



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Caracterización de las emisiones atmosféricas del transporte en Montevideo

Mauro D'Angelo Taibo

Programa de Posgrado en Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Julio de 2016



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Caracterización de las emisiones atmosféricas del transporte en Montevideo

Mauro D'Angelo Taibo

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magister en Ingeniería Ambiental.

Director:

Dra. Prof. Alice Elizabeth González Fernández

Montevideo – Uruguay

Julio de 2016

D'Angelo Taibo, Mauro

Caracterización de las emisiones atmosféricas del transporte en Montevideo / Mauro D'Angelo Taibo. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2016.

XXXVIII, 292 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Alice Elizabeth González Fernández

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería Ambiental, 2016.

Referencias bibliográficas: p. 207 – 215.

1. Contaminación atmosférica, 2. Emisiones vehiculares.
I. González Fernández, Alice Elizabeth, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería Ambiental. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Prof. José Alberto Cataldo Ottieri

Msc. Prof. Álvaro Fidel Díaz Rosas

Dr. Prof. William Alonso Giraldo Aristizabal

Montevideo – Uruguay

Julio de 2016

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer al Ing. José Larramendi (MTOPI) y al personal de SUCTA (Ing. Federico Feuer, Carlos Quintero y otros miembros del personal de la planta) por su colaboración en la realización de las mediciones de emisiones sobre vehículos pesados. En el marco de estas mediciones, quisiera también agradecer a los docentes Ing. Agustín Ríos e Ing. Pablo Gianoli, del Departamento de Ingeniería Ambiental del IMFIA, por su colaboración durante el mencionado trabajo de campo.

Por otra parte, quisiera agradecer profundamente a todas aquellas personas que participaron en el muestreo de emisiones sobre vehículos livianos cediendo desinteresadamente su automóvil y conduciéndolo durante el desarrollo de la actividad.

Por último, me gustaría agradecer a los docentes Dr. Ing. Pedro Curto del IIMPI y Msc. Ing. Mariana Mendina del IMFIA por sus colaboraciones en distintas etapas del trabajo aquí presentado.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la caracterización de las emisiones vehiculares de la flota nacional. Dicha caracterización implicó la realización de un muestreo de emisiones vehiculares sobre una muestra de vehículos livianos y pesados. A partir del mencionado muestreo se calcularon factores de emisión de diversos contaminantes para vehículos livianos y pesados en circulación. El ajuste de distribuciones de probabilidad a los factores de emisión calculados permitió la determinación de intervalos de confianza para los factores de emisión medios.

Seguidamente, se estudió el vínculo entre las emisiones atmosféricas y otros parámetros de los vehículos ensayados mediante el empleo de la herramienta de análisis de clusters.

Finalmente, se aplicó el modelo numérico computacional *caffa3d.MBRi* a una calle de la Ciudad Vieja de Montevideo para el estudio de la dispersión atmosférica de las emisiones vehiculares generadas en su seno. Dicho modelo también fue utilizado para el análisis de la dispersión de emisiones vehiculares considerando distintos escenarios de flujo vehicular en la zona de estudio.

Palabras claves:

Contaminación atmosférica, Emisiones vehiculares.

ABSTRACT

In this work the characterization of vehicle emissions of the national fleet was made. This characterization involved the completion of a sampling of vehicle emissions on a sample of light and heavy vehicles. From sampling, emission factors of several pollutants for light and heavy vehicles were calculated. The adjustment of probability distributions to the calculated emission factors allowed the determination of confidence intervals for the average emission factors. Then, the link between atmospheric emissions and other parameters of the tested vehicles was studied by using the cluster analysis tool. Finally, computational `caffa3d.MBRi` numerical model was applied to a street of the Ciudad Vieja of Montevideo for the study of atmospheric dispersion of vehicular emissions generated within it. This model was also used for the analysis of different emissions dispersion scenarios considering several compositions of traffic flow in the study area.

Keywords:

Atmospheric pollution, Vehicle emissions.

Lista de figuras

1.1	Regiones atmosféricas y distribución de temperatura en altura. Adaptado de [75].	2
1.2	Algunos ejemplos de fuentes naturales de contaminación atmosférica (Observatorio terrestre de la National Aeronautics and Space Administration (NASA)).	3
1.3	Tiempo de residencia de algunas sustancias en la atmósfera. Adaptado de [75].	5
1.4	Evento de contaminación con material particulado en el norte de China (durante el evento, la concentración de MP_{10} alcanzó un valor de $560 \mu g/m^3$ y los registros de $MP_{2.5}$ se encontraron fuera de escala durante la mañana del 10 de enero de 2012 evolucionando hacia niveles moderados en la tarde) (Observatorio terrestre de la NASA).	7
1.5	Evolución de una parcela de aire [13].	13
1.6	Estados de la atmósfera [13].	15
1.7	Distribuciones de temperatura en altura de la atmósfera y de la parcela. Adaptado de [13].	16
1.8	Evolución del gradiente vertical de temperatura de la atmósfera a lo largo de un día. Adaptado de [13].	17
1.9	Cañón urbano. Las concentraciones de gases contaminantes son mayores en el sector denominado Sotavento (leeward side en inglés). Adaptado de [17].	20

1.10	Relación entre flujo vehicular, velocidad de viento y concentraciones de NO ₂ durante dos días de semana consecutivos en 1997 en Jagtvej, una calle con alto flujo vehicular rodeada de edificios en Copenhague, Dinamarca. Las concentraciones de NO ₂ son registradas a nivel de calle (curva superior) y sobre el techo de un edificio cercano (curva inferior). Adaptado de [17].	21
1.11	Temperatura de combustión y emisiones en función de Φ . Adaptado de [71].	23
1.12	Tiempo de residencia y tiempo químico. Adaptado de [71].	24
1.13	Emisiones de CO (%) por tipo de vehículo para la ciudad de San Petersburgo, Rusia. Adaptado de [63].	25
1.14	Emisiones de NO _x (%) por tipo de vehículo para la ciudad de San Petersburgo, Rusia. Adaptado de [63].	25
1.15	Producto Bruto Interno (PBI), índice de población e índice de contaminación en la UE (1990= 100 %). Adaptado de [34].	26
1.16	Porcentaje de la población urbana de la UE expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos superiores a los límites de la UE (azul) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (verde) en los años 2010-2012. Adaptado de [34]★.	27
2.1	Cantidad de vehículos livianos relevados en la bibliografía consultada. Elaboración propia a partir de [54], [80], [86], [65], [16], [85], [30], [35], [10] y [73].	30
2.2	Cantidad de vehículos pesados relevados en la bibliografía consultada. Elaboración propia a partir de [54], [21], [76], [20], [78], [72], [51], [10] y [73].	30
2.3	Factores de emisión de CO para vehículos livianos relevados en la bibliografía consultada (en este gráfico se excluyó el resultado proporcionado por uno de los trabajos relevados [80] ya que el mismo (26.2 g/km) alteraba la escala de la ilustración). Elaboración propia a partir de [54], [86], [65], [16], [30] y [35].	31
2.4	Esquema de una instalación para la medición de emisiones en un dinamómetro de chasis. Adaptado de [66].	32
2.5	Vehículo de pasajeros instrumentado con PEMS [35].	35
2.6	Evolución temporal de las emisiones de NO _x para vehículos a gasolina (izquierda) y a gas oil (derecha). Adaptado de [46].	37

2.7	Relación entre la cilindrada, la potencia del motor y el peso de los vehículos a gasolina y las emisiones de CO ₂ (valores normalizados con respecto al valor promedio obtenido en el citado trabajo). Adaptado de [30].	38
2.8	Histograma de funcionamiento para vehículos semi-pesados en ciudad. Adaptado de [76].	40
2.9	Emisiones de NO _x en función de la velocidad para vehículos pesados (la descripción de los puntos muestrales se expresa en inglés según la referencia original). Adaptado de [32].	41
2.10	Emisiones de NO _x de vehículos pesados para distintas tecnologías en función de la velocidad. Adaptado de [73].	42
2.11	Relación entre el factor de emisión de CO y la velocidad del vehículo. Adaptado de [86].	43
2.12	Emisiones promedio de CO para un ciclo de manejo urbano a dos temperaturas diferentes para los vehículos a gasolina ensayados. Adaptado de [16].	44
2.13	Diferencia entre las emisiones de CO ₂ registradas en condiciones reales de manejo y en el laboratorio para diversas fuentes de información. Adaptado de [39].	47
2.14	Distintos ciclos de conducción. Adaptado de [30].	48
2.15	Factores de emisión de CO correspondientes a vehículos a gasolina registrados a partir de ensayos en dinamómetro de chasis utilizando diferentes ciclos de conducción. Adaptado de [30].	49
3.1	Dispersión de contaminantes en un cañón urbano regular. Adaptado de [52].	53
3.2	Regímenes de flujo en cañones urbanos para vientos sinópticos perpendiculares en función de la relación de aspecto. Adaptado de [52].	54
3.3	Relación entre la complejidad de los modelos y los errores de sus predicciones. Adaptado de [75].	58
3.4	Actividad de planta de un radionucleido (en B_q) computada por un modelo Gaussiano [75].	59
3.5	Concentraciones horarias de CO estimadas utilizando modelación inversa. Adaptado de [37].	60

3.6	Grilla utilizada en un modelo computacional para el estudio de la dispersión de contaminantes en cañones urbanos [12].	62
3.7	Líneas de flujo alrededor de un grupo de edificios [56].	62
3.8	Comparación entre la concentración de CO medida dentro de un cañón urbano a una altura igual a 2.5 m en el lado sur y la simulada utilizando un modelo CFD a ambos lados del mismo. Adaptado de [28].	63
4.1	Medidas de gestión para la contaminación de origen vehicular (elaboración propia).	66
4.2	Patrones geométricos urbanos. Adaptado de [60].	67
4.3	Configuración de un modelo de cañón urbano. Adaptado de [12].	68
4.4	Configuración de un modelo de cañón urbano. Adaptado de [14].	69
4.5	Niveles de contaminación en un cañón urbano en función de la relación entre las alturas de los edificios circundantes. Adaptado de [12].	70
4.6	Efecto de la permeabilidad de la calle en las concentraciones ambientales de monóxido de carbono (25 % de permeabilidad). Adaptado de [14].	71
4.7	Efecto del retiro de los edificios en las concentraciones ambientales de monóxido de carbono (retiro vertical). Adaptado de [14].	71
4.8	Efecto de la presencia de vehículos estacionados en las concentraciones ambientales de CO ₂ (izquierda: sin vehículos estacionados; derecha: con vehículos estacionados de forma paralela al eje de la calle) para un flujo de viento perpendicular al eje del cañón urbano (4 m/s). Adaptado de [44].	73
4.9	Efecto de la presencia de árboles en las velocidades verticales normalizadas de flujo en cañones urbanos (izquierda: sin árboles; derecha: con árboles), corte transversal. Adaptado de [15]. . . .	75
4.10	Subtotales de costos del usuario por tipo de vehículo (USD/km/persona) (nf: nafta) [61].	76
4.11	Tiempos insumidos por distintos medios de transporte para un mismo recorrido urbano [61].	77
4.12	Emisiones vehiculares diarias de monóxido de carbono en la ciudad de Beijing antes (izquierda) y durante (derecha) los Juegos Olímpicos de 2008. Adaptado de [47].	78

4.13	Emisiones de CO en función de la aceleración del vehículo. Adaptado de [20].	79
4.14	Consumo de combustible normalizado en función de la velocidad promedio para vehículos livianos de pasajeros a gasolina. Adaptado de [85].	80
4.15	Costos incrementales de las tecnologías de control de emisiones para un motor Diesel de 12000 cm ³ bajo estándares de control de emisiones europeos y norteamericanos. Elaboración propia a partir de [42].	82
4.16	Factores de emisión de CO para vehículos altamente emisores (círculo blanco: antes del mantenimiento; círculo negro: después del mantenimiento). Adaptado de [49].	83
5.1	Factores de emisión de CO (g/km) para vehículos de pasajeros a gasolina para las diferentes normas EURO (elaboración propia).	86
5.2	New European Driving Cycle. Adaptado de [55].	87
5.3	European Transient Cycle. Adaptado de [55].	87
5.4	Evolución temporal de los factores de emisión de CO ₂ para vehículos livianos de pasajeros en la Unión Europea. Adaptado de [40].	88
5.5	Evolución temporal de las ventas anuales de automotores cero kilómetro. Adaptado de [33].	94
5.6	Distribución de la flota nacional de camiones por antigüedad. Adaptado de [33].	95
5.7	Evolución histórica de las ventas de vehículos de pasajeros por tipo de combustible. Adaptado de [33].	96
5.8	Distribución del parque automotor montevideano a diciembre de 2015 por categoría. Adaptado de (Sitio web de Sucive: https://www.sucive.gub.uy/).	97
5.9	Distribución de antigüedades de la flota vehicular montevideana (Categoría A). Adaptado de (Sitio web de Sucive: https://www.sucive.gub.uy/).	97
5.10	Sistema de Transporte Metropolitano (STM) [24].	101
5.11	Infraestructura vial existente para el uso de la bicicleta. Adaptado de (Sitio web de la Intendencia de Montevideo: http://www.montevideo.gub.uy/mapa-montevideo-en-bici).	102

5.12	Zonificación del departamento de Montevideo de acuerdo a la circulación de vehículos de carga. Adaptado de [24].	103
5.13	Red Base de monitoreo (azul) y Red Orientada a Fuentes Significativas (negro). Adaptado de [26].	105
5.14	Emisiones nacionales de NO _x por tipo de fuente. Adaptado de [23].	108
5.15	Emisiones nacionales de CO por tipo de fuente. Adaptado de [23].	108
5.16	Emisiones vehiculares de NO _x por tipo de vehículo. Adaptado de [23].	109
5.17	Emisiones vehiculares de CO por tipo de vehículo. Adaptado de [23].	109
6.1	Recorrido realizado durante el registro de emisiones vehiculares en movimiento, 08/03/2016. Elaboración propia a partir de Google Earth.	112
6.2	Vehículos pesados ensayados en ralentí.	115
6.3	Vehículo pesado ensayado en movimiento, 21/08/2015.	115
6.4	Zona de estudio (calle Buenos Aires entre Zabala y Misiones).	116
7.1	Recorridos realizados durante el muestreo (cada color representa a un vehículo). Elaboración propia a partir de Google Earth.	119
7.2	Equipo KANE Auto 5-2 (Sitio web del fabricante: https://www.kane.co.uk/).	120
7.3	Conector OBDII utilizado durante el muestreo.	120
7.4	Emisiones de CO (%vol) registradas durante la medición efectuada sobre el vehículo N° 3 para cada instante de medición.	122
7.5	Factor de emisión de CO en función de la antigüedad.	124
7.6	Histograma de los factores de emisión de CO calculados.	125
7.7	Gráfico cuantil-cuantil (qqplot) FECO.	126
7.8	Gráfico cuantil-cuantil (qqplot) FENO.	126
7.9	Cálculo del intervalo de confianza del factor de emisión medio de CO.	128
7.10	Varianza de los registros representada por cada componente principal.	130
7.11	Dendrograma (enlace completo).	131
7.12	Distancia entre grupos (enlace completo).	132

8.1	Ubicación de la planta fija de SUCTA (Ruta 5 km 16).	138
8.2	Actividad desarrollada.	138
8.3	Caño de escape con posible rotura (círculo rojo).	141
8.4	Marcas de los camiones registrados.	148
8.5	Histograma de antigüedad de camiones.	150
8.6	Curvas de permanencia de las mediciones realizadas sobre camiones.	151
8.7	Histogramas de los factores de emisión para la muestra de camiones.	152
8.8	qqplot FE_{NO} camiones.	153
8.9	Marcas de los ómnibus ensayados.	154
8.10	Histograma de antigüedad de ómnibus.	155
8.11	Curvas de permanencia de las mediciones realizadas sobre ómnibus.	156
8.12	Histogramas de los factores de emisión para la muestra de ómnibus.	157
8.13	qqplot FE_{NO} ómnibus.	158
8.14	qqplot FE_{CO_2} ómnibus.	159
8.15	Dendrograma para agrupamiento de vehículos.	161
8.16	Distancias de agrupamiento para cada etapa (el proceso de agrupamiento se detiene en la etapa n°69).	162
8.17	Factor de emisión de NO en ralentí en función de la potencia y de la antigüedad.	163
8.18	Factor de emisión de CO_2 en ralentí en función de la potencia y de la antigüedad.	163
8.19	Emisiones en movimiento, vehículo N°1.	165
8.20	Variación de la velocidad de giro del motor durante las mediciones en movimiento.	166
9.1	Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia a partir de Google Earth.	170
9.2	Imágenes de la zona de estudio.	170
9.3	Imagen de la zona de estudio en donde se aprecian las alturas de los edificios presentes. Google Earth Street View.	172
9.4	Grilla construida (perspectiva).	173

9.5	Corte transversal de la grilla construida. Los distintos colores representan distintos bloques de cálculo.	173
9.6	Evolución de la dispersión: 10 s.	174
9.7	Evolución de la dispersión: 20 s.	174
9.8	Evolución de la dispersión: 30 s.	175
9.9	Evolución de la dispersión: 40 s.	175
9.10	Evolución de la dispersión: 50 s.	175
9.11	Evolución de la dispersión: 60 s.	176
9.12	Flujo de viento dentro de cañones urbanos para condiciones de viento perpendicular. Comparación entre resultados bibliográficos y la modelación realizada.	176
9.13	Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PERP ALTO.	177
9.14	Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PARA ALTO.	178
9.15	Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PERP BAJO.	178
9.16	Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PARA BAJO.	178
9.17	Evolución temporal de la concentración del trazador (adimensionado) para dos horas de simulación (patrón de dispersión PERP BAJO, $v= 0.6$ m/s).	179
9.18	Equipo utilizado para la medición de CO (calibración efectuada el 30/11/2015 válida hasta el 28/05/2016) (Sitio web de la marca comercial: http://www.rkiinstruments.com/pages/gx2009.htm).	180
9.19	Direcciones de viento registradas durante el muestreo.	182
9.20	Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 15.	183
9.21	Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 16.	184
9.22	Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 17.	184
9.23	Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 18.	184
9.24	Escenario Base.	188
9.25	Escenario O50AM.	188
9.26	Escenario O75AM.	189
9.27	Escenario O100AM.	189
9.28	Escenario O100A.	189

9.29	Escenario O100M.	190
9.30	Escenario OA100M.	190
9.31	Escenario OAC100M.	190
10.1	Número de muestras de vehículos livianos, comparación con trabajos bibliográficos.	194
10.2	Número de muestras de vehículos pesados, comparación con trabajos bibliográficos.	194
10.3	Factor de emisión de CO en función de la antigüedad para cada vehículo liviano ensayado y normas de emisión de la Unión Europea.	196
10.4	Resultados del análisis de clusters efectuado para la muestra de vehículos pesados.	197
10.5	Comparación gráfica entre registros de alto y bajo rendimiento del combustible.	198
10.6	Composición actual del flujo vehicular circulante.	199
10.7	Reducción del flujo de ómnibus en un 100%. Reemplazo de ómnibus equitativo entre autos y motos.	200
10.8	Ubicación del punto de modelación considerado inicialmente (asterisco de color blanco) para la evaluación de la variación de la concentración del trazador en altura.	201
10.9	Porcentaje de reducción de la concentración con la altura (altura inicial=1.5 m).	201

Lista de tablas

1.1	Composición química de la atmósfera. Adaptado de [75].	2
1.2	Principales fuentes de contaminantes atmosféricos. Adaptado de [7].	4
1.3	Escalas de tiempo características del transporte atmosférico. Adaptado de [75].	4
2.1	Factores de emisión de NO _x relevados en la bibliografía consultada para vehículos pesados. Elaboración propia a partir de [54], [21], [76], [20], [78], [72], [51], [10] y [73].	31
5.1	Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gasolina★. Adaptado de [3].	89
5.2	Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gas oil*. Adaptado de [3].	89
5.3	Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gasolina al momento de la inspección técnica vehicular. Estas disposiciones se aplican fuera de la Región Metropolitana de Santiago. Adaptado de [3].	90
5.4	Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gas oil al momento de la inspección técnica vehicular. Adaptado de [3].	90
5.5	Norma europea EURO 4 y EURO IV. Adaptado de [9].	92
5.6	Porcentaje de hogares con automóviles según nivel socio-económico. Adaptado de [33].	94
5.7	Rendimiento medio de los vehículos livianos nacionales en función del tipo de recorrido. Adaptado de [58].	98
5.8	Red Base de monitoreo. Adaptado de [26].	104
5.9	Red Orientada a Fuentes Significativas. Adaptado de [26].	104

5.10	Índice de Calidad de Aire. Adaptado de [26].	105
5.11	Valores del ICAire correspondientes al año 2015 obtenidos en la estación Palacio Legislativo. Adaptado de [26].	106
6.1	Parámetros registrados durante el muestreo.	113
7.1	Características de los vehículos utilizados durante el muestreo. . .	118
7.2	Factores de emisión medios calculados.	123
7.3	Factores de emisión medios e intervalos de confianza al 95 % (valores calculados).	128
7.4	Clusters formados (enlace completo).	133
7.5	Clusters formados (Ward).	134
8.1	Parámetros registrados durante el muestreo de emisiones vehi- culares sobre vehículos pesados.	139
8.2	Cantidad de vehículos ensayados.	140
8.3	Ensayos en movimiento.	140
8.4	Valores medios de los parámetros consultados.	149
8.5	Valores medios y desviaciones estándar de las mediciones efec- tuadas sobre camiones.	150
8.6	Valor medio y desviación estándar de los factores de emisión calculados para la flota de camiones analizada.	151
8.7	Intervalos de confianza de los factores de emisión medios calcu- lados para la muestra de camiones analizada.	153
8.8	Valores medios de los parámetros consultados.	154
8.9	Valores medios y desviaciones estándar de las mediciones efec- tuadas sobre ómnibus.	156
8.10	Valor medio y desviación estándar de los factores de emisión calculados para la flota de ómnibus analizada.	157
8.11	Intervalos de confianza de los factores de emisión medios calcu- lados para la muestra de ómnibus analizada.	159
8.12	Características medias de los agrupamientos formados [†]	162
8.13	Velocidad de giro del motor y emisiones de CO ₂ en ralentí. . . .	165
8.14	Estimación de factores de emisión en movimiento [†]	166
8.15	Resumen de factores de emisión, NO.	166
8.16	Resumen de factores de emisión, CO ₂	167
8.17	Factores de emisión de NO (diversas unidades de medida). . . .	167

8.18	Factores de emisión de NO (bibliografía).	167
9.1	Características del tramo de calle estudiado.	171
9.2	Patrones ideales de flujo de viento.	177
9.3	Información relevada durante el muestreo.	180
9.4	Factores de emisión considerados.	182
9.5	Resultados de la modelación de los escenarios relevados.	183
9.6	Cantidad de personas transportadas por cada tipo de vehículo [61].	187
9.7	Escenarios de flujo vehicular.	187
9.8	Concentraciones de CO modeladas para cada escenario de flujo vehicular analizado.	191
10.1	Factores de emisión medios e intervalos de confianza al 95 % calculados para la flota de vehículos livianos analizada.	195
10.2	Factores de emisión medios de NO e intervalos de confianza al 95 % calculados para la flota de vehículos pesados analizada.	195
B.1	Registros sin procesar.	222
B.2	Registros sin procesar (continuación).	223
C.1	Registros sin procesar.	226
C.2	Registros sin procesar (continuación).	227
D.1	Registros sin procesar.	230
D.2	Registros sin procesar (continuación).	231
D.3	Registros sin procesar (continuación).	232
D.4	Registros sin procesar (continuación).	233
D.5	Registros sin procesar (continuación).	234
D.6	Registros sin procesar (continuación).	235
D.7	Registros sin procesar (continuación).	236
E.1	Registros sin procesar.	238
E.2	Registros sin procesar (continuación).	239
E.3	Registros sin procesar (continuación).	240
E.4	Registros sin procesar (continuación).	241
E.5	Registros sin procesar (continuación).	242
E.6	Registros sin procesar (continuación).	243

E.7	Registros sin procesar (continuación).	244
E.8	Registros sin procesar (continuación).	245
E.9	Registros sin procesar (continuación).	246
F.1	Registros sin procesar.	248
F.2	Registros sin procesar (continuación).	249
F.3	Registros sin procesar (continuación).	250
F.4	Registros sin procesar (continuación).	251
F.5	Registros sin procesar (continuación).	252
G.1	Registros sin procesar.	254
G.2	Registros sin procesar (continuación).	255
G.3	Registros sin procesar (continuación).	256
H.1	Registros sin procesar.	258
I.1	Registros sin procesar.	260
I.2	Registros sin procesar (continuación).	261
I.3	Registros sin procesar (continuación).	262
J.1	Registros sin procesar.	264
J.2	Registros sin procesar (continuación).	265
J.3	Registros sin procesar (continuación).	266
J.4	Registros sin procesar (continuación).	267
J.5	Registros sin procesar (continuación).	268
J.6	Registros sin procesar (continuación).	269
K.1	Registros sin procesar.	272
K.2	Registros sin procesar (continuación).	273
K.3	Registros sin procesar (continuación).	274
K.4	Registros sin procesar (continuación).	275
K.5	Registros sin procesar (continuación).	276
L.1	Registros sin procesar.	278
L.2	Registros sin procesar (continuación).	279
L.3	Registros sin procesar (continuación).	280
M.1	Registros sin procesar.	282
M.2	Registros sin procesar (continuación).	283

M.3	Registros sin procesar (continuación).	284
M.4	Registros sin procesar (continuación).	285
N.1	Registros sin procesar.	288
Ñ.1	Registros sin procesar: vehículo N°1.	290
Ñ.2	Registros sin procesar: vehículo N°2.	291
Ñ.3	Registros sin procesar: vehículo N°3.	292
Ñ.4	Registros sin procesar: vehículo N°4.	292

Lista de siglas

ACAU	Asociación del Comercio Automotor del Uruguay	210
ANCAP	Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland	104
AR	Aspect Ratio	52
CADC	Common Artemis Driving Cycle	47
CFC_s	Clorofluorocarbonos	1
CFD	Computational Fluid Dynamics	60
CLA	Capa Límite Atmosférica	12
COT	Compuestos Orgánicos Totales	107
COV_s	Compuestos Orgánicos Volátiles	3
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano	107
CTM	Chemical Transport Model	56
DOC	Diesel Oxidation Catalyst	36
EGR	Exhaust Gas Recirculation	36
EI	Emission Index	143
ELR	European Load Response	87
EPRS	European Parliamentary Research Service	210
ESC	European Stationary Cycle	87
ETC	European Transient Cycle	87
GEI	Gases de Efecto Invernadero	1
GPS	Sistema de Posicionamiento Global	34
HC	Hidrocarburos no quemados	3
HCNM	Hidrocarburos No Metánicos	89
ICAire	Índice de Calidad de Aire	105
ICCT	The International Council on Clean Transportation	210
IM	Intendencia de Montevideo	100
INUMET	Instituto Uruguayo de Meteorología	180

LNT Lean NO_x Traps 81

MP Material Particulado 3

MP₁₀ Material Particulado con diámetro inferior a 10 μm 6

MP_{2.5} Material Particulado con diámetro inferior a 2.5 μm 6

MTOP Ministerio de Transporte y Obras Públicas 137

NASA National Aeronautics and Space Administration xv, 3

NEDC New European Driving Cycle 37

OBD On Board Diagnostics 34

OIML International Organization of Legal Metrology 119

OMS Organización Mundial de la Salud xvi, 26

OSPM Operational Street Pollution Model 59

PBI Producto Bruto Interno xvi, 26

PCB_s Policlorobifenilos 6

PEMS Portable Emissions Measurement System 34

PTS Partículas Totales en Suspensión (hasta 100 μm de diámetro aerodinámico) 104

RPM Revoluciones Por Minuto 89

RS Radiación Solar 9

SCE Sistema de Control de Emisiones 139

SCR Selective Catalytic Reduction 40

STM Sistema de Transporte Metropolitano 100

SUCIVE Sistema Único de Cobro de Ingresos Vehiculares 94

SUCTA Sociedad Uruguaya de Control Técnico de Automotores 109

TRS Compuestos de Azufre Reducido 104

TWC Three-Way Catalyst 38

Tep Toneladas Equivalentes de Petróleo 107

UE Unión Europea 25

UTE Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas 104

VSP Vehicle-Specific Power 37

WHSC World Harmonized Stationary Cycle 87

WHTC World Harmonized Transient Cycle 87

WLTC Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle 87

WLTP Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure 47

WMTC Worldwide Motorcycle Test Cycle 47

Tabla de contenidos

Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XXV
Lista de siglas	XXXII
1 Conceptos generales sobre contaminación atmosférica	1
1.1 Introducción	1
1.2 Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos	3
1.3 Principales contaminantes atmosféricos	6
1.3.1 Material particulado (MP)	6
1.3.2 Monóxido de carbono (CO)	7
1.3.3 Dióxido de azufre (SO ₂)	8
1.3.4 Compuestos orgánicos volátiles (COV _s)	8
1.3.5 Óxidos de nitrógeno (NO _x)	8
1.3.6 Ozono (O ₃)	9
1.4 Factores que afectan a la contaminación atmosférica	12
1.4.1 Introducción	12
1.4.2 Teoría de la parcela	13
1.5 Contaminación atmosférica de origen vehicular	19
1.5.1 Parámetros que controlan la formación de contaminantes en el motor de vehículos	22
1.5.2 Tendencias actuales relativas a la contaminación at- mosférica en la Unión Europea	26
2 Cuantificación de emisiones	29
2.1 Factores de emisión	29
2.2 Medición de emisiones vehiculares	32

2.2.1	Condiciones controladas	32
2.2.2	Condiciones reales de manejo	33
2.3	Fuentes de variabilidad de emisiones vehiculares	36
2.3.1	Características del vehículo	36
2.3.2	Sistemas de control de emisiones	38
2.3.3	Condiciones de manejo	39
2.3.4	Método de medición de emisiones	45
3	Introducción a la modelación de la dispersión atmosférica de emisiones vehiculares	51
3.1	Cañones urbanos	51
3.1.1	Introducción	51
3.1.2	Características de los cañones urbanos	52
3.2	Modelación de la dispersión de contaminantes en cañones urbanos	56
3.2.1	Clases de modelos	58
3.2.2	Requerimientos de los modelos	64
4	Medidas de gestión para la contaminación atmosférica de origen vehicular	65
4.1	Introducción	65
4.2	Geometría urbana	67
4.3	Alteración de la geometría urbana existente	73
4.3.1	Vehículos estacionados	73
4.3.2	Presencia de árboles	74
4.4	Tipos de medios de transporte	76
4.5	Gestión del tránsito	78
4.6	Modernización de la flota vehicular	81
5	Caso de aplicación: antecedentes	85
5.1	Introducción	85
5.2	Marco legal	86
5.2.1	Normativa internacional	86
5.2.2	Normativa nacional	91
5.3	Antecedentes nacionales	94
5.3.1	Parque vehicular nacional	94
5.3.2	Plan de Movilidad de Montevideo	100
5.3.3	Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Montevideo .	104

5.3.4	Inventario de Emisiones Atmosféricas 2006	107
6	Metodología de trabajo	111
6.1	Introducción	111
6.2	Caracterización de emisiones de vehículos livianos en circulación	112
6.3	Caracterización de emisiones de vehículos pesados en circulación	114
6.4	Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares	116
7	Caracterización de emisiones de vehículos livianos en circulación	117
7.1	Introducción	117
7.2	Muestreo desarrollado	118
7.3	Procesamiento de datos	121
7.3.1	Vehículos separados	121
7.3.2	Vehículos agrupados	124
8	Caracterización de emisiones de vehículos pesados en circulación	137
8.1	Introducción	137
8.2	Muestreo desarrollado	138
8.3	Procesamiento de datos	142
8.3.1	Mediciones en ralentí	148
8.3.2	Relación entre los factores de emisión y otros parámetros de los vehículos	160
8.3.3	Mediciones en movimiento	165
9	Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares	169
9.1	Introducción	169
9.2	Zona de estudio: descripción y representación gráfica	170
9.3	Evolución temporal de la dispersión	174
9.4	Patrones de dispersión	177
9.5	Comparación entre concentraciones medidas y modeladas	180
9.6	Análisis de escenarios	186
10	Discusión de resultados	193
10.1	Introducción	193
10.2	Tamaño muestral	194

10.3 Norma de emisión de la flota nacional analizada	195
10.4 Vínculo entre las emisiones y los demás parámetros de los vehículos	197
10.5 Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares	199
11 Conclusiones y líneas de trabajo futuras	203
11.1 Conclusiones	203
11.2 Líneas de trabajo a futuro	205
Referencias bibliográficas	207
Apéndices	217
Apéndice A Curva de calibración de instrumento de medición de emisiones vehiculares	219
Apéndice B Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 1	221
Apéndice C Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 2	225
Apéndice D Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 3	229
Apéndice E Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 4	237
Apéndice F Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 5	247
Apéndice G Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 6	253
Apéndice H Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 7	257
Apéndice I Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 8	259
Apéndice J Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 9	263
Apéndice K Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 10	271
Apéndice L Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 11	277
Apéndice M Muestreo de emisiones de vehículos pesados en ralentí: camiones	281

Apéndice N Muestreo de emisiones de vehículos pesados en ralenti: ómnibus.	287
Apéndice Ñ Muestreo de emisiones de vehículos pesados en movi- miento: camiones	289

Capítulo 1

Conceptos generales sobre contaminación atmosférica

1.1. Introducción

La expresión *contaminación atmosférica* abarca distintos fenómenos [75]:

- Intensificación del efecto invernadero debido a las emisiones atmosféricas de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI).
- Destrucción del ozono estratosférico (especialmente sobre el Polo Sur) catalizada por los Clorofluorocarbonos (CFC_s) emitidos a la atmósfera.
- Problemas de calidad de aire locales asociados a contaminación fotoquímica, con partículas, lluvia ácida y contaminación transfronteriza.
- Impacto ambiental generado por pérdidas accidentales a la atmósfera.

Todas estas temáticas tienen en común su vínculo con la composición química de la atmósfera y con su capacidad de dispersión. La presente tesis se enmarca dentro de los eventos de contaminación atmosférica asociados a problemas de calidad de aire locales.

La atmósfera puede ser dividida en diversas regiones (**Figura 1.1**). La más cercana a la superficie de la Tierra, típicamente de 12 km a 15 km de espesor, es la tropósfera. Más allá que la misma representa una pequeña fracción del volumen de la atmósfera, ésta es la región en donde se producen la mayoría de las emisiones antropogénicas y la totalidad de las naturales [17].

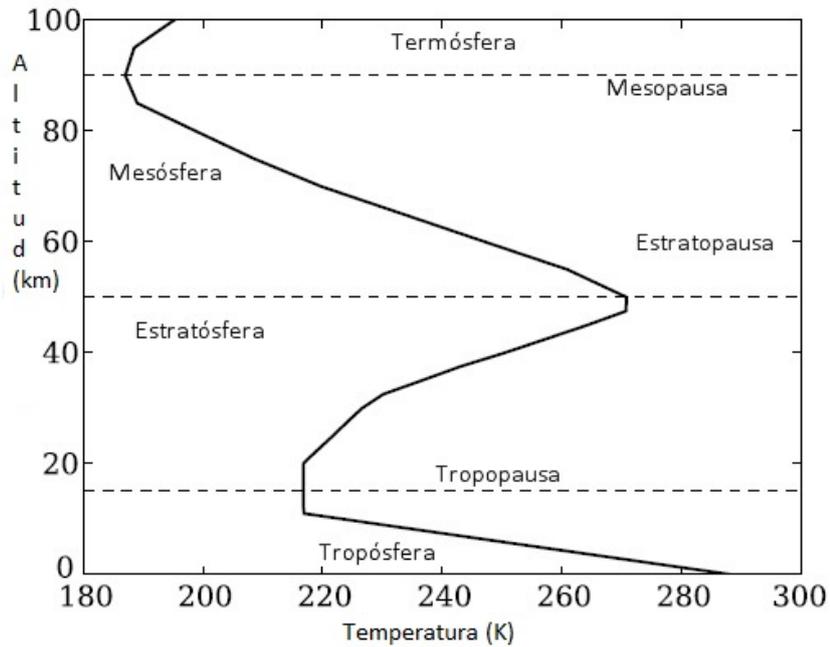


Figura 1.1: Regiones atmosféricas y distribución de temperatura en altura. Adaptado de [75].

En la [Tabla 1.1](#) se muestra la composición química de la atmósfera. Se destaca que más allá de las bajas concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el aire, los mismos son capaces de generar efectos adversos importantes ¹.

Tabla 1.1: Composición química de la atmósfera. Adaptado de [75].

Especie	Fórmula química	Concentración atmosférica
Nitrógeno	N_2	780000 ppmv
Oxígeno	O_2	210000 ppmv
Argón	Ar	9300 ppmv
Dióxido de carbono	CO_2	365 ppmv
Ozono	O_3	1 ppbv - 10 ppmv
Metano	CH_4	1.8 ppmv
Óxido nitroso	N_2O	314 ppbv

¹Las concentraciones de ozono, metano y óxido nitroso son fuertemente dependientes de las condiciones locales.

1.2. Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos son sustancias transportadas por el aire (sólidas, líquidas o gaseosas) que están presentes en concentraciones lo suficientemente altas como para amenazar la salud humana y de animales, para afectar a la vegetación y a las estructuras o para contaminar determinado ambiente. En esta tesis, no se consideran agentes contaminantes de origen físico o biológico.

Dichos contaminantes provienen de fuentes naturales y antropogénicas. Ejemplos de fuentes naturales son la erosión eólica, las erupciones volcánicas y los incendios forestales ([Figura 1.2](#)).



(a) Erupción del volcán Puyehue, 2 de julio de 2011. (b) Incendio forestal en la Selva del Amazonas, 19 de agosto de 2014.

Figura 1.2: Algunos ejemplos de fuentes naturales de contaminación atmosférica ([Observatorio terrestre de la NASA](#)).

Las fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica pueden ser fijas o móviles. Las fuentes fijas en general se atribuyen a complejos industriales, plantas de generación de energía, sitios de disposición final de residuos sólidos, hogares, etc. Las fuentes móviles incluyen a los vehículos terrestres, barcos y aviones.

Los contaminantes atmosféricos se dividen en primarios y secundarios: los primarios son emitidos directamente por las fuentes antes mencionadas mientras que los secundarios se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas en las que participan contaminantes primarios y otros componentes del aire. En la [Tabla 1.2](#) se detallan las principales fuentes de contaminantes atmosféricos.

Tabla 1.2: Principales fuentes de contaminantes atmosféricos. Adaptado de [7].

Tipo de fuente	Fuente	Contaminantes emitidos
Natural	Erupciones volcánicas	Material Particulado (MP), SO ₂ , CO ₂
	Incendios forestales	Humo, Hidrocarburos no quemados (HC), CO ₂ , NO _x , MP
	Tormentas de arena	MP
	Olas oceánicas	Sales
	Vegetación	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV _s)
Antropogénica (industrial)	Aguas termales	Gases sulfurosos
	Fábricas de papel	MP, SO _x
	Plantas de energía (carbón)	MP, SO _x , NO _x
	Plantas de energía (petróleo)	SO _x , NO _x , CO
	Refinerías	HC, SO _x , CO, TRS
	Fabricación de ácido sulfúrico	SO ₂ , SO ₃ , H ₂ SO ₄
	Fabricación de fertilizante fosfatado	MP, flúor gaseoso
	Fabricación de hierro y acero	Óxidos metálicos, humo, MP, gases orgánicos e inorgánicos
Antropogénica (no industrial)	Fabricación de plásticos	Resinas gaseosas
	Fabricación de pinturas/barniz	Acroleína, compuestos de azufre
	Vehículos	CO, NO _x , COV _s , MP
	Hornos y estufas	CO, MP
	Quema de residuos	CO, MP

La comparación entre el tiempo de residencia atmosférico de un contaminante (primario o secundario) y las escalas de tiempo características del transporte atmosférico determinan la escala de su impacto. En la [Tabla 1.3](#) se muestran las escalas de tiempo características del transporte atmosférico.

Tabla 1.3: Escalas de tiempo características del transporte atmosférico. Adaptado de [75].

Transporte	Escala de tiempo característica
Continental	Una semana
Transcontinental	Dos semanas
Hemisférico	Un mes
Inter-hemisférico	Un año
Capa límite atmosférica	Entre una hora y un día
Tropósfera libre (aprox. 5000 m)	Una semana
Tropósfera	Un mes
Intercambio desde la tropósfera hacia la estratósfera	Entre cinco y diez años
Intercambio desde la estratósfera hacia la tropósfera	Entre uno y dos años

El tiempo de residencia en la atmósfera de una sustancia depende de ([Figura 1.3](#)):

- Reacciones químicas o fotoquímicas.
- Deposición seca en superficie.
- Barrido de especies gaseosas solubles y aerosoles por la lluvia.

- Sedimentación de partículas gruesas.

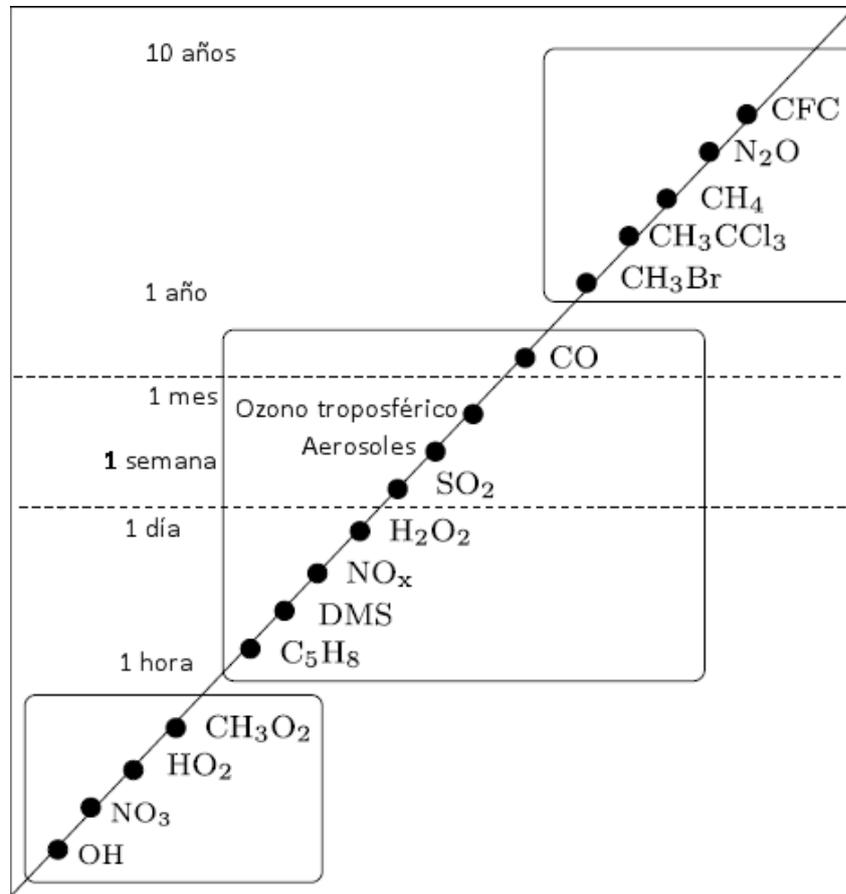


Figura 1.3: Tiempo de residencia de algunas sustancias en la atmósfera. Adaptado de [75].

1.3. Principales contaminantes atmosféricos

Los *contaminantes criterio* son un conjunto de agentes muy abundantes especialmente en los centros urbanos, con potencial de generar efectos perjudiciales para la salud de las personas. Debido a ello y para evitarlos, se suele establecer límites (guías y estándares) para proteger la salud y el bienestar humano. Tales valores se fijan con un razonable margen de seguridad para que efectivamente cumplan esa función de protección. A continuación se listan los contaminantes criterio:

- Monóxido de carbono.
- Dióxido de azufre.
- Óxidos de nitrógeno.
- Ozono.
- Material particulado con diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$.

En los apartados que siguen se describe a los contaminantes criterio en conjunto con los Compuestos Orgánicos Volátiles.

1.3.1. Material particulado (MP)

El término material particulado representa a un grupo de partículas sólidas y de gotas líquidas que son lo suficientemente pequeñas como para permanecer suspendidas en el aire. El término aerosol incluye partículas sólidas que pueden afectar a las personas pero que usualmente no son tóxicas, como por ejemplo el hollín, el polvo doméstico, el humo y el polen [7].

En esta categoría también se incluyen pequeñas gotas de ácido sulfúrico, Policlorobifenilos (PCBs), petróleo y varios pesticidas.

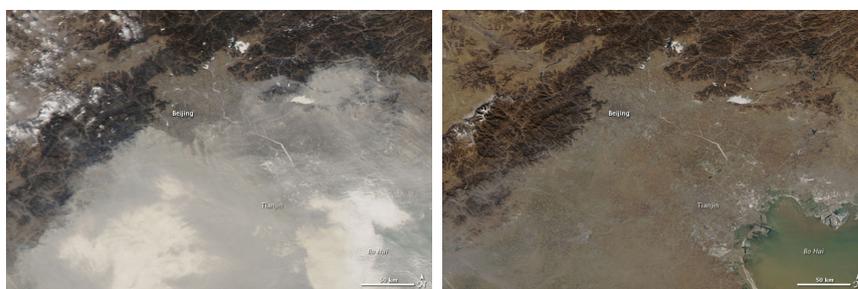
La contaminación atmosférica por material particulado es la más notoria debido a la gran disminución de visibilidad que produce (Figura 1.4). El material particulado recolectado en ciudades puede contener hierro, cobre, níquel y plomo entre otras sustancias.

La contaminación con material particulado puede rápidamente afectar el sistema respiratorio de las personas. Una vez dentro de los pulmones, el material particulado puede dificultar la respiración, en particular para aquellas personas con afecciones respiratorias crónicas. Estudios recientes afirman que la contaminación con material particulado puede afectar el ritmo cardíaco [7].

El Material Particulado con diámetro inferior a $10\ \mu\text{m}$ (MP₁₀) constituye un

tipo de partículas de especial interés al evaluar los efectos sobre la salud derivados de la contaminación con material particulado, ya que las mismas son lo suficientemente pequeñas como para penetrar a través de los mecanismos naturales de defensa de los pulmones [7].

El Material Particulado con diámetro inferior a $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2.5}$) es especialmente peligroso. En primer lugar, debido a su tamaño, puede penetrar hasta una profundidad mayor en los pulmones que el MP_{10} . Por otra parte, este tipo de partículas en general se componen de productos de combustión tóxicos o cancerígenos.



(a) Niebla sobre el norte de China, (b) Misma zona luego del evento de niebla, 11 de enero de 2012.

Figura 1.4: Evento de contaminación con material particulado en el norte de China (durante el evento, la concentración de MP_{10} alcanzó un valor de $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los registros de $\text{MP}_{2.5}$ se encontraron fuera de escala durante la mañana del 10 de enero de 2012 evolucionando hacia niveles moderados en la tarde) ([Observatorio terrestre de la NASA](#)).

1.3.2. Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro y potencialmente tóxico que se forma durante la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono. La contaminación con CO puede resultar peligrosa en zonas poco ventiladas como los cañones urbanos o los estacionamientos subterráneos. El monóxido de carbono ingresa al torrente sanguíneo a través de los pulmones y se combina preferentemente con la hemoglobina para producir un compuesto denominado carboxihemoglobina (COH_b). Dicho compuesto desplaza al oxígeno reduciendo, de esta manera, el transporte del mismo a los órganos y tejidos corporales. Se destaca que la afinidad del CO a la hemoglobina es entre 200 y 230 veces superior a la del oxígeno. Dependiendo de las concentraciones ambientales de CO y del tiempo de exposición, la disminución en la cantidad

de oxígeno transportado por la sangre puede causar dolor de cabeza, fatiga, somnolencia e incluso la muerte.

1.3.3. Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro que proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles (como carbón y petróleo). Sus fuentes principales incluyen plantas de generación de energía, fundiciones, refinerías de petróleo y fábricas de papel. Sin embargo, el SO₂ también puede ser emitido por fuentes naturales como por ejemplo las erupciones volcánicas. El SO₂ emitido se oxida rápidamente para formar SO₃ y, en aire húmedo, ácido sulfúrico H₂SO₄ (contaminantes secundarios).

Si se inhalan concentraciones elevadas de SO₂ pueden agravarse problemas respiratorios existentes como asma, bronquitis y enfisema.

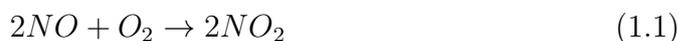
1.3.4. Compuestos orgánicos volátiles (COV_s)

Los compuestos orgánicos volátiles son hidrocarburos con hasta 5 átomos de carbono en su molécula. El más abundante es el metano. Algunos COV_s reaccionan con óxidos de nitrógeno en presencia de radiación solar para formar contaminantes secundarios.

Algunos COV_s como por ejemplo el benceno y el benzopireno son cancerígenos [7].

1.3.5. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son gases que se forman cuando parte del nitrógeno presente en el aire reacciona con oxígeno durante la combustión a altas temperaturas. Los óxidos de nitrógeno se dividen en NO₂ y NO. En aire húmedo, el NO₂ reacciona con vapor de agua para formar ácido nítrico (HNO₃), sustancia que contribuye al fenómeno denominado lluvia ácida. Los óxidos de nitrógeno son precursores del ozono. La mayoría de las emisiones de óxidos de nitrógeno se producen en forma de NO. Una pequeña fracción, generalmente menor al 10 %, se emite como NO₂. Este compuesto también puede generarse cerca de la fuente de emisión a través de la reacción química presentada en la [Ecuación 1.1](#).



La tasa de conversión de NO a NO₂ es fuertemente dependiente de la concentración de NO. Por lo tanto, cerca de las fuentes de emisión de NO, la tasa de conversión es alta pero decrece dramáticamente con la dispersión atmosférica del NO.

En general, el mecanismo de conversión anterior es insignificante, siendo el camino preferencial para la formación de NO₂ el descrito en la [Ecuación 1.2](#).



A concentraciones de ozono típicas de la capa límite atmosférica (30 ppbv), la reacción anterior ocurre normalmente en un minuto [57]. Durante el día, sin embargo, el NO₂ es transformado nuevamente a NO como resultado de la fotólisis.

Altas concentraciones de NO_x pueden agravar problemas cardíacos y respiratorios de salud además de reducir la resistencia a las infecciones respiratorias.

1.3.6. Ozono (O₃)

En la tropósfera, el ozono es un oxidante fuerte con olor desagradable que irrita los ojos y las mucosas del sistema respiratorio, agravando enfermedades crónicas como asma y bronquitis. Incluso en personas sanas, la exposición a concentraciones relativamente bajas de O₃ durante seis o siete horas durante la realización de ejercicios moderados puede reducir de forma significativa la función pulmonar. Esta situación en general viene acompañada por dolores en el pecho, náuseas, tos y congestión pulmonar. El ozono es el principal componente del smog fotoquímico¹.

El ozono estratosférico conforma una capa protectora del planeta frente a la radiación ultravioleta proveniente del Sol. Sin embargo, cerca de la superficie, en una atmósfera contaminada, dicho gas (conocido como ozono troposférico) es un contaminante secundario que se forma como resultado de un complejo conjunto de reacciones químicas que involucran a otros contaminantes, como por ejemplo a los NO_x y a los COV_s. Debido a que la radiación solar es necesaria para la producción de ozono, las concentraciones de este contaminante son generalmente mayores durante la tarde y durante los meses de verano.

¹El término smog agrupa los conceptos smoke (humo) y fog (niebla) y fue propuesto por el físico Harold Des Voeux en 1911 (aproximadamente) para describir la contaminación atmosférica de la ciudad de Londres [7]. El fenómeno de smog fotoquímico fue reconocido por primera vez en Los Ángeles en la década de 1940.

El proceso de generación de ozono troposférico puede ilustrarse a partir de las reacciones químicas simplificadas que se muestran entre la [Ecuación 1.3](#) y la [Ecuación 1.5](#)¹.



En las reacciones anteriores se observa un proceso cíclico de formación y destrucción de ozono. Este sistema de reacciones químicas tiende a estabilizar la concentración de ozono troposférico (estado foto-estacionario) [75]. Sin embargo, pueden formarse grandes concentraciones de ozono si parte del NO reacciona con otros gases y no destruye el ozono formado. Un ejemplo de este caso se ilustra en la [Ecuación 1.6](#) [57].



Se destaca que los RO₂ son formados como consecuencia de las emisiones de hidrocarburos. Teniendo en cuenta que las emisiones gaseosas vehiculares incluyen hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno entre sus componentes, dichas emisiones podrían provocar incrementos en la concentración del ozono troposférico. En zonas urbanas se supone que la concentración de ozono está limitada por la emisión de COV_s.

Las máximas concentraciones de ozono se encuentran, en general, viento abajo de las fuentes de emisión, ya que el comienzo de las reacciones químicas que llevan a su formación tarda del orden de horas hasta días.

En el marco de un episodio de smog fotoquímico, los primeros compuestos que aparecen cronológicamente son los asociados con las emisiones vehiculares: monóxido de carbono y de nitrógeno. Este último, al comenzar las horas de insolación, se oxida fotoquímicamente a NO₂. El pico de la concentración de NO₂ aparece un par de horas después que el del NO. Al disminuir las concentraciones de NO₂ aumentan las de ozono, produciéndose el valor de pico al cabo de 5 a 6 horas después de la emisión de los contaminantes primarios y

¹M en general es N₂ [57]. En la ecuación también participa la Radiación Solar (RS).

declinando luego gradualmente.

Por lo tanto, si se asocian los fenómenos de smog fotoquímico con las emisiones vehiculares, puede deducirse el horario de los picos de los contaminantes secundarios adicionando respectivamente 2 y 6 horas a la hora de mayor flujo vehicular, siempre y cuando se den las condiciones para que la radiación solar actúe como catalizador del proceso [36].

1.4. Factores que afectan a la contaminación atmosférica

1.4.1. Introducción

La intensidad de los eventos de contaminación es gobernada principalmente por las condiciones meteorológicas reinantes en la parte baja de la tropósfera. La dispersión de los contaminantes emitidos queda determinada por dos procesos:

- Transporte horizontal por el campo de viento que explica el transporte de contaminantes persistentes a lo largo de grandes distancias.
- Mezcla vertical debida a la turbulencia atmosférica la cual es inducida directamente por efectos de la capa límite.

A continuación se describen las posibles fuentes de turbulencia atmosférica:

- Turbulencia mecánica: inducida por el rozamiento vertical del viento.
- Turbulencia térmica o convectiva: inducida por la distribución vertical de temperaturas (la superficie de la Tierra se calienta durante el día y se enfría durante la noche).

En términos sencillos, la Capa Límite Atmosférica (CLA) es definida como la parte de la atmósfera que es sensible, en el corto plazo (unas pocas horas) a las condiciones variables de la superficie terrestre. Un parámetro clave es la altura de la CLA (altura de mezcla). Este parámetro representa la altura del volumen en donde se mezclan los contaminantes emitidos. Como consecuencia de lo anterior, la altura de mezcla determina las concentraciones ambientales de los contaminantes emitidos.

El estado de dilución de la CLA se clasifica usualmente en tres grupos:

- CLA neutra.
- CLA inestable: alta dispersión de contaminantes, situación común durante el día.
- CLA estable: los contaminantes se acumulan a nivel de suelo (dispersión pobre). Típicamente, este estado se da durante la noche.

1.4.2. Teoría de la parcela

Para explicar el concepto de estado de dilución de la CLA es necesario introducirse en los procesos termodinámicos que experimenta una parcela de aire que evoluciona en la atmósfera (Figura 1.5).

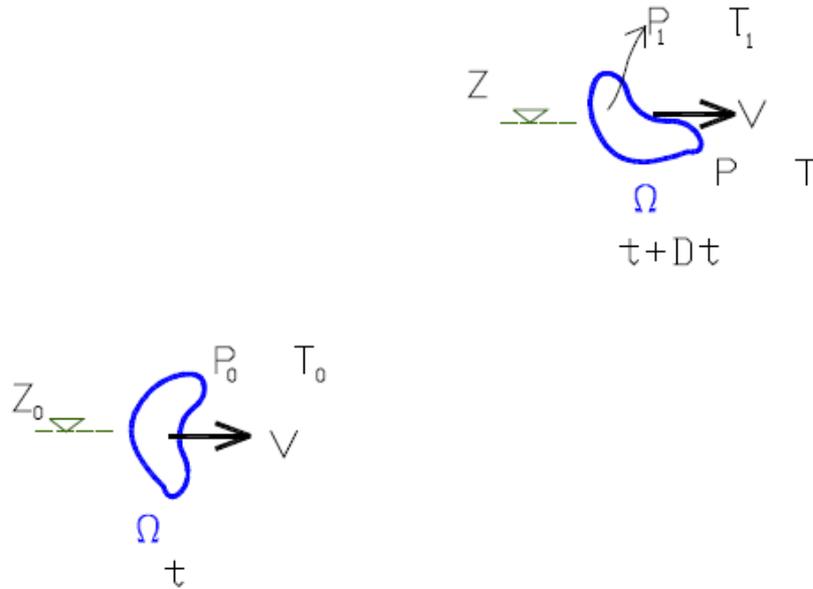


Figura 1.5: Evolución de una parcela de aire [13].

Se supone inicialmente que, moviéndose en la atmósfera, esa parcela presenta la misma presión y temperatura que el medio que la rodea y entonces sufre un cambio en su posición vertical. Se suele suponer que la velocidad a la que ocurre ese proceso de evolución vertical es suficientemente grande como para que no se registre intercambio de calor con el medio (proceso adiabático). En un proceso adiabático, la relación entre la presión y el volumen queda descrita por la Ecuación 1.7.

$$p * V^k = constante \quad (1.7)$$

Donde k representa el cociente entre los calores específicos a presión y volumen constante. Si se supone que la parcela que evoluciona contiene un gas ideal, también se verifica la relación ilustrada en la Ecuación 1.8.

$$\frac{T}{p^\alpha} = constante \quad (1.8)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{k-1}{k} \quad (1.9)$$

Se supone que se lleva una parcela de fluido, como la presentada en la [Figura 1.5](#), desde una condición inicial hasta una presión de 100 kPa (esta presión se corresponde aproximadamente con la presión ambiente a nivel del mar) siguiendo un proceso adiabático. La temperatura que adoptaría dicha parcela de fluido se denomina temperatura potencial (θ) y su valor sería:

$$\theta = T * \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}}; p_0 = 100kPa \quad (1.10)$$

De acuerdo a lo expuesto, cuando una parcela de aire evoluciona en la atmósfera lo hace a temperatura potencial constante. Es decir, el gradiente vertical de la temperatura potencial es nulo. Desarrollando la expresión correspondiente al gradiente vertical de la temperatura potencial, igualando su valor a cero y suponiendo que el gradiente vertical de presiones es de tipo hidrostático, se llega a la siguiente expresión para el gradiente vertical de temperatura:

$$\Gamma = \frac{\partial T}{\partial z}|_{ad} \approx -10^\circ C/km \quad (1.11)$$

Este gradiente se denomina gradiente adiabático seco y sería el que experimentaría una parcela de aire seco cuando evoluciona en la atmósfera.

Cabe recordar que el aire es una mezcla de gases y vapores. Al cambiar la temperatura y la presión de la mezcla es posible que parte de esos vapores cambien de estado; en especial, esto ocurre con el agua. Los cambios de estado traen consigo un aporte o un consumo de calor. Este calor adicional actúa modificando la temperatura del sistema y, por consiguiente, el gradiente vertical de temperatura adiabático seco. El gradiente vertical adiabático húmedo de temperatura tendrá un valor entre $-4^\circ C/km$ y $-9^\circ C/km$.

Se supone que la parcela que evoluciona en la atmósfera ([Figura 1.5](#)) presenta una condición termodinámica diferente a la del medio que la rodea. Sea ρ_1 la densidad de la parcela y ρ la densidad del medio. La parcela en cuestión experimentará una fuerza debida a su peso y otra al empuje del medio que la rodea. Dichas fuerzas se vinculan con la aceleración de la parcela según la

segunda ley de Newton:

$$\rho_1 * a = (\rho_1 - \rho) * g \quad (1.12)$$

Si se supone que la parcela y el medio están conformados por el mismo gas ideal y que las presiones de la parcela y del medio se igualan, la aceleración de la parcela queda expresada de la siguiente forma:

$$a = \frac{T - T_1}{T} * g \quad (1.13)$$

Es decir que, si la parcela se elevara llegando a un medio cuya temperatura resultara mayor que la de la misma, entonces la parcela experimentaría una aceleración de igual sentido que la gravedad y por lo tanto caería, regresando a su posición original (Figura 1.6).

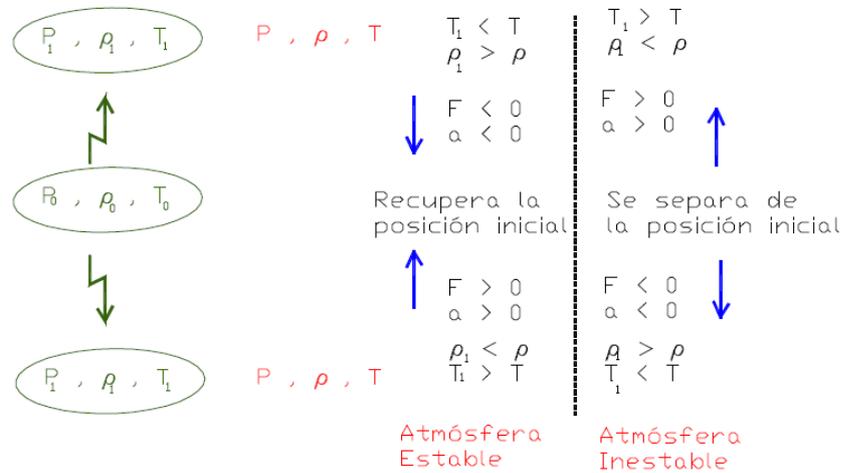


Figura 1.6: Estados de la atmósfera [13].

La relación entre el gradiente vertical de temperatura de la parcela de aire en movimiento y el gradiente vertical de temperatura de la atmósfera que la rodea determina el estado termodinámico de la misma, tal cual se observa en la Figura 1.7.

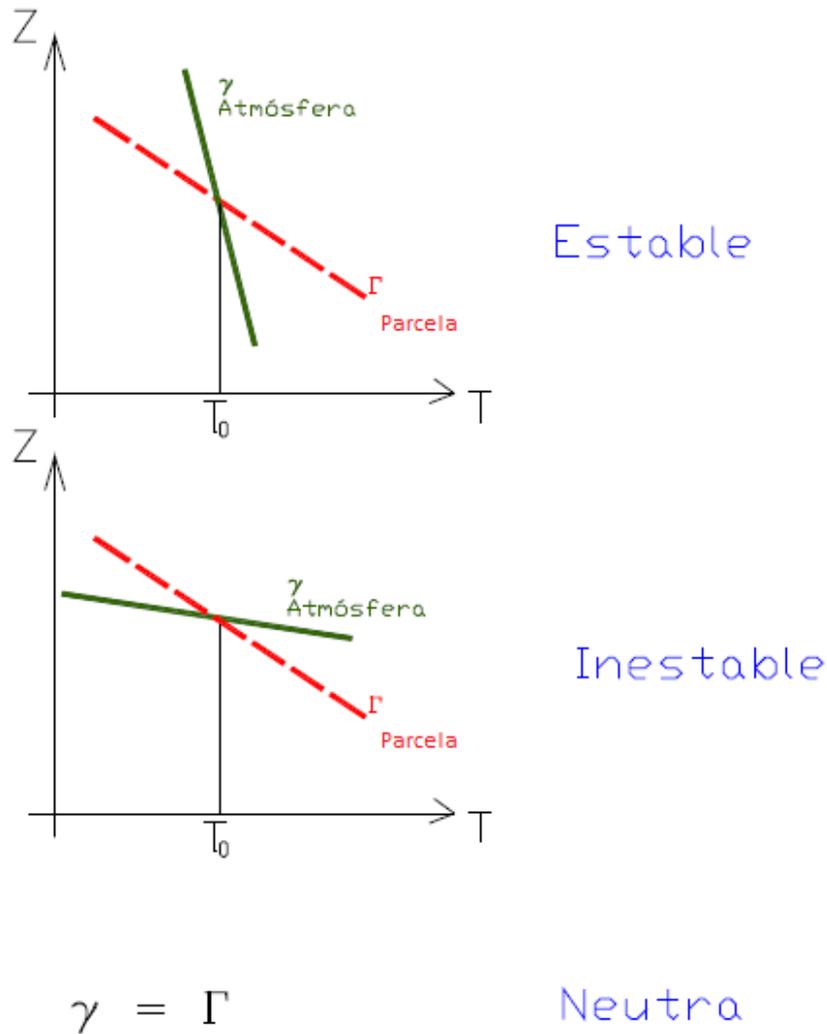


Figura 1.7: Distribuciones de temperatura en altura de la atmósfera y de la parcela. Adaptado de [13].

En la [Figura 1.7](#), la curva punteada muestra la evolución de la temperatura de una parcela al moverse verticalmente en la atmósfera. Dicha curva presentará una pendiente igual al gradiente adiabático (Γ).

En un mismo día, el gradiente vertical de temperatura de la atmósfera puede cambiar drásticamente. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la [Figura 1.8](#).

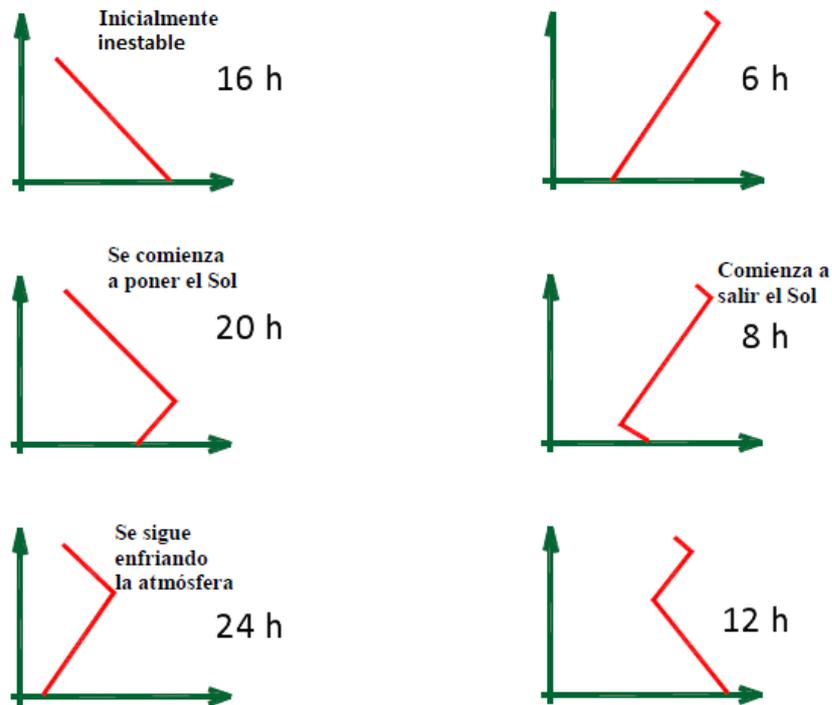


Figura 1.8: Evolución del gradiente vertical de temperatura de la atmósfera a lo largo de un día. Adaptado de [13].

