía tienen un promedio de 15.102,1 $[ng/m^3]$ y 14.085,5 $[ng/m^3]$, respectivamente.

3.3. Calidad de aire

La figura 3.7 muestra la contaminación de fondo promedio asociada a cada ciclovía¹. Se puede ver que la calidad de aire no es un factor que pueda indicar que el ciclista tendrá mayor exposición de carbono negro en una ciclovía respecto a la otra. La ciclovía de Las Perdices presenta el segundo mayor nivel de $MP_{2,5}$ promedio entre las ciclovías estudiadas, con 44,25 $[\mu g/m^3]$ y es la ciclovía que presenta, en promedio, la menor exposición de carbono negro, con 5.096 $[ng/m^3]$. Lo contrario ocurre en la ciclovía Antonio Varas, donde, pese a tener una concentración promedio de 26,77 $[\mu g/m^3]$ de $MP_{2,5}$, presenta la mayor exposición de carbono negro, con un promedio de 18.106 $[ng/m^3]$.

Se puede ver en mayor detalle la variación de la calidad de aire para cada recorrido en la figura 3.8.

¹Fuente: Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire, Ministerio del Medio Ambiente. Valores corresponden al promedio diario de la estación más cercana a la ciclovía mencionada. Ver detalle en tabla A.1

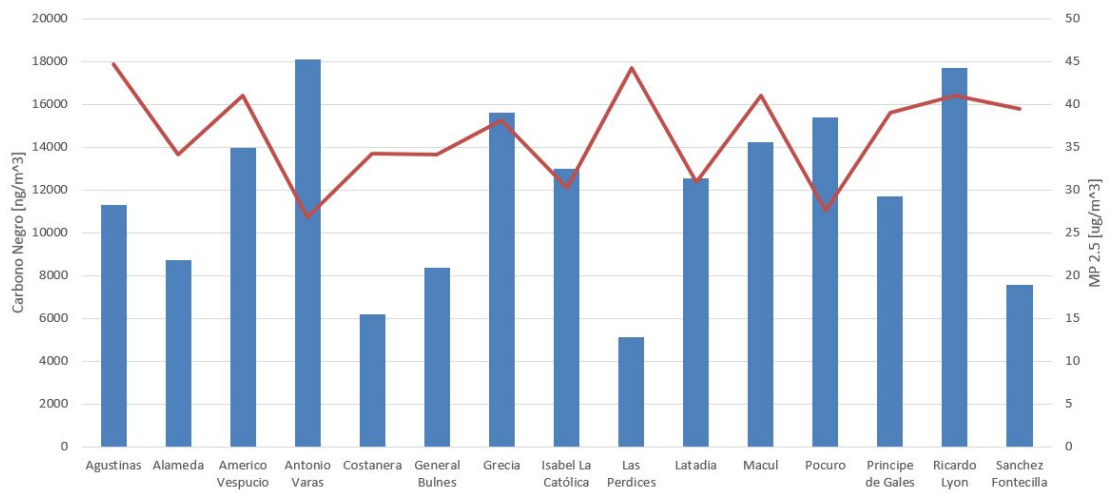


Figura 3.7: Promedio para nivel de exposición de carbono negro por ciclovía en azul y promedio de calidad de aire según material particulado 2.5 en rojo.

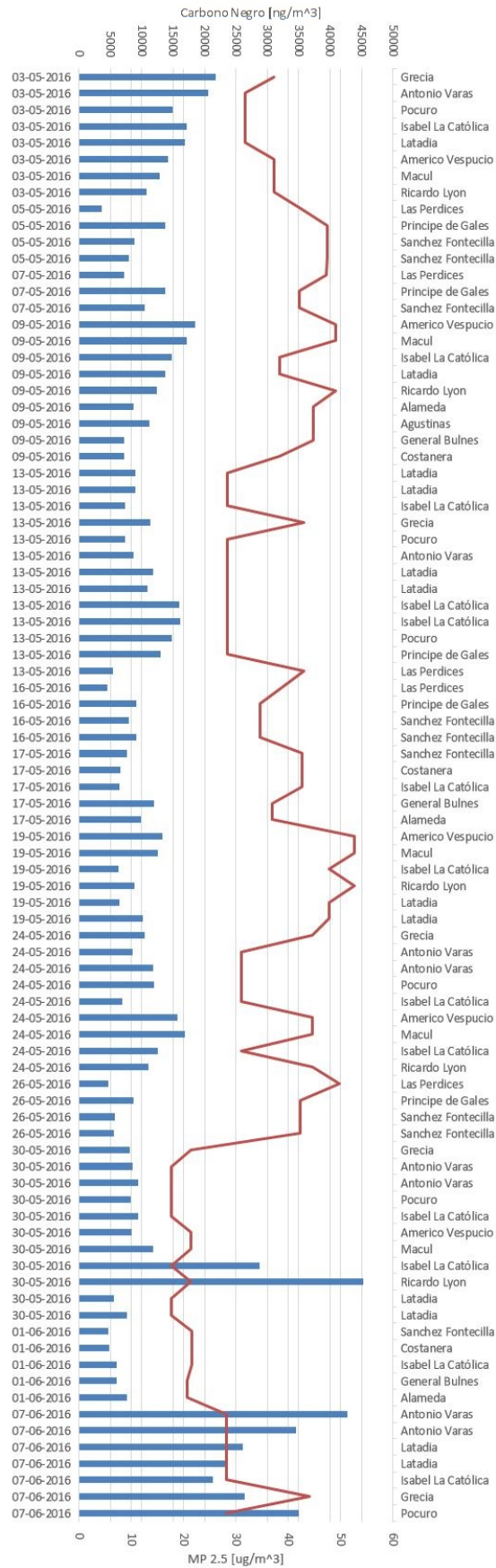


Figura 3.8: Calidad de aire para cada recorrido realizado en este estudio en rojo y nivel de exposición de carbono negro en azul.

Para los tres tipos de horario de este estudio se tienen promedios de calidad de aire bastante similares, siendo la tarde el horario con la mejor calidad de aire, con un promedio de $32,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el horario valle y punta mañana tienen una calidad de aire promedio de $39,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Nuevamente se puede ver que la calidad de aire no tiene relación directa con la exposición del ciclista a carbono negro, como se muestra en la figura 3.9

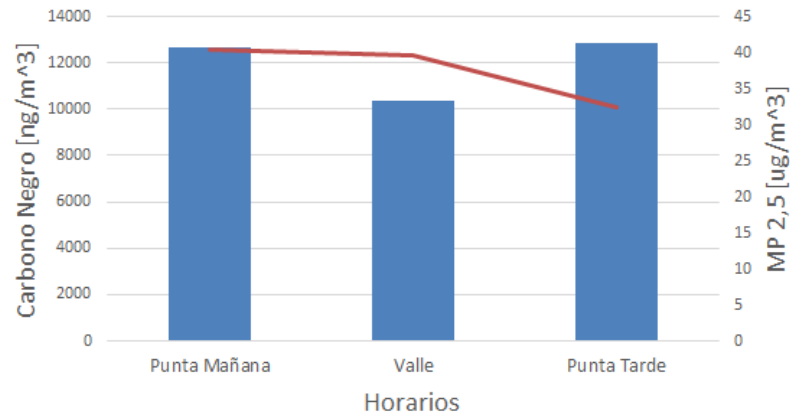


Figura 3.9: Calidad de aire promedio en línea roja y promedio de carbono negro en azul según horario.

3.4. Horarios de medición

En la figura 3.10 se muestra la exposición promedio de cada ciclovía para cada horario. Para el horario de la tarde existen dos casos que son mucho mayores al resto: Antonio Varas y Ricardo Lyon. Además, la figura 3.6 muestra los distintos promedios de exposición según el horario. Si se promedian los tres tipos de ciclovía para cada horario, se tiene que el horario valle es donde se tiene la menor exposición, con un promedio de $10.332 \text{ ng}/\text{m}^3$, mientras que el horario punta de la tarde presenta una exposición promedio de $12.857 \text{ ng}/\text{m}^3$ y, finalmente, el horario punta de la mañana presenta un promedio de exposición de $12.665 \text{ ng}/\text{m}^3$.

