



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**MEDICION Y ANALISIS DE FACTORES DE EMISION PARA  
VEHICULOS MOTORIZADOS DE LA REGION METROPOLITANA DE  
SANTIAGO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA MENCION MECANICA**

**DAVID GABRIEL CARRASCO MANRIQUEZ**

PROFESOR GUIA:  
MAURICIO OSSES ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISION:  
ROBERTO CORVALAN PAIVA  
LAURA GALLARDO KLENNER  
LUIS CIFUENTES LIRA

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2009

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes Generales	1
1.2	Motivación	1
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Generales	5
1.3.2	Específicos	5
1.4	Contenidos	6
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>7</b>
2.1	Sistemas de medición de emisiones vehiculares	7
2.1.1	Antecedentes Generales	7
2.1.2	Medición en Túneles	8
2.1.3	Medición en Borde de Calle	8
2.1.4	Medición con Sensores Remotos	8
2.1.5	Dinamómetro de Chasis	9
2.1.6	Seguimiento en Ruta	10
2.2	Metodologías para determinación de Factores de Emisión	10
2.2.1	Potencia Específica Vehicular (PSV)	11
2.2.2	Modelo Europeo COPERT III	15
2.2.2.1	Factores de emisión y normas	17
2.2.2.2	Corrección de las emisiones	18
2.2.3	Dispersión de datos en la determinación de los factores de emisión	20
2.2.4	Actualización del modelo: COPERT IV	24
2.3	Categorías Vehiculares en Chile	25
2.3.1	Vehículos livianos y medianos	25
2.3.2	Vehículos Pesados de carga	28
2.3.3	Transporte Público	28
2.4	Revisión de Trabajos Previos	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>32</b>
3.1	Introducción	32
3.2	Equipamiento	33
3.2.1	Laboratorio del Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV)	33
3.2.1.1	Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	34
3.2.1.2	Hidrocarburos Totales (HCT)	35
3.2.1.3	Oxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	35
3.2.1.4	Material Particulado Respirable (MP <sub>10</sub> )	35
3.2.2	Equipos Portátiles	35
3.3	Post-procesamiento de datos	37
3.3.1	Datos desde dinamómetro	37

3.3.2	Datos desde Equipos Portátiles .....	40
3.3.2.1	Camiones Livianos.....	42
3.3.2.2	Camiones Medianos.....	45
3.3.2.3	Camiones Pesados.....	48
3.4	Campaña experimental para buses.....	51
3.4.1	Metodología específica.....	53
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
4.1	Vehículos Livianos y Medianos .....	58
4.1.1	Curvas de emisión para vehículos livianos y medianos .....	60
4.2	Camiones .....	62
4.2.1	Curvas de emisión para camiones .....	63
4.3	Buses .....	65
4.3.1	Buses sin filtro de partículas.....	66
4.3.2	Buses con filtro de partículas.....	77
4.3.3	Curvas de emisión para buses.....	84
<b>5</b>	<b>COMPARACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN.....</b>	<b>85</b>
5.1	Vehículos livianos y medianos .....	87
5.1.1	COPERT III V/S COPERT IV .....	87
5.1.2	Comparación para factores experimentales .....	88
5.1.2.1	Vehículos de pasajeros.....	88
5.1.2.2	Vehículos Comerciales .....	90
5.2	Vehículos pesados de carga.....	94
5.2.1	COPERT III V/S COPERT IV .....	94
5.2.2	Comparación para factores experimentales.....	95
5.3	Buses.....	98
5.3.1	COPERT III V/S COPERT IV .....	98
5.3.2	Comparación para factores experimentales .....	98
5.4	Ranking por categoría.....	101
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>104</b>
6.1	Conclusiones.....	104
6.1.1	Conclusiones Generales .....	104
6.1.2	Conclusiones respecto de los Resultados .....	105
6.1.3	Conclusiones para la Comparación de Factores de Emisión .....	106
6.2	Recomendaciones.....	107

## Índice de Tablas

Tabla 1-1: Inventario de emisiones anual, escenario 2005 real, Región Metropolitana .	3
Tabla 2-1: Calidades de combustible consideradas por COPERT, Gasolina .....	19
Tabla 2-2: Calidades de combustible consideradas por COPERT, Diesel.....	19
Tabla 2-3: Calidad de combustibles aplicables .....	19
Tabla 2-4: Vehículos Livianos, clasificación según DS 211/1991 .....	26
Tabla 2-5: Clasificación para los efectos del artículo N° 4 bis del DS 211/1991.....	26
Tabla 2-6: Vehículos Medianos, clasificación según DS 54/1994 .....	26
Tabla 2-7: Clasificación para los efectos del artículo N° 4 bis del DS 54/1994.....	27
Tabla 2-8: Definición de categorías para Vehículos Livianos y Medianos.....	27
Tabla 2-9: Categorías de vehículos de carga .....	28
Tabla 2-10: Categorías vehiculares y tecnologías para Buses .....	29
Tabla 2-11: Resumen programa de pruebas laboratorio 3CV .....	30
Tabla 2-12: Resumen de flota experimental por categoría .....	31
Tabla 2-13: Cuadro resumen de pruebas realizadas .....	31
Tabla 3-1: Categorías de buses para mediciones experimentales.....	51
Tabla 3-2: Muestra de buses del transporte público. ....	52
Tabla 3-3: Características principales del Ciclo CTST-1 .....	54
Tabla 3-4: Características principales del Ciclo CTST-2 .....	55
Tabla 4-1: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, vehículos livianos y medianos.....	60
Tabla 4-2: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, vehículos livianos y medianos.....	61
Tabla 4-3: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, camiones livianos.....	64
Tabla 4-4: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, camiones medianos.....	64
Tabla 4-5: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, camiones pesados.....	65
Tabla 4-6: Reducciones porcentuales entre tecnologías .....	83
Tabla 4-7: Expresiones para niveles de emisión en función de la velocidad, buses del transporte público sin filtro de partículas.....	84
Tabla 5-1: Índices de calidad estadística definidos por COPERT .....	85
Tabla 5-2: Calidad estadística de las curvas de emisión.....	86
Tabla 5-3: Comparación Copert IV / Copert III para Vehículos de Pasajeros.....	88
Tabla 5-4: Comparación Copert IV / Copert III para Vehículos Comerciales.....	88
Tabla 5-5: Comparación de resultados experimentales / Copert III para Vehículos de Pasajeros.....	89
Tabla 5-6: Comparación de resultados experimentales / Copert IV para Vehículos de Pasajeros.....	89
Tabla 5-7: Comparación de resultados experimentales / Copert III para Vehículos Comerciales .....	90
Tabla 5-8: Comparación de resultados experimentales / Copert IV para Vehículos Comerciales .....	90
Tabla 5-9: Comparación Copert IV / Copert III para Camiones .....	94
Tabla 5-10: Comparación valores experimentales / Copert III para Camiones .....	95
Tabla 5-11: Comparación valores experimentales / Copert IV para Camiones.....	96
Tabla 5-12: Comparación Copert IV / Copert III, Buses del transporte público .....	98
Tabla 5-13: Comparación Valores experimentales / Copert III, Buses del transporte público .....	99
Tabla 5-14: Comparación Valores experimentales / Copert IV, Buses del transporte público .....	99

Tabla 5-15: Comparación valores experimentales / Copert IV, valores extremos (mayores a 200% y menores al 50%) .....	103
--	-----

## Índice de Figuras

Figura 2-1: Emisiones en BINs de PSV para CO <sub>2</sub> .....	13
Figura 2-2: Histograma de participación por BIN para dos vehículos con circuitos de conducción levemente distintos. ....	14
Figura 2-3: Generación de curvas de emisión a partir de ciclos de conducción .....	15
Figura 2-4: Rapone et al., Curvas de emisión y dispersión de datos para CO.....	21
Figura 2-5: Rapone et al., Curvas de emisión y dispersión de datos para CO <sub>2</sub> . ....	22
Figura 2-6: Rapone et al., Curvas de emisión y dispersión de datos para HC.....	23
Figura 2-7: Rapone et al., Curvas de emisión y dispersión de datos para NO <sub>x</sub> . ....	24
Figura 2-8: Buses con tecnologías anteriores a Transantiago.....	29
Figura 2-9: Buses con tecnologías estándar Transantiago .....	30
Figura 3-1: Flujómetro utilizado y vista de montaje de equipo de recolección en vehículo liviano.....	37
Figura 3-2: Formato de resultados de test en laboratorio.....	39
Figura 3-3: Curva experimental versus curva de referencia.....	40
Figura 3-4: Ciclos Camiones Livianos, velocidades medias entre 5 y 70 km/h.....	45
Figura 3-5: Ciclos Camiones Medianos, velocidades medias entre 6 y 73 km/h.....	48
Figura 3-6: Ciclos Camiones Pesados, velocidades medias entre 9 y 75 km/h.....	51
Figura 3-7: Ciclo de conducción CTSM-1 .....	55
Figura 3-8: Ciclo de conducción CTSM-2.....	56
Figura 4-1: Curvas de emisión en función de la velocidad media, para varias fuentes. Categoría vehicular "Camión Mediano - Sin norma" .....	57
Figura 4-2: Factores experimentales para vehículos livianos y medianos, HC, CO, NO <sub>x</sub> .....	59
Figura 4-3: Factores experimentales para vehículos livianos y medianos, MP .....	59
Figura 4-4: Factores experimentales para camiones, HC, CO, NO <sub>x</sub> .....	62
Figura 4-5: Factores experimentales para camiones, MP.....	63
Figura 4-6: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión HC.....	67
Figura 4-7: Resultados detallados por test, HC.....	68
Figura 4-8: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, NO <sub>x</sub> .....	69
Figura 4-9: Resultados detallados por test, NO <sub>x</sub> .....	70
Figura 4-10: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO .....	71
Figura 4-11: Resultados detallados por test, CO .....	72
Figura 4-12: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO <sub>2</sub> .....	73
Figura 4-13: Resultados detallados por test, CO <sub>2</sub> .....	74
Figura 4-14: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, MP .....	75
Figura 4-15: Resultados detallados por test, MP .....	76
Figura 4-16: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, HC .....	77
Figura 4-17: Resultados detallados por test, HC .....	78
Figura 4-18: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, NO <sub>x</sub> .....	78
Figura 4-19: Resultados detallados por test, NO <sub>x</sub> .....	79
Figura 4-20: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO .....	79
Figura 4-21: Resultados detallados por test, CO .....	80
Figura 4-22: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO <sub>2</sub> .....	80
Figura 4-23: Resultados detallados por test, CO <sub>2</sub> .....	81
Figura 4-24: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, MP .....	81
Figura 4-25: Resultados detallados por test, MP .....	82
Figura 4-26: Comparación entre emisiones de buses C/F y S/F, HC, NO <sub>x</sub> y CO [g/km] .....	83

Figura 4-27: Comparación entre emisiones de buses C/F y S/F, MP [g/km].....	83
Figura 5-1: Comparación para Vehículos Livianos y Medianos Pasajeros .....	92
Figura 5-2: Comparación para Vehículos Livianos y Medianos Comerciales .....	93
Figura 5-3: Comparación para Camiones .....	97
Figura 5-4: Comparación para Buses.....	100

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO  
DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA  
MENCION MECANICA  
POR: DAVID GABRIEL CARRASCO MANRIQUEZ  
FECHA: 22 de Enero de 2009  
PROF. GUÍA: Sr. MAURICIO OSSES ALVARADO

“MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS  
MOTORIZADOS DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO”

El año 1996 la Región Metropolitana fue declarada Zona Saturada por cuatro contaminantes atmosféricos (ozono, material particulado respirable, partículas en suspensión y monóxido de carbono) y Zona Latente por los elevados niveles de dióxido de nitrógeno presentes en el aire. Las emisiones vehiculares representan una fuente importante de dichos contaminantes, y sobre la cual existe poca información local. El presente trabajo aborda de manera directa la cuantificación de los distintos contaminantes atmosféricos asociadas al sector de fuentes móviles, haciéndose cargo de dicha deficiencia en información, relevante para la gestión ambiental de la región.

Existen diversas campañas experimentales realizadas por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, las cuales se abordan en el presente trabajo. Las categorías estudiadas corresponden a vehículos livianos y medianos, camiones y buses del transporte público, totalizando una muestra de 179 vehículos, separados en 29 categorías vehiculares, según las normas de emisión vigentes en el país.