Como la estabilidad atmosférica varía a lo largo del día, las concentraciones horarias de ciertos contaminantes en el ambiente pueden verse afectadas. El tiempo de respuesta de la CLA a un efecto en superficie es aproximadamente una hora. Este tiempo es muy superior por encima de la CLA. Las zonas urbanas son capaces de afectar a la CLA por diversos motivos:

- Factores geométricos: efectos radiativos, incremento de la rugosidad, incremento de la turbulencia.
- Factores de superficie: cambios en el albedo, disminución de la evaporación (debido a la menor cantidad de vegetación).
- Emisiones: pueden modificar el balance radiativo y el régimen de precipitaciones.

Otro factor del entorno que puede afectar los fenómenos de contaminación atmosférica es la topografía. La misma puede jugar un papel importante “atrapando” contaminantes cerca de la superficie. Durante la noche, el aire frío tiende a fluir pendiente abajo. Este flujo puede incrementar la estabilidad atmosférica y transportar contaminantes hacia los valles.

Además, cuando existen montañas que rodean valles, tiende a disminuir la velocidad del viento y, por lo tanto, la dispersión de contaminantes [7].

1.5. Contaminación atmosférica de origen vehicular

Las emisiones generadas a partir de la combustión de combustibles fósiles son de gran relevancia debido a su impacto en el ambiente y en la salud humana.

Los productos primarios de la combustión completa, CO_2 y H_2O , afectan el ambiente incrementando el efecto invernadero y a través de su potencial de generación de eventos de niebla localizados. Otros contaminantes significativos de la combustión son productos secundarios, incluyendo CO , HC , hollín, NO_x , SO_x y óxidos metálicos.

Una característica que distingue a algunas fuentes móviles de casi todas las fuentes fijas es que la combustión no es completa. Como consecuencia de esto, una pequeña fracción del combustible es solamente oxidada a monóxido de carbono con algunos hidrocarburos volátiles también emitidos en forma de vapor y partículas carbonosas derivadas de la combustión incompleta de gotas de combustible.

El azufre presente en el combustible es oxidado mayoritariamente a dióxido de azufre durante la combustión.

Finalmente, debido a las altas temperaturas de combustión alcanzadas por los vehículos, el nitrógeno atmosférico (N_2) es oxidado a monóxido de nitrógeno y a pequeñas cantidades de dióxido de nitrógeno. También se registran emisiones de óxido nitroso (N_2O) pero solamente en pequeñas cantidades siendo más abundante su presencia en las emisiones de escape de vehículos equipados con convertidor catalítico [69].

El transporte se diferencia de otras fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos principalmente por la proximidad de los receptores. Esto hace que los contaminantes emitidos no puedan ser dispersados completamente antes de llegar a los mismos. Además de lo anterior, se destaca que la mayoría de las rutas urbanas están rodeadas de edificios (cañones urbanos). Estos edificios disminuyen la velocidad del viento a nivel de calle dificultando aún más la dispersión de los contaminantes emitidos. Si los cañones urbanos se construyen paralelos a la dirección predominante del viento, las emisiones vehiculares generarán altas concentraciones ambientales de contaminantes viento abajo. Por el contrario, si dichos cañones urbanos se construyen perpendiculares a la

dirección predominante del viento, se tendrá un patrón de flujo en el interior de la calle según se muestra en la [Figura 1.9](#).

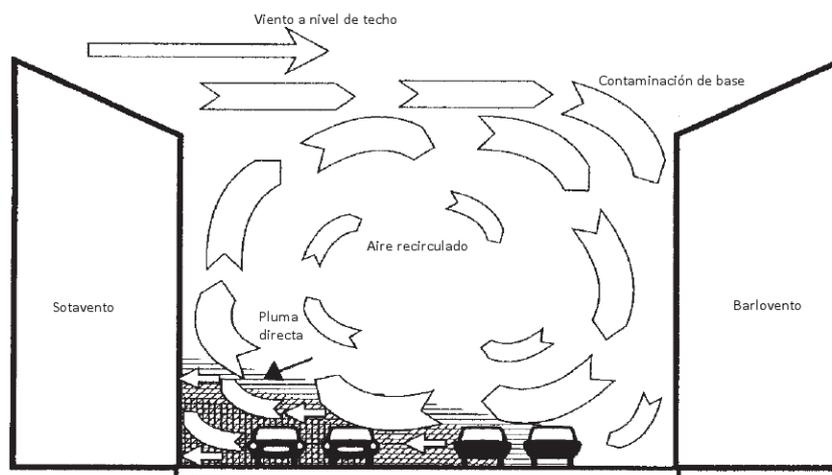


Figura 1.9: Cañón urbano. Las concentraciones de gases contaminantes son mayores en el sector denominado Sotavento (leeward side en inglés). Adaptado de [17].

Según algunos autores ([74], [17]), las emisiones vehiculares pueden ser determinantes de la calidad del aire en ambiente urbano ([Figura 1.10](#)). Esto puede evaluarse, por ejemplo, comparando las emisiones asociadas al flujo vehicular con los registros de estaciones de monitoreo cercanas.

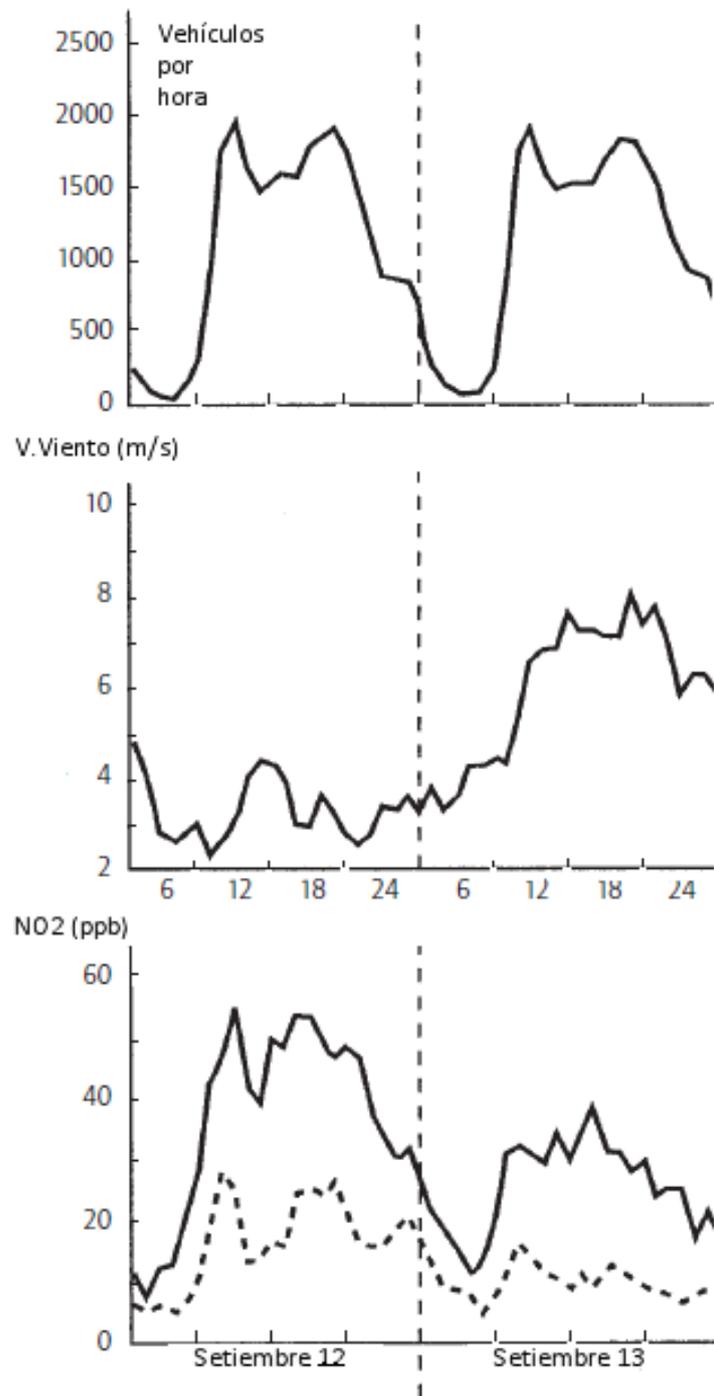


Figura 1.10: Relación entre flujo vehicular, velocidad de viento y concentraciones de NO₂ durante dos días de semana consecutivos en 1997 en Jagtvej, una calle con alto flujo vehicular rodeada de edificios en Copenhague, Dinamarca. Las concentraciones de NO₂ son registradas a nivel de calle (curva superior) y sobre el techo de un edificio cercano (curva inferior). Adaptado de [17].

1.5.1. Parámetros que controlan la formación de contaminantes en el motor de vehículos

La temperatura y el tiempo de residencia del combustible en la cámara de combustión (τ_{res}) son dos parámetros importantes que influyen en la formación de contaminantes [71]. La temperatura condiciona la producción de ciertas reacciones químicas generadoras de contaminantes.

Debido a que la temperatura de combustión es función de la composición de la mezcla combustible, la formación de contaminantes puede ser influenciada a partir del control de la composición de la mezcla. La composición de la mezcla suele cuantificarse a través del parámetro Φ . Dicho parámetro es el cociente entre la relación combustible-aire de la mezcla combustible y la relación combustible-aire estequiométrica. En función de lo anterior, valores de Φ mayores que uno darán cuenta de una mezcla combustible con combustible en exceso (mezcla rica) mientras que valores de Φ por debajo de la unidad representarán mezclas combustibles con exceso de aire (mezcla pobre). Por último, si el parámetro Φ vale uno, la mezcla combustible tendrá proporciones estequiométricas.

El vínculo entre el valor del parámetro Φ y la generación de contaminantes en los motores de los vehículos se aprecia en la [Figura 1.11](#).

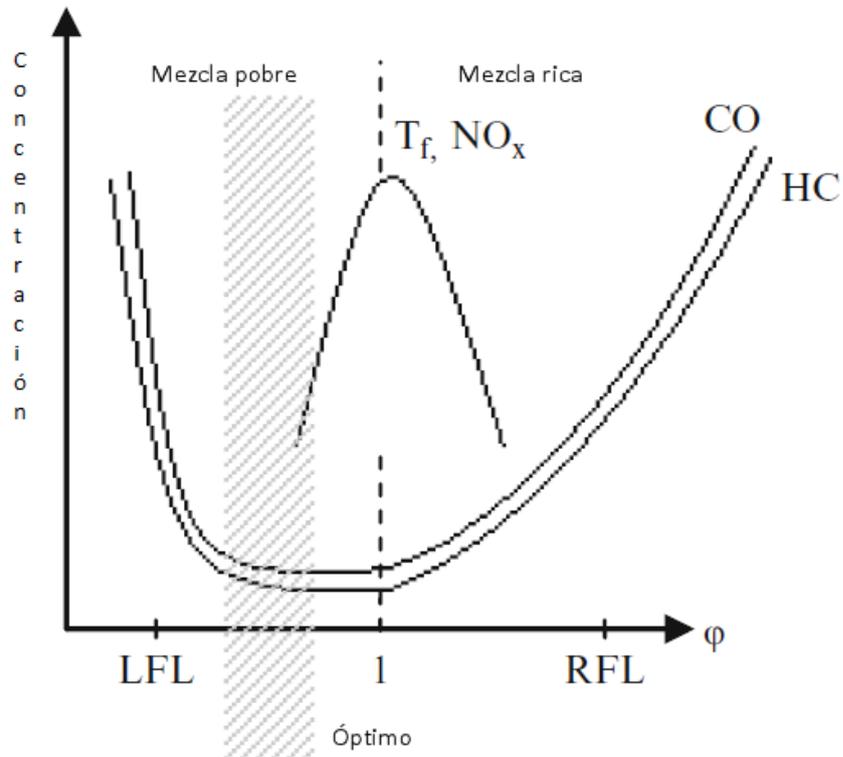


Figura 1.11: Temperatura de combustión y emisiones en función de Φ . Adaptado de [71].

Para que las reacciones químicas se lleven a cabo de forma completa en una cámara de combustión, debe proporcionarse el tiempo de residencia suficiente. La cantidad de tiempo que los reactivos necesitan para reaccionar se denomina “tiempo químico” (τ_{chem}). τ_{chem} depende de la temperatura y de Φ .

En la [Figura 1.12](#) se muestra un ejemplo de un proceso de combustión en función del tiempo. En dicha ilustración, el combustible en cuestión es metano (CH_4). Más allá que dicho combustible no se utiliza en automóviles, el ejemplo es útil para ilustrar el concepto introducido en el párrafo anterior. Se destaca que, en este ejemplo, el tiempo de residencia en la cámara de combustión es suficiente para que tenga lugar la combustión del combustible generándose bajos niveles de emisión de CO.

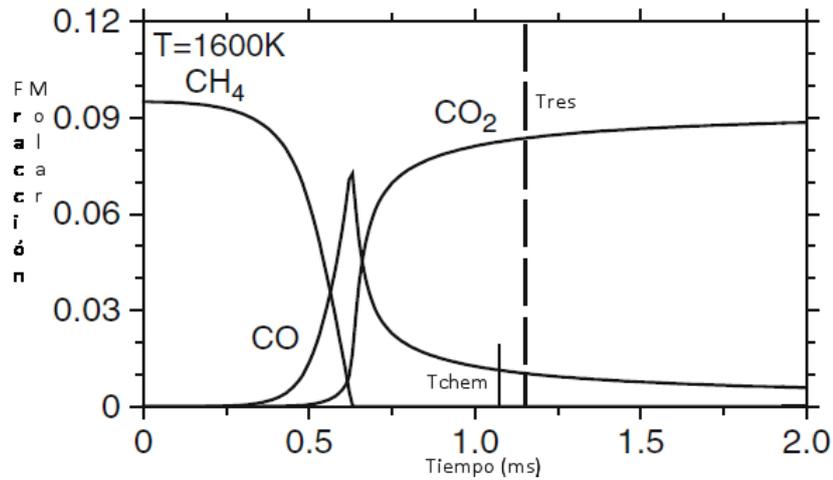


Figura 1.12: Tiempo de residencia y tiempo químico. Adaptado de [71].

Como se muestra en la [Figura 1.11](#), la formación de NO depende fuertemente de la temperatura de combustión. El comportamiento de la formación de CO y HC es contrario al del NO. En mezclas muy ricas, la cantidad de O₂ es insuficiente. Por lo tanto, la combustión del combustible es incompleta emitiéndose mayores cantidades de CO y HC. En mezclas muy pobres, la temperatura resulta muy baja para la oxidación del CO y el HC. Además, aumenta el tiempo químico de dicha reacción y puede suceder que éste supere el valor del tiempo de residencia. Por estas razones, en condiciones de mezcla muy pobre, también se generan elevadas emisiones de CO y HC.

No todos los tipos de vehículos generan las mismas emisiones de escape. Algunos de ellos se asocian fuertemente con las emisiones de ciertos contaminantes. Este hecho se observa en la [Figura 1.13](#) y en la [Figura 1.14](#).

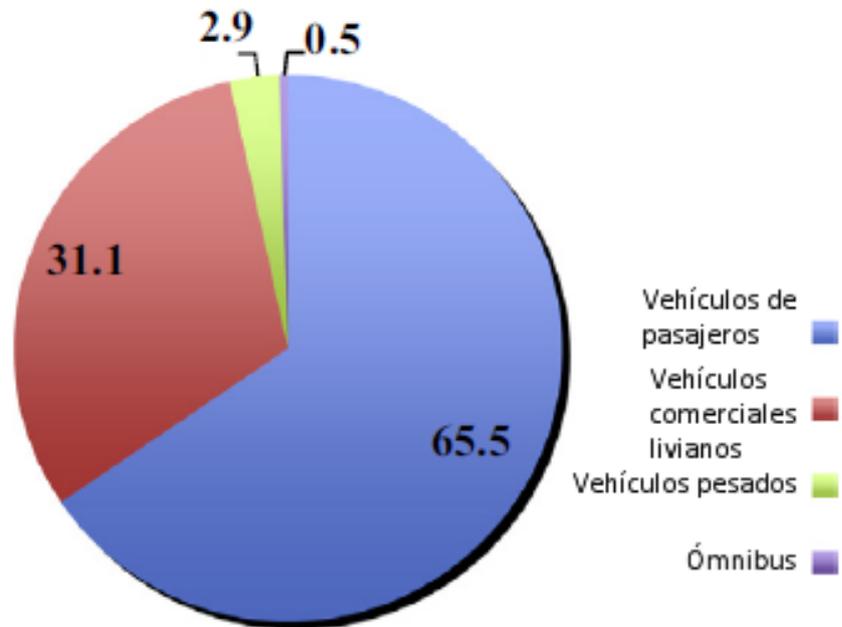


Figura 1.13: Emisiones de CO (%) por tipo de vehículo para la ciudad de San Petersburg, Rusia. Adaptado de [63].

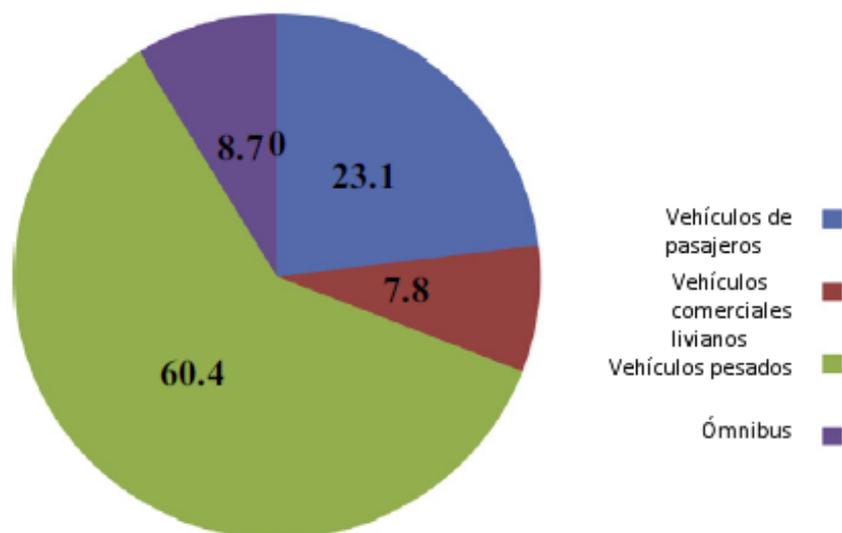


Figura 1.14: Emisiones de NO_x (%) por tipo de vehículo para la ciudad de San Petersburg, Rusia. Adaptado de [63].

1.5.2. Tendencias actuales relativas a la contaminación atmosférica en la Unión Europea

Desde la Unión Europea (UE) se sostiene que la calidad del aire en el continente europeo ha mejorado notablemente en las últimas décadas. Sin embargo, también se manifiesta que la contaminación atmosférica se mantiene como el principal factor ambiental asociado a las enfermedades evitables y a la mortalidad prematura en la UE y también que dicha problemática sigue generando efectos adversos en gran parte del medio natural europeo ([27], [34]) (Figura 1.15 y Figura 1.16).

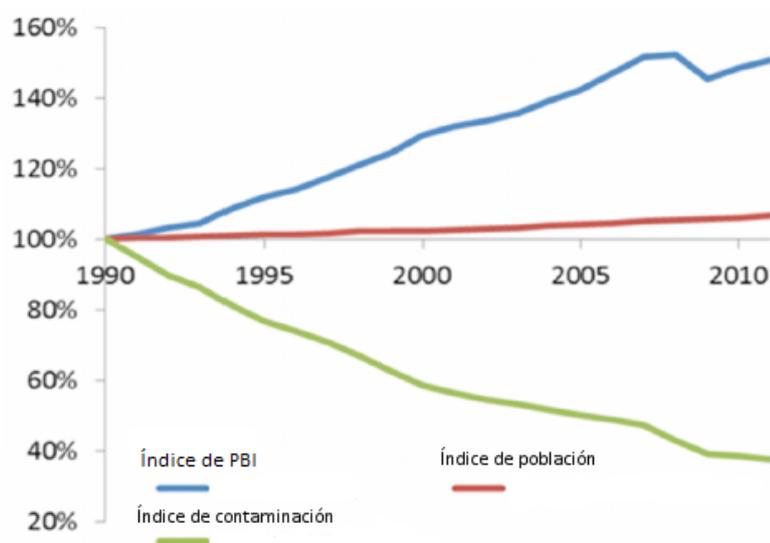


Figura 1.15: PBI, índice de población e índice de contaminación en la UE (1990=100 %). Adaptado de [34].

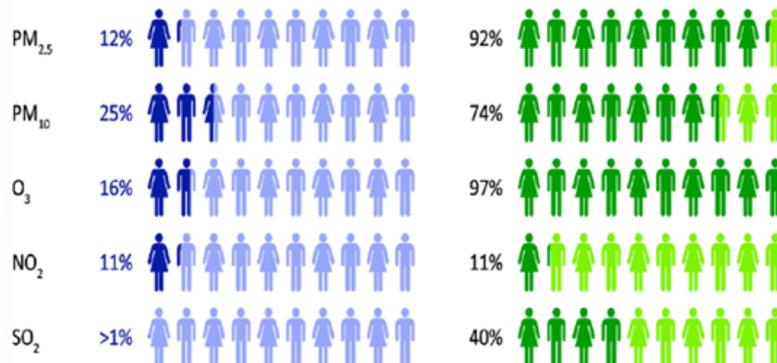


Figura 1.16: Porcentaje de la población urbana de la UE expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos superiores a los límites de la UE (azul) y de la OMS (verde) en los años 2010-2012. Adaptado de [34]★.

★ La diferencia de porcentajes entre la UE y la OMS evidencia diferentes grados de exigencia o criterios de evaluación entre ambas referencias.

Desde la UE se afirma que el cumplimiento de las normas de calidad de aire vigentes ha sido problemático. En este sentido, se dice que más de una tercera parte de las zonas de gestión de la calidad del aire de la UE rebasan los valores límite correspondientes a MP₁₀ y una cuarta parte los correspondientes al NO₂¹.

De todas maneras, se dice que las graves infracciones actuales de las normas de calidad del aire pueden resolverse a mediano y corto plazo si se aplica la legislación vigente de la UE, sobre todo la relativa a las emisiones de los vehículos livianos a gas oil [27]. En particular, se dice que el control debería enfocarse en las emisiones de NO_x de los vehículos livianos a gas oil que verifican la norma EURO 6.

Se destaca que las emisiones de NO_x de los vehículos a gas oil EURO 5 homologados desde 2009 superan ahora las de los vehículos EURO 1 homologados en 1992, siendo unas cinco veces superiores al valor límite fijado.

Este hecho ha tenido un enorme impacto en las concentraciones ambientales de NO₂, ozono y partículas secundarias en todo el continente europeo.

Un hecho llamativo es que, durante los procedimientos normalizados de evaluación de emisiones, estos vehículos no presentan niveles de emisión de NO_x que superen el límite establecido. Sin embargo, al ser evaluados bajo condiciones reales de manejo, las emisiones de NO_x son muy superiores [35].

¹Actualmente, están abiertos procedimientos de infracción por incumplimiento de los valores de MP₁₀ contra diecisiete Estados miembros de la UE [27].

Capítulo 2

Cuantificación de emisiones

2.1. Factores de emisión

Los factores de emisión son relaciones funcionales empíricas entre las emisiones de contaminantes y las actividades que las generan [66]. En el caso de las emisiones vehiculares, estos predicen las cantidades máxicas emitidas de un cierto contaminante en función de la distancia recorrida, la energía consumida o la cantidad de combustible utilizado.

Generalmente existen diferentes factores de emisión para distintas clases de vehículos (autos, motos, camiones, ómnibus) y éstos dependen de diversos parámetros: sistema de control de emisiones, calidad del combustible utilizado, condiciones ambientales, condiciones de operación del vehículo (arranque en frío, velocidad crucero, aceleración, etc.), entre otros.

Las emisiones vehiculares (y su dependencia con aspectos operacionales) pueden ser medidas bajo condiciones controladas en laboratorio (estudios en dinamómetro de chasis o de motores) o bajo condiciones reales de manejo (estudios en túneles, remote sensing, mediciones on-road y on-board).

En [54], [80], [86], [65], [16], [85], [30], [35], [10] y [73] se han publicado factores de emisión calculados para distintos tipos de vehículos empleando diferentes metodologías. La cantidad de vehículos relevada en cada trabajo es muy variable tal cual se observa en la [Figura 2.1](#) y en la [Figura 2.2](#).

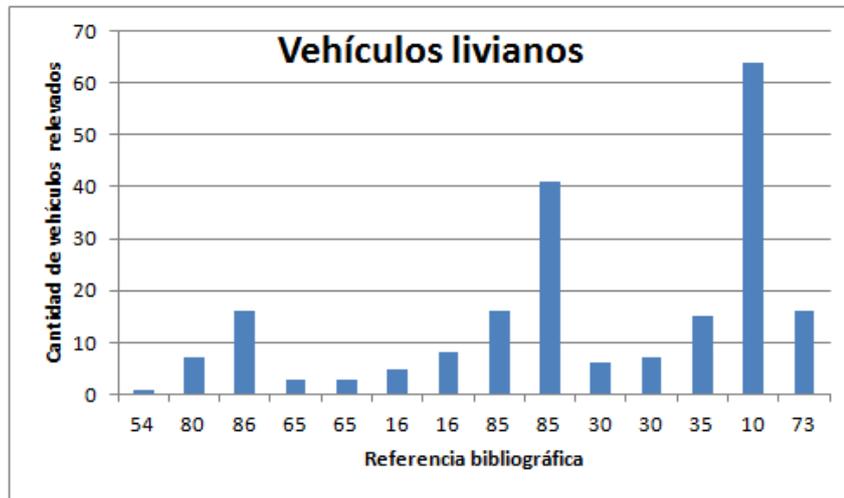


Figura 2.1: Cantidad de vehículos livianos relevados en la bibliografía consultada. Elaboración propia a partir de [54], [80], [86], [65], [16], [85], [30], [35], [10] y [73].

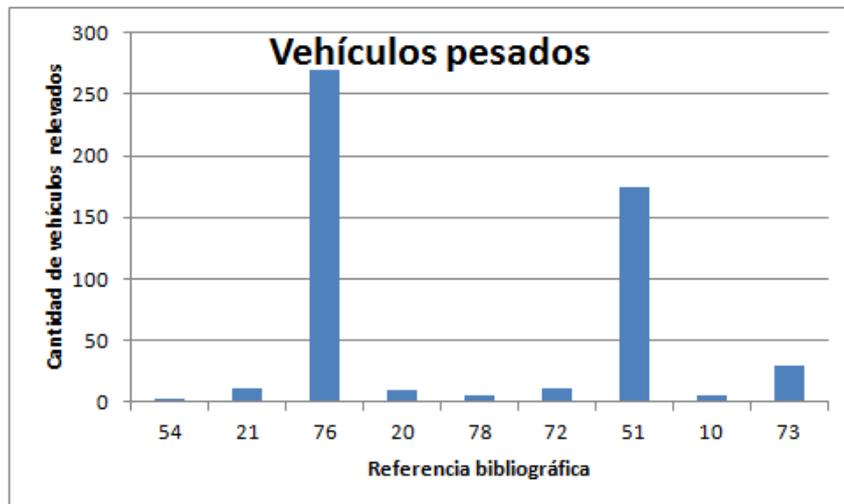


Figura 2.2: Cantidad de vehículos pesados relevados en la bibliografía consultada. Elaboración propia a partir de [54], [21], [76], [20], [78], [72], [51], [10] y [73].

A modo de ejemplo, en la [Figura 2.3](#) se muestran los factores de emisión de CO calculados para vehículos livianos en el marco de los trabajos bibliográficos relevados y, en la [Tabla 2.1](#), se muestran los factores de emisión de NO_x relevados para vehículos pesados. Se destaca la existencia de una importante variabilidad en los resultados informados.

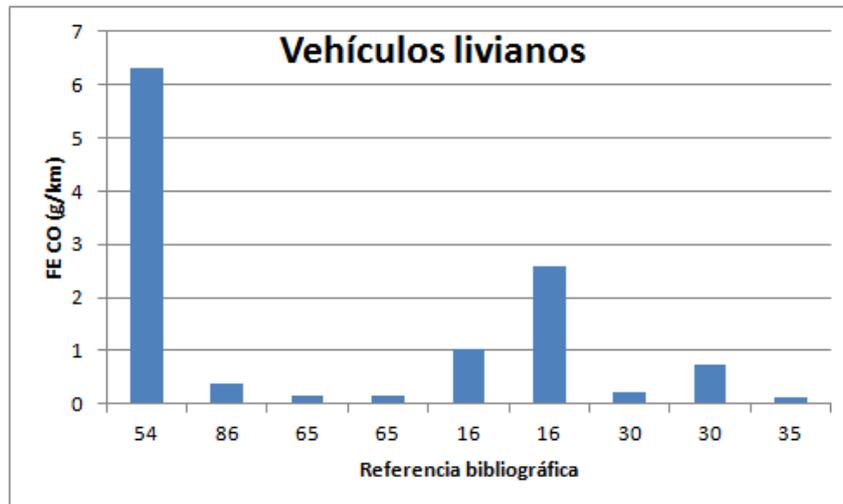


Figura 2.3: Factores de emisión de CO para vehículos livianos relevados en la bibliografía consultada (en este gráfico se excluyó el resultado proporcionado por uno de los trabajos relevados [80] ya que el mismo (26.2 g/km) alteraba la escala de la ilustración). Elaboración propia a partir de [54], [86], [65], [16], [30] y [35].

Tabla 2.1: Factores de emisión de NO_x relevados en la bibliografía consultada para vehículos pesados. Elaboración propia a partir de [54], [21], [76], [20], [78], [72], [51], [10] y [73].

Referencia bibliográfica	FE _{NO_x}
[54]	10.2 g/kWh
[21]	42.9 g/milla
[76]	2576 g/d
[20]	6.5 g/km
[78]	40 g/kg comb; 17.5 g/milla
[72]	7.3 g/kWh
[51]	9.7 g/km; 48.2 g/kg comb
[10]	11 g/kg comb
[73]	3.9 g/km

Una posible fuente de variabilidad de los resultados relevados en la bibliografía puede ser el tipo de combustible utilizado por los vehículos ensayados. En este sentido, el factor de emisión medio de CO relevado en la bibliografía para vehículos livianos a gasolina fue 7.2 g/km mientras que el valor medio para los vehículos livianos a gas oil resultó ser 0.4 g/km.

2.2. Medición de emisiones vehiculares

2.2.1. Condiciones controladas

Con el objetivo de determinar emisiones vehiculares en un laboratorio, existen operadores que ejercen control sobre el ciclo de conducción que se evalúa, las condiciones ambientales de los ensayos y otros parámetros de interés. Este hecho facilita la repetitividad de los ensayos.

Un dinamómetro de chasis simula la resistencia impuesta sobre las ruedas de un vehículo durante el manejo. Durante los ensayos, el vehículo se fija al dinamómetro de tal forma que permanece estático mientras un conductor lo maneja de acuerdo a un patrón tiempo-velocidad (ciclo de conducción) y a una secuencia de cambio de marchas predeterminados que se muestran en un monitor.

Durante la realización de este tipo de ensayos, el flujo de gases de escape es registrado instantáneamente y los mismos son analizados. Las instalaciones descritas se muestran de forma esquemática en la [Figura 2.4](#).

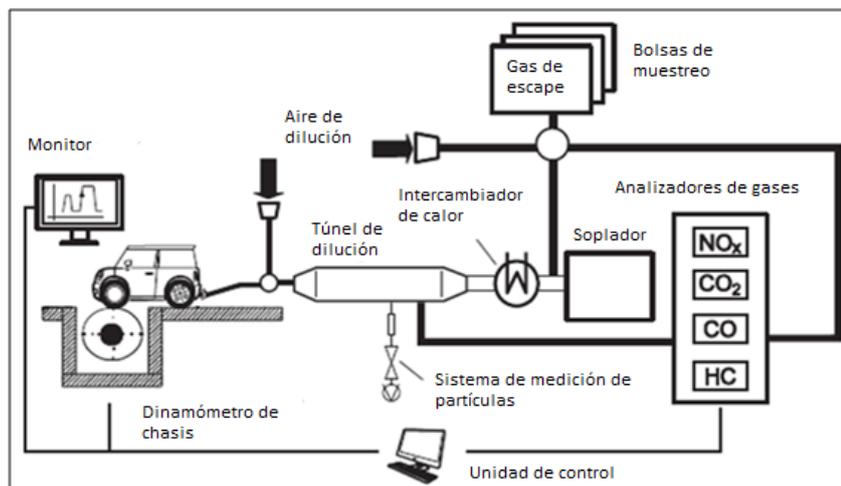


Figura 2.4: Esquema de una instalación para la medición de emisiones en un dinamómetro de chasis. Adaptado de [66].

Una desventaja de este tipo de pruebas es que puede no resultar una representación suficientemente adecuada de las emisiones vehiculares durante condiciones reales de manejo [66]. Esto es consecuencia del rango acotado de condiciones de ensayo.

Por otra parte, un dinamómetro de motor es un dispositivo que evalúa direc-

tamente el motor del vehículo. Este es el método utilizado para la evaluación de vehículos pesados en cuanto al cumplimiento de normativa.

Los ciclos de conducción utilizados en estos ensayos pueden ser estacionarios o transitorios. Los estacionarios están compuestos por un número de modos de velocidad de giro y carga del motor. El vehículo se opera durante cierto tiempo en cada modo. Luego, los factores de emisión se construyen como un promedio ponderado de aquellos obtenidos para cada modo ensayado.

Por su parte, los ciclos transitorios incluyen variaciones dinámicas de las condiciones de operación de los vehículos. Se dice que estos tipos de ciclos se ajustan más a las condiciones reales de manejo que los estacionarios.

Los ciclos utilizados en los ensayos con dinamómetro de chasis son en general transitorios. En los ensayos con dinamómetro de motor se utilizan en general ciclos estacionarios.

El desarrollo de factores de emisión robustos mediante la realización de ensayos de laboratorio requiere una muestra de vehículos suficientemente grande y el empleo de ciclos de conducción ajustados a las condiciones de manejo locales. Los ensayos realizados en dinamómetro de chasis se utilizan para la evaluación de cumplimiento de normativa de vehículos livianos, motos y vehículos comerciales livianos. Entretanto, para la evaluación de cumplimiento de normativa de vehículos pesados se utilizan los ensayos realizados en dinamómetro de motor.

2.2.2. Condiciones reales de manejo

Los resultados de este tipo de mediciones son, en general, menos precisos y menos repetibles que aquellos logrados en laboratorio, debido a la ausencia de un ciclo de manejo estándar y a la presencia de grandes fuentes de variabilidad (condiciones ambientales, tráfico, tipo de conducción y operación altamente variable). De todas maneras, este tipo de mediciones son esenciales para la validación de factores de emisión obtenidos en laboratorio [66].

Existen diferentes técnicas de medición de emisiones en condiciones reales de manejo. A continuación se resumen algunas de ellas.

Medición remota (remote sensing)

En este sistema, las emisiones se determinan a medida que los vehículos pasan a través de una estación de medición ubicada a nivel de calle. Dicha estación de medición produce haces de luz infrarroja y ultravioleta de determinadas longitudes de onda, que pasan a través de la calle. La interferencia de estos haces con los gases de escape permite la determinación del contenido de diversos contaminantes presentes en los mismos. La principal ventaja de esta metodología de medición es la gran cantidad de vehículos que pueden evaluarse (del orden de miles por día). Por otra parte, las emisiones registradas se corresponden solamente con un punto del espacio por lo que su representatividad para otras condiciones topográficas y de manejo es cuestionable.

Mediciones on-road (chase)

Durante el desarrollo de este tipo de mediciones, se seleccionan vehículos que son seguidos por un laboratorio móvil provisto de medidores de gases y partículas además de una estación meteorológica y un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (pudiendo también contar con cámaras de video para el registro de las condiciones del tráfico). Este tipo de laboratorio móvil es capaz de captar y analizar las emisiones atmosféricas generadas por el vehículo al que persigue.

Estudios en túneles

La realización de este tipo de estudios implica la medición del flujo total de contaminantes generado por los vehículos que pasan a través de un túnel. Luego, son necesarias mediciones de tráfico vehicular para la estimación de factores de emisión para cada vehículo (con la dificultad que implica separar por tipo de vehículo). Las mediciones de contaminantes son efectuadas a la entrada y a la salida del túnel. Para calcular el flujo de contaminantes generados es necesario estimar el flujo de aire a través del túnel. Luego, dicho flujo se multiplica por la diferencia de concentraciones de contaminantes entre la salida y la entrada al túnel. Estos estudios en general presentan dificultad para representar condiciones reales de manejo ya que, en general, los túneles son atravesados a velocidad constante.

Mediciones on-board

Los sistemas portátiles de medición de emisiones (Portable Emissions Measurement System (PEMS) en inglés) son dispositivos que cuentan con diversos instrumentos de medición que pueden colocarse en el vehículo. Estos sistemas son capaces de registrar tasas instantáneas de emisión de diversos contaminantes con niveles de precisión aceptables. Una unidad PEMS está compuesta típicamente por un conjunto de analizadores de gases que se conectan directamente al escape del vehículo y por un escáner del funcionamiento del motor diseñado para conectarse al vehículo a través de una interfase On Board Diagnostics (OBD). También cuenta con una computadora a bordo que procesa las mediciones realizadas. Se utilizan caudalímetros conectados al escape para determinar el flujo de gases o dicho flujo se estima a partir de las condiciones de funcionamiento del motor. Comúnmente también se instala un GPS y una estación meteorológica en el exterior del vehículo. La principal ventaja de este sistema de medición es su capacidad de registrar emisiones durante condiciones reales de manejo algunas de las cuales son muy difíciles de reproducir en laboratorio (por ejemplo elevadas pendientes del terreno). Estos muestreos tienen una repetitividad muy limitada debido a las múltiples variaciones en las condiciones experimentadas durante las mediciones. En la [Figura 2.5](#) se muestra un vehículo equipado con un PEMS.



Figura 2.5: Vehículo de pasajeros instrumentado con PEMS [35].

2.3. Fuentes de variabilidad de emisiones vehiculares

Existen diversas fuentes de variabilidad que afectan las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos. A continuación se desarrollan brevemente algunas de ellas.

2.3.1. Características del vehículo

Las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos livianos y pesados no son iguales para algunos de los contaminantes emitidos. En este sentido, [54] afirma que las emisiones de CO y HC son razonablemente parecidas entre los ómnibus y los autos. Sin embargo, se dice que las emisiones de NO_x de los ómnibus son aproximadamente 30 veces superiores a las de los autos. En cuanto a las emisiones de CO, en [50] se muestra que las mismas son mayores para vehículos livianos que para pesados.

A su vez, para un mismo tipo de vehículo, las emisiones atmosféricas generadas pueden variar en función de algunas características de los mismos como por ejemplo la antigüedad. En este sentido, en [20] se constató que los camiones más viejos presentaron tasas de emisión de NO_x menores a las experimentadas por vehículos de menor antigüedad. Sin embargo, en [78] se observó una tendencia decreciente en cuanto a las emisiones de NO_x al pasar de modelos más viejos a otros más nuevos. De lo anterior se desprende que, más allá que la antigüedad del vehículo pueda tener influencia en las emisiones generadas, no parece explicar por sí sola el comportamiento de dichas emisiones.

Otra característica de los vehículos que tiene influencia en las emisiones generadas es el tipo de combustible utilizado. En este sentido, en [86] se realiza una comparación de desempeño en cuanto a generación de emisiones y consumo de combustible entre vehículos livianos a gasolina y a gas oil. Según se informa en el citado artículo, los vehículos a gas oil registrados mostraron un rendimiento 20 % superior en cuanto al consumo de combustible que los vehículos a gasolina. En cuanto a las emisiones atmosféricas, los vehículos livianos a gas oil presentan menores emisiones de CO y de CO₂ pero mayores emisiones de NO_x que los vehículos a gasolina. A su vez, los autores mencionan que los vehículos

livianos a gas oil equipados con un sistema de control de emisiones compuesto por una recirculación de gases de escape (Exhaust Gas Recirculation (EGR)) y un catalizador de oxidación Diesel (Diesel Oxidation Catalyst (DOC)) tuvieron emisiones de NO_2 y cocientes NO_2/NO_x significativamente mayores que los demás. Se presume que este hecho puede provocar una mayor formación de ozono troposférico [86].

Además de lo anterior, la evolución temporal de las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos a gasolina y a gas oil no ha seguido la misma trayectoria. En este sentido, en [46] se señala que la evolución temporal de las emisiones de NO_x ha sido diferente para vehículos a gasolina y a gas oil. Estos autores destacan que las emisiones de NO_x de los vehículos a gasolina han ido decreciendo con el tiempo en consonancia con las mayores exigencias normativas, aunque no se ha constatado el mismo comportamiento en el caso de los vehículos a gas oil (Figura 2.6).

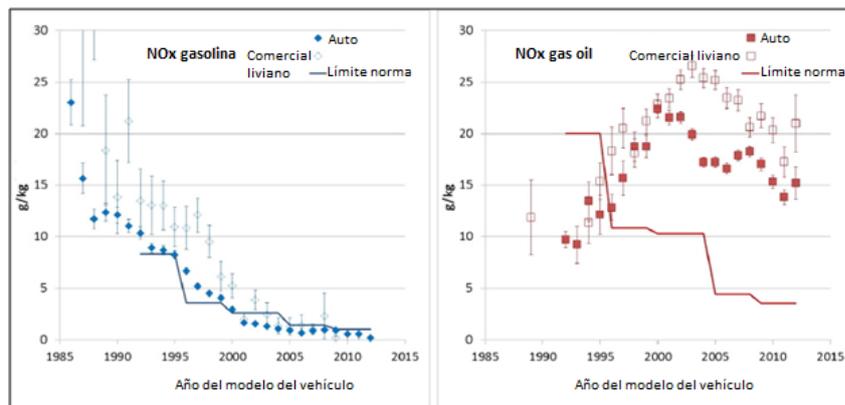


Figura 2.6: Evolución temporal de las emisiones de NO_x para vehículos a gasolina (izquierda) y a gas oil (derecha). Adaptado de [46].

Otra característica de los vehículos que puede afectar las emisiones atmosféricas generadas es la potencia del motor. En [19] se encontró una gran dependencia positiva entre la potencia específica del vehículo (Vehicle-Specific Power (VSP)) y las emisiones de NO_x para vehículos de pasajeros a gas oil EURO 3 – 5 (este comportamiento no fue observado para las emisiones de CO y HC). El mencionado hallazgo también se observa para vehículos a gasolina antiguos (EURO 1 – 2). Además, se señala que la potencia de los vehículos a gas oil se ha incrementado en gran medida en los últimos años [19]. Por último, se menciona que la VSP registrada durante las mediciones resultó ser bastante mayor a la impuesta a los vehículos durante el ensayo utilizado en la Unión

Europea para la evaluación normativa de las emisiones gaseosas de vehículos livianos (New European Driving Cycle (NEDC)). Más allá de lo anterior, [19] muestra que la dependencia de las emisiones con la VSP decrece para menores antigüedades (salvo en el caso de las emisiones de NO_x de vehículos a gas oil).

En [30] se presentan dependencias positivas entre la cilindrada, la potencia del motor, el peso de los vehículos y las emisiones de CO_2 (Figura 2.7).

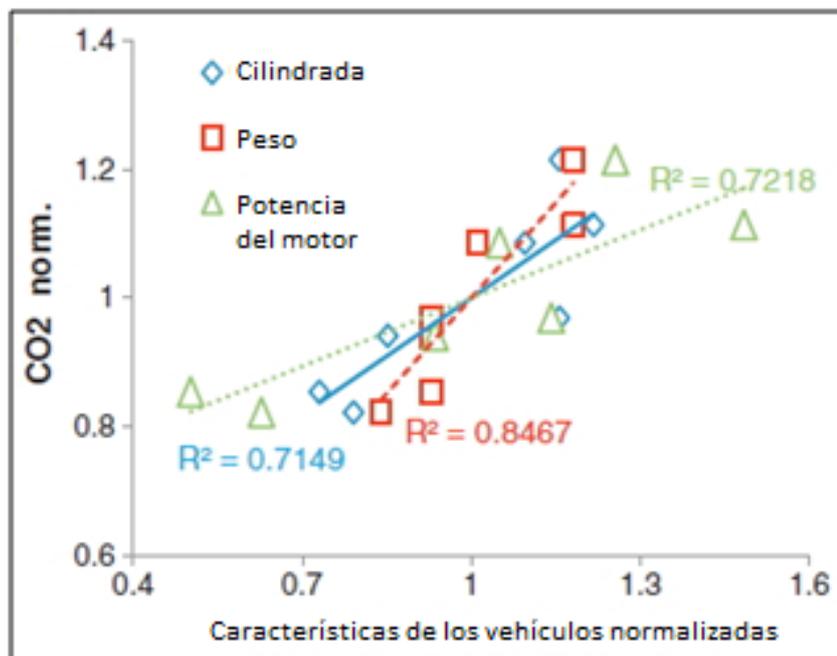


Figura 2.7: Relación entre la cilindrada, la potencia del motor y el peso de los vehículos a gasolina y las emisiones de CO_2 (valores normalizados con respecto al valor promedio obtenido en el citado trabajo). Adaptado de [30].

2.3.2. Sistemas de control de emisiones

Los sistemas de control de emisiones mejoran el desempeño de los vehículos en cuanto a las emisiones atmosféricas generadas.

[80] ejemplifica acerca de las mejoras en el desempeño ambiental de los vehículos que resultan de los sistemas de control de emisiones. El autor registra las emisiones atmosféricas de una flota compuesta por siete vehículos de pasajeros. Dentro de la flota analizada, seis vehículos contaban con un sistema de control de emisiones (Three-Way Catalyst (TWC)) y el restante no contaba con ningún sistema destinado al control de las emisiones atmosféricas generadas. Las emisiones de los vehículos equipados con TWC resultaron ser 70%

menores a las experimentadas por el vehículo sin TWC.

Por otra parte, en [53] se indica que los catalizadores de tres vías, utilizados para la reducción de emisiones de escape, tienen una vida útil de cinco años u 80.000 km. Por lo tanto, si no existen programas obligatorios de recambio de estos dispositivos, es razonable suponer que los mismos no funcionarán adecuadamente en el mediano plazo.

Además, los sistemas catalíticos de reducción de emisiones no funcionan bajo cualquier condición de operación del motor. En este sentido, la eficiencia de los mismos depende de la temperatura de los gases de escape. Existe una temperatura por debajo de la cual estos sistemas no funcionan adecuadamente [16]. En consonancia con lo anterior, el reporte [72] indica que los sistemas de control de emisiones de NO_x que poseen los camiones modernos sólo tienden a funcionar adecuadamente durante el manejo en ruta (velocidades mayores a 80 km/h).

En los vehículos a gas oil, los filtros de partículas han demostrado ser dispositivos de control de emisiones eficaces. En este sentido, en [10] se menciona que los filtros de partículas reducen las emisiones de CO, HC y MP de vehículos pesados a gas oil en uno a dos órdenes de magnitud.

2.3.3. Condiciones de manejo

La eficiencia de combustión influye en las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos [70].

En general, una mayor eficiencia de combustión se asocia con una mayor emisión de NO_x si otros factores se mantienen constantes y si el vehículo no cuenta con sistemas de control de emisiones. Por el contrario, las emisiones de HC, CO y MP tienden a ser mayores bajo condiciones causantes de combustión incompleta (bajas temperaturas de combustión, mezcla pobre). La correlación negativa entre las emisiones de MP y NO_x representa un desafío para la reducción de emisiones en motores Diesel [70]. En este sentido, en [78] se hicieron mediciones on-board de emisiones en camiones y afirman que algunos vehículos mostraron una tendencia hacia mayores emisiones de NO_x durante eventos de alta velocidad (mayor a 90 km/h aproximadamente).

Por el contrario, en [21] también se realizaron mediciones on-board de emisiones pero sobre once camiones (modelos 1996 – 2000), y encontraron que las

emisiones de NO_x para bajas velocidades (tráfico congestionado) resultaron ser tres veces mayores que las experimentadas durante manejo a velocidad crucero en ruta. Este hecho resulta contradictorio con lo sugerido por [70].

Se presume que esta contradicción pueda tener su explicación en la presencia de sistemas de control de emisiones. Según se vio anteriormente, estos sistemas de control suelen funcionar mejor para temperaturas altas del motor. Dichas temperaturas se alcanzan con mayor seguridad durante el manejo en ruta. Por lo tanto, es posible que las emisiones de NO_x sean menores en ruta debido a que los sistemas de control de emisiones resultan ser más eficaces en dicha condición de manejo.

Teniendo en cuenta que las emisiones vehiculares dependen de las condiciones de manejo, resulta interesante conocer las condiciones de manejo típicas de los distintos tipos de vehículos. En este sentido en [76] se menciona que los camiones pasan la mayoría del tiempo en condiciones de velocidad crucero o ralentí y un menor porcentaje del tiempo en la transición entre estas dos condiciones de operación. En promedio, la flota relevada en el citado artículo pasa el 29.4% del tiempo en ralentí. En la **Figura 2.8** se observa el patrón de funcionamiento para vehículos semi-pesados en ciudad registrado en California entre los años 2001 y 2002 [76].

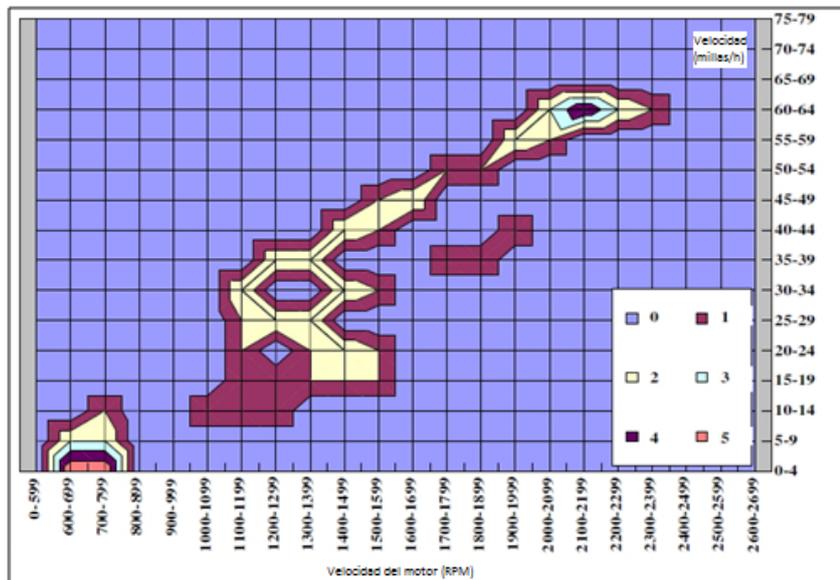


Figura 2.8: Histograma de funcionamiento para vehículos semi-pesados en ciudad. Adaptado de [76].

En [20] se señala que los camiones pasan, en promedio, un 16.5% del tiempo

en ralentí, 25.5 % acelerando, 27.9 % desacelerando y 30 % en velocidad crucero (se destaca que el tiempo estimado en ralentí es aproximadamente la mitad del informado en [76]). Además, se afirma que las emisiones de CO y HC se incrementan bajo condiciones de manejo asociadas a tráfico congestionado en ciudad. En consonancia con lo anterior, en el trabajo se afirma que durante la noche, momento en el cual el tráfico es más fluido, se observa un incremento en las emisiones de NO_x y una reducción en las de CO y HC.

Durante el manejo en ralentí, el consumo de combustible equivale al 5 % del total y las emisiones de CO, HC y NO_x al 7 %, 11 % y 6 % del total respectivamente [20].

En [32] se evaluaron las emisiones atmosféricas y el consumo de combustible de vehículos pesados en zonas urbanas y portuarias. Según este estudio, el manejo en zonas portuarias se caracteriza por bajas velocidades medias, largos períodos en ralentí y arranques y paradas sucesivas. Las emisiones de NO_x de vehículos EURO V equipados con Selective Catalytic Reduction (SCR) resultan ser significativamente mayores a las producidas por los vehículos equipados con EGR y levemente menores a las experimentadas por los vehículos EURO III. Esto se explica por las bajas temperaturas de los gases de escape producidas bajo las condiciones de manejo experimentadas en zonas portuarias (este hecho también fue observado durante el manejo en ciudad, entre el puerto y la ruta) [32]. Según este estudio, las emisiones de NO_x resultaron ser decrecientes con la velocidad del vehículo (Figura 2.9).

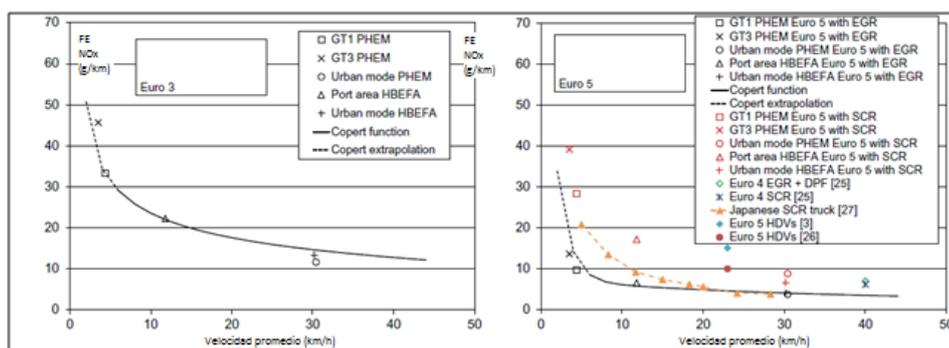


Figura 2.9: Emisiones de NO_x en función de la velocidad para vehículos pesados (la descripción de los puntos muestrales se expresa en inglés según la referencia original). Adaptado de [32].

El reporte [73] muestra resultados similares a los presentados en la Figura 2.9 (Figura 2.10).

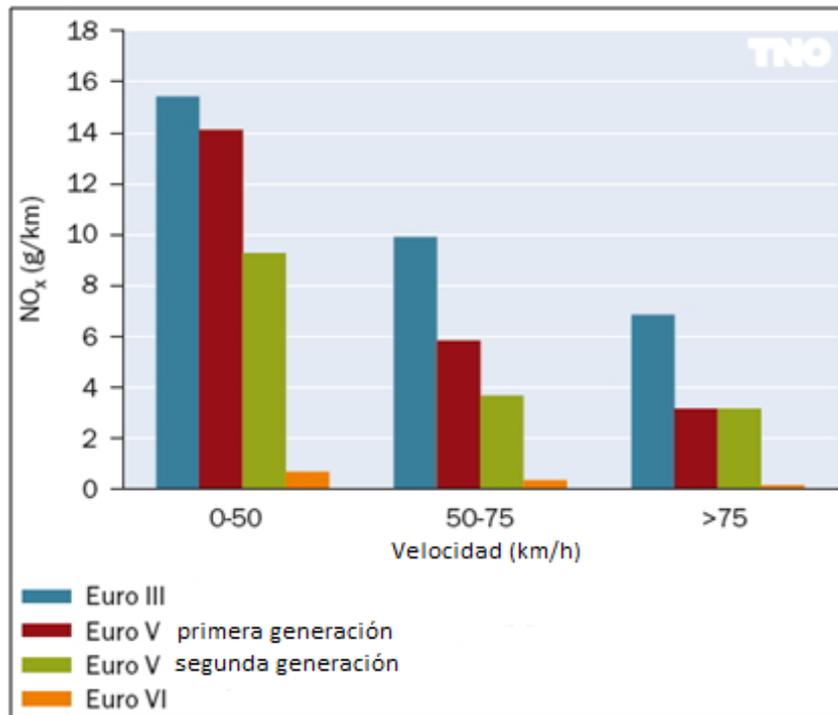


Figura 2.10: Emisiones de NO_x de vehículos pesados para distintas tecnologías en función de la velocidad. Adaptado de [73].

En consonancia con lo anterior [86] grafican las emisiones de escape y el consumo de combustible en función de la velocidad, resultando mayores las emisiones y el consumo de combustible para velocidades bajas (Figura 2.11).

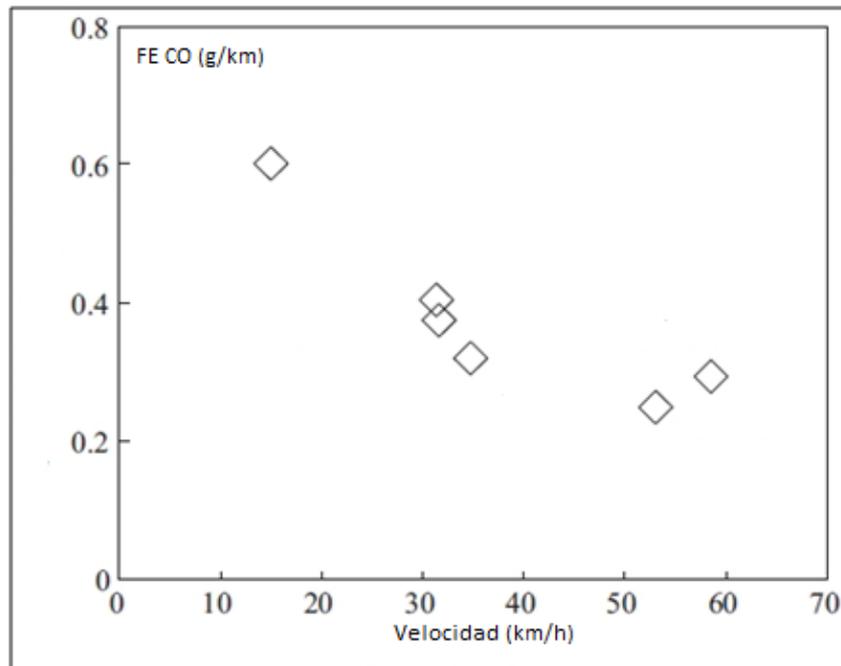


Figura 2.11: Relación entre el factor de emisión de CO y la velocidad del vehículo. Adaptado de [86].

El reporte [35] analiza las emisiones en circulación de diferentes vehículos de pasajeros a gas oil ensayados en Europa y Estados Unidos utilizando PEMS. La conclusión general del estudio es que los vehículos a gas oil modernos presentan bajas emisiones de HC y CO pero elevadas emisiones de NO_x . Se constató que las altas emisiones de NO_x estaban concentradas, en gran medida, en un número discreto de picos de emisión. Dichos picos de emisión se atribuyen a incrementos transitorios en la carga del motor generados durante el manejo debido a elevadas pendientes de la carretera, aceleración en una rampa, aceleraciones positivas desde el reposo o a eventos de regeneración propios de la operación normal de los sistemas de tratamiento de gases de escape de los vehículos a gas oil [35]. En promedio, las emisiones de NO_x registradas en el mencionado trabajo fueron siete veces superiores al estándar EURO 6. De todas maneras, algunos de los vehículos ensayados cumplieron con el estándar EURO 6. Este hecho demuestra que existe tecnología disponible tal que los vehículos a gas oil puedan cumplir con la mencionada norma bajo condiciones reales de manejo [35].

Las condiciones de manejo de los vehículos pueden estar influenciadas por la topografía del terreno. En este sentido, cuando la pendiente del terreno es positiva, la potencia del motor debe aumentar para mantener el vehículo a

velocidad constante. Este incremento en la potencia requiere un mayor consumo de combustible y, por lo tanto, genera mayores emisiones de CO_2 [22]. Siguiendo el mismo razonamiento, el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 decrecen cuando se tiene una pendiente negativa.

Las emisiones vehiculares no sólo dependen de las condiciones de manejo sino también de las condiciones del vehículo previas al encendido del mismo. En este sentido, se destaca que durante el arranque en frío de los vehículos, la mezcla aire-combustible generalmente es rica (para evitar fallos de encendido debidos a efectos de condensación en las paredes del cilindro) generando combustión incompleta. Esto en general lleva a la generación de elevados niveles de emisión de contaminantes durante el arranque en frío de los vehículos especialmente a bajas temperaturas ambiente [16] (Figura 2.12). Para los vehículos a gasolina, las emisiones de CO y HC se incrementan de manera evidente variando la temperatura de ensayo de 22°C a -7°C . El comportamiento de las emisiones de NO_x no es tan claro. Los vehículos a gas oil ensayados por [16] presentaron menores emisiones de CO y HC que los vehículos a gasolina. Las emisiones de NO_x fueron superiores para -7°C y superiores también a las generadas por los vehículos a gasolina.

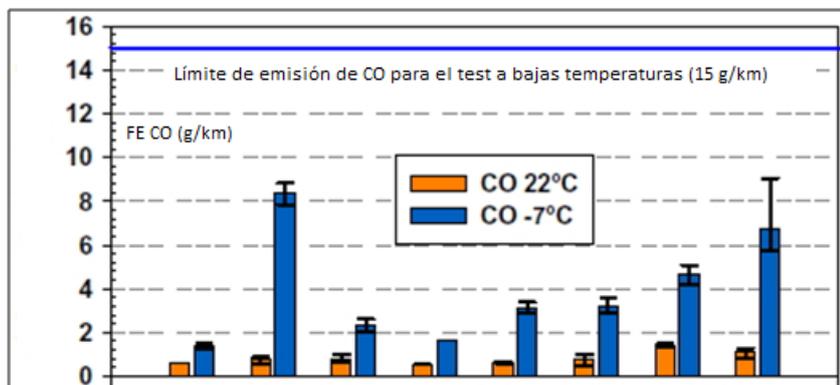


Figura 2.12: Emisiones promedio de CO para un ciclo de manejo urbano a dos temperaturas diferentes para los vehículos a gasolina ensayados. Adaptado de [16].

De acuerdo con lo anterior, según [54], que realizó mediciones on-board de emisiones en un auto y dos ómnibus, las mayores emisiones se encontraron durante el manejo en ciudad y para arranque en frío. Según [54] la duración de esta fase es aproximadamente 3.5 minutos a temperaturas ambiente cercanas a 10°C .

El comportamiento del conductor durante el manejo también influye en las

emisiones vehiculares generadas. En este sentido, las mediciones efectuadas por [78] muestran que las emisiones de NO_x son variables con picos durante las aceleraciones. En el caso de las emisiones de CO, los registros muestran que las emisiones de este contaminante experimentan picos durante las aceleraciones en ciudad.

2.3.4. Método de medición de emisiones

Las emisiones vehiculares pueden diferir en función del método de medición utilizado para determinarlas [70]. En la Unión Europea, los valores oficiales de consumo de combustible y emisiones atmosféricas de automóviles son obtenidos mediante ensayos en dinamómetro de chasis utilizando el ciclo de conducción NEDC.

En el reporte [72], se analizan mediciones de emisiones en movimiento efectuadas en siete camiones; se muestra que los registros de emisiones de NO_x en condiciones urbanas de manejo (velocidades menores a 60 km/h) resultan ser tres veces superiores al estándar EURO V (estándar verificado por los camiones ensayados). Se dice que este comportamiento también se observa en camiones más antiguos (EURO III). Según se menciona en este artículo, este hecho muestra la necesidad de incluir mediciones en condiciones reales de manejo dentro del proceso de certificación de emisiones de la norma EURO VI. Esta necesidad se enuncia también en el reporte [38]. Además, este último documento señala la necesidad de incorporar una prueba de emisiones con arranque en frío y la inclusión de un ciclo de manejo más representativo dentro del procedimiento de ensayo oficial. Según se informa en ese documento, el procedimiento de ensayo para el cumplimiento del estándar EURO VI incorpora las citadas mejoras.

Los comentarios realizados en el párrafo anterior se reflejan en el reporte [38]. En este documento se afirma que más allá que los camiones EURO IV y EURO V cumplen con estándares de emisiones más exigentes, muchos de estos vehículos (equipados con sistemas de reducción catalítica selectiva SCR) presentan emisiones significativamente elevadas de NO_x durante condiciones reales de manejo (en particular en condiciones de tráfico urbano). La principal explicación de este fenómeno radica en el pobre desempeño de los sistemas de control de emisiones para bajas temperaturas de los gases de escape. Sin embargo, du-

rante los ciclos de ensayo oficiales actuales, esta condición de funcionamiento no es evaluada [38].

El reporte [73] afirma que, en condiciones reales de manejo, los vehículos pesados EURO VI producen, en promedio, diez veces menos NO_x que los EURO IV y EURO V. Sin embargo, se dice que esta reducción no se observa en los vehículos de pasajeros y comerciales livianos a gas oil. Según este estudio, las emisiones de NO_x de un vehículo moderno de pasajeros a gas oil son 15 a 30 veces mayores a las generadas por un vehículo de pasajeros moderno a gasolina. Además, se dice que la reducción de emisiones experimentada por los vehículos pesados EURO VI es alcanzada mediante una combinación de las tecnologías EGR y SCR¹. De todas maneras, se señala que bajo condiciones de manejo urbanas, no todos los vehículos pesados EURO VI presentan bajas emisiones de NO_x . Este documento destaca que se ha incluido una prueba de emisiones en condiciones reales de manejo dentro de la evaluación normativa de los vehículos pesados a gas oil EURO VI. Esta medida aún no se ha tomado para la evaluación normativa de vehículos livianos. Más allá de lo anterior, se señala que la prueba normativa de emisiones on-board no refleja condiciones urbanas típicas de manejo.

Las elevadas emisiones de NO_x durante condiciones reales de manejo en comparación con las registradas mediante el empleo de ensayos de laboratorio es evaluada en [65] a través de mediciones en laboratorio y en condiciones reales de manejo. En este artículo se afirma que las emisiones de NO_x de los vehículos livianos a gas oil fueron aceptables durante la realización del ciclo NEDC pero inaceptables durante condiciones reales de manejo. En consonancia con lo anterior, los factores de emisión obtenidos para NO_x resultan ser mayores a los utilizados por el modelo COPERT². Más allá de esto, se observa una similitud razonable entre los factores de emisión de CO_2 , HC y CO medidos y los utilizados por el modelo COPERT.