Según estos datos, no hay una gran diferencia de exposición entre los horarios de la hora punta de la tarde y la mañana, pero sí se ve una reducción de exposición en el horario valle. Esto concuerda con los estudios analizados en el estado de arte.

A continuación se presenta un ranking de exposición de las ciclovías para cada horario, el cual corresponde a una descomposición de la figura 3.5, la cual considera la

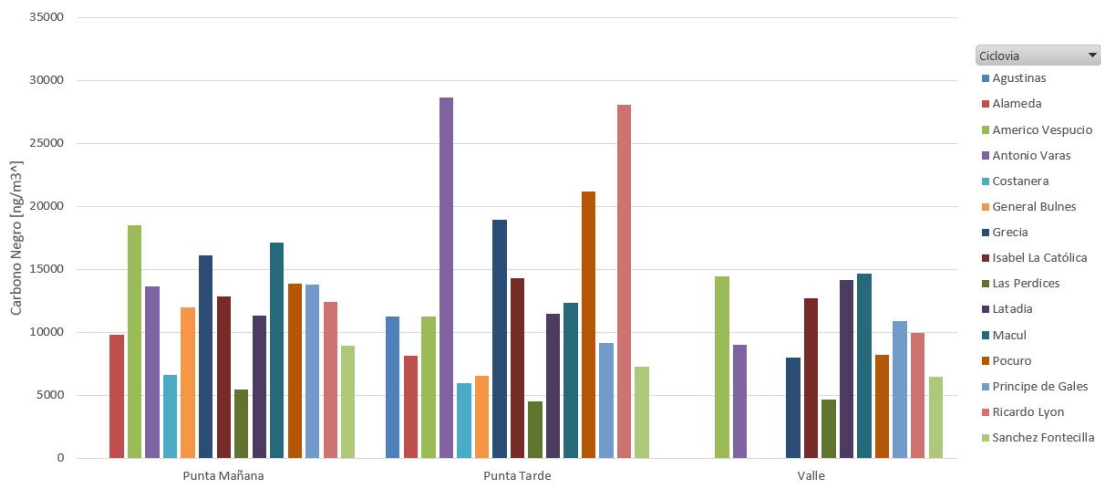


Figura 3.10: Promedio de exposición para cada ciclovía según el horario.

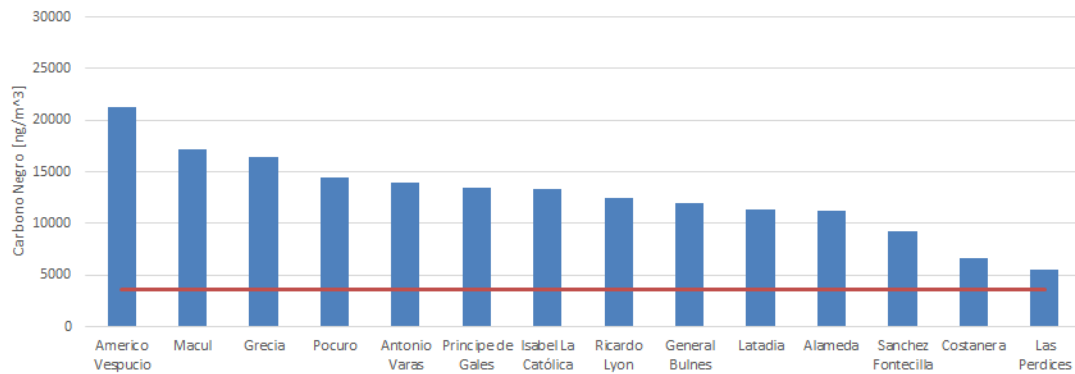


Figura 3.11: Ranking de exposición en ciclovías en el horario punta de la mañana.

exposición promedio de los tres horarios. En rojo se presenta la menor exposición de un recorrido individual para cada horario.

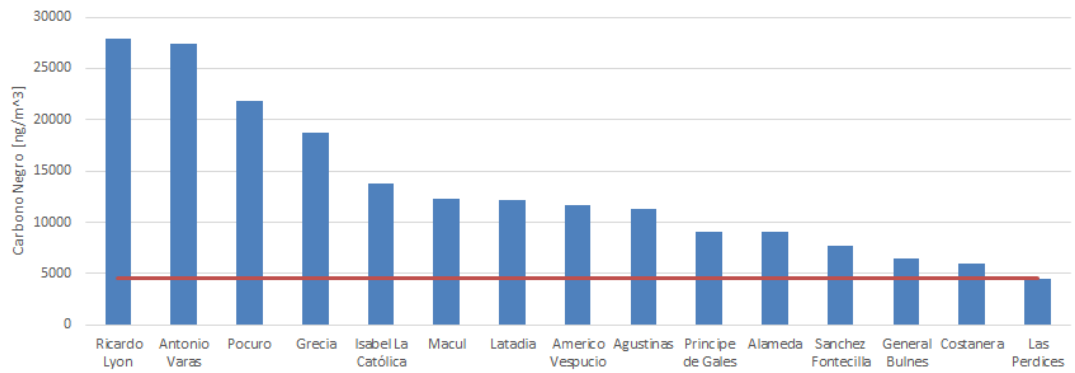


Figura 3.12: Ranking de exposición en ciclovías en el horario punta de la tarde.

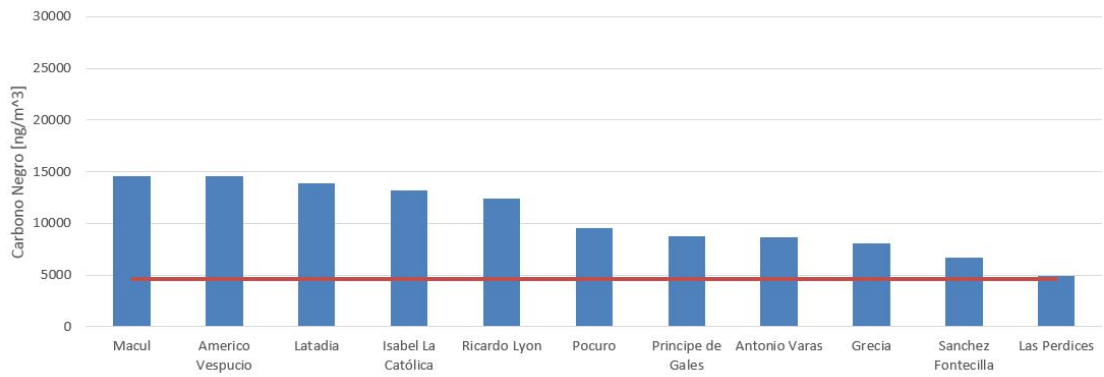


Figura 3.13: Ranking de exposición en ciclovías en el horario valle.

3.5. Combinación de ciclovías y horario

En las secciones 3.2 y 3.4 se habla de las características para cada tipo de ciclovía y horario, pero no se entra en énfasis para ambos casos simultáneamente. En total, se tienen 9 casos, ya que son tres horarios para los tres tipos de ciclovía.

La figura 3.14 muestra la distribución estadística de exposición de carbono negro para las ciclovías en el horario punta de la mañana. Se puede ver que las ciclovías independientes son la que reciben menor exposición, mientras que las calles compartidas son la que reciben mayor exposición.

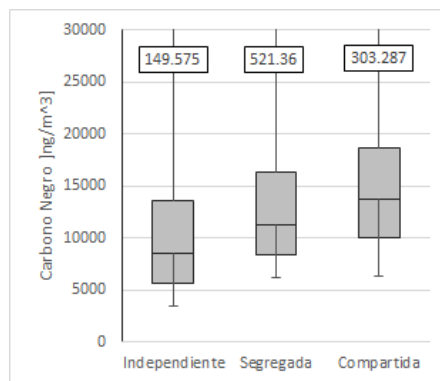


Figura 3.14: Diagrama de caja para ciclovías en horario punta mañana.

En contraste, la figura 3.15 muestra el caso para el horario punta de la tarde. Para este horario, las medias de exposición de los tres tipos de ciclovía bajan, al igual que los cuartiles de las ciclovías independientes y calles compartidas, pero el tercer cuartil de las ciclovías segregadas aumenta considerablemente. Además, para este horario se presentan los niveles más altos de exposición para las ciclovías segregadas e independientes.