El estudio distingue mediciones de CO, HC, NO<sub>x</sub>, MP y CO<sub>2</sub> realizadas bajo condiciones de laboratorio y en ruta mediante equipos portátiles. Las mediciones de laboratorio entregan información bajo condiciones definidas y controladas para ciclos de conducción locales, en tanto que los equipos portátiles permiten estudiar las emisiones bajo condiciones de manejo en la vida real. Para los datos obtenidos mediante pruebas en ruta se utiliza un método basado en el concepto de Potencia Específica Vehicular, que permite evaluar las emisiones para cualquier condición de conducción.

Siguiendo el esquema utilizado en Chile para la determinación de inventarios de emisión, se construyen 110 curvas de emisión para los contaminantes y categorías vehiculares de interés, las cuales se reportan en su forma algebraica, con los coeficientes de correlación correspondientes y para todas las categorías en estudio. La regresión de los resultados experimentales presenta, en la mayoría de los casos, valores de R<sup>2</sup> superiores a 0,8.

Los resultados obtenidos apuntan en la dirección de COPERT IV. Las curvas presentadas reflejan las condiciones de manejo y mantenimiento locales, y constituyen una herramienta útil para la estimación y análisis de las emisiones vehiculares bajo la realidad de la Región Metropolitana y se recomienda ampliar el tamaño muestral de la categoría de vehículos pesados, en particular de los Camiones.

## ***Agradecimientos***

*A Dios,*

*a mis Padres y Hermana que siempre me han acompañado,*

*a Violeta que ha vivido junto conmigo cada parte de este proceso,*

*a Sebastián colega y amigo que me ha guiado por los pasos de las emisiones vehiculares,*

*a Mauricio, Roberto, Carlos, Laura y tantos docentes que han tutelado nuestro avance con el sólo afán de educar a los futuros profesionales, maestros y doctores de la ingeniería en nuestro país.*

*a Maricarmen, María Eugenia, Raquel, Soledad, Ricardo y el último tiempo Danniela que siempre han tenido la disposición de apoyar nuestras labores de estudiantes, y a todos quienes dan vida al departamento de Ingeniería Mecánica.*

*A todos, Muchas gracias*



# **1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

## ***1.1 Antecedentes Generales***

El presente trabajo se enmarca en el programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica, dictado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Los párrafos siguientes recogen las experiencias recogidas entre marzo de 2007 y Octubre de 2008, que motivaron la presente investigación.

## ***1.2 Motivación***

En Septiembre de 2007 tiene lugar en Santiago de Chile el V Congreso Interamericano de la Calidad del Aire AIDIS. Dicho evento reúne a investigadores de Latinoamérica bajo el lema: "Calidad del Aire: Una Prioridad Universal", y es que de un tiempo a esta parte, la contaminación atmosférica ha tomado protagonismo. Evidencias del llamado cambio climático está en el colectivo mundial, y el aumento de la morbilidad y mortalidad por enfermedades respiratorias es innegable.

Si bien Estados Unidos y la Unión Europea han hecho estudios acabados respecto del tema, la situación de Latinoamérica es una gran interrogante. Grandes ciudades con problemas de congestión y parques automotrices crecientes, flotas con bajas tasas de renovación y baja calidad de su mantenimiento no responden a ninguna estimación que pudiera realizarse en base a antecedentes de las regiones desarrolladas del mundo.

Es por esto que se están realizando importantes esfuerzos para cuantificar los niveles de contaminación atmosférica en la región de Latinoamérica. Dentro de estos cabe destacar el proyecto "South American Emissions, Megacities and Climate" (SAEMC, 2006-2010) que involucra a entidades de Argentina, Brasil, Chile, Colombia y Estados Unidos, en busca de proveer de buenas proyecciones de la contaminación atmosférica en las principales ciudades de los países en cuestión.

La situación en Chile no es muy distinta a la de la región. El año 1996 la Región Metropolitana (en adelante, RM) fue declarada Zona Saturada por cuatro contaminantes atmosféricos (ozono, material particulado respirable, partículas en suspensión y monóxido de carbono) y Zona Latente por los elevados niveles de dióxido de nitrógeno presentes en el

aire. En ese momento comenzó la elaboración del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la RM, el primero que se llevó a cabo en Chile.

El PPDA tuvo una primera actualización el año 2004 y contiene medidas estructurales con un fuerte impacto en la reducción de las emisiones de material particulado y gases a la atmósfera. Las medidas más importantes están relacionadas con la implementación del plan de modernización de transporte público, el expendio de nuevos combustibles más limpios y el cumplimiento de metas de reducción de emisiones para el sector industrial. A contar del año 2007, se ha dado inicio a la segunda actualización del PPDA.

Con el fin de alcanzar las metas propuestas para el año 2010, esto es, cumplir con las normas de calidad atmosférica primarias vigentes en Chile para Material Particulado (PM10), el 1 de septiembre de 2006 se dio inicio a la segunda actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de Santiago (PPDA).

Actualmente la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), máxima autoridad dedicada al tema en Chile, centra todos sus esfuerzos en reducir las emisiones de provenientes de diversas fuentes contaminantes, pero sin duda, los principales esfuerzos se dedican al sector de transporte. Durante el 2007, cerca de los 60% de los proyectos ejecutados o en ejecución contratados por CONAMA, apuntan a cuantificar y/o mitigar el efecto que tiene el sector transporte en las emisiones atmosféricas de la ciudad de Santiago.

Durante el año 2007, el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile (DIMEC), ha ejecutado dos proyectos y tiene en proceso al menos cinco proyectos relacionados con el tema, encargados tanto por CONAMA, como por otras entidades abocadas al medioambiente. Así mismo, durante el 2007, 7 Trabajos de Título y 5 Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, han visto la luz abocándose de manera directa a la cuantificación y caracterización de los distintos contaminantes atmosféricos asociadas al sector de transporte, así como de sus fuentes emisoras.

Para descubrir el porque del interés que este tema particular, basta con mirar los resultados del inventario de emisión al año 2005 publicados por CONAMA en 2007, mostrados en la Tabla 1-1. Por ejemplo, si observamos la responsabilidad de las distintas fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos se observa la importancia de las fuentes

móviles alcanza en casos como el del monóxido de carbono, CO, con valores de participación de un 90%.

Tabla 1-1: Inventario de emisiones anual, escenario 2005 real, Región Metropolitana

<b>Categoría de Fuente</b>	<b>PM10 %</b>	<b>PM2.5 %</b>	<b>CO %</b>	<b>NOx %</b>	<b>COV %</b>
Industria	27,0	26.3	3.2	23.9	7.3
Combustión de leña residencial	14.8	17.8	3.4	0.2	7.2
Otras Residenciales	1.7	1.8	0.1	2.2	39.9
Comerciales	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7
Quemas agrícolas	5.3	6.2	0.9	0.2	0.2
Otras Areales	13.9	12.3	2.2	0.3	18.0
<b>Total Estacionarias</b>	<b>62,7</b>	<b>68.1</b>	<b>10.0</b>	<b>30.1</b>	<b>80.8</b>
Buses	6.7	2.3	0.2	5.5	0.2
Camiones	16.3	18.7	1.5	24.4	2.1
Vehículos livianos	11.0	6.9	87.4	37.9	16.5
Fuera de Ruta	3.3	4.0	0.9	2.1	0.3
<b>Total Móviles</b>	<b>37.3</b>	<b>31.9</b>	<b>90.0</b>	<b>69.9</b>	<b>19.2</b>

Fuente: (CONAMA, 2007)

Teniendo en cuenta que el control y gestión medioambiental requiere del establecimiento de metas y evaluación de su cumplimiento en el tiempo, la utilización de herramientas como los inventarios de emisión se hace de vital importancia a la hora de cuantificar el cumplimiento y la actualización de metas medioambientales.

Un inventario de emisión en el ámbito de interés del presente estudio, no es otra cosa que la estimación de las emisiones, en un intervalo de tiempo definido, de cada una de las fuentes que aportan contaminantes atmosféricos.

La expresión general para calcular la tasa de emisión para una fuente dada viene dada por la expresión siguiente.

$$E_{Ti} = FE_i \cdot NA \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde

$E_{Ti}$  : emisiones totales del contaminante  $i$   
 $FE_i$  : factor de emisión del contaminante  $i$   
 $NA$  : nivel de actividad de la fuente en estudio

En particular, para sistemas de transporte, la expresión se modifica para hacer explícito que existen diversas tecnologías y tipos de vehículo que llevarán asociado un factor de emisión (en adelante FdE) característico.

$$E_{i,k} = N_k (FE_{i,k} \cdot NA_k) \quad \text{Ec. 1.2}$$

$E_{i,k}$  : Emisiones del contaminante  $i$  producidas por la categoría vehicular  $k$   
 $FE_{i,k}$  : Factor de emisión del contaminante  $i$  para las fuentes de la categoría  $k$   
 $NA_k$  : Nivel de actividad de la categoría  $k$   
 $N_k$  : Número de fuentes de la categoría  $k$

Entonces, los valores entregados por un inventario de emisión, son función de dos factores que son propios de cada país, y en particular de cada ciudad, donde se este realizando un proceso de gestión y control medioambiental. En el caso del sector de transporte, el nivel de actividad da cuenta de los kilómetros recorridos anualmente por cada categoría vehicular, en tanto que el factor de emisión debe dar cuenta de la tecnología vehicular, del comportamiento de manejo, la topografía de la red vial de la ciudad en cuestión, de la calidad del mantenimiento de los vehículos y del tipo de combustible utilizado, entre otras variables. En definitiva, la representatividad de un inventario de emisión viene dada por una buena estimación de nivel de actividad por fuente y la utilización de factores de emisión que representen de buena forma las variables antes mencionadas.

### **1.3 Objetivos**

En virtud de lo ya expuesto en la sección anterior, se plantean para la presente tesis de Magíster los siguientes objetivos generales y específicos.

#### **1.3.1 Generales**

- Medir la emisión de NO<sub>x</sub>, CO, HC, MP y CO<sub>2</sub> para fuentes móviles de la Región Metropolitana de Santiago, a través de campañas experimentales.
- Determinar factores de emisión para NO<sub>x</sub>, CO, HC, MP y CO<sub>2</sub>, comparables con la metodología utilizada actualmente en Chile para la estimación de emisiones de fuentes móviles en ruta, y comparar con factores determinados con otras metodologías utilizadas internacionalmente.
- Crear una base de datos que contenga los factores de emisión de contaminantes en toda la gama de vehículos motorizados, utilizando los datos obtenidos en los objetivos anteriores, buscando una estructura que permita una actualización continua con estudios futuros.

#### **1.3.2 Específicos**

Para el cumplimiento de los objetivos generales, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar campañas de medición de emisiones con Dinamómetro de Chasis y con sistemas portátiles en ruta, para buses del transporte público de la Región Metropolitana de Santiago.
- Recopilar resultados obtenidos en campañas experimentales previas realizadas por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.
- Utilizar la metodología de CONAMA (basada en COPERT) para la determinación de factores de emisión.
- Utilizar la metodología de MOVES (Aprobada por EPA) para la determinación de factores de emisión.
- Construir una base de datos que permita actualizar datos de emisión obtenidos en futuros estudios.

## **1.4 Contenidos**

Los contenidos de este reporte han sido agrupados en 5 capítulos principales, que darán cuenta del trabajo realizado, los resultados obtenidos, y las recomendaciones emanadas de ellos. Estos son: Antecedentes, Metodología, Resultados, Comparación de Factores de Emisión, y finalmente Conclusiones y recomendaciones.

El capítulo de antecedentes contempla revisión bibliográfica de artículos nacionales e internacionales, trabajos de título de pregrado y tesis de magíster y doctorados publicadas respecto de la estimación de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes móviles en ruta. Estos se reportan en el numeral 2 del presente informe.

El capítulo de Metodología comprende la realización mediciones experimentales y análisis de experiencias previas realizadas bajo dos metodologías. La primera corresponde a mediciones bajo condiciones de laboratorio para vehículos pesados (buses) del parque vehicular perteneciente a la Región Metropolitana de Santiago, Chile. La segunda en tanto, comprende la recopilación y acondicionamiento de mediciones de los contaminantes atmosféricos en cuestión en un circuito de calle, obtenidas a través de equipos portátiles de análisis de gases y material particulado (MP).