La idea desarrollada en los párrafos anteriores es reforzada en el reporte [39] según el cual los valores de emisiones y de consumo de combustible medidos en laboratorio no representan a los experimentados por los vehículos cuando se encuentran en circulación.

¹Esta combinación tecnológica ha sido aplicada a vehículos de pasajeros a gas oil y a vehículos comerciales livianos a gas oil con resultados menos exitosos. De todas maneras, la aplicación controlada de estas tecnologías puede tener resultados exitosos en vehículos livianos a gas oil.

²Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport.

En particular, en el mencionado documento se dice que, para el año 2013, la diferencia entre las emisiones de CO₂ medidas en laboratorio y en ruta alcanzó el 38 % (siendo mayores las registradas en ruta) (Figura 2.13). Más allá que este documento se basa en las emisiones de CO₂, en el mismo se presume un comportamiento similar para las emisiones de contaminantes criterio. En particular, se sospecha un comportamiento similar para las emisiones de óxidos de nitrógeno de vehículos a gas oil.

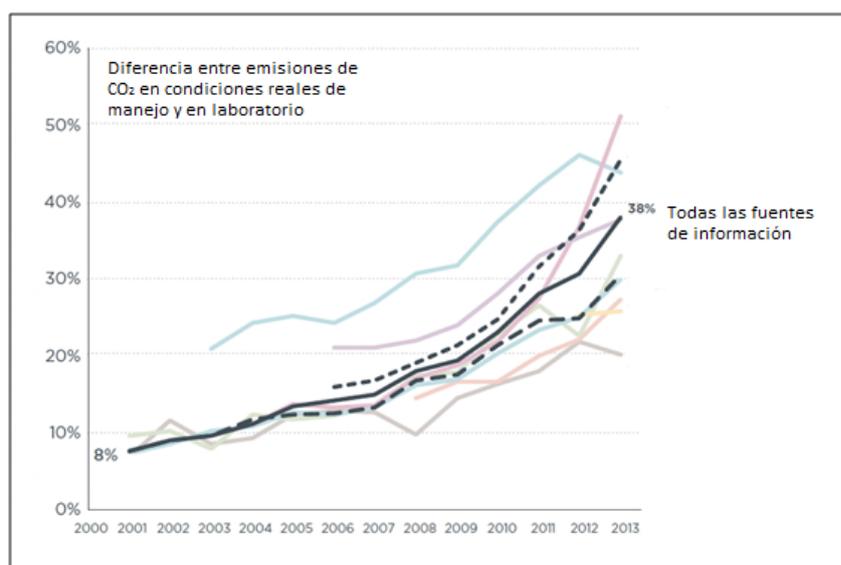


Figura 2.13: Diferencia entre las emisiones de CO₂ registradas en condiciones reales de manejo y en el laboratorio para diversas fuentes de información. Adaptado de [39].

El aumento de la diferencia entre las emisiones de CO₂ reales y aquellas obtenidas en el laboratorio se atribuye a cambios tecnológicos en los automóviles que se reflejan en un mejor desempeño en el laboratorio pero no durante condiciones reales de manejo [39].

Actualmente se ha desarrollado un nuevo ciclo de conducción (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)) del cual se espera que aporte resultados más realistas. Su aplicación oficial en la Unión Europea está prevista para el año 2017.

En [85] se efectuaron mediciones de consumo de combustible y emisiones de CO₂ con vehículo en movimiento. El consumo de combustible obtenido durante las mediciones resultó ser, en promedio, $9 \pm 2\%$ superior al calculado durante la realización del ensayo NEDC. Se dice que esto se debe a que el ciclo de ensayo NEDC tiene aceleraciones más suaves a las experimentadas durante

condiciones reales de manejo.

En consonancia con lo anterior, en [30] se registraron las emisiones de 13 vehículos de pasajeros EURO 5 en un dinamómetro de chasis durante la realización de tres ciclos de conducción diferentes: NEDC, Worldwide Motorcycle Test Cycle (WMTC) y Common Artemis Driving Cycle (CADC) (Figura 2.14). Las emisiones registradas utilizando los ciclos de conducción WMTC y CADC (más representativos de condiciones reales de manejo) fueron superiores a las medidas durante la utilización del ciclo NEDC (Figura 2.15). Más allá de lo anterior, las emisiones en general se mantuvieron por debajo de los límites permitidos (con excepción de las emisiones de NO_x de los vehículos a gas oil). Esto último resultó ser el aspecto más preocupante del citado estudio, según sus autores.

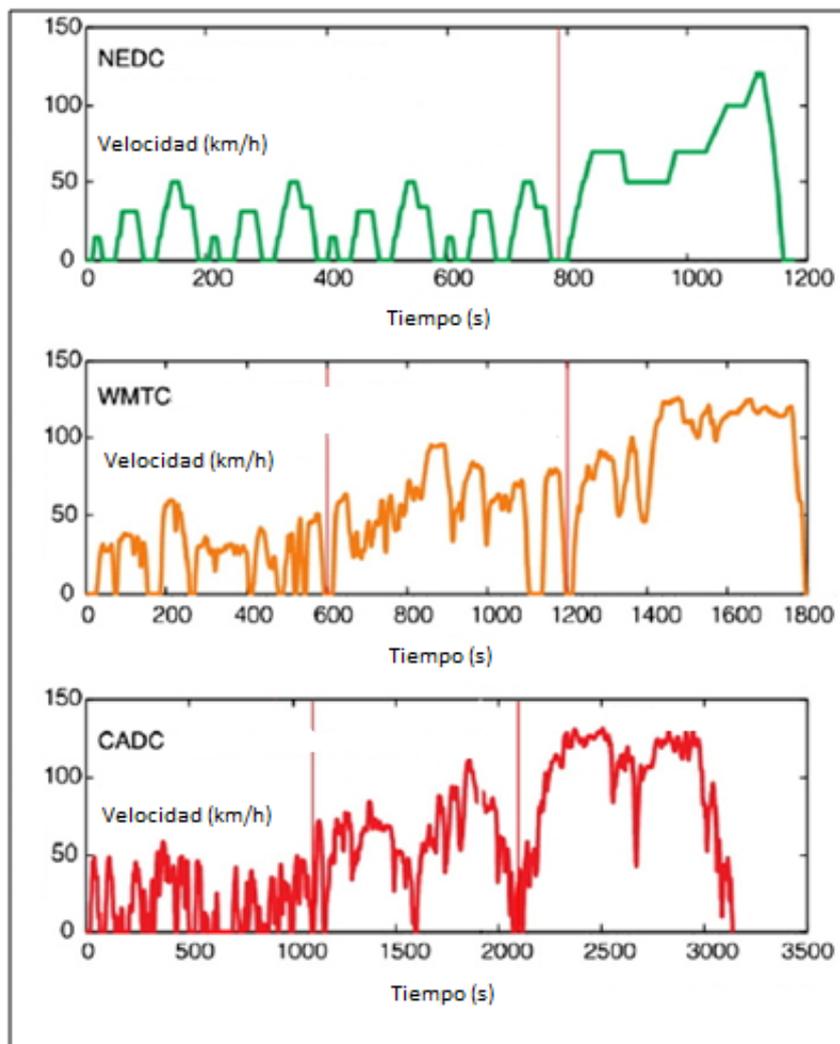


Figura 2.14: Distintos ciclos de conducción. Adaptado de [30].

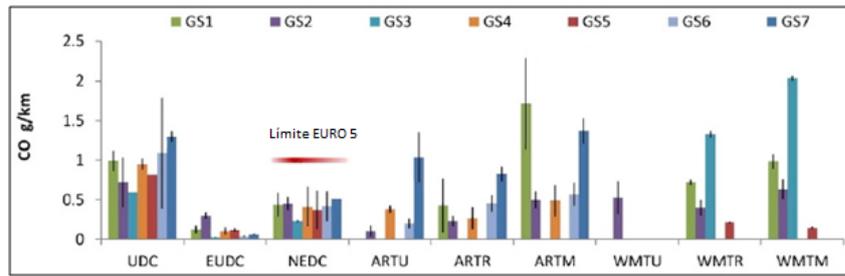


Figura 2.15: Factores de emisión de CO correspondientes a vehículos a gasolina registrados a partir de ensayos en dinamómetro de chasis utilizando diferentes ciclos de conducción. Adaptado de [30].

Capítulo 3

Introducción a la modelación de la dispersión atmosférica de emisiones vehiculares

3.1. Cañones urbanos

3.1.1. Introducción

Más allá que las concentraciones atmosféricas de diversos contaminantes cerca de calles con elevado flujo vehicular difieren significativamente de las concentraciones de base de la ciudad, todos los ambientes exteriores están sujetos a la misma regulación con respecto a la calidad del aire. Esto se debe a la suposición de que las concentraciones de contaminantes registradas en un conjunto de estaciones de monitoreo fijas dentro de una ciudad son representativas de la exposición experimentada por toda la población.

En realidad, en ambientes urbanos y especialmente en aquellas zonas donde la población y el flujo vehicular son elevados, se supone que la exposición humana a contaminantes atmosféricos se verá significativamente incrementada. Usualmente, esta situación predomina cerca de los ejes de tránsito principales de una ciudad, en donde la topografía y el microclima presentes pueden contribuir a la creación de condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes emitidos aumentando sus niveles ambientales.

En este sentido, resulta particularmente interesante estudiar la dispersión y las concentraciones ambientales de los contaminantes emitidos dentro de cañones

urbanos. El término cañón urbano idealmente refiere a una calle relativamente angosta con edificios alineados de manera continua a ambos lados.

Según [52], la concentración de contaminantes atmosféricos puede ser cinco veces superior en un cañón urbano que en el resto de la ciudad. Los altos niveles de contaminantes atmosféricos observados en cañones urbanos se explican por las altas emisiones vehiculares que ocurren en su seno y por la reducida ventilación natural de los mismos.

3.1.2. Características de los cañones urbanos

Geometría

Las dimensiones de un cañón urbano usualmente se describen en función de su relación de aspecto (Aspect Ratio (AR)) definida como el cociente entre su altura (H) y su ancho (W).

A partir de la definición anterior, los cañones urbanos se clasifican según las siguientes categorías:

- Regular: AR cercano a 1 sin mayores aberturas para circulación de aire entre los edificios linderos.
- Profundo: AR cercano a 2.

Además, en función de la longitud del cañón entre dos intersecciones (L), se genera una nueva clasificación:

- Corto: L/H cercano a 3.
- Medio: L/H cercano a 5.
- Largo: L/H cercano a 7.

Finalmente, los cañones urbanos podrán ser simétricos si los edificios que los rodean tienen aproximadamente la misma altura. Si esto no se cumple, los cañones urbanos serán asimétricos.

Flujo de viento

El clima de los cañones urbanos está controlado principalmente por los efectos micrometeorológicos de la geometría urbana (Figura 3.1).

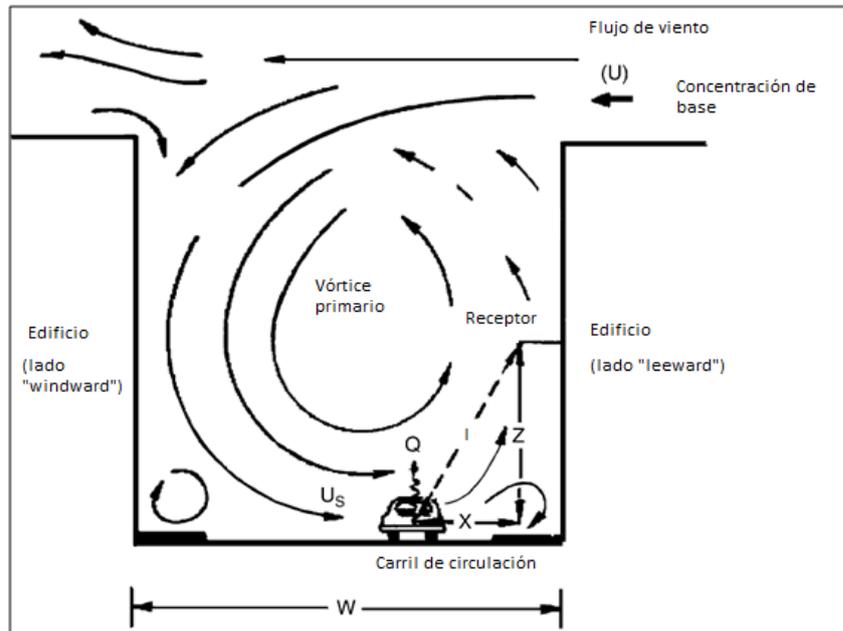


Figura 3.1: Dispersión de contaminantes en un cañón urbano regular. Adaptado de [52].

Dependiendo del viento sinóptico (flujo libre), se pueden identificar tres condiciones predominantes de dispersión de contaminantes en cañones urbanos:

- Condición de vientos bajos: velocidad del viento sinóptico menor a 1.5 m/s⁽¹⁾.
- Flujo perpendicular o casi perpendicular: velocidad del viento sinóptico mayor o igual a 1.5 m/s. Vientos provenientes de direcciones que formen un ángulo mayor a 30° con el eje del cañón urbano.
- Flujo paralelo o casi paralelo: velocidad del viento sinóptico mayor o igual a 1.5 m/s. Vientos provenientes de direcciones que formen un ángulo menor o igual a 30° con el eje del cañón urbano.

¹En estas condiciones resultan relevantes los efectos de mezcla causados por el movimiento de los vehículos [28].

En el caso de flujo perpendicular, la zona del cañón urbano ubicada “viento arriba” se denomina “leeward” y la ubicada “viento abajo” “windward” (Figura 3.1).

Para vientos sinópticos perpendiculares al eje del cañón urbano con velocidades mayores a 1.5 m/s o 2 m/s, el flujo dentro del cañón puede ser descrito mediante tres regímenes posibles, dependiendo de las dimensiones del cañón urbano (Figura 3.2):

- Flujo rugoso aislado (H/W menor a 0.3).
- Flujo con interferencias en la estela (“wake interference flow”) (H/W cercano a 0.5).
- Flujo “rasante” (“skimming flow”) (H/W cercano a 1).

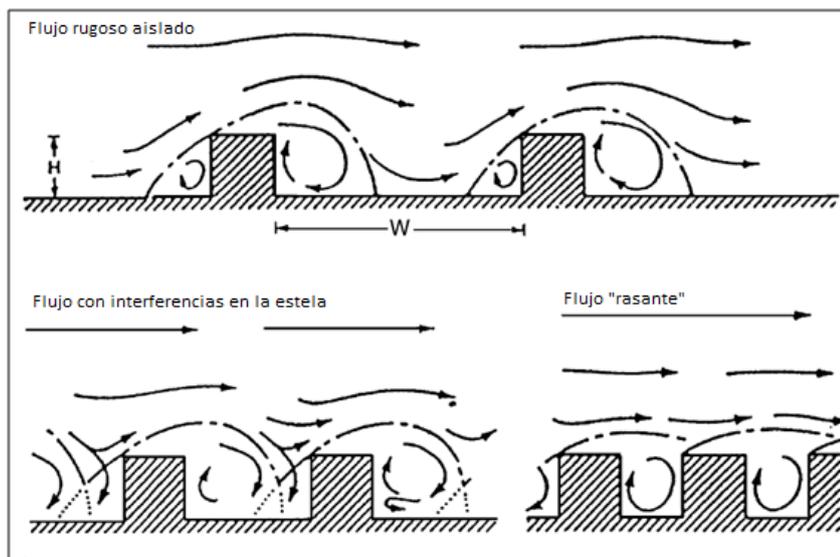


Figura 3.2: Regímenes de flujo en cañones urbanos para vientos sinópticos perpendiculares en función de la relación de aspecto. Adaptado de [52].

Dispersión de contaminantes

La dispersión de contaminantes gaseosos en un cañón urbano en general depende de la tasa a la cual el cañón intercambia aire verticalmente con la atmósfera superior y lateralmente con las calles que lo intersecan. El régimen de flujo “rasante” genera mínima dispersión.

Estudios de campo mostraron mayores concentraciones de contaminantes de

origen vehicular en el lado “leeward side” de los cañones urbanos y concentraciones decrecientes con el aumento de la altura a ambos lados de los mismos.

Transformación de los contaminantes emitidos en la atmósfera

Debido a la escasa distancia existente entre la fuente de emisión y los receptores, solamente reacciones químicas muy rápidas tienen una influencia significativa en las concentraciones de contaminantes registradas en cañones urbanos. Por esta razón, algunos de los contaminantes asociados al tránsito vehicular (CO y HC) pueden ser considerados como prácticamente inertes dentro de este tipo de calles. Este no es el caso de los óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos. En consonancia con lo anterior, en [64] se indica que el monóxido de carbono es un buen indicador de la dispersión y dilución de las emisiones vehiculares debido a que su tiempo de respuesta química es bastante alto (algunas semanas) en comparación con el de otros contaminantes emitidos. Además, se destaca que el mismo se encuentra presente en concentraciones mayores a las de otros contaminantes comúnmente monitoreados (por ejemplo NO_x) lo que hace que su detección sea simple y confiable [64].

3.2. Modelación de la dispersión de contaminantes en cañones urbanos

La dispersión de las emisiones vehiculares en áreas urbanas está definida por la interacción entre el flujo de viento y los edificios, las calles y los árboles [64].

La evolución temporal de las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos se rige por la llamada ecuación de dispersión reactiva [75]. Dicha relación es una ecuación en derivadas parciales que representa fenómenos de advección, difusión y reacción.

La advección corresponde al transporte de sustancias por la acción del viento, la difusión representa la mezcla turbulenta y las reacciones procesos químicos y físicos.

Los modelos numéricos tridimensionales que resuelven estas ecuaciones se denominan modelos de transporte químico (Chemical Transport Model (CTM) en inglés).

La mencionada ecuación de dispersión reactiva se representa por la siguiente fórmula:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (V(x, t) \cdot C_i) = \nabla \cdot (K_{molec} \cdot \nabla C_i) + X_i(C, T(x, t), t) + S_i(x, t) - \Lambda_i x C_i \quad (3.1)$$

Donde:

- C_i : concentración de cierta especie (mg/m^3).
- $V(x, t)$: velocidad del viento.
- K_{molec} : matriz de difusión molecular.
- $T(x, t)$: temperatura.
- $S_i(x, t)$: término fuente de la emisión.
- X_i : término fuente químico.
- Λ_i : coeficiente de barrido (representa los sumideros).

La ecuación anterior no puede ser utilizada para simular flujos turbulentos. Se asume que los campos presentes en la ecuación de dispersión reactiva

pueden descomponerse de la siguiente manera: $\Phi = \Phi_m + \Phi'$; donde Φ_m representa el valor medio del campo y Φ' la fluctuación del mismo (se cumple que $\Phi'_m = 0$).

La aplicación de la descomposición de los campos presentada en el párrafo anterior a la ecuación de dispersión reactiva resulta en la aparición de un nuevo término, función de las fluctuaciones de los campos: $\nabla \cdot ((C'_i \cdot V')_m)$. Para resolver este término es necesario un esquema de cierre. Dicho esquema expresa el término anterior en función de los campos medios. Los dos procesos que requieren un esquema de cierre son la advección del viento (flujo turbulento vertical) y la producción química (efecto de segregación).

En el caso del flujo turbulento, el término presentado anteriormente se resuelve utilizando la siguiente ecuación:

$$\nabla \cdot ((C'_i \cdot V')_m) = -\rho_m * K_{turb}(x, t) * \nabla \frac{C_{i,m}}{\rho_m} \quad (3.2)$$

Donde:

- K_{turb} : matriz de difusión turbulenta (usualmente es una matriz diagonal).
- ρ_m : densidad media del aire.

En la práctica, K_{turb} es mucho mayor que K_{molec} [75]. En general, el único coeficiente de difusión turbulenta que se tiene en cuenta es $K_z \approx 10m^2/s$ ya que, en el plano horizontal, el flujo está gobernado por el fenómeno de advección¹.

Se destaca que, para la correcta resolución de la ecuación de dispersión reactiva, deben especificarse condiciones iniciales y de borde.

Tal cual se verá a continuación, existen diversas clases de modelos útiles para estimar la dispersión en cañones urbanos de las emisiones vehiculares de contaminantes atmosféricos. Dichos modelos varían, entre otras cosas, de acuerdo a la complejidad de su estructura. Existe un balance interesante entre la complejidad del modelo y el error asociado a los resultados que surgen de la aplicación del mismo ya que, cuánto más complejo es el modelo, este requiere información más específica para su funcionamiento y, en general, la calidad de dicha información no es tan confiable (Figura 3.3).

¹En este caso, z representa la dirección vertical.

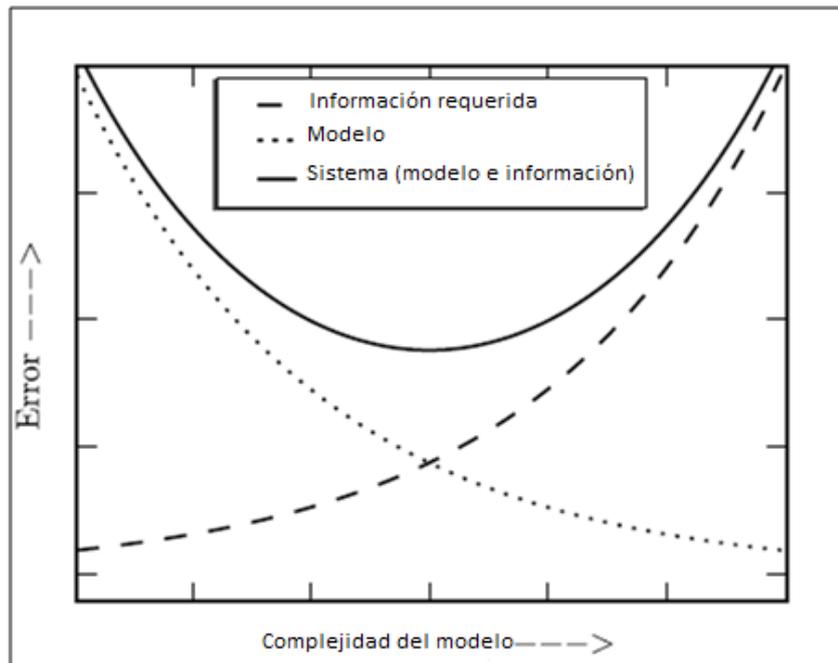


Figura 3.3: Relación entre la complejidad de los modelos y los errores de sus predicciones. Adaptado de [75].

3.2.1. Clases de modelos

Modelos operacionales

Modelos Gaussianos Este tipo de modelos describen el campo de concentraciones en tres dimensiones generado por una fuente puntual. Se asume que las concentraciones generadas a partir de una fuente emisora continua son proporcionales a la tasa de emisión, inversamente proporcionales a la velocidad del viento y que las concentraciones promediadas en el tiempo en la dirección horizontal y vertical son descritas de manera satisfactoria por distribuciones Gaussianas.

En su aplicación más simple, se asume que las sustancias transportadas no reaccionan químicamente y que la pluma contaminante se refleja al llegar a los límites del dominio considerado.

Se supone que estos modelos son válidos hasta distancias del orden de unos pocos kilómetros a partir de la fuente emisora [75]. En la **Figura 3.4** se puede ver un ejemplo de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de este tipo de modelos.

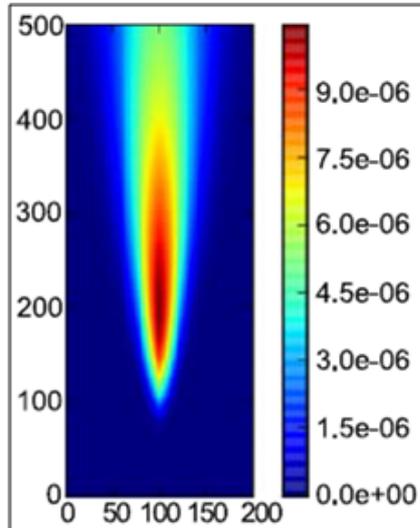


Figura 3.4: Actividad de planta de un radionucleido (en Bq) computada por un modelo Gaussiano [75].

CALINE 4 Este modelo es uno de los más validados para la investigación del impacto de las emisiones vehiculares en la calidad del aire cercano a las fuentes emisoras. El mismo utiliza la teoría de la pluma gaussiana para estimar la dispersión de contaminantes emitidos por una fuente lineal.

STREET o SRI El modelo STREET o SRI es un modelo tipo caja. El mismo está basado en la hipótesis de que los niveles de contaminantes que se presentan cerca de las calles están formados por dos componentes: la concentración de base de la ciudad y la generada por las emisiones vehiculares.

En el “leeward side” de los cañones urbanos las concentraciones de contaminantes se suponen inversamente proporcionales a la distancia existente entre la fuente emisora y el receptor. En el “windward side” se tiene en cuenta el descenso de los niveles de contaminantes con la altura de forma tal de cuantificar el efecto de la entrada de aire desde el exterior del cañón urbano.

OSPM El modelo Operational Street Pollution Model (OSPM) es semi-empírico. El mismo calcula concentraciones de gases de escape a ambos lados de un cañón urbano asumiendo tres contribuciones diferentes:

- Flujo directo de contaminantes desde la fuente al receptor (modelo gaussiano).

- Recirculación de contaminantes debida al flujo de aire existente dentro del cañón urbano (modelo caja).
- Concentración urbana de base.

Modelos de receptores Se basan en el análisis de mediciones de concentraciones ambientales de contaminantes. Este análisis busca determinar cuáles son las fuentes emisoras que aportan a las concentraciones registradas recibiendo este método el nombre de modelación inversa (inverse modeling).

La modelación inversa es un método formal utilizado para estimar ciertas variables de estado x (las emisiones) las cuales condicionan la evolución de un cierto sistema dinámico a partir del registro de las manifestaciones observables de dicho sistema y y utilizando un modelo físico F de forma tal de relacionar las observaciones con las variables de estado. En calidad de aire, F es un modelo de transporte químico (CTM) que relaciona las emisiones x con las concentraciones y [37]. En general, el proceso de modelación inversa es iterativo, obteniéndose estimaciones de emisiones cada vez más precisas a lo largo del cálculo (Figura 3.5).

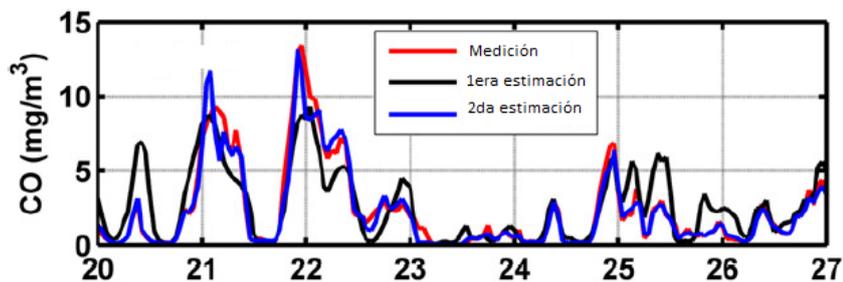


Figura 3.5: Concentraciones horarias de CO estimadas utilizando modelación inversa. Adaptado de [37].

Modelos CFD

El término Computational Fluid Dynamics (CFD) es utilizado de forma general para describir el análisis de sistemas que involucran el flujo de fluidos, la transferencia de calor y fenómenos asociados (por ejemplo reacciones químicas) por medio de métodos numéricos computacionales.

Los modelos CFD se basan en resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido y la dispersión de sustancias, las cuales son derivadas de principios básicos de conservación y transporte:

- Ecuación de conservación de masa (continuidad).
- Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento (Navier Stokes) en tres dimensiones.
- Ecuación de transporte para la concentración de contaminantes.

Además de lo anterior, para el correcto funcionamiento de este tipo de modelos deben especificarse condiciones iniciales y de contorno.

Existen cuatro corrientes diferentes de metodologías de resolución numérica: volúmenes finitos, diferencias finitas, elementos finitos y métodos espectrales. Las mayores diferencias entre ellas radican en la forma en la que se aproximan las variables de flujo y en la metodología de discretización de las ecuaciones que lo gobiernan [52].

Actualmente, en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR se está desarrollando un modelo CFD llamado `caffa3d.MBRi` [56]¹ que puede ser utilizado para estudiar la dispersión atmosférica de emisiones vehiculares.

Se han relevado en la bibliografía diversos artículos que utilizan este tipo de modelos para describir el flujo de fluidos entre edificios y la dispersión de contaminantes en cañones urbanos ([28], [56], [12], [14], entre otros).

La utilización de modelos CFD permite la construcción de una grilla de trabajo que se adapte a la situación real que se quiere estudiar. Dentro de la mencionada grilla pueden colocarse obstáculos alrededor de los cuales se resolverá el flujo del fluido de interés. En el caso del estudio de la dispersión de emisiones vehiculares en ambiente urbano, resulta interesante estudiar el flujo del aire alrededor de los edificios linderos de calles con alto flujo vehicular. En la **Figura 3.6** se observa una grilla construida para el estudio de la dispersión de emisiones vehiculares en cañones urbanos.

¹Sitio web del modelo `caffa3d.MB`: www.fing.edu.uy/imfia/caffa3d.MB

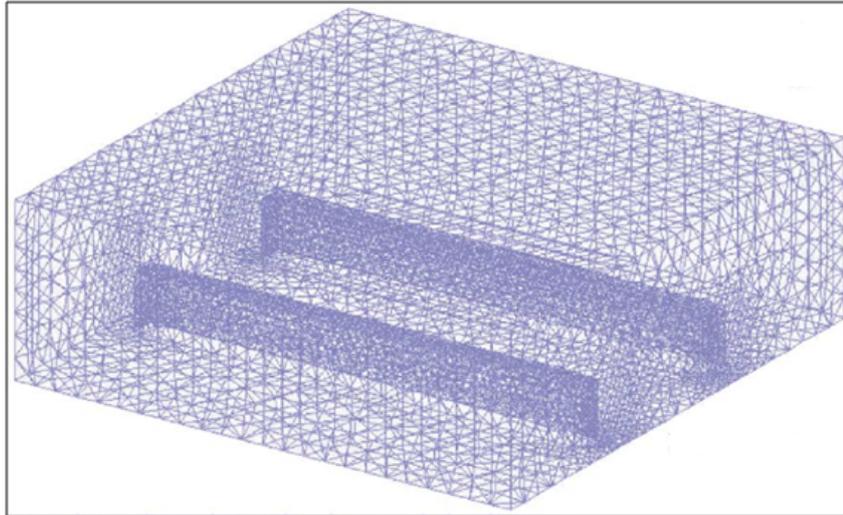


Figura 3.6: Grilla utilizada en un modelo computacional para el estudio de la dispersión de contaminantes en cañones urbanos [12].

Una vez construida la grilla, el modelo CFD se encarga de simular el flujo del fluido en el seno de la misma. En la **Figura 3.7** se muestra un ejemplo de este tipo de simulaciones.

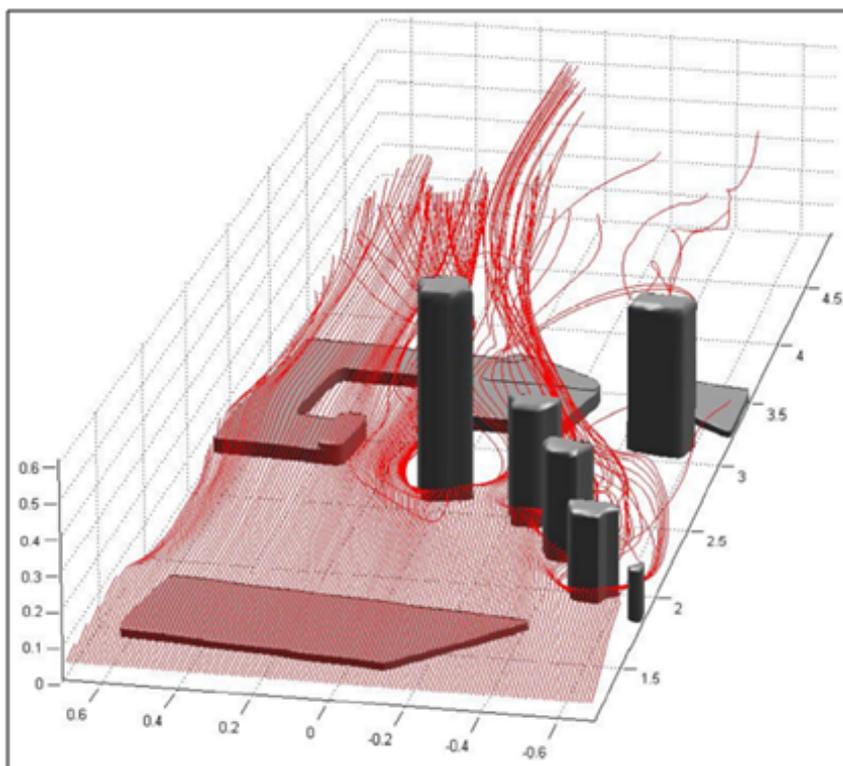


Figura 3.7: Líneas de flujo alrededor de un grupo de edificios [56].

Una vez que se ha simulado el flujo del fluido en el seno de la grilla construida, es posible evaluar la dispersión de un trazador a partir de la especificación de su punto y velocidad de emisión dentro de la grilla. Luego, puede calcularse el campo de concentraciones del trazador emitido. Debido a que el monóxido de carbono es considerado un gas prácticamente inerte dentro de cañones urbanos, las concentraciones simuladas en el seno de dichas calles del trazador emitido pueden asimilarse a las del CO. Por lo tanto, es posible comparar las concentraciones modeladas con registros de dicho contaminante para diversos puntos de la grilla con el fin de calibrar y validar el modelo utilizado (Figura 3.8).

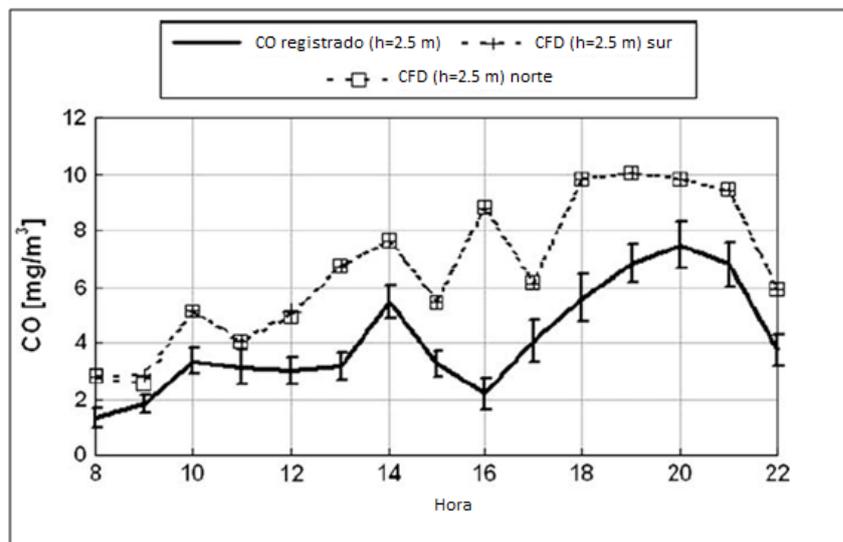


Figura 3.8: Comparación entre la concentración de CO medida dentro de un cañón urbano a una altura igual a 2.5 m en el lado sur y la simulada utilizando un modelo CFD a ambos lados del mismo. Adaptado de [28].

Además, la modelación numérica de la dispersión atmosférica de contaminantes de origen vehicular brinda la posibilidad de ensayar diversas medidas de gestión de la calidad del aire para evaluar su efecto previo a su aplicación. En este sentido, una posible medida de gestión de la calidad del aire a implementar dentro de cañones urbanos es la construcción de un corredor que conecte dos cañones urbanos paralelos con el fin de mejorar la ventilación natural de los mismos. Esta y otras medidas de gestión capaces de ser implementadas en cañones urbanos, con el fin de mitigar posibles episodios de contaminación atmosférica capaces de generarse en su seno, serán descriptas en el capítulo N° 4 dentro del marco teórico del presente documento.

Comparación de tipos de modelos

En términos generales, el mayor problema experimentado por los modelos operacionales es su validación ya que los mismos utilizan diversos parámetros empíricos generalmente obtenidos a partir de datos experimentales. En este sentido, la validez de los resultados está limitada a calles o rutas con geometrías y condiciones de dispersión similares a aquellas para las cuales el modelo fue validado [28].

En consonancia con lo anterior, es interesante destacar que el modelo OSPM fue validado mayoritariamente en cañones urbanos regulares [28].

Por otro lado, los modelos CFD resultan ser de aplicación más compleja que los modelos operacionales. Además, los mismos requieren potentes equipos de cómputo para su correcto funcionamiento.

3.2.2. Requerimientos de los modelos

Más allá que los requerimientos de información de los modelos varían de acuerdo a la complejidad de los mismos, es posible listar algunos que pueden ser necesarios para su correcta implementación en cañones urbanos:

- Flujo vehicular, composición de la flota, velocidades medias de los vehículos.
- Factores de emisión.
- Información meteorológica (velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, presión atmosférica, etc.).
- Geometría de la calle (altura de edificios circundantes, ancho, longitud, orientación, distancia entre edificios, coeficiente de rugosidad de superficie, etc.).
- Concentraciones de contaminantes de base (obtenidas mediante monitoreo en sitios no afectados por fuentes locales).

Capítulo 4

Medidas de gestión para la contaminación atmosférica de origen vehicular

4.1. Introducción

La contaminación atmosférica de origen vehicular puede prevenirse o remediarse de diversas maneras. En particular, pueden definirse medidas de control pasivas o activas siendo las primeras de índole preventivo orientadas al diseño o modificación del espacio urbano y estando las segundas enfocadas en la modificación de la fuente emisora. Entre estos dos extremos teóricos se ubican medidas de gestión de carácter operativo, orientadas al fomento del uso de determinados tipos de medios de transporte o al manejo de los flujos vehiculares existentes. Gráficamente, lo anterior se expresa en la [Figura 4.1](#).



Figura 4.1: Medidas de gestión para la contaminación de origen vehicular (elaboración propia).

Tal cual se deduce de la **Figura 4.1**, se entiende conveniente priorizar las medidas de gestión pasivas por sobre las activas, en el entendido de que las primeras resultan ser de carácter preventivo mientras que las medidas activas constituyen la remediación de un problema ambiental ya instalado.

En las siguientes secciones se definirán y comentarán las medidas de gestión aquí introducidas.

4.2. Geometría urbana

Según [60], [12], [14], [11], [67] y [62], existen vínculos entre la geometría urbana y la contaminación atmosférica. En este marco, la geometría urbana se analiza tanto a nivel de calle como de ciudad.

A escala de ciudad, se distinguen distintos patrones geométricos, a saber:

1. Ciudad densa y continua (ciudad compacta).
2. Ciudad densa y fragmentada.
3. Ciudad poco densa y continua.
4. Ciudad poco densa y fragmentada.

Los patrones geométricos definidos se aprecian de forma esquemática en la [Figura 4.2](#).

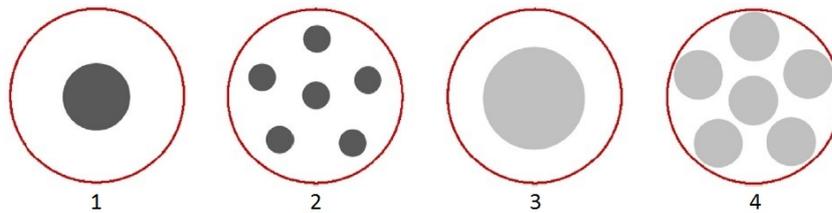


Figura 4.2: Patrones geométricos urbanos. Adaptado de [60].

Según [60] las ciudades fragmentadas y densamente construidas experimentan mayores niveles ambientales de NO_2 y MP_{10} y las ciudades densamente pobladas sufren de una mayor concentración ambiental de SO_2 . En contraste con los contaminantes NO_2 y MP_{10} , las concentraciones de SO_2 no se relacionan con la fragmentación urbana debido a que los vehículos no son la principal fuente emisora de este contaminante. Los hallazgos relevados sugieren que las zonas urbanas continuas pueden experimentar mejores condiciones ambientales en cuanto a su calidad de aire. Por el contrario, el desarrollo fragmentado de ciudades puede traducirse en zonas urbanas dependientes del automóvil para su correcto funcionamiento. Las zonas urbanas no fragmentadas aumentan la conectividad, reducen la necesidad de movilidad y la dependencia de los automóviles y facilitan el uso de medios de transporte no motorizados. Otros beneficios de estos diseños son el ahorro de energía y la reducción de los costos de mantenimiento de los sistemas de transporte y de generación de energía

[60]. En forma teórica, se espera que una ciudad compacta presente menores niveles de emisión de contaminantes de origen vehicular que una fragmentada. Por otro lado, las zonas urbanas densas exponen a una mayor proporción de la población a la contaminación atmosférica. En resumen, ciudades continuas y poco densas (patrón N°3) podrían experimentar niveles de contaminación atmosférica menores a los demás patrones urbanos. Resulta relevante comparar la dispersión de contaminantes experimentada por un tipo de ciudad dada ante distintos flujos de viento. Según [67], para vientos paralelos al flujo vehicular, las transferencias verticales y transversales de aire son mínimas estando la remoción de contaminantes asociada con los flujos de viento longitudinales. Por otra parte, vientos transversales al flujo de vehículos resultan en mejores ventilaciones debido a un aumento de los flujos transversales y del intercambio vertical de aire. [12] y [14] abordan el vínculo entre la geometría urbana y la contaminación atmosférica a nivel de diseño de calles. En particular, se centran en el diseño geométrico de cañones urbanos para prevenir la contaminación atmosférica de tipo vehicular en su seno.

El clima de vientos de los cañones urbanos está controlado principalmente por la interacción del flujo de viento local con la geometría de los edificios circundantes. Dicha interacción puede modelarse de forma tal de investigar la influencia de la geometría del cañón en la dispersión de los contaminantes emitidos en su seno (Figura 4.3 y Figura 4.4).

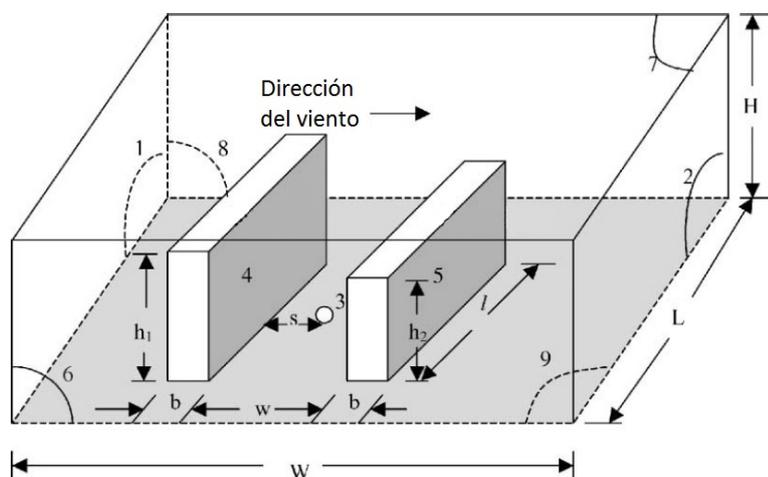


Figura 4.3: Configuración de un modelo de cañón urbano. Adaptado de [12].

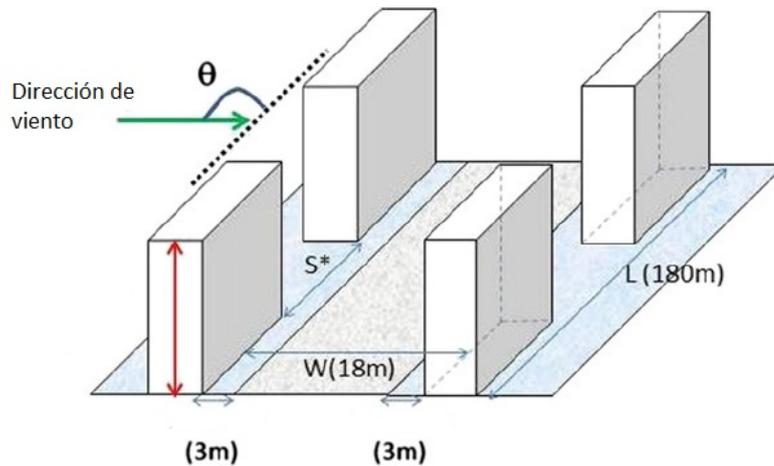


Figura 4.4: Configuración de un modelo de cañón urbano. Adaptado de [14].

Utilizando un modelo computacional de un cañón urbano como los ilustrados en la [Figura 4.3](#) o en la [Figura 4.4](#), se puede evaluar la influencia de la geometría de la calle en los niveles ambientales de contaminación en su seno variando los parámetros geométricos de la calle para un mismo flujo de viento y estimando, para cada escenario de interés, los niveles de calidad de aire resultantes. A partir de lo anterior surgen vinculaciones entre la geometría de la calle y la calidad del aire resultante. Las mismas se resumen a continuación:

- Altura relativa de los edificios h_2/h_1 : la relación de alturas entre los edificios circundantes a una calle influye en los niveles de contaminación alcanzados en su seno tal cual se observa en la [Figura 4.5](#).
- Cociente entre la altura de los edificios y el ancho de la calle (relación de aspecto): si la relación h/w es demasiado elevada, puede ocurrir el estancamiento de contaminantes dentro del cañón urbano. Para conservar el abrigo dentro de la calle y aumentar el calentamiento urbano se recomienda $h/w \geq 0.4$ mientras que para favorecer la dispersión de contaminantes y la penetración de la radiación solar se recomienda $h/w \leq 0.6$.
- Cociente entre el largo de la calle (entre cruces) y la altura de los edificios: hasta relaciones l/h iguales a 5, los niveles de contaminación decrecen con un aumento de dicha relación. A partir de $l/h = 5$, los niveles de contaminación aumentan con la relación l/h .
- Posición de la fuente emisora: si la fuente se ubica cerca del lado de la calle que queda corriente arriba del flujo de viento, la dispersión de los

contaminantes emitidos mejora.

- Permeabilidad de las calles: la permeabilidad de las calles se define como el cociente entre la longitud del espaciamiento entre los edificios circundantes a la misma y el largo total del cañón urbano. El aumento de la permeabilidad de las calles contribuye a un descenso de los niveles ambientales de contaminación tal cual se observa en la [Figura 4.6](#).
- Retiro de los edificios: el retiro de los edificios se define como la distancia entre los edificios y la calle. El aumento del retiro de los edificios contribuye a un descenso de los niveles ambientales de contaminación ([Figura 4.7](#)). Sin embargo, en este caso, la eficacia de la medida depende de la relación de aspecto del cañón urbano.

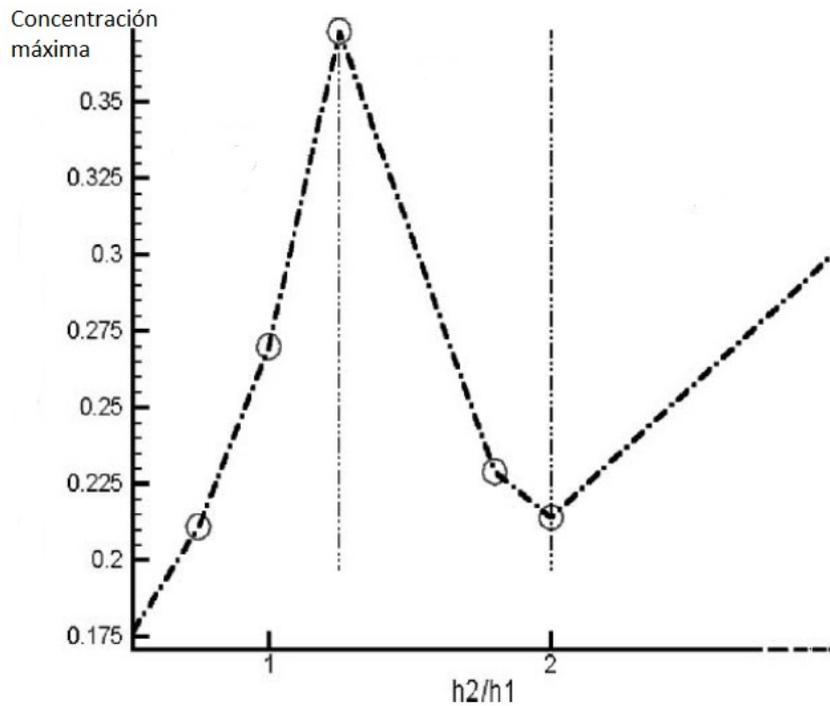


Figura 4.5: Niveles de contaminación en un cañón urbano en función de la relación entre las alturas de los edificios circundantes. Adaptado de [12].

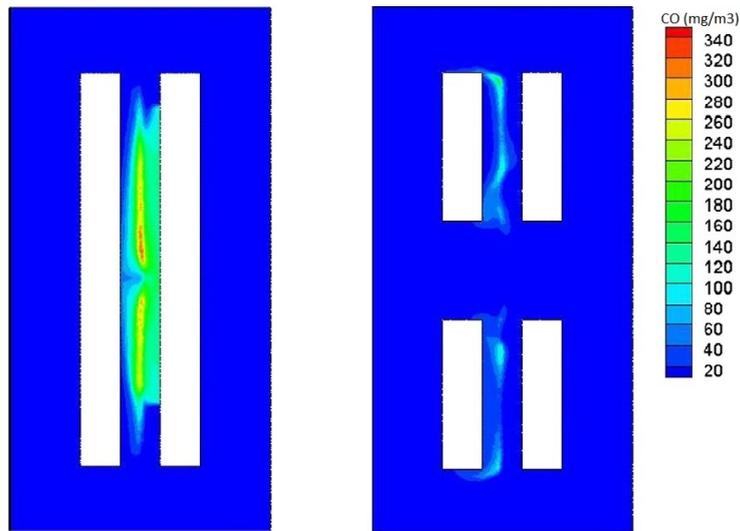


Figura 4.6: Efecto de la permeabilidad de la calle en las concentraciones ambientales de monóxido de carbono (25 % de permeabilidad). Adaptado de [14].

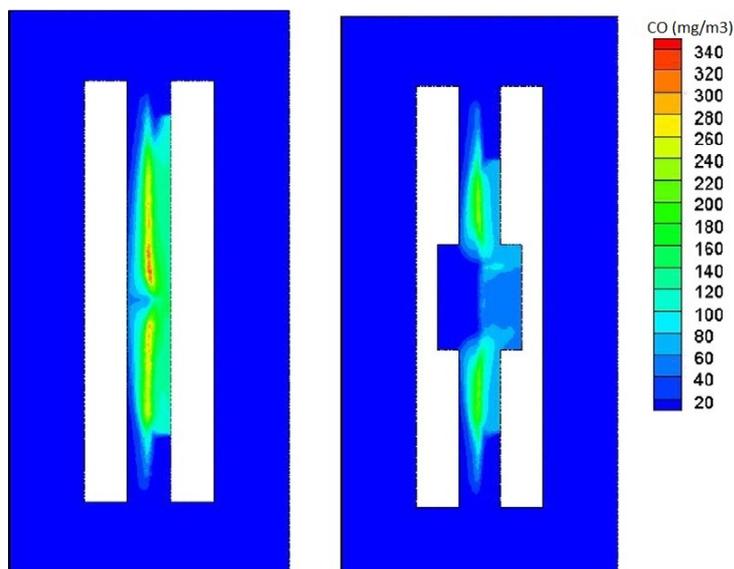


Figura 4.7: Efecto del retiro de los edificios en las concentraciones ambientales de monóxido de carbono (retiro vertical). Adaptado de [14].

A partir de uno de los puntos detallados anteriormente, se destaca que los distintos aspectos que hacen al diseño de una vía de tránsito obligarían a optar por priorizar algunos en desmedro de otros pues son intrínsecamente contradictorios. Sin embargo, el diseño de las calles está, en la práctica, supeditado al diseño de la trama urbana en la que se enclavan y a la que sirven. Lo anterior se debe a que si las geometrías de las calles resultan ser abiertas, se produce una mejor ventilación de las mismas y, por lo tanto, los niveles de

contaminación registrados en ellas serán menores. Además, este tipo de geometrías permiten una mayor penetración de la radiación solar. Sin embargo, un arreglo de calles más denso es favorable para la conservación de la energía y el abrigo. Estos últimos aspectos son también importantes [62], más allá de que no sean analizados en el presente trabajo.

4.3. Alteración de la geometría urbana existente

Una vez que la ciudad ha sido construida y, por lo tanto, todos los parámetros revisados en la sección anterior han quedado fijados, puede ser necesario modificar la geometría existente con el fin de remediar un problema de contaminación atmosférica de origen vehicular que se haya detectado.

En la presente sección se comentarán dos posibles metodologías de alteración de la geometría urbana existente con el fin de disminuir la exposición humana a la contaminación de origen vehicular ([44], [68]).

4.3.1. Vehículos estacionados

Según [44], la presencia de vehículos estacionados en la calle puede reducir los niveles de exposición a contaminantes de los peatones que circulan por la misma. En el marco del trabajo de investigación descrito en [44], se determinó la configuración de vehículos estacionados que produce la mayor reducción de la exposición de los peatones a las emisiones vehiculares siendo ésta correspondiente a la ubicación de los vehículos estacionados paralelos al eje de la calle.

Luego, para dicha configuración, se vinculó la reducción de la exposición con el porcentaje de ocupación de los sitios de estacionamiento disponibles. En este sentido se determinó que la exposición es mayor cuanto menor es la ocupación. Esto se observa en la [Figura 4.8](#).

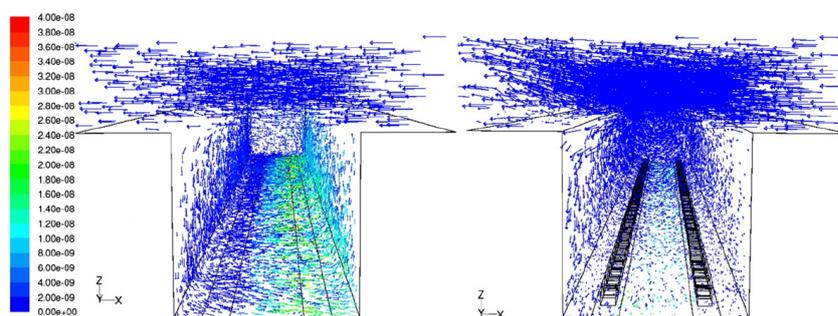


Figura 4.8: Efecto de la presencia de vehículos estacionados en las concentraciones ambientales de CO_2 (izquierda: sin vehículos estacionados; derecha: con vehículos estacionados de forma paralela al eje de la calle) para un flujo de viento perpendicular al eje del cañón urbano (4 m/s). Adaptado de [44].

De lo anterior se desprende que los vehículos estacionados pueden actuar

minimizando las zonas de estancamiento de aire dentro del cañón urbano, reduciendo así los niveles de exposición a contaminantes de los peatones.

4.3.2. Presencia de árboles

En el marco de un trabajo de modelación aplicado al centro de la ciudad de Leicester (Reino Unido) [68], se encontró que la presencia de árboles en la vía pública tiene un impacto regional positivo en cuanto a la calidad de aire ¹ al aumentar la turbulencia y reducir las concentraciones ambientales de los contaminantes emitidos por vehículos en un 7% en promedio a nivel de calle. El porcentaje de reducción anterior también se reporta en el trabajo descrito en [83] para MP_{10} .

Sin embargo, el estudio descrito en [68] subraya que, a nivel de cañones urbanos, la presencia de árboles aumenta las concentraciones ambientales de contaminantes. Esto también es así según [15], en donde a partir de mediciones realizadas en túnel de viento se determinó que la presencia de árboles en cañones urbanos reduce el intercambio de aire entre la calle y el ambiente (Figura 4.9). En comparación con cañones urbanos sin presencia de árboles, se midieron mayores niveles de contaminantes y menores velocidades de viento. En particular, para flujos de viento perpendiculares al eje de calle, se registraron aumentos significativos de las concentraciones de contaminantes en la zona del cañón urbano ubicada corriente arriba del flujo de viento y concentraciones levemente inferiores en la zona de la calle ubicada corriente abajo de dicho flujo.

¹Por impacto regional se entiende fuera de cañones urbanos.

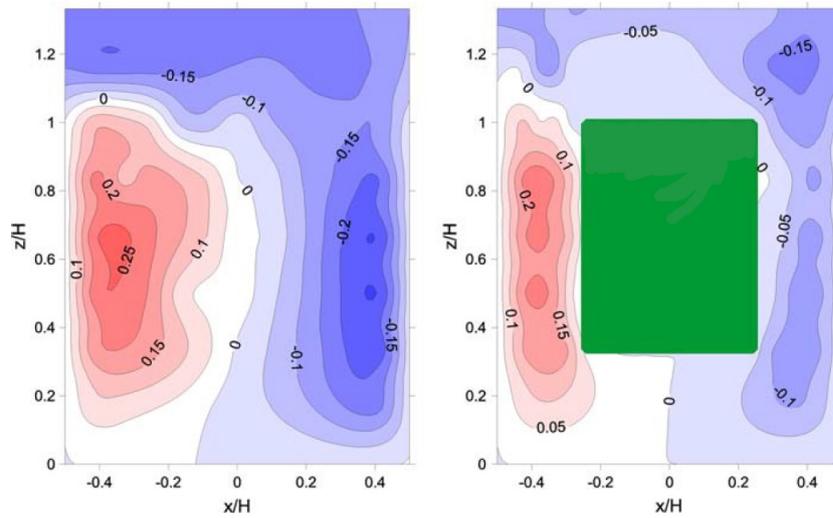


Figura 4.9: Efecto de la presencia de árboles en las velocidades verticales normalizadas de flujo en cañones urbanos (izquierda: sin árboles; derecha: con árboles), corte transversal. Adaptado de [15].

Además, según [83], la presencia de árboles no es del todo efectiva en la reducción de los niveles ambientales de contaminantes distintos a MP_{10} . Lo anterior sugiere que el éxito de esta medida de gestión radica en la elección del lugar de emplazamiento de los árboles pudiendo tener un efecto contrario al buscado si los mismos se ubican en el seno de cañones urbanos. De todas maneras, en [83] se indica que su uso como medida de gestión de la calidad del aire deberá complementarse con otras si se quieren reducir los niveles ambientales de otros contaminantes atmosféricos además de MP_{10} .

4.4. Tipos de medios de transporte

Los impactos ambientales negativos generados por un número importante de vehículos en circulación pueden ser mitigados promoviendo medios de transporte alternativos. Esta estrategia puede lograr co-beneficios como ser una mejora en la salud de la población debido al cambio de la calidad del aire y al aumento de la realización de ejercicio físico (si se propone, dentro de los medios de transporte alternativos, el traslado a pie o en bicicleta).

A modo de ejemplo, en un estudio de investigación realizado en la ciudad de Adelaide, Australia [87], se modelaron distintos escenarios futuros (al año 2030) a partir del uso de diferentes medios de transporte. Como resultado se obtuvo que cambiando el 40% de los kilómetros recorridos por automóviles particulares a medios de transporte alternativos, las concentraciones ambientales urbanas medias anuales de $MP_{2.5}$ se reducirían en $0.4 \mu g/m^3$ con respecto al escenario base.

Además del ejemplo anterior, según [61] el uso de medios alternativos de transporte puede ser más económico y no necesariamente insumir un tiempo de traslado mayor. Estos resultados se aprecian gráficamente en la [Figura 4.10](#) y en la [Figura 4.11](#).

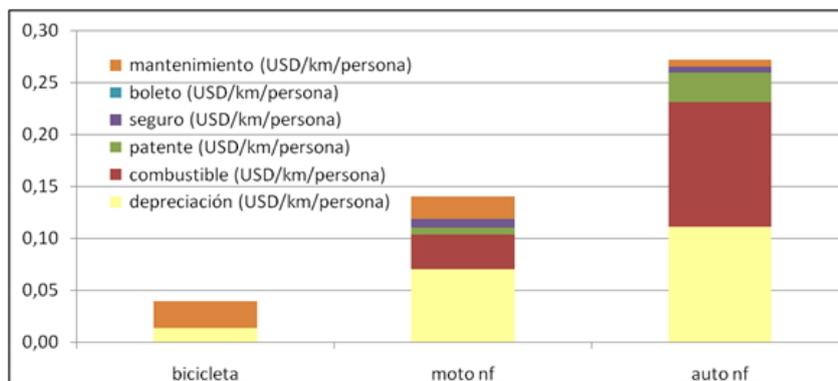


Figura 4.10: Subtotales de costos del usuario por tipo de vehículo (USD/km/persona) (nf: nafta) [61].

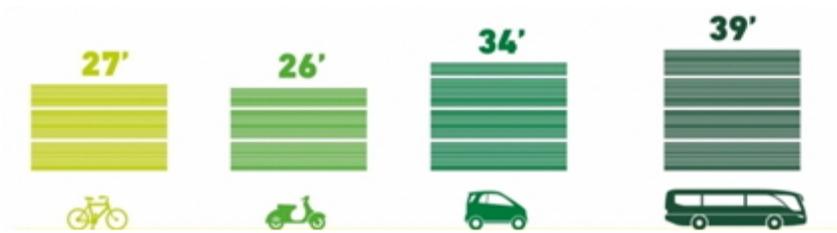


Figura 4.11: Tiempos insumidos por distintos medios de transporte para un mismo recorrido urbano [61].

La utilización de medios de transporte alternativos (por ejemplo la bicicleta) está condicionada a la existencia de infraestructura segura y en buenas condiciones. Se destaca que, a nivel internacional, la promoción del uso de la bicicleta como medio de transporte es una prioridad para la salud pública. Más allá de lo anterior, son necesarias medidas a distintos niveles para incentivar su uso de forma segura [61].

4.5. Gestión del tránsito

Existen diversas medidas de gestión del tránsito que pueden aplicarse con el fin de mitigar la contaminación atmosférica de origen vehicular, a continuación se destacan algunas de ellas:

- Restricción de la circulación de vehículos de particulares en función del número de matrícula.
- Restricción de la circulación de vehículos del estado.
- Zonificación urbana de la circulación de vehículos pesados.
- Restricción de la circulación de vehículos altamente emisores.

Los efectos resultantes de la aplicación de las medidas de gestión del tránsito presentadas anteriormente en la ciudad de Beijing, por parte del gobierno municipal de dicha ciudad, durante los Juegos Olímpicos del año 2008 fueron analizados por [47]. Dichos efectos se listan a continuación:

- Se aumentó la velocidad media de circulación.
- Se modernizó la flota circulante a partir de la prohibición de la circulación de vehículos altamente emisores y de la restricción de la circulación de vehículos pesados.
- Se redujeron las emisiones asociadas al tráfico de COV_s , CO (Figura 4.12), NO_x y MP_{10} un 55.5 %, 56.8 %, 45.7 % y 51.6 % respectivamente durante el período de aplicación de las medidas de gestión.

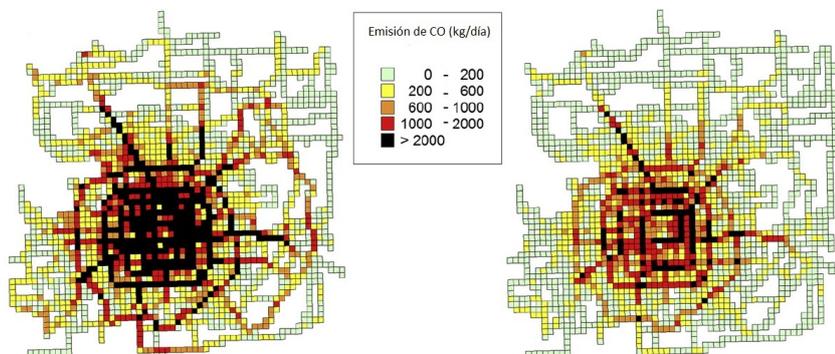


Figura 4.12: Emisiones vehiculares diarias de monóxido de carbono en la ciudad de Beijing antes (izquierda) y durante (derecha) los Juegos Olímpicos de 2008. Adaptado de [47].

Medidas similares de gestión del tránsito se tomaron en la ciudad de Nueva York durante el año 2008 [79]. En particular, se prohibió la circulación de vehículos por la Avenida Park durante tres mañanas de sábado consecutivas durante el mes de agosto del mencionado año. Se constató un descenso de la concentración de partículas ultrafinas de 58 % durante las mañanas sin flujo vehicular.

Más allá del aumento de la velocidad media de circulación, resulta interesante disminuir la cantidad de arranques y paradas de los vehículos mediante la aplicación de las medidas de gestión mencionadas anteriormente debido a que las emisiones atmosféricas tienden a ser mayores en estas situaciones [17]. De hecho, según [20], condiciones de manejo caracterizadas por bajas velocidades con aceleraciones y frenadas frecuentes, particularmente en condiciones de tránsito congestionado, constituyen la principal razón del aumento de las emisiones vehiculares de CO y HC para vehículos pesados (Figura 4.13). Además, según [85], estas condiciones de manejo aumentan el consumo de combustible (Figura 4.14).

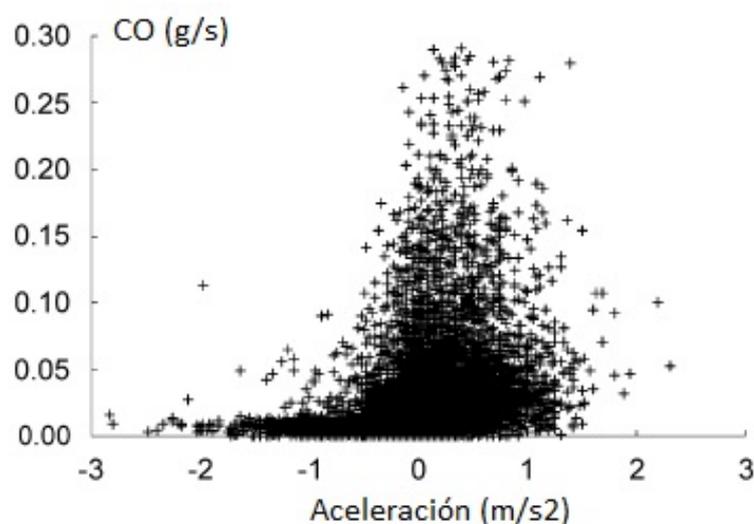


Figura 4.13: Emisiones de CO en función de la aceleración del vehículo. Adaptado de [20].