Por último, la figura 3.16 muestra el diagrama de caja para las ciclovías en horario valle. Nuevamente las ciclovías compartidas muestran ser las ciclovías con mayor exposición para el ciclista. Además, se ve que para este horario los cuartiles están más cercanos a la media, indicando que este horario es el más estable en términos de exposición.

En conclusión se puede ver que existen algunas diferencias entre los horarios en general, pero el caso de las ciclovías segregadas para el horario punta de la tarde tiene diferencias significativas (se ve en más detalle en la sección 4.4). Se ven con mayor facilidad diferencias entre los tipos de ciclovía, teniendo menos exposición aquellas que

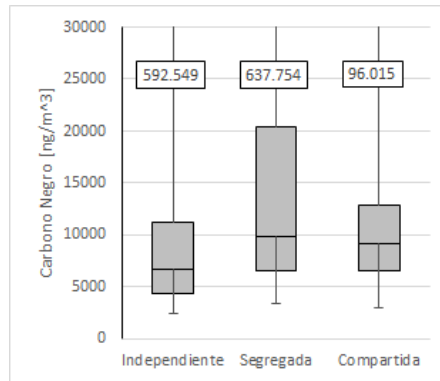


Figura 3.15: Diagrama de caja para ciclovías en horario punta tarde.

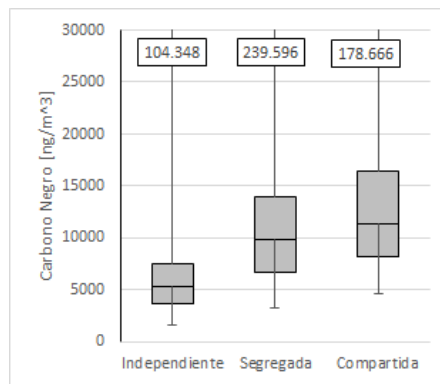


Figura 3.16: Diagrama de caja para ciclovías en horario valle.

tienden a estar más alejadas de los vehículos.

3.6. Flujo de ciclistas

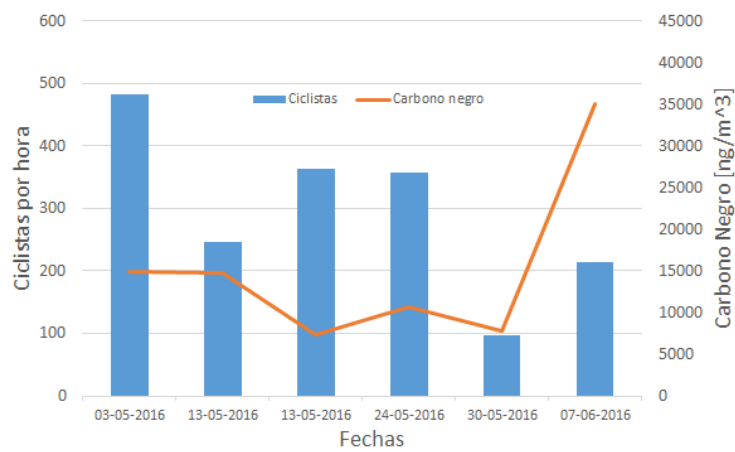
Para las dos ciclovías más transitadas de este estudio, Pocuro y Ricardo Lyon, se realiza un análisis más profundo: se incluye la cantidad de ciclistas que transitan durante las mediciones ².

En la figura 3.17 se ve el flujo de ciclistas en una hora, correspondiente al periodo donde se realizó la medición. El nivel de exposición de carbono negro corresponde al promedio del recorrido para la ciclovía mencionada durante aquel día.

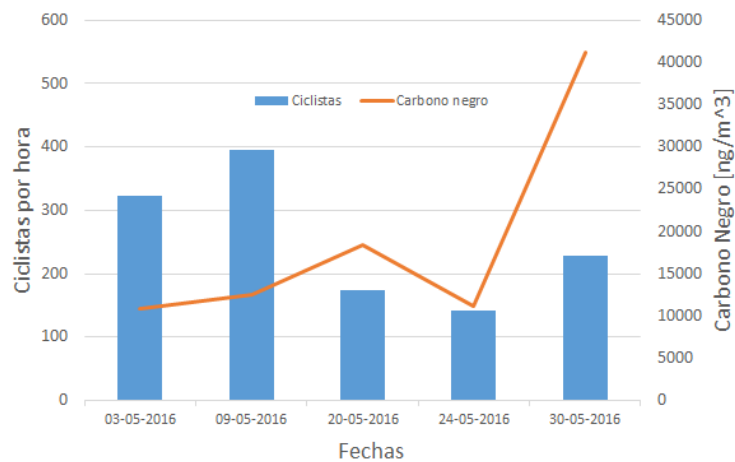
No existe una relación entre el flujo de ciclistas y la exposición a carbono negro, lo

²Datos aportados desde “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA DE INFRAESTRUCTURA ESPECIALIZADA PARA BICICLETAS”

que es de esperar, ya que el ciclista no tiene cómo saber a que nivel de este contaminante está expuesto, pero sí se puede observar un mayor flujo de ciclistas para la hora punta de mañana (9 de mayo para Ricardo Lyon y 3, 13 y 30 de mayo para Pocuro) respecto a la hora punta de la tarde (3, 24 y 30 de mayo para Ricardo Lyon y 24 de mayo y 7 de junio para Pocuro). Además, el horario valle es el horario con el menor flujo de ciclistas(20 de mayo para Ricardo Lyon y 13 de Mayo para Pocuro). Por último, se ve una tendencia a una mayor concentración de carbono negro para las últimas mediciones, las cuales corresponden al horario punta de la tarde. En la sección 4.4 se explica esta situación en detalle.



(a) Pocuro



(b) Ricardo Lyon

Figura 3.17: Flujo de ciclistas y exposición a carbono negro.

3.7. Puntos de alta exposición

Es necesario analizar aquellas mediciones que fueron notoriamente elevadas. A partir de la figura 3.1, se tiene que concentraciones sobre los $86.000 \text{ [ng/m}^3\text{]}$ están por sobre el 99 % de los datos. Estos niveles serán considerados como hot spots, es decir, puntos donde los niveles son muy superiores al promedio y donde es necesario buscar la causa de estos niveles.

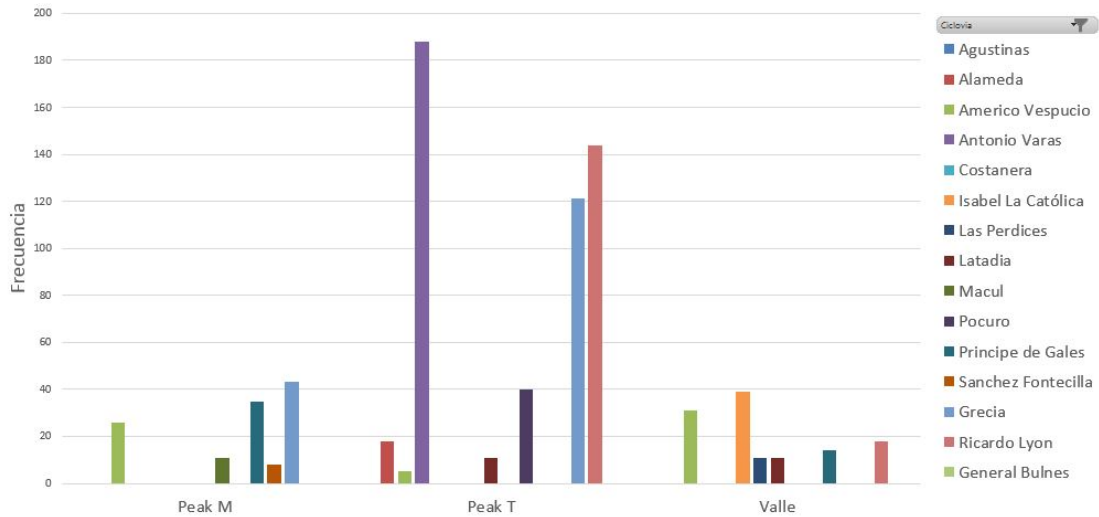


Figura 3.18: Cantidad de veces que se presentan hotspots para cada ciclovia, separado por horarios.