El capítulo 4 presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos desagregados en las categorías vehiculares relevantes para el estado de Chile, en base a la legislación y estándares vigentes a la fecha. Lo anterior aplicando los enfoques para datos provenientes de seguimiento operacional con equipos portátiles, así como aquellos provenientes de ensayos en laboratorios de emisiones vehiculares especializados.

El capítulo 5 del presente trabajo, compara los resultados obtenidos, con los estándares nacionales utilizados actualmente por CONAMA para la determinación de inventarios de emisión de fuentes móviles en ruta, y con aquellos definidos por la comunidad europea para estos mismo fines, agrupados en la metodología COPERT.

Finalmente, el último capítulo presenta las conclusiones particulares para los resultados obtenidos y su comparación con estándares nacionales y europeos, además de conclusiones generales respecto de las metodologías empleadas y recomendaciones para el uso de los resultados aquí reportados y para futuros estudios en el ámbito de las emisiones vehiculares.

## **2 ANTECEDENTES**

### ***2.1 Sistemas de medición de emisiones vehiculares***

#### **2.1.1 Antecedentes Generales**

Existen varios métodos típicos para la determinación de emisiones atmosféricas que tiene como origen fuentes móviles en ruta entre los cuales destacan los siguientes: pruebas en dinamómetro de chasis, estudios en túneles, utilización de sensores remotos y muestreo en calle o costado de calle. Adicionalmente, se ha introducido el uso de equipos de medición portátiles que acompañan al vehículo en un recorrido por las calles de la ciudad en estudio.

Generalmente, existe un trade-off entre el costo del método de medición y la cantidad de información adquirida para producir factores de emisión. Por ejemplo, las pruebas en Dinamómetro entregan información detallada de las emisiones individuales de cada uno de los vehículos en estudio, pero debido al alto costo de cada prueba, sólo se pueden estudiar un número limitado de vehículos. El costo por vehículo de estudios en túnel, sensores remotos y muestreo en costado de calle es mucho menor, pero es difícil obtener información de emisiones versus régimen de operación de motor. Los estudios en ruta que no se relacionan con la obtención de muestras directo del escape de los vehículos, están limitados a un solo modo de operación del motor en cada zona vial de muestreo, en tanto que las mediciones en dinamómetro y equipos portátiles, obtienen emisiones para un rango de modos de operación sobre un determinado ciclo o circuito de conducción. De todos modos, capturar emisiones en un Dinamómetro está sujeto a la utilización de un ciclo de conducción, que puede no representar de la mejor manera las condiciones reales de manejo de una ciudad dada. Los equipos portátiles se ocupan de este hecho, pero a costa de una pérdida en la repetitividad de las condiciones de manejo y en la precisión con la que los equipos registran los contaminantes emitidos. Además, ni las pruebas en dinamómetro ni aquellas con equipos portátiles cuantifican las emisiones atmosféricas producidas por el desgaste de neumáticos y re-suspensión de polvo. En definitiva, cada método de medición tendrá sus ventajas y desventajas, las cuales se deben tener en consideración al escoger una metodología u otra. A continuación se describen en detalle cada una de ellas.

### **2.1.2 Medición en Túneles**

En este caso se aplica un balance de masa en las concentraciones de contaminantes al principio del túnel y al final de este. Un conteo y caracterización del tipo de vehículos que transitan por el túnel, así como estimaciones de velocidad media de tránsito, permiten definir un factor de emisión por flota, sin embargo, deben hacerse supuestos respecto del flujo y reacciones químicas en los contaminantes de interés. A todos estos aspectos debe sumarse el siguiente hecho: las flotas que circulan por el túnel pueden no ser representativas de aquellas que circulan en el resto de la ciudad, debido a que la posición del túnel es obviamente definida y única. Además, en ciertas localidades no existen túneles al interior o en las inmediaciones de la zona bajo estudio (Damm, Kuhns, & Gertler, 2004).

### **2.1.3 Medición en Borde de Calle**

Para la determinación de factores de emisión también pueden ser utilizadas las mediciones de flujo de partículas en borde de calle. Estas permiten cuantificar las contribuciones de polvo de calle re-suspendido, en conjunto con las emisiones de escape. Al igual que las mediciones en túneles, permiten determinar material particulado producto del desgaste de frenos y neumáticos, con la posibilidad de diferenciar entre distintas flotas de vehículos en función de una cuantificación de los cambios en la composición de vehículos mientras se mide. Incluso, en los casos que la distancia entre vehículos testeados lo permite, se puede asociar un nivel de emisión a un tipo de vehículo específico. De este modo, este tipo de mediciones permite un grado de precisión mayor a las mediciones en túneles. Otra ventaja sobre las mediciones en túneles, es que las mediciones se pueden realizar en varios lugares representativos de la ciudad, aumentando el rango de vehículos y flotas testeados, no dependiendo de la ubicación y del tipo de flujo que admite un túnel dado. Finalmente, la determinación de un factor de emisión dependerá de la posibilidad de caracterizar la pluma de los vehículos testeados, que puede ser refinada con la medición de perfiles verticales de concentración.

### **2.1.4 Medición con Sensores Remotos**

Las mediciones remotas se llevan a cabo a través de extinción y/o scattering de luz a través de la calle. Una vez que un vehículo pasa, la



pluma de gases que deja el escape atenúa la intensidad de un haz de luz en patrones particulares de longitud de onda típicos para los contaminantes de interés. Este método permite individualizar los vehículos medidos, cruzando la información con el registro fotográfico de patentes y la posterior identificación con el registro de vehículos motorizados de la localidad correspondiente.

Las principales desventajas que tiene este método son diversas: el muestreo de la pluma es en un periodo muy corto de tiempo, pudiendo no ser representativo de los niveles de emisión; en el caso de material particulado, los sensores remotos no pueden dar información de los perfiles químicos, por lo tanto no permiten determinar la fuente química de los mismos; y finalmente la precisión propia de este tipo de sensores.

### **2.1.5 Dinamómetro de Chasis**

Un dinamómetro de chasis consiste en un eje móvil rotatorio acoplado a un rodillo que es movido por las ruedas motoras del vehículo o directamente por el eje impulsor del mismo. Con un equipo de estas características se busca simular la carga que un vehículo puede experimentar sobre un ciclo particular de conducción. Las condiciones de carga se logran con una combinación de motores eléctricos o hidráulicos y volantes de inercia. Las mediciones de contaminantes se realizan mientras el vehículo recorre un ciclo de conducción, que consiste en una traza definida de velocidad versus tiempo. Existen docenas de ciclos de conducción que se pueden realizar buscando simular los rangos de patrones de conducción, desde la congestión urbana, hasta las condiciones de carreteras o vías rápidas.

Las pruebas en dinamómetro de chasis permiten medir emisiones en vehículos sometidos a condiciones específicas y controladas, tanto de operación como de muestreo. Estos estudios son útiles para estudiar cambios relativos en las emisiones asociados a uso de distintos combustibles, tipos de motor, ciclos de conducción, y condiciones ambientales.

No obstante las ventajas antes señaladas, la principal crítica a los ciclos de conducción utilizados en un dinamómetro, es que estos no representan de manera precisa las condiciones de conducción del mundo real. Por ejemplo un ciclo que carezca de aceleraciones importantes, no representará bien las emisiones de material particulado que son muy sensibles a este factor. Adicionalmente, las pruebas en Dinamómetro de Chasis son costosas y requieren de un tiempo importante por vehículo.

Usualmente se requieren más de 40 minutos por prueba, a lo que hay que sumar el tiempo de montaje del vehículo en el sistema de rodillos, la instalación de las mangueras que tomarán la muestra y la llevarán a los analizadores, y el aseguramiento del vehículo para evitar posibles desmontajes a altas velocidades, que pueden provocar daños materiales y al personal encargado de la prueba. En consecuencia, el alto costo y tiempo requerido por prueba hace que el estudio de una muestra de tamaño representativo de las flotas en uso, tenga un valor monetario alto en comparación con otras tecnologías.

### **2.1.6 Seguimiento en Ruta**

Al igual que las mediciones en dinamómetro de chasis, los factores de emisión en ruta presentan una gran individualización, y la posibilidad de recoger una amplia gama de comportamientos en ruta segundo a segundo, sumado a un costo menor por prueba. Sin embargo, las condiciones de cada prueba son menos controladas, versus las mediciones en dinamómetro de chasis. Presión, temperatura ambiente y modos de conducción son registrados, pero no se puede tener control puesto que las condiciones de tráfico real son muy variables. La variaciones en el flujo de una arteria dada impactará directamente sobre las variables antes mencionadas, lo que conlleva la necesidad de buscar un medio de normalización para poder comparar diferentes medidas para un mismo, o entre varios vehículos.

## ***2.2 Metodologías para determinación de Factores de Emisión***

El presente trabajo contempla el estudio de mediciones realizadas tanto en condiciones de conducción reales por el método de seguimiento en ruta, como por el método de medición bajo condiciones de laboratorio, en un dinamómetro de chasis. Ambos métodos suponen la medición segundo a segundo de niveles de emisión directamente del escape de un vehículo.

La obtención de factores de emisión se realizará en primera instancia, observando el esquema reconocido y aprobado por el estado para estimar las emisiones antropogénicas provenientes de fuentes móviles en ruta. Dicho método se basa en la metodología propuesta por la European Environment Agency, llamada Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT III).

A modo comparativo y exploratorio buscando nuevas tendencias, se utiliza el método aprobado por la Environmental Protection Agency de los

Estados Unidos de América, EPA. Esta variable es considerada como la mejor unidad para estimar emisiones vehiculares, según los modelos internacionales más recientes de estimación de emisiones (IVE y MOVES). Su desarrollo teórico se encuentra ampliamente reportado en la literatura especializada (Jimenez P., 1999).

A continuación se explica cada uno de los acercamientos que se usan actualmente para determinar factores de emisión bajo dichos métodos de recolección de datos.

### 2.2.1 Potencia Específica Vehicular (PSV)

La metodología de Potencia Vehicular Específica (Vehicle Specific Power, en ingles), es una medida de la carga de marcha sobre un vehículo. Este tipo de aproximación a la caracterización de las emisiones fue desarrollada por Jimenez (Jimenez P., 1999), y se define como la potencia por unidad de masa en función de la pendiente de la vía, resistencia aerodinámica y a la rodadura y finalmente la aceleración inercial, como sigue:

$$PSV = \frac{\frac{d}{dt}(K + U) + F_{Rodadura} \cdot v + F_{Aerodinámica} \cdot v}{m} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Desarrollando la ecuación anterior se tiene que:

$$PSV = \frac{\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot v^2 + mgh\right) + C_R mg \cdot v + \frac{1}{2} \rho_a C_D A \cdot v^2 \cdot v}{m}$$

Aplicando la derivada temporal, y simplificando la masa, obtenemos la expresión:

$$PSV = v \cdot (a \cdot (1 + \varepsilon) \cdot Pendiente + g \cdot C_R) + 0,5 \cdot \frac{\rho_a \cdot C_D \cdot A \cdot v^3}{m} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde

- m: Masa del vehículo
- v: Velocidad del vehículo
- a: Aceleración del vehículo
- $\varepsilon$ : "Factor de Masa", el cual es equivalente a la masa de los componentes rodantes del tren de potencia (ruedas, engranajes, ejes, etc.)