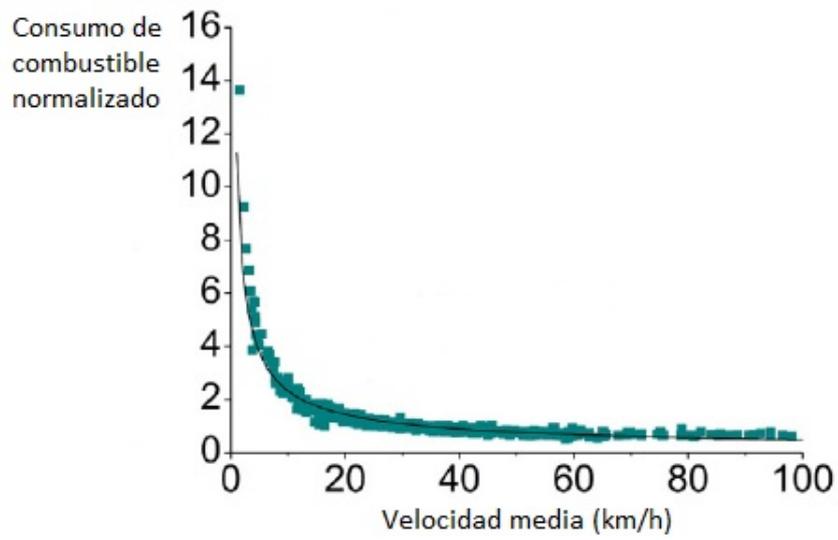


Figura 4.14: Consumo de combustible normalizado en función de la velocidad promedio para vehículos livianos de pasajeros a gasolina. Adaptado de [85].

4.6. Modernización de la flota vehicular

Con el aumento progresivo de los estándares de emisiones vehiculares se ha generado un desarrollo de tecnologías capaces de reducir los niveles de emisión de diversos contaminantes para los distintos tipos de vehículos en circulación.

En particular, existe un reciente desarrollo tecnológico tendiente a disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) generadas por los vehículos a gas oil de pasajeros. Este desarrollo tecnológico representa uno de los desafíos más importantes que enfrentan los fabricantes de este tipo de vehículos [41].

Actualmente existen tres tipos de tecnologías principales para este propósito:

- Recirculación de gas de escape (EGR).
- Adsorbentes de NO_x para mezcla pobre (Lean NO_x Traps (LNT) en inglés).
- Reducción catalítica selectiva (SCR).

En el mercado europeo, las tecnologías de control predominantes son los adsorbentes de NO_x para mezcla pobre y la reducción catalítica selectiva [41]. Además, también se destaca que la tecnología SCR se adecua mejor a situaciones con altas cargas de manejo requiriendo para su funcionamiento del uso de un aditivo ¹. Por otra parte, las LNT se recomiendan para bajas cargas de manejo aunque se remarca que algunos vehículos pueden experimentar resultados muy pobres mediante la aplicación de esta tecnología durante condiciones reales de manejo. Por último se menciona que la tecnología EGR, más allá de no estar específicamente diseñada para el control de las emisiones de NO_x en motores a gasolina sino para disminuir el consumo de combustible [31], resulta ser una tecnología probada de bajo costo con un desempeño medio en el control de las emisiones de NO_x que, en el caso de los motores a gasolina, resulta ser un co-beneficio de la aplicación de dicha tecnología.

La incorporación de los nuevos desarrollos tecnológicos orientados al cumplimiento de nuevos estándares de emisiones tiene un costo económico asociado. Tales costos para vehículos pesados se estudian en [42]. Tomando como base la norma europea Euro II y la norma norteamericana US 1994, la evolución temporal de la inversión económica necesaria para cumplir con los sucesivos

¹AdBlue(TM).

estándares de emisiones se muestra en la [Figura 4.15](#). Allí se observa que, más allá que los incrementos de costos por etapa normativa son diferentes para Europa y para Estados Unidos, el incremento total para pasar de la norma EURO II a la Euro VI es igual al necesario para pasar de la norma US 1994 a la US 2010.

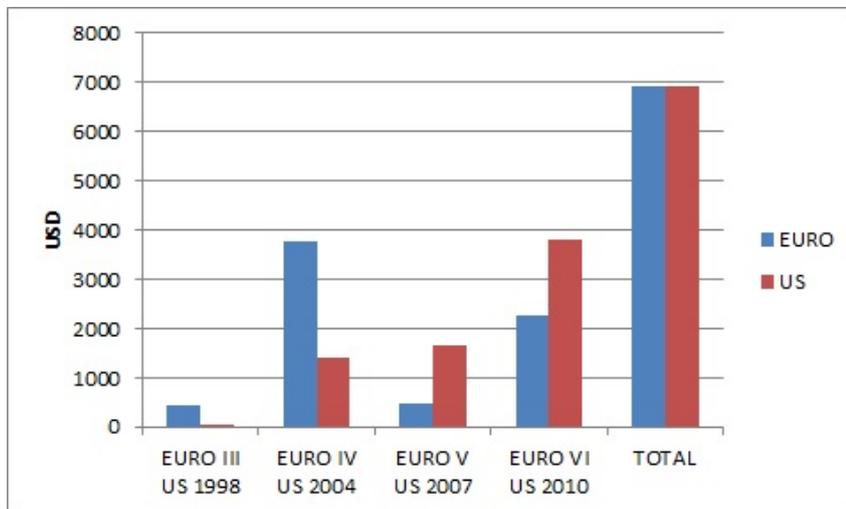


Figura 4.15: Costos incrementales de las tecnologías de control de emisiones para un motor Diesel de 12000 cm³ bajo estándares de control de emisiones europeos y norteamericanos. Elaboración propia a partir de [42].

Más allá de la aparición de vehículos modernos con tecnologías de control de emisiones avanzadas como las mencionadas anteriormente, existe la posibilidad de actuar sobre los vehículos altamente emisores existentes de forma tal de mejorar sus desempeños ambientales. De todas maneras, según [49], las operaciones de mantenimiento realizadas sobre vehículos altamente emisores pueden no resultar efectivas ([Figura 4.16](#)).

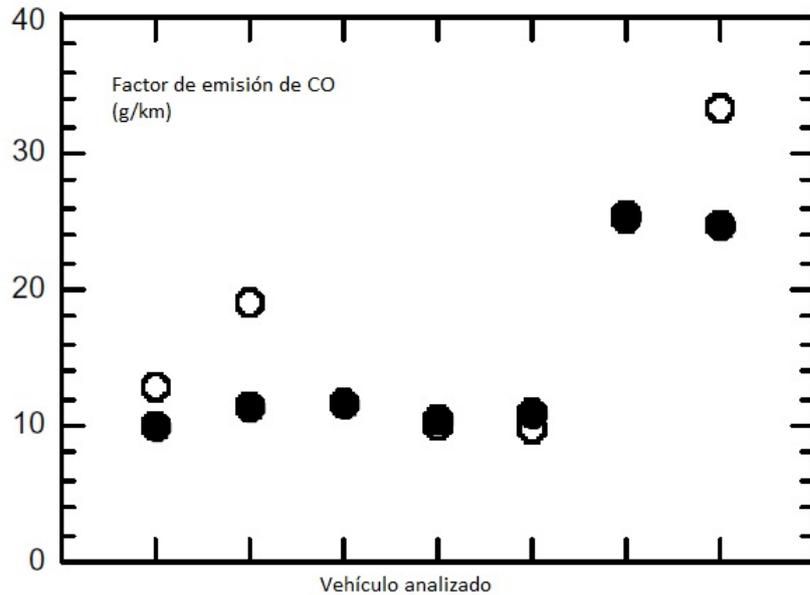


Figura 4.16: Factores de emisión de CO para vehículos altamente emisores (círculo blanco: antes del mantenimiento; círculo negro: después del mantenimiento). Adaptado de [49].

La **Figura 4.16** muestra que, de los siete vehículos altamente emisores analizados en [49], sólo tres mostraron un descenso en el factor de emisión de CO luego del mantenimiento y uno de ellos experimentó un leve aumento de dicho factor de emisión. Lo anterior muestra que las flotas vehiculares existentes deben ser analizadas con cuidado con el fin de inferir si un programa de mantenimiento puede resultar efectivo en la reducción de las emisiones de escape.

Capítulo 5

Caso de aplicación: antecedentes

5.1. Introducción

En el presente capítulo se presenta el marco legal nacional que regula las emisiones vehiculares así como también algunas referencias normativas internacionales en la materia.

Además, se incluyen comentarios acerca de los siguientes antecedentes nacionales vinculados con las emisiones gaseosas vehiculares:

- Tamaño, composición y consumo energético del parque vehicular nacional.
- Plan de Movilidad de Montevideo.
- Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Montevideo.
- Inventario de Emisiones Atmosféricas 2006.

5.2. Marco legal

5.2.1. Normativa internacional

Unión Europea

El proceso normativo de control de emisiones vehiculares en la Unión Europea comenzó en el año 1992 con la norma EURO 1/I (vehículos livianos y pesados respectivamente). Desde el año 2015, la norma de control de emisiones vigente es la EURO 6/VI. Los estándares de emisiones presentes en la norma EURO 6/VI tienen en cuenta que es necesaria una reducción considerable de las emisiones de NO_x de vehículos a gas oil para mejorar la calidad del aire ambiente [43]. La evolución normativa europea estuvo sujeta a las mejoras de la calidad de los combustibles, sobre todo en lo relativo al contenido de azufre de los mismos [43].

A modo ilustrativo, en la **Figura 5.1** se muestra la evolución temporal de los valores límite de emisión de monóxido de carbono para vehículos de pasajeros a gasolina.

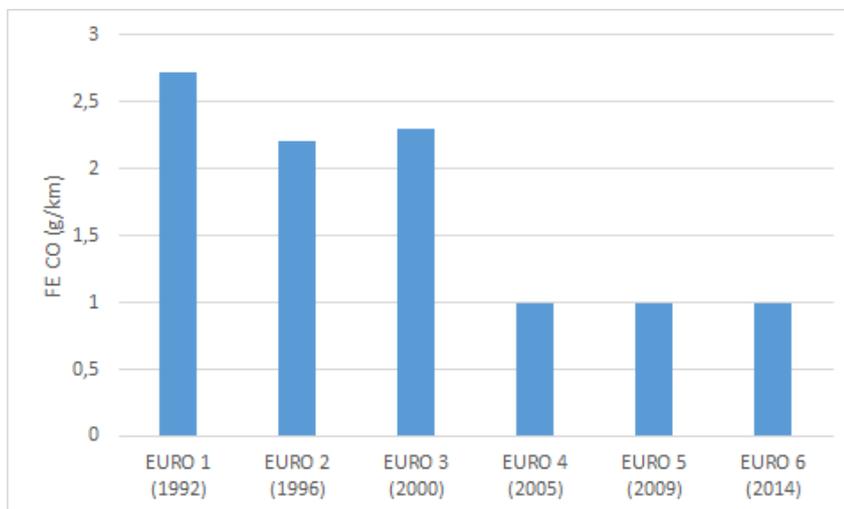


Figura 5.1: Factores de emisión de CO (g/km) para vehículos de pasajeros a gasolina para las diferentes normas EURO (elaboración propia).

En el caso de los vehículos de pasajeros, las emisiones son evaluadas a través de un ensayo de laboratorio durante el cual los vehículos siguen una secuencia preestablecida velocidad-tiempo (“ciclo de conducción”) que se denomina New European Driving Cycle (NEDC) (**Figura 5.2**).

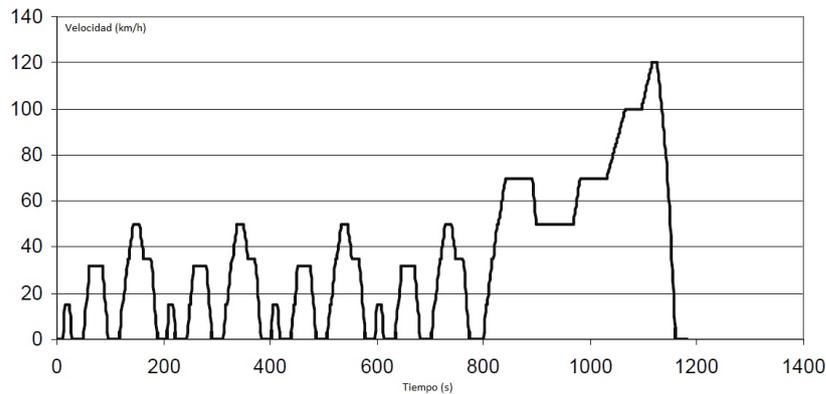


Figura 5.2: New European Driving Cycle. Adaptado de [55].

A partir de la etapa EURO III, la evaluación normativa de las emisiones gaseosas de vehículos pesados se realiza utilizando dos ciclos de manejo: el European Stationary Cycle (ESC) y el European Transient Cycle (ETC) (Figura 5.3). Además, la opacidad se mide utilizando un test denominado European Load Response (ELR). A partir de la entrada en vigencia de la norma EURO VI, las emisiones se evalúan utilizando los ciclos de manejo denominados World Harmonized Stationary Cycle (WHSC) y World Harmonized Transient Cycle (WHTC)¹.

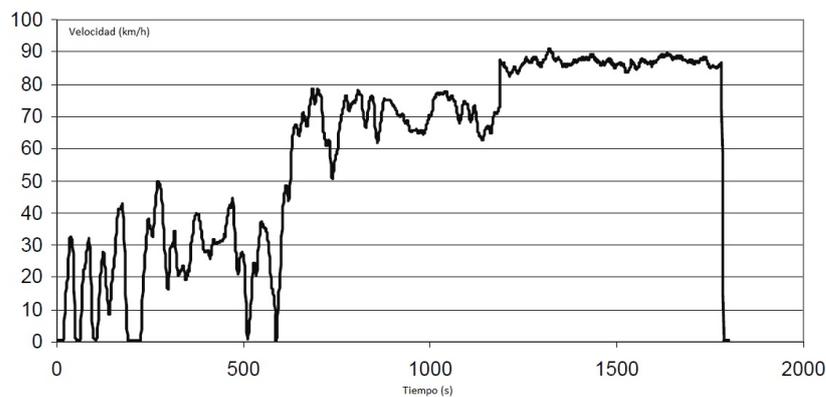


Figura 5.3: European Transient Cycle. Adaptado de [55].

En [43] se afirma que se ha demostrado que el NEDC no logra representar adecuadamente las condiciones reales de manejo. Actualmente se ha desarrollado un nuevo ciclo de conducción denominado Worldwide Harmonized Light

¹Sitio web de consulta de normas relativas al transporte: <http://www.transportpolicy.net/>.

Vehicles Test Cycle (WLTC) que contiene condiciones de manejo más dinámicas. La Comisión Europea tiene previsto comenzar a utilizar el WLTC con fines normativos a partir del año 2017. Dicha comisión también prevé la implementación de una prueba de emisiones en movimiento en adición al test de laboratorio.

Por otra parte, en la Unión Europea también existen valores límite de emisión para CO₂. Actualmente se han fijado metas de reducción de emisiones de tal forma que el factor de emisión de este contaminante en el año 2015 sea igual a 130 g/km y en 2021 igual a 95 g/km (Figura 5.4).

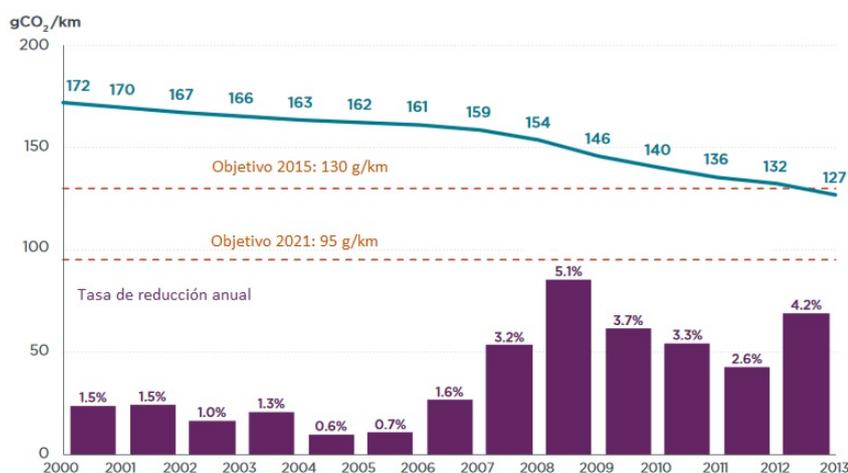


Figura 5.4: Evolución temporal de los factores de emisión de CO₂ para vehículos livianos de pasajeros en la Unión Europea. Adaptado de [40].

Según se aprecia en la Figura 5.4, se ha cumplido la meta fijada para el año 2015.

En cuanto a los vehículos livianos a gas oil, el pasaje de la norma EURO 5 a la norma EURO 6 implica la incorporación de límites de emisión de NO_x significativamente más estrictos (de 0.18 g/km a 0.08 g/km). Este hecho repercute significativamente en cuanto a las tecnologías de control de emisiones necesarias ya que los vehículos livianos a gas oil deberán incorporar algún sistema de tratamiento de las emisiones de NO_x para poder cumplir con la nueva norma.

Chile

En el año 1991, los niveles de contaminación atmosférica alcanzados en la Región Metropolitana de Santiago de Chile obligaron a la toma de medidas drásticas de carácter permanente por parte del gobierno de dicho País [3].

Las emisiones vehiculares tienen un rol protagónico en los mencionados niveles de contaminación atmosférica ya que, en el año 1991, el 79 % de las emisiones de CO, el 59 % de las de NO_x, el 44 % de las emisiones de COV_s y el 5 % de las de MP₁₀ ya provenían de los automóviles a gasolina y que el 71 % de la concentración ambiental de MP₁₀ resultaba atribuible a la emisión proveniente de los vehículos a gas oil. Lo anterior tiene como consecuencia la superación de los estándares de calidad de aire de MP₁₀ y CO durante los meses de otoño e invierno y de O₃ durante los meses de primavera y verano en forma reiterada. En la [Tabla 5.1](#) y en la [Tabla 5.2](#) se muestran los estándares de emisiones vehiculares vigentes en Chile para vehículos livianos a gasolina y a gas oil respectivamente.

Tabla 5.1: Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gasolina★. Adaptado de [3].

Tipo de vehículo	CO (g/km)	HC (g/km)	HCNM (g/km)*	NO _x (g/km)
Vehículos livianos de pasajeros (MI)	1.00	0.10	0.068	0.060
Vehículos comerciales livianos (N1 I)	1.00	0.10	0.068	0.060
Vehículos comerciales livianos (N1 II)	1.81	0.13	0.090	0.075
Vehículos comerciales livianos (N1 III)	2.27	0.16	0.108	0.082

★ Estos estándares de emisión se corresponden con la normativa europea. En Chile, el fabricante, armador, importador o sus representantes del vehículo podrán optar por verificar la normativa de emisiones de la Unión Europea o de Estados Unidos. * Hidrocarburos No Metánicos (HCNM).

Tabla 5.2: Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gas oil*. Adaptado de [3].

Tipo de vehículo	CO (g/km)	NO _x (g/km)	HC +NO _x (g/km)	MP (g/km)
Vehículos livianos de pasajeros (MI)	0.50	0.18	0.23	0.005
Vehículos comerciales livianos (N1 I)	0.50	0.18	0.23	0.005
Vehículos comerciales livianos (N1 II)	0.63	0.235	0.295	0.005
Vehículos comerciales livianos (N1 III)	0.74	0.28	0.35	0.005

* Estos estándares de emisión se corresponden con la normativa europea. En Chile, el fabricante, armador, importador o sus representantes del vehículo podrán optar por verificar la normativa de emisiones de la Unión Europea o de Estados Unidos.

Más allá del cumplimiento de los estándares de emisión anteriormente listados al momento de su entrada en funcionamiento, los vehículos livianos deberán someterse a una inspección técnica vehicular anual en la cual serán evaluadas sus emisiones atmosféricas debiendo cumplir con los estándares presentados en la [Tabla 5.3](#) y en la [Tabla 5.4](#) para vehículos a gasolina y a gas oil respectivamente.

Tabla 5.3: Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gasolina al momento de la inspección técnica vehicular. Estas disposiciones se aplican fuera de la Región Metropolitana de Santiago. Adaptado de [3].

Revoluciones Por Minuto (RPM) del motor	CO (% vol)	HC (ppm)	CO + CO ₂ (% vol)
350 - 1100 (ralentí)	0.5	100	mayor o igual a 6
2200 - 2800	0.5	100	mayor o igual a 6

Tabla 5.4: Estándares de emisiones vehiculares de escape de Chile para vehículos livianos a gas oil al momento de la inspección técnica vehicular. Adaptado de [3].

RPM del motor	Opacidad
350 - 1100 (ralentí)	0
2200 - 2800	0

Argentina

En Argentina se asume que más del 50% de la contaminación generada en los centros altamente urbanizados proviene de los vehículos con motores de combustión interna [1].

En la Resolución 1464 del año 2014 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable [2] se decidió prorrogar la vigencia de los certificados de emisiones gaseosas, otorgados con anterioridad a la publicación de la citada Resolución, que cumplan con los límites de emisiones gaseosas EURO III y EURO IV para motores pesados, los que tendrán vencimiento el 31 de diciembre de 2015 y el 31 de diciembre de 2017, respectivamente. Luego de las fechas de vencimiento estipuladas, los vehículos pesados deberán verificar la norma europea EURO V.

A su vez, dicha Resolución informa que los certificados previamente emitidos para vehículos livianos conforme los límites de emisiones gaseosas EURO 4 tendrán validez hasta el 31 de diciembre de 2017, con excepción de los vehículos livianos M1, para los cuales los citados certificados tendrán validez hasta el 31 de diciembre de 2016, salvo aquellos cuya motorización se halle integrada con vehículos livianos N1, que tendrán validez hasta el 31 de diciembre de 2017. Luego de las fechas de vencimiento estipuladas, los vehículos livianos deberán verificar la norma europea EURO 5.

5.2.2. Normativa nacional

En Uruguay, la protección de la calidad del aire fue declarada de interés general en la Ley N° 17.283 del 28 de noviembre del año 2000 [5]. Específicamente, en lo que refiere a las emisiones vehiculares, existe actualmente una propuesta de estándares nacionales [9]¹. Dicha propuesta de normativa establece lo siguiente:

- **Vehículos nuevos:** Mientras no exista en el mercado combustible gasolina con 30 ppm o menos de azufre o gas oil con 50 ppm o menos de azufre, todos los vehículos que entren al mercado, ya sea por importación o fabricados en el País, deben cumplir con la norma europea EURO 2 o EURO II (vehículos livianos y pesados respectivamente) para emisiones gaseosas. A partir de la fecha en que se comercialicen combustibles gasolina con no más de 30 ppm de azufre y gas oil con no más de 50 ppm de azufre deben cumplir con la norma europea EURO 4 o EURO IV (vehículos livianos y pesados respectivamente) para emisiones gaseosas.
- **Vehículos en circulación:** Para los vehículos en circulación se implementará un plan de mediciones obligatorias sin sanciones asociadas, que permitirá definir, en un plazo no mayor a tres años, estándares adecuados a nuestro País.

A la fecha se encuentran disponibles en el País combustibles gasolina con 30 ppm de azufre y gas oil con 50 ppm de azufre, por lo tanto, según la propuesta de estándares nacionales de emisiones vehiculares, los vehículos nuevos deben cumplir con la norma europea EURO 4 o EURO IV (vehículos livianos y pesados respectivamente) para emisiones gaseosas. En la [Tabla 5.5](#) se presentan los estándares de emisiones contenidos en la citada norma europea.

¹La primera versión de esta propuesta data del año 2001. Luego de varias revisiones, actualmente se cuenta con la citada propuesta, del año 2012.

Tabla 5.5: Norma europea EURO 4 y EURO IV. Adaptado de [9].

Tipo de combustible	Categoría de vehículo	CO	HC + NO _x	NO _x	MP	HC	Humo
Gas oil	MI	0.50 g/km	0.30 g/km	0.25 g/km	0.025 g/km	-	-
	N1 I	0.50 g/km	0.30 g/km	0.25 g/km	0.025 g/km	-	-
	N1 II	0.63 g/km	0.39 g/km	0.33 g/km	0.04 g/km	-	-
	N1 III	0.95 g/km	0.86 g/km	0.78 g/km	0.10 g/km	-	-
	N2 y N3	1.5 g/kWh	-	3.5 g/kWh	0.02 g/kWh	0.46 g/kWh	0.5 m ⁻¹
Gasolina	MI	1.0 g/km	-	0.08 g/km	-	0.10 g/km	-
	N1 I	1.0 g/km	-	0.08 g/km	-	0.10 g/km	-
	N1 II	1.81 g/km	-	0.10 g/km	-	0.13 g/km	-
	N1 III	2.27 g/km	-	0.11 g/km	-	0.16 g/km	-

Para la correcta interpretación de la [Tabla 5.5](#), a continuación se definen las categorías de vehículo consideradas [18]:

- MI: Vehículo automotor que tiene por lo menos cuatro ruedas o que tiene tres ruedas cuando el peso máximo excede una tonelada métrica y es utilizado para el transporte de pasajeros no pudiendo contener más de ocho asientos además del asiento del conductor. El peso máximo cargado de este tipo de vehículos es 3500 kg.
- N1 I: Vehículo automotor que tenga por lo menos cuatro ruedas o que tenga tres ruedas cuando el peso máximo excede una tonelada métrica y es utilizado para transporte de carga. El peso máximo de este tipo de vehículos es 1305 kg.
- N1 II: Vehículo automotor que tenga por lo menos cuatro ruedas o que tenga tres ruedas cuando el peso máximo excede una tonelada métrica y es utilizado para transporte de carga. El peso máximo de este tipo de vehículos está comprendido entre 1305 kg y 1760 kg.
- N1 III: Vehículo automotor que tenga por lo menos cuatro ruedas o que tenga tres ruedas cuando el peso máximo excede una tonelada métrica y es utilizado para transporte de carga. El peso máximo de este tipo de vehículos está comprendido entre 1760 kg y 3500 kg.
- N2: Vehículos utilizados para transporte de carga con un peso máximo superior a 3500 kg pero menor o igual a 12000 kg.
- N3: Vehículos utilizados para transporte de carga con un peso máximo superior a 12000 kg.

Además de lo anteriormente expuesto, el Decreto 111/008 del 25 de febrero de 2008 [4] menciona que a partir del 1º de julio de 2008 la Dirección Nacional de Transporte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, no expedirá certificados de Necesidad de Importación ni registrará y habilitará vehículos pe-

sados del tipo “0 km.” autopropulsados con motores de ciclo Diesel, destinados al transporte de pasajeros y cargas, si las emisiones de gases y partículas contaminantes y la opacidad de los humos procedentes de sus motores, no cumplen con los valores límite establecidos en la norma EURO III de la Unión Europea o en la norma EPA 98 de Estados Unidos.

Dicho Decreto se aplica a cualquier vehículo de las categorías M2⁽¹⁾, M3⁽²⁾, N2 y N3 excepto a los vehículos de la categoría M2 de hasta dieciocho pasajeros y de la categoría N2 de hasta cinco toneladas de peso bruto total.

¹Vehículos para transporte de pasajeros con más de ocho asientos además del asiento del conductor y que no excedan el peso máximo de 5 toneladas métricas [18].

²Vehículos para transporte de pasajeros con más de ocho asientos además del asiento del conductor y que tengan un peso máximo mayor a las 5 toneladas métricas [18].

5.3. Antecedentes nacionales

5.3.1. Parque vehicular nacional

Según [33], la cantidad de hogares con un automóvil aumentó de 29 % en el año 2005 a 39 % en el año 2013. De todas maneras, el porcentaje de hogares con automóviles depende del nivel socioeconómico de sus habitantes, tal cual se ilustra en la [Tabla 5.6](#).

Tabla 5.6: Porcentaje de hogares con automóviles según nivel socioeconómico. Adaptado de [33].

Nivel socioeconómico	Porcentaje de hogares con automóviles (%)
Alto Superior	100
Alto Inferior	80
Medio Superior	52
Medio	30
Medio Inferior	16
Bajo Superior	10
Bajo Inferior	-

En concordancia con lo anterior, se destaca que la venta de automotores cero kilómetro ha tenido un fuerte incremento en los últimos catorce años. Sin embargo, a partir del año 2013 se han registrado caídas en las ventas tal cual se ilustra en la [Figura 5.5](#) (caída de 11 % en las ventas entre 2014 y 2015). De todas maneras, la venta de vehículos con cilindradas menores o iguales a 1000 cm³ aumentó un 55.3 % entre 2014 y 2015.



Figura 5.5: Evolución temporal de las ventas anuales de automotores cero kilómetro. Adaptado de [33].

Al 31 de diciembre de 2015, habían registrados en todo el territorio nacional

67378 camiones de acuerdo a información del Sistema Único de Cobro de Ingresos Vehiculares (SUCIVE) [33]. En la **Figura 5.6** se muestra la distribución por antigüedad de la flota nacional de camiones.

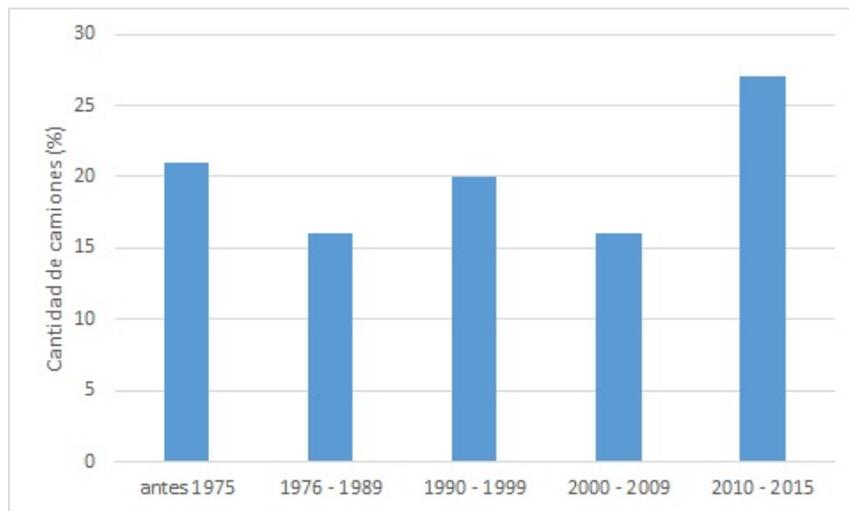


Figura 5.6: Distribución de la flota nacional de camiones por antigüedad. Adaptado de [33].

En la **Figura 5.6** se observa que sólo el 43 % de la flota tiene antigüedades menores a 17 años (año 2000 en adelante).

Según datos de Sucive [33], en el País hay 943460 automóviles particulares registrados ¹. Del total de automóviles particulares registrados, el 10.5 % es de 1975 o más antiguo mientras que sólo el 47 % es del año 2000 en adelante.

La flota nacional de motos, ciclomotores, motonetas, triciclos y cuadríciclos asciende a 1176007 unidades mientras que la flota de remolques, zorras, casas rodantes sin propulsión propia y maquinaria industrial-agrícola cuenta con 67840 unidades [33].

La inmensa mayoría de los vehículos de pasajeros comercializados en el País utilizan gasolina como combustible. La evolución histórica de las ventas de vehículos según el tipo de combustible utilizado se ilustra en la **Figura 5.7**.

¹Categoría A de Sucive: autos, camionetas, ambulancias, casas rodantes con propulsión propia, carrozas fúnebres, furgones, ómnibus y micros.

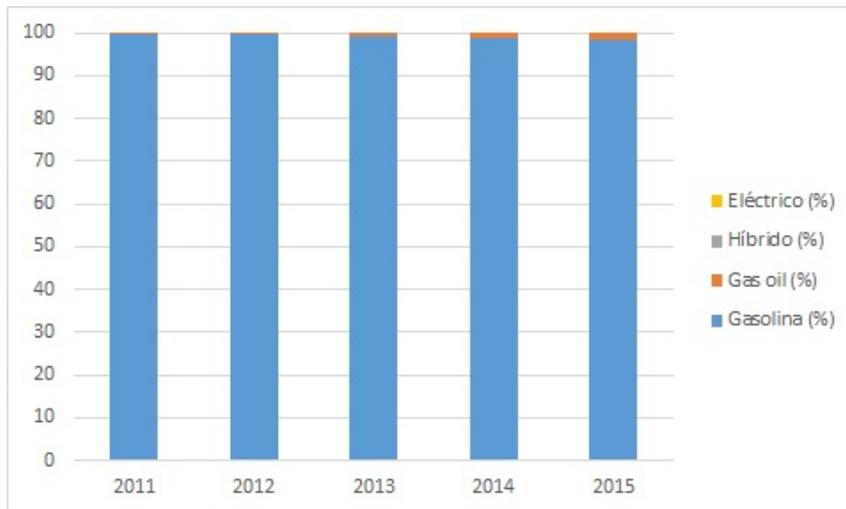


Figura 5.7: Evolución histórica de las ventas de vehículos de pasajeros por tipo de combustible. Adaptado de [33].

Con el objetivo de analizar en detalle la composición del parque automotor de Montevideo, se definen las siguientes categorías de vehículos¹:

- Categoría A: autos, camionetas, incluidos los vehículos sin chofer o de alquiler, ambulancias, casas rodantes con propulsión propia, carrozas fúnebres, furgones, ómnibus y micros.
- Categoría B: camiones.
- Categoría C: motos, ciclomotores, motonetas, triciclos, cuadríciclos, etc..
- Categoría E: zorras, remolques, casas rodantes sin propulsión propia e industrial-agrícola.

El parque automotor montevideano, a diciembre de 2015, cuenta con 533885 vehículos. En la **Figura 5.8** se muestra la distribución de dicho parque por categoría.

¹Sitio web de Sucive: <https://www.sucive.gub.uy/>

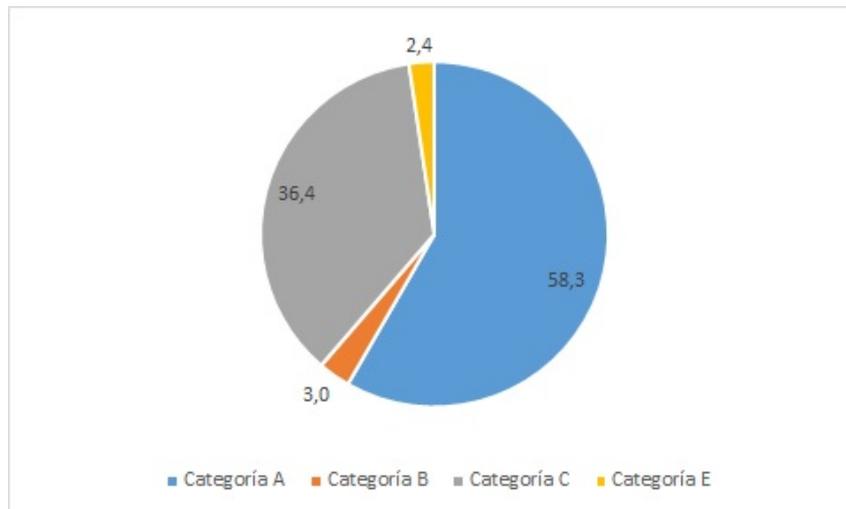


Figura 5.8: Distribución del parque automotor montevideano a diciembre de 2015 por categoría. Adaptado de (Sitio web de Sucive: <https://www.sucive.gub.uy/>).

Un aspecto importante a considerar, dentro de la flota vehicular montevideana, es la antigüedad de la misma. En la **Figura 5.9** se muestra la distribución de antigüedades de la flota montevideana para su categoría vehicular mayoritaria (Categoría A).

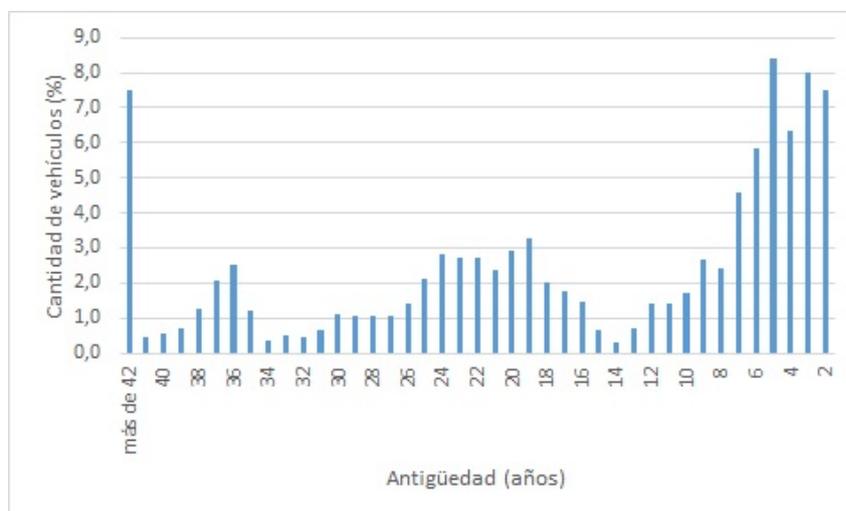


Figura 5.9: Distribución de antigüedades de la flota vehicular montevideana (Categoría A). Adaptado de (Sitio web de Sucive: <https://www.sucive.gub.uy/>).

En la **Figura 5.9** se observa que un 7.5% de los vehículos montevideanos Categoría A tiene más de 42 años de antigüedad mientras que un 45.7% de los mismos tiene menos de 10 años de antigüedad.

Según el Balance Energético Nacional (BEN) 2013, el consumo del sector transporte representó un 30 % del consumo energético global del País, siendo el segundo en importancia relativa luego del sector industrial [58]. El subsector con mayor incidencia es el carretero (99 %). El rendimiento medio de los vehículos livianos a gasolina es 13.2 km/L mientras que el rendimiento promedio de los vehículos livianos a gas oil resulta ser 13.8 km/L. En la **Tabla 5.7** se detallan los rendimientos medios de los distintos tipos de vehículos livianos en función del tipo de recorrido.

Tabla 5.7: Rendimiento medio de los vehículos livianos nacionales en función del tipo de recorrido. Adaptado de [58].

Tipo de vehículo	General (km/L)	Carretero (km/L)	Ciudad (km/L)
Auto	gasolina: 13.6; gas oil: 15.7	gasolina: 15.1; gas oil: 17.1	gasolina: 12.5; gas oil: 14.2
Camioneta	gasolina: 11.9; gas oil: 12.2	gasolina: 13.0; gas oil: 13.3	gasolina: 11.0; gas oil: 11.3
Promedio	gasolina: 13.2; gas oil: 13.8	gasolina: 14.6; gas oil: 15.0	gasolina: 12.2; gas oil: 12.7

En la **Tabla 5.7** se observa que, tal como es esperable, los rendimientos aumentan para recorridos en carretera con respecto al promedio mientras que disminuyen para los recorridos urbanos en función del rendimiento medio.

Según [58], el rendimiento medio estimado del parque nacional de motos es 31.9 km/L. Por otra parte, para los vehículos pesados de carga se estimaron rendimientos medios en carretera y ciudad iguales a 6.6 km/L y 6.3 km/L respectivamente. Del mismo modo, para vehículos pesados de transporte de pasajeros se estimó en 4.1 km/L el rendimiento medio en carretera y en 5.0 km/L el rendimiento medio en ciudad.

A partir de los rendimientos medios calculados en [58], en la misma referencia se estimaron consumos medios de combustible por vehículo. Dichos consumos se listan a continuación:

- Vehículos livianos a gasolina: 24 L/semana.
- Vehículos livianos a gas oil: 30 L/semana.
- Vehículos pesados a gas oil: 254 L/semana.
- Motos a gasolina: 5 L/semana.

Dentro de las actividades previstas en el marco del Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015-2024 [59] se encuentra el establecimiento de un programa de etiquetado vehicular. Dicho programa prevé realizar la difusión del

rendimiento de combustible de los vehículos livianos como forma de incentivar la compra de vehículos de alto rendimiento. Además, está previsto analizar el efecto de dicho programa a través de la evaluación de las tendencias del mercado automotriz.

5.3.2. Plan de Movilidad de Montevideo

El Plan de Movilidad de Montevideo, desarrollado por la Intendencia de Montevideo (IM), es un proyecto de largo plazo que incluye transformaciones profundas en el sistema de transporte público, en el sistema de transporte de cargas y mercancías y también en el desarrollo logístico de la ciudad orientado a un mejor desarrollo económico, productivo y comercial, que implica una mejor conectividad entre el puerto, el aeropuerto y las rutas viales y ferroviarias nacionales [24].

En el marco de dicho Plan se destaca que

“la movilidad urbana debe pensarse en términos de equidad social y de sustentabilidad ambiental, por tanto las inversiones en infraestructura deben estar orientadas a priorizar un sistema de transporte público de calidad y no uno basado en el vehículo individual”.

El servicio de transporte público colectivo de pasajeros en Montevideo es prestado por empresas privadas, las cuales cuentan con una flota de 1528 vehículos en funcionamiento cuyos pasajeros realizan 900000 viajes por día [25]. Con respecto al año 2009, las ventas de boletos de transporte público han experimentado un descenso del 2.4 % al año 2014 [25]. Sin embargo, en función de las posibilidades actuales de realizar varios viajes con un solo boleto, la cantidad de viajes, por boleto vendido, se ha incrementado de 1.01 viajes/boleto en 1990 a 1.27 viajes/boleto en 2015.

La velocidad promedio en los corredores de transporte público es de 16 km/h, pero en el centro de la ciudad la velocidad se reduce a 6 km/h a 8 km/h [24]. El Plan de Movilidad de Montevideo incluye la creación del Sistema de Transporte Metropolitano (STM). Dicho sistema adoptará un modelo tronco-alimentado basado en cinco ejes radiales y uno transversal, que serán resueltos en régimen de carriles exclusivos para líneas troncales de gran capacidad, desde el centro hacia las terminales e intercambiadores de trasbordo ubicados en la periferia. Desde estos nodos partirán líneas alimentadoras que recorrerán los barrios. De forma complementaria, convivirán líneas comunes que servirán de “costura” transversal del sistema para asegurar la cobertura de toda la ciudad (Figura 5.10).

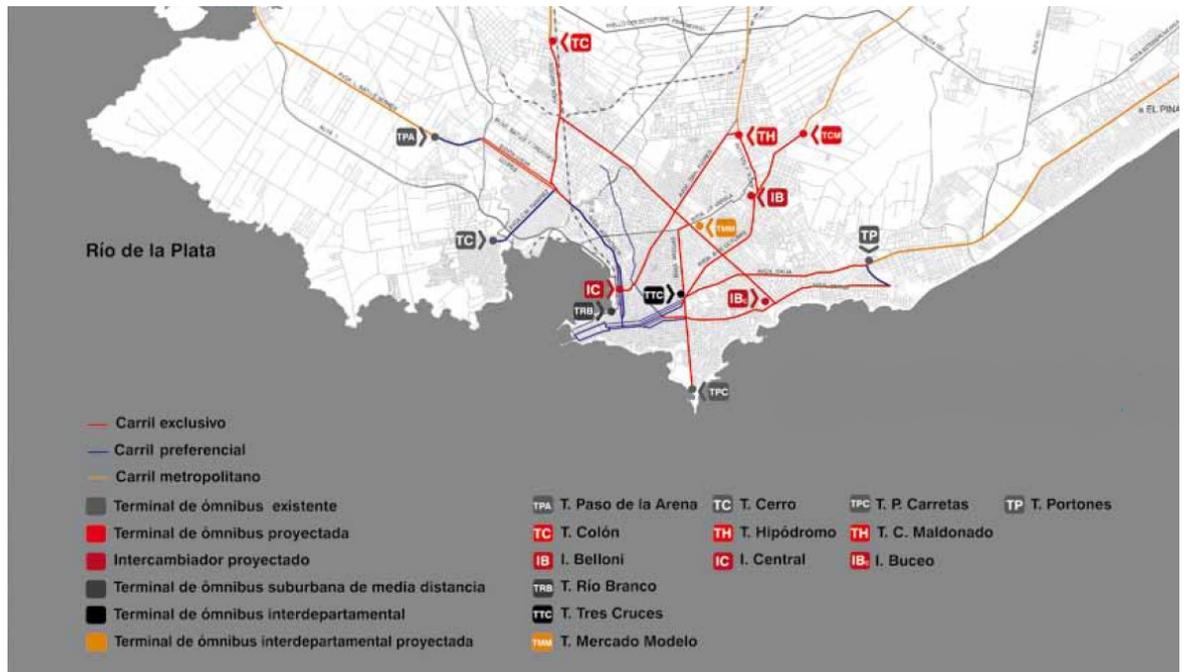


Figura 5.10: Sistema de Transporte Metropolitano (STM) [24].

Con la implementación del STM se prevé que la velocidad del servicio sea mayor o igual a 18 km/h para las líneas comunes y mayor o igual a 22 km/h para los carriles exclusivos.

En el marco del referido Plan de Movilidad se propenderá a la consolidación del uso de las bicicletas como modo sustentable de transporte y se proveerá de espacios seguros dentro de la trama vial destinados tanto a su uso exclusivo como combinado con otros modos de transporte. En un escenario futuro, se prevé que todas las ciclovías estén integradas en una red que interconectará los sectores residenciales y las centralidades existentes con los puntos de transferencia al STM (intercambiadores y terminales) y que las mismas cuenten con sitios seguros para el estacionamiento de las bicicletas. La infraestructura vial actualmente existente para el uso de la bicicleta se muestra en la [Figura 5.11](#).



Figura 5.11: Infraestructura vial existente para el uso de la bicicleta. Adaptado de (Sitio web de la Intendencia de Montevideo: <http://www.montevideo.gub.uy/mapa-montevideo-en-bici>).

El Plan de Movilidad de Montevideo establece una reglamentación que restringe la circulación indiscriminada de vehículos de carga por la trama vial del departamento. Se destaca que el Anillo Colector Vial Perimetral es la pieza fundamental de esta propuesta de ordenación del transporte de cargas en el territorio. El referido Anillo es una importante obra de infraestructura que tiende a solucionar la conectividad este-oeste. También vincula los accesos de las rutas N°1 y N°5 con las rutas N°8 y N°102 y de éstas con el puerto de Montevideo sin atravesar la malla vial.

Uno de los objetivos del mencionado Plan de Movilidad es descongestionar la ciudad del tránsito pesado a efectos de mejorar la seguridad vial, disminuir la interferencia con el resto de los modos de transporte y con las actividades propias de la ciudad, mejorar el nivel de servicio de las vías de tránsito y evitar el deterioro de la infraestructura vial. Para ello, se establecen limitaciones para la entrada del transporte de carga tanto a zonas urbanizadas como a la caminería rural, definiendo una zonificación y una red preferencial de vías. La nueva norma de zonificación divide al departamento en tres zonas (A, B y C) para las cuales se establecen limitaciones diferentes para la circulación de

vehículos de carga. Se superpone a estas zonas una red de vías preferentes para las que se admite la circulación de vehículos con cargas mayores a las de las zonas que atraviesan y por las que también se admite la circulación de ciertos vehículos de gran porte, aunque en todos los casos en carácter de excepción (Figura 5.12).

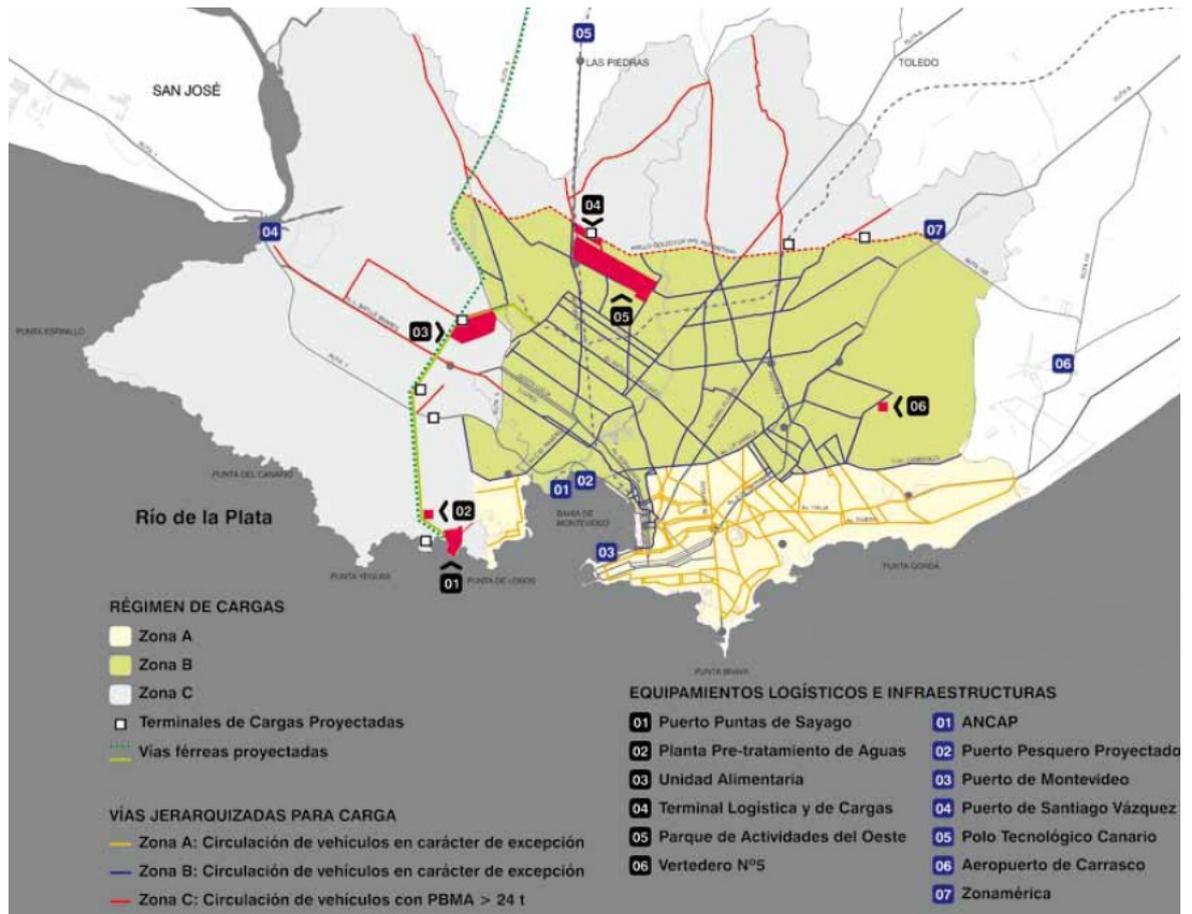


Figura 5.12: Zonificación del departamento de Montevideo de acuerdo a la circulación de vehículos de carga. Adaptado de [24].

5.3.3. Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Montevideo

La Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Montevideo está integrada por estaciones de medición de contaminantes para evaluar la calidad del aire ambiente del departamento (Red Base) y otras para evaluar el impacto de fuentes emisoras significativas en el entorno (Red Orientada a Fuentes Significativas) [26].

La Red Base en el año 2015 operó cinco estaciones distribuidas en el territorio (Tabla 5.8 y Figura 5.13). Esta red cuenta con equipos de tipo integrador con exposición continua de 24 horas cada seis días y equipos automáticos, que registran niveles en aire de contaminantes en forma horaria. Las estaciones que conforman la Red Base están ubicadas en Ciudad Vieja, Tres Cruces, Curva de Maroñas, Portones de Carrasco y Colón.

La Red Orientada a Fuentes Significativas se incorporó en el año 2009 y consta de cuatro estaciones automáticas destinadas a evaluar el impacto en el entorno de las centrales termoeléctricas Batlle y La Tablada, y de la refinería de La Teja (Tabla 5.9 y Figura 5.13). Tres de estas estaciones pertenecen a la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) y una a la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP).

Tabla 5.8: Red Base de monitoreo. Adaptado de [26].

Estación	Altura sobre la calzada (m)	PTS [†]	MP ₁₀	MP _{2.5}	Tren de monitoreo [★]
Ciudad Vieja*	9; 3	-	-	X	X
Tres Cruces	8	-	X	-	X
Curva de Maroñas	5	-	X	-	X
Portones de Carrasco	10	-	X	-	X
Colón	3	X	-	-	-

[†] Partículas Totales en Suspensión (hasta 100 μm de diámetro aerodinámico) (PTS). [★] Utilizado para la determinación de humo negro y SO₂. * Esta estación se ubica físicamente en dos lugares diferentes.

Tabla 5.9: Red Orientada a Fuentes Significativas. Adaptado de [26].

Estación	Altura sobre la calzada (m)	MP ₁₀	MP _{2.5}	CO	NO ₂	SO ₂	TRS [†]	Meteorológicos
La Teja	2.5	-	X	X	X	X	X	X
Palacio Legislativo	2.5	X	-	X	X	X	-	-
Bella Vista	2.5	X	-	X	X	X	-	X
La Tablada	-	X	-	X	X	X	-	X

[†] Compuestos de Azufre Reducido (TRS).

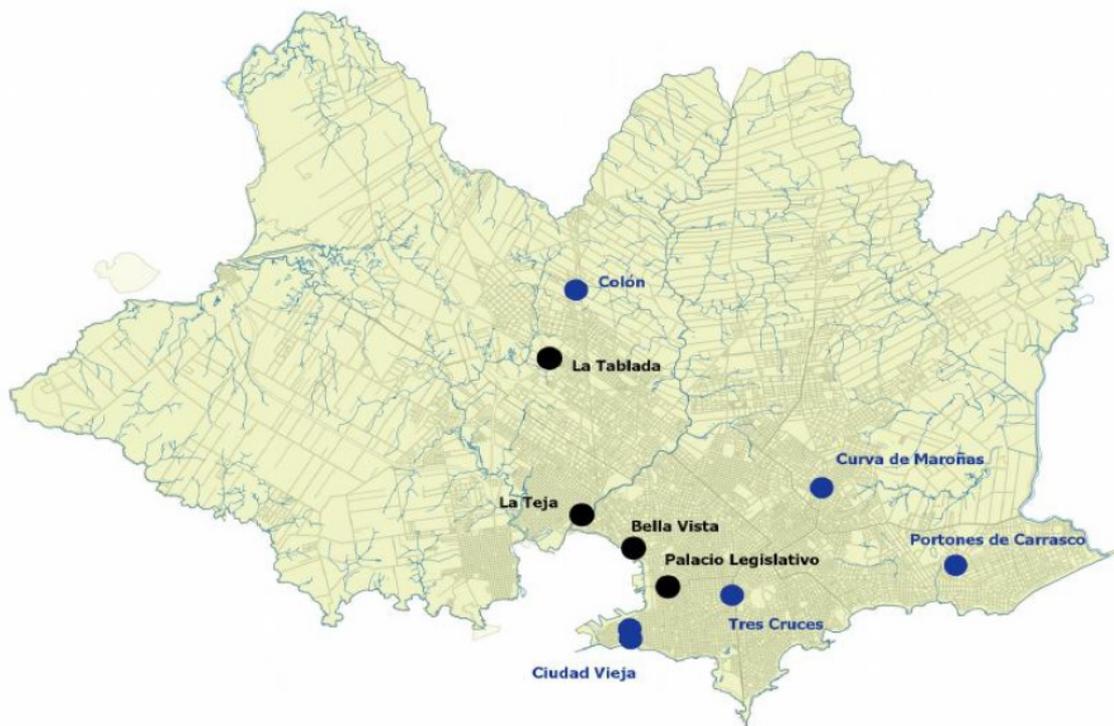


Figura 5.13: Red Base de monitoreo (azul) y Red Orientada a Fuentes Significativas (negro). Adaptado de [26].

Desde el año 2007 se emplea el Índice de Calidad de Aire para la comunicación de los resultados de los diversos parámetros determinados a partir de la Red de Monitoreo. El Índice de Calidad de Aire (ICAire) se calcula a partir de valores medidos de concentración.

Dicho índice transforma las concentraciones de los diferentes contaminantes a una escala arbitraria de 0 a 400, similar para todos, distribuida en seis categorías (Tabla 5.10). La categoría de cada estación de monitoreo se define a partir del ICAire de cada uno de los parámetros monitoreados, estableciéndose la categoría de la estación igual al mayor valor calculado para los contaminantes medidos.

Tabla 5.10: Índice de Calidad de Aire. Adaptado de [26].

Categorías de ICAire	Valor ICAire	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [†]	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [†]	MP _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [†]	Humo negro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [†]	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [†]	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [★]	CO (mg/m ³) [*]	TRS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [†]
Muy buena	Hasta 25	60	50	25	50	20	40	4.5	2.5
Buena	26 a 50	100	75	32	75	50	75	7	5.0
Aceptable	51 a 100	150	100	50	100	125	200	10	10
Inadecuada	101 a 200	375	150	75	150	365	500	15	20
Mala	201 a 300	563	225	100	225	550	1130	22	30
Muy mala	301 a 400	845	340	200	340	825	2260	33	40

[†] Promedio de 24 horas de monitoreo. [★] Máximo horario en 24 horas de monitoreo. ^{*} Máximo de promedio de 8 horas en 24 horas de monitoreo.

A modo ilustrativo, en la **Tabla 5.11** se muestran los valores del ICAire obtenidos en el año 2015 para la estación Palacio Legislativo.

Tabla 5.11: Valores del ICAire correspondientes al año 2015 obtenidos en la estación Palacio Legislativo. Adaptado de [26].

Parámetro	Muestras esperadas	Sin dato	ICAire muy buena (días)	ICAire buena (días)	ICAire aceptable (días)	ICAire inadecuada (días)	ICAire mala (días)	ICAire muy mala (días)
CO	367	19	345	3	0	0	0	0
NO ₂	367	11	326	29	1	0	0	0
SO ₂ *	367	7	356	3	0	0	0	0
MP ₁₀	367	6	351	7	2	1	0	0

* Falta un dato.

A continuación se resumen los principales resultados obtenidos por la Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Montevideo para el año 2015:

- Red Base: El único parámetro que registró categoría inadecuada fue MP_{2,5} en la estación Ciudad Vieja (durante 3 días). Además, se destaca que las muestras no determinadas por problemas operativos ascendieron al 4 % del total.
- Red Orientada a Fuentes Significativas: Los resultados obtenidos para CO y SO₂ se asocian a una calidad de aire muy buena. Además, el 96 % de las muestras registradas para SO₂ se correspondieron con una calidad de aire muy buena. El NO₂ registró valores de calidad de aire aceptables, buenos y muy buenos. Los compuestos de azufre reducido superaron el valor 100 del ICAire en el 1.6 % de los días monitoreados. Por último, se destaca que el mayor porcentaje de excedencias se observó con relación al material particulado (el 6 % de las muestras de MP_{2,5} y el 0.7 % de las muestras de MP₁₀ superaron el valor 100 del ICAire).

5.3.4. Inventario de Emisiones Atmosféricas 2006

El Inventario de Emisiones Atmosféricas 2006, presentado en el año 2010, es el primero de estas características que se realiza en Uruguay. Su propósito principal era establecer una línea de base cuantitativa a partir de la cual se pueda conocer y jerarquizar los principales conflictos de uso, contaminantes, áreas y actividades críticas, etc. [23].

Los contaminantes atmosféricos considerados en el citado inventario fueron:

- CO
- SO₂
- NO_x
- PTS
- MP₁₀
- Compuestos Orgánicos Totales (COT)
- COV_s
- Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (COVNM)

El cálculo de las emisiones atmosféricas que se incluyen en el mencionado inventario se realizó utilizando el método de factores de emisión. En el caso particular de las emisiones vehiculares, los factores de emisión considerados se correspondieron con los utilizados en Europa para los países pertenecientes a los grupos CC4, BC y NIS (Rusia, Ucrania, Kazajstán, Bielorrusia, Uzbekistán, Kirgizstán, Moldava, Armenia, Azerbaiján, Georgia, Rumania, Bulgaria, Croacia y Turquía, entre otros).

Para estimar las emisiones correspondientes al sector transporte, se parte de la información para el año 2006 proporcionada por el Ministerio de Industria y Energía. En ella se incluyen los consumos anuales para cada categoría de vehículos, expresados en Toneladas Equivalentes de Petróleo (Tep). A partir de estos valores, y considerando los poderes caloríficos de la gasolina y del gas oil, se obtuvo el volumen anual consumido en m³ de cada combustible. Asimismo, se tuvieron en cuenta las emisiones fugitivas de los vehículos a gasolina. Por último, las emisiones se calcularon aplicando los factores de emisión antes citados a los consumos de combustible estimados.

A continuación se destacan algunos de los resultados obtenidos mediante la realización del mencionado inventario relativos a las emisiones vehiculares na-

cionales:

- El sector transporte es responsable del 59.8% (20114 Ton/año) de los óxidos de nitrógeno que se emiten a nivel nacional (33631 Ton/año) (Figura 5.14).
- Los sectores residencial y transporte generan en conjunto más del 89% del CO total emitido en el país (Figura 5.15).
- En lo referente a partículas y COV_s, los aportes del sector transporte no llegan al 10% del total nacional.

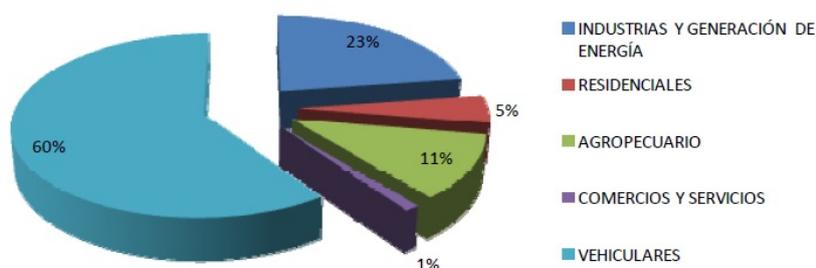


Figura 5.14: Emisiones nacionales de NO_x por tipo de fuente. Adaptado de [23].

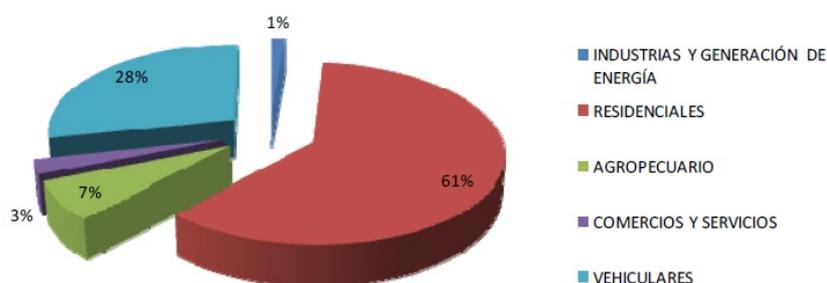


Figura 5.15: Emisiones nacionales de CO por tipo de fuente. Adaptado de [23].

De lo anterior se desprende que el sector transporte es el principal emisor de NO_x y el segundo de CO.

En todos los casos a excepción de MP₁₀ y COV_s, las principales emisiones se registran en Montevideo, y son siempre de por lo menos el 19% de cada

contaminante analizado.

Dentro de las emisiones nacionales vehiculares, los principales emisores de NO_x son los camiones y tractores para transporte carretero de cargas, seguidos de los autos y camionetas a gasolina (Figura 5.16). Por otra parte, los principales emisores de CO son los autos y camionetas a gasolina (Figura 5.17).

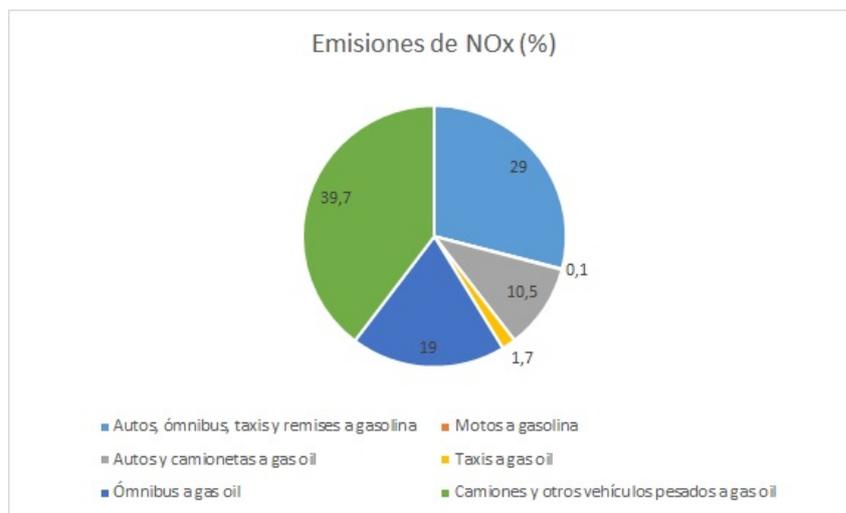


Figura 5.16: Emisiones vehiculares de NO_x por tipo de vehículo. Adaptado de [23].

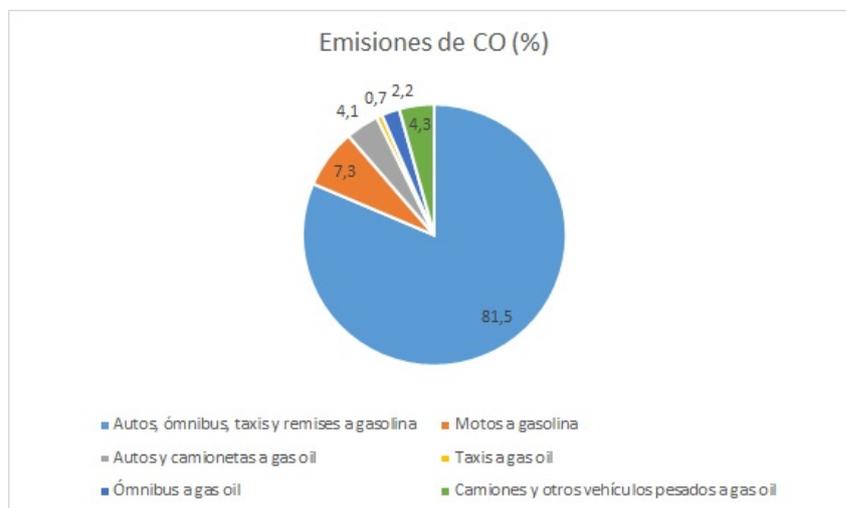


Figura 5.17: Emisiones vehiculares de CO por tipo de vehículo. Adaptado de [23].

A modo de trabajo futuro, en [23] se plantea como necesario el control de emisiones vehiculares en todo el País, especialmente a nivel de vehículos livianos. Además, se señala como necesario modificar el control que actualmente se

realiza a vehículos interdepartamentales en la planta de la Sociedad Uruguaya de Control Técnico de Automotores (SUCTA), de modo de cuantificar las emisiones de los diferentes contaminantes criterio y no sólo la opacidad de las mismas, asignando plazos breves para realizar un segundo control cuando se presente algún nivel de no conformidad ya que se considera que el uso y estado de mantenimiento de los vehículos tiene una incidencia muy importante en las emisiones de los mismos. Por último se señala que los vehículos nuevos deben ser aprobados por alguna autoridad competente antes de su ingreso al País, de modo de asegurar que sus niveles de emisión sean compatibles con los objetivos nacionales de calidad ambiental.