De la figura 3.18 se puede ver que el horario punta de la tarde es aquel que tiene la mayor cantidad de hotspots, con 527 casos, frente a los 123 casos del horario punta de mañana y 124 del horario valle.

Haciendo un análisis más profundo, la mayoría de estos casos están repartidos para las siguientes mediciones:

- 30/05/2016, Ricardo Lyon : 144 hotspots
- 07/06/2016, Antonio Varas: 188 hotspots
- 07/06/2016, Grecia: 121 hotspots

Estos tres recorridos contienen el 58,5 % de los hotspots de este estudio. Más aún, el recorrido de Grecia del 7 de junio presenta la mayor exposición registrada por la cámara, con $491.020 \text{ [ng/m}^3\text{]}$ al estar en una intersección con un alto tránsito vehicular, incluyendo buses de Transantiago.

Estudiando el contexto de los hotspots captados por la cámara, se puede encontrar dos casos comunes: camiones e intersecciones congestionadas donde se tiene que esperar el cruce.

3.8. Impacto de motores Diesel

Otro de los responsables para muchos de los hotspots se le puede atribuir a camiones de gran tamaño, buses de Transantiago e incluso a vehículos medianos con motor Diesel. En las siguientes imágenes (3.19 y 3.20) se muestran ejemplos de casos donde se les puede atribuir estos hotspots a vehículos de gran tamaño.



Figura 3.19: Exposición de 162.441 [ng/m^3]

La causa de esto se debe al tipo de motor que utilizan los buses, camiones y vehículos de gran tamaño o transporte en general. En la página 9 se menciona a estos vehículos como uno de los grandes responsables de las emisiones de carbono negro. Estos vehículos, por lo general, utilizan un motor Diesel de gran cilindrada, los cuales queman una gran cantidad de combustible, pero no necesariamente de manera completa. Un porcentaje de este combustible no quemado es emitido a la atmósfera, llevando consigo gran cantidad de material particulado. Un estudio indica que los camiones pesados, como los utilizados para el transporte de contenedores o cargas de similar tamaño, emiten hasta 1.440 [mg] de carbono negro por cada kilogramo de combustible quemado [22].



Figura 3.20: Exposición de 152.706 [ng/m^3]

3.9. Impacto de intersecciones

En este caso, más que un elemento en concreto, se tiene una situación donde el ciclista está expuesto durante un largo periodo de tiempo a un gran flujo vehicular. Cuando se está esperando cruzar una calle y en especial cuando ésta está congestionada, no son sólo los vehículos detenidos que van en el sentido del ciclista los que emiten carbono negro, sino que además se está expuesto al tránsito en sentido perpendicular. Mientras más tiempo se espera el cruce, mayor es la cantidad de vehículos que se cruzarán frente al ciclista y, por lo tanto, se estará vulnerable a una mayor exposición.

Se puede ver en la figura 3.21 dos casos en donde se espera un cruce y donde, eventualmente, se tiene mayor exposición. En ambos casos se aprecia una mayor concentración de datos (círculos), indicando que hubo un tiempo de espera para cruzar.

Finalmente cabe mencionar que al estar en una intersección o cerca de un camión no significa que se estará necesariamente expuestos a estos altos niveles, por lo contrario, se tienen muchas instancias de intersecciones y recorridos realizados juntos a buses de Transantiago sin tener niveles más altos de lo normal.

Capítulo 4

Conclusiones

De este estudio se concluye que se cumplió de manera satisfactoria el objetivo general de analizar la exposición de carbono negro en los ciclistas, considerando distintos horarios y tipos de ciclovía. Se tienen las siguientes conclusiones, obtenidas a partir de los resultados del capítulo anterior y con lo estudiado en el estado del arte.

La concentración de carbono negro a la cual se expone el ciclista varía enormemente. Se pueden notar diferencias entre las ciclovías y los horarios a los que puede optar el ciclista, pero incluso dentro de un mismo recorrido, bajo similares condiciones, existe una gran variación en la exposición. El factor que más influye en la exposición del ciclista es el tipo de ciclovía en donde circula. En las ciclovías independientes se tiene un promedio de 35 % menos exposición respecto a las ciclovías segregadas, las cuales presentan la mayor exposición promedio con 15.102 [ng/m^3], mientras que las calles compartidas tienen 7 % menor exposición promedio respecto a las ciclovías segregadas.

El horario de circulación es un factor que también influye en la exposición del ciclista, ya que si se prefiere el horario valle se puede tener 19,6 % menos exposición promedio comparado con los horarios punta, que entre ellos la variación es menor a un 2 %, siendo el horario punta de la tarde aquel con la mayor exposición promedio de carbono negro con 12.863 [ng/m^3]. Finalmente la calidad de aire es un factor que no influye en la exposición de carbono negro al ciclista, ya que el entorno en el que circula el ciclista es muy dinámico, donde se recibe los gases de escape de diversos vehículos, eclipsando la contaminación presente en la atmósfera.

4.1. Tipo de ciclovía

La distancia de la fuente influye enormemente en la exposición del ciclista. Tanto en calles compartidas sin ciclovía como en ciclovías segregadas se está a una distancia menor a 2 metros de los vehículos, por lo que facilita que los contaminantes lleguen al ciclista antes de dispersarse en la atmósfera. Se puede ver en la sección 3.2 que para las ciclovías mencionadas, la exposición es notoriamente mayor. En cambio, para las ciclovías independientes, en especial aquellas donde se tiene una mayor distancia respecto a la calle, los niveles de exposición son menores. Esto concuerda con lo visto en el estado del arte, donde se indica que la ruta seleccionada es un factor determinante en la exposición del ciclista, donde una ruta más larga y con menos tránsito vehicular significa una menor exposición que una ruta más directa.

Un ejemplo de cómo una mayor separación a los vehículos se asocia con una menor exposición se puede ver en la figura 4.1.



Figura 4.1: Alameda con General Bulnes. Pese a la gran congestión, se tienen niveles inferiores a los 8000 $[ng/m^3]$.

La ciclovía con mayor exposición promedio a carbono negro es Antonio Varas, con 17.615 $[ng/m^3]$, seguido por Ricardo Lyon, con 17.601 $[ng/m^3]$, ambas ciclovías segregadas. La ciclovía con menor exposición es Las Perdices, con 5.060 $[ng/m^3]$, seguido por Costanera, con 6.125 $[ng/m^3]$, ambas ciclovías independientes.

4.2. Horario de circulación

Existe poca variación de exposición de carbono negro para los horarios punta de la mañana y la tarde, donde tienen una exposición promedio de $12.665 [ng/m^3]$ y $12.863 [ng/m^3]$, respectivamente, mientras que para el horario valle se ve una significativa disminución al contaminante, con un promedio de $10.332 [ng/m^3]$. Una diferencia que también se puede ver es la distribución de datos, como se muestra en la figura 4.2, donde el horario valle muestra ser el horario con la exposición más pareja, visto por la cercanía de sus cuartiles a la media, mientras que lo contrario ocurre para el horario punta de la tarde, especialmente el caso de las ciclovías segregadas. La figura también muestra el nivel máximo de exposición, donde nuevamente la configuración más afectada es la ciclovía segregada en horario punta de la tarde.

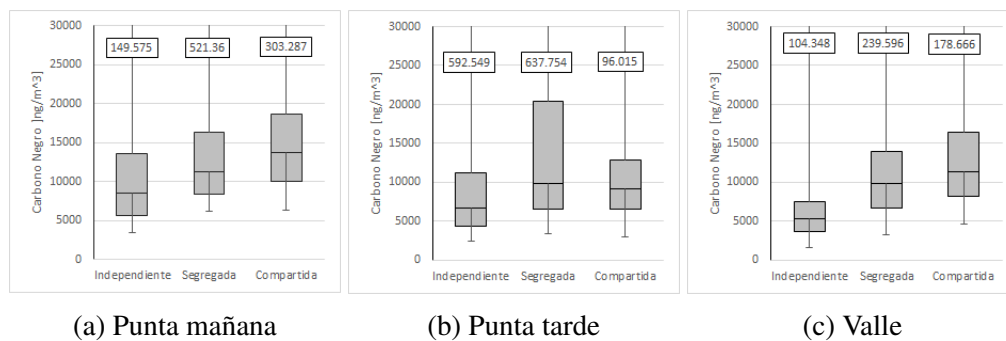


Figura 4.2: Diagrama de caja para los tres tipos de ciclovía para cada horario.