- h: Altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra el vehículo
- Grado: Alzamiento Vertical / Largo de la pendiente
- g : Aceleración de gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>)
- C<sub>R</sub>: Coeficiente de resistencia a la rodadura (adimensional)
- C<sub>D</sub>: Coeficiente de arrastre (adimensional)
- A: Área frontal del vehículo
- ρ<sub>a</sub>: Densidad del aire (1,207 kg/m<sup>3</sup> a 20°C)

Usando valores típicos de los coeficientes en unidades SI, la ecuación se convierte en la siguiente expresión:

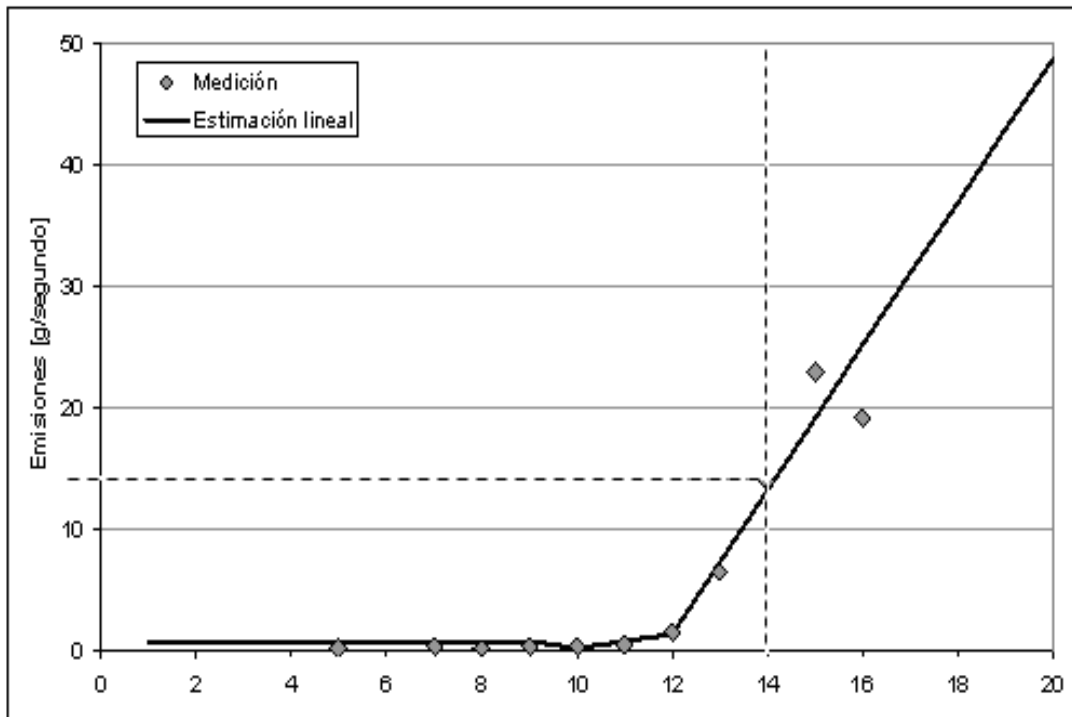
$$VSP \left( \frac{kW}{Ton\ metricas} \right) = v \cdot (1,04 \cdot a + 9,81 \cdot Pendiente(\%) + 0,132) + 0,00121 \cdot v^3 \quad \text{Ec. 2.3}$$

Cabe decir, que si bien es razonable asumir valores típicos para los coeficientes de rodadura y aerodinámica, puede ser un problema asumir una masa única para todos los vehículos. Aproximadamente, existe un factor de 2 entre los valores de C<sub>D</sub>A/m entre un auto compacto vacío, y un gran vehículo de pasajeros. Usar un valor único para todos los vehículos livianos, a altas velocidades donde el término aerodinámico cobra relevancia y las emisiones de alimentación de combustible son relativamente altas, puede resultar en un error considerable.

De esta forma, la ecuación de PSV es basada en la física, pero las emisiones generadas pueden ser empíricas. Las tendencias de las emisiones de los vehículos, en función de la carga tienen una correlación razonablemente buena, incluso a través de diferentes vehículos.

El esquema PSV permite definir niveles de exigencia sobre el motor, en base a la velocidad, aceleración y diferencia de alturas instantáneas que experimenta el vehículo en estudio. A cada nivel de exigencia, en adelante denominado por su nombre en inglés "BIN", se le asigna un factor de emisión como se muestra en la Fuente: (Tolvett C., 2009)

Figura 2-1. En ella se observa que para el BIN N° 14 la emisión asociada es de 14 gramos de CO<sub>2</sub> por cada segundo en que el vehículo opere en dicho nivel de potencia específica.



Fuente: (Tolvett C., 2009)

Figura 2-1: Emisiones en BINs de PSV para CO<sub>2</sub>

Por otro lado, todo recorrido de un vehículo, registrado por un GPS, o mediante algún método que obtenga las variables de interés para el PSV ya mencionadas, puede ser expresado como una suma de niveles de participación, es decir como porcentaje del total del tiempo recorrido, en cada BIN, definiendo así un histograma para cada uno de los niveles de potencia establecidos por el método. Como se muestra en la Figura 2-2, dos vehículos con circuitos de conducción distintos, presentarán histogramas distintos. En particular podemos observar que para el Vehículo n° 2, se tiene que un 8% del tiempo estuvo operando bajo las condiciones de potencia asociadas al BIN N° 14, y por lo tanto, en un 8% del tiempo total recorrido emitió 14 gramos por cada segundo. Además está decir que los números presentados en esta sección buscan dar un ejemplo práctico de la utilización de la metodología PSV, pero no representan el resultado del presente estudio.

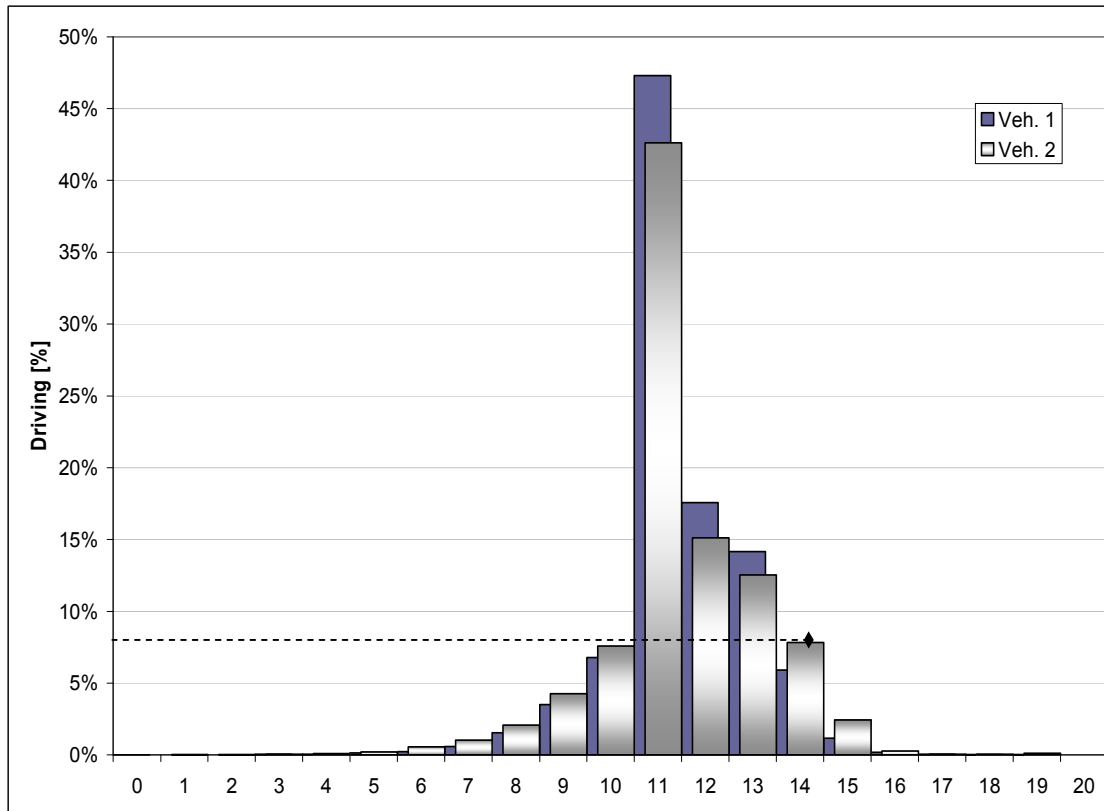


Figura 2-2: Histograma de participación por BIN para dos vehículos con circuitos de conducción levemente distintos.

Dado que el motor puede estar sujeto a distintos niveles de exigencia, debido a aceleraciones, pendientes pronunciadas o velocidades muy altas, se definen dos niveles adicionales de BINS, completando un total de 60: desde el No.0 al 19 se asocia a carga baja; desde el No. 20 al 39 se considera carga media; y finalmente entre los BINs No. 40 y 59 se considera que el motor esta operando bajo un régimen de carga alta.

Para obtener curvas de emisiones en función de la velocidad media de operación del vehículo, se construyen ciclos de conducción con velocidades medias entre 0 y 70 km/hr, buscando mantener intervalos con una diferencia de aproximadamente 10 km/hr, con el fin de obtener varios puntos en el rango de velocidades mencionado.

Para cada uno de los ciclos de conducción señalados, se obtiene el histograma de participación de BIN de potencia específica. Por otro lado, de los datos obtenidos en la campaña de medición en ruta, se obtienen factores de emisión para cada BIN, que son representativos del parque vehicular y condiciones de mantenimiento de la Región Metropolitana. Acoplado ambos resultados se obtienen curvas de emisión en función

de la velocidad media de operación. Este esquema de solución se ilustra en la Figura 2-3.

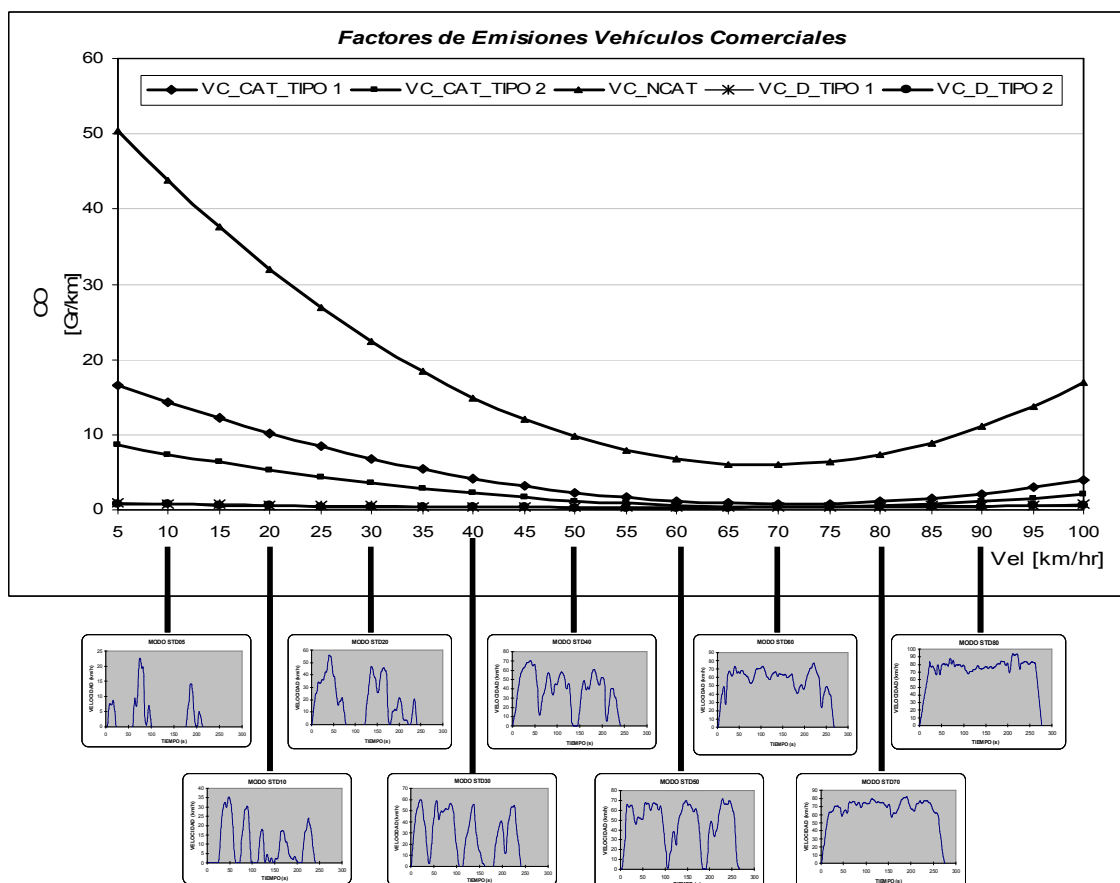


Figura 2-3: Generación de curvas de emisión a partir de ciclos de conducción

## 2.2.2 Modelo Europeo COPERT III

Los factores de emisión COPERT III (Ntziachristos & Samaras, 2000) son los que se usan actualmente en Chile, para determinar las emisiones asociadas a las fuentes móviles en ruta. Programas como MODEM, permiten determinar las responsabilidades de cada grupo y categoría vehicular en los inventarios de emisión de las principales ciudades del país, en base a estimaciones realizadas bajo esta metodología.

COPERT entrega directivas para la estimación de las emisiones contaminantes de CO, NO<sub>x</sub>, Compuestos orgánicos volátiles (VOC, en inglés), CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, material particulado (PM), entre otros, tanto evaporativas, como en partidas en frío y en operación en caliente, como se muestra en la formula siguiente.

$$E_{Total} = E_{Hot} + E_{Cold} + E_{Evap}$$

Ec. 2.4

Donde,

$E_{Total}$ : Emisiones totales (g) de cualquier contaminante, para la resolución temporal de aplicación.