Capítulo 6

Metodología de trabajo

6.1. Introducción

En el presente capítulo se describe la metodología de trabajo que se ha seguido en el abordaje del caso de aplicación de esta tesis. Dicho caso de aplicación está conformado por los siguientes capítulos:

- Caracterización de emisiones de vehículos livianos en circulación.
- Caracterización de emisiones de vehículos pesados en circulación.
- Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares.

6.2. Caracterización de emisiones de vehículos livianos en circulación

En el marco del presente capítulo del caso de aplicación se realizó un muestreo de emisiones vehiculares en movimiento en la ciudad de Montevideo entre noviembre de 2014 y abril de 2016. En total, se registraron once vehículos pertenecientes a la flota vehicular nacional cubriendo un rango de antigüedades de entre 3 y 19 años.

A modo de adelanto, en la [Figura 6.1](#) se muestra el recorrido efectuado durante las mediciones realizadas el 08/03/2016 y en la [Tabla 6.1](#) se presenta la información recabada durante los muestreos.



Figura 6.1: Recorrido realizado durante el registro de emisiones vehiculares en movimiento, 08/03/2016. Elaboración propia a partir de Google Earth.

Tabla 6.1: Parámetros registrados durante el muestreo.

Parámetro	Unidad de medida
Emisiones de NO	ppm
Emisiones de CO ₂	Porcentaje en vol
Emisiones de CO	Porcentaje en vol
Emisiones de HC	ppm
Longitud	°
Latitud	°
Velocidad	km/h
Altitud	m
Carga del motor	Porcentaje
Velocidad de giro del motor	rpm
Rendimiento	km/L
Distancia acumulada	km

A partir del muestreo realizado se desarrollan factores de emisión de CO, CO₂ y NO para vehículos livianos en circulación. Además, para los factores de emisión de CO y NO calculados, se ajustan distribuciones de probabilidad y, a partir de las mismas, se calculan intervalos de confianza de los factores de emisión medios con un nivel de confianza del 95%. Por último, un análisis estadístico de los datos permite vincular las emisiones atmosféricas de los vehículos con otros parámetros de los mismos (rendimiento, velocidad, entre otros).

6.3. Caracterización de emisiones de vehículos pesados en circulación

Al igual que en el capítulo descripto anteriormente, para la flota de vehículos pesados analizada (camiones y ómnibus interdepartamentales) también se desarrollaron factores de emisión (en este caso de NO y CO₂ debido a que las mediciones de CO y HC presentaron, en general, valores anómalos). Asimismo, en este capítulo también se procedió al ajuste de distribuciones de probabilidad a los factores de emisión calculados a partir de las cuales se estimaron intervalos de confianza, al 95 %, para los factores de emisión medios. Por último, se utilizaron las mismas herramientas estadísticas que en el capítulo anterior para evaluar el vínculo entre los factores de emisión y otras características de los vehículos relevados (en este caso antigüedad y potencia).

La diferencia sustancial entre el trabajo con vehículos pesados y livianos radica en la metodología de medición. Mientras que para la flota de vehículos livianos analizada, las mediciones fueron registradas en movimiento, en el caso de los vehículos pesados dichas mediciones se efectuaron en ralentí (con excepción de cuatro vehículos que fueron ensayados en movimiento).

Más allá que la cantidad de registros por vehículo fue mucho mayor para los livianos que para los pesados, como contrapartida, la muestra de vehículos pesados contó con muchas más unidades: 123 camiones, 22 ómnibus y 5 minivans.

En el marco del presente capítulo, el muestreo de emisiones vehiculares se realizó en un único lugar físico: planta fija de SUCTA¹. En la [Figura 6.2](#) se muestran fotografías de algunas de las unidades ensayadas en ralentí mientras que en la [Figura 6.3](#) se muestra una de las unidades ensayada en movimiento.

¹A menos de los cuatro registros de emisiones en movimiento sobre camiones. En estos casos, las mediciones se realizaron durante pequeños recorridos efectuados en las inmediaciones de la mencionada planta.



(a) Ómnibus.

(b) Camión.

Figura 6.2: Vehículos pesados ensayados en ralentí.



Figura 6.3: Vehículo pesado ensayado en movimiento, 21/08/2015.

Tal cual se observa en la **Figura 6.2**, durante la actividad desarrollada, los conductores de los vehículos ensayados fueron encuestados de forma tal de obtener información adicional de los vehículos capaz de ser comparada luego con los factores de emisión calculados.

Por último, utilizando las mediciones de emisiones en movimiento realizadas en el presente capítulo se estimaron, a modo ilustrativo, factores de emisión para condiciones de manejo en ciudad y en ruta a partir de los factores de emisión calculados para condiciones de ralentí.

6.4. Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares

En el presente capítulo se estudia la dispersión de las emisiones vehiculares en una calle de la Ciudad Vieja de Montevideo a partir de la aplicación del modelo computacional *caffa3d.MBRi*, herramienta numérica computacional desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR. La zona de estudio se muestra en la [Figura 6.4](#).



Figura 6.4: Zona de estudio (calle Buenos Aires entre Zabala y Misiones).

En el marco del referido estudio se suponen diferentes flujos de viento en la zona (en cuanto a su dirección y velocidad) construyéndose cuatro patrones ideales de dispersión diferentes. Seguidamente, las salidas del modelo son comparadas con mediciones efectuadas en el cañón urbano bajo estudio. Finalmente, la herramienta de modelación desarrollada se utiliza para evaluar el efecto que podrían tener distintas modificaciones en la composición del flujo vehicular circulante sobre la concentración ambiental de monóxido de carbono. Esta etapa de trabajo insumió la realización de 19 corridas del citado modelo. La fecha de finalización de las mencionadas corridas se ubicó entre el 05/02/2016 y el 19/07/2016.

Capítulo 7

Caracterización de emisiones de vehículos livianos en circulación

7.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrollan factores de emisión de CO, CO₂ y NO para vehículos livianos en circulación en la ciudad de Montevideo a partir de la descripción y el análisis de un muestreo de emisiones vehiculares en movimiento realizado sobre un conjunto formado por once vehículos livianos. Además, para los factores de emisión de CO y NO calculados, se ajustan distribuciones de probabilidad y, a partir de las mismas, se calculan intervalos de confianza de los factores de emisión medios con un nivel de confianza del 95 %. Por último, mediante un análisis de clusters, las emisiones vehiculares registradas son vinculadas de forma cualitativa con otras características de operación de los vehículos.

7.2. Muestreo desarrollado

Los factores de emisión fueron desarrollados a partir de la realización de un muestreo. En dicha actividad se registraron, cada 10 segundos¹, emisiones y otras características del funcionamiento de los vehículos mientras los mismos llevaban a cabo una ruta de manejo a través de zonas céntricas del departamento de Montevideo.

La muestra utilizada se compuso de once vehículos livianos pertenecientes a personas particulares allegadas al equipo de trabajo. Las características de estos vehículos se observan en la [Tabla 7.1](#). En la [Figura 7.1](#) se muestran los recorridos efectuados durante la realización de las mediciones. Los mencionados recorridos se correspondieron con trayectos urbanos de rutina desempeñados por los dueños de los vehículos particulares participantes². Cada vehículo efectuó un único recorrido. Se realizó una medición por vehículo. Los registros instantáneos de emisiones de escape se presentan en el [Apéndice B](#), en el [Apéndice C](#), en el [Apéndice D](#), en el [Apéndice E](#), en el [Apéndice F](#), en el [Apéndice G](#), en el [Apéndice H](#), en el [Apéndice I](#), en el [Apéndice J](#), en el [Apéndice K](#) y en el [Apéndice L](#).

Tabla 7.1: Características de los vehículos utilizados durante el muestreo.

Nº de vehículo	Marca	Modelo	Año	Kilometraje (km)	Cilindrada (cm ³)	Fecha de muestreo
1	Volkswagen	Gol	2002	75022	1800	05/11/2014
2	Peugeot	308	2011	35356	1397	06/11/2014
3	Volkswagen	Gol	2007	41338	1600	29/06/2015
4	Chevrolet	Corsa	2008	80000	1800	01/07/2015
5	Chevrolet	Corsa	2006	1300000 [†]	1600	23/09/2015
6	Chevrolet	Agile	2010	129291	1389	03/10/2015
7	Volkswagen	Fox	2007	41561	1598	09/10/2015
8	Nissan	Tiida	2012	52496	1598	18/10/2015
9	Chevrolet	Celta	2010	64738	1389	25/02/2016
10	Chevrolet	Spark	2014	53576	1100	08/03/2016
11	Hyundai	Atos	1998	1719452	1000	01/04/2016

[†] Taxi.

Según [6], las marcas representadas en la muestra abarcan el 39% de las ventas de automóviles nuevos registradas en el País durante 2015.

A continuación se detallan los parámetros registrados durante las mediciones:

¹Salvo en dos casos, en donde las mediciones se tomaron cada 30 segundos.

²Se destaca que los recorridos efectuados logran representar de forma razonable condiciones típicas de la ciudad de Montevideo en cuanto a semaforización, congestionamiento, pendientes del terreno y velocidad de circulación.

- Emisiones de NO (ppm)
- Emisiones de CO₂ (%vol)
- Emisiones de CO (%vol)
- Emisiones de HC (ppm)
- Longitud (°)
- Latitud (°)
- Velocidad (km/h)
- Altitud (m)
- Carga del motor (%)
- RPM del motor (rpm)
- Rendimiento (km/L)
- Distancia acumulada (km)



Figura 7.1: Recorridos realizados durante el muestreo (cada color representa a un vehículo). Elaboración propia a partir de Google Earth.

Para la medición de emisiones gaseosas se utilizó un analizador de gases

marca KANE modelo Auto 5-2 (Figura 7.2). Según los datos brindados por el fabricante, las medidas de los gases de escape efectuadas con este equipo presentan una incertidumbre del 2%. Se destaca que las mediciones realizadas con el equipo utilizado cumplen con las recomendaciones efectuadas por la International Organization of Legal Metrology (OIML).



Figura 7.2: Equipo KANE Auto 5-2 (Sitio web del fabricante: <https://www.kane.co.uk/>).

Los demás parámetros registrados fueron medidos a partir de la utilización de un conector OBDII ^{1 2} (Figura 7.3).



Figura 7.3: Conector OBDII utilizado durante el muestreo.

¹On Board Diagnostics.

²En tres de los once muestreos realizados no fue posible utilizar el conector OBDII. En estos casos, los valores de longitud, latitud, altitud, distancia acumulada y velocidad del vehículo se registraron mediante la utilización de un GPS. Sin embargo, no fue posible registrar la carga del motor, las RPM del motor ni el rendimiento del vehículo.

7.3. Procesamiento de datos

Una vez finalizado el muestreo, los registros fueron procesados con el objetivo de determinar factores de emisión de contaminantes atmosféricos y de evaluar, de forma cualitativa, el vínculo entre las emisiones y los demás parámetros obtenidos durante el muestreo. Para el mencionado procesamiento se siguieron dos estrategias:

- Vehículos considerados por separado
- Vehículos agrupados

Al analizar cada vehículo por separado se pudieron determinar factores medios de emisión de contaminantes para cada viaje y para cada vehículo registrado.

El procesamiento conjunto de todos los vehículos permitió contar con suficientes registros de manera de poder ajustar distribuciones de probabilidad a los factores de emisión calculados y, a partir de esto, calcular intervalos de confianza para los factores de emisión medios al 95 %. Además, bajo esta estrategia de procesamiento se realizó un análisis de clusters de las mediciones. Este análisis permitió establecer vínculos cualitativos entre las emisiones gaseosas y los demás parámetros monitoreados a partir del análisis de una serie extensa de mediciones.

En los apartados siguientes se describe el procesamiento de datos efectuado bajo ambas estrategias.

7.3.1. Vehículos separados

En primer lugar, se construyen gráficos con el objetivo de visualizar la evolución de las emisiones gaseosas vehiculares a lo largo del trayecto recorrido. A modo de ejemplo, en la [Figura 7.4](#) se muestra la evolución de las emisiones de CO para el vehículo N° 3.

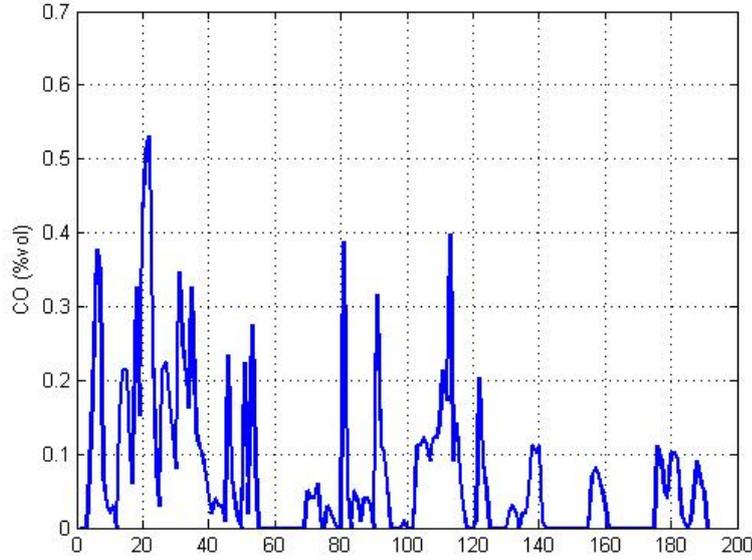


Figura 7.4: Emisiones de CO (%vol) registradas durante la medición efectuada sobre el vehículo N° 3 para cada instante de medición.

A continuación, se calcularon factores de emisión para CO y CO₂ en unidades de g/km para cada instante de medición a partir de la aplicación de la [Ecuación 7.1](#) [71] y de NO en unidades de g/km según la [Ecuación 7.2](#) [71].

$$FECO_i = \left(\frac{\rho_{comb}}{Rend} \right) * \left(\frac{\left(\frac{ECO_i}{100} \right) * PM_{CO_i}}{PM_{comb} * \left(\frac{\left(\frac{ECO_2}{100} \right) + \left(\frac{ECO}{100} \right)}{\alpha_{comb}} \right)} \right) \quad (7.1)$$

Donde:

- FE_{CO_i}: Factor de emisión de CO o CO₂ en g/km.
- ρ_{comb}: Densidad del combustible= 850 g/L¹.
- Rend: Rendimiento del vehículo en km/L.
- ECO_i: Emisión de CO o CO₂ en % vol.
- PM_{CO_i}: Masa molecular del CO o CO₂ en g/mol.
- PM_{comb}: Masa molecular del combustible en g/mol.
- α_{comb}: Número de moles de C en un mol de combustible.

¹Gasolina Super 95 30-S.

$$FENO = \left(\frac{\rho_{comb}}{Rend} \right) * \left(\frac{\left(\frac{ENO}{1000000} \right) * PM_{NO}}{PM_{comb} * \left(\frac{\left(\frac{ECO_2}{100} \right) + \left(\frac{ECO}{100} \right)}{\alpha_{comb}} \right)} \right) \quad (7.2)$$

Donde:

- FENO: Factor de emisión de NO en g/km.
- ρ_{comb} : Densidad del combustible en g/L.
- Rend: Rendimiento del vehículo en km/L.
- ENO: Emisión de NO en ppm.
- PM_{NO} : Masa molecular del NO en g/mol.
- PM_{comb} : Masa molecular del combustible en g/mol.
- α_{comb} : Número de moles de C en un mol de combustible.

En la [Tabla 7.2](#) se muestran los factores de emisión medios calculados a partir de las ecuaciones anteriores para cada vehículo.

Tabla 7.2: Factores de emisión medios calculados.

Nº de vehículo	FECO (g/km)	FECO ₂ (g/km)	FENO (g/km)	Fecha de muestreo
1	9.28	237.78	0.02	05/11/2014
2	0.62	251.39	0.01	06/11/2014
3	1.26	256.19	0.02	29/06/2015
4	2.16	355.85	0.04	01/07/2015
5	1.46	253.06	- [†]	23/09/2015
6	0.94	255.72	- [†]	03/10/2015
7	7.70	475.82	- [†]	09/10/2015
8	0.47	347.48	- [†]	18/10/2015
9	1.16	221.27	0.06	25/02/2016
10	0.48	327.11	0.04	08/03/2016
11	15.10	228.64	1.17	01/04/2016

[†] Durante estos muestreos no funcionó el sensor de NO.

En primera instancia, se observa que los vehículos más antiguos tienden a presentar mayores emisiones de CO. Este hecho se muestra en la [Figura 7.5](#). De todas maneras, el vínculo entre las emisiones atmosféricas y otras características de los vehículos se estudia en profundidad en la siguiente sección.

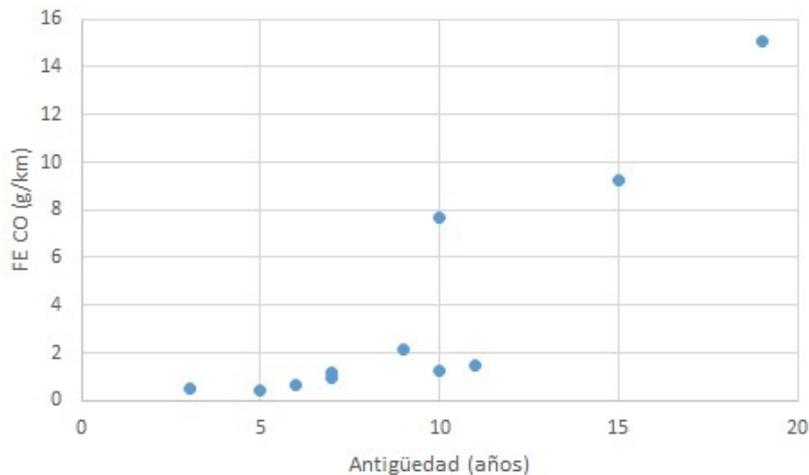


Figura 7.5: Factor de emisión de CO en función de la antigüedad.

7.3.2. Vehículos agrupados

En primer lugar se evalúa si el agrupamiento de las mediciones registradas sobre los distintos vehículos ensayados resulta estadísticamente razonable. Para ello, se realiza el test de hipótesis de Kruskal-Wallis sobre las series de velocidad medias minutales registradas para cada vehículo. Este procedimiento se juzga como sensato ya que la velocidad del vehículo es vista como una característica representativa de cada uno de los viajes realizados durante el muestreo.

La hipótesis nula (H_0) establece que todas las series analizadas provienen de la misma población. Dicha hipótesis no será rechazada en caso que el p-valor resultante de la aplicación del mencionado test de hipótesis sea mayor o igual a 0.05.

A partir de la aplicación del test de hipótesis de Kruskal-Wallis se obtiene: $p_{valor} = 0.1007$. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se procede a trabajar con las series de registros agrupadas de aquí en más. Más allá de lo anterior, los vehículos N° 1 y N° 2 se excluyeron del presente análisis por presentar una frecuencia de registro de datos distinta a los demás (30 segundos).

Seguidamente, a partir de la aplicación de la [Ecuación 7.1](#) y de la [Ecuación 7.2](#) se calcularon los factores de emisión de CO, CO₂ y NO para la serie total de datos ¹. A modo de ejemplo, en la [Figura 7.6](#) se muestra el histograma

¹A partir de este momento y hasta la determinación de intervalos de confianza para los

de los factores de emisión de CO calculados.

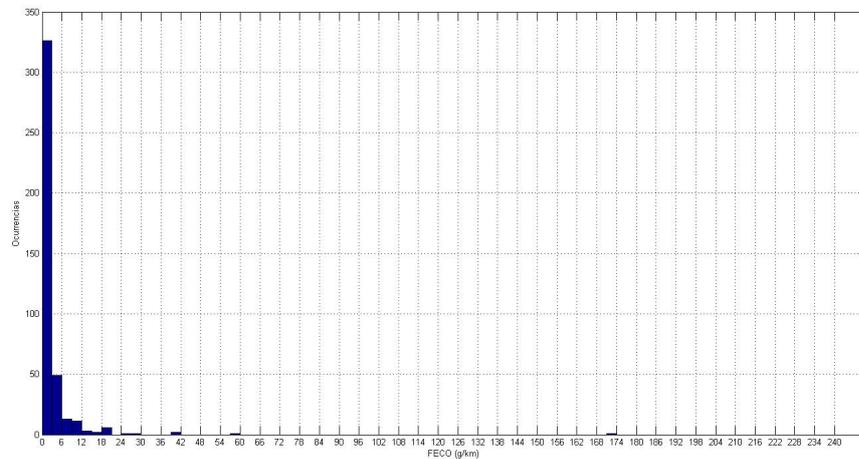


Figura 7.6: Histograma de los factores de emisión de CO calculados.

A continuación, se evaluará la posibilidad de ajustar distribuciones de probabilidad a los factores de emisión calculados para CO, CO₂ y NO. Luego, utilizando las distribuciones ajustadas, se calcularán intervalos de confianza al 95 % para los factores de emisión medios.

Seguidamente se listan las distribuciones de probabilidad a ajustar y los métodos utilizados para dicho ajuste:

- Normal (se utilizaron estimadores insesgados de varianza mínima).
- Gamma (método de máxima verosimilitud).
- Lognormal (método de máxima verosimilitud).

En el caso de los factores de emisión de CO, fue posible ajustar una distribución gamma y una distribución lognormal. Luego de evaluar gráficamente estos dos ajustes ([Figura 7.7](#)), se decidió que la distribución lognormal resultó ser la que mejor se ajustó a los factores de emisión de CO calculados.

factores de emisión medios, se descartan los valores nulos.

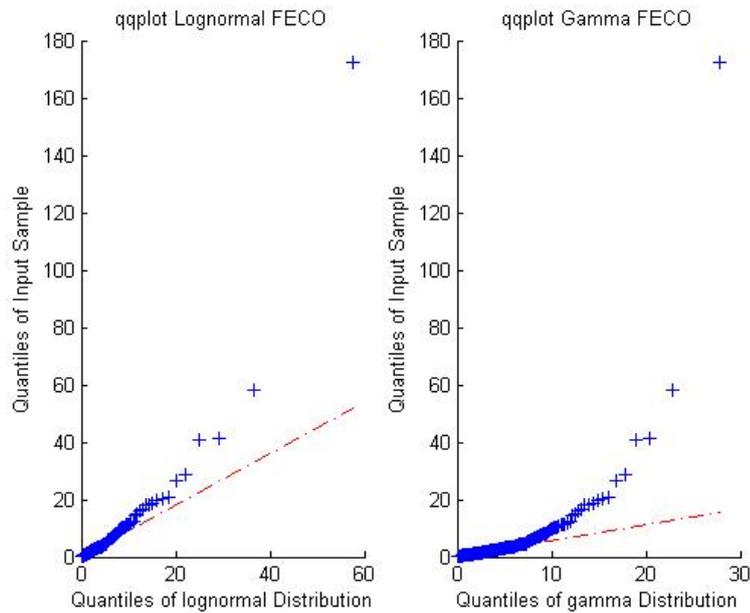


Figura 7.7: Gráfico cuantil-cuantil (qqplot) FECO.

Para los factores de emisión de NO se obtuvieron resultados idénticos a los obtenidos a partir del análisis de los factores de emisión de CO. Nuevamente, la distribución de probabilidad de mejor ajuste se determinó gráficamente (Figura 7.8).

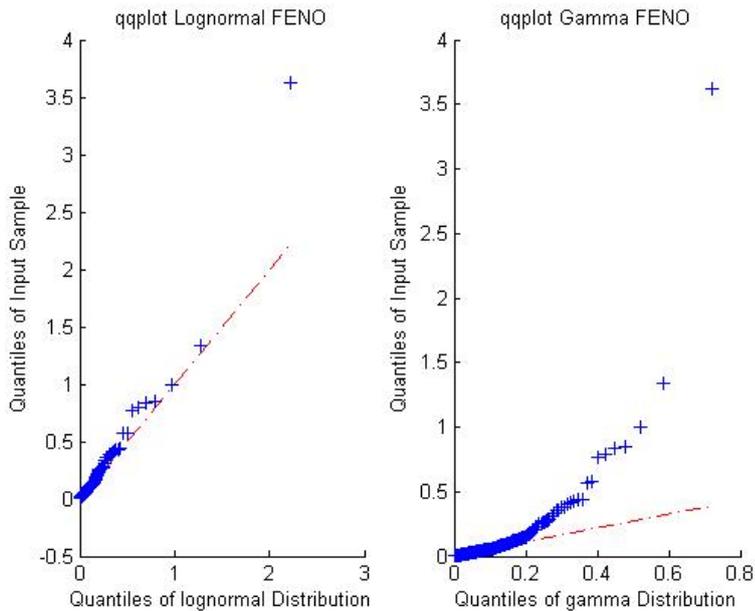


Figura 7.8: Gráfico cuantil-cuantil (qqplot) FENO.

En el caso de los factores de emisión de CO₂, no fue posible ajustar ninguna de las distribuciones de probabilidad consideradas (normal, lognormal y gamma) utilizando test de bondad de ajuste. Por lo tanto, para los factores de emisión calculados para este contaminante atmosférico, no se calcularán intervalos de confianza.

A partir de las distribuciones de probabilidad ajustadas, se determinaron intervalos de confianza, al 95 %, para los factores de emisión medios de CO y NO. Esta tarea fue realizada siguiendo un procedimiento iterativo:

- En primer lugar, se elige una longitud del intervalo de confianza.
- Luego, se calcula el área debajo de la curva de la distribución de probabilidad correspondiente al intervalo de confianza supuesto.
- Se repiten los pasos anteriores hasta que el área bajo la curva sea igual a 0.95.

En estos casos (ajuste lognormal), se utilizó el método de Fenton-Wilkinson [29] para hallar los parámetros de la distribución asociada al promedio de los factores de emisión. A modo de ejemplo, en la **Figura 7.9** se ilustra el proceso iterativo seguido para determinar el intervalo de confianza para el factor de emisión medio de CO. Nótese que la longitud del intervalo de confianza que se muestra en la **Figura 7.9** corresponde a la mitad del intervalo de confianza (el intervalo de confianza es simétrico respecto del factor de emisión medio).

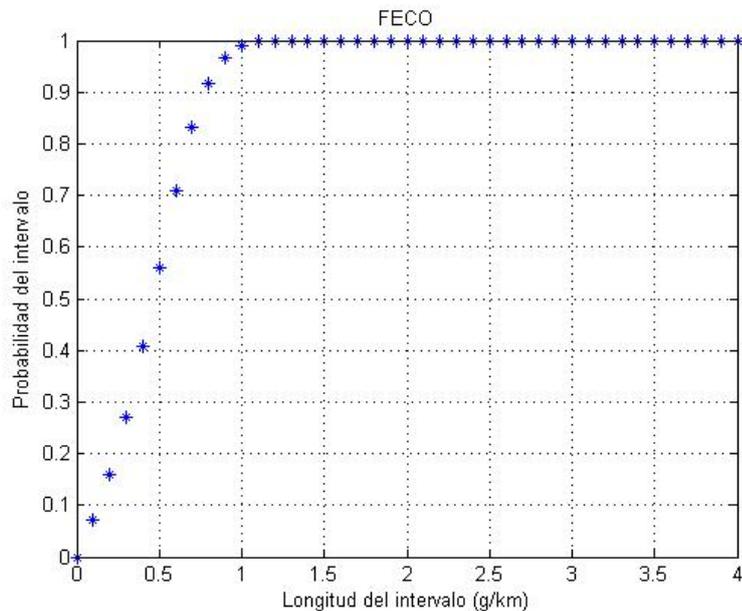


Figura 7.9: Cálculo del intervalo de confianza del factor de emisión medio de CO.

Cabe destacar que la **Figura 7.9** se presenta con fines ilustrativos, pero la determinación del intervalo de confianza se realiza numéricamente. A partir de la aplicación de la metodología descrita, se llega a los resultados que se presentan en la **Tabla 7.3**.

Tabla 7.3: Factores de emisión medios e intervalos de confianza al 95 % (valores calculados).

Contaminante	FE medio (g/km)	Intervalo de confianza al 95 % (g/km)
CO	3.05	0.90
NO	0.07	0.03

Finalmente, se explora la posibilidad de realizar agrupamientos de registros en función de los valores de algunos de los parámetros monitoreados. Con este análisis se busca establecer relaciones cualitativas entre las emisiones atmosféricas y los demás parámetros registrados durante el muestreo.

A continuación se listan los atributos considerados durante el presente análisis:

- Emisiones de NO (ppm).
- Emisiones de CO (% vol).
- Emisiones de CO₂ (% vol).
- Velocidad del vehículo (km/h).

- Aceleración del vehículo multiplicada por Velocidad del vehículo (m^2/s^3).
- Pendiente del terreno (%).
- Rendimiento del vehículo (km/L).
- Aceleración del vehículo (m/s^2).
- Potencia específica del vehículo (W/kg) [48].

Para este análisis serán considerados todos los registros para los que se cuente con los valores de los atributos mencionados. Como consecuencia de lo anterior, en lo que sigue se trabajará con 698 registros.

De la lista de atributos confeccionada se desprende que algunos de los mismos no fueron directamente registrados durante las mediciones. En particular, la aceleración del vehículo, la pendiente del terreno y la potencia específica del vehículo se calcularon según la [Ecuación 7.3](#), la [Ecuación 7.4](#) y la [Ecuación 7.5](#) respectivamente.

$$accel_i = \left(\frac{vel_{i+1} - vel_{i-1}}{\Delta t} \right) \quad (7.3)$$

Donde:

- $accel_i$: Aceleración del vehículo en el instante i (m/s^2).
- vel_{i+1} : Velocidad del vehículo en el instante $i+1$ (m/s).
- vel_{i-1} : Velocidad del vehículo en el instante $i-1$ (m/s).
- Δt : Paso temporal (10 s).

$$pend_i = \left(\frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{d_{i+1} - d_{i-1}} \right) \quad (7.4)$$

Donde:

- $pend_i$: Pendiente del terreno en el instante i (%).
- h_{i+1} : Altitud del vehículo en el instante $i+1$ (m).
- h_{i-1} : Altitud del vehículo en el instante $i-1$ (m).
- d_{i+1} : Distancia recorrida acumulada en el instante $i+1$ (m).
- d_{i-1} : Distancia recorrida acumulada en el instante $i-1$ (m).

$$VSP_i = vel_i * (1.1 * acel_i + 9.81 * pend_i + 0.132) + 0.000302 * vel_i^3 \quad (7.5)$$

Donde:

- VSP_i : Potencia específica del vehículo en el instante i (W/kg) [48].
- vel_i : Velocidad del vehículo en el instante i (m/s).
- $acel_i$: Aceleración del vehículo en el instante i (m/s²).
- $pend_i$: Pendiente del terreno en el instante i (%).

Para evaluar el posible agrupamiento de registros se utilizará la metodología de análisis de clusters [81]. De manera de reducir el volumen de la información a analizar, los nueve atributos anteriormente listados serán representados por los primeros seis componentes principales de los datos considerados. Estos componentes principales representan el 92.2% de la varianza de los datos (Figura 7.10).

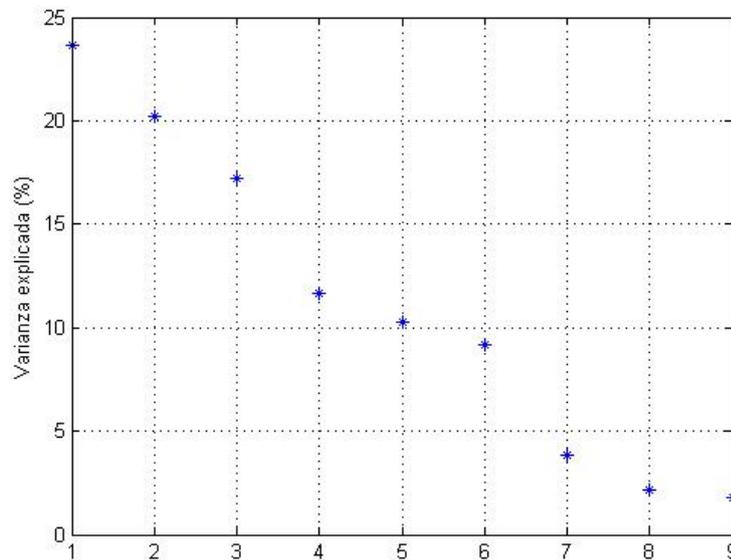


Figura 7.10: Varianza de los registros representada por cada componente principal.

Se utilizarán tres metodologías distintas de agrupamiento con el fin de evaluar la sensibilidad de los resultados obtenidos. El primer método de agrupamiento a utilizar será aglomerativo y jerárquico. Para medir la distancia entre

elementos se utilizará la distancia de Karl-Pearson y para evaluar la distancia entre grupos se utilizará el método de enlace completo. Este método define la distancia entre dos grupos considerando la mayor distancia existente entre los elementos de cada uno [81].

En la **Figura 7.11** se muestra el dendrograma obtenido mediante la aplicación del primer método de agrupamiento utilizado¹ y en la **Figura 7.12** se muestra la distancia entre grupos para cada nivel de agrupamiento.

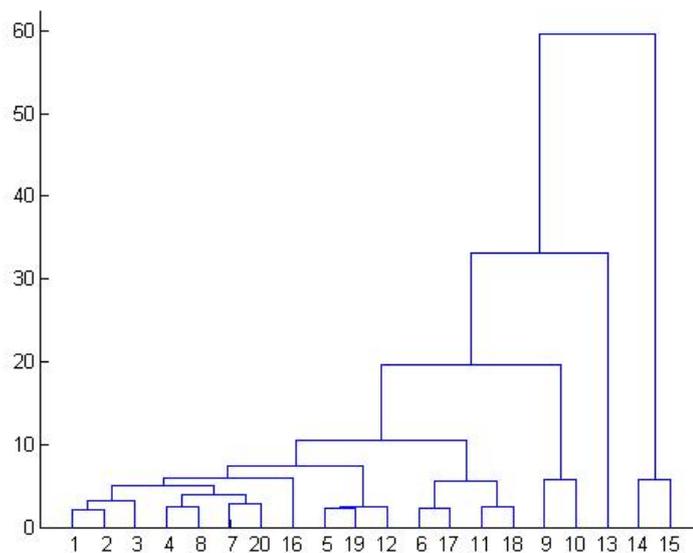


Figura 7.11: Dendrograma (enlace completo).

¹Cabe destacar que cada uno de los 20 elementos que se muestran en el eje de las abscisas de la **Figura 7.11** están integrados por uno o más registros.

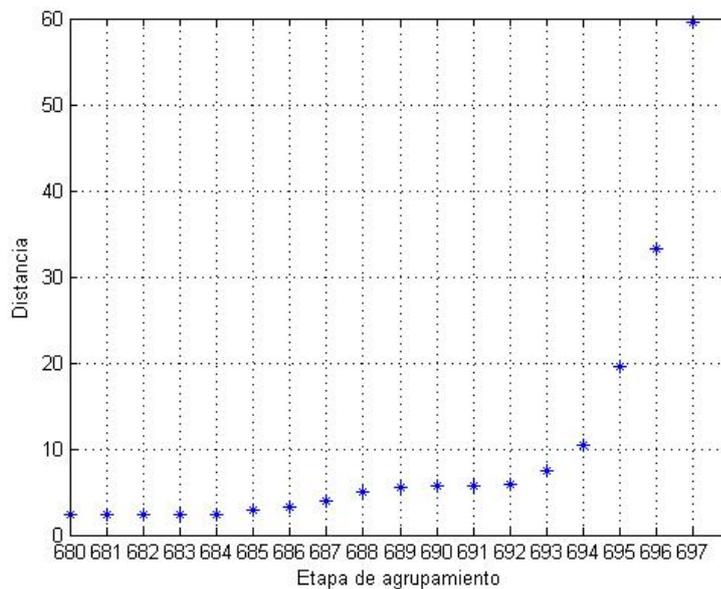


Figura 7.12: Distancia entre grupos (enlace competo).

Como puede observarse en la [Figura 7.11](#), el método de agrupamiento utilizado parte de una situación en la cual todos los registros pertenecen a grupos diferentes y, al final del proceso, se llega a un único grupo conformado por todos los registros.

Es necesario interrumpir el proceso de agrupamiento en alguna etapa con el fin de obtener una cantidad razonable de agrupamientos. En la [Figura 7.12](#) se observa que hasta la etapa N° 692 de agrupamiento, la distancia entre grupos aumentó de manera paulatina. Luego, al pasar de la etapa de agrupamiento N° 692 a la N° 693, la distancia aumenta de forma abrupta. A partir de lo anterior, se concluye que los agrupamientos formados a partir de la etapa N° 692 presentan una distancia excesivamente grande entre sus elementos. Por lo tanto, se decidió interrumpir el proceso de agrupamiento en la etapa N° 692. Como consecuencia de esto, los registros quedan agrupados en seis grupos o clusters.

De los seis agrupamientos confeccionados, tres fueron considerados anómalos ya que cada uno de ellos contuvo menos del 1% del total de registros. La [Tabla 7.4](#) describe los clusters formados que no fueron considerados anómalos y muestra los valores medios de los atributos en cada uno.

Tabla 7.4: Clusters formados (enlace completo).

N° de cluster	Cantidad de registros (%)	NO (ppm)	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	Vel (km/h)	Acel*Vel (m ² /s ³)	Pend (%)	Rend (km/L)	Acel (m/s ²)	VSP (W/kg)
1	88.4	11.1	0.05	8.7	20.0	0.2	1.1	10.3	0.02	47.8
2	8.7	8.4	0.06	8.3	30.3	-1.7	-10.3	14.3	-0.17	-737.8
3	2.1	156.9	0.08	9.2	29.9	-0.9	-1.8	6.9	-0.10	-150.4

A partir de la [Tabla 7.4](#) surgen los siguientes comentarios:

- La mayoría del tiempo de manejo los vehículos experimentan altas aceleraciones y potencias específicas. Estas condiciones se corresponden con elevadas pendientes del terreno y generan valores altos del producto aceleración*velocidad. El rendimiento del vehículo bajo estas condiciones presenta valores intermedios, su velocidad es baja y las emisiones atmosféricas presentan valores bajos a medios.
- Los momentos de alto rendimiento del combustible (8.7 % del tiempo) se corresponden con bajas emisiones atmosféricas, altas velocidades, pendientes negativas del terreno y bajas aceleraciones, potencias específicas y productos aceleración*velocidad.
- Existe un pequeño porcentaje del tiempo (2.1 %) durante el cual los vehículos experimentan altas emisiones atmosféricas y bajos rendimientos.

El segundo método de agrupamiento considerado también es jerárquico con distancia entre elementos igual a la distancia de Karl-Pearson. De todas maneras, en este caso la distancia entre grupos es evaluada utilizando el método de Ward. En este método se comienza con todos los puntos por separado. En cada paso, se elige la unión de grupos que minimice la suma de distancias al cuadrado entre cada punto del grupo y el centroide formado (o sea que minimiza la suma de varianzas) sobre todos los grupos posibles de ser formados [81].

Siguiendo un razonamiento análogo al expuesto anteriormente para la determinación del número de agrupamientos se determina la formación de diez grupos en este caso. Nuevamente, tres de los diez agrupamientos formados se consideran anómalos ya que cada uno contuvo menos del 1 % del total de registros. La [Tabla 7.5](#) describe los clusters formados que no fueron considerados anómalos y muestra los valores medios de los atributos en cada uno de ellos.

Tabla 7.5: Clusters formados (Ward).

Nº de cluster	Cantidad de registros (%)	NO (ppm)	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	Vel (km/h)	Acel*Vel (m ² /s ³)	Pend (%)	Rend (km/L)	Acel (m/s ²)	VSP (W/kg)
1	12.8	8.1	0.05	8.5	32.5	-0.9	-8.3	16.1	-0.08	-615.7
2	53.2	2.7	0.04	8.8	16.6	-0.1	-0.6	9.1	-0.04	-14.9
3	15.5	18.8	0.06	8.7	22.1	0.7	3.0	10.2	0.13	103.7
4	7.3	3.6	0.04	8.9	31.3	0.3	13.7	14.1	0.04	576.1
5	6.5	48.2	0.11	8.1	19.2	1.3	0.2	10.3	0.23	46.2
6	2.7	94.1	0.07	8.0	21.0	0.02	-1.2	8.3	-0.01	28.2
7	1.4	181.5	0.06	9.5	33.2	-1.7	-1.0	7.6	-0.24	-65.6

A partir de la observación de la [Tabla 7.5](#) surgen los siguientes comentarios:

- La mayoría del tiempo de manejo los vehículos experimentan aceleraciones y potencias específicas moderadas a bajas. Estas condiciones se corresponden con moderadas pendientes del terreno y generan valores medios a bajos del producto aceleración*velocidad. El rendimiento del vehículo bajo estas condiciones presenta valores intermedios a bajos, su velocidad es baja y las emisiones atmosféricas presentan valores bajos a medios. Esta situación media difiere a la encontrada mediante la aplicación del método de agrupamiento anterior aunque también se destaca que la presente situación media se corresponde con un porcentaje de los registros (53.2%) bastante menor al anterior (88.4%).
- Los momentos de alto rendimiento del combustible (12.8% del tiempo) se corresponden con emisiones atmosféricas medias a bajas, altas velocidades, pendientes negativas del terreno y bajas aceleraciones, potencias específicas y productos aceleración*velocidad. Este escenario es compartido con el encontrado mediante la aplicación del método de agrupamiento anterior. Más allá de esto, en este caso se identifica otro escenario de alto rendimiento asociado a altas pendientes del terreno, potencias específicas y emisiones de CO₂ (7.3% del tiempo).
- Existe un pequeño porcentaje del tiempo (1.4%) durante el cual los vehículos experimentan altas emisiones atmosféricas y bajos rendimientos. Este escenario es compartido con el encontrado mediante la aplicación del método de agrupamiento anterior.

Finalmente, se emplea un método no jerárquico para el agrupamiento de registros. En este caso, se utiliza la metodología denominada kmeans [81]. Cabe destacar que esta metodología no fue aplicada en profundidad. Se realizó solamente una corrida para cada variante evaluada. El objetivo de su implementación fue contrastar los resultados obtenidos mediante la aplicación de los primeros dos métodos utilizados con los alcanzados a través de un método no

jerárquico. En la aplicación de la mencionada metodología resulta necesario fijar, a priori, el número de clusters a formar. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante la aplicación de los dos métodos jerárquicos considerados, se evalúa el agrupamiento de los vehículos mediante la metodología kmeans en 6 y 10 clusters.

En el caso de la formación de 6 agrupamientos, el resultado de la aplicación de la metodología no jerárquica difiere del obtenido mediante el método de enlace completo principalmente en que se construyeron dos grupos anómalos en lugar de tres. El nuevo grupo no anómalo formado consiste en una nueva situación de alto rendimiento. En este escenario, los momentos de alto rendimiento se dividen en dos grupos: el primero de ellos (21.3 % del tiempo) presenta altas emisiones de NO, moderadas emisiones de CO₂ y bajas emisiones de CO. Por el contrario, el segundo de estos grupos presenta bajas emisiones de NO y CO₂ y altas emisiones de CO (5.3 % del tiempo).

En el caso de la formación de 10 agrupamientos, la aplicación de la metodología no jerárquica también arroja la formación de tres grupos anómalos. Dentro de los escenarios de alto rendimiento, esta metodología también divide dichos escenarios en función de las emisiones atmosféricas: uno de los grupos de alto rendimiento presenta emisiones bajas de CO, medias de NO y altas de CO₂ (7.2 % del tiempo) mientras que el otro también muestra bajas emisiones de CO, pero en este caso se tienen emisiones medias de CO₂ y altas de NO (16.3 % del tiempo).

Capítulo 8

Caracterización de emisiones de vehículos pesados en circulación

8.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrollan factores de emisión de monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de carbono (CO₂) para vehículos pesados nacionales en circulación (camiones y ómnibus interdepartamentales).

Los factores de emisión fueron desarrollados en base a un muestreo de emisiones vehiculares llevado a cabo en la planta fija de SUCTA. En dicho muestreo se registraron emisiones gaseosas en ralentí sobre una muestra compuesta por 119 camiones, 22 ómnibus y 5 minivans. A su vez, se registraron emisiones de escape en movimiento sobre 4 camiones¹.

En primer lugar se desarrollaron factores de emisión para condiciones de ralentí. Luego, se ajustaron distribuciones de probabilidad a dichos factores y se determinaron intervalos de confianza al 95 % para sus valores medios. Luego se estudió el vínculo entre las emisiones determinadas para condiciones de ralentí y otros atributos de los vehículos (antigüedad y potencia). Por último, utilizando las mediciones de emisiones en movimiento realizadas se estimaron, a modo ilustrativo, factores de emisión para condiciones de manejo en ciudad y en ruta a partir de los factores de emisión calculados para condiciones de ralentí.

¹Se destaca que la realización del presente estudio no hubiera sido posible sin la colaboración del Ing. José Larramendi del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y del personal de SUCTA (Ing. Federico Feuer, Carlos Quintero y otros miembros del personal de la planta).

8.2. Muestreo desarrollado

La caracterización de las emisiones de escape de vehículos pesados nacionales en circulación realizada en el presente capítulo surge como consecuencia de la descripción y el análisis de un muestreo de emisiones gaseosas vehiculares, realizado sobre vehículos pesados (camiones, ómnibus y minivans) en la planta fija de SUCTA (Figura 8.1). Dicho muestreo (Figura 8.2) fue efectuado durante cinco jornadas de trabajo¹.



(a) Vista aérea general.

(b) Vista aérea de la planta.

Figura 8.1: Ubicación de la planta fija de SUCTA (Ruta 5 km 16).



(a) Muestreo de emisiones.

(b) Encuesta al conductor.

Figura 8.2: Actividad desarrollada.

Como se aprecia en Figura 8.2, para la medición de las emisiones gaseosas se

¹Se destaca la colaboración en la realización del muestreo de los docentes Ing. Agustín Ríos e Ing. Pablo Gianoli, del Departamento de Ingeniería Ambiental del IMFIA.

utilizó el mismo analizador de gases empleado para la medición de emisiones de escape de vehículos livianos oportunamente descrito en el capítulo de análisis de dichas mediciones. Los parámetros registrados durante el muestreo junto con sus unidades de medida se muestran en la [Tabla 8.1](#).

Tabla 8.1: Parámetros registrados durante el muestreo de emisiones vehiculares sobre vehículos pesados.

Parámetro	Unidad de medida
Monóxido de carbono (CO)	porcentaje en volumen (% vol)
Dióxido de carbono (CO ₂)	porcentaje en volumen (% vol)
Hidrocarburos no quemados (HC)	partes por millón (ppm)
Monóxido de nitrógeno (NO)	partes por millón (ppm)
Oxígeno (O ₂)	porcentaje en volumen (% vol)

Durante la actividad desarrollada, los conductores de los vehículos ensayados fueron encuestados. A continuación se detalla la información referente al vehículo solicitada a cada conductor en paralelo a la realización de la medición:

- Marca
- Modelo
- Antigüedad
- Kilometraje
- Cilindrada
- Sistema de Control de Emisiones (SCE)¹
- Potencia del motor
- Peso
- Rendimiento estimado
- Uso promedio
- Revoluciones por minuto (RPM) del motor durante el ensayo

En la [Tabla 8.2](#) se presenta la cantidad de vehículos ensayados durante cada una de las jornadas de trabajo.

Durante la quinta jornada de medición que se presenta en la [Tabla 8.2](#) se registraron emisiones de CO y CO₂ en movimiento sobre cuatro camiones seleccionados al azar. El detalle de dichas mediciones se presenta en la [Tabla 8.3](#).

¹Resultó notorio el desconocimiento generalizado acerca de este ítem por parte de los conductores.

Tabla 8.2: Cantidad de vehículos ensayados.

Fecha	Número de camiones registrados	Número de ómnibus registrados	Número de minivans registradas	Total
05/03/2015	32	6	2	40
19/03/2015	34	5	0	39
07/04/2015	29	6	0	35
23/04/2015	24	5	3	32
21/08/2015	4	0	0	4
Total	123	22	5	150

Tabla 8.3: Ensayos en movimiento.

Nº de vehículo	Antigüedad (años)	Potencia del motor (kW)	Tiempo de ensayo (min)
1	1	324	10
2	1	302	10
3	34	127	10
4	4	85	5

Durante la realización del muestreo se experimentaron algunas dificultades inherentes al desarrollo de la actividad de campo. Algunas de las mismas se listan a continuación:

- No se tiene certeza acerca de si el dato de peso declarado corresponde al vehículo vacío o cargado. En el caso de disponerse de ambos datos se utilizó la tara ya que las emisiones se registraron con el vehículo descargado.
- Existe la posibilidad de que el odómetro en camiones antiguos haya superado el millón de kilómetros recorridos y, por lo tanto, el kilometraje verdadero pudiera ser el declarado más uno o varios millones.
- Durante la medición realizada el 23/04/2015 no funcionó el sensor de O₂.

En algunos casos se registró composiciones de gases de escape muy similares a la del aire ambiente, lo cual se entiende que se debería a roturas en los caños de escape¹. Un ejemplo de esta situación, constatado durante el muestreo, se refleja en la [Figura 8.3](#).

¹Esto llevó al descarte de una medición realizada el 19/03/2015, una registrada el 07/04/2015 y otra efectuada el 23/04/2015.



Figura 8.3: Caño de escape con posible rotura (círculo rojo).

En este capítulo se analizan por separado camiones, ómnibus y minivans. Debe mencionarse que el número de minivans presentes en la muestra es bastante menor al número de camiones y ómnibus. Por lo tanto, algunas de las metodologías de cálculo presentadas en este documento serán aplicadas, únicamente, a las muestras de camiones y ómnibus.

8.3. Procesamiento de datos

Los registros de emisiones gaseosas fueron realizados en ralentí durante el ingreso de los vehículos a la planta. Luego, estos registros fueron procesados de manera de obtener factores de emisión para NO y CO₂. Estos factores de emisión fueron analizados estadísticamente. A partir del análisis realizado se ajustaron distribuciones de probabilidad a los factores de emisión y luego se determinaron intervalos de confianza, al 95 %, para el valor medio de dichos factores.

Se destaca que los factores de emisión obtenidos representan el funcionamiento de los vehículos en ralentí. Esta condición de funcionamiento se da mayoritariamente en entornos portuarios y durante la espera de los vehículos en los semáforos.

Sin embargo, esta condición de funcionamiento difiere sustancialmente de la experimentada por los vehículos pesados durante el manejo en ruta y en ciudad. Por lo tanto, con el fin de ajustar los factores de emisión desarrollados a las condiciones de manejo en ruta y en ciudad, en el final de la presente sección se utilizan los registros de emisiones en movimiento para la obtención de factores de emisión para condiciones de manejo en ruta y en ciudad. Se entiende que la cantidad de vehículos evaluados en movimiento es baja. De todas maneras, los resultados obtenidos serán utilizados para estimar factores de emisión para NO y CO₂ en ruta y en ciudad. Más allá que no se registraron emisiones de NO en movimiento, según [39], en el caso de los vehículos a gas oil, las emisiones de NO_x y CO₂ siguen un comportamiento similar.

Sin desmedro de lo anterior, se recomienda incorporar en futuros análisis una mayor cantidad de mediciones de emisiones en movimiento con el fin de refinar la estimación de los factores de emisión aquí presentada para condiciones reales de manejo. En particular, se recomienda focalizarse en los vehículos pesados con mayor presencia en la flota vehicular.

Se realizó un filtrado de los registros de emisiones de NO y CO₂ para camiones, ómnibus y minivans. En primer lugar el proceso de filtrado implica, tanto para NO como para CO₂, considerar el primer cuartil ($q_{0.25}$) y el tercer cuartil ($q_{0.75}$) de la muestra. Luego se calcula el intervalo intercuartil (IQR) como la resta entre el tercer y el primer cuartil. Finalmente, un registro es descartado cuando es mayor a la suma del tercer cuartil más el intervalo intercuartil multiplicado por 1.5, o cuando es menor al primer cuartil menos el intervalo

intercuartil multiplicado por 1.5. En definitiva:

$$Lim_{max} = q_{0.75} + 1.5 * IQR \quad (8.1)$$

$$Lim_{min} = q_{0.25} - 1.5 * IQR \quad (8.2)$$

Como consecuencia del filtrado de datos se descartan los registros efectuados sobre 6 camiones, 4 ómnibus y 1 minivan. Al quitar una minivan como consecuencia del filtrado la muestra queda compuesta por cuatro unidades. Debido al reducido tamaño de la muestra y a la diferencia de porte existente entre estos vehículos y los camiones y ómnibus, las minivans no fueron tenidas en cuenta para el cálculo de factores de emisión. Se destaca que el proceso de filtrado efectuado fue ideado en el marco de esta tesis.

Con el objetivo de generar factores de emisión útiles para la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes, la confección de inventarios de emisiones y poder comparar las emisiones registradas con las normas actualmente aplicadas internacionalmente fue necesario desarrollar, a partir de los registros, factores de emisión de NO en unidades de g/kWh y de CO₂ en unidades de g/km debido a que dichas unidades de medida permiten la comparación de los factores de emisión calculados con la normativa internacional. Dicho desarrollo implicó la realización de un balance de masa. En dicho balance se asume que CO₂, CO y HC son los principales productos de la combustión¹. A partir de las suposiciones realizadas, la emisión de NO en unidades de gramos emitidos por kilogramo de combustible quemado se obtiene a partir de la siguiente fórmula [71]:

$$EI_{NO} = \frac{\left(\frac{NO}{1000000}\right) * PM_{NO}}{PM_{Diesel} * \left(\frac{\left(\frac{CO_2}{100}\right) + \left(\frac{CO}{100}\right)}{\alpha}\right)} * 1000 \quad (8.3)$$

¹Si la concentración de HC en el gas de escape es inferior a 1000 ppm, puede despreciarse su presencia como producto de la combustión [71]. Esta condición se cumple para todos los vehículos analizados. Por lo tanto, se desprecia la presencia de HC como producto de la combustión.

Donde¹:

- NO: Emisión de NO registrada (ppm).
- CO: Emisión de CO registrada (% vol).
- CO₂: Emisión de CO₂ registrada (% vol).
- α : Número de moles de C en un mol de combustible (12).
- PM_{NO}: Masa molecular del NO (30 g/mol).
- PM_{Diesel}: Masa molecular del combustible (167 g/mol).

Finalmente, para obtener factores de emisión para NO que resulten comparables con las normas aplicadas internacionalmente, la cantidad obtenida anteriormente debe ser afectada por el consumo de combustible del vehículo en condiciones de ralentí según la siguiente ecuación:

$$FE_{NO}(g/kWh) = \frac{EI_{NO}(g/kg) * C}{1000} \quad (8.4)$$

Donde:

- FE_{NO}: Factor de emisión de NO (g/kWh).
- C: Consumo de combustible del vehículo en condiciones de ralentí (g/kWh).

El consumo de combustible del vehículo en condiciones de ralentí se obtuvo de los catálogos de los vehículos pesados relevados. Cuando no se obtuvo el dato para la marca y el modelo en cuestión, se tomaron los valores de modelos razonablemente similares.

El procedimiento de cálculo para el factor de emisión de CO₂ es similar:

$$FE_{CO_2}(g/km) = \left(\frac{\rho_{Diesel}}{Rend} \right) * \left(\frac{\left(\frac{CO_2}{100} \right) * PM_{CO_2}}{PM_{Diesel} * \left(\frac{\left(\frac{CO_2}{100} \right) + \left(\frac{CO}{100} \right)}{\alpha} \right)} \right) \quad (8.5)$$

¹En la [Ecuación 8.3](#) se determina el Emission Index (EI) [71].

Donde:

- FE_{CO₂}: Factor de emisión de CO₂ (g/km).
- ρ_{Diesel} : Densidad del combustible Diesel (840 kg/m³).
- Rend: Rendimiento del vehículo (km/L).
- CO₂: Emisión de CO₂ registrada (% vol).
- CO: Emisión de CO registrada (% vol).
- PM_{CO₂}: Masa molecular del CO₂ (44 g/mol).
- PM_{Diesel}: Masa molecular del combustible (167 g/mol).
- α : Número de moles de C en un mol de combustible (12).

Luego del cálculo de los factores de emisión, se evaluará la posibilidad de ajustar distribuciones de probabilidad a los mismos. A continuación, utilizando las distribuciones ajustadas, se calcularán intervalos de confianza al 95 % para los factores de emisión medios. La metodología de ajuste de distribuciones de probabilidad es análoga a la llevada a cabo para las mediciones efectuadas sobre vehículos livianos por lo que no se efectuará, en el presente capítulo, el desarrollo teórico de la misma.

El cálculo de intervalos de confianza realizado estuvo condicionado, en cada caso, por la distribución de probabilidad ajustada a los factores de emisión. En el caso de ajuste normal, el intervalo de confianza para el promedio, al 95 %, se determinó a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$u = \frac{1.96 * \sigma}{\sqrt{n}} \quad (8.6)$$

Donde:

- u: Longitud de la mitad del intervalo de confianza (g/km).
- σ : Desviación estándar de la serie de factores de emisión (g/km).
- n: Longitud de la serie.

En el resto de los casos (ajuste gamma y lognormal) se siguió un procedimiento iterativo para el cálculo de los intervalos de confianza idéntico al descrito en el capítulo dedicado al análisis de las mediciones efectuadas sobre

vehículos livianos.

En el caso del ajuste gamma, para determinar la distribución de probabilidad de los factores de emisión medios a partir de la distribución de probabilidad de los factores de emisión, se utilizó la propiedad de que la suma de variables aleatorias independientes que siguen una distribución gamma con el mismo factor de escala es una variable aleatoria con distribución gamma, con el mismo factor de escala y con el factor de forma igual a la suma de los factores de forma. En el caso del ajuste lognormal, se utilizó el método de Fenton-Wilkinson [29] para hallar los parámetros de la distribución asociada al promedio de los factores de emisión.

Seguidamente, se estudia el vínculo entre los factores de emisión determinados para condiciones de ralentí y otros parámetros de los vehículos. Los parámetros de los vehículos evaluados en este estudio son la antigüedad y la potencia.

A partir de los factores de emisión medios calculados para ralentí se estiman factores de emisión para manejo en ruta y en ciudad de NO y CO₂ para camiones y ómnibus. Dicha estimación utiliza, además de los factores de emisión medios en ralentí, las mediciones de emisiones en movimiento realizadas.

El manejo en ruta se asocia a velocidades de giro del motor considerablemente elevadas y constantes mientras que el manejo en ciudad será representado por aceleraciones y frenadas sucesivas.

En este sentido, las mediciones de emisiones en movimiento son procesadas de manera que, para la estimación del factor de emisión en ruta, sólo sean consideradas aquellas que se correspondan con velocidades de giro del motor mayores o iguales al tercer cuartil ($q_{0.75}$). Por otra parte, para la determinación del factor de emisión en ciudad, se consideran todos los registros de emisiones en movimiento tal que las revoluciones por minuto del motor no superen el tercer cuartil. Se aclara que este procedimiento fue desarrollado en el marco de esta tesis. A partir de lo anterior, las emisiones de CO₂ consideradas en cada caso son promediadas y divididas entre la emisión en ralentí obteniéndose los denominados $Cociente_{RUTA}$ y $Cociente_{CIUDAD}$.

Finalmente, los factores de emisión en ruta y en ciudad se construyen aplicando ecuaciones que utilizan coeficientes de ponderación para las condiciones del vehículo en movimiento y en ralentí. Dichos coeficientes de ponderación se corresponden con los utilizados en el ensayo ESC¹ para la determinación de factores de emisión de vehículos pesados. A continuación se muestran las

¹European Stationary Cycle.

ecuaciones utilizadas:

$$FE_{RUTA} = 0.15 * FE_{RALENTI} + 0.85 * Cociente_{RUTA} * FE_{RALENTI} \quad (8.7)$$

$$FE_{CIUDAD} = 0.15 * FE_{RALENTI} + 0.85 * Cociente_{CIUDAD} * FE_{RALENTI} \quad (8.8)$$

El procedimiento anterior se repite para los vehículos ensayados y los factores de emisión resultantes son promediados.

8.3.1. Mediciones en ralentí

Camiones

Se ensayaron 119 camiones en ralentí. En cuanto a las marcas de los mismos, Mercedes resultó ser la de mayor participación con un 25.2% de los casos seguida de Volkswagen con un 24.4% (Figura 8.4). Según [6], estas dos marcas abarcan aproximadamente el 18% de las ventas de camiones nuevos registradas en el País durante 2015.

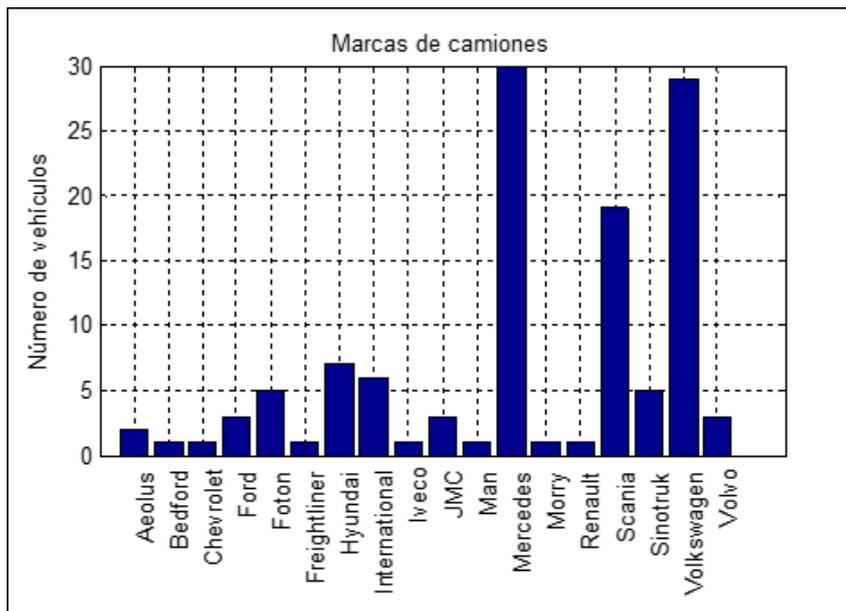


Figura 8.4: Marcas de los camiones registrados.

En la Tabla 8.4 se presentan los valores medios, para los camiones analizados, de los parámetros indagados durante las encuestas.

Tabla 8.4: Valores medios de los parámetros consultados.

Parámetro	Valor medio
Antigüedad (años)	13.6
Kilometraje (km)	394550
Cilindrada (cm ³)	7754
Potencia máxima del motor (kW)	185.4
Peso (kg)	12878
Rendimiento estimado (km/L)	3.3
Meses de funcionamiento al año	11.2
Días de funcionamiento al mes	23.8
Horas de funcionamiento al día	10.8
RPM del motor durante el ensayo	676

Un primer comentario que surge a partir de la [Tabla 8.4](#) es que, en promedio, los camiones analizados presentan un uso muy importante a lo largo de todo el año. A continuación se informan las desviaciones estándar de algunos de los parámetros consultados:

- Antigüedad: 11.5 años.
- Kilometraje: 461483 km.
- Cilindrada: 3067 cm³.
- Potencia máxima del motor: 70 kW.

Lo anterior indica que la muestra de camiones analizada resulta ser considerablemente heterogénea en relación a los parámetros indagados durante las encuestas.

La antigüedad de la muestra de camiones analizada puede observarse con mayor detalle en el histograma de la [Figura 8.5](#). En el mismo se observa que un porcentaje importante de la flota analizada no llega a los 5 años de antigüedad.

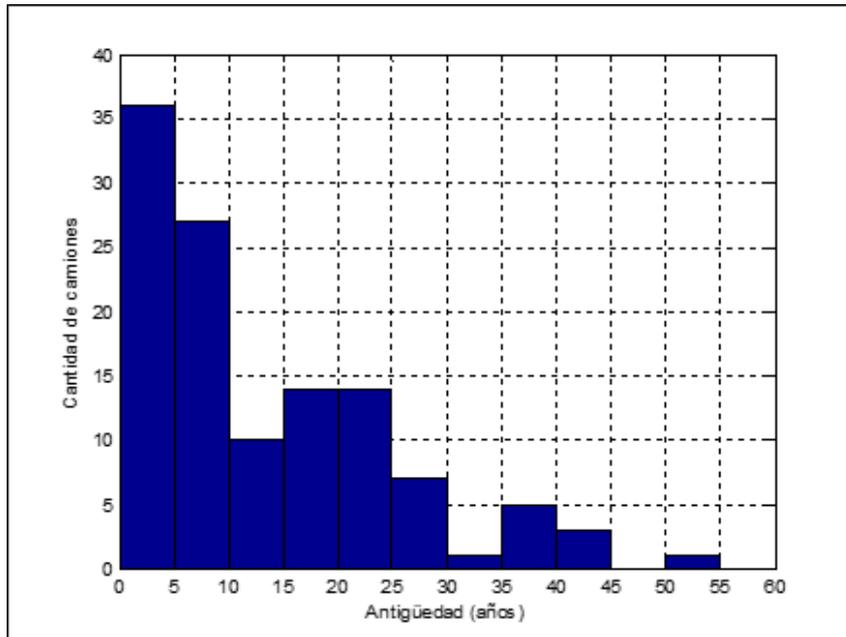


Figura 8.5: Histograma de antigüedad de camiones.

A modo de comparación con los datos de la flota nacional de camiones presentados anteriormente, puede decirse que la cantidad de camiones analizada resulta ser aproximadamente igual al 0.2% de la flota nacional. Además, la antigüedad media de la muestra de camiones resulta ser similar a la de la flota nacional (estimada en 25 años). De todas maneras, puede decirse que la muestra de camiones considerada tiene una mayor cantidad porcentual de vehículos nuevos que la flota nacional.

En la [Tabla 8.5](#) se presentan valores medios y desviaciones estándar de las mediciones realizadas para cada parámetro sobre la flota de camiones analizada. En la [Figura 8.6](#) se grafican dichos registros y en el [Apéndice M](#) se presenta la totalidad de las mediciones realizadas.