El horario de circulación no tiene tanto peso en la exposición a contaminantes en comparación con el tipo de ciclovía en el que se transita, pero no se puede ignorar la menor exposición fuera de los horarios punta. Además, los mayores niveles de exposición ocurren por situaciones puntuales, como por ejemplo, buses o camiones con motor Diesel, donde ambos se pueden encontrar durante todo el día.

Respecto a lo visto en el estado del arte, se pueden llegar a las mismas conclusiones respecto al horario. Tanto los estudios realizados por Hertel *et al.*, y un estudio realizado en Santiago por SECTRA señalan que debe haber una exposición mayor en las horas puntas de tránsito, teniendo una mayor exposición el horario de la mañana. Para el caso de este estudio se tienen exposiciones prácticamente idénticas en los dos tipos de hora punta, pero se ve la disminución en el horario valle.

4.3. Calidad del aire

Como se ve en la figura 3.8, los niveles de exposición a carbono negro no tienen relación con la concentración de $MP_{2,5}$ atmosférica. Las estaciones de monitoreo de calidad de aire son puntos fijos y no se ven afectadas por las condiciones a las que se expone el ciclista. Además, el ciclista está cambiando constantemente su posición y a la vez, el contexto en el que se encuentra. Estas situaciones no pueden ser previstas por las estaciones de monitoreo y no se ven reflejadas en los reportes de calidad de aire. Si bien, es posible que bajo las mismas condiciones (es decir, misma ciclovía, horario y dentro de lo posible, condiciones de tránsito), una peor calidad de aire signifique una mayor exposición a contaminantes en la atmósfera, esto no se verá reflejado en la exposición a carbono negro, ya que esta última es más dinámica y depende del contexto inmediato donde se encuentre el ciclista.

Con lo visto en el estado del arte se ven situaciones similares, ya que una estación de monitoreo fija no puede relacionarse con la exposición que tendrá una persona en movimiento, independiente del medio de transporte.

Finalmente, se menciona que por motivos de salud, no se realizaron mediciones en aquellos días en que se decretaron estados de alerta o preemergencia ambiental, aunque, por lo ya mencionado, es probable que la exposición a carbono negro no se vea afectada por la calidad de aire.

4.4. Mediciones nocturnas

Durante la campaña, se realizó un cambio de horario, por lo que, después del 14 de mayo, la puesta de sol ocurre una hora antes. Antes del cambio de horario, al finalizar la hora punta de la tarde, se estaba recién oscureciendo el cielo, mientras que, después del cambio de horario, al terminar la hora punta de la tarde se circulaba sin sol. Específicamente, la última hora de medición, es decir, después de las 18:00 hrs, se realizaba sin luz solar.

Después del 14 de mayo se realizaron dos circuitos en horario punta de la tarde y, en ambos casos, se puede ver un notorio aumento de exposición a carbono negro. En la figura 3.4 se ve reflejado este aumento de exposición. Coincidentemente, las rutas realizadas contenían en su mayoría ciclobandas, por lo que el promedio de exposición para estas ciclovías se ve afectada para este caso de mayor manera que las otras ciclovías.

4.5. Hotspots

Existen puntos o circunstancias en donde el nivel de exposición del ciclista llega a ser 50 veces más alto que el promedio global durante breves periodos de tiempo y ocurren regularmente durante un recorrido.

Los responsables de estos niveles suelen ser vehículos de gran tamaño con motores Diesel, incluyendo los buses de Transantiago, aunque esto no significa que la presencia de estos vehículos siempre esté asociada a un alto nivel de carbono negro (ver figura 4.3). Por el contrario, se tuvieron múltiples instancias donde se está cerca de estos vehículos sin percibir una exposición más alta de lo normal. La distribución y transporte de los gases de escape y carbono negro son complejas y las condiciones para recibir directamente los gases de escape son difíciles, ya que normalmente para estos vehículos el tubo de escape se encuentra a gran altura y fomentando la salida hacia arriba de estos gases.



Figura 4.3: Exposición de $14.000 [ng/m^3]$ detrás de un bus de Transantiago.

Por último, en la figura 4.4 se puede ver algunos de los puntos donde ocurrieron estos hotspots con sus concentraciones respectivas. La mayoría de estos ocurrieron en intersecciones con avenidas principales, donde se destaca el flujo de los buses de Transantiago.

Los dos hotspots más altos registrados con la cámara ocurrieron el 7 de junio, alcanzando niveles de $491.020 [ng/m^3]$ (figura 4.5) y $425.829 [ng/m^3]$ (figura 4.6). Ambos ocurrieron en una intersección con mucho flujo vehicular, incluyendo buses.

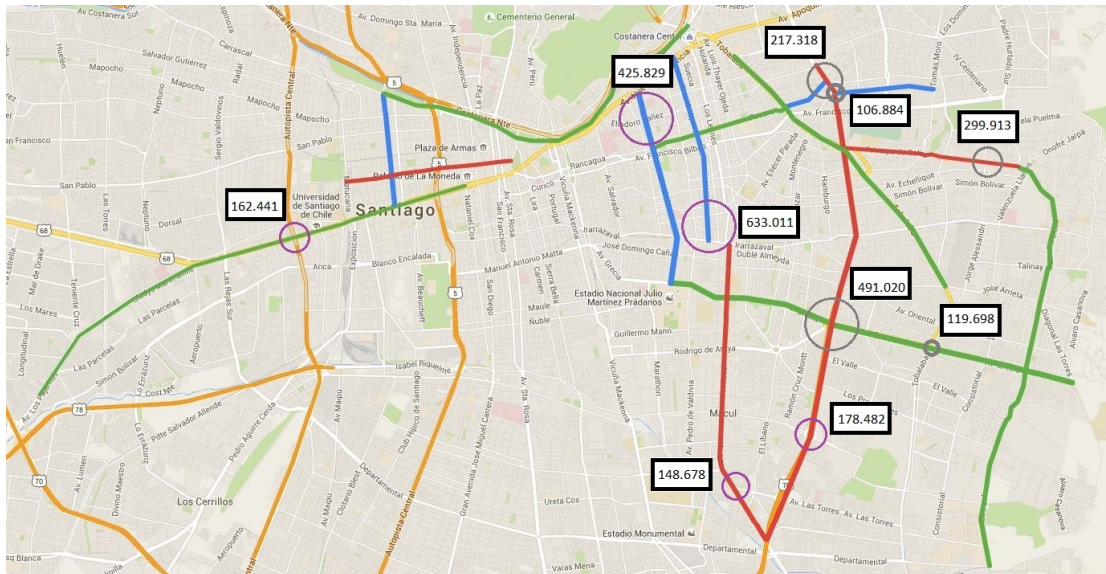


Figura 4.4: Hotspots más representativos encontrados en este estudio. En gris están aquellos reiterados y en morado aquellos que se encontraron una sola vez. El tamaño del círculo representa el nivel de la exposición.



Figura 4.5: Rotonda Grecia, 491.020 [ng/m^3].



Figura 4.6: Antonio Varas con Eliodoro Yañez, 425.829 [ng/m^3].

4.6. Recomendaciones

Un mayor exposición de carbono negro luego de la puesta de sol podría ocurrir debido a la inversión térmica que se produce al bajar la temperatura. De ser posible, es necesario realizar más mediciones para el horario punta de la tarde y comparar cómo influye la exposición después que se haya puesto el sol.

Es necesario complementar estos datos con exposición a material particulado, que por motivos de fuerza mayor, no fue posible conseguir un instrumento capaz de medir material particulado. Como se ve en este estudio, la cantidad de material particulado indicada por la calidad de aire no refleja la exposición real que afecta al ciclista.