$E_{Hot}$ : Emisiones (g) durante la operación térmica estable del motor.

$E_{Cold}$ : Emisiones (g) durante la operación térmica transiente del motor.

$E_{Evap}$ : Emisiones (g) producto de la evaporación del combustible.

El presente estudio se aboca a la determinación de emisiones durante la operación estable del vehículo, es decir, las emisiones en caliente. El enfoque COPERT, para este caso particular, responde a la utilización de tasas de emisiones en función de la velocidad media de operación, definidas para tres tipos de vías: Carretera, Urbana y Rural. Dichas tasas se han derivado de un conjunto de programas científicos, y debido al amplio rango de datos utilizado y el procesamiento subsecuente, COPERT establece diversas restricciones y limitaciones asociadas con tasas de emisión de distintas clases. El uso de factores de emisión COPERT se resume en los puntos siguientes:

- La aplicación de factores de emisión sólo debe emplearse dentro de los rangos de velocidad establecidos por las diferentes tablas que entregan dichas tasas. Aquellos intervalos se han establecido de acuerdo a la disponibilidad de datos de entrada. La extrapolación de las funciones más allá de los rangos estipulados no se recomienda, en base a los datos experimentales recogidos.
- Las fórmulas propuestas por COPERT deben ser utilizadas con velocidades medias de operación, y no pueden ser consideradas como una aproximación precisa cuando se disponga únicamente de valores instantáneos de velocidad. Los factores de emisión pueden ser considerados como representativos de la emisión a velocidad constante para altas velocidades (mayores a 100 km/hr), donde se estima que las variaciones de velocidad son relativamente pequeñas.
- Los factores de emisión no deben utilizarse donde los patrones de conducción salgan de la condición normal de manejo, como por ejemplo áreas de tráfico a baja velocidad.



- Los tres tipos de vía (Carretera, Urbana y Rural) son obviamente sinónimos de ciertos patrones de conducción que son típicos, aunque no iguales para distintos países. Un ejemplo de esto es que las velocidades promedio para un viaje en carretera difieren entre un país y otro.

### 2.2.2.1 Factores de emisión y normas

Debido a la evolución temporal de las normas de emisión, los factores de emisión responden a trabajos realizados en distintos momentos y bajo distintas características. Para vehículos Convencionales (pre-Euro I) se tienen valores experimentales obtenidos por COPERT, mientras que para vehículos Euro I, los factores provienen del programa experimental MEET, los cuales presentan valores para un rango amplio de velocidades (entre 5 y 130 km/hr), con bajos coeficientes de correlación, debido a la dispersión de los datos respecto de la media.

Mientras los factores entregados por COPERT, para vehículos convencionales y Euro I, corresponden a curvas de emisión en función de la velocidad media de operación del mismo, obtenidas por el mejor ajuste a datos experimentales, las tasas de emisión para vehículos post Euro I responden a reducciones sobre las emisiones definidas para Euro I. Lo anterior, en respuesta a la falta de datos experimentales. Vale decir, que las curvas de tecnologías posteriores a Euro I, son ponderaciones de aquellas reportadas para la tecnología antes mencionada. El factor de ponderación se denomina Factor de Reducción.

El desarrollo de factores de reducción para COPERT, fue llevado a cabo bajo el supuesto de que para cada contaminante, la razón de factores de emisión de cualquier clase o categoría post-Euro I, sobre una clase de referencia debe ser igual a la razón del estándar de emisión respectivo. Tomando los vehículos Euro I como referencia, el supuesto puede ser expresado matemáticamente como sigue:

$$E_{Total} = E_{Hot} + E_{Cold} + E_{Evap} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde,

- $e_{TOT i}^j$ : Factor de emisiones totales, para el contaminante  $i$ , para el vehículo clase  $j$  ( $j = \text{Euro II, Euro III, Euro IV, etc.}$ ).
- $e_{TOT i}^I$ : Factor de emisiones totales, para vehículos Euro I.
- $ES_{TOT i}^{EURO i}$ : Estándar de emisión para el contaminante  $i$ , para el vehículo clase  $j$  ( $j = \text{Euro II, Euro III, Euro IV, etc.}$ ).
- $ES_{TOT i}^{EURO i, COP}$ : Conformidad del estándar de producción para el contaminante  $i$ , para vehículos Euro I.

### **2.2.2.2 Corrección de las emisiones**

COPERT considera los efectos de diferentes variables en sus recomendaciones para el cálculo de emisiones. Sobre los factores de emisión entregados, se proponen ajustes que dan cuenta de variados efectos tales como la edad del vehículo, la calidad del mantenimiento, mejora en los combustibles, gradiente de las vías en vehículos pesados, y finalmente, la carga que transporten estos últimos. En general, dichas correcciones requieren de información que no es entregada por los modelos de transporte disponibles en Chile, por lo cual se prescinde de ellas al momento de calcular emisiones.

No obstante lo anterior, es importante considerar la influencia que tienen cada uno de los factores mencionados sobre las emisiones observadas en las campañas experimentales. En los párrafos siguientes se detalla la implicancia de cada uno de ellos, sobre las tasas que en adelante se denominarán factores de emisión de línea base.

#### **2.2.2.2.1 Edad del vehículo (Kilometraje).**

Los factores de emisión de línea base propuestos por COPERT corresponden a una flota de kilometraje entre 50,000 y 100,000 kms., sobre la cual se recoge un factor de degradación inherente, debido a la naturaleza experimental de los valores entregados por la European Environment Agency. La degradación de flotas con kilometraje superior a los señalados debiera incrementar la tasa de emisión para cada contaminante, alcanzando su nivel máximo a los 120.000 km.

### 2.2.2.2.2 Calidad del combustible

La calidad del combustible afecta la tasa de emisión correspondiente. En sus recomendaciones, COPERT presenta ecuaciones de ajuste para este factor, y señala que se asumen tres tipos de calidades de combustible para los valores presentados: 1996 Base fuel, Fuel 2000 y Fuel 2005. Los valores correspondientes para cada calidad de combustible se presentan a continuación.

Tabla 2-1: Calidades de combustible consideradas por COPERT, Gasolina

Propiedad	1996 Base Fuel	Fuel 2000	Fuel 2005
Sulfuros [ppm]	165	130	40
RVP [kPa]	68(verano); 81 (inv.)	60(verano); 70 (inv.)	60(verano); 70 (inv.)
Aromáticos [vol, %]	39	37	33
Benzeno [vol, %]	2,1	0,8	0,8
Oxígeno [vol, %]	0,4	1,0	1,5
Olefinas [vol, %]	10	10	10
E100 [vol, %]	52	52	52
E150 [vol, %]	86	86	86
Plomo [g/l]	0,005	0,003	0,003

Tabla 2-2: Calidades de combustible consideradas por COPERT, Diesel

Propiedad	1996 Base Fuel	Fuel 2000	Fuel 2005
Numero Cetano [-]	51	53	53
Densidad a 15°C	840	840	835
T <sub>95</sub> [°C]	350	330	320
PAH [%]	9	7	5
Azufre [ppm]	400	300	40
Aromáticos Totales [%]	28	26	24

La tecnología asociada a cada una de las calidades de combustibles que se presentan en la Tabla 2-1, se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 2-3: Calidad de combustibles aplicables

Clase	Base Fuel	Correcciones disponibles
Pre-Euro III	1996 Base Fuel	Fuel 2000, Fuel 2005
Euro III	Fuel 2000	Fuel 2005
Euro IV	Fuel 2005	

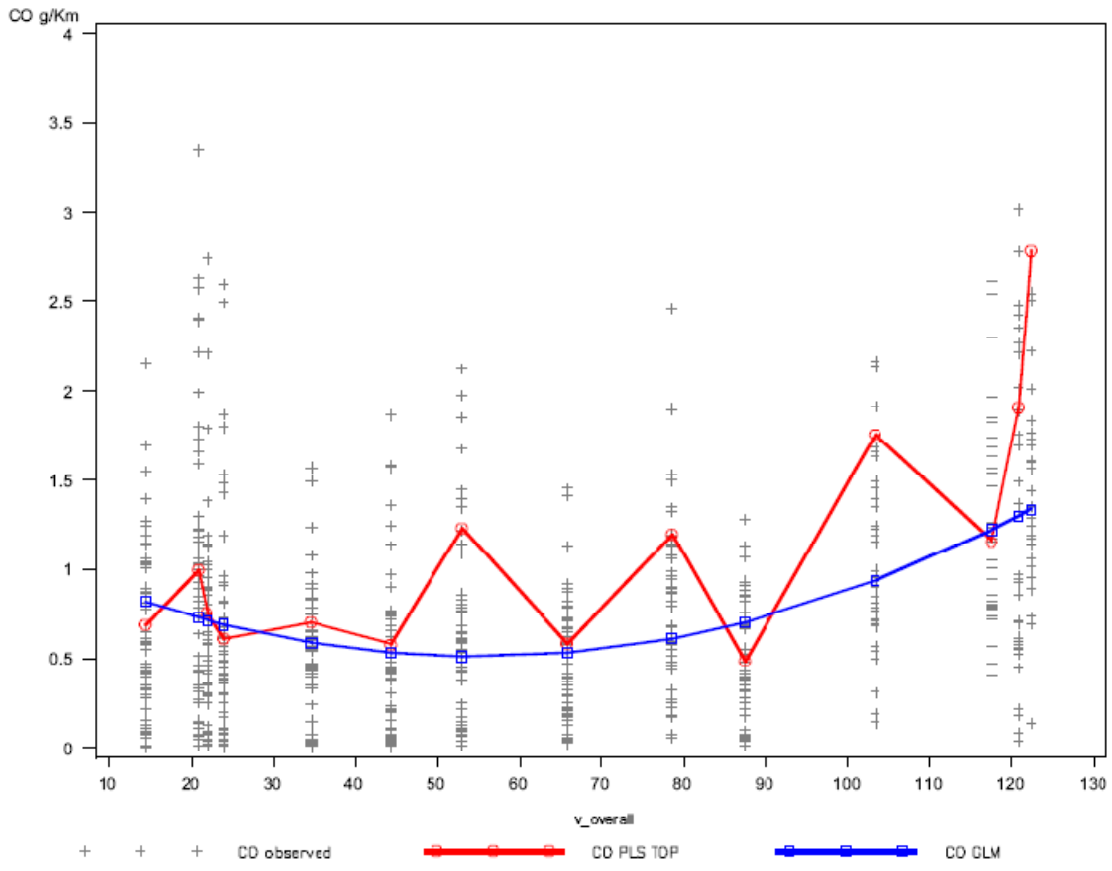
### **2.2.3 Dispersión de datos en la determinación de los factores de emisión**

En el marco de las actualizaciones de COPERT, Rapone et al. construyen curvas de emisión en función de la velocidad (Rapone, 2007). Aunque el método utilizado difiere del empleado en el presente trabajo, ellos dan cuenta de la dispersión que hay detrás de dichas curvas.

En las figuras siguientes se muestran las curvas entregadas en este trabajo para vehículos livianos y medianos Euro III. Se aprecia una gran dispersión en las medidas para cada velocidad media para todos los contaminantes, llegando en ocasiones a duplicar los valores reportados finalmente como curva de emisión.