Tabla 8.5: Valores medios y desviaciones estándar de las mediciones efectuadas sobre camiones.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar
CO (% vol)	0.02	0.02
HC (ppm)	1	1
CO ₂ (% vol)	1.6	0.3
NO (ppm)	183	94

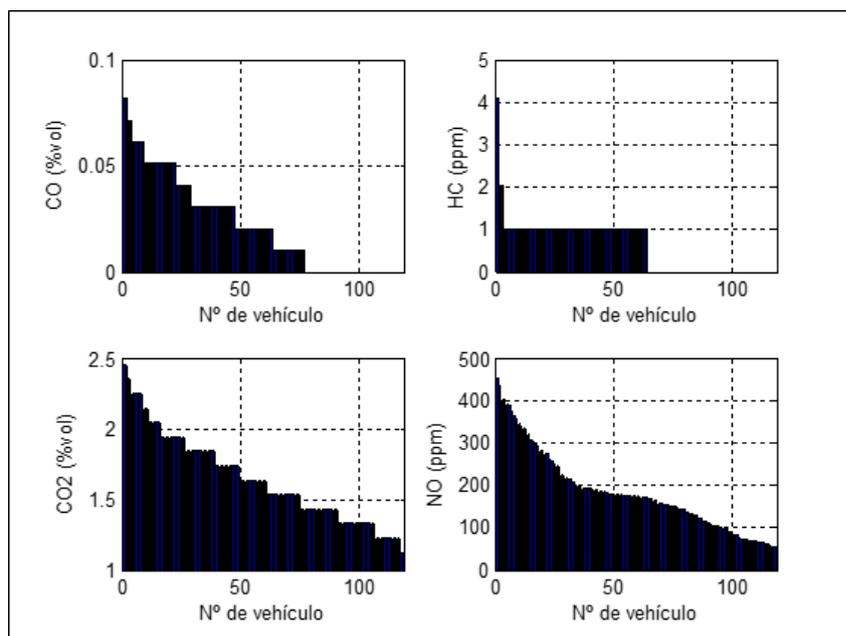


Figura 8.6: Curvas de permanencia de las mediciones realizadas sobre camiones.

A partir de la observación de la [Tabla 8.5](#) y de la [Figura 8.6](#) puede decirse que los registros de CO y HC presentan valores anómalos. En el caso del CO sorprende la cantidad de registros nulos. Dichos registros nulos hacen que el valor de la desviación estándar de las mediciones resulte muy elevado (igual a la media). El mismo efecto se observa en los registros de HC. Al analizar la precisión del instrumental utilizado durante las mediciones, se constató que gran parte de los registros de CO quedan dentro del margen de error del instrumento ($\pm 0.06\%$ vol) y que todas las mediciones de HC se encuentran dentro del margen de error del equipo de medición (± 12 ppm en volumen). A partir de lo anterior se decidió calcular factores de emisión para NO y CO₂ únicamente.

En primer lugar, se realizó un análisis exploratorio de los factores de emisión calculados. En la [Tabla 8.6](#) y en la [Figura 8.7](#) se presentan valores medios, desvíos estándar e histogramas de dichos factores de emisión.

Tabla 8.6: Valor medio y desviación estándar de los factores de emisión calculados para la flota de camiones analizada.

Contaminante	Valor medio	Desviación estándar
NO (g/kWh)	4.9	2.2
CO ₂ (g/km)	886	302.7

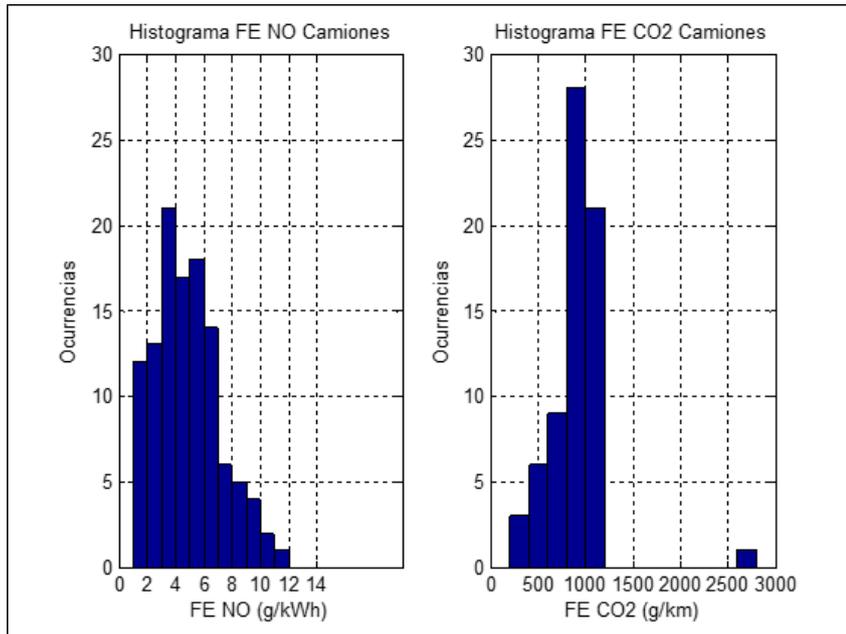


Figura 8.7: Histogramas de los factores de emisión para la muestra de camiones.

En el caso de los factores de emisión de NO, fue posible ajustar las tres distribuciones de probabilidad evaluadas. La distribución gamma resultó ser la que mejor se ajustó¹ a los factores de emisión de NO en el caso de los camiones (Figura 8.8).

¹Esta distribución de probabilidad fue la que presentó el mayor p-valor durante los ajustes de distribuciones de probabilidad realizados.

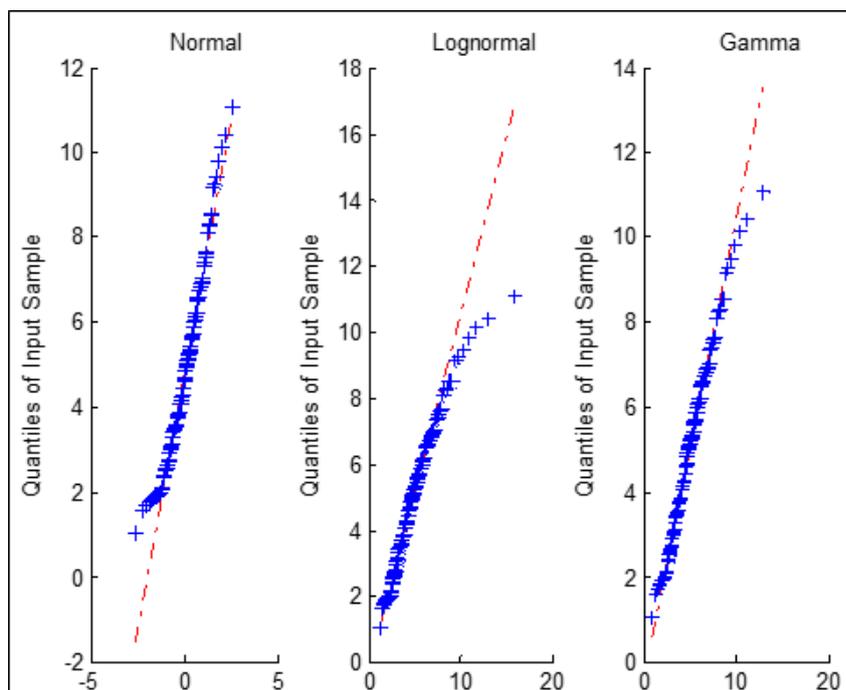


Figura 8.8: qqplot FE_{NO} camiones.

En el caso de los factores de emisión de CO_2 , no fue posible ajustar ninguna de las distribuciones de probabilidad consideradas (normal, lognormal y gamma) utilizando test de bondad de ajuste. En este escenario, la distribución normal fue la que presentó el p-valor más alto durante el intento de ajuste. Por lo tanto, con el fin de construir intervalos de confianza para el factor de emisión medio de CO_2 , se utilizará la distribución normal.

En la [Tabla 8.7](#) se muestran los intervalos de confianza calculados para los factores de emisión medios.

Tabla 8.7: Intervalos de confianza de los factores de emisión medios calculados para la muestra de camiones analizada.

Longitud del intervalo FE_{NO} (g/kWh)	Longitud del intervalo FE_{CO_2} (g/km)
0.42	72 [†]

[†] Debe tenerse en cuenta que no fue posible ajustar una distribución de probabilidad a los factores de emisión de CO_2 . Por lo tanto, la validez del intervalo de confianza calculado resulta cuestionable.

Ómnibus

Durante la actividad desarrollada se relevaron 22 ómnibus. En cuanto a las marcas de los ómnibus relevados, Scania resultó ser la de mayor participación

con un 36.4 % de los registros seguida de Mercedes con un 27.3 % (Figura 8.9). Según [6], estas dos marcas abarcan aproximadamente el 35 % de las ventas de ómnibus nuevos registradas en el País durante 2015.

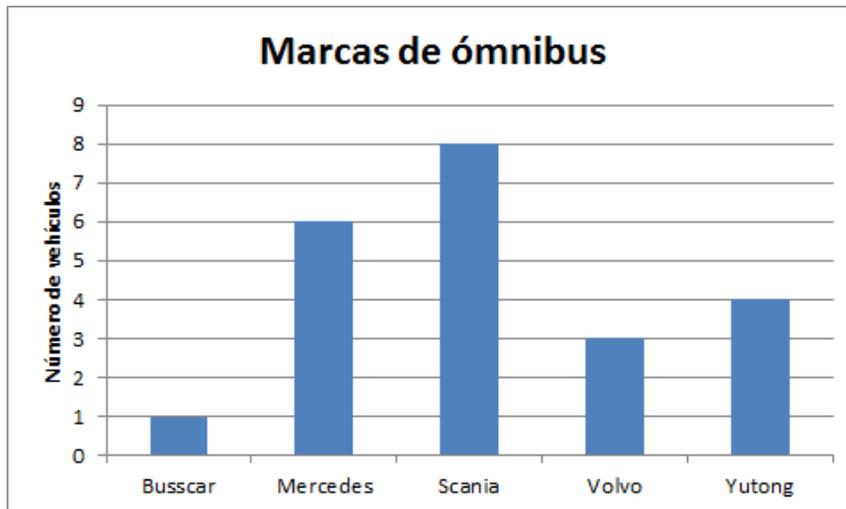


Figura 8.9: Marcas de los ómnibus ensayados.

En la Tabla 8.8 se presentan valores medios, para los ómnibus analizados, de los parámetros indagados durante las encuestas.

Tabla 8.8: Valores medios de los parámetros consultados.

Parámetro	Valor medio
Antigüedad (años)	9.7
Kilometraje (km)	812100
Cilindrada (cm ³)	9114
Potencia máxima del motor (kW)	221
Peso (kg)	15963
Rendimiento estimado (km/L)	4.0
Meses de funcionamiento al año	11.8
Días de funcionamiento al mes	27.5
Horas de funcionamiento al día	12.7
RPM del motor durante el ensayo	630

A partir de la Tabla 8.8 puede decirse que los ómnibus relevados también presentan un uso muy importante a lo largo de todo el año. Además, se destaca que el kilometraje promedio de los ómnibus resulta ser significativamente mayor al de los camiones analizados.

A continuación se informan las desviaciones estándar de algunos de los paráme-

tros consultados:

- Antigüedad: 7.4 años.
- Kilometraje: 1322300 km.
- Cilindrada: 2556 cm³.
- Potencia máxima del motor: 54 kW.

Lo anterior indica que la muestra de ómnibus analizada resulta ser considerablemente heterogénea en relación a los parámetros indagados durante las encuestas.

La antigüedad de la muestra de ómnibus analizada puede observarse con mayor detalle en el histograma de la [Figura 8.10](#). En el mismo se observa que un porcentaje importante de la flota analizada no llega a los 10 años de antigüedad.

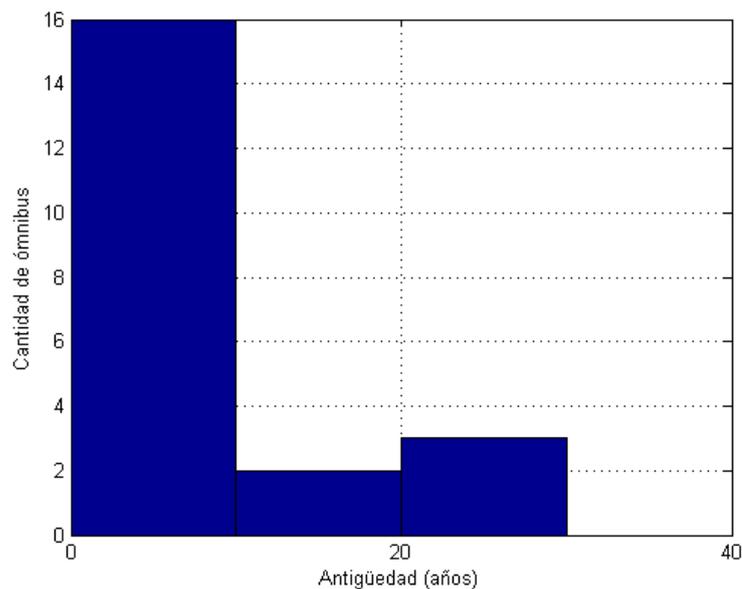


Figura 8.10: Histograma de antigüedad de ómnibus.

Se cuenta con información oficial de la Dirección Nacional de Transporte (DNT) y del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) actualizada al 30 de abril de 2013 acerca de la antigüedad de la flota nacional de ómnibus. La antigüedad media de dicha flota resulta ser 14.4 años.

Al igual que se hizo para el caso de la muestra de camiones, es posible comparar la muestra de ómnibus analizada con los datos de la flota nacional. En primer lugar, se destaca que la cantidad de ómnibus analizada resulta ser aproximadamente igual al 0.7% de la flota nacional. Además, la antigüedad media de la muestra resulta ser similar a la de la flota nacional. De todas maneras, puede decirse que la muestra de ómnibus considerada tiene una mayor cantidad porcentual de vehículos nuevos que la flota nacional.

En la [Tabla 8.9](#) se presentan valores medios y desviaciones estándar de las mediciones realizadas sobre ómnibus para cada parámetro. En la [Figura 8.11](#) se grafican dichos registros y en el [Apéndice N](#) se presenta la totalidad de las mediciones realizadas.

Tabla 8.9: Valores medios y desviaciones estándar de las mediciones efectuadas sobre ómnibus.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar
CO (% vol)	0.01	0.02
HC (ppm)	0.5	0.5
CO ₂ (% vol)	1.7	0.4
NO (ppm)	240	96

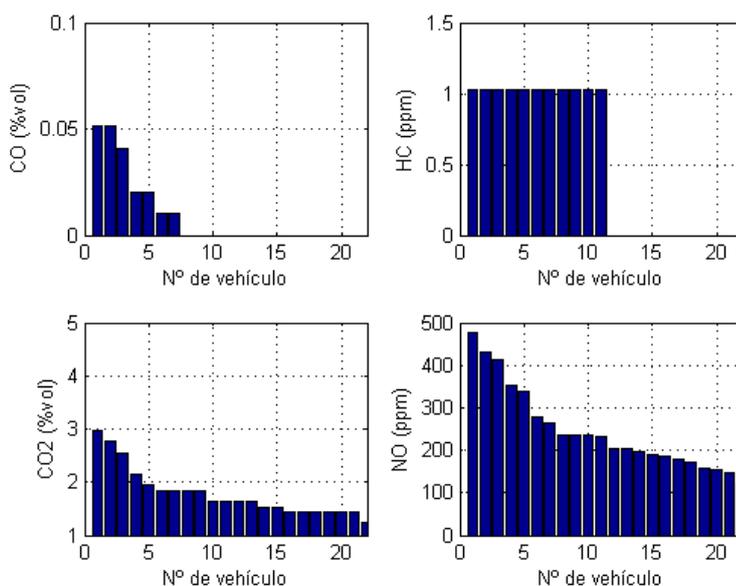


Figura 8.11: Curvas de permanencia de las mediciones realizadas sobre ómnibus.

En el caso de las mediciones de emisiones de escape en ómnibus, se constató que todos los registros de CO y HC quedan dentro del margen de error del instrumental. Al igual que en el caso de los camiones, se resolvió calcular factores de emisión únicamente para NO y CO₂.

En primer lugar, se realizó un análisis exploratorio de los factores de emisión calculados. En la [Tabla 8.10](#) y en la [Figura 8.12](#) se presentan valores medios, desvíos estándar e histogramas de dichos factores de emisión.

Tabla 8.10: Valor medio y desviación estándar de los factores de emisión calculados para la flota de ómnibus analizada.

Contaminante	Valor medio	Desviación estándar
NO (g/kWh)	5.5	1.1
CO ₂ (g/km)	761.6	236.5

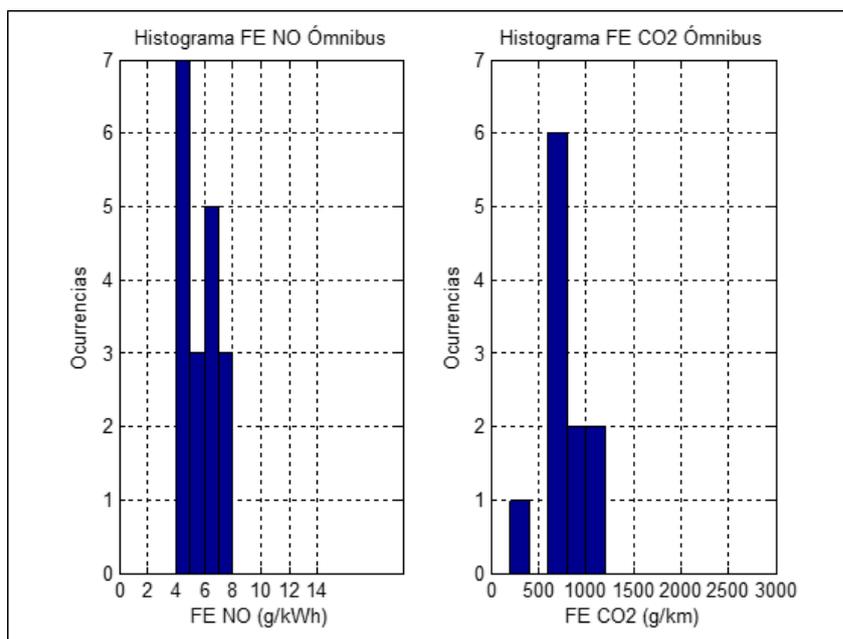


Figura 8.12: Histogramas de los factores de emisión para la muestra de ómnibus.

En el caso de los factores de emisión de NO, fue posible ajustar las tres distribuciones de probabilidad evaluadas. El mejor ajuste fue evaluado gráficamente ([Figura 8.13](#)). A partir de dicha evaluación, se consideró que la distribución lognormal es la que mejor se ajusta a los datos.

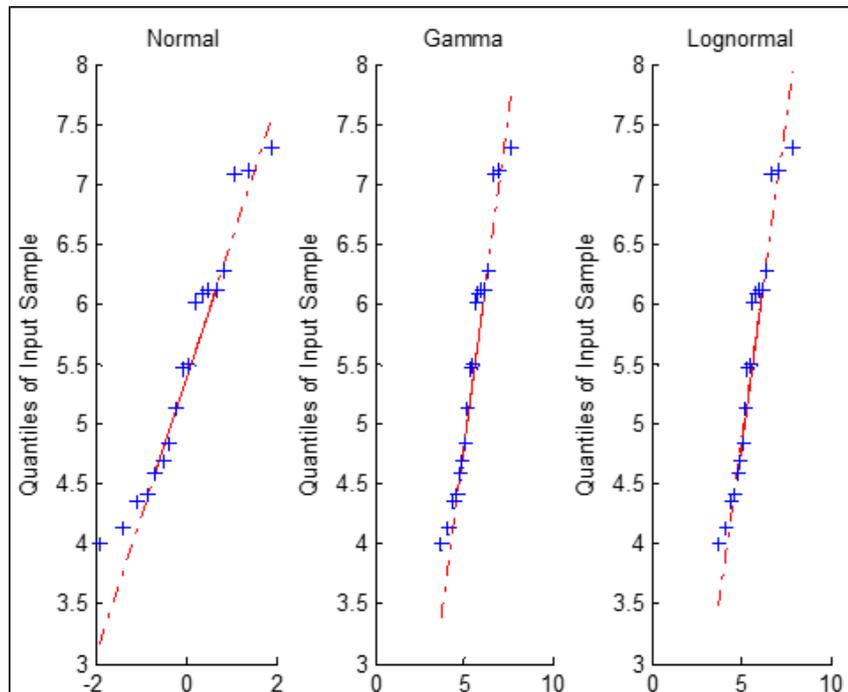


Figura 8.13: qqplot FE_{NO} omnibus.

Para los factores de emisión de CO_2 también pudieron ajustarse las tres distribuciones de probabilidad consideradas. Nuevamente, el mejor ajuste fue elegido gráficamente (Figura 8.14). Al igual que en el caso de los factores de emisión de NO , se eligió la distribución lognormal para el ajuste de los factores de emisión de CO_2 .

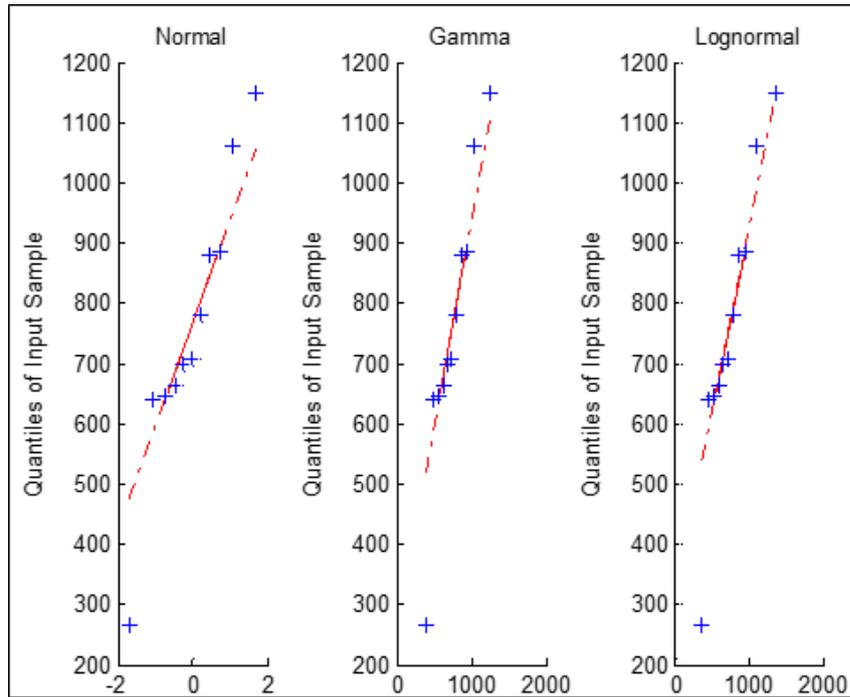


Figura 8.14: qqplot FE_{CO_2} ómnibus.

En la [Tabla 8.11](#) se muestran los intervalos de confianza calculados para los factores de emisión medios.

Tabla 8.11: Intervalos de confianza de los factores de emisión medios calculados para la muestra de ómnibus analizada.

Longitud del intervalo FE_{NO} (g/kWh)	Longitud del intervalo FE_{CO_2} (g/km)
0.50	186

8.3.2. Relación entre los factores de emisión y otros parámetros de los vehículos

En la presente sección se estudia la posibilidad de formar agrupaciones de vehículos considerando los siguientes atributos de los mismos:

- Factor de emisión de NO.
- Factor de emisión de CO₂.
- Antigüedad.
- Potencia.

En primer lugar, se realiza un test de hipótesis estadístico¹ sobre las series de factores de emisión de NO y CO₂ correspondientes a camiones y ómnibus con el objetivo de evaluar si las mencionadas series podrían presentar la misma mediana. El resultado de dicho test indicó que, efectivamente, podría decirse que los factores de emisión de NO y CO₂ para camiones y ómnibus tienen la misma mediana.

A partir de lo anterior, para el análisis que sigue se considerarán en conjunto los factores de emisión desarrollados para la flota de camiones y ómnibus evaluada.

Para investigar el posible agrupamiento de vehículos se utilizará la metodología de análisis de clusters [81]. El método de agrupamiento a utilizar será aglomerativo y jerárquico. Para medir la distancia entre elementos se utilizará la distancia de Karl-Pearson y para evaluar la distancia entre grupos se utilizará el método de enlace completo [81].

El proceso de agrupamiento realizado se ilustra en la [Figura 8.15](#).

¹Test de suma de rangos de Wilcoxon.

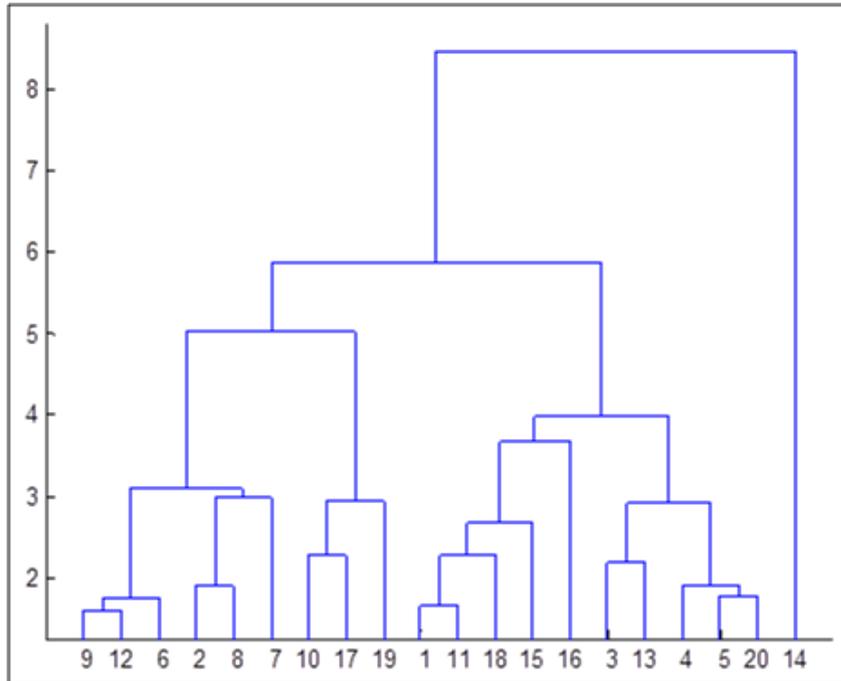


Figura 8.15: Dendrograma para agrupamiento de vehículos.

Como puede observarse en la [Figura 8.15](#), al igual que en el caso del muestreo sobre vehículos livianos, el método de agrupamiento utilizado parte de una situación en la cual todos los vehículos pertenecen a grupos diferentes y, al final del proceso, se llega a un único grupo conformado por todos los vehículos.

Es necesario interrumpir el proceso de agrupamiento en alguna etapa con el fin de obtener una cantidad razonable de agrupamientos. Esto último se realiza manualmente a partir de la observación de la [Figura 8.16](#). En dicha figura se ilustra la distancia considerada en cada etapa de agrupamiento para la confección de un nuevo grupo¹. Cuando dicha distancia aumenta bruscamente, puede decirse que se están agrupando vehículos “significativamente” diferentes de modo que el proceso de agrupamiento se detiene en la etapa anterior. Este razonamiento lleva a la selección de seis grupos de vehículos cuyas características medias se ilustran en la [Tabla 8.12](#).

¹Nótese que en cada etapa de agrupamiento la cantidad total de grupos disminuye en una unidad.

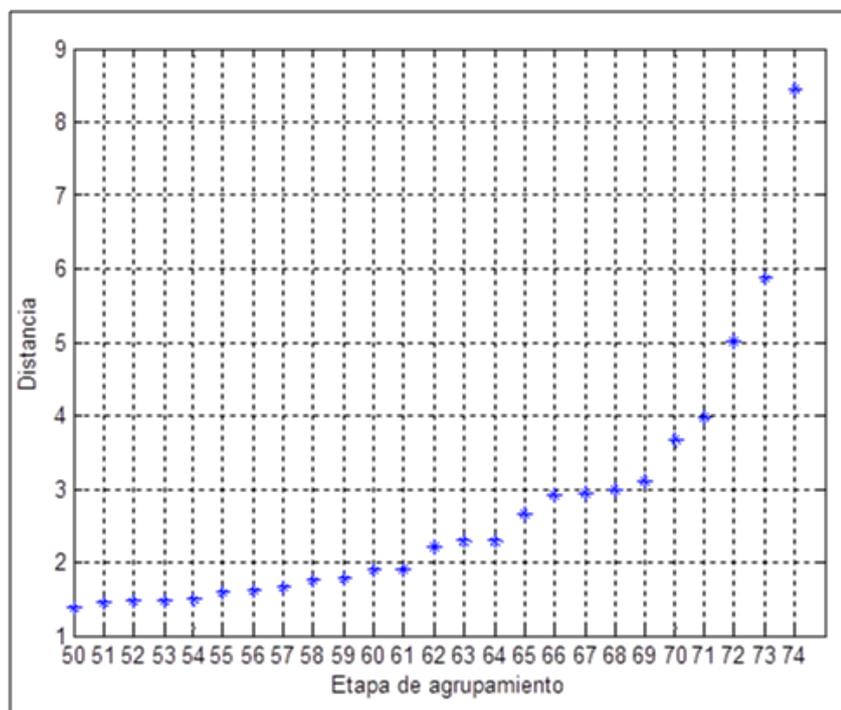


Figura 8.16: Distancias de agrupamiento para cada etapa (el proceso de agrupamiento se detiene en la etapa n°69).

Tabla 8.12: Características medias de los agrupamientos formados[†].

N° cluster	N° veh	FE _{NO} medio (g/kWh)	FE _{CO₂} medio (g/km)	Antigüedad media (años)	Potencia media (kW)
1	20	3.3	834.0	30.2	142.6
2	7	<i>3.9</i>	<i>362.7</i>	<i>9.1</i>	<i>86.4</i>
3	24	6.2	926.9	8.4	192.3
4	4	<i>10.1</i>	<i>1067.2</i>	<i>12.0</i>	<i>203.3</i>
5	19	5.6	916.8	4.2	284.9
6	1	<i>4.9</i>	<i>2624.9</i>	<i>6.0</i>	<i>247.0</i>

[†] En cursiva se muestran aquellos agrupamientos formados por menos de diez vehículos.

Con fines orientativos, en la [Figura 8.17](#) y en la [Figura 8.18](#) se interpolan los factores de emisión de NO y CO₂ para distintas potencias y antigüedades obtenidos mediante el análisis de clusters llevado a cabo utilizando los agrupamientos de vehículos con más de siete unidades (clusters N°1, 3 y 5).

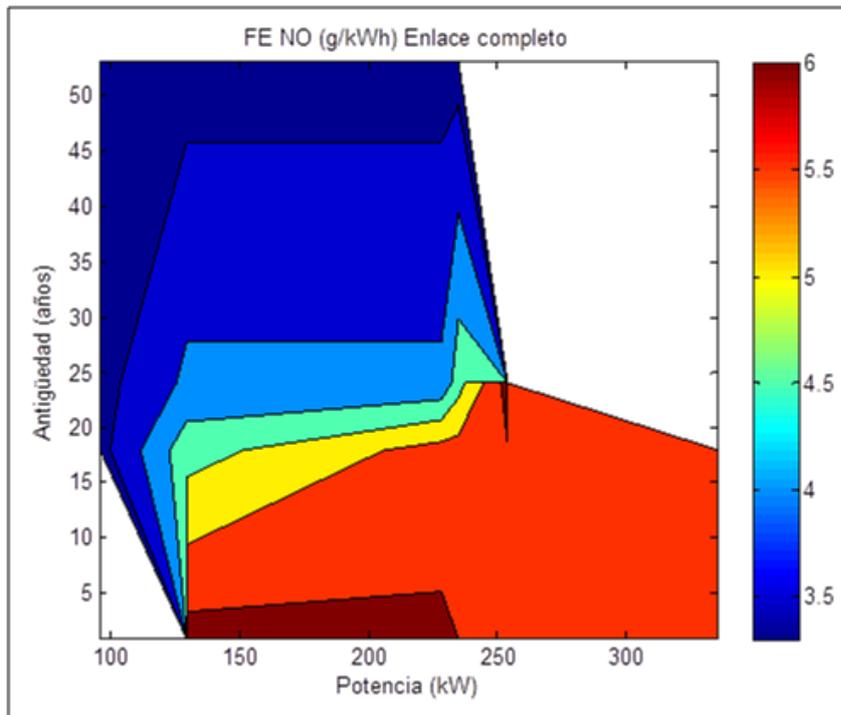


Figura 8.17: Factor de emisión de NO en ralentí en función de la potencia y de la antigüedad.

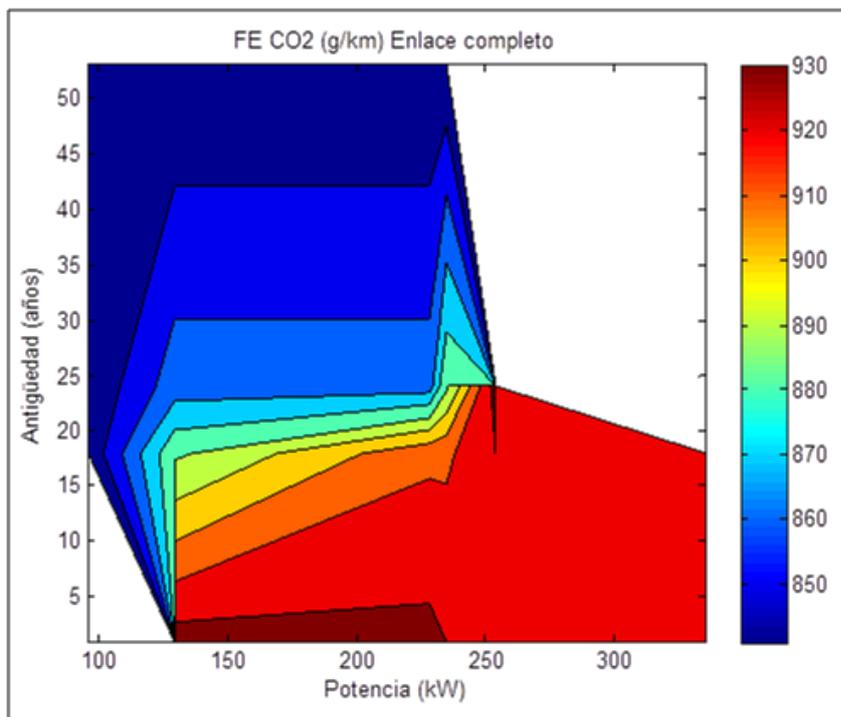


Figura 8.18: Factor de emisión de CO₂ en ralentí en función de la potencia y de la antigüedad.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de clusters (expresados gráficamente en la [Figura 8.17](#) y en la [Figura 8.18](#)) señalan que los vehículos más nuevos y más potentes tienden a presentar mayores emisiones de NO y de CO₂. Teniendo en cuenta que la emisión de los dos contaminantes analizados se asocia con altas temperaturas del motor y mezclas aire-combustible cercanas a la estequiométrica, resulta razonable que ambos se comporten de manera similar con respecto a los demás parámetros de los vehículos analizados. Existe una correspondencia inversa entre los factores de emisión de NO y la antigüedad de los vehículos. Se entiende que los vehículos nuevos tienden a funcionar con mezclas aire-combustible más cercanas a la estequiométrica que los vehículos antiguos por lo que este resultado también era previsible. También se prevé que los vehículos más potentes presenten antigüedades menores y tiendan a presentar factores de emisión de NO y de CO₂ más altos. Este hecho se refleja en la [Figura 8.17](#) y en la [Figura 8.18](#).

8.3.3. Mediciones en movimiento

Durante la quinta jornada de medición se llevaron a cabo registros de emisiones de escape en ralentí y en movimiento sobre cuatro vehículos pesados al finalizar el procedimiento de inspección técnica vehicular en la planta fija de SUCTA. En la [Tabla 8.13](#) se subraya su funcionamiento en condiciones de ralentí.

Tabla 8.13: Velocidad de giro del motor y emisiones de CO₂ en ralentí.

Nº de vehículo	RPM ralentí	CO ₂ ralentí (% vol)
1	600	1.4
2	500	1.2
3	700	1.7
4	700	1.7

A modo de ejemplo, en la [Figura 8.19](#) se muestran las emisiones registradas durante la medición en movimiento del vehículo N°1 (en el [Apéndice Ñ](#) se presenta la totalidad de las mediciones realizadas sobre cada uno de los vehículos ensayados). Cabe destacar la diferencia existente entre estos registros y las emisiones en ralentí. En la [Figura 8.20](#) se ilustra la variación de la velocidad de giro del motor para todas las mediciones en movimiento. Este parámetro de funcionamiento del motor será utilizado para la estimación de los factores de emisión para manejo en ruta y en ciudad.

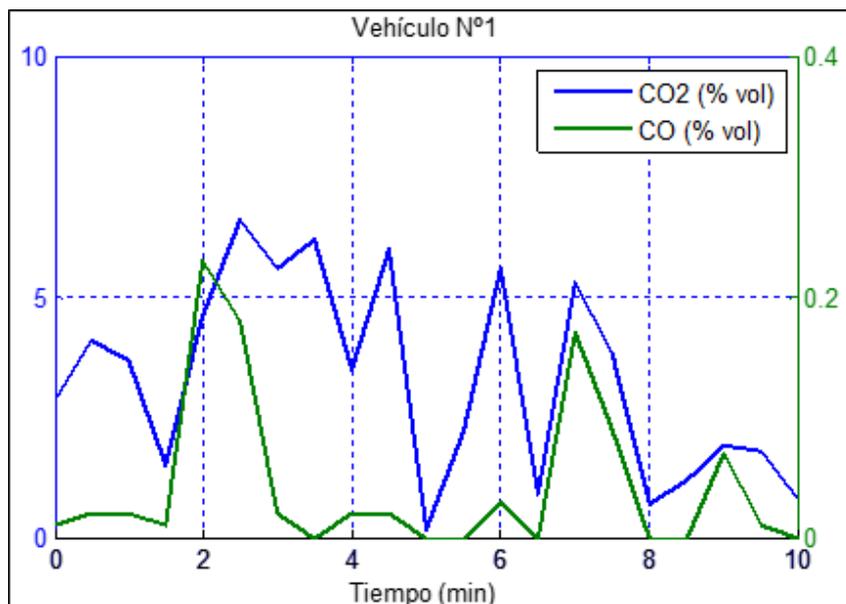


Figura 8.19: Emisiones en movimiento, vehículo N°1.

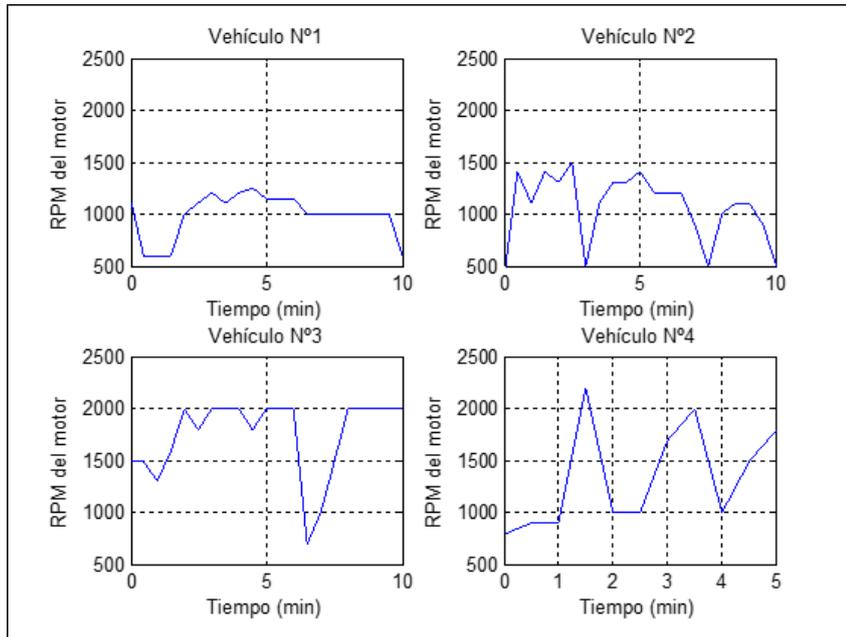


Figura 8.20: Variación de la velocidad de giro del motor durante las mediciones en movimiento.

Utilizando la **Ecuación 8.7** y la **Ecuación 8.8** se estiman factores de emisión para condiciones de manejo en ruta y en ciudad. Para lograr este objetivo, en primer lugar deben estimarse los coeficientes denominados $Cociente_{RUTA}$ y $Cociente_{CIUDAD}$. Los resultados de dicha estimación se presentan en la **Tabla 8.14**.

Tabla 8.14: Estimación de factores de emisión en movimiento[†].

Nº de vehículo	CO ₂ ralentí (% vol)	CO ₂ ciudad medio (% vol)	CO ₂ ruta medio (% vol)	Cociente _{CIUDAD}	Cociente _{RUTA}
1	1.4	3.22	3.52	2.30	2.51
2	1.2	2.67	2.60	2.23	2.17
4	1.7	5.49	5.95	3.23	3.50
			Promedio	2.59	2.73

[†] No se consideran las mediciones realizadas en el Vehículo Nº3 debido a su elevada antigüedad.

En la **Tabla 8.15** y en la **Tabla 8.16** se presentan los factores de emisión calculados para ralentí y estimados para ruta y ciudad para camiones y ómnibus de NO y CO₂ respectivamente.

Tabla 8.15: Resumen de factores de emisión, NO.

Tipo de vehículo	FE medio ralentí (g/kWh)	FE medio ciudad (g/kWh)	FE medio ruta (g/kWh)	Intervalo de confianza 95 % (g/kWh)
Camiones	4.9	11.5	12.1	0.42
Ómnibus	5.5	12.9	13.6	0.50

Tabla 8.16: Resumen de factores de emisión, CO₂.

Tipo de vehículo	FE medio ralentí (g/km)	FE medio ciudad (g/km)	FE medio ruta (g/km)	Intervalo de confianza 95% (g/km)
Camiones	886.0	2083.4	2188.9	72.0
Ómnibus	761.6	1790.9	1881.5	186.0

Con el objetivo de comparar los factores de emisión obtenidos para manejo en ruta y en ciudad con valores presentes en la literatura internacional, es necesario expresarlos en unidades de medida diferentes. En la [Tabla 8.17](#) se presentan los factores de emisión de NO, para camiones y ómnibus, expresados en diversas unidades de medida alternativas.

Tabla 8.17: Factores de emisión de NO (diversas unidades de medida).

Tipo de vehículo	FE medio ralentí (g/kg comb)	FE medio ciudad (g/kg comb)	FE medio ruta (g/kg comb)
Camiones	22.58	53.1	55.8
Ómnibus	27.50	64.7	67.9
Tipo de vehículo	FE medio ralentí (g/km)	FE medio ciudad (g/km)	FE medio ruta (g/km)
Camiones	7.20	16.9	17.8
Ómnibus	6.94	16.3	17.1
Tipo de vehículo	FE medio ralentí (g/milla)	FE medio ciudad (g/milla)	FE medio ruta (g/milla)
Camiones	11.59	27.3	28.6
Ómnibus	11.17	26.3	27.6

Por otra parte, en la [Tabla 8.18](#) se presentan los factores de emisión de NO para vehículos pesados relevados en diversos trabajos publicados en revistas internacionales [51], [20], [78], [72], [21], [76], [53].

Tabla 8.18: Factores de emisión de NO (bibliografía).

Referencia	Muestra utilizada	Resultados
[51]	175 camiones	FE NO _x =48.2 g/kg comb; 9.7 g/km
[20]	9 camiones	FE NO _x =6.5 g/km
[78]	5 camiones	FE NO _x =10 g/kg comb-70 g/kg comb; 5 g/milla-30 g/milla
[72]	11 camiones	FE NO _x = 6 g/kWh (EURO V ciudad); 8.5 g/kWh (EURO 3 ciudad)
[21]	11 camiones	FE NO _x = 2.8 g/min (ralentí); 42.9 g/milla (movimiento)
[76]	270 camiones	FE NO _x = 876 g/d (6350 kg-15000 kg); 4275 g/d (más de 15000 kg)
[53]	Recopilación de FE	FE NO _x = 8.92 g/km (sin SCE [†]); 5.61 g/km (con SCE [†])

[†] Sistema de Control de Emisiones.

A partir del análisis de la [Tabla 8.18](#) surgen diversos comentarios que se resumen a continuación:

- Los valores de factor de emisión expresados en g/kg comb coinciden razonablemente.

- Los factores de emisión en unidades de g/km reportados en la bibliografía consultada se asemejan a los calculados en el presente trabajo para condiciones de ralentí. Para el cálculo de los factores de emisión en unidades de g/km a partir de los calculados en g/kg comb se utiliza el rendimiento estimado de los vehículos (km/L). El valor de dicho rendimiento fue consultado a los conductores durante las encuestas realizadas.
- Los factores de emisión reportados en la bibliografía en unidades de g/milla coinciden razonablemente con los determinados en el presente estudio para condiciones de manejo en ruta y en ciudad.
- [72] presenta un factor de emisión en ciudad para camiones EURO III. Según los catálogos de los vehículos relevados, la mayoría cumplen con esta norma de emisión. El factor de emisión desarrollado en este estudio resulta ser un 35% superior aproximadamente.

A partir de los comentarios anteriores, se concluye que los factores de emisión de NO reportados en el presente trabajo para vehículos pesados para condiciones de manejo en ruta y en ciudad (Tabla 8.15) coinciden razonablemente con los reportados en la bibliografía consultada.

Más allá de lo anterior, sería deseable ampliar la cantidad de mediciones de emisiones en movimiento con el fin de refinar el pasaje de los factores de emisión en ralentí a condiciones de manejo en ruta y en ciudad.

Capítulo 9

Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares

9.1. Introducción

En el presente capítulo se aplica el modelo `caffa3d.MBRi`¹ en una calle de la Ciudad Vieja de Montevideo con el objetivo de modelar la dispersión de las emisiones vehiculares generadas en su seno. Tal cual se mencionó en el marco teórico del presente trabajo, el modelo `caffa3d.MBRi` es una herramienta numérica computacional desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR útil, entre otras cosas, para modelar la dispersión atmosférica de contaminantes [56]. Primeramente, se realiza la descripción de la zona de estudio y de la grilla construida para la representación gráfica de la misma. Luego, a partir de la suposición de determinado flujo de viento, se muestra la evolución temporal de la dispersión de contaminantes emitidos en el seno de la calle estudiada (cañón urbano). Además, se comparan los distintos patrones de dispersión de contaminantes resultantes en la zona de estudio a partir de la consideración de distintos flujos de viento. A continuación, en el presente capítulo se presentan los resultados de una medición de flujo vehicular y concentración de monóxido de carbono realizada en la zona de estudio. Los escenarios relevados son modelados de forma tal de comparar las concentraciones medidas con las salidas del modelo. Por último, se modelan escenarios ficticios considerando distintos flujos vehiculares en la zona de estudio calculándose, para cada uno de ellos, concentraciones de CO en posibles receptores ubicados a nivel de calle.

¹Sitio web del modelo `caffa3d.MBRi`: <https://www.fing.edu.uy/imfia/caffa3d.MB/>.

9.2. Zona de estudio: descripción y representación gráfica

La zona de estudio se encuentra en la Ciudad Vieja de Montevideo. En particular, se estudiará la dispersión de contaminantes en la calle Buenos Aires entre Zabala y Misiones (Figura 9.1 y Figura 9.2).



Figura 9.1: Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia a partir de Google Earth.



(a) Hacia el suroeste.

(b) Hacia el noreste.

Figura 9.2: Imágenes de la zona de estudio.

Como puede verse en la [Figura 9.2](#), se encuentra una parada de ómnibus en la esquina noreste de la zona de estudio (intersección Misiones). En este sitio se produce una importante acumulación de personas en horas de la tarde. Lo anterior demuestra la existencia de posibles receptores de las emisiones vehiculares generadas en el seno de la zona de estudio.

En la [Tabla 9.1](#) se presentan algunas características generales del tramo estudiado.

Tabla 9.1: Características del tramo de calle estudiado.

Largo (m)	87.3
Ancho calle (m)	7.2
Ancho vereda (m)	1.5
Altura media de edificios (m)	11

Se entiende que la calle estudiada constituye un cañón urbano. En el marco teórico del presente documento se definieron a los cañones urbanos como *calle*s relativamente angostas con edificios alineados de manera continua a ambos lados. Con el objetivo de clasificar el cañón urbano bajo estudio, a partir de la [Tabla 9.1](#) puede calcularse su relación de aspecto. La misma resulta ser igual a 1.1 aproximadamente. Por lo tanto, el cañón urbano bajo estudio se clasifica como regular. Además, teniendo en cuenta que el cociente entre el largo y la altura de la calle de estudio vale 8, puede decirse que el cañón urbano bajo estudio es largo. Las estimaciones anteriores suponen que la altura de los edificios a lo largo de toda la calle de estudio se corresponde con la altura media presentada en la [Tabla 9.1](#). Más allá que esto no es así en realidad, la hipótesis considerada es juzgada como razonable teniendo en cuenta que la altura de los edificios ubicados en la zona de estudio no presenta grandes variaciones tal cual se observa en la [Figura 9.3](#).



Figura 9.3: Imagen de la zona de estudio en donde se aprecian las alturas de los edificios presentes. Google Earth Street View.

Con el fin de aplicar el modelo `caffa3d.MBRi` en la zona de estudio, la primer actividad consistió en la construcción de la grilla de trabajo. Dicha grilla abarcó la totalidad del cañón urbano bajo estudio y se modeló con una celda de cálculo cada 20 cm. A partir de lo anterior se deduce que la grilla de cálculo contó con 71 celdas en la dirección transversal a la calle, 450 en sentido longitudinal y 65 celdas en altura. Lo anterior implica la asunción de las siguientes hipótesis:

- El dominio de cálculo se definió de modo de considerar que la altura de los edificios frentistas se mantiene constante durante al menos 2 m desde la fachada.
- Por simplicidad, el largo de la calle se fijo igual a 90 m.
- Se dispusieron 2 m de altura libre por encima de los edificios.

En la [Figura 9.4](#) y en la [Figura 9.5](#) se presenta la grilla construida.

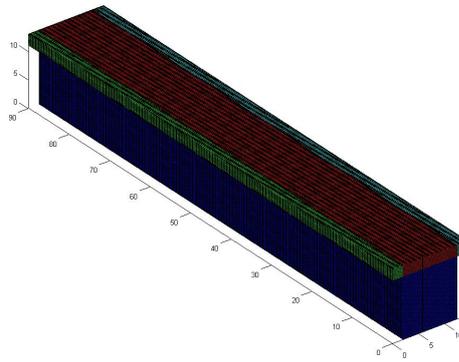


Figura 9.4: Grilla construida (perspectiva).

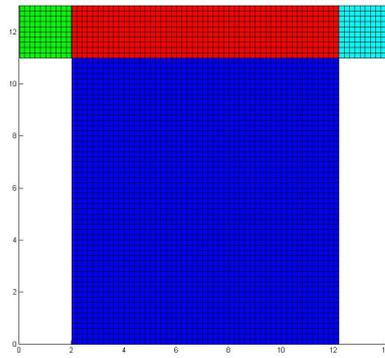
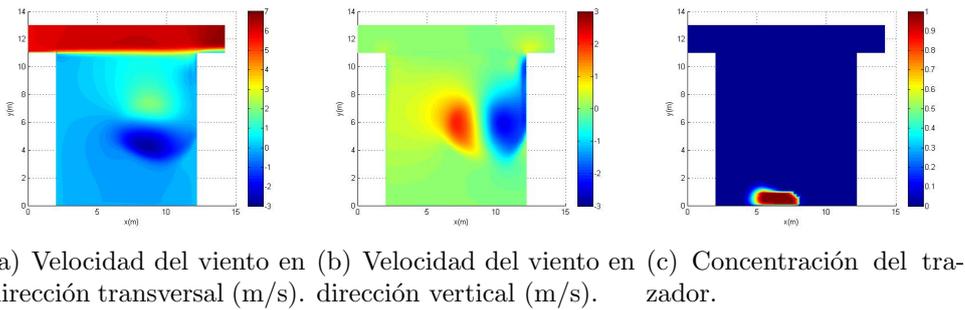


Figura 9.5: Corte transversal de la grilla construida. Los distintos colores representan distintos bloques de cálculo.

9.3. Evolución temporal de la dispersión

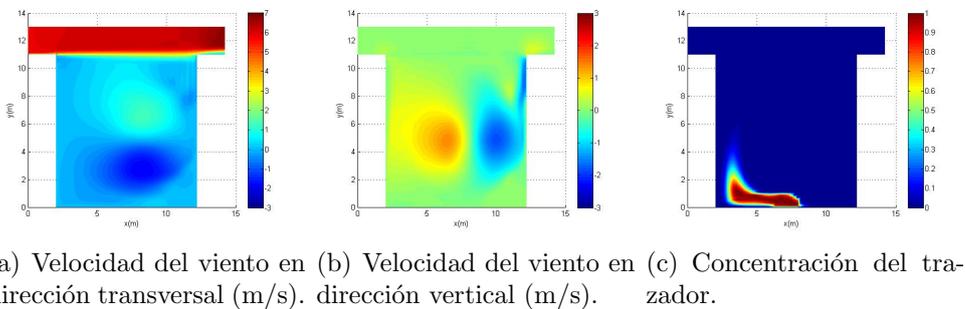
En la presente sección se describe la evolución temporal de la dispersión de contaminantes de origen vehicular en el seno del cañón urbano bajo estudio. Para la realización de la mencionada tarea se supondrá que el viento presenta una dirección perpendicular ¹ al eje de la calle y que su velocidad es igual a 5.9 m/s ². En este caso, las emisiones vehiculares serán representadas por un trazador emitido a nivel de calle, en el eje de la misma y con un radio de emisión igual a 1 m. La intensidad de la emisión se fija, a los efectos del cálculo, igual a 1 e inicialmente no se tienen emisiones en la zona de estudio.

Entre la [Figura 9.6](#) y la [Figura 9.11](#) se muestra la evolución temporal del campo de velocidades y de la dispersión de las emisiones vehiculares a lo largo de un minuto en el seno de la zona de estudio (sección transversal media).



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.6: Evolución de la dispersión: 10 s.

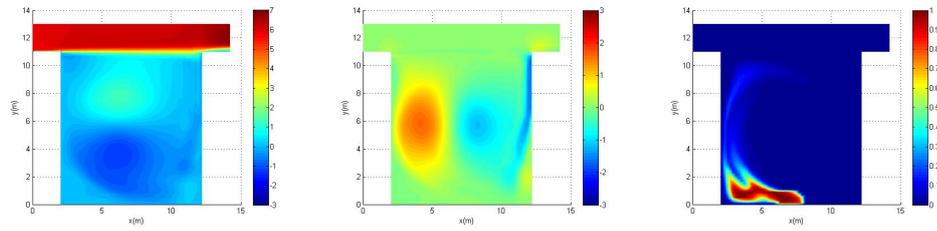


(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.7: Evolución de la dispersión: 20 s.

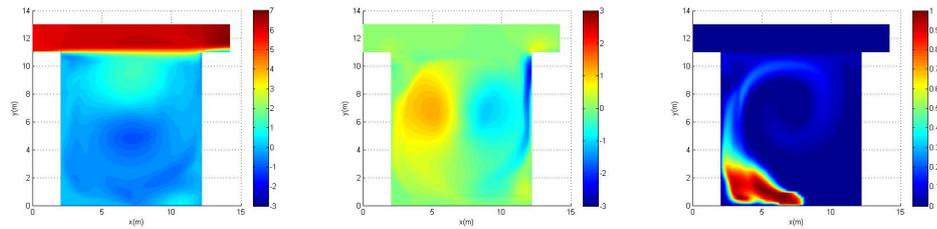
¹De izquierda a derecha en los gráficos presentados entre la [Figura 9.6](#) y la [Figura 9.11](#).

²Esta velocidad resulta ser cuatro veces superior a la mínima requerida (1.5 m/s) para garantizar que exista flujo de viento perpendicular [52].



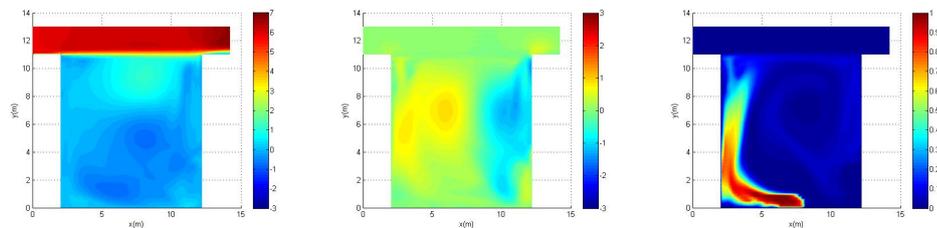
(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.8: Evolución de la dispersión: 30 s.



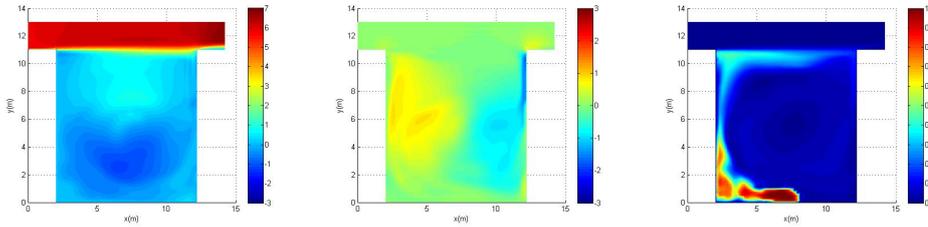
(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.9: Evolución de la dispersión: 40 s.



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

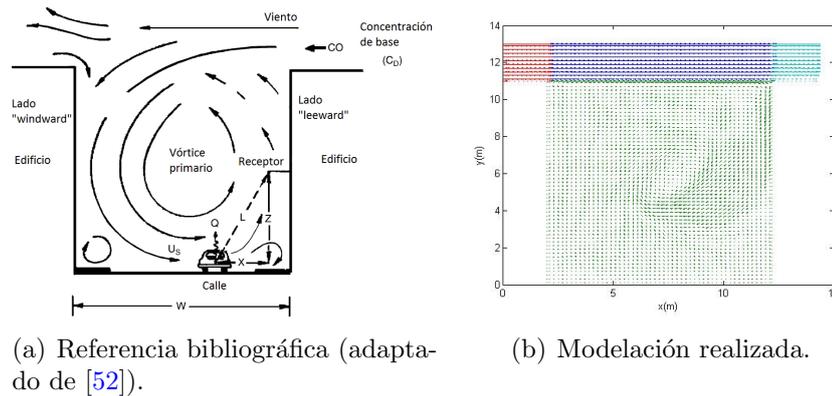
Figura 9.10: Evolución de la dispersión: 50 s.



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.11: Evolución de la dispersión: 60 s.

A partir de lo anterior se concluye que la modelación realizada es capaz de reproducir el campo de viento dentro del cañón urbano relevado en la bibliografía para condiciones de viento perpendicular [52], [45], [84], [44], [77]. Este hecho se muestra gráficamente en la [Figura 9.12¹](#).



(a) Referencia bibliográfica (adaptado de [52]).

(b) Modelación realizada.

Figura 9.12: Flujo de viento dentro de cañones urbanos para condiciones de viento perpendicular. Comparación entre resultados bibliográficos y la modelación realizada.

Lo anterior confirma que, en condiciones de viento perpendicular, uno de los lados del cañón urbano (leeward side) experimentará concentraciones de contaminantes mayores al otro (windward side). Esta afirmación se constata de forma gráfica entre la [Figura 9.6](#) y la [Figura 9.11](#).

¹El sentido del flujo de viento presente en la modelación realizada es opuesto al existente en la referencia bibliográfica citada. Más allá de lo anterior, se entiende que la comparación realizada resulta pertinente.

9.4. Patrones de dispersión

En la presente sección se proponen cuatro patrones ideales de flujo de viento y se estudian las dispersiones atmosféricas de contaminantes generadas por cada uno de ellos al cabo de una hora de simulación.

En la [Tabla 9.2](#) se describen las características de cada uno de los patrones considerados.

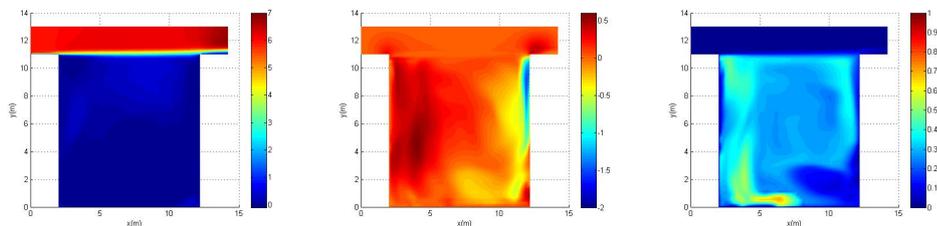
Tabla 9.2: Patrones ideales de flujo de viento.

Nombre del patrón	Dirección de viento	Velocidad de viento (m/s)
PERP ALTO	Perpendicular al cañón [†]	5.9
PARA ALTO	Paralelo al cañón [★]	5.9
PERP BAJO	Perpendicular al cañón [†]	0.6 [♣]
PARA BAJO	Paralelo al cañón [★]	0.6 [♣]

[†] De izquierda a derecha. [★] En el sentido del flujo vehicular. [♣] Esta velocidad se encuentra dentro de las asociadas a vientos bajos [52].

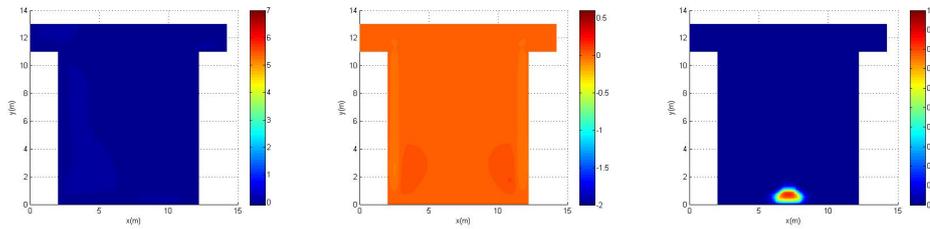
Se entiende que los patrones de viento listados en la [Tabla 9.2](#) son ideales ya que, en la práctica, seguramente se den flujos de viento con diversas inclinaciones con respecto al eje del cañón urbano bajo estudio. De todas maneras, se entiende que el estudio de la dispersión de contaminantes generada bajo estos patrones ideales de flujo de viento contribuye en la identificación de las distintas condiciones de ventilación que pueden generarse en la zona de estudio.

Entre la [Figura 9.13](#) y la [Figura 9.16](#) se muestra el flujo de viento y la dispersión de contaminantes generados en el seno del cañón urbano bajo estudio (sección transversal media) según los diferentes patrones ideales de viento considerados.



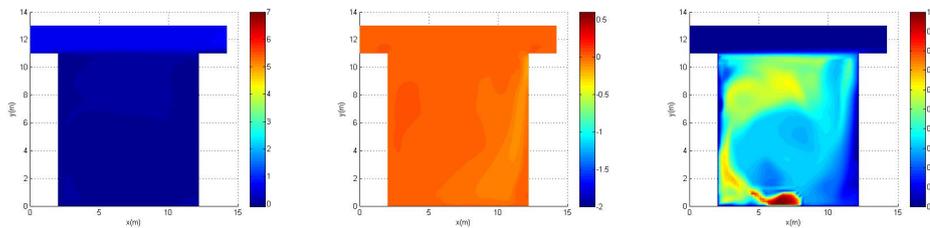
(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.13: Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PERP ALTO.



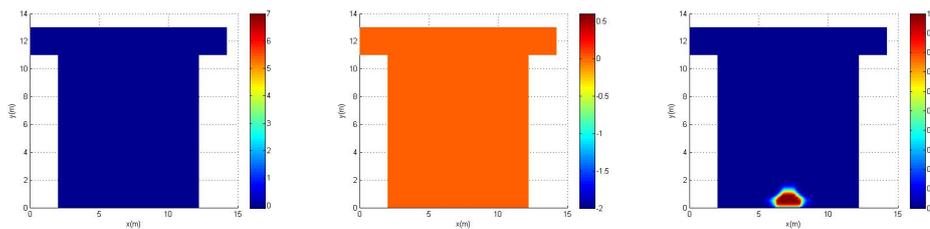
(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.14: Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PARA ALTO.



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.15: Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PERP BAJO.



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración del trazador.

Figura 9.16: Flujo de viento y dispersión de contaminantes bajo el patrón ideal PARA BAJO.

A partir de lo anterior surgen los siguientes comentarios:

- En condiciones de viento paralelo (patrones PARA ALTO y PARA BAJO), la concentración de contaminantes a nivel de calle es baja. Esto se

debe a que el flujo de viento transporta los contaminantes emitidos “calle abajo”.

- En condiciones de viento perpendicular (patrones PERP ALTO y PERP BAJO), la concentración de contaminantes es mayor cuando la intensidad del viento es menor. Cuando la velocidad del viento es alta, el vórtice generado en el seno del cañón urbano es suficiente para ventilar la pluma contaminante generada en el eje de la calle. Por el contrario, velocidades de viento bajas tienen como consecuencia el estancamiento de las emisiones generadas cerca de la superficie.

Más allá que las simulaciones anteriores fueron realizadas a lo largo de una hora, resulta interesante observar la evolución temporal de la dispersión para períodos de tiempo mayores. En este sentido, se realizó una simulación adicional para el patrón de dispersión PERP BAJO de dos horas de duración con una salida de resultados cada diez minutos. En la [Figura 9.17](#) se observa la evolución temporal de la concentración del trazador en un punto de la grilla de cálculo ubicado en la parada de ómnibus presente en la calle de estudio.

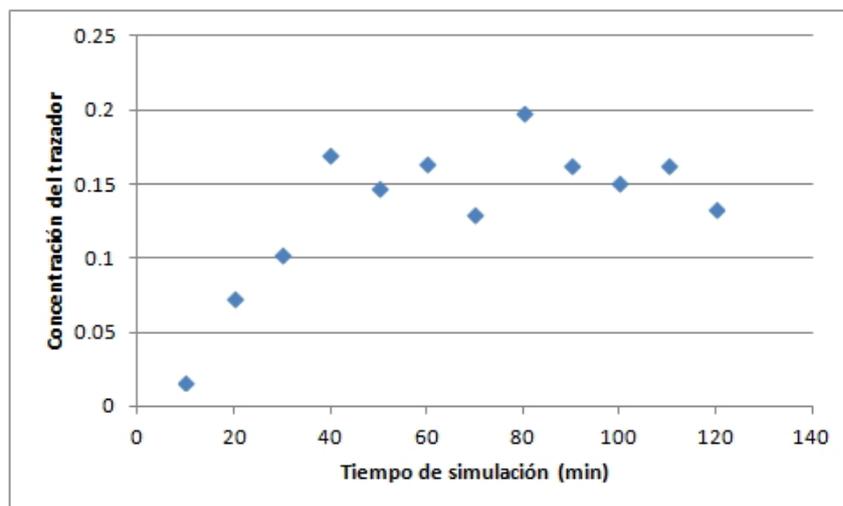


Figura 9.17: Evolución temporal de la concentración del trazador (adimensionado) para dos horas de simulación (patrón de dispersión PERP BAJO, $v= 0.6$ m/s).