Otro factor que podría ser estudiado más a fondo es cómo los buses de Transantiago y los camiones en general provocan los *hotspots*, considerando que no todos ellos causaban estos niveles anormales. Se puede analizar bajo qué condiciones, distancias, o potencia en los motores de estos vehículos causan las altas exposiciones de carbono negro.

Bibliografía

- [1] HS Adams, Mark J Nieuwenhuijsen, RN Colvile, MJ Older, and M Kendall. Assessment of road users' elemental carbon personal exposure levels, london, uk. *Atmospheric Environment*, 36(34):5335–5342, 2002.
- [2] HS Adams, MJ Nieuwenhuijsen, and RN Colvile. Determinants of fine particle (pm 2.5) personal exposure levels in transport microenvironments, london, uk. *Atmospheric Environment*, 35(27):4557–4566, 2001.
- [3] Environmental Protection Agency. Black carbon research and future strategies. *Science in Action*, 2011.
- [4] P Berghmans, N Bleux, L Int Panis, VK Mishra, R Torfs, and M Van Poppel. Exposure assessment of a cyclist to pm 10 and ultrafine particles. *Science of the Total Environment*, 407(4):1286–1298, 2009.
- [5] Tom Cole-Hunter, Lidia Morawska, Ian Stewart, Rohan Jayaratne, and Colin Solomon. Inhaled particle counts on bicycle commute routes of low and high proximity to motorised traffic. *Atmospheric Environment*, 61:197–203, 2012.
- [6] Sociedad de Asesorías Profesionales en Urbanismo y Territorio Ltda. (UYT Ltda.). Análisis del comportamiento de la demanda de infraestructura especializada para bicicletas. SECTRA RM: Teatinos 950, piso 17. Santiago, 2013.
- [7] Sociedad de Asesorías Profesionales en Urbanismo y Territorio Ltda. (UYT Ltda.). Catastro y georreferenciación de ciclovías existentes del gran santiago. SECTRA RM: Teatinos 950, piso 17. Santiago, 2014.
- [8] Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito. Análisis especial de accidentes de tránsito con participación de bicicletas y su interacción con ciclovías en el gran santiago. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2008-2011.

- [9] Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito. Accidentes de tránsito de ocupantes de bicicleta y consecuencias. 2013. Recuperado de: http://www.conaset.cl/wp-content/uploads/2014/02/bicicletas_2012.pdf.
- [10] Subsecretaría de Transportes. Plan maestro de transporte de santiago 2025. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013.
- [11] Oscar A Fajardo and Nestor Y Rojas. Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmospheric Environment*, 46:675–679, 2012.
- [12] Judith Herrera. Bikesantiago suma 25 mil usuarios y 1,2 millones de viajes. *La Tercera*. 11 de Octubre de 2015. Recuperado de: www.latercera.com.
- [13] Ole Hertel, Martin Hvidberg, Matthias Ketzel, Lars Storm, and Lizzi Stausgaard. A proper choice of route significantly reduces air pollution exposure—a study on bicycle and bus trips in urban streets. *Science of the total environment*, 389(1):58–70, 2008.
- [14] NA Janssen, Gerard Hoek, Milena Simic-Lawson, Paul Fischer, Leendert Van Bree, Harry Ten Brink, Menno Keuken, Richard W Atkinson, H Ross Anderson, Bert Brunekreef, et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with pm10 and pm2. 5. *Environ Health Perspect*, 119(12):1691–1699, 2011.
- [15] Nicole AH Janssen, Miriam E Gerlofs-Nijland, Timo Lanki, Raimo O Salonen, Flemming Cassee, Gerard Hoek, Paul Fischer, Bert Brunekreef, and Michal Krzyzanowski. Health effects of black carbon. WHO Regional Office for Europe Copenhagen, 2012.
- [16] Soni Kaur, Mark J Nieuwenhuijsen, and Roy N Colvile. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 41(23):4781–4810, 2007.
- [17] J-F Lamarque, Tami C Bond, Veronika Eyring, Claire Granier, Angelika Heil, Z Klimont, D Lee, Catherine Lioussé, Aude Mieville, Bethan Owen, et al. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15):7017–7039, 2010.

- [18] Piers MacNaughton, Steven Melly, Jose Vallarino, Gary Adamkiewicz, and John D Spengler. Impact of bicycle route type on exposure to traffic-related air pollution. *Science of the Total Environment*, 490:37–43, 2014.
- [19] A McNabola, BM Broderick, and LW Gill. Relative exposure to fine particulate matter and vocs between transport microenvironments in dublin: Personal exposure and uptake. *Atmospheric Environment*, 42(26):6496–6512, 2008.
- [20] Aonghus McNabola, Brian M Broderick, and Laurence W Gill. Optimal cycling and walking speed for minimum absorption of traffic emissions in the lungs. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(13):1999–2007, 2007.
- [21] Valentina Mery. Construcción de ciclovías avanza más rápido que uso de bicicletas en santiago. *La Tercera*. 24 de Marzo de 2015. Recuperado de www.latercera.com.
- [22] Antonio H Miguel, Thomas W Kirchstetter, Robert A Harley, and Susanne V Hering. On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles. *Environmental Science & Technology*, 32(4):450–455, 1998.
- [23] Jan Peters, Joris Van den Bossche, Matteo Reggente, Martine Van Poppel, Bernard De Baets, and Jan Theunis. Cyclist exposure to ufp and bc on urban routes in antwerp, belgium. *Atmospheric Environment*, 92:31–43, 2014.
- [24] Veerabhadran Ramanathan and Gregory Carmichael. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience*, 1(4):221–227, 2008.
- [25] Alejandro Taddia, Ramiro Alberto Ríos, Carlos Felipe Pardo, and Natalia Lleras. *Ciclo-inclusión en américa latina y el caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta*. Banco Interamericano de Desarrollo, 2015.
- [26] Elmar Uherek, Tomas Halenka, Jens Borken-Kleefeld, Yves Balkanski, Terje Berntsen, Carlos Borrego, Michael Gauss, Peter Hoor, Katarzyna Juda-Rezler, Jos Lelieveld, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport. *Atmospheric Environment*, 44(37):4772–4816, 2010.
- [27] Observatorio Social Universidad Alberto Hurtado. *Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, ix etapa: Encuesta origen des-*

tino santiago 2012. encuesta origen destino de viajes 2012 (documento difusión).
SECTRA, Ministerio de Transportes y Telecomunicación, 2014.

Anexo A

Exposición en ciclovías seleccionadas

Tabla A.1: Promedio de exposición, desviación estándar y calidad de aire en $MP_{2,5}$ y MP_{10} para cada recorrido.

Fecha	Ciclovía	Tipo	Horario	Promedio [ng/m ³]	Desv. est. [ng/m ³]	$MP_{2,5}$ [μg/m ³]	MP_{10} [μg/m ³]
03-05	Grecia	Independiente	M	21811	10832,04	37,29	78,52
03-05	Antonio Varas	Segregada	M	20551	6073,82	31,75	54,02
03-05	Pocuro	Independiente	M	15009	4110,51	31,75	54,02
03-05	Isabel La Católica	Segregada	V	17228	3571,72	31,75	54,02
03-05	Latadia	Segregada	V	16924	3792,49	31,75	54,02
03-05	Americo Vespucio	Compartida	T	14150	12600,67	37,29	78,52
03-05	Macul	Compartida	T	12865	7744,49	37,29	78,52
03-05	Ricardo Lyon	Segregada	T	10822	2357,14	37,29	78,52
05-05	Las Perdices	Independiente	M	3589	4555,03	42,42	49,21
05-05	Principe de Gales	Compartida	M	13787	27716,04	47,5	52,45
05-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	M	8767	10267,36	47,5	52,45
05-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	V	8011	7487,01	47,5	52,45
07-05	Las Perdices	Independiente	M	7242	3004,54	47,21	53,69
07-05	Principe de Gales	Compartida	M	13797	16965,08	42,17	46,88
07-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	M	10443	4372,35	42,17	46,88