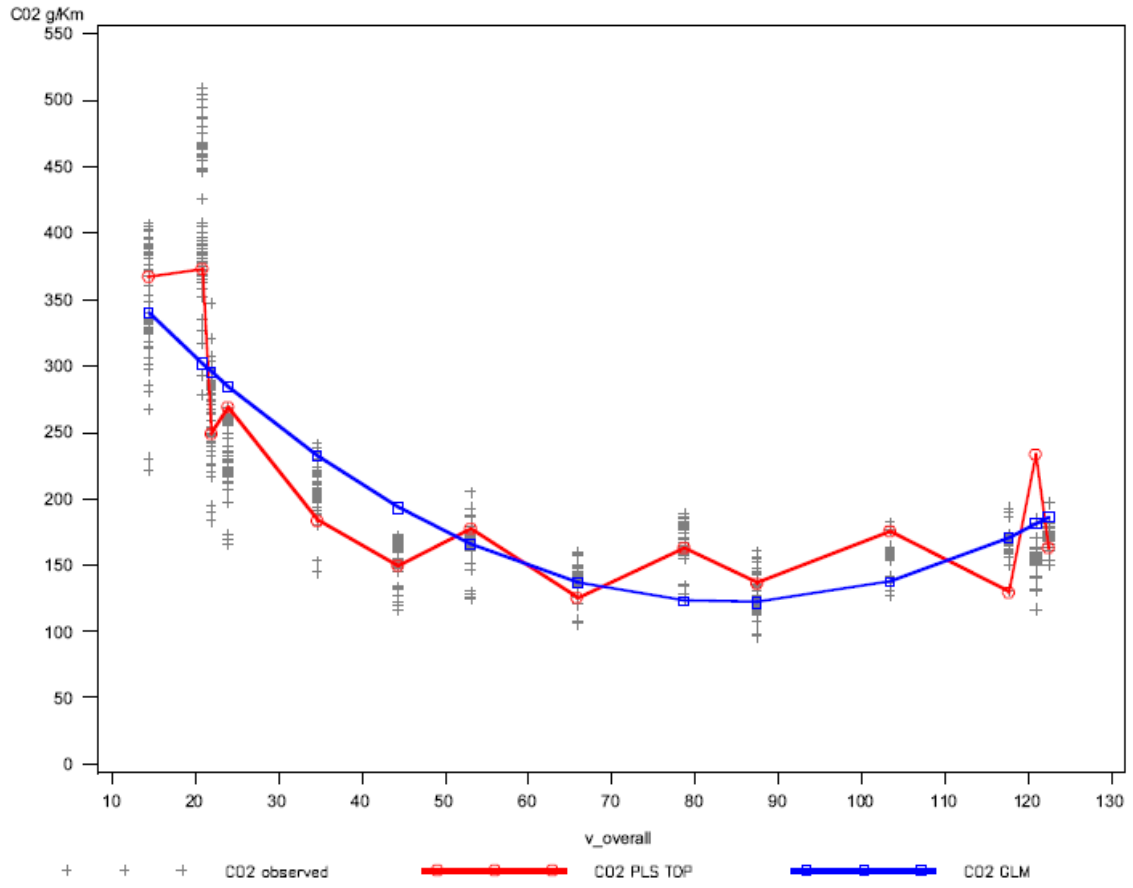
De los cuatro gases reportados, el CO es el que presenta la mayor dispersión, en tanto que HC y NO<sub>x</sub> se comportan de manera similar, con mayor variación a bajas velocidades. Finalmente el CO<sub>2</sub> tiene la menor dispersión de los 4 gases, siendo igualmente alta a velocidades bajas.

La principal conclusión del estudio es que la variabilidad no sólo viene dada por las diferencias en los modos de conducción, si no que también los distintos modelos de vehículos y los ajustes individuales definidos por cada fabricante.



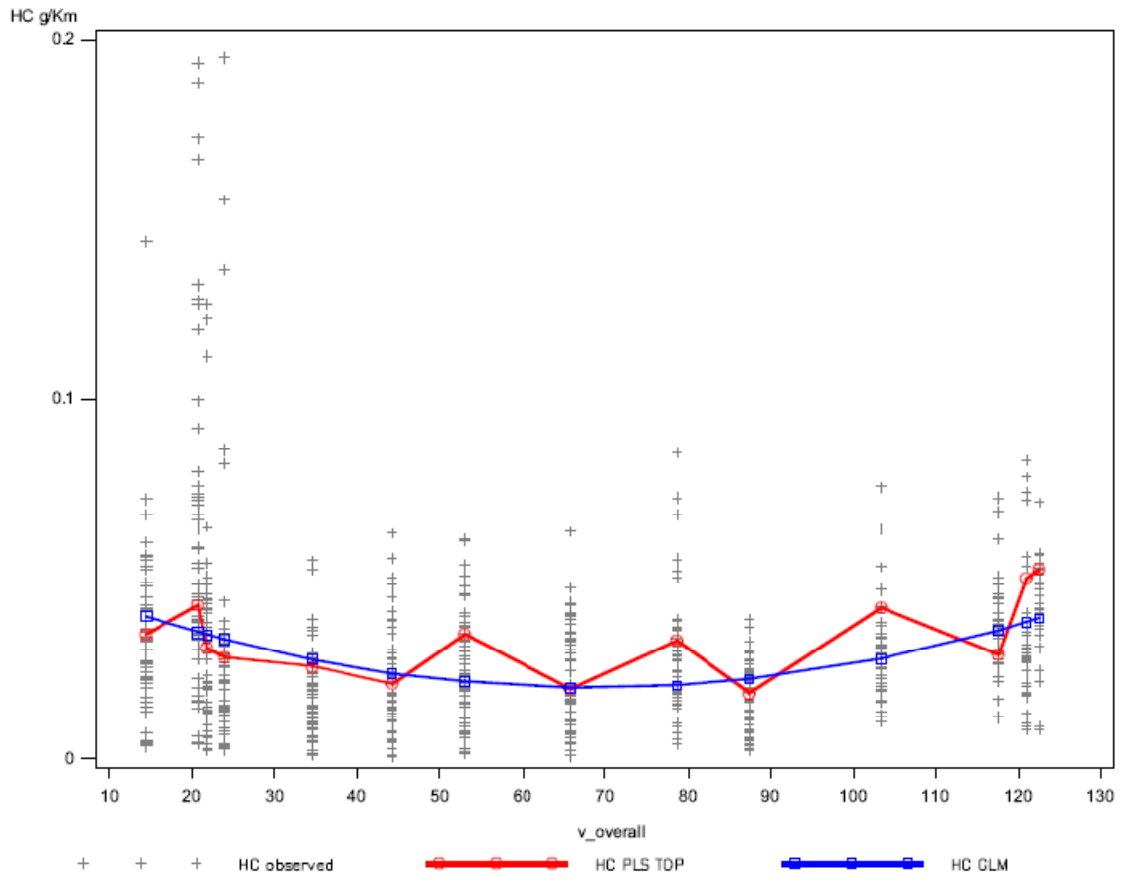
Fuente: (Rapone, 2007)

Figura 2-4: Curvas de emisión y dispersión de datos para CO.



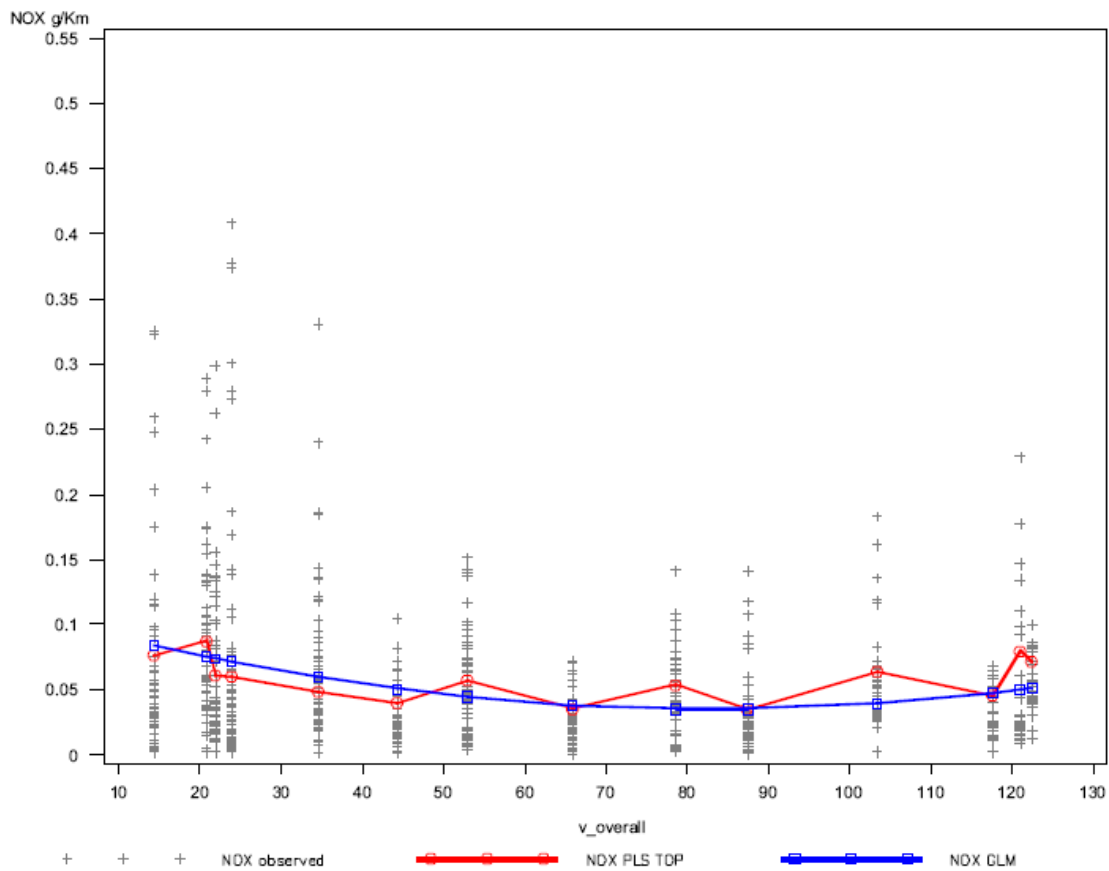
Fuente: (Rapone, 2007)

Figura 2-5: Curvas de emisión y dispersión de datos para CO2.



Fuente: (Rapone, 2007)

Figura 2-6: Curvas de emisión y dispersión de datos para HC.



Fuente: (Rapone, 2007)

Figura 2-7: Curvas de emisión y dispersión de datos para NOx.

## 2.2.4 Actualización del modelo: COPERT IV

Los factores de emisión utilizados por el modelo MODEM de CONAMA, que actualmente se utiliza para determinar los inventarios de emisión de fuentes móviles en la RM, son una adaptación de aquellos reportados por COPERT III. A partir de agosto de 2007 es posible encontrar en la página oficial de la European Environmental Agency, la nueva versión de COPERT.

El detalle de la metodología está disponible en la página oficial de COPERT IV<sup>1</sup>, sin embargo, se puede destacar que es la 5ta actualización del apronte inicial del inventario CORINAIR de 1985. En este esquema,

<sup>1</sup> Emission inventory Guidebook, Agosto 2007. <http://lat.eng.auth.gr/copert/>



COPERT III corresponde a una actualización mayor publicada en el 2000, y la presente, publicada el año 2007, da cuenta de mejoras metodológicas para las emisiones en caliente para vehículos post Euro 1, información para emisiones de MP y valores de emisión para motocicletas.

Entre los cambios significativos entre COPERT IV y la versión anterior se encuentran los siguientes aspectos:

- Nuevos factores de emisión para vehículos de pasajeros Euro 4.
- Nuevos factores de reducción para vehículos de pasajeros y comerciales Euro 5 y Euro 6.
- Metodología revisada para el cálculo de CO<sub>2</sub>, que incluye el efecto de combustibles oxigenados.

Adicionalmente, COPERT IV ofrece diversos factores de emisión para vehículos pesados, incorporando las variables pendiente (G) y el porcentaje de carga (L) correspondiente a la flota en estudio. Este aspecto es tomado en consideración para el análisis que se aplica más adelante en el presente informe.

### ***2.3 Categorías Vehiculares en Chile***

Una vez medidos, los datos deben ser agrupados según su origen y usando criterios que permitan su comparación y posterior utilización para inventarios de emisión. Para estos fines, la propuesta de este trabajo de tesis, es utilizar la normativa chilena vigente al respecto.

Actualmente, en Chile se utiliza una clasificación para los vehículos que circulan por las calles del país, que responde a un compendio de criterios internacionales dictados por la actual Unión Europea (en adelante, norma EURO), y Estados Unidos (en adelante, norma EPA), los cuales están vertidos en diversos decretos supremos. A continuación se presentan dichas definiciones, que responden principalmente a dos criterios: el peso del vehículo y el uso para el cual fue diseñado.