La [Figura 9.17](#) indica que a partir de los 40 minutos de simulación aproximadamente, la concentración modelada del trazador tiende a estabilizarse.

9.5. Comparación entre concentraciones medidas y modeladas

Tal como se dijo en la introducción del presente capítulo, se realizaron mediciones de flujo vehicular y concentración de monóxido de carbono en la zona de estudio. Además, se obtuvo información sobre el flujo de viento (dirección y velocidad) a partir de la consulta del sitio web del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET)¹ durante el muestreo, de forma tal de contar también con esta información.

Mientras que el flujo vehicular fue determinado de forma manual, para la medición de CO se utilizó el equipo que se muestra en la **Figura 9.18**. Se trata de un instrumento de medición capaz de registrar la concentración ambiental de CO, gas combustible, O₂ y H₂S. Dicho dispositivo registró la concentración ambiental de CO cada un minuto durante el muestreo en un punto fijo ubicado frente a la parada de ómnibus existente en la calle de estudio.



Figura 9.18: Equipo utilizado para la medición de CO (calibración efectuada el 30/11/2015 válida hasta el 28/05/2016) (Sitio web de la marca comercial: <http://www.rkiinstruments.com/pages/gx2009.htm>).

En la **Tabla 9.3** se presenta la información relevada durante el muestreo.

Tabla 9.3: Información relevada durante el muestreo.

Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Flujo de ómnibus (veh/h)	Flujo de camiones (veh/h)	Flujo de autos (veh/h)	Flujo de motos (veh/h)	Concentración media de CO (mg/m ³)
10/12/2015	15	SW	6.1	142	28	354	54	3.2
10/12/2015	16	SW	4.2	158	14	344	42	1.4
10/12/2015	17	SSE	4.2	104	14	304	52	0.5
10/12/2015	18	SSE	3.1	130	6	308	34	0.9

Con el fin de comparar la información relevada durante el muestreo con los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo *caffa3d.MBRi*, se construyeron cuatro corridas del modelo con flujos de viento análogos a los relevados durante el muestreo (cada corrida construida representó una hora de muestreo con flujos de viento constantes). Luego, la emisión de contaminante fue escalada para cada escenario a partir de la utilización de la **Ecuación 9.1**.

¹Sitio web del INUMET: <http://www.meteorologia.com.uy/>.

$$E_i(mg) = FE_i(g/veh/km) * L(m) * NV_i(veh) \quad (9.1)$$

Donde:

- E_i : Emisión vehicular media de CO para la hora i .
- FE_i : Factor de emisión medio de CO para la hora i calculado como un promedio ponderado de los factores de emisión asumidos para cada tipo de vehículo en función del flujo vehicular de la hora i .
- L : Largo de la calle (90 m).
- NV_i : Cantidad simultánea media de vehículos en la calle para la hora i .

La cantidad simultánea media de vehículos en la calle se calcula según la **Ecuación 9.2**.

$$NV_i(veh) = \frac{2 * L(m)}{LV_i(m)} \quad (9.2)$$

Donde:

- LV_i (m): Largo promedio de los vehículos para la hora i . Este parámetro se calcula como el promedio ponderado de los largos asumidos para cada uno de los tipos de vehículo¹ en función del flujo vehicular de la hora i .

Luego, para cada hora, la emisión en cada una de las celdas emisoras será igual al cociente entre la emisión vehicular media y la cantidad de celdas emisoras de la grilla. Finalmente, la concentración de CO en el dominio de estudio se determina dividiendo la emisión modelada entre el volumen de cada celda de la grilla de cálculo ².

Los factores de emisión considerados se listan en la **Tabla 9.4**.

Según [52], [64], el monóxido de carbono puede ser considerado como un gas inerte dentro de cañones urbanos. Por lo tanto, la representación del CO como un trazador inerte dentro del modelo de dispersión utilizado es juzgada como razonable.

¹Considerando los modelos más vendidos en el mercado local [6].

²0.008 m³.

Tabla 9.4: Factores de emisión considerados.

Tipo de vehículo	FE CO (g/veh/km)	Referencia
Camiones y ómnibus	4.5	[51]
Autos	3.8	[54], [80], [86], [65], [16], [30], [35]
Motos	14.7	[82]

Según se aprecia en la **Figura 9.19**, durante el muestreo existieron flujos de viento predominantemente paralelos¹ (horas 15 y 16) y perpendiculares (horas 17 y 18).

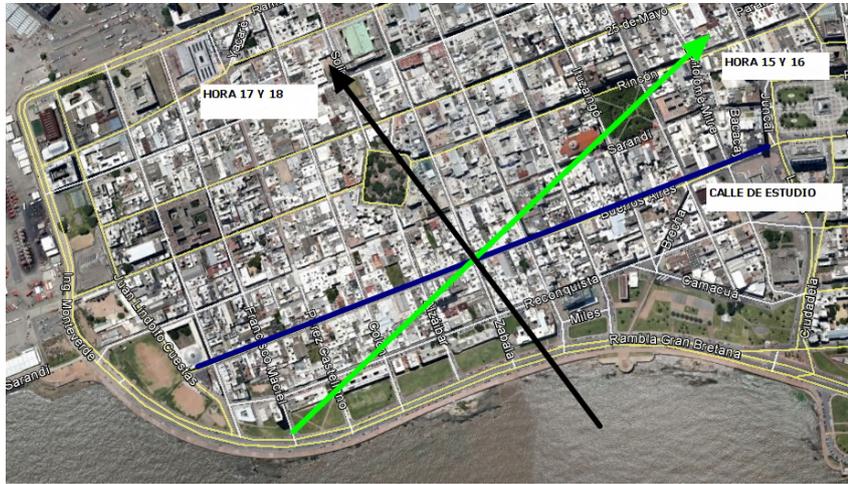


Figura 9.19: Direcciones de viento registradas durante el muestreo.

Para los casos de viento perpendicular, en la modelación se utilizó la velocidad de viento registrada por el INUMET ya que se entiende que el flujo de viento que ingresa a la zona de estudio por encima de los edificios linderos a la calle (a más de 11 metros de altura) se corresponde con el medido. Por el contrario, para las horas de viento paralelo, se asumió un perfil de velocidades de viento potencial siguiendo la línea de [14] (**Ecuación 9.3**).

$$\frac{u(z)}{u_H} = \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha \quad (9.3)$$

Donde:

- $u(z)$: Velocidad del viento (m/s) a la altura z .

¹Dirección de viento con una inclinación menor a 30° con respecto al eje del cañón urbano.

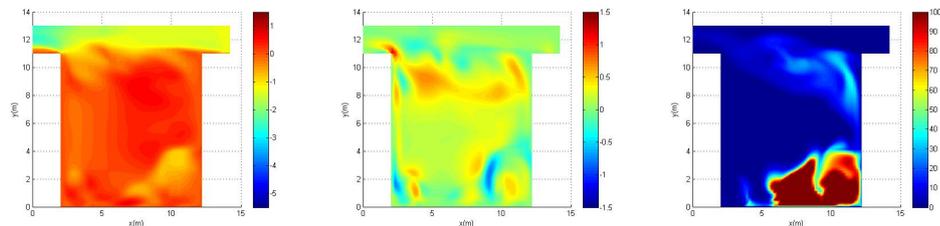
- u_H : Velocidad del viento (m/s) a la altura de los edificios (H).
- α : Constante que depende del tipo de terreno (se asume igual a 0.3 [14]).

Cabe destacar que en las horas de viento paralelo, el perfil potencial de velocidad de viento será utilizado para estimar la velocidad del flujo a un metro de altura. Luego, dicho valor será utilizado en la modelación asumiendo un perfil uniforme de velocidades de viento. De lo anterior se desprende que, en el marco del presente trabajo, las velocidades de viento modeladas serán uniformes quedando para futuras investigaciones el uso de perfiles de velocidad de viento variables con la altura.

En la [Tabla 9.5](#) se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo para cada uno de los escenarios analizados considerando una hora de dispersión. Dichos resultados se muestran de forma gráfica entre la [Figura 9.20](#) y la [Figura 9.23](#).

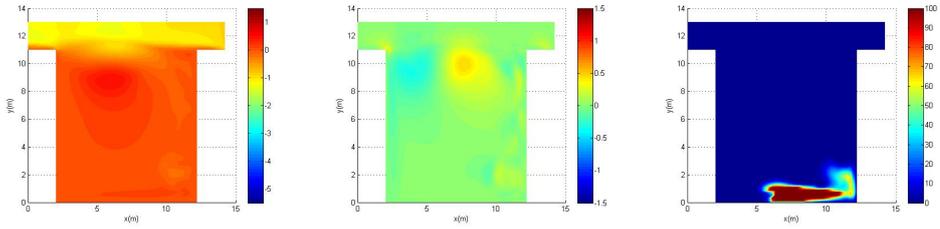
Tabla 9.5: Resultados de la modelación de los escenarios relevados.

Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Concentración media de CO (mg/m ³)
10/12/2015	15	SW	6.1	52.9
10/12/2015	16	SW	4.2	0.01
10/12/2015	17	SSE	4.2	4.62
10/12/2015	18	SSE	3.1	0.73



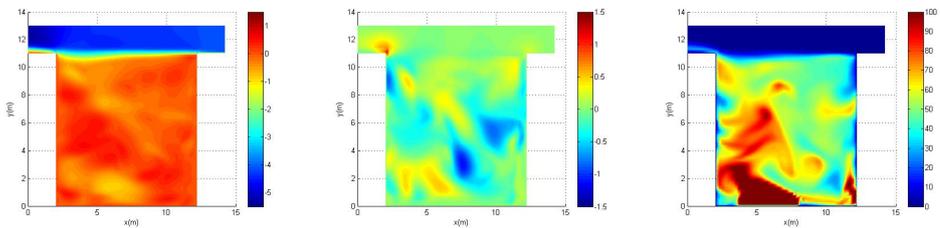
(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s) (sección media del cañón). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s) (sección media del cañón). (c) Concentración modelada de CO (mg/m³) (sección media del cañón).

Figura 9.20: Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 15.



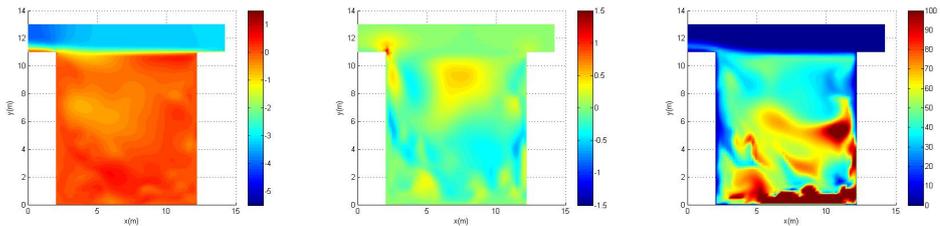
(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración modelada de CO (mg/m^3). (sección media del cañón). (sección media del cañón).

Figura 9.21: Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 16.



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración modelada de CO (mg/m^3). (sección media del cañón). (sección media del cañón).

Figura 9.22: Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 17.



(a) Velocidad del viento en dirección transversal (m/s). (b) Velocidad del viento en dirección vertical (m/s). (c) Concentración modelada de CO (mg/m^3). (sección media del cañón). (sección media del cañón).

Figura 9.23: Flujo de viento y dispersión de contaminantes, hora 18.

De lo anterior se desprende que la herramienta de modelación presentada en las condiciones de desarrollo actuales no es capaz de reproducir los valores medidos de forma razonable presentándose las diferencias más importantes entre los valores medidos y modelados para flujos de viento paralelos al eje de la calle. Igualmente, cabe destacar que las mediciones de CO no fueron

realizadas en el punto medio de la calle analizada sino cerca de una de sus esquinas (posición coincidente con la parada de ómnibus existente en la zona de estudio). Por lo tanto, el flujo de viento proveniente de las calles aledañas puede haber incidido en las concentraciones de CO registradas por el equipo utilizado. Se recuerda que dichos efectos no fueron modelados.

De todas maneras, se entiende que la cantidad de horas registradas no es suficiente para juzgar de forma definitiva al modelo desarrollado. Por lo tanto, puede resultar interesante para futuras investigaciones el desarrollo de una campaña de medición extensa a nivel de calle de forma tal de poder validar el modelo propuesto con herramientas estadísticas. Además de lo anterior, se cree necesario perfeccionar la herramienta de modelación aquí presentada incorporando flujos de viento variables con la altura, flujo de viento en vías de tránsito aledañas, entre otras mejoras.

Con las salvedades mencionadas en el párrafo anterior, en la siguiente sección el modelo desarrollado será utilizado para modelar posibles escenarios futuros de emisiones en el cañón urbano bajo estudio. Dicho análisis de escenarios será realizado a modo ilustrativo y con el objetivo de evaluar tendencias, no de determinar valores de concentración ambiental de CO.

9.6. Análisis de escenarios

Según la propuesta nacional de estándares de calidad del aire [8], la concentración máxima admisible de monóxido de carbono en aire, para una hora de período de muestreo, es 30 mg/m^3 . En la citada normativa se destaca que dicho valor límite no podrá superarse más de tres veces al año.

En la presente sección se utilizará el modelo descrito anteriormente para el análisis de escenarios ficticios que pudieran provocar la generación de niveles de CO en aire superiores al estándar. En particular, se investigará el efecto en los niveles ambientales de CO de un cambio paulatino de la composición del flujo vehicular hacia un aumento de la cantidad de vehículos particulares en el cañón urbano bajo estudio.

Como resultado de este análisis se obtendrán composiciones de flujo vehicular límites para no superar la propuesta de estándares vigente en cuanto a las concentraciones ambientales de CO. De todas maneras, se destaca que dichos límites son presentados a título ilustrativo ya que, como se mostró en la sección anterior, la herramienta de modelación aquí desarrollada necesita ser sometida a un proceso exhaustivo de validación como paso previo a su correcta utilización.

Para la realización de este análisis se supondrá que el flujo de viento reinante se corresponde con el registrado a las 17 h durante la jornada de muestreo. Las concentraciones modeladas se evaluarán nuevamente en el punto en donde se registraron los niveles de CO durante el muestreo.

Como punto de partida se considerará el flujo vehicular relevado durante la jornada de muestreo correspondiente a la hora en cuestión. A continuación se procederá a incrementar la proporción de vehículos particulares en dicho flujo de forma sucesiva hasta que la modelación arroje concentraciones de CO superiores a la máxima permitida por la propuesta nacional de estándares de calidad del aire.

Dicho incremento se hará manteniendo la cantidad total de personas transportadas. En este sentido, fue necesario definir un número medio de personas transportadas por cada tipo de vehículo (Tabla 9.6).

Tabla 9.6: Cantidad de personas transportadas por cada tipo de vehículo [61].

Tipo de vehículo	Cantidad de personas transportadas	Referencia
Camiones	1	Hipótesis propia
Autos	1.4	[61]
Motos	1	[61]
Ómnibus	22	[61]

A partir de lo anterior se construyen los escenarios de flujo vehicular a evaluar que se muestran en la **Tabla 9.7**.

Tabla 9.7: Escenarios de flujo vehicular.

Escenario	Autos (%)	Camiones (%)	Ómnibus (%)	Motos (%)	Cantidad de personas transportadas
Base	64	3	22	11	2780
O50AM	51	1	4	44	2780
O75AM	49	1	1	49	2780
O100AM	48	1	0	51	2780
O100A	97	1	0	3	2780
O100M	11	1	0	88	2780
OA100M	0	1	0	99	2780
OAC100M	0	0	0	100	2780

A continuación se describen los escenarios de flujo vehicular analizados:

- Base: flujo vehicular registrado durante la hora 17 el día de muestreo.
- O50AM: reducción del flujo de ómnibus en un 50 %. Reemplazo de ómnibus equitativo entre autos y motos.
- O75AM: reducción del flujo de ómnibus en un 75 %. Reemplazo de ómnibus equitativo entre autos y motos.
- O100AM: reducción del flujo de ómnibus en un 100 %. Reemplazo de ómnibus equitativo entre autos y motos.
- O100A: reducción del flujo de ómnibus en un 100 %. Reemplazo de ómnibus por autos.
- O100M: reducción del flujo de ómnibus en un 100 %. Reemplazo de ómnibus por motos.
- OA100M: reducción del flujo de ómnibus y de autos en un 100 %. Reemplazo de ómnibus y autos por motos.
- OAC100M: reducción del flujo de ómnibus, autos y camiones en un 100 %. Reemplazo de ómnibus, autos y camiones por motos.

Los resultados obtenidos se muestran de forma gráfica entre la [Figura 9.24](#) y la [Figura 9.31](#). Además, dichos resultados se resumen en la [Tabla 9.8](#).

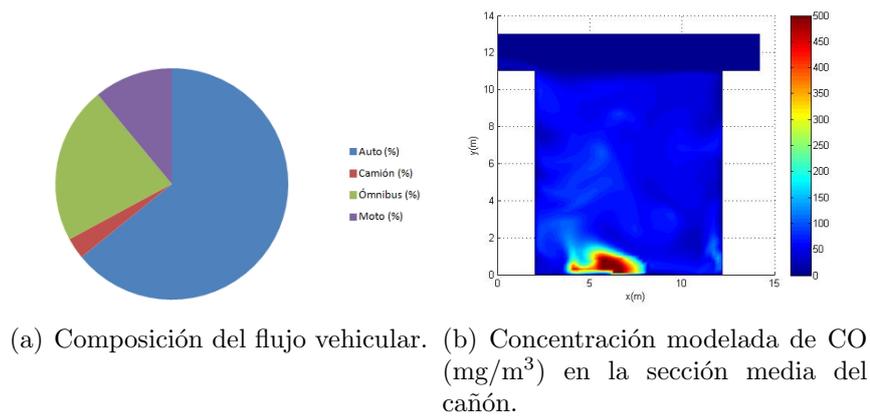


Figura 9.24: Escenario Base.

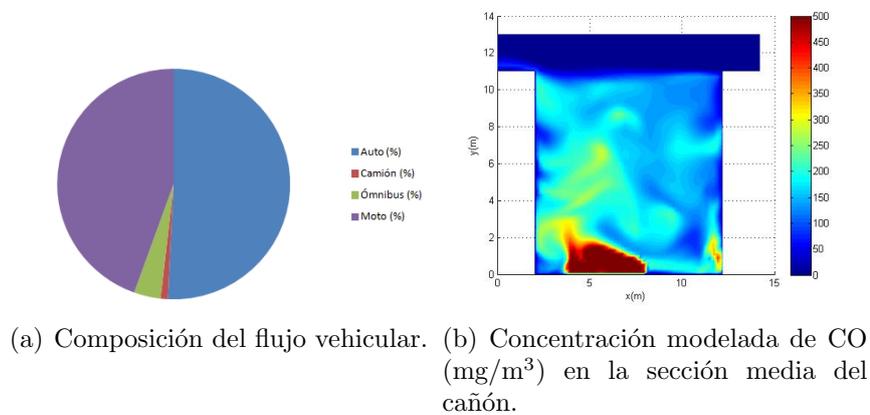
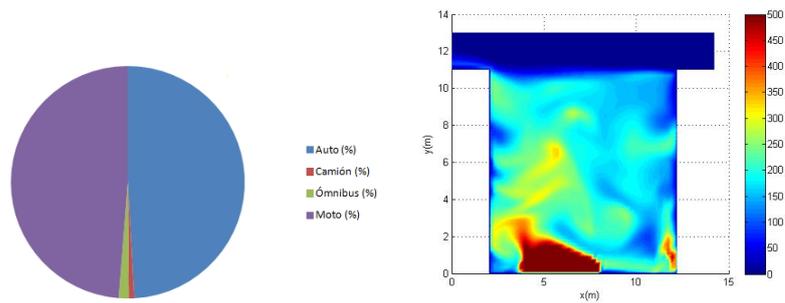
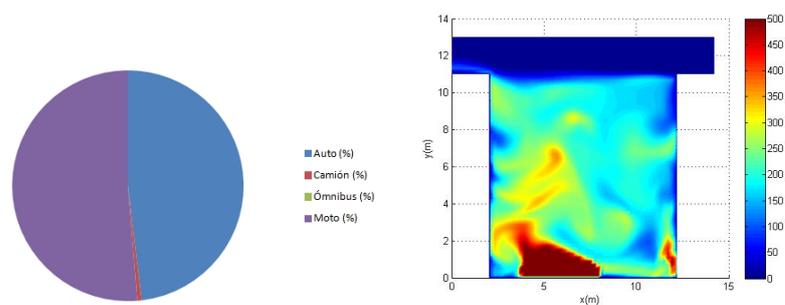


Figura 9.25: Escenario O50AM.



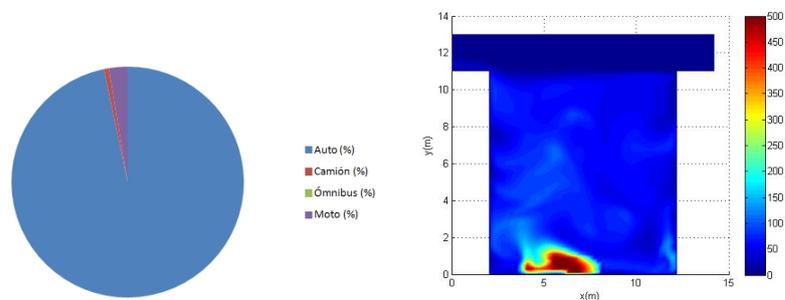
(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m^3) en la sección media del cañón.

Figura 9.26: Escenario O75AM.



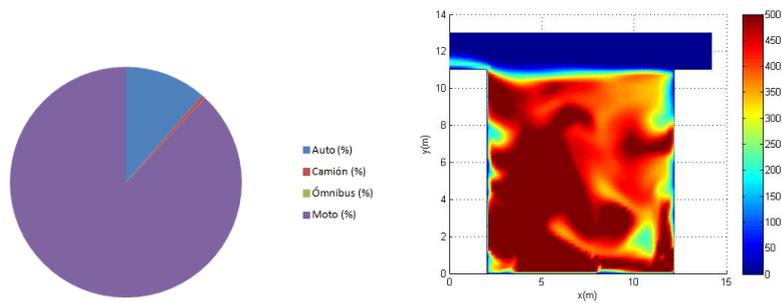
(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m^3) en la sección media del cañón.

Figura 9.27: Escenario O100AM.



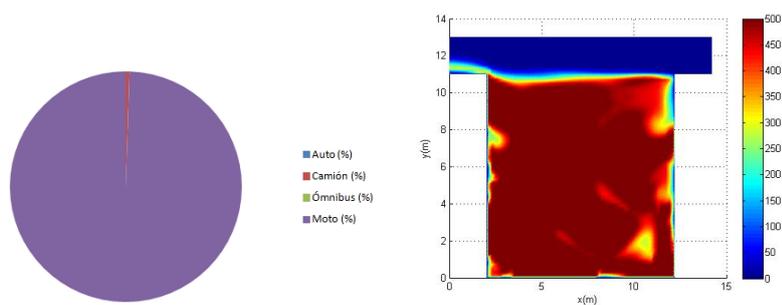
(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m^3) en la sección media del cañón.

Figura 9.28: Escenario O100A.



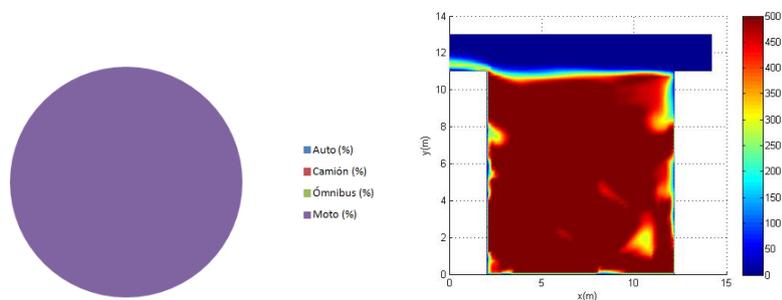
(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m³) en la sección media del cañón.

Figura 9.29: Escenario O100M.



(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m³) en la sección media del cañón.

Figura 9.30: Escenario OA100M.



(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m³) en la sección media del cañón.

Figura 9.31: Escenario OAC100M.

Tabla 9.8: Concentraciones de CO modeladas para cada escenario de flujo vehicular analizado.

Escenario	Concentración modelada de CO (mg/m ³)
Base	4.62
O50AM	13.6
O75AM	15.8
O100AM	17.4
O100A	5.2
O100M	37.6
OA100M	49.0
OAC100M	50.2

A partir de lo anterior se concluye que el incremento del uso de vehículos particulares en detrimento del uso del transporte público, para un número constante de personas transportadas, incrementa los niveles ambientales de CO pudiéndose generar niveles mayores a la propuesta de estándares nacionales. Se cree razonable afirmar nuevamente que los resultados aquí presentados son meramente ilustrativos ya que, según se subrayó con anterioridad, el modelo empleado requiere ser validado. De todas formas, el ejercicio llevado a cabo en la presente sección permite mostrar posibles aplicaciones futuras de esta herramienta de modelación de dispersión de emisiones vehiculares y muestra una tendencia clara hacia el aumento de los niveles ambientales de CO para un incremento del uso de vehículos particulares.

Capítulo 10

Discusión de resultados

10.1. Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en capítulos anteriores. En primer lugar, se comparan los tamaños muestrales utilizados en esta tesis con los empleados en trabajos internacionales similares. Luego, se evalúa la norma verificada por los vehículos livianos y pesados de la flota nacional a partir de los factores de emisión calculados. Seguidamente se analizan los vínculos entre las emisiones atmosféricas y los demás parámetros registrados para vehículos pesados y livianos. Luego se evalúan los resultados de la modelación de la dispersión atmosférica de emisiones vehiculares realizada incluyendo los escenarios ficticios de flujo vehicular analizados. Finalmente, la variación de las concentraciones de contaminantes en cañones urbanos con la altura es comentada en relación con la ubicación en el espacio de una posible estación de monitoreo dedicada a evaluar dichos niveles.

10.2. Tamaño muestral

La [Figura 10.1](#) y la [Figura 10.2](#) indican que el número de muestras utilizado se ajusta de forma razonable a los considerados en trabajos bibliográficos relevantes y citados en capítulos anteriores.

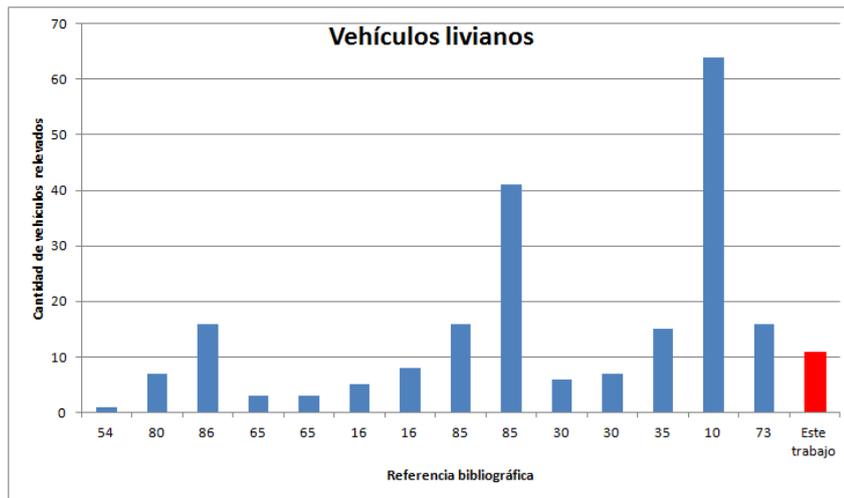


Figura 10.1: Número de muestras de vehículos livianos, comparación con trabajos bibliográficos.

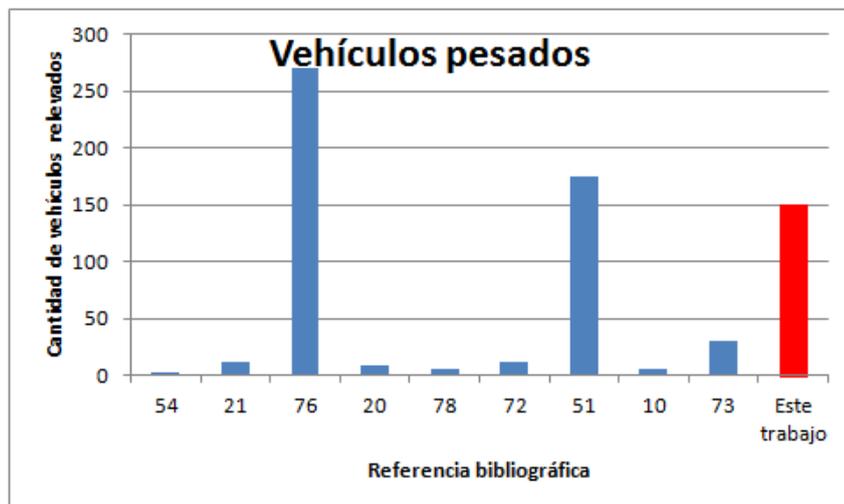


Figura 10.2: Número de muestras de vehículos pesados, comparación con trabajos bibliográficos.

10.3. Norma de emisión de la flota nacional analizada

La determinación de factores de emisión de diversos contaminantes atmosféricos realizada en el marco del caso de aplicación del presente trabajo permite ubicar, a la flota nacional analizada, dentro de alguna de las normas de emisión formuladas por la Unión Europea. Se destaca que esta tarea se enmarca dentro de la propuesta nacional de estándares de emisiones de fuentes móviles [9].

En la [Tabla 10.1](#) y en la [Tabla 10.2](#) se resumen los factores de emisión medios calculados con sus respectivos intervalos de confianza al 95 %, para vehículos livianos y pesados respectivamente.

Tabla 10.1: Factores de emisión medios e intervalos de confianza al 95 % calculados para la flota de vehículos livianos analizada.

Contaminante	FE medio (g/km)	Intervalo de confianza al 95 % (g/km)
CO	3.05	0.90
NO	0.07	0.03

Tabla 10.2: Factores de emisión medios de NO e intervalos de confianza al 95 % calculados para la flota de vehículos pesados analizada.

Tipo de vehículo	FE medio ralentí (g/kWh)	FE medio ciudad (g/kWh)	FE medio ruta (g/kWh)	Intervalo de confianza 95 % (g/kWh)
Camiones	4.9	11.5	12.1	0.42
Ómnibus	5.5	12.9	13.6	0.50

A partir de los valores que figuran en la [Tabla 10.1](#) y en la [Tabla 10.2](#) se concluye que, en términos medios, los vehículos livianos ensayados no verifican la norma europea más antigua (EURO 1) de acuerdo a las emisiones de CO. De todas maneras, podrían llegar a verificar la norma EURO 3 en función del intervalo de confianza estimado para dichas emisiones. En cuanto a las emisiones de NO, los factores de emisión medios verifican la norma EURO 4. Si se tienen en cuenta los intervalos de confianza estimados para este contaminante, los vehículos livianos podrían verificar la norma EURO 3 en lugar de la EURO 4 así como también la norma EURO 6¹. En cuanto a la flota de vehículos pesados, los factores de emisión medios calculados indican que, en condiciones

¹En este caso se utilizaron las normas EURO correspondientes a vehículos a gasolina ya que, de los 11 vehículos livianos ensayados, 10 utilizan este tipo de combustible.

de ralentí, los camiones verifican la norma EURO III y los ómnibus la norma EURO II. Si se tienen en cuenta los intervalos de confianza estimados, los camiones y los ómnibus ensayados podrían verificar la norma EURO III o la EURO II.

Resulta interesante evaluar el cumplimiento de las normas de emisión de la Unión Europea por parte de los vehículos livianos analizados en función de su antigüedad. En este sentido, en la **Figura 10.3** se muestra el factor de emisión calculado para cada vehículo liviano ensayado en función de su antigüedad en conjunto con las normas de emisión de la Unión Europea.

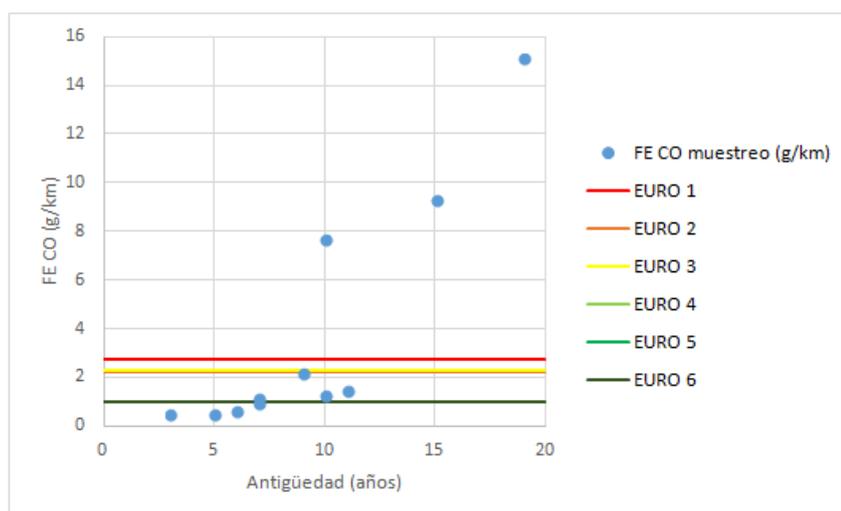


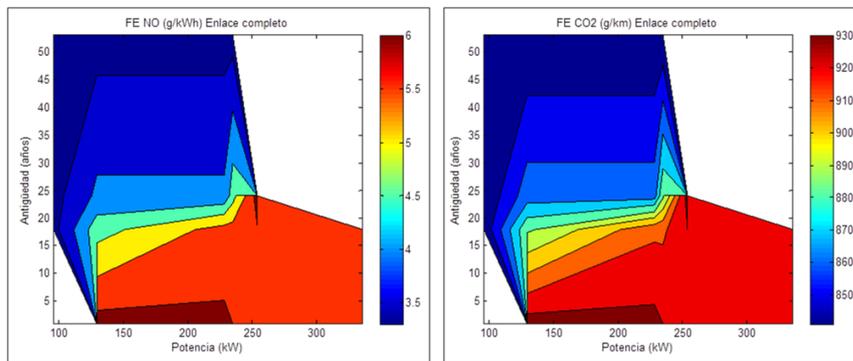
Figura 10.3: Factor de emisión de CO en función de la antigüedad para cada vehículo liviano ensayado y normas de emisión de la Unión Europea.

En la **Figura 10.3** se observa que, dentro de la flota nacional de vehículos livianos, existen vehículos que no alcanzan a cumplir con la norma europea más antigua y otros que cumplen con los estándares más exigentes. El mejor desempeño ambiental de la flota moderna resulta evidente para las emisiones de monóxido de carbono. El deterioro ambiental de los vehículos comienza a observarse a partir de los 7 años de antigüedad de los mismos aproximadamente. Teniendo en cuenta la antigüedad de la flota vehicular montevideana¹, es posible afirmar que el 40.6% de los vehículos livianos estarían en condiciones de verificar las normas europeas más exigentes en cuanto a las emisiones de CO (EURO 4, 5 y 6).

¹Sitio web de Sucive: <https://www.sucive.gub.uy/>

10.4. Vínculo entre las emisiones y los demás parámetros de los vehículos

Para la muestra de vehículos pesados ensayada se evaluó el vínculo existente entre los factores de emisión calculados para NO y CO₂ y la antigüedad y la potencia de dichos vehículos utilizando la metodología de análisis de clusters. Los resultados obtenidos mediante el análisis de clusters señalan que los vehículos más nuevos y más potentes tienden a presentar mayores emisiones de NO y de CO₂ (Figura 10.4). Los resultados obtenidos son juzgados como razonables teniendo en cuenta que los vehículos ensayados no contaban con mantenimiento de sus sistemas de control de emisiones (en caso de tenerlos) según se constató en la encuesta realizada a los conductores de los mismos durante el muestreo. Se entiende que el correcto uso de sistemas de control de emisiones podría producir una disminución de los factores de emisión de los vehículos con menores antigüedades.



(a) Monóxido de nitrógeno (NO). (b) Dióxido de carbono (CO₂).

Figura 10.4: Resultados del análisis de clusters efectuado para la muestra de vehículos pesados.

Por otra parte, para la muestra de vehículos livianos ensayada se exploró la posibilidad de realizar agrupamientos de registros en función de los valores de algunos de los parámetros monitoreados aplicando también la metodología de análisis de clusters. Con este análisis se buscó establecer relaciones cualitativas entre las emisiones atmosféricas y los demás parámetros registrados durante el muestreo.

A partir de la utilización del método de enlace completo, se determinó que

los momentos de alto rendimiento del combustible (8.7% del tiempo) se corresponden con bajas emisiones atmosféricas, altas velocidades, pendientes negativas del terreno y bajas aceleraciones, potencias específicas y productos aceleración*velocidad. Además, también se identificó la existencia de un pequeño número de registros (2.1% del tiempo) durante el cual los vehículos experimentan altas emisiones atmosféricas y bajos rendimientos. Estos dos agrupamientos se comparan gráficamente en la **Figura 10.5**. Para la realización de este gráfico, los valores medios de cada parámetro dentro de cada grupo fueron divididos entre los valores medios de dichos promedios entre los dos agrupamientos evaluados. Por lo tanto, los valores mostrados en la **Figura 10.5** son adimensionados.

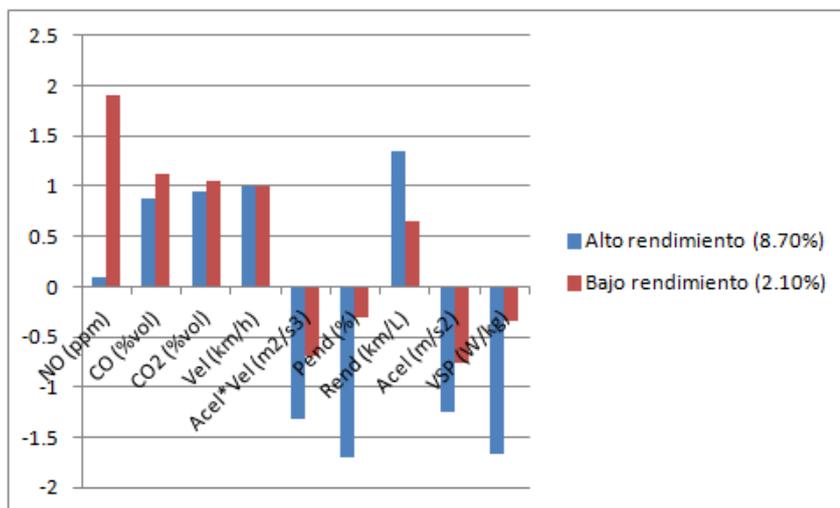


Figura 10.5: Comparación gráfica entre registros de alto y bajo rendimiento del combustible.

Más allá de lo anterior, según se muestra en el capítulo del caso de aplicación correspondiente al análisis de las mediciones de emisiones efectuadas sobre vehículos livianos, los registros con alto rendimiento del combustible podrían estar asociados a diferentes escenarios de emisiones atmosféricas según el método de agrupamiento aplicado. Lo anterior sugiere la necesidad de ampliar el número de registros de forma tal de poder obtener conclusiones robustas que no dependan del método matemático de agrupamiento de registros que se aplique.

10.5. Modelación de la dispersión de emisiones vehiculares

En el marco del caso de aplicación del presente trabajo se utilizó un modelo numérico computacional para estudiar el comportamiento de la dispersión de contaminantes en el seno de un cañón urbano ubicado en la Ciudad Vieja de Montevideo. Más allá que la validación del modelo desarrollado no pudo ser efectuada en el presente trabajo debido a la ausencia de una serie de mediciones representativa, se considera que, en forma cualitativa, pudo reproducirse el flujo de viento dispersivo dentro del cañón urbano bajo estudio a juzgar por las referencias bibliográficas consultadas. Cabe aclarar que la validación del mencionado modelo de dispersión no estaba prevista en el marco de esta tesis. Una vez desarrollado el modelo, el mismo fue utilizado para la evaluación de escenarios ficticios de emisiones correspondientes a diferentes composiciones del flujo vehicular circulante manteniendo constante el número de personas transportadas. A partir de dicho análisis surge con claridad la tendencia al aumento de las concentraciones ambientales de CO para flujos vehiculares con mayores proporciones de vehículos particulares (Figura 10.6 y Figura 10.7). Más allá que los valores numéricos entregados por el modelo no estén validados, las tendencias cualitativas encontradas concuerdan con lo esperable de acuerdo a la bibliografía analizada.

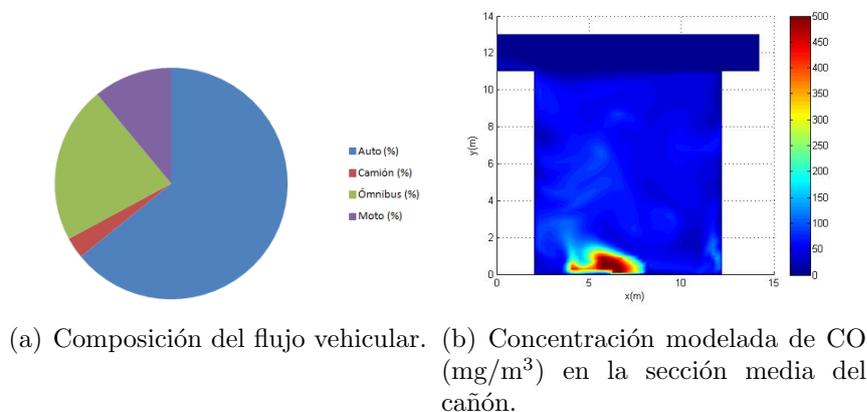
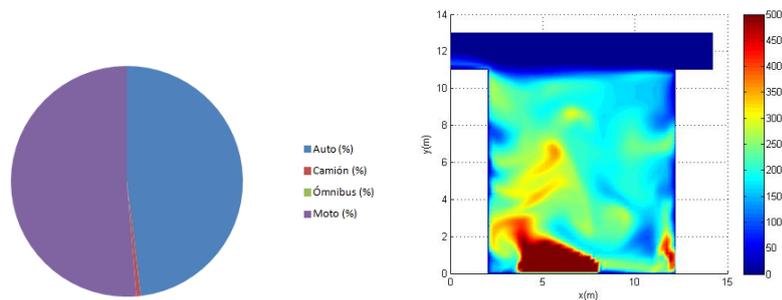


Figura 10.6: Composición actual del flujo vehicular circulante.



(a) Composición del flujo vehicular. (b) Concentración modelada de CO (mg/m^3) en la sección media del cañón.

Figura 10.7: Reducción del flujo de ómnibus en un 100%. Reemplazo de ómnibus equitativo entre autos y motos.

Otra aplicación interesante de la herramienta de modelación desarrollada resulta ser la evaluación de la variación en altura de las concentraciones modeladas. Se entiende que, en caso de considerarse necesaria la instalación de una estación de monitoreo en un cañón urbano con el objetivo de evaluar la calidad del aire en su seno, la ubicación en altura de la misma deberá decidirse atendiendo aspectos vinculados a la seguridad de los equipos pero también a los niveles de contaminantes capaces de ser registrados. A modo de ejemplo, en la [Figura 10.9](#) se muestra la reducción porcentual en altura de la concentración de un trazador (cuya concentración de emisión es 1) emitido en el seno del cañón urbano estudiado en el presente trabajo bajo el patrón de dispersión identificado como PERP BAJO. La altura inicial considerada es 1.5 m ([Figura 10.8](#)).

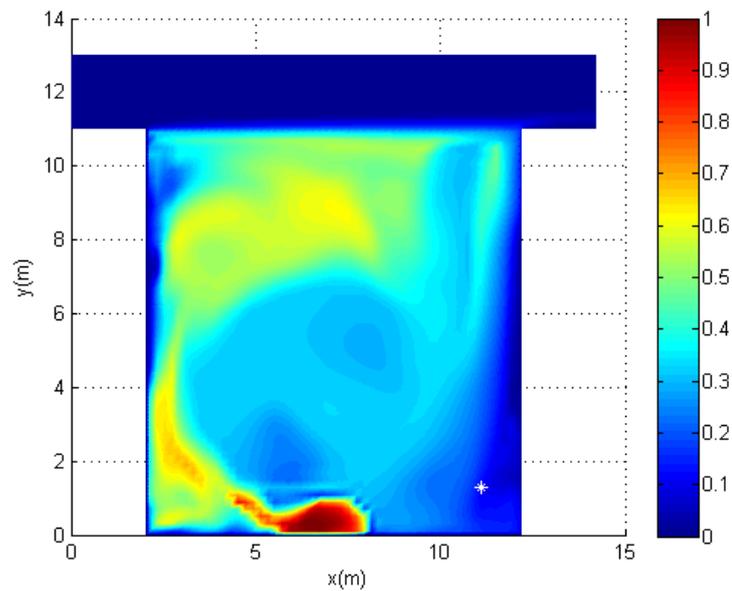


Figura 10.8: Ubicación del punto de modelación considerado inicialmente (asterisco de color blanco) para la evaluación de la variación de la concentración del trazador en altura.

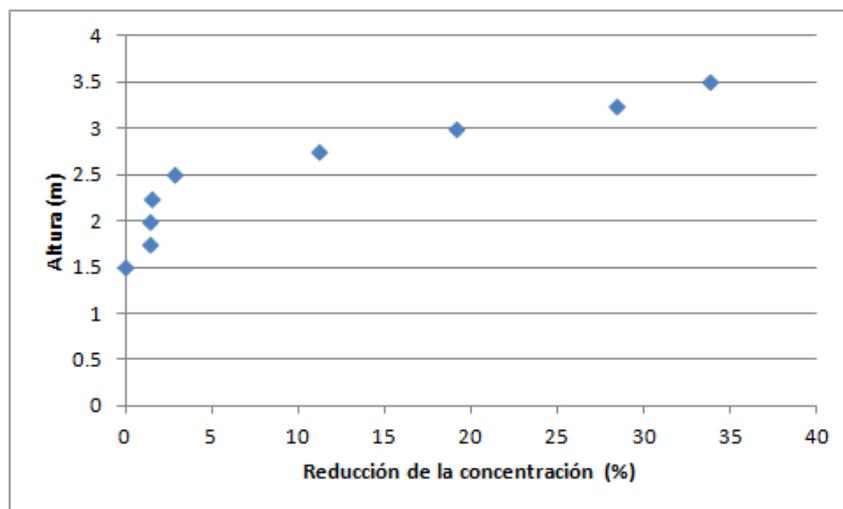


Figura 10.9: Porcentaje de reducción de la concentración con la altura (altura inicial=1.5 m).

La **Figura 10.9** muestra que a los 3.5 m de altura, la concentración se redujo un 34% aproximadamente con respecto a la concentración modelada a 1.5 m de altura sobre el nivel de calle. Se destaca además que esta estimación es conservadora teniendo en cuenta que la diferencia de temperaturas entre las emisiones vehiculares y el aire ambiente, no modelada en este trabajo,

tendería a aumentar la ventilación de dichas emisiones disminuyendo aún más sus niveles en altura.

Capítulo 11

Conclusiones y líneas de trabajo futuras

11.1. Conclusiones

En el presente trabajo se caracterizaron las emisiones vehiculares de una muestra de vehículos livianos y pesados de la flota nacional actualmente en circulación. En el caso de los vehículos livianos, la muestra estuvo integrada por 11 unidades mientras que en el caso de los vehículos pesados, la muestra estuvo compuesta por 150 unidades (123 camiones, 22 ómnibus y 5 minivans). La mencionada caracterización consistió en el cálculo de factores de emisión de CO, NO y CO₂ para la flota de vehículos livianos y de NO y CO₂ para la de vehículos pesados. Luego, se ajustaron distribuciones de probabilidad a los factores de emisión medios, actividad que permitió la estimación de intervalos de confianza, al 95 %, para dichos factores de emisión y su posterior comparación con normas internacionales. Seguidamente, se llevó a cabo un análisis de clusters de los registros lo que permitió la determinación, en forma cualitativa, de los parámetros de los vehículos más influyentes en las emisiones atmosféricas generadas por los mismos.

Por otra parte, se utilizó un modelo numérico computacional para el estudio de la dispersión de los contaminantes de origen vehicular en un cañón urbano de la Ciudad Vieja de Montevideo. A partir del modelo aplicado, se logró reproducir el flujo de viento dentro del cañón urbano para condiciones de viento perpendicular. Además, el citado modelo fue utilizado a modo de herramienta

de gestión de la calidad del aire, estimando el efecto en la misma de cambios en la composición del flujo vehicular circulante. Por último, se evaluó el cambio en altura de la concentración de un trazador emitido en el cañón urbano bajo estudio de forma tal de contribuir en la selección del sitio de colocación de una hipotética estación de monitoreo orientada a fuentes vehiculares.

11.2. Líneas de trabajo a futuro

A partir de la realización del presente trabajo surgen las siguientes líneas de investigación a futuro:

- Validación del modelo de dispersión desarrollado. Se entiende que esta tarea puede llevarse a cabo a partir de la realización de un muestreo intensivo de concentraciones ambientales de CO, flujo vehicular y de viento de metodología similar al descrito en el presente documento.
- Perfeccionamiento del modelo de dispersión desarrollado en varios aspectos. Entre ellos se destacan: modelación de flujos de viento variables con la altura, inclusión de la temperatura de las emisiones gaseosas, incorporación de nuevas calles y morfologías de edificios en el marco de la grilla de cálculo.
- Perfeccionamiento de las técnicas de medición de emisiones vehiculares.
- Aumento de la cantidad de vehículos ensayados con el fin de optimizar los resultados de los análisis de clusters y de reducir los intervalos de confianza de los factores de emisión.
- Investigación de la normativa actual de construcción de edificios en cuanto a las alturas máximas permitidas evaluando la posible incorporación en la misma de aspectos vinculados a la calidad del aire.

Referencias bibliográficas

- [1] Lineamientos generales para el programa de control de gases contaminantes de vehículos 0 km. Documento técnico, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina, 2010.
- [2] Resolución 1464/2014. Documento legislativo, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina, 29 de diciembre, 2014.
- [3] Decreto 211. Decreto, Chile, 29 de setiembre, 2012.
- [4] Decreto 111/008. Decreto, Montevideo, 25 de febrero, 2008.
- [5] Ley general de protección del ambiente. Ley, Montevideo, 28 de noviembre, 2000.
- [6] ACAU. Planilla mercado automotor diciembre 2015. Informe, 2015.
- [7] C. Donald Ahrens. Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the Environment. Brooks/Cole CENGAGE Learning, 2013.
- [8] Grupo GESTA AIRE. Propuesta Estándares Calidad de Aire. Documento técnico, 2012.
- [9] Grupo GESTA AIRE. Propuesta Estándares Emisiones de Fuentes Móviles. Documento técnico, 2012.
- [10] Ngoc T. Nguyen Albert A. Presto Timothy D. Gordon Eric M. Lipsky Mrunmayi Karve Alvaro Gutierrez William H. Robertson Mang Zhang Christopher Brandow Oliver Chang Shiyan Chen Pablo Cicero-Fernandez Lyman Dinkins Mark Fuentes Shiou-Mei Huang Richard Ling Jeff Long Christine Maddox John Massetti Eileen McCauley Antonio Miguel Kwangsam Na Richard Ong Yanbo Pang Paul Rieger Todd Sax Tin Truong Thu Vo Sulekha Chattopadhyay Hector Maldonado M. Matti Maricq Allen L. Robinson, Andrew A. May.

- Gas- and particle-phase primary emissions from in-use, on-road gasoline and diesel vehicles. Atmospheric Environment, 88:247–260, 2014.
- [11] Ellen S.P. So Andy T. Chan, William T.W. Au. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality-part II: multiple canopies and canyons. Atmospheric Environment, 37:2761–2772, 2003.
- [12] Subash C. Samad Andy T. Chan, Ellen S.P. So. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality. Atmospheric Environment, 35:4089–4098, 2001.
- [13] José Cataldo. Atmósfera como sistema receptor. Curso Contaminación Atmosférica, Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay, 2014.
- [14] Wai-Yin Ng Chi-Kwan Chau. A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons. Science of the Total Environment, 468–469:429–448, 2014.
- [15] Bodo Ruck Christof Gromke. On the Impact of Trees on Dispersion Processes of Traffic Emissions in Street Canyons. Boundary-Layer Meteorology, 131:19–34, 2009.
- [16] Alessandro Marotta Urbano Manfredi Christos Dardiotis, Giorgio Martini. Low-temperature cold-start gaseous emissions of late technology passenger cars. Applied Energy, 111:468–478, 2013.
- [17] Andrea V. Jackson C.N. Hewitt (editores). Handbook of Atmospheric Science: Principles and Applications. Blackwell Publishing, 2003.
- [18] Grupo Mercado Común. Clasificación de vehículos. Resolución 35/94, 1994.
- [19] James E. Tate Sean D. Beevers David C. Carslaw, Martin L. Williams. The importance of high vehicle power for passenger car emissions. Atmospheric Environment, 68:8–16, 2013.
- [20] Cheng Huang Qiguo Jing Haikun Wang Hansheng Pan Li Li Jing Zhao Yi Dai Haiying Huang Lee Schipper David G. Streets, Changhong Chen. On-road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles in Shanghai. Atmospheric Environment, 41:5334–5344, 2007.

- [21] Kent C. Johnson J. Wayne Miller David R. Cocker III, Sandip D. Shah. Emission rates of regulated pollutants from on-road heavy-duty diesel vehicles. Atmospheric Environment, 40:147–153, 2006.
- [22] James E. Tate David W. Wyatt, Hu Li. The impact of road grade on carbon dioxide (CO₂) emission of a passenger vehicle in real-world driving. Transportation Research Part D, 32:160–170, 2014.
- [23] Departamento de Ingeniería Ambiental Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Inventario de Emisiones Atmosféricas 2006. Informe, Uruguay, 2010.
- [24] Intendencia de Montevideo. Plan de Movilidad. Informe, Montevideo, 2010.
- [25] Intendencia de Montevideo. Utilización del transporte colectivo. Informe, Montevideo, 2014.
- [26] Intendencia de Montevideo. Informe de Calidad de Aire. Año 2015. Síntesis anual. Informe, Montevideo, 2015.
- [27] Comisión Europea. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Programa “Aire Puro” para Europa. Bruselas, 2013.
- [28] Sotiris Vardoulakis Efisio Solazzo Fabio Murena, Giuseppe Favale. Modelling dispersion of traffic pollution in a deep street canyon: Application of CFD and operational models. Atmospheric Environment, 43:2303–2311, 2009.
- [29] L. F. Fenton. The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems. IRE Transactions on Communication Systems, 8:57–67, 1960.
- [30] Panagiota Dilara Giorgio Martini Urbano Manfredi Georgios Fontaras, Vicente Franco. Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles. Science of the Total Environment, 468–469:1034–1042, 2014.
- [31] Tianyu Zhu Linlin Tan Yuesen Wang Gequn Shu, Haiqiao Wei. Gasoline engine exhaust gas recirculation - A review. Applied Energy, 99:534–544, 2012.

- [32] Adelia Roveda Massimo Capobianco Giorgio Zamboni, Michel André. Experimental evaluation of Heavy Duty Vehicle speed patterns in urban and port areas and estimation of their fuel consumption and exhaust emissions. Transportation Research Part D, 35:1–10, 2015.
- [33] Asociación del Comercio Automotor del Uruguay (ACAU). Anuario 2015. Informe, 2015.
- [34] European Parliamentary Research Service (EPRS). Reducing air pollution. National emission ceilings for air pollutants. European Parliament, 2015.
- [35] The International Council on Clean Transportation (ICCT). Real-World Exhaust Emissions from Modern Diesel Cars. White paper, 2014.
- [36] Elizabeth González. Notas sobre evolución y destino de los contaminantes vertidos a la atmósfera. Curso Contaminación Atmosférica, Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay, 2014.
- [37] Julio Castro Hector Jorquera. Analysis of urban pollution episodes by inverse modeling. Atmospheric Environment, 44:42–54, 2010.
- [38] ICCT. Urban off-cycle NO_x emissions from Euro IV/V trucks and buses. Problems and solutions for Europe and developing countries. White paper, 2012.
- [39] ICCT. From laboratory to road. A 2014 update of official and “Real-world” fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe. White paper, 2014.
- [40] ICCT. Light-Duty Vehicle Efficiency Standards. Factsheet, 2014.
- [41] ICCT. NO_x control technologies for EURO 6 Diesel passenger cars. Market penetration and experimental performance assessment. White paper, 2015.
- [42] ICCT. Costs of emission reduction technologies for heavy-duty Diesel vehicles. White paper, 2016.
- [43] ICCT. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. Briefing, 2016.

- [44] A. McNabola J. Gallagher, L.W. Gill. Optimizing the use of on-street car parking system as a passive control of air pollution exposure in street canyons by large eddy simulation. Atmospheric Environment, 45:1684–1694, 2011.
- [45] A. McNabola J. Gallagher, L.W. Gill. Numerical modelling of the passive control of air pollution in asymmetrical urban street canyons using refined mesh discretization schemes. Building and Environment, 56:232–240, 2012.
- [46] Yuche Chen Jens Borcken-Kleefeld. Real-driving emissions from cars and light commercial vehicles - Results from 13 years remote sensing at Zurich/CH. Atmospheric Environment, 88:157–164, 2014.
- [47] Ye Wu Liu Yang Lixin Fu Kebin He Shuxiao Wang Jinchuan Chen Chunyan Li Jiming Hao, Yu Zhou. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China. Atmospheric Environment, 44:285–293, 2010.
- [48] José Luis Jiménez-Palacios. Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [49] Yung-Chen Yao Wen-Yuan Ho Jiun-Horng Tsai, Hung-Lung Chiang. Deterioration of gasoline vehicle emissions and effectiveness of tune-up for high-polluted vehicles. Transportation Research Part D, 13:47–53, 2008.
- [50] Xing Wang-Xiaochuan Pan K. Max Zhang, Dane Westerdahl. Characterization of on-road vehicle emission factors and microenvironmental air quality in Beijing, China. Atmospheric Environment, 43:697–705, 2009.
- [51] Zhiliang Yao Yingzhi Zhang Xianbao Shen-Qiang Zhang Kebin He, Hong Huo. On-board measurement of emissions from diesel trucks in five cities in China. Atmospheric Environment, 54:159–167, 2012.
- [52] Bernard E. A. Fisher Norbert Gonzalez-Flesca Koulis Pericleous, Sotiris Vardoulakis. Modelling air quality in street canyons: a review. Atmospheric Environment, 37:155–182, 2003.
- [53] Darío R. Gómez Mauricio Osses Laura E. Dawidowski, Ariela D’Angiola. On-road traffic emissions in a megacity. Atmospheric Environment, 44:483–493, 2010.

- [54] Guido Lenaers. On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural- and city traffic and on two Euro-1 diesel city buses. The Science of the Total Environment, 189–190:139–147, 1996.
- [55] TRL Limited. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. Reporte, 2009.
- [56] Ana Paula Kelm Soares Gabriel Narancio-Gabriel Usera Mariana Mendina, Martin Draper. A general purpose parallel block structured open source flow solver. Cluster Computing Journal, 11, 2013.
- [57] Kevin C. Clemitshaw Michael E. Jenkin. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. Atmospheric Environment, 34:2499–2527, 2000.
- [58] MIEM. Encuesta de usos, consumos y rendimientos del sector transporte, año 2014. Informe, Uruguay, 2014.
- [59] MIEM. Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015 - 2024. Informe, Uruguay, 2015.
- [60] Walid Oueslati Miguel Cárdenas Rodríguez, Laura Dupont-Courtade. Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53:1–9, 2016.
- [61] Elizabeth González Nicolás Rezzano, Mauro D’Angelo. Movilidad en la ciudad de Montevideo (costos, emisiones y tiempos). 8 Congreso Nacional de AIDIS, 17 y 18 de noviembre de 2015, Montevideo, Uruguay, 2015.
- [62] T.R. Oke. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. Energy and Buildings, 11:103–113, 1988.
- [63] Vladimir N. Lozhkin Olga V. Lozhkina. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. Transportation Research Part D, 36:178–189, 2015.
- [64] Anne Pitt Anatoly A. Lezhenin Yuri V. Zakharov Olga V. Taseiko, Sergey V. Mikhailuta. Air pollution dispersion within urban street canyons. Atmospheric Environment, 43:245–252, 2009.

- [65] Georgios Fontaras Leonidas Ntziachristos Pierre Bonnel Zissis Samaras Panagiota Dilara, Marina Kousoulidou. Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors. Atmospheric Environment, 64:329–338, 2013.
- [66] Marina Kousoulidou Marilena Muntean Leonidas Ntziachristos Stefan Hausberger Panagiota Dilara, Vicente Franco. Road vehicle emission factors development: A review. Atmospheric Environment, 70:84–97, 2013.
- [67] Lionel Soulhac Valeria Garbero Silvana Di Sabatino Riccardo Buccolieri, Pietro Salizzoni. The breathability of compact cities. Urban Climate, 13:73–93, 2015.
- [68] W.A. McMullan G. Hinchliffe A.P.R. Jeanjean R.J. Leigh, P.S. Monks. A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale. Atmospheric Environment, 120:1–14, 2015.
- [69] J.S. Mindell R.F. Warren R.N. Colville, E.J. Hutchinson. The transport sector as a source of air pollution. Atmospheric Environment, 35:1537–1565, 2001.
- [70] Michael S. Graboski Robert L. McCormick, Janet Yanowitz. In-Use Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles. Environmental Science & Technology, 34:729–740, 2000.
- [71] A. Carlos Fernandez-Pello Sara McAllister, Jyh-Yuan Chen. Fundamentals of Combustion Processes. Springer, 2011.
- [72] TNO Science and Industry. On-road NO_x emissions of Euro-V trucks. Reporte, 2009.
- [73] TNO Science and Industry. Emissions of nitrogen oxides and particulates of Diesel vehicles. Reporte, 2015.
- [74] D.R. Gómez R.M. Negri-E. San Román S.L. Reich, H. Bogo. Traffic pollution in a downtown site of Buenos Aires City. Atmospheric Environment, 35:1717–1727, 2001.
- [75] Bruno Sportisse. Fundamentals in Air Pollution. From Processes to Modelling. Springer, 2010.

- [76] J. Wayne Miller-Ted Younglove Donald J. Chernich Alberto Ayala Tao Huai, Sandip D. Shah. Analysis of heavy-duty diesel truck activity and emissions data. Atmospheric Environment, 40:2333–2344, 2006.
- [77] W. Theurer. Typical building arrangements for urban air pollution modelling. Atmospheric Environment, 33:4057–4066, 1999.
- [78] J. Wayne Miller-Hector Maldonado Don Chernich Thomas D. Durbin, Kent Johnson. Emissions from heavy-duty vehicles under actual on-road driving conditions. Atmospheric Environment, 42:4812–4821, 2008.
- [79] K. Max Zhang-Juan Anguita Thomas H. Whitlow, Andrew Hall. Impact of local traffic exclusion on near-road air quality: Findings from the New York City “Summer Streets” campaign. Environmental Pollution, 159:2016–2027, 2011.
- [80] I. De Vlieger. On-board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars. Atmospheric Environment, 31:3753–3761, 1997.
- [81] Daniel S. Wilks. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series, 2011.
- [82] Maria Victoria Toro Gómez William Alonso Giraldo Aristizabal. Estimación de la emisión de contaminantes por motocicletas en el Valle de Aburra. 2008.
- [83] Emmanuel Rivière Nadège Blond-Lotfi Mehdi David Nowak Wissal Selmi, Christiane Weber. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. Urban Forestry & Urban Greening, 17:192–201, 2016.
- [84] Dennis Y.C. Leung Xiaomin Xie, Chun-HO Liu. Impact of building facades and ground heating on wind flow and pollutant transport in street canyons. Atmospheric Environment, 41:9030–9049, 2007.
- [85] Huan Liu Ruikun Huang-Puikui Un Yu Zhou Lixin Fu Jiming Hao Ye Wu, Shaojun Zhang. Real-world fuel consumption and CO₂ (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China. Energy, 69:247–257, 2014.

- [86] Zhishi Wang Zhenhua Li-Yu Zhou Haitao Wang Xiaofeng Bao Jiming Hao Ye Wu, Jingnan Hu. Real-world fuel efficiency and exhaust emissions of light-duty diesel vehicles and their correlation with road conditions. Journal of Environmental Sciences, 24:865–874, 2012.
- [87] Monika Nitschke Pushan Shah-Shona Crabb Alana Hansen Ying Zhang, Ting Xia. Traffic-related air pollution and health co-benefits of alternative transport in Adelaide, South Australia. Environment International, 74:281–290, 2015.

APÉNDICES

Apéndice A

Curva de calibración de instrumento de medición de emisiones vehiculares



www.kane.co.uk

Kane International Limited
 Kane House, Swallowfield, Welwyn Garden City, Hertfordshire, AL7 1JG, UK
 T: +44 (0) 1707 375550 F: +44 (0) 1707 393277 E: sales@kane.co.uk

ANALYSER TEST REPORT

Instrument: AUTO 5-2 *Serial No:* 090312355

Parameter(s)	Signal Input(s)	Within Tolerance	Accuracy	Signal Source/Equipment
Carbon Monoxide CO	0 %	0	+/-5% o.r.	In ambient air
	3.51 %	349	+/-0.5	Certified Calibration Gas
Hydrocarbon (Propane) HC	0 ppm	0	+/-5% o.r.	In ambient air
	1071 ppm	1067	+/-12	Certified Calibration Gas
Oxygen O ₂	20.9 %	20.91	+/-5% o.r.	In ambient air
	0 %	0.06	+/-0.1	Certified Calibration Gas
Carbon Dioxide CO ₂	0 %	0	+/-5% o.r.	In ambient air
	14.02 %	13.9	+/-0.5	Certified Calibration Gas
RPM 4	0 rpm	0		No Input Connected
	6030 rpm	6030	+/-50	Electronic RPM Simulator
Oil Temperature	100 °C	100.8	+/-2 °C +/-0.3% o.r.	Electronic Temperature Simulator
Nitric Oxide NO	0 ppm	0	+/-4%	In ambient air
	1014 ppm	1021	+/-25	Certified Calibration Gas
Measured Flow Rate	l/min	YES	>0.75	TL529
Measured Pump Suction	mbar	YES	>100	EX/C/147
Propane Equivalency Factor (factor)			+/-2% ratio	Certified Calibration Gas

Signat: L. Meridale *Date:* 20/01/2012

Calibration Results

Test Method: Temperature: The temperature input is subjected to a known and traceable voltage simulating a thermocouple input. The reference voltages are taken from International Tables - BS4937 (1973).