Tabla A.1 – Continuación de página anterior

Fecha	Ciclovia	Tipo	Horario	Promedio [ng/m ³]	Desv. est. [ng/m ³]	MP _{2,5} [μg/m ³]	MP ₁₀ [μg/m ³]
09-05	Americo Vespucio	Compartida	M	18501	11168,76	49	64,39
09-05	Macul	Compartida	M	17112	12088,02	49	64,39
09-05	Isabel La Católica	Segregada	V	14799	5026,14	38,42	47,52
09-05	Latadia	Segregada	V	13765	2344,59	38,42	47,52
09-05	Ricardo Lyon	Segregada	M	12447	3771,97	49	64,39
09-05	Alameda	Independiente	T	8704	12138,66	44,75	63,42
09-05	Agustinas	Compartida	T	11280	8684,68	44,75	63,42
09-05	General Bulnes	Segregada	T	7138	5726,07	44,75	63,42
09-05	Costanera	Independiente	T	7178	3691,22	38,42	47,52
13-05	Latadia	Segregada	T	9054	3165,03	28,42	61,17
13-05	Latadia	Segregada	T	8963	3110,19	28,42	61,17
13-05	Isabel La Católica	Segregada	T	7400	1594,75	28,42	61,17
13-05	Grecia	Independiente	T	11367	5181,75	43,04	0
13-05	Pocuro	Independiente	T	7344	1919,95	28,42	61,17
13-05	Antonio Varas	Segregada	T	8665	5035,2	28,42	61,17
13-05	Latadia	Segregada	M	11757	6321,39	28,42	61,17
13-05	Latadia	Segregada	M	10848	4115,51	28,42	61,17
13-05	Isabel La Católica	Segregada	M	15924	8896,73	28,42	61,17
13-05	Isabel La Católica	Segregada	M	16123	6456,97	28,42	61,17
13-05	Pocuro	Independiente	M	14735	5151,28	28,42	61,17
13-05	Principe de Gales	Compartida	V	13026	9132,79	28,42	61,17
13-05	Las Perdices	Independiente	M	5460	3944,36	43,04	0
16-05	Las Perdices	Independiente	T	4522	2880,89	38,79	79,48
16-05	Principe de Gales	Compartida	T	9120	9703,83	34,59	47,21
16-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	T	8009	6531,01	34,59	47,21
16-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	T	9103	6461,08	34,59	47,21
17-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	M	7576	2305,26	42,71	54,72
17-05	Costanera	Independiente	M	6643	3288,69	42,71	54,72

Tabla A.1 – Continuación de página anterior

Fecha	Ciclovia	Tipo	Horario	Promedio [ng/m ³]	Desv. est. [ng/m ³]	MP _{2,5} [μg/m ³]	MP ₁₀ [μg/m ³]
17-05	Isabel La Católica	Segregada	M	6521	2238,05	42,71	54,72
17-05	General Bulnes	Segregada	M	11972	3988,23	36,96	65,48
17-05	Alameda	Independiente	M	9805	5234,28	36,96	65,48
19-05	Americo Vespucio	Compartida	V	13276	12688,37	52,65	77,29
19-05	Macul	Compartida	V	12561	6712,38	52,65	77,29
19-05	Isabel La Católica	Segregada	V	6269	563,03	47,92	53,59
20-05	Ricardo Lyon	Segregada	V	8817	4319,52	52,65	77,29
20-05	Latadia	Segregada	V	6382	4590,18	47,92	53,59
20-05	Latadia	Segregada	V	10209	9618,71	47,92	53,59
24-05	Grecia	Independiente	M	10463,4	14300,97	44,54	101,6
24-05	Antonio Varas	Segregada	M	8539,86	2446,76	31,12	61,96
24-05	Antonio Varas	Segregada	M	11840,53	6619,51	31,12	61,96
24-05	Pocuro	Independiente	M	11914	3813,41	31,12	61,96
24-05	Isabel La Católica	Segregada	V	6834,37	1347,89	31,12	61,96
24-05	Americo Vespucio	Compartida	V	15661	12753,8	44,54	101,6
24-05	Macul	Compartida	V	16808	7454,56	44,54	101,6
24-05	Isabel La Católica	Segregada	V	12626	9317,76	31,12	61,96
24-05	Ricardo Lyon	Segregada	V	11109	2360,76	44,54	101,6
26-05	Las Perdices	Independiente	V	4668	7438,53	49,79	84,58
26-05	Principe de Gales	Compartida	V	8742	15160,25	42,33	69,1
26-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	V	5778	3459,21	42,33	69,1
26-05	Sanchez Fontecilla	Independiente	V	5623	5481,06	42,33	69,1
30-05	Grecia	Independiente	V	8027	7962,47	21,42	37,1
30-05	Antonio Varas	Segregada	V	8524	2866,41	17,71	26,02
30-05	Antonio Varas	Segregada	V	9474	5899,65	17,71	26,02
30-05	Pocuro	Independiente	V	8193	4083,74	17,71	26,02
30-05	Isabel La Católica	Segregada	V	9361	2935,69	17,71	26,02
30-05	Americo Vespucio	Compartida	T	8323	4165,3	21,42	37,1

Tabla A.1 – Continuación de página anterior

Fecha	Ciclovia	Tipo	Horario	Promedio [ng/m ³]	Desv. est. [ng/m ³]	MP _{2,5} [μg/m ³]	MP ₁₀ [μg/m ³]
30-05	Macul	Compartida	T	11869	7029,75	21,42	37,1
30-05	Isabel La Católica	Segregada	V	28724	46783,83	17,71	26,02
30-05	Ricardo Lyon	Segregada	T	45329	71431,48	21,42	37,1
30-05	Latadia	Segregada	T	5543	4107,05	17,71	26,02
30-05	Latadia	Segregada	T	7685	4636,71	17,71	26,02
01-06	Sanchez Fontecilla	Independiente	T	4658	2313,82	21,58	31,87
01-06	Costanera	Independiente	T	4794	3273,65	21,58	31,87
01-06	Isabel La Católica	Segregada	V	6014	3298,62	21,58	31,87
01-06	General Bulnes	Segregada	T	6002	4242,47	20,67	49,69
01-06	Alameda	Independiente	T	7590	5511,79	20,67	49,69
07-06	Antonio Varas	Segregada	T	42705	51637,98	28,17	38,94
07-06	Antonio Varas	Segregada	T	34553	43991,37	28,17	38,94
07-06	Latadia	Segregada	T	26041	20950,83	28,17	38,94
07-06	Latadia	Segregada	V	23470	15833,32	28,17	38,94
07-06	Isabel La Católica	Segregada	T	21272	11115,07	28,17	38,94
07-06	Grecia	Independiente	T	26436	49973,41	44,17	83,63
07-06	Pocuro	Independiente	T	35065	32088,01	28,17	38,94

Anexo B

Ciclovías en Santiago

Tabla B.1: Red de ciclovías existente en Santiago en 2015.

Nombre eje	Comuna	Longitud[m]
5 DE ABRIL	ESTACION CENTRAL	2.171,4
ACCESO SUPER STA ISABEL	PUENTE ALTO	910,9
ALBERTO LLONA	MAIPU	1.303,1
ALMIRANTE RIVEROS	SAN BERNARDO	1.298,6
AMÉRICO VESPUCIO NORTE	LAS CONDES	5.209,2
ANTONIO VARAS	ÑUÑO A	2.975,3
ARZOBISPO VALDIVIESO	RECOLETA	538,1
AV GLADYS MARIN	ESTACION CENTRAL	2.757,5
AV. ALCALDE CARLOS VALDOVINOS	SAN JOAQUIN	2.232,4
AV. ANDRÉS BELLO	PROVIDENCIA	3.625,8
AV. BLANCO ENCALADA	SANTIAGO	919,8
AV. CONCHA Y TORO	PUENTE ALTO	4.259,6
AV. DEPARTAMENTAL	SAN JOAQUIN	2.074,1
AV. DEPARTAMENTAL	LA FLORIDA	4.548,3
AV. EL SALTO	HUECHURABA	172,1
AV. EL SALTO	HUECHURABA	67,9
AV. GABRIELA	LA PINTANA	1.190,2
AV. GRECIA	PEÑALOLEN	6.420,8
AV. LA PAZ	INDEPENDENCIA	1.171,9
AV. LA SERENA	LA GRANJA	1.572,2