#### **2.3.1 Vehículos livianos y medianos**

En Chile, para efectos de normas de emisión, la primera clasificación es aquella que define los vehículos livianos y medianos. Los criterios que definen esta categoría se describen a continuación:

Tabla 2-4: Vehículos Livianos, clasificación según DS 211/1991

Categoría	Sub categoría	Características
Vehículos Motorizados Livianos: PBV menor a 2.700 kg.	Pasajeros	Todos aquellos diseñados principalmente para el transporte de personas.
	Comerciales	Todos aquellos diseñados para el transporte de carga o derivados de estos. Incluye la clasificación US-EPA "Light Duty Trucks"
Notas: 1. Decreto N°211/1991 2. PBV es el peso bruto vehicular		

Tabla 2-5: Clasificación para los efectos del artículo N° 4 bis del DS 211/1991

Categoría	Sub categoría	Características
Vehículos Comerciales Livianos	Tipo 1	LVW menor o igual a 1.700 kg.
	Tipo 2	LVW mayor a 1.700 kg.
	Clase 1	Peso Neto de Marcha $\geq$ 1305 kg
	Clase 2	Peso neto de marcha entre 1.305 y 1.760 kg.
	Clase 3	Peso neto de marcha mayor a 1.760 kg.
Notas: 1. Decreto N°211/1991 2. LVW es el peso de ajuste de carga estipulado por US-EPA 3. Peso Neto de Marcha es la definición de masa de referencia utilizada por la directiva europea 70/220 CEE, modificada por la directiva 98/69 CE.		

Tabla 2-6: Vehículos Medianos, clasificación según DS 54/1994

Categoría	Sub categoría	Características
Vehículos Motorizado Medianos : PBV entre 2.700 y 3860 kg.	Tipo 1	Vehículo destinado al transporte de personas y carga, por calles o caminos, y que tiene un peso de marcha inferior a 1.700 kg
	Tipo2	Vehículo destinado al transporte de personas y carga, por calles o caminos, y que tiene un peso de marcha igual o superior a 1.700 kg
Notas: 1. Decreto N°54/1994 2. PBV es el peso bruto vehicular 3. Peso neto de marcha es el peso del vehículo en su modo normal de operación, incluyendo el peso del equipo estándar, de equipo opcional y del combustible contenido en el estanque de combustible cuando se llena en su capacidad nominal, más 140 kilogramos.		

Tabla 2-7: Clasificación para los efectos del artículo N° 4 bis del DS 54/1994

Categoría	Sub categoría	Características
Vehículos Medianos	Tipo 1	ALVW entre 1.700-2.610 kg.
	Tipo 2	ALVW mayor a 2.610 kg.
	Clase 1	Peso Neto de Marcha $\geq$ 1.305 kg
	Clase 2	Peso neto de marcha entre 1.305 y 1.760 kg.
	Clase 3	Peso neto de marcha mayor a 1.760 kg.
Notas:		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Decreto N°54/1994</li> <li>2. ALVW es el peso de ajuste de carga estipulado por US-EPA</li> <li>3. Peso Neto de Marcha es la definición de masa de referencia utilizada por la directiva europea 70/220 CEE, modificada por la directiva 98/69 CE.</li> </ol>		

En base a la clasificación anterior, se utiliza la tipificación que muestra la Tabla 2-8 para los vehículos Livianos y Medianos, y que separa primordialmente los vehículos según el combustible utilizado, y la norma de emisión que rige al momento de su inscripción.

Tabla 2-8: Definición de categorías para Vehículos Livianos y Medianos

ID	TIPO	DESCRIPCIÓN
1	Vehículos particulares gasolina catalíticos Tipo 1	Sedan, SW con convertidor catalítico, inscritos a partir de septiembre de 1992
2	Vehículos particulares gasolina catalíticos tipo 2	Sedan, SW con convertidor catalítico, inscritos a partir de enero del 2005
3	Vehículos particulares gasolina no catalíticos	Sedan, SW sin convertidor catalítico, inscritos antes de septiembre de 1992
4	Vehículos particulares diesel Tipo 1	Sedan, SW que cumplen con norma Tier 0
5	Vehículos particulares diesel Tipo 2	Sedan, SW que cumplen con norma Tier 1 o Euro III, inscritos a partir de enero del 2005
6	Vehículos particulares diesel Tipo 3	Sedan, SW que cumplen con norma Tier 1 California o Euro IV, inscritos a partir marzo del 2006
7	Vehículos comerciales gasolina catalíticos Tipo 1	Jeep, furgones o camionetas con convertidor catalítico
8	Vehículos comerciales gasolina catalíticos Tipo 2	Jeep, furgones o camionetas con convertidor catalítico, inscritos a partir de enero del 2005
9	Vehículos comerciales no catalíticos	Jeep, furgones o camionetas sin convertidor catalítico
10	Vehículos comerciales diesel Tipo 1	Jeep, furgones o camionetas que cumplen con norma Tier 0
11	Vehículos comerciales diesel Tipo 2	Jeep, furgones o camionetas que cumplen con norma Tier 1 o Euro III, inscritos a partir de enero del 2005
12	Vehículos comerciales diesel Tipo 3	Jeep, furgones o camionetas que cumplen con norma Tier 1 California o Euro IV, inscritos a partir de marzo del 2006

### 2.3.2 Vehículos Pesados de carga

Para el caso de los vehículos pesados de carga, nuevamente la principal clasificación corresponde a aquella que distingue sus Pesos Bruto Vehicular (PBV) en tres sub-grupos: Livianos, Medianos y Pesados. Así mismo, es de gran importancia la norma de emisión que corresponde al vehículo en cuestión. La Tabla 2-9 resume la clasificación para los vehículos pesados de carga, según los aspectos mencionados anteriormente.

Tabla 2-9: Categorías de vehículos de carga

Nº	TIPO	Peso Bruto (Ton)	Tipo de norma de emisión
1	Camiones livianos convencional	$\leq 7.5$	Sin norma de emisión
2	Camiones livianos Tipo 1	$\leq 7.5$	EPA 91 ó EURO I
3	Camiones livianos Tipo 2	$\leq 7.5$	EPA 94 ó EURO II
4	Camiones livianos Tipo 3	$\leq 7.5$	EPA 98 ó EURO III
5	Camiones medianos convencional	$> 7.5$ y $\leq 16$	Sin norma de emisión
6	Camiones medianos Tipo 1	$> 7.5$ y $\leq 16$	EPA 91 ó EURO I
7	Camiones medianos Tipo 2	$> 7.5$ y $\leq 16$	EPA 94 ó EURO II
8	Camiones medianos Tipo 3	$> 7.5$ y $\leq 16$	EPA 98 ó EURO III
9	Camiones pesados convencional	$> 16$	Sin norma de emisión
10	Camiones pesados Tipo 1	$> 16$	EPA 91 ó EURO I
11	Camiones pesados Tipo 2	$> 16$	EPA 94 ó EURO II
12	Camiones pesados Tipo3	$> 16$	EPA 98 ó EURO III

### 2.3.3 Transporte Público

Especial mención merecen los vehículos de transporte público, que para los alcances del presente estudio comprenden los buses utilizados en el sistema de transporte Transantiago. Estos vehículos se distinguen entre sus pares, según el estándar definido por el decreto supremo 130/2001, pudiéndose definir las categorías presentadas en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10: Categorías vehiculares y tecnologías para Buses

<b>Categoría</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción Marca, chasis, filtro</b>	<b>Norma emisión</b>
Anterior a Transantiago	M.1	MB OF1318 SIN FILTRO	EURO1
	M.2	MB OH1420 SIN FILTRO	EURO2
	M.3	MB OH1115 SIN FILTRO	EURO3
Estándar Transantiago	B2.3.1	VOLVO B7RLE SIN FILTRO	EURO3
	C2.3.1	VOLVO B9SALF SIN FILTRO	EURO3
Superior a estándar Transantiago	M.2	MB OH1420 CON FILTRO	EURO2
	B2.3.2	VOLVO B7RLE CON FILTRO	EURO3
	C2.3.2	VOLVO B9SALF CON FILTRO	EURO3

## 2.4 Revisión de Trabajos Previos

Entre los años 2006 y 2007, el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile (DIMEC), ha llevado a cabo varios estudios relacionados con la determinación o actualización de Factores de Emisión para vehículos livianos, medianos y pesados del parque de vehículos de la Región Metropolitana de Santiago.

Respondiendo a las categorías definidas en la Tabla 2-10, *Acevedo* (Acevedo H., 2007) reporta las mediciones de ocho buses que fueron medidos en dos oportunidades, en los meses de agosto y noviembre del año 2006. Todos los buses incorporados al programa emplean combustible diesel y se diferencian entre sí principalmente por su norma de emisión, el tipo de chasis, y la existencia de sistemas de tratamiento de emisiones de escape.



Código: M.1.1  
Chasis: OF-1318  
Potencia motor: 180 HP  
Capacidad: 75 pax  
Norma: EURO1



Código: M.2.1  
Chasis: OH-1420  
Potencia motor: 211 HP  
Capacidad: 81 pax  
Norma: EURO2



Código: M.3.1  
Chasis: OH-1115  
Potencia motor: 150 HP  
Capacidad: 60 pax  
Norma: EURO3

Figura 2-8: Buses con tecnologías anteriores a Transantiago



Código: B2.3.1  
 Chasis: VOLVO B7-RLE  
 Potencia motor: 260 HP  
 Capacidad: 92 pax  
 Norma: EURO3



Código: C2.3.1  
 Chasis: VOLVO B9-SALF  
 Potencia motor: 340 HP  
 Capacidad: 161 pax  
 Norma: EURO3

Figura 2-9: Buses con tecnologías estándar Transantiago

Durante marzo de 2007 se lleva a cabo el programa de mediciones con equipos portátiles (Madrid G., 2007) que realizó pruebas sobre 38 camiones, clasificados según sus pesos brutos (livianos, medianos y pesados) como se presenta en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11: Resumen programa de pruebas laboratorio 3CV

Tipo de vehículo	Categoría	Norma de emisión	# Vehículos
Camión	Pesado	S/N	3
		EURO1	8
		EURO2	3
		EURO3	3
	Mediano	S/N	2
		EURO1	4
		EURO2	3
		EURO3	2
	Liviano	S/N	2
		EURO1	2
		EURO2	3
		EURO3	3
Total			46

Durante el mismo periodo se lleva a cabo una campaña experimental para vehículos livianos y medianos ((Henriquez G., 2007) y (Nikolic M., 2007)). En este estudio se midieron emisiones para una flota total de 120 vehículos livianos y medianos, impulsados tanto por motores a gasolina como diesel. El detalle por categoría se presenta en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12: Resumen de flota experimental por categoría

Categoría	Tipo de Vehículo	Submuestra
1	Vehículos particulares gasolina catalíticos Tipo 1	10
2	Vehículos particulares gasolina catalíticos Tipo 2	10
3	Vehículos particulares gasolina No catalíticos	10
4	Vehículos particulares Diesel Tipo 1	9
5	Vehículos particulares Diesel Tipo 2	5
6	Vehículos particulares Diesel Tipo 3	3
7	Vehículos comerciales gasolina catalíticos Tipo 1	10
8	Vehículos comerciales gasolina catalíticos Tipo 2	10
9	Vehículos comerciales gasolina No catalíticos	10
10	Vehículos comerciales Diesel Tipo 1	9
11	Vehículos comerciales Diesel Tipo 2	9
12	Vehículos comerciales Diesel Tipo 3	5
13	Vehículos duales GNC/GLP e híbrido	12
14	Vehículos adicionales Categoría 1	7
Total flota experimental		120

En definitiva, se dispone de 174 vehículos medidos. El cuadro completo se muestra en la Tabla 2-13, donde se observa claramente una deficiencia en los datos disponibles para Buses del transporte público. Este último hecho será subsanado por el presente estudio, que midió 25 buses adicionales, en busca de representar bien cada una de las categorías presentes en Chile.

Tabla 2-13: Cuadro resumen de pruebas realizadas

<b>ESTUDIO</b>	<b>NUMERO DE VEHICULOS</b>	<b>METODO DE MEDICION</b>
Acevedo	8 buses	Dinamómetro
Nikolic y Henriquez	68 gasolina 40 diesel 12 Híbridos y GNC	Equipos Portátiles Portátil Portátil
Madrid	39 camiones 12 camiones	Portátil Dinamómetro

## **3 METODOLOGÍA**

### ***3.1 Introducción***

Cabe recordar que para el presente estudio se distinguen mediciones realizadas bajo dos métodos: mediciones en condiciones de laboratorio y mediciones en ruta mediante equipos portátiles.

Como se dijo en el numeral 2 del presente reporte, las mediciones de laboratorio entregan una buena cantidad de información, bajo condiciones definidas y controladas, por lo que las mediciones realizadas bajo procedimientos de esta índole serán de una muy buena confiabilidad. Sin embargo, el costo de uso del laboratorio y el tiempo que lleva preparar una prueba de este estilo, hace que la muestra de vehículos que es posible monitorear sea pequeña. Adicionalmente, las mediciones en laboratorio no representan de buena forma la operación de un vehículo en condiciones de manejo real.