Gas: The gas input is subjected to a known and traceable value of a Certified gas mixture.

Measurement Uncertainties: The uncertainty assigned to the above measurements is 2°C for temperature and ± 2% for gas measurements.

Apéndice B

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 1

Tabla B.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:16:15 AM	38	5.5	0.13	160
9:16:45 AM	136	5.6	0.61	101
9:17:15 AM	3	7.2	0.24	29
9:17:45 AM	10	7.4	0.44	57
9:18:15 AM	0	7.5	0.08	18
9:18:45 AM	0	7.7	0.09	14
9:19:15 AM	0	7.8	0.08	14
9:19:45 AM	1	8.4	0.81	18
9:20:15 AM	8	7.6	0.96	17
9:20:45 AM	0	8	0.15	35
9:21:15 AM	0	7.9	0.09	14
9:21:45 AM	0	7.8	0.16	44
9:22:15 AM	306	8.2	0.63	51
9:22:45 AM	0	8.2	0.09	18
9:23:15 AM	0	8.7	0.39	59
9:23:45 AM	0	8.3	0.34	14
9:24:15 AM	0	8.5	0.8	19
9:24:45 AM	0	8.2	0.07	12
9:25:15 AM	58	9.8	0.57	51
9:25:45 AM	10	9	0.86	53
9:26:15 AM	0	8.5	0.76	29
9:26:45 AM	0	8.3	0.31	12
9:27:15 AM	0	8.3	0.13	14
9:27:45 AM	0	8.1	0.05	10
9:28:15 AM	0	9.2	1.15	70
9:28:45 AM	0	8.5	1	82
9:29:15 AM	0	8.7	0.46	55
9:29:45 AM	0	7.8	1.44	106
9:30:15 AM	0	8.5	0.06	15
9:30:45 AM	24	10.6	0.64	78
9:31:15 AM	0	9.7	2.44	23
9:31:45 AM	0	8.7	0.44	41

Tabla B.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:32:15 AM	0	10	1.47	50
9:32:45 AM	12	11.6	0.44	23
9:33:15 AM	0	7.9	1.01	18
9:33:45 AM	0	8.9	0.08	15
9:34:15 AM	0	6.4	0.37	18
9:34:45 AM	0	10.1	1.03	19
9:35:15 AM	0	8.3	0.09	13
9:35:45 AM	20	11.5	0.77	18
9:36:15 AM	0	7.7	1.48	17
9:36:45 AM	1	8.9	0.76	35
9:37:15 AM	0	8.8	1.2	41
9:37:45 AM	13	9.8	0.75	47
9:38:15 AM	54	10.3	0.13	17
9:38:45 AM	0	8.5	0.05	12
9:39:15 AM	0	8.4	0.21	44
9:39:45 AM	21	11.8	0.3	20
9:40:15 AM	0	0.5	0.29	16
9:40:45 AM	0	8.1	0.06	12
9:41:15 AM	0	9.1	0.14	14
9:41:45 AM	19	10.3	0.87	50
9:42:15 AM	0	8.4	0.09	16
9:42:45 AM	0	8.5	0.07	17
9:43:15 AM	0	8.8	0.31	19
9:43:45 AM	23	11.4	0.98	38
9:44:15 AM	1	9.3	0.71	60
9:44:45 AM	0	8.9	0.11	16
9:45:15 AM	3	7.6	0.19	18
9:45:45 AM	0	0.8	0.07	14
9:46:15 AM	0	9	0.75	26
9:46:45 AM	0	8.1	0.1	35
9:47:15 AM	0	6.9	0.09	26
9:47:45 AM	0	9.5	0.33	32

Apéndice C

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 2

Tabla C.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
6:26:46 PM	0	15	0.07	1
6:27:16 PM	26	14.6	0.01	1
6:27:46 PM	21	14.6	0.01	1
6:28:17 PM	15	15.1	0.01	1
6:28:47 PM	9	15.1	0.01	1
6:29:17 PM	1	15.1	0.01	1
6:29:48 PM	10	14.8	0.01	1
6:31:21 PM	0	13.5	0.01	1
6:31:51 PM	22	12.4	0.01	1
6:32:22 PM	21	12.2	0.01	1
6:32:53 PM	6	13.2	0.01	1
6:33:23 PM	3	13.4	0.01	1
6:33:53 PM	2	13.6	0.01	1
6:34:24 PM	1	13.6	0.07	1
6:34:54 PM	7	12.9	0.01	1
6:35:24 PM	7	10.8	0.01	1
6:35:55 PM	13	13.4	0.01	1
6:36:26 PM	7	13.1	0.01	1
6:36:56 PM	1	13.7	0.13	1
6:37:26 PM	2	13.5	0.01	1
6:37:57 PM	0	13.5	0.15	1
6:38:27 PM	27	13.3	0.55	1
6:38:57 PM	5	13.2	0.01	1
6:39:28 PM	7	11.1	0.36	1
6:39:59 PM	11	12.1	0.01	1
6:40:29 PM	3	13.4	0.01	1
6:40:59 PM	5	13.4	0.04	1
6:41:30 PM	1	13.3	0.01	1
6:42:00 PM	6	12.1	0.01	1
6:42:30 PM	2	13.6	0.01	1
6:43:01 PM	34	10.3	0.01	1
6:43:31 PM	1	13.2	0.01	1
6:45:03 PM	1	13.2	0.01	1

Tabla C.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
6:45:33 PM	2	13.4	0.01	1
6:46:03 PM	9	13.1	0.27	1
6:46:34 PM	57	12.1	0.01	1
6:47:04 PM	2	13.3	0.01	1
6:47:34 PM	5	13.3	0.01	1
6:48:05 PM	1	11.9	0.07	1
6:48:36 PM	3	13.3	0.01	1

Apéndice D

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 3

Tabla D.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
8:52:37	3	10.5	0	0
8:52:47	3	11.3	0	0
8:52:57	1	10.9	0	0
8:53:08	1	11	0.08	59
8:53:18	2	11.3	0.18	239
8:53:28	15	11.3	0.37	74
8:53:38	27	11.3	0.34	8
8:53:48	6	11.2	0.07	6
8:53:58	1	10.9	0.03	3
8:54:08	1	11.9	0.02	3
8:54:19	30	11.4	0.03	4
8:54:29	32	10.2	0	1
8:54:39	5	10.9	0.15	1
8:54:49	2	11.2	0.21	1
8:54:59	10	11.6	0.21	1
8:55:09	10	11.1	0.1	1
8:55:19	3	10.6	0.06	1
8:55:29	1	11	0.32	1
8:55:39	7	10.8	0.15	1
8:55:50	9	10.4	0.41	1
8:56:00	1	9.5	0.5	4
8:56:10	70	10.8	0.52	99
8:56:20	32	10.9	0.24	10
8:56:30	26	10.3	0.08	8
8:56:40	6	8	0.03	3
8:56:50	1	10.3	0.21	3
8:57:01	0	10.8	0.22	3
8:57:11	0	11	0.17	3
8:57:21	0	11	0.13	2
8:57:31	17	10.9	0.08	2

Tabla D.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
8:57:41	3	10.6	0.34	2
8:57:51	0	10.9	0.25	6
8:58:01	6	10.8	0.2	3
8:58:12	1	11.4	0.16	1
8:58:22	59	11.2	0.32	0
8:58:32	5	10.7	0.13	0
8:58:42	3	11.2	0.11	0
8:58:52	2	10.2	0.1	0
8:59:02	0	11.3	0.07	0
8:59:12	0	11.3	0.04	0
8:59:23	2	11.4	0.02	0
8:59:33	3	11.3	0.04	0
8:59:43	5	11.1	0.03	0
8:59:53	4	10.8	0.03	0
9:00:03	2	10.6	0.01	0
9:00:13	0	10.7	0.23	0
9:00:23	0	10.7	0.07	0
9:00:34	0	10.7	0.03	0
9:00:44	0	10.7	0.01	0
9:00:54	0	10.8	0	0
9:01:04	0	10.6	0.22	0
9:01:14	0	11.1	0.02	0
9:01:24	7	10.8	0.27	0
9:01:34	25	10.7	0.09	0
9:01:45	3	10.7	0	0
9:01:55	0	10.7	0	0
9:02:05	0	10.6	0	0
9:02:15	0	10.6	0	0
9:02:25	0	10.6	0	0
9:02:35	0	10.6	0	0

Tabla D.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:02:45	0	10.6	0	0
9:02:56	0	10.6	0	0
9:03:06	0	10.6	0	0
9:03:16	0	10.6	0	0
9:03:26	0	10.6	0	0
9:03:36	0	10.6	0	0
9:03:46	0	10.6	0	0
9:03:56	7	11.3	0	0
9:04:07	30	10.6	0	0
9:04:17	9	10.7	0.05	0
9:04:27	4	9.3	0.04	0
9:04:37	3	10.3	0.04	0
9:04:47	0	10.3	0.06	0
9:04:57	0	10.9	0	0
9:05:07	17	10.8	0	0
9:05:18	18	10.3	0.03	0
9:05:28	2	10.2	0.02	0
9:05:38	1	10.2	0.01	0
9:05:48	0	10.2	0	0
9:05:58	0	10.9	0	0
9:06:08	40	10.2	0.38	0
9:06:18	42	9.9	0.05	0
9:06:28	14	3.7	0	0
9:06:38	5	9.5	0.05	0
9:06:49	1	9.9	0.04	0
9:06:59	0	10.7	0.01	0
9:07:09	19	10.4	0.04	0
9:07:19	15	10.4	0.04	0
9:07:29	6	10.1	0.03	0
9:07:39	4	9.9	0	0

Tabla D.4: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:07:49	2	9.6	0.31	0
9:08:00	0	9.8	0.11	0
9:08:10	5	9.7	0.1	0
9:08:20	5	8	0.06	0
9:08:30	1	9.6	0	0
9:08:40	0	10	0	0
9:08:50	1	10.1	0	0
9:09:00	0	9.7	0	0
9:09:11	5	9.4	0.01	0
9:09:21	6	9.3	0	0
9:09:31	1	10	0	0
9:09:41	5	9.6	0	0
9:09:51	9	9.4	0.11	0
9:10:01	2	9.2	0.11	0
9:10:11	1	9.5	0.12	0
9:10:22	9	8.8	0.11	0
9:10:32	13	9.1	0.09	0
9:10:42	2	9	0.12	0
9:10:52	7	9.7	0.12	0
9:11:02	49	9.3	0.14	0
9:11:12	73	9.1	0.21	0
9:11:22	16	9	0.17	0
9:11:33	39	9.6	0.39	0
9:11:43	35	9.3	0.09	0
9:11:53	34	8.8	0.14	0
9:12:03	8	7.4	0.07	0
9:12:13	3	8.6	0.03	0
9:12:23	1	9.3	0	0
9:12:33	3	8.9	0	0
9:12:44	9	8.6	0	0

Tabla D.5: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:12:54	2	9	0.01	0
9:13:04	41	9.4	0.2	0
9:13:14	14	8.7	0.09	0
9:13:24	6	5.7	0.05	0
9:13:34	2	8.1	0	0
9:13:44	1	8.4	0	0
9:13:55	3	9.5	0	0
9:14:05	4	8.7	0	0
9:14:15	28	8.6	0	0
9:14:25	4	8.6	0	0
9:14:35	4	8.6	0.02	0
9:14:45	1	8.6	0.03	0
9:14:55	0	9.3	0.02	0
9:15:06	5	8.9	0	0
9:15:16	13	8.4	0.02	0
9:15:26	2	8.4	0.02	0
9:15:36	1	8	0.05	0
9:15:46	8	8.8	0.11	0
9:15:56	2	8.8	0.1	0
9:16:06	7	8.6	0.11	0
9:16:17	25	8.8	0.01	0
9:16:27	4	8.7	0	0
9:16:37	1	8.7	0	0
9:16:47	0	8.6	0	0
9:16:57	0	8.6	0	0
9:17:07	0	8.5	0	0
9:17:17	0	8.5	0	0
9:17:27	0	8.5	0	0
9:17:37	0	8.4	0	0
9:17:48	0	8.4	0	0

Tabla D.6: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:17:58	0	8.5	0	0
9:18:08	0	8.5	0	0
9:18:18	0	8.5	0	0
9:18:28	0	8.1	0	0
9:18:38	0	8.4	0	0
9:18:48	0	8.6	0.07	0
9:18:59	2	8.8	0.08	0
9:19:09	7	8.8	0.07	0
9:19:19	17	8.6	0.05	0
9:19:29	8	8.6	0.03	0
9:19:39	21	8.1	0	0
9:19:49	4	8.1	0	0
9:19:59	1	8.4	0	0
9:20:10	0	8.1	0	0
9:20:20	0	8.4	0	0
9:20:30	0	7.9	0	0
9:20:40	1	8.4	0	0
9:20:50	0	8.2	0	0
9:21:00	0	7.9	0	0
9:21:10	0	8.1	0	0
9:21:21	0	7.9	0	0
9:21:31	0	8	0	0
9:22:24	0	3	0	0
9:22:34	0	8.1	0	0
9:22:44	0	8	0	0
9:22:54	0	8	0.11	0
9:23:04	34	7.8	0.09	0
9:23:14	4	8.7	0.05	0
9:23:24	1	8.4	0.04	0
9:23:34	1	8.2	0.1	0

Tabla D.7: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
9:23:44	0	8	0.1	0
9:23:55	0	8	0.09	0
9:24:05	0	7.9	0.02	0
9:24:15	0	8.1	0.01	0
9:24:25	0	8.2	0	0
9:24:35	0	8.7	0.01	0
9:24:45	8	8.6	0.05	0
9:24:55	2	8	0.09	0
9:25:06	4	7.6	0.06	0
9:25:17	1	7.6	0.05	0
9:25:28	1	5.1	0	0

Apéndice E

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 4

Tabla E.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:03:23	9	10.6	0.06	0
10:03:33	4	12.5	0.05	0
10:03:43	2	11.2	0.08	0
10:03:53	35	10.4	0.39	0
10:04:03	18	7.6	0.04	0
10:04:14	15	10.2	0.06	0
10:04:24	26	12.2	0.06	0
10:04:34	26	12.5	0.04	0
10:04:44	27	11	0.02	0
10:04:54	25	12	0.01	0
10:05:04	9	10.7	0.02	0
10:05:14	2	10.8	0.05	0
10:05:24	27	11.4	0.15	0
10:05:35	3	9.1	0.05	0
10:05:45	5	11.8	0.1	0
10:05:55	2	10.1	0.08	0
10:06:05	8	10.9	0.07	0
10:06:15	13	10.3	0.12	0
10:06:25	8	9.1	0.08	0
10:06:35	2	11.8	0.1	0
10:06:45	13	10.9	0.11	0
10:06:56	3	9.4	0.04	0
10:07:06	1	10.3	0.04	0
10:07:16	3	9.3	0.04	0
10:07:26	3	9.4	0.03	0
10:07:36	14	10.1	0.11	0
10:07:46	9	8	0.08	0
10:07:56	6	9	0.06	0
10:08:07	3	9.9	0.13	0
10:08:17	0	9.4	0.1	0

Tabla E.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:08:27	9	9.6	0.13	0
10:08:37	0	9	0.1	0
10:08:47	3	10.6	0.23	0
10:08:57	1	9.3	0.13	0
10:09:07	0	9.2	0.15	0
10:09:18	1	9.9	0.05	0
10:09:28	0	9.5	0.03	0
10:09:38	22	9.9	0.07	0
10:09:48	0	9.9	0.07	0
10:09:58	4	8.5	0.03	0
10:10:08	0	10.8	0.07	0
10:10:18	0	9.5	0.06	0
10:10:29	0	11.6	0.08	0
10:10:39	22	7.5	0.03	0
10:10:49	3	7.8	0.02	0
10:10:59	0	7.3	0.02	0
10:11:09	0	7.2	0.03	0
10:11:19	4	7.2	0.02	0
10:11:29	40	8.2	0.02	0
10:11:40	9	8.6	0.02	0
10:11:50	1	8.6	0.09	0
10:12:00	1	10.4	0.12	0
10:12:10	1	11.2	0.1	0
10:12:20	18	10.4	0.08	0
10:12:30	1	9.3	0.01	0
10:12:40	15	9.4	0.07	0
10:12:51	6	4	0.07	0
10:13:01	1	9.4	0.03	0
10:13:11	20	4.7	0.02	0
10:13:21	5	8.5	0.02	0

Tabla E.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:13:31	18	5.8	0.04	0
10:13:41	3	7.2	0.02	0
10:13:51	20	7.9	0.01	0
10:14:02	3	8.3	0.01	0
10:14:12	1	8.4	0.02	0
10:14:22	5	10	0.07	0
10:14:32	5	8.3	0.05	0
10:14:42	3	10.5	0.04	0
10:14:52	3	9.6	0.04	0
10:15:02	3	10.5	0.06	0
10:15:13	40	9.6	0.04	0
10:15:23	8	9.5	0.04	0
10:15:33	9	9.3	0.06	0
10:15:43	3	7.9	0.1	0
10:15:53	25	9.6	0.14	0
10:16:03	5	8.2	0.11	0
10:16:13	6	8	0.02	0
10:16:24	4	7.2	0.02	0
10:16:34	1	7.7	0.02	0
10:16:44	0	6.6	0.02	0
10:16:54	31	9.1	0.05	0
10:17:04	8	8.3	0.04	0
10:17:14	7	8.3	0.03	0
10:17:24	7	8.2	0.01	0
10:17:34	2	8.2	0.33	0
10:17:44	6	8.7	0.23	0
10:17:55	8	7.7	0.18	0
10:18:05	2	8.8	0.13	0
10:18:15	15	9.2	0.04	0
10:18:25	219	9	0.02	0

Tabla E.4: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:18:35	90	6	0.02	0
10:18:45	59	7.7	0.01	0
10:18:55	48	7.2	0.33	0
10:19:06	21	8.5	0.08	0
10:19:16	25	8	0.06	0
10:19:26	19	9.1	0.05	0
10:19:36	7	8.2	0.02	0
10:19:46	4	8.3	0.05	0
10:19:56	7	8.6	0.06	0
10:20:06	6	8	0.06	0
10:20:17	1	7.5	0.05	0
10:20:27	1	7.8	0.04	0
10:20:37	0	7.8	0.05	0
10:20:47	0	6.7	0.07	0
10:20:57	0	6.1	0.04	0
10:21:07	14	8.5	0.07	0
10:21:17	4	8	0.06	0
10:21:28	2	9.6	0.01	0
10:21:38	9	6.9	0.01	0
10:21:48	19	5.7	0	0
10:21:58	15	6.6	0.02	0
10:22:08	1	6.6	0.01	0
10:22:18	0	6.5	0.01	0
10:22:28	0	5.9	0.01	0
10:22:39	50	9.4	0.15	0
10:22:49	479	10.1	0.1	0
10:22:59	63	9.9	0.13	0
10:23:09	12	0.9	0.09	0
10:23:19	24	4.7	0.02	0
10:23:29	337	9.9	0.07	0

Tabla E.5: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:23:39	44	5.2	0.05	0
10:23:50	150	9.6	0.06	0
10:24:00	23	3.4	0.01	0
10:24:10	27	8.4	0	0
10:24:21	106	9.5	0.02	0
10:24:31	36	9.3	0.21	0
10:24:41	7	4.4	0.13	0
10:24:51	5	2.2	0.11	0
10:25:01	88	5.8	0.1	0
10:25:12	24	7	0.17	0
10:25:22	5	2.1	0.37	0
10:25:32	149	7.6	0.31	0
10:25:42	39	10.1	0.22	0
10:25:52	146	10.1	0.22	0
10:26:02	68	6.9	0.19	0
10:26:12	37	6.2	0.13	0
10:26:23	15	7.8	0.15	0
10:26:33	8	5.7	0.12	0
10:26:43	3	6.3	0.13	0
10:26:53	2	6	0.13	0
10:27:03	1	5.1	0.16	0
10:27:13	29	7.2	0.15	0
10:27:23	6	8.3	0.13	0
10:27:34	15	8.5	0.05	0
10:27:44	8	7.1	0.04	0
10:27:54	6	8.4	0.08	0
10:28:04	5	5.9	0.09	0
10:28:14	5	6.3	0.02	0
10:28:24	4	8.5	0.05	0
10:28:34	5	6.5	0.04	0

Tabla E.6: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:28:45	2	7.3	0.01	0
10:28:55	8	8.1	0.01	0
10:29:05	1	7.3	0.04	0
10:29:15	0	2.4	0.06	0
10:29:25	4	7.6	0.06	0
10:30:26	15	4.8	0.01	0
10:30:36	5	7.5	0.01	0
10:30:46	0	7.1	0.01	0
10:30:56	0	5.3	0.01	0
10:31:07	3	7.1	0.06	0
10:31:17	1	6.7	0.01	0
10:31:27	24	8.1	0.08	0
10:31:37	7	7.5	0.06	0
10:31:47	5	8.3	0.07	0
10:31:57	10	7.5	0	0
10:32:07	4	7.7	0.06	0
10:32:18	10	8.2	0.08	0
10:32:28	6	4.1	0.05	0
10:32:38	15	7.6	0.08	0
10:32:48	2	6.2	0.03	0
10:32:58	5	7.6	0.04	0
10:33:08	0	7.1	0.07	0
10:33:18	4	7.6	0.11	0
10:33:29	6	6.8	0.09	0
10:33:39	4	6.2	0.07	0
10:33:49	1	7.8	0	0
10:33:59	3	5.9	0.02	0
10:34:09	2	6.9	0.01	0
10:34:19	7	7.7	0.01	0
10:34:29	10	6.8	0	0

Tabla E.7: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:34:39	5	7.5	0.01	0
10:34:49	3	8.5	0	0
10:35:00	3	6.1	0	0
10:35:10	3	5.8	0	0
10:35:20	4	5.9	0	0
10:35:30	1	5.7	0	0
10:35:40	0	5.4	0	0
10:35:50	0	5.3	0	0
10:36:00	1	5.3	0	0
10:36:11	9	7.9	0	0
10:36:21	15	6.6	0	0
10:36:31	13	7.8	0.03	0
10:36:41	5	5.8	0.02	0
10:36:51	16	5.6	0	0
10:37:01	2	6.6	0	0
10:37:11	1	6.2	0	0
10:37:22	0	5.2	0	0
10:37:32	26	6.8	0.03	0
10:37:42	16	5.7	0.03	0
10:37:52	38	5.1	0.03	0
10:38:02	8	8.1	0.03	0
10:38:12	15	5.3	0	0
10:38:22	5	6.8	0	0
10:38:33	1	6.5	0	0
10:38:43	1	5.3	0	0
10:38:53	1	5.3	0	0
10:39:03	2	4.8	0	0
10:39:13	1	5.2	0	0
10:39:23	7	6.8	0	0
10:39:33	9	7.9	0.05	0

Tabla E.8: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:39:44	79	10.3	0.05	0
10:39:54	10	2.6	0.06	0
10:40:04	3	4.1	0.27	0
10:40:14	2	4.8	0.05	0
10:40:24	24	6.3	0.02	0
10:40:34	8	8.3	0.03	0
10:40:44	3	8.6	0.02	0
10:40:55	2	8.9	0.03	0
10:41:05	6	8.1	0.08	0
10:41:15	82	6.6	0.06	0
10:41:25	15	8.8	0.05	0
10:41:35	10	9.3	0.06	0
10:41:45	5	5.3	0.08	0
10:41:55	3	1.8	0.04	0
10:42:06	10	6.5	0.03	0
10:42:16	4	7.7	0	0
10:42:26	4	7.2	0	0
10:42:36	1	6.5	0.31	0
10:42:46	0	6.4	0.38	0
10:42:56	1	7.2	0.32	0
10:43:06	1	7.2	0.25	0
10:43:17	0	6.8	0.15	0
10:43:27	19	6.8	0.06	0
10:43:37	4	7.7	0.05	0
10:43:47	3	7.1	0.04	0
10:43:57	2	6.8	0.02	0
10:44:07	15	7.2	0.06	0
10:44:21	8	7.8	0.07	0
10:44:31	26	6.9	0.05	0
10:44:42	9	6.6	0	0

Tabla E.9: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:44:52	17	6.4	0	0
10:45:02	3	6.5	0.03	0

Apéndice F

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 5

Tabla F.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
12:53:32	NaN	2.1	0.03	NaN
12:53:43	NaN	2.7	0.04	NaN
12:53:53	NaN	2.9	0.02	NaN
12:54:03	NaN	1.3	0.03	NaN
12:54:13	NaN	3.5	0.02	NaN
12:54:23	NaN	4.6	0.04	NaN
12:54:34	NaN	3.8	0.02	NaN
12:54:44	NaN	4.1	0.01	NaN
12:54:54	NaN	2.3	0.02	NaN
12:55:04	NaN	2.9	0.03	NaN
12:55:14	NaN	2	0.03	NaN
12:55:24	NaN	5.1	0.03	NaN
12:55:34	NaN	2.4	0.04	NaN
12:55:45	NaN	4.2	0.02	NaN
12:55:55	NaN	1.6	0.02	NaN
12:56:05	NaN	3.4	0.02	NaN
12:56:15	NaN	2	0.02	NaN
12:56:25	NaN	3.6	0.01	NaN
12:56:36	NaN	4.1	0.01	NaN
12:56:47	NaN	2.4	0.01	NaN
12:56:57	NaN	1.7	0.01	NaN
12:57:07	NaN	4.5	0.01	NaN
12:57:17	NaN	0.6	0.01	NaN
12:57:27	NaN	0.7	0.04	NaN
12:57:37	NaN	2.7	0.04	NaN
12:57:47	NaN	3.2	0.03	NaN
12:57:58	NaN	3.1	0.02	NaN
12:58:08	NaN	2	0.03	NaN
12:58:18	NaN	2.5	0.02	NaN
12:58:28	NaN	3.2	0.02	NaN

Tabla F.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
12:58:38	NaN	6.6	0.02	NaN
12:58:48	NaN	2.2	0.01	NaN
12:58:58	NaN	3.5	0.01	NaN
12:59:08	NaN	2.6	0.02	NaN
12:59:18	NaN	2.6	0.01	NaN
12:59:29	NaN	2.3	0.04	NaN
12:59:39	NaN	5.3	0.04	NaN
12:59:49	NaN	4.8	0.03	NaN
12:59:59	NaN	8.2	0.02	NaN
13:00:09	NaN	2.3	0.01	NaN
13:00:20	NaN	11.5	0.02	NaN
13:00:31	NaN	8.8	0.01	NaN
13:00:41	NaN	3.3	0.02	NaN
13:00:51	NaN	4.5	0.01	NaN
13:01:01	NaN	6.7	0	NaN
13:01:11	NaN	6.3	0	NaN
13:01:21	NaN	3	0	NaN
13:01:31	NaN	5.5	0	NaN
13:01:41	NaN	1.2	0	NaN
13:01:52	NaN	2.2	0.05	NaN
13:02:02	NaN	9	0.01	NaN
13:02:12	NaN	7.5	0	NaN
13:02:22	NaN	3	0	NaN
13:02:32	NaN	0.8	0.01	NaN
13:02:42	NaN	2.2	0.01	NaN
13:02:52	NaN	5.3	0.01	NaN
13:03:03	NaN	9.1	0.02	NaN
13:03:13	NaN	9.5	0.02	NaN
13:03:23	NaN	3	0.01	NaN
13:03:33	NaN	2.2	0.01	NaN

Tabla F.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
13:03:43	NaN	4.4	0	NaN
13:03:54	NaN	3.1	0	NaN
13:04:05	NaN	2.1	0	NaN
13:04:15	NaN	2.1	0.01	NaN
13:04:25	NaN	2.1	0.04	NaN
13:04:35	NaN	2	0.03	NaN
13:04:45	NaN	2.1	0.04	NaN
13:04:55	NaN	2.1	0.04	NaN
13:05:05	NaN	2.1	0.04	NaN
13:05:15	NaN	2.1	0.03	NaN
13:05:25	NaN	2.1	0.03	NaN
13:05:36	NaN	2.1	0.04	NaN
13:05:46	NaN	2.1	0.03	NaN
13:05:56	NaN	2.1	0.03	NaN
13:06:06	NaN	2	0.03	NaN
13:06:16	NaN	2	0.02	NaN
13:06:27	NaN	2	0.02	NaN
13:06:38	NaN	2	0.02	NaN
13:06:48	NaN	2	0.02	NaN
13:06:58	NaN	2	0.01	NaN
13:07:08	NaN	2	0.01	NaN
13:07:18	NaN	2	0.01	NaN
13:07:28	NaN	2	0.02	NaN
13:07:38	NaN	2	0.02	NaN
13:07:49	NaN	2.1	0.02	NaN
13:07:59	NaN	2.1	0.01	NaN
13:08:09	NaN	2.2	0.01	NaN
13:08:19	NaN	2.3	0	NaN
13:08:29	NaN	3.6	0	NaN
13:08:39	NaN	3.5	0	NaN

Tabla F.4: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
13:08:49	NaN	3.4	0	NaN
13:09:00	NaN	3.4	0	NaN
13:09:10	NaN	2.3	0	NaN
13:09:20	NaN	3	0	NaN
13:09:30	NaN	4.2	0	NaN
13:09:40	NaN	2.5	0	NaN
13:09:50	NaN	3.8	0	NaN
13:10:00	NaN	1.9	0	NaN
13:10:11	NaN	2.9	0	NaN
13:10:21	NaN	8.2	0.03	NaN
13:10:31	NaN	2.3	0.02	NaN
13:10:41	NaN	7.7	0.03	NaN
13:10:51	NaN	2.1	0.01	NaN
13:11:01	NaN	6.8	0.02	NaN
13:11:11	NaN	2.1	0	NaN
13:11:21	NaN	10.5	0.06	NaN
13:11:31	NaN	9.2	0.05	NaN
13:11:42	NaN	10.9	0.04	NaN
13:11:52	NaN	4.3	0	NaN
13:12:02	NaN	6.7	0	NaN
13:12:12	NaN	9.3	0	NaN
13:12:22	NaN	6.7	0	NaN
13:12:32	NaN	2	0	NaN
13:17:18	NaN	1.7	0	NaN
13:17:28	NaN	4.7	0.02	NaN
13:17:39	NaN	5.4	0.03	NaN
13:17:49	NaN	9.8	0.04	NaN
13:17:59	NaN	3.5	0.04	NaN
13:18:09	NaN	3.3	0.05	NaN
13:18:19	NaN	6.6	0.07	NaN

Tabla F.5: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
13:18:29	NaN	1.1	0.06	NaN
13:18:39	NaN	10.4	0.1	NaN
13:18:49	NaN	8.2	0.09	NaN
13:19:00	NaN	2.3	0.07	NaN
13:19:10	NaN	1.5	0.06	NaN
13:19:20	NaN	4	0.02	NaN
13:19:30	NaN	3	0.02	NaN
13:19:40	NaN	1.3	0.02	NaN
13:19:51	NaN	1.4	0.03	NaN
13:20:02	NaN	1.4	0.06	NaN
13:20:12	NaN	1.7	0.06	NaN
13:20:22	NaN	1.4	0.06	NaN
13:20:32	NaN	2.9	0.03	NaN
13:20:42	NaN	4.8	0.03	NaN
13:20:52	NaN	2.3	0.03	NaN
13:21:02	NaN	2.2	0.03	NaN
13:21:13	NaN	1.4	0.04	NaN
13:21:23	NaN	1.4	0.05	NaN
13:21:33	NaN	1.3	0.05	NaN

Apéndice G

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 6

Tabla G.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
19:08:44	NaN	10.3	0.01	NaN
19:08:54	NaN	10.4	0	NaN
19:09:04	NaN	10.5	0.03	NaN
19:09:14	NaN	10.6	0.04	NaN
19:09:24	NaN	10.8	0.03	NaN
19:09:34	NaN	10.8	0.02	NaN
19:09:45	NaN	10.8	0.01	NaN
19:09:55	NaN	10.8	0.01	NaN
19:10:05	NaN	10.8	0.01	NaN
19:10:15	NaN	10.8	0.01	NaN
19:10:25	NaN	10.8	0	NaN
19:10:35	NaN	10.4	0	NaN
19:10:45	NaN	10.7	0	NaN
19:10:56	NaN	10.9	0.19	NaN
19:11:06	NaN	10.3	0.17	NaN
19:11:16	NaN	10.3	0.18	NaN
19:11:26	NaN	10	0.18	NaN
19:11:36	NaN	10.9	0.18	NaN
19:11:46	NaN	10.5	0.13	NaN
19:11:56	NaN	10.9	0.11	NaN
19:12:07	NaN	11	0.08	NaN
19:12:17	NaN	10.3	0.1	NaN
19:12:27	NaN	9.7	0.07	NaN
19:12:37	NaN	10.1	0.08	NaN
19:12:47	NaN	10.8	0.07	NaN
19:12:57	NaN	11.2	0.05	NaN
19:13:07	NaN	10.9	0.08	NaN
19:13:18	NaN	10.1	0.1	NaN
19:13:28	NaN	7.8	0.03	NaN
19:13:38	NaN	8	0.01	NaN

Tabla G.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
19:13:48	NaN	10.2	0.01	NaN
19:13:58	NaN	10.3	0.03	NaN
19:14:08	NaN	10.3	0.02	NaN
19:14:18	NaN	10.6	0.02	NaN
19:14:28	NaN	11	0.02	NaN
19:14:38	NaN	11	0.13	NaN
19:14:49	NaN	10.3	0.11	NaN
19:14:59	NaN	7.4	0.08	NaN
19:15:09	NaN	9.4	0.06	NaN
19:15:19	NaN	10.4	0.05	NaN
19:15:29	NaN	9.8	0.03	NaN
19:15:39	NaN	10	0.04	NaN
19:15:49	NaN	10.9	0.09	NaN
19:16:00	NaN	10.9	0.12	NaN
19:16:10	NaN	9.9	0.08	NaN
19:16:20	NaN	10.4	0.09	NaN
19:16:30	NaN	10.2	0.06	NaN
19:16:40	NaN	10.2	0.13	NaN
19:16:50	NaN	11	0.09	NaN
19:17:00	NaN	11.3	0.12	NaN
19:17:11	NaN	9.8	0.11	NaN
19:17:21	NaN	6.8	0.06	NaN
19:17:31	NaN	6.5	0.03	NaN
19:17:41	NaN	10.2	0	NaN
19:17:51	NaN	10.3	0	NaN
19:18:01	NaN	9.3	0.02	NaN
19:18:11	NaN	10.5	0.03	NaN
19:18:22	NaN	10.7	0.16	NaN
19:18:32	NaN	10.4	0.14	NaN
19:18:42	NaN	9.3	0.11	NaN

Tabla G.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
19:18:52	NaN	6.1	0	NaN
19:19:02	NaN	9.7	0.08	NaN
19:19:12	NaN	9.7	0.07	NaN
19:19:22	NaN	8.2	0.05	NaN
19:19:33	NaN	9.9	0	NaN
19:19:43	NaN	10.4	0	NaN
19:19:53	NaN	10.7	0	NaN
19:20:03	NaN	10	0.04	NaN
19:20:13	NaN	10	0.16	NaN
19:20:23	NaN	5.2	0.18	NaN
19:20:33	NaN	9.7	0.11	NaN
19:20:44	NaN	9.8	0.08	NaN
19:20:54	NaN	10.1	0.07	NaN
19:21:04	NaN	10.1	0.05	NaN
19:21:14	NaN	10.2	0.03	NaN
19:21:24	NaN	9.8	0.1	NaN
19:21:34	NaN	10.4	0.1	NaN
19:21:44	NaN	9	0.06	NaN
19:21:55	NaN	10.7	0.06	NaN
19:22:05	NaN	10.1	0.03	NaN
19:22:15	NaN	10.1	0.05	NaN

Apéndice H

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 7

Tabla H.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
22:16:00	NaN	9.5	0.01	19
22:16:10	NaN	9.5	0	18
22:16:20	NaN	9.9	0	18
22:16:30	NaN	9.5	0.01	18
22:16:40	NaN	10	0.11	20
22:16:50	NaN	9.7	0.12	38
22:17:00	NaN	9.6	0.29	57
22:17:11	NaN	9.8	0.18	66
22:17:21	NaN	9.5	0.22	68
22:17:31	NaN	9.9	0.2	72
22:17:41	NaN	9.4	0.34	57
22:17:51	NaN	9.8	0.26	44
22:18:01	NaN	9.5	0.23	26
22:18:11	NaN	9.7	0.3	26
22:18:22	NaN	9.5	0.22	17
22:18:32	NaN	10	0.2	16
22:18:42	NaN	9.3	0.23	17
22:18:52	NaN	9.6	0.07	15
22:19:02	NaN	9.4	0.06	13
22:19:12	NaN	9.4	0.07	12
22:19:22	NaN	9.9	0.05	7

Apéndice I

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 8

Tabla I.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
14:19:17	NaN	11.6	0	0
14:19:27	NaN	11.9	0	0
14:19:37	NaN	11.6	0	0
14:19:47	NaN	9	0	0
14:19:57	NaN	11.4	0	0
14:20:08	NaN	12	0	0
14:20:18	NaN	12.5	0	0
14:20:28	NaN	12.1	0	0
14:20:38	NaN	11.9	0	0
14:20:48	NaN	8.6	0	0
14:20:58	NaN	12.1	0	0
14:21:08	NaN	11.4	0	0
14:21:19	NaN	6.1	0	0
14:21:29	NaN	11	0	0
14:21:39	NaN	11.7	0	0
14:22:32	NaN	9	0	0
14:22:42	NaN	9	0	0
14:22:52	NaN	5.4	0	0
14:23:02	NaN	10.1	0	0
14:23:12	NaN	10.7	0	0
14:23:22	NaN	10.7	0	0
14:23:32	NaN	10.2	0	0
14:23:43	NaN	4.6	0	0
14:23:53	NaN	10.3	0	0
14:24:03	NaN	10.7	0	0
14:24:13	NaN	11	0	0
14:24:23	NaN	11	0	0
14:24:33	NaN	10.4	0	0
14:24:43	NaN	4.9	0	0
14:24:54	NaN	8.8	0	0

Tabla I.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
14:25:04	NaN	10.8	0	0
14:25:14	NaN	10.6	0	0
14:25:24	NaN	10.6	0	0
14:25:34	NaN	7.1	0	0
14:25:44	NaN	10.3	0	0
14:25:54	NaN	10.8	0	0
14:26:05	NaN	9.5	0	0
14:26:15	NaN	4.8	0	0
14:26:25	NaN	10	0	0
14:26:35	NaN	10.5	0	0
14:26:45	NaN	10.5	0	0
14:26:55	NaN	8	0	0
14:27:05	NaN	9	0	0
14:27:16	NaN	8.6	0	0
14:27:26	NaN	9.9	0	0
14:27:36	NaN	8.7	0	0
14:27:46	NaN	10.5	0	0
14:27:56	NaN	10.7	0	0
14:28:06	NaN	10.7	0	0
14:28:16	NaN	10.3	0	0
14:28:26	NaN	9.5	0	0
14:28:36	NaN	10.4	0	0
14:28:47	NaN	11.6	0	0
14:28:57	NaN	10	0	0
14:29:07	NaN	6.5	0	0
14:29:17	NaN	10.1	0	0
14:29:27	NaN	9.2	0.36	0
14:29:37	NaN	10.4	0.08	0
14:29:47	NaN	9.1	0.03	0
14:29:58	NaN	10.2	0.25	0

Tabla I.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
14:30:08	NaN	5.1	0.22	0
14:30:18	NaN	10.4	0	0
14:30:28	NaN	10.7	0	0
14:30:38	NaN	10.6	0	0
14:30:48	NaN	6.5	0	0
14:30:58	NaN	10.2	0	0
14:31:09	NaN	10.4	0	0

Apéndice J

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N° 9

Tabla J.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
7:13:19	0	8.9	0	0
7:13:29	0	10.2	0	0
7:13:39	2	10.4	0	0
7:13:49	11	9.5	0	0
7:13:59	168	10.7	0	0
7:14:09	54	10.6	0	0
7:14:20	25	8.5	0	0
7:14:30	22	9.7	0	0
7:14:40	8	9.4	0	0
7:14:50	0	10.4	0	0
7:15:00	148	11.1	0	0
7:15:10	47	10.3	0	0
7:15:20	0	9.3	0	0
7:15:30	13	8.9	0	0
7:15:40	6	7.4	0	0
7:15:51	95	11	0	0
7:16:01	233	9.8	0	0
7:16:11	176	9.1	0	0
7:16:21	22	5.6	0	0
7:16:31	7	10	0	0
7:16:41	7	11.2	0	0
7:16:51	111	10.2	0	0
7:17:02	29	10.2	0	0
7:17:12	17	10.2	0	0
7:17:22	17	10.4	0	0
7:17:32	172	10.1	0	0
7:17:42	26	6	0	0
7:17:52	6	9.6	0	0
7:18:02	5	9	0	0
7:18:13	0	10.9	0.03	0

Tabla J.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
7:18:23	18	11.1	0.06	0
7:18:33	26	11.1	0.04	0
7:18:43	2	11.2	0.01	0
7:18:53	28	8.9	0	0
7:19:03	12	9.7	0	0
7:19:13	16	10.3	0	0
7:19:24	2	10.5	0	0
7:19:34	12	10.8	0	0
7:20:55	69	7.2	0	0
7:21:05	84	9.7	0	0
7:21:15	16	9.6	0	0
7:21:25	15	7.9	0	0
7:21:35	12	8.6	0	0
7:21:46	2	8.4	0	0
7:21:56	3	8.2	0	0
7:22:06	52	8.8	0	0
7:22:16	10	8.7	0	0
7:22:26	1	8.8	0	0
7:22:36	0	7.9	0	0
7:22:46	0	8.1	0	0
7:22:57	3	8.2	0.01	0
7:23:07	20	9.1	0	0
7:23:17	1	9	0	0
7:23:27	0	8.8	0	0
7:23:37	15	8	0	0
7:23:47	3	9	0	0
7:23:57	0	8.2	0	0
7:24:08	4	8.5	0.05	0
7:24:18	2	8.9	0.02	0
7:24:28	0	8.6	0.01	0

Tabla J.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
7:24:38	0	9.7	0.01	0
7:24:48	1	8	0.07	0
7:24:58	5	8.4	0.03	0
7:25:08	18	9.4	0.01	0
7:25:19	3	9.4	0.03	0
7:25:29	6	9.4	0	0
7:25:39	17	9.4	0	0
7:25:49	5	9.4	0.01	0
7:25:59	61	9.7	0.02	0
7:26:09	107	9	0.01	0
7:26:19	86	9.2	0.01	0
7:26:29	6	9.3	0	0
7:26:39	12	9.3	0	0
7:26:50	1	9.3	0	0
7:27:00	0	9.1	0	0
7:27:10	0	7.2	0	0
7:27:20	42	6.5	0	0
7:27:30	3	8.3	0	0
7:27:40	0	8.6	0	0
7:27:50	11	9.1	0	0
7:28:01	41	9	0	0
7:28:11	84	8.1	0	0
7:28:21	24	8.7	0	0
7:28:31	1	8.7	0	0
7:28:41	0	9.1	0	0
7:28:51	3	9.3	0.01	0
7:29:01	3	9.3	0.02	0
7:29:12	14	9.3	0.02	0
7:29:22	48	8.4	0.02	0
7:29:32	13	8.2	0.02	0

Tabla J.4: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
7:29:42	10	7	0	0
7:29:52	0	8	0	0
7:30:02	0	8.9	0	0
7:30:12	0	7.8	0	0
7:30:23	0	7.8	0.01	0
7:30:33	0	8.7	0.06	0
7:30:43	0	8.2	0.04	0
7:30:53	3	7.6	0	0
7:31:03	0	7.6	0.03	0
7:31:13	0	7.6	0.05	0
7:31:23	0	7.6	0.04	0
7:31:34	0	8.6	0.01	0
7:31:44	5	8.4	0.06	0
7:31:54	23	7.6	0.03	0
7:32:04	30	8.2	0.02	0
7:32:14	10	8.5	0	0
7:32:24	62	8.2	0	0
7:32:34	18	7.9	0	0
7:32:45	3	8.5	0	0
7:32:55	1	8.1	0	0
7:33:05	0	8.2	0	0
7:33:15	0	7.1	0	0
7:33:25	0	8.4	0.01	0
7:33:35	0	7.2	0	0
7:33:45	0	8.2	0	0
7:33:56	0	7.7	0	0
7:34:06	0	7.5	0	0
7:34:16	0	7.7	0	0
7:34:26	86	7	0	0
7:34:36	60	7.1	0	0

Tabla J.5: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
7:34:46	36	8.1	0	0
7:34:56	5	8.7	0	0
7:35:07	6	8.3	0	0
7:35:17	16	7.5	0	0
7:35:27	1	6.9	0	0
7:35:37	10	7.2	0	0
7:35:47	4	7.4	0	0
7:35:57	5	7.9	0	0
7:36:07	11	6.9	0	0
7:36:18	1	7.8	0	0
7:36:28	11	8.9	0	0
7:36:38	46	8.6	0	0
7:36:48	61	7.1	0	0
7:36:58	102	6.8	0	0
7:37:08	18	8	0	0
7:37:18	4	8	0	0
7:37:28	13	7.6	0	0
7:37:38	6	7.7	0	0
7:37:49	19	7	0	0
7:37:59	4	7	0	0
7:38:09	0	7.4	0	0
7:38:19	14	8.1	0	0
7:38:29	103	7.5	0	0
7:38:39	20	7.2	0	0
7:38:49	11	8.3	0	0
7:39:00	3	8.8	0	0
7:39:10	17	8.3	0	0
7:39:20	3	7.8	0	0
7:39:30	5	7.4	0	0
7:39:40	3	6	0	0

Tabla J.6: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
7:39:50	0	7.4	0	0
7:40:00	3	5.9	0	0
7:40:11	0	7.2	0	0
7:40:21	7	7.4	0	0
7:40:31	10	7	0	0
7:40:41	0	7.4	0	0
7:40:51	0	7.4	0	0
7:41:01	0	7.8	0	0
7:41:11	0	8	0	0
7:41:22	46	4.8	0.22	0
7:41:32	31	8.8	0.17	0
7:41:42	90	8.1	0.06	0
7:41:52	46	6.1	0.83	0
7:42:02	108	6	0.55	0
7:42:12	31	4.8	0.04	0
7:42:22	66	6	0.6	0
7:42:33	38	7.1	0.04	0
7:42:43	68	6	0.01	0
7:42:53	14	8.2	0	0

Apéndice K

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N^o 10

Tabla K.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:22:01	0	9.8	0	11
10:22:11	0	9.3	0	10
10:22:21	0	9.4	0	9
10:22:31	0	10.2	0.19	5
10:22:41	0	8.9	0.2	6
10:22:51	0	9.7	0.23	6
10:23:02	0	10.1	0.21	4
10:23:12	0	10.5	0.06	4
10:24:02	0	9.9	0	0
10:24:13	0	10.2	0	0
10:24:23	0	10.2	0	0
10:24:33	0	9.9	0	0
10:24:43	0	10.5	0	0
10:24:53	0	9.4	0.52	0
10:25:03	0	10.1	0.12	0
10:25:13	32	10	0.06	0
10:25:24	8	9.4	0.03	0
10:25:34	12	8.7	0	0
10:25:44	1	10.5	0	0
10:25:54	0	10.9	0	0
10:26:04	9	9.4	0	0
10:26:14	0	10.7	0	0
10:26:24	29	10	0	0
10:26:35	0	10.7	0	0
10:26:45	1	10.7	0	0
10:26:55	43	9	0	0
10:27:05	23	4.5	0	0
10:27:15	28	6.1	0	0
10:27:25	1	10.6	0.07	0
10:27:35	0	10.6	0.02	0

Tabla K.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:27:46	0	10.7	0.01	0
10:27:56	0	10.7	0.01	0
10:28:06	0	9.8	0	0
10:28:16	8	8.1	0	0
10:28:26	3	10.1	0	0
10:28:36	0	10.8	0.13	0
10:28:46	67	9.5	0.03	0
10:28:56	41	4.2	0.01	0
10:29:06	29	6.8	0	0
10:29:17	0	10.3	0	0
10:29:27	0	10.7	0	0
10:29:37	202	10.4	0	0
10:29:47	107	9.8	0	0
10:29:57	18	4.7	0	0
10:30:07	79	4.6	0	0
10:30:17	8	9.9	0	0
10:30:28	0	9.7	0.03	0
10:30:38	0	8.9	0	0
10:30:48	1	10.5	0.01	0
10:30:58	0	9.7	0.03	0
10:31:08	0	10	0	0
10:31:18	0	10.4	0	0
10:31:28	0	10.5	0	0
10:31:39	0	10.4	0	0
10:31:49	0	10.3	0	0
10:31:59	0	9.6	0	0
10:32:09	3	9.5	0	0
10:32:19	2	9.4	0	0
10:32:29	0	9.9	0	0
10:32:39	0	9.9	0	0

Tabla K.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:32:50	0	9.9	0	0
10:33:00	0	9.9	0	0
10:33:10	0	9.6	0	0
10:33:20	0	9.7	0	0
10:34:19	0	8.7	0	0
10:34:29	0	8.4	0.01	0
10:34:39	80	7.8	0	0
10:34:49	81	5.8	0	0
10:34:59	23	8.9	0	0
10:35:09	6	8.7	0	0
10:35:20	1	8.7	0.12	0
10:35:30	1	8.9	0.08	0
10:35:40	1	9.1	0.06	0
10:35:50	1	8.1	0	0
10:36:00	5	8.2	0	0
10:36:10	6	8.5	0	0
10:36:20	1	9.2	0	0
10:36:31	15	9.2	0.03	0
10:36:41	3	9.4	0	0
10:36:51	1	8.4	0.01	0
10:37:01	1	7.8	0	0
10:37:11	12	7.7	0	0
10:37:21	6	7.9	0	0
10:37:31	1	8.1	0	0
10:37:42	0	8.4	0	0
10:37:52	0	8.8	0.02	0
10:38:02	1	7.9	0.04	0
10:38:12	0	8.3	0.03	0
10:38:22	0	8.3	0	0
10:38:32	146	8.7	0	0

Tabla K.4: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:38:42	14	8.6	0	0
10:38:53	27	8	0.02	0
10:39:03	26	7.9	0	0
10:39:23	1	8.3	0	0
10:39:33	1	8.3	0	0
10:39:43	5	8	0	0
10:39:53	2	8.3	0	0
10:40:04	1	9.1	0	0
10:40:14	0	7.5	0.03	0
10:40:24	0	8.2	0.05	0
10:40:34	0	8.4	0.06	0
10:40:44	31	7.8	0.06	0
10:40:54	17	8.3	0	0
10:41:04	4	8.3	0	0
10:41:15	2	8.3	0	0
10:41:25	1	8.3	0	0
10:41:35	1	8.3	0	0
10:41:45	101	8.2	0	0
10:41:55	181	8	0	0
10:42:05	100	8	0	0
10:42:15	20	8.3	0	0
10:42:26	5	8.3	0	0
10:42:36	2	8.3	0	0
10:42:46	1	8.9	0.08	0
10:42:56	1	7.8	0.11	0
10:43:06	0	7.6	0.08	0
10:43:16	0	9.1	0	0
10:43:26	0	9.1	0	0
10:43:37	0	8.8	0	0
10:43:47	41	4	0	0

Tabla K.5: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
10:43:57	53	6.3	0	0
10:44:07	10	7.8	0	0
10:44:17	2	8.6	0	0
10:44:27	0	8.4	0.06	0
10:44:37	30	7.3	0	0
10:44:47	57	8	0	0
10:44:57	36	8	0	0
10:45:08	34	7.6	0	0
10:45:18	16	6.9	0	0
10:45:28	3	8.8	0	0
10:45:38	2	8.2	0	0
10:45:48	1	8.2	0.09	0
10:45:58	0	8.2	0.06	0
10:46:08	0	8.2	0.08	0
10:46:19	0	8.5	0.02	0
10:46:29	0	8	0.22	0
10:46:39	0	8.5	0.15	0
10:46:49	0	8.6	0.1	0
10:46:59	0	8.2	0.07	0
10:47:09	24	3.6	0.03	0
10:47:19	7	7.9	0.01	0
10:47:30	1	7.3	0	0
10:47:40	0	9.5	0	0

Apéndice L

Muestreo de emisiones de vehículos livianos: vehículo N^o 11

Tabla L.1: Registros sin procesar.

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
20:16:17	103	9	0.45	98
20:16:27	95	9.9	0.53	103
20:16:37	90	9.8	0.51	106
20:16:47	170	9.8	0.51	104
20:16:57	108	9.8	0.75	104
20:17:07	167	9.8	0.78	103
20:17:17	104	9.8	0.82	102
20:17:28	784	9.9	0.48	102
20:17:38	783	9.6	0.68	103
20:17:48	267	9.9	1.25	102
20:17:58	327	9.9	1.13	95
20:18:08	929	10	0.24	95
20:18:18	1069	10	0.55	96
20:19:17	164	8.5	1.26	96
20:19:27	9	5.5	0.27	146
20:19:37	83	5.9	0.59	222
20:19:47	810	9.2	0.58	171
20:19:58	1676	9.5	0.34	116
20:20:08	1951	9.6	0.23	109
20:20:18	1385	9.6	0.81	108
20:20:28	1198	9.4	1.02	112
20:20:38	1348	8.8	0.29	124
20:20:49	634	8.7	1.12	120
20:21:00	177	8.9	1.61	122
20:21:10	118	9.3	1.29	140
20:21:20	992	9.2	0.8	143
20:21:30	207	5.7	0.73	145
20:21:40	1297	9	0.57	151
20:21:50	1301	9.4	0.93	142
20:22:00	1322	9.4	0.6	114

Tabla L.2: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
20:22:11	891	8.4	0.54	105
20:22:21	289	7.8	1.72	104
20:22:31	146	8	1.33	110
20:22:41	110	9.1	1.18	138
20:22:51	104	9.2	1.11	168
20:23:01	837	8.6	1.18	159
20:23:11	212	7.8	1.49	147
20:23:22	106	9	1.1	132
20:23:32	101	9.4	0.99	145
20:23:42	1095	8.9	0.72	152
20:23:53	517	9.6	1.38	156
20:24:03	1851	10.2	0.34	154
20:24:13	1838	9.6	0.44	108
20:24:23	807	8.8	0.8	106
20:24:33	213	8.5	1.63	107
20:24:44	106	9.1	1.36	141
20:24:54	1704	9.1	0.27	140
20:25:04	1827	9.1	0.27	105
20:25:15	1227	8.9	0.86	107
20:25:26	1289	9.5	0.43	107
20:25:36	1470	8.9	0.25	104
20:25:46	983	8.2	1.77	101
20:25:57	310	8.2	1.79	106
20:26:07	124	8.2	1.23	106
20:26:17	95	8.8	1.15	108
20:26:27	405	8.3	0.82	118
20:26:37	362	8.6	1.34	118
20:26:47	477	8.9	0.95	118
20:26:57	904	8.5	0.76	109
20:27:08	1079	8.8	0.68	105

Tabla L.3: Registros sin procesar (continuación).

Hora	NO (ppm)	CO ₂ (% vol)	CO (% vol)	HC (ppm)
20:27:18	466	8.7	0.71	102
20:27:28	267	8.3	1.7	104
20:27:38	1181	8.3	0.76	107
20:27:48	949	8.3	1	103
20:27:58	426	7.8	1.62	105
20:28:08	1136	8.7	0.63	106
20:28:19	639	7.8	1.74	106
20:28:29	1443	8.6	0.58	104
20:28:39	782	8.6	0.17	100
20:28:49	970	8.4	0.63	98
20:28:59	804	7.8	0.94	103
20:29:09	459	7.7	2.18	106
20:29:19	611	7.9	0.84	107
20:29:30	679	7.5	0.88	101
20:29:40	281	6.6	1.53	102
20:29:50	122	7.2	1.07	102
20:30:00	102	8.2	0.94	103
20:30:10	93	8.2	0.89	130
20:30:20	426	8.2	0.84	124
20:30:30	165	8.7	1.11	109
20:30:41	435	8.5	0.63	101
20:30:51	1139	8.2	0.59	99
20:31:01	341	7.8	1.57	99
20:31:11	342	8.1	0.83	99
20:31:21	193	8.1	0.78	99

Apéndice M

Muestreo de emisiones de vehículos pesados en ralentí: camiones

Tabla M.1: Registros sin procesar.

N° vehículo	CO (% vol)	HC (ppm)	O ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	NO (ppm)
1	0.01	1	18.64	2	423
2	0.08	1	18.71	1.8	65
3	0.02	1	19.24	1.5	113
4	0.02	1	18.85	1.6	241
5	0.03	1	18.74	1.8	74
6	0.01	1	18.7	1.7	275
7	0.05	0	19.33	1.3	56
8	0.05	1	18.91	1.7	106
9	0.02	1	18.86	1.8	196
10	0.03	1	18.78	2	168
11	0.02	1	18.85	1.8	173
12	0.05	1	18.78	1.8	71
13	0.05	1	18.78	1.9	70
14	0.01	1	19.21	1.5	59
15	0.04	1	19.04	1.6	268
16	0.03	1	19.6	1.2	94
17	0.02	1	18.15	2.3	169
18	0.03	1	18.35	2.2	146
19	0.03	1	19.32	1.4	253
20	0.05	1	19.27	1.5	174
21	0.03	1	18	2.4	102
22	0.03	1	18.96	1.5	171
23	0.04	1	18.74	1.5	98
24	0	1	18.63	1.8	328
25	0	1	18.75	1.7	128
26	0.02	1	19.14	1.4	186
27	0	1	18.14	2.2	164
28	0	1	18.48	2.1	167
29	0.02	1	19.06	1.6	52
30	0.02	1	18.59	1.8	181

Tabla M.2: Registros sin procesar (continuación).

Nº vehículo	CO (% vol)	HC (ppm)	O ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	NO (ppm)
31	0	1	19.36	1.5	325
32	0	1	18.77	1.8	196
33	0.06	0	18.74	1.7	214
34	0.03	1	19.12	1.5	125
35	0	2	19.67	1.1	254
36	0.02	4	18.63	1.9	394
37	0	2	19.4	1.4	121
38	0.02	1	19.51	1.2	139
39	0.01	1	18.99	1.6	65
40	0.03	1	19.41	1.2	66
41	0	1	19.47	1.1	155
42	0.01	1	19.38	1.2	65
43	0.03	1	19.38	1.2	26
44	0	1	19.09	1.4	171
45	0	1	19.42	1.2	97
46	0.04	1	18.89	1.6	68
47	0.03	1	19.22	1.4	172
48	0.05	1	18.65	1.9	160
49	0.02	1	19.4	1.4	109
50	0.06	1	19.38	1.3	60
51	0	1	18.58	1.9	393
52	0	1	19.13	1.5	189
53	0.05	1	19.22	1.4	118
54	0	1	19.09	1.6	356
55	0.05	1	19.11	1.5	66
56	0	1	18.68	2	288
57	0	1	19.01	1.7	176
58	0	1	18.97	1.6	181
59	0.01	1	19.25	1.4	296
60	0	1	18.38	2.2	285

Tabla M.3: Registros sin procesar (continuación).

N° vehículo	CO (% vol)	HC (ppm)	O ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	NO (ppm)
61	0	1	19.43	1.2	175
62	0.01	1	19.41	1.2	66
63	0.01	1	18.86	1.6	182
64	0.01	1	19.05	1.4	244
65	0.02	1	19.27	1.3	53
66	0.01	1	19.41	1.2	179
67	0.04	0	19.11	1.5	301
68	0.08	0	19.07	1.3	131
69	0.05	0	19.29	1.3	189
70	0.06	0	18.8	1.8	141
71	0.03	0	18.46	2.1	170
72	0	0	19.18	1.5	87
73	0	0	19.32	1.4	277
74	0	0	19.01	1.7	239
75	0	0	19.47	1.3	148
76	0	0	19.35	1.3	151
77	0	0	19.25	1.4	332
78	0	0	18.93	1.7	268
79	0	0	19.5	1.2	145
80	0	0	19.31	1.3	187
81	0	0	18.81	1.7	383
82	0	0	18.78	1.8	149
83	0.02	0	18.65	1.9	339
84	0	0	19.16	1.5	221
85	0	0	19.16	1.4	132
86	0.04	0	18.88	1.6	381
87	0.02	0	19.05	1.7	188
88	0.04	0	19.02	1.6	151
89	0.05	0	19.58	1.2	97
90	0.06	0	18.86	1.8	140

Tabla M.4: Registros sin procesar (continuación).

N° vehículo	CO (% vol)	HC (ppm)	O ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	NO (ppm)
91	0.07	0	18.65	1.9	80
92	0	0	18.82	1.3	211
93	0	0	17.68	1.9	176
94	0.03	0	18.94	1.6	216
95	0.07	0	18.99	1.4	71
96	0.01	0	NaN	1.5	170
97	0	0	NaN	1.9	103
98	0.04	0	NaN	1.9	441
99	0.03	0	NaN	1.6	209
100	0.02	0	NaN	2.2	348
101	0.01	0	NaN	1.3	114
102	0.03	0	NaN	1.3	167
103	0.02	0	NaN	1.3	175
104	0.06	0	NaN	1.3	81
105	0.03	0	NaN	2.4	152
106	0.01	0	NaN	2	366
107	0.05	0	NaN	1.4	80
108	0.01	0	NaN	1.4	129
109	0.05	0	NaN	1.9	170
110	0	0	NaN	1.4	174
111	0	0	NaN	1.5	188
112	0	0	NaN	1.3	155
113	0	0	NaN	1.3	195
114	0.03	0	NaN	2.1	314
115	0	0	NaN	1.8	160
116	0	0	NaN	1.8	164
117	0	0	NaN	2.2	202
118	0.05	0	NaN	1.7	187
119	0.03	0	NaN	2	102

Apéndice N

Muestreo de emisiones de vehículos pesados en ralentí: ómnibus

Tabla N.1: Registros sin procesar.

Nº vehículo	CO (% vol)	HC (ppm)	O ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	NO (ppm)
1	0.04	1	18.65	1.8	257
2	0	1	18.72	1.8	421
3	0	1	18.75	1.9	182
4	0.05	1	19.15	1.5	144
5	0	1	17.5	2.9	332
6	0	1	17.98	2.5	466
7	0.05	1	18.74	1.8	201
8	0	1	19.08	1.5	191
9	0	1	18.85	1.6	226
10	0.01	1	18.91	1.6	273
11	0	1	19.19	1.4	155
12	0.02	0	19.05	1.6	230
13	0	0	18.77	1.8	184
14	0	0	19.17	1.6	230
15	0	0	18.5	2.1	345
16	0	0	19.48	1.2	121
17	0	0	18.31	1.4	231
18	0	0	NaN	2.7	403
19	0.01	0	NaN	1.4	150
20	0.02	0	NaN	1.4	169
21	0	0	NaN	1.4	175
22	0	0	NaN	1.4	199

Apéndice Ñ

Muestreo de emisiones de vehículos pesados en movimiento: camiones

Tabla Ñ.1: Registros sin procesar: vehículo N°1.

Tiempo (min)	RPM del motor	CO ₂ (%vol)	CO (%vol)	HC (ppm)	NO (ppm)
0	1100	2.9	0.01	0	0
0.5	600	4.1	0.02	0	0
1	600	3.7	0.02	0	0
1.5	600	1.5	0.01	0	0
2	1000	4.6	0.23	0	0
2.5	1100	6.6	0.18	0	0
3	1200	5.6	0.02	0	0
3.5	1100	6.2	0	0	0
4	1200	3.5	0.02	0	0
4.5	1250	6	0.02	0	0
5	1150	0.2	0	0	0
5.5	1150	2.2	0	0	0
6	1150	5.6	0.03	0	0
6.5	1000	0.9	0	0	0
7	1000	5.3	0.17	0	0
7.5	1000	3.8	0.09	0	0
8	1000	0.7	0	0	0
8.5	1000	1.2	0	0	0
9	1000	1.9	0.07	0	0
9.5	1000	1.8	0.01	0	0
10	600	0.8	0	0	0

Tabla Ñ.2: Registros sin procesar: vehículo N°2.

Tiempo (min)	RPM del motor	CO ₂ (%vol)	CO (%vol)	HC (ppm)	NO (ppm)
0	500	1.2	0	0	0
0.5	1400	1.4	0	0	0
1	1100	1.7	0	0	0
1.5	1400	1.6	0	0	0
2	1300	3.5	0	0	0
2.5	1500	0.4	0	0	0
3	500	4.6	0	0	0
3.5	1100	1.6	0	0	0
4	1300	4.8	0	0	0
4.5	1300	4.3	0	0	0
5	1400	0.5	0	0	0
5.5	1200	3.2	0	0	0
6	1200	4.1	0	0	0
6.5	1200	2.8	0	0	0
7	900	4.5	0	0	0
7.5	500	0.6	0	0	0
8	1000	1.1	0	0	0
8.5	1100	4	0	0	0
9	1100	4.7	0	0	0
9.5	900	2.8	0	0	0
10	500	0.7	0	0	0

Tabla Ñ.3: Registros sin procesar: vehículo N°3.

Tiempo (min)	RPM del motor	CO ₂ (%vol)	CO (%vol)	HC (ppm)	NO (ppm)
0	1500	2.4	0.02	0	0
0.5	1500	1.5	0.03	0	0
1	1300	6.5	0	0	0
1.5	1600	7.2	0	0	0
2	2000	11.9	0.17	0	0
2.5	1800	10.1	0.04	0	0
3	2000	7.7	0	0	0
3.5	2000	8.4	0	0	0
4	2000	12.6	0.08	0	0
4.5	1800	10.8	0.16	0	0
5	2000	12.6	0.23	0	0
5.5	2000	8	0	0	0
6	2000	12.2	0.15	0	0
6.5	700	12.4	0.17	0	0
7	1000	2.1	0.01	0	0
7.5	1500	11.2	0.02	0	0
8	2000	8.8	0	0	0
8.5	2000	11.8	0	0	0
9	2000	12.2	0.14	0	0
9.5	2000	7.5	0	0	0
10	2000	8.4	0	0	0

Tabla Ñ.4: Registros sin procesar: vehículo N°4.

Tiempo (min)	RPM del motor	CO ₂ (%vol)	CO (%vol)	HC (ppm)	NO (ppm)
0	800	2.9	0	0	0
0.5	900	3.8	0	0	0
1	900	5.3	0	0	0
1.5	2200	4.6	0.01	0	0
2	1000	9.3	0.02	0	0
2.5	1000	5	0	0	0
3	1700	7.1	0	0	0
3.5	2000	9.4	0.05	0	0
4	1000	2.6	0	0	0
4.5	1500	8.4	0	0	0
5	1800	0.3	0	0	0