Tabla B.1 – Continuación de página anterior

Nombre eje	Comuna	Longitud [m]
AV. LIBERTADOR BERNARDO O HIGGINS	SANTIAGO	5.238,1
AV. MATTA	SANTIAGO	1.836,8
AV. PADRE HURTADO	EL BOSQUE	5.510,2
AV. PADRE HURTADO	LA REINA	1.241,1
AV. PAJARITOS	MAIPU	1.197,5
AV. PEDRO AGUIRRE CERDA	CERRILLOS	4.016,3
AV. PROVIDENCIA	PROVIDENCIA	186,6
AV. SANTA ROSA	SAN RAMON	4.844,1
AV. TOBALABA	PEÑALOLEN	11.339,9
AV. VICUÑA MACKENNA	LA FLORIDA	4.962,6
BARROS ARANA	SAN BERNARDO	958,1
BRASIL	SANTIAGO	972,8
CALETERA ORIENTE DE ACCESO SUR	PUENTE ALTO	8.273,8
CALETERA PONIENTE DE ACCESO SUR	LA PINTANA	8.780,6
CALLAO	LAS CONDES	919,0
CALLE G	RECOLETA	1.603,2
CAMINO EL MARISCAL	LA PINTANA	5.154,3
CAMINO MELIPILLA	MAIPU	1.574,7
CARD. JOSÉ MARIA CARO	SANTIAGO	1.174,4
CARLOS SILVA VILDOSOLA	SAN MIGUEL	590,1
CARMEN	SANTIAGO	3.748,7
CENTRAL CARDENAL SILVA HENRIQUEZ	LO ESPEJO	1.930,9
CHILE ESPAÑA	ÑUÑO A	453,3
CLOTARIO BLEST	PEDRO AGUIRRE CERDA	3.298,0
CLUB HÍPICO	SANTIAGO	2.504,2
CURICO/TARAPACA	SANTIAGO	2.241,5
DIAGONAL CARDENAL JOSÉ MARÍA CARO	RECOLETA	341,1
DR. JOHOW	ÑUÑO A	728,6
DUBLÉ ALMEIDA	ÑUÑO A	3.073,0
GABRIELA MISTRAL	LO ESPEJO	989,2
ELENA BLANCO	PROVIDENCIA	233,9
EMILIA TELLEZ	ÑUÑO A	1.038,0

Tabla B.1 – Continuación de página anterior

Nombre eje	Comuna	Longitud[m]
ENRIQUE OLIVARES (SUR)	LA FLORIDA	1.597,5
ENRIQUE OLIVARES (NORTE)	LA FLORIDA	1.599,9
ESQUINA BLANCA	MAIPU	2.401,5
EXPOSICIÓN	SANTIAGO	1.008,3
FORESTAL	CONCHALI	446,4
FRANCISCO BILBAO	PROVIDENCIA	227,2
GENERAL BULNES	SANTIAGO	2.178,1
GENERAL BUSTAMANTE	PROVIDENCIA	1.162,6
GUANACO	CONCHALI	1.269,6
ISABEL LA CATÓLICA	LAS CONDES	946,7
ISABEL RIQUELME	SAN JOAQUIN	176,1
IV CENTENARIO	LAS CONDES	1.869,1
JOSÉ MIGUEL BALMACEDA	RENCA	926,6
JOSÉ MIGUEL INFANTE	RENCA	524,4
JUANITA	LA PINTANA	695,4
LAGUNA SUR	PUDAHUEL	1.700,2
LARRAIN	LA REINA	3.732,0
LAS INDUSTRIAS	SAN JOAQUIN	4.521,1
LAS PERDICES	LA REINA	4.471,5
LAS TORRES	CERRO NAVIA	1.401,6
LAS TORRES ORIENTE	LO PRADO	2.010,3
LAS TORRES PONIENTE	LO PRADO	2.006,6
LATADIA	LAS CONDES	1.919,6
LIBERTADOR BERNARDO OHIGGINS	QUILICURA	1.035,9
LO BLANCO	SAN BERNARDO	2.619,1
LO MARTINEZ	LA PINTANA	3.913,1
MANQUEHUE SUR	LAS CONDES	1.468,1
MANUEL ANTONIO MATTA	QUILICURA	1.479,3
MAPOCHO	CERRO NAVIA	632,6
MARIN	PROVIDENCIA	646,7
MARTÍNEZ DE ROZAS	QUINTA NORMAL	1.529,0
MONTENEGRO	ÑUÑO A	3.452,0

Tabla B.1 – Continuación de página anterior

Nombre eje	Comuna	Longitud[m]
NEVERIA	LAS CONDES	1.190,7
NORUEGA	LAS CONDES	691,8
OBSERVATORIO	LA PINTANA	2.333,9
PAJARITOS	MAIPU	2.392,0
PEDRO DE VALDIVIA	ÑUÑO A	829,2
PEDRO LEÓN GALLO	PROVIDENCIA	275,7
PÍO NONO	PROVIDENCIA	441,0
POCURO	PROVIDENCIA	2.782,8
PRESIDENTE BALMACEDA	SANTIAGO	2.590,9
PRESIDENTE RIESCO	LAS CONDES	784,5
PRÍNCIPE DE GALES	LA REINA	477,5
PUYEHUE	PROVIDENCIA	406,6
RECOLETA	HUECHURABA	717,3
REGIMIENTO CAZADORES	PROVIDENCIA	155,1
REPÚBLICA	SANTIAGO	1.006,5
ROMA / DORSAL	CONCHALI	2.645,8
ROSAS	SANTIAGO	2.971,8
SAN FRANCISCO	LA PINTANA	1.062,6
SANTA ISABEL	SANTIAGO	861,3
SANTA ISABEL	SANTIAGO	2.525,2
SENADOR JAIME GUZMAN	ÑUÑO A	616,3
SIMON BOLIVAR	ÑUÑO A	3.441,5
TRES PONIENTE	MAIPU	4.009,5
AV. VICUÑA MACKENNA	SAN JOAQUIN	103,4
GENERAL CALDERON	PROVIDENCIA	54,7
MARIA TERESA	LAS CONDES	260,6
18 DE SEPTIEMBRE	PAINE	3.673,4
BAJOS DE MATTE	BUIN	1.462,1
LARRAIN	PEÑAFLO R	1.053,3
VICUÑA MACKENNA	MELIPILLA	747,1
CHARLES HAMILTON	LAS CONDES	506,2
AV. RICARDO LYON	PROVIDENCIA	2.393,5

Tabla B.1 – Continuación de página anterior

Nombre eje	Comuna	Longitud [m]
EL PIANO	LA PINTANA	874,9
AV. MATTA	SANTIAGO	18,9
CALERA DE TANGO	CALERA DE TANGO	2.192,7
AV. MATTA ORIENTE/DUBLE ALMEYDA	ÑUÑO A	1.078,7
BARROS LUCO	LAMPA	2.626,5
GENERAL BAQUEDANO	PAINE	1.656,7
RENATO SANCHEZ	LAS CONDES	490,9
LOS MORROS	EL BOSQUE	263,7
COLON	SAN BERNARDO	926,7
RIO CLARO	PEÑALOLEN	474,1
NUEVA TAJAMAR	PROVIDENCIA	262,5
EINSTEIN	RECOLETA	78,8
LAS TORRES	RECOLETA	813,1
COSTANERA SUR	QUINTA NORMAL	1.492,4
TEATINOS	SANTIAGO	877,8
AV. LAS TORRES	PEÑALOLEN	836,2
AV. EL VALLE	PEÑALOLEN	1.157,2
AV. LOS PRESIDENTES	PEÑALOLEN	446,9
AV. LOS CEREZOS	PEÑALOLEN	329,9
AV. LAS PERDICES	PEÑALOLEN	870,2
PRESIDENTE BALMACEDA	SANTIAGO	185,5
	Total	255.359,3

Fuente: Revisión del Plan Maestro de Ciclovías del Gran Santiago y Plan de Obras” (GORE, 2012)