Por otro lado, existen equipos portátiles que permiten estudiar las emisiones bajo condiciones de manejo en la vida real, al posibilitar su instalación en vehículos que se desplazan en las calles y avenidas de la ciudad en estudio. A pesar de esta ventaja significativa, este tipo de pruebas implica que no hay garantía de que las condiciones entre una prueba y otra sean iguales. Adicionalmente, los equipos utilizados, por su condición de portabilidad, tienen menor precisión que aquellos usados en un laboratorio de emisiones vehiculares.

Los proyectos que aportan información al presente estudio abordan ambos tipos de mediciones, según la disponibilidad de recursos propia de cada cual. Cabe destacar que las pruebas de laboratorio se realizan, en su totalidad, en las instalaciones del Laboratorio de Control y Certificación Vehicular del Ministerio de Transporte de Chile (3CV), en tanto que las pruebas en ruta se realizan con equipos portátiles facilitados por el International Sustainable Systems Research Center ([www.issrc.org](http://www.issrc.org)), de los Estados Unidos de América. Las especificaciones de ambos sistemas de medición son detalladas a continuación.



## **3.2 Equipamiento**

En los párrafos siguientes se detallan los equipos utilizados para la medición de las emisiones en el tubo de escape, para las diferentes campañas experimentales abordadas por el presente trabajo.

### **3.2.1 Laboratorio del Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV)**

El laboratorio 3CV cuenta con el siguiente equipamiento:

- Dinamómetro eléctrico de chasis: marca AVL-Zöllner, con rodillo simple de 48 pulgadas. La capacidad de inercia máxima es de 30 [ton] y su potencia máxima de 300 [kW].
- Túnel de doble dilución: marca AVL-Pierburg, de acero inoxidable, con sistema de muestreo gravimétrico para material particulado. Esta configuración cumple con la Directiva Europea 1999/96 EC.
- Sistema de muestreo de volumen constante: mediante control de flujo por venturi, con sistema de regulación de temperatura de los gases de escape diluidos mediante un intercambiador de calor. El equipo cuenta con dos pares de bolsas para la acumulación de muestra de gases de escape diluidos y de aire de dilución.
- Sistema analizador de gases: marca AVL-Pierburg, con método FID (Flame Ionization Detector) para hidrocarburos totales (HCT) y metano (CH<sub>4</sub>). Método NDIR (Non-Dispersive Infra-Red) para monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Método CLD (Chemiluminescence Detector) para óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
- Termodilutor: comprende un termodilutor de la muestra, regulable en rangos de dilución entre 18 y 1800 veces y de temperaturas de entre 0 y 400°C. El equipo CPC (Condensation Particle Counter), permite medir las concentraciones de número de partículas sólidas en la muestra termocondicionada, en rango de tamaños desde 10 nm.
- Medidor de partículas: equipo marca Rupprecht & Patashnick Co. Inc, modelo Teom Serie 1105, para medir la concentración instantánea de la masa de partículas totales, en microgramos por metro cúbico.

Los equipos del laboratorio, a excepción del Termodilutor-CPC y Teom, están integrados a través de un Sistema de Automatización que controla y sincroniza la operación de los equipos, registra los valores medidos y

calcula las emisiones de THC, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y Material Particulado durante la prueba en gramos por kilómetro.

Para la determinación de las sustancias contaminantes emitidas, los buses de la flota experimental fueron sometidos a ciclos de conducción simulados sobre el dinamómetro de chasis. Dichos ciclos son una representación de las condiciones de carga, velocidad y aceleración a las que es sometido el vehículo en la operación real en la vía pública.

Durante el desarrollo del ciclo, la totalidad de los gases de escape son recolectados a través de una sonda que los conduce al túnel de dilución, donde se mezclan con aire ambiente adecuadamente filtrado, para generar una muestra diluida. Las condiciones constructivas del túnel permiten una homogenización de la muestra, la que es posteriormente conducida a los distintos instrumentos de análisis, para la determinación de las concentraciones de cada sustancia en estudio. El flujo de los gases diluidos es conocido y prácticamente constante, debido al uso del equipo CVS-CFV, que cuenta con venturis cuyos coeficientes de calibración conocidos permiten el cálculo de dicho flujo. Para mayor exactitud en la estimación de éste, el equipo CVS-CFV posee un intercambiador de calor, que regula la temperatura de la muestra diluida.

A continuación se presenta el método de medición para la concentración de cada sustancia en estudio:

### **3.2.1.1 Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

Para la determinación de estos contaminantes, una muestra diluida es extraída desde el túnel de dilución y es conducida hasta el banco analizador de gases Infrared Dispersion (IRD). De esta forma, la concentración es determinada con una frecuencia de 2 Hz y posteriormente integrada para todo el ciclo de conducción, calculándose la concentración media para ambos contaminantes. Simultáneamente, otra muestra es dirigida a la bolsa de muestreo del equipo CVS-CFV, para ser también acumulada durante todo el ciclo. El contenido de la bolsa es analizada al final de la prueba. Este segundo valor es contrastado con el resultado modal para efectos de validación.

### **3.2.1.2 Hidrocarburos Totales (HCT)**

Para analizar este contaminante, se utiliza una sonda calefaccionada a 190 [°C], que conduce la muestra desde el túnel de dilución a un analizador Flame Ionization Detector (FID). Para este caso, como para el anterior, los valores son muestreados por el analizador a una frecuencia de 2 Hz y posteriormente integrado para la determinación de la concentración media obtenida para el ciclo.

### **3.2.1.3 Oxidos de Nitrógeno (NOx)**

Para la determinación de esta sustancia, una muestra es extraída desde el túnel y conducida a través de una sonda calefaccionada a 190 [°C] a un analizador Chemiluminescence Detecor (CLD), donde es muestreada con una frecuencia de 2 Hz, durante todo el ciclo, y posteriormente integrada para calcular el valor medio.

### **3.2.1.4 Material Particulado Respirable (MP<sub>10</sub>)**

La masa total de material particulado es determinado a través del método gravimétrico. Para ello, una muestra de los gases diluidos es conducida a través de filtros que acumulan el material particulado. Dichos filtros son pesados en una cámara de pesaje acondicionada, previa estabilización de 3 o más horas, en condiciones de humedad y temperatura controladas. La masa de material particulado es determinada por diferencia del peso del filtro con material particulado, menos el peso del filtro medido antes del ensayo (método gravimétrico). Adicionalmente, otra muestra es conducida al equipo TEOM, que calcula instantáneamente la concentración de material particulado, mediante un elemento oscilante, por variación de la frecuencia de oscilación, asociada a la variación de la masa en un filtro dispuesto en dicho elemento.

## **3.2.2 Equipos Portátiles**

La metodología de muestreo directo de emisiones en ruta utiliza un montaje portátil de analizadores y sistemas de medición de material particulado, los cuales pueden ser transportados en el mismo vehículo bajo análisis, con capacidad de medición en tiempo real. Los analizadores de gases pueden ser de distintos tipos, pero de preferencia se consideran los sistemas tradicionales utilizados en laboratorio, tales

como detector de ionización de llama (FID) para hidrocarburos, analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR) para monóxido y dióxido de carbono, y analizador ultravioleta no dispersivo (NDUV) o de luminiscencia química (CHLM) para óxidos de nitrógeno. De preferencia se deben usar este tipo de analizadores en lugar de sensores electroquímicos, siendo estos últimos más económicos pero de menor precisión y corta vida útil.

Con respecto a la medición de material particulado, la regulación internacional ha estado basada exclusivamente en el método gravimétrico con filtros, que resulta en una medición acumulativa de la emisión másica correspondiente al ciclo completo de conducción. Como sistemas alternativos, recientemente se han reportado instrumentos con capacidad de medición en tiempo real que ofrecen información segundo a segundo de concentración másica de partículas, basados en la detección eléctrica de las partículas, mediante etapas de carga y posterior clasificación por tamaño e inercia.

Paralelamente a la medición en tiempo real de gases y partículas, el vehículo debe tener sensores de posición (GPS) y condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). Esto, junto a la medición de flujo en el escape, permite efectuar las correcciones necesarias debidas a las condiciones existentes en la zona de medición, así como convertir las mediciones volumétricas en mediciones másicas por unidad de distancia recorrida (gramos/kilómetro).

Una vez definidas las muestras representativas de vehículos con diferentes tecnologías, y la ruta que describe de la manera más representativa la operación de un vehículo en uso normal en la ciudad de Santiago, se procede a realizar mediciones de contaminantes en ruta. Este tipo de medición se realiza montando un set de analizadores portátiles en el vehículo, lo que permite obtener emisiones en tiempo real directamente del sistema de escape de un vehículo que opera bajo condiciones normales de conducción.

El equipo de medición se conecta al tubo de escape mediante un flujómetro, el cual está constituido por dos dispositivos: un tubo equipado con transductores de presión y termocuplas (TPT) y una caja de medición y adquisición de datos (CMA).



Fuente: (Níkolic, 2007)

Figura 3-1: Flujiómetro utilizado y vista de montaje de equipo de recolección en vehículo liviano

El flujiómetro registra segundo a segundo el flujo total de gases de escape, y mediante una línea de muestra obtiene las concentraciones de contaminantes existente en los gases. Con estos dos parámetros el equipo calcula valores de masa para cada contaminante.

Adicionalmente, los equipos de medición poseen sensores de posicionamiento global (GPS) y condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). Esto, junto a la medición de flujo en el escape, permite efectuar las correcciones necesarias debidas a las condiciones existentes en la zona de medición, calcular pendientes de la ruta recorrida y convertir las mediciones volumétricas en mediciones másicas por unidad de distancia recorrida (gramos/kilómetro).

### ***3.3 Post-procesamiento de datos***

Cada uno de los datos obtenidos en las pruebas experimentales debe ser expresado como tasa de emisión versus velocidad media de operación. Para ello existen dos tipos de procedimientos de acuerdo al tipo de prueba. A continuación se presentan ambos procedimientos.

#### **3.3.1 Datos desde dinamómetro**

El laboratorio 3CV entrega los resultados de emisión total por test como se muestra en la figura siguiente. Aquí se pueden encontrar las emisiones por test provenientes de los dos sistemas de muestreo disponibles, el de bolsa (Bags) y el de túnel de dilución (Diluted Exhaust Tunnel Emissions). Debido a que las partículas se miden en base a diferencias de masa entre la situación previa al test y el resultado posterior al mismo, el material particulado se entrega de manera

separada. Toda la información se presenta para las distintas fases de cada ciclo de conducción.

Estos números son llevados a una base de datos estandarizada donde se incorpora a los datos de emisión la identificación del vehículo, el test y fecha asociados. Esta base de datos permite comparar fácilmente el test en cuestión, con los resultados obtenidos en vehículos de la categoría correspondiente.

Con ella también se pueden construir curvas de emisión dependientes de la velocidad media de cada fase y del ciclo total. El procedimiento consiste en llevar las emisiones reportadas en la columna "Phase 1", y graficar versus la velocidad media correspondiente a la misma fase. El mismo procedimiento se realiza con las columnas "Phase 2" y "Total" asociadas a la fase 2 y al ciclo total, respectivamente. La curva obtenida y una regresión polinomial o potencial de la misma, dan origen a una ecuación para la curva y un coeficiente de correlación  $R^2$ . Ambas son comparables con las ecuaciones reportadas por COPERT, como se muestra en la Figura 3-3.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Test Results</b>							
2								
3	<i>Measurement:</i>		<i>PhaseResults</i>				<i>TestResults</i>	
4	<b>Bag Emissions</b>							
5		Unit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Total	Total Weighted
6	HC	[g/km]	0.147	0.159			0.156	0.156
7	CH4	[g/km]	0.000	0.000			0.000	0.000
9	NOX	[g/km]	0.801	0.431			0.536	0.536
10	CO	[g/km]	1.095	0.693			0.808	0.808
11	CO2	[g/km]	293.735	220.164			241.088	241.088
12								
13	<b>Diluted Exhaust Tunnel Emissions</b>							
14		Unit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Total	Total Weighted
15	HC	[g/km]	0.148	0.159			0.156	0.156
16	CH4	[g/km]	-0.129	-0.014			-0.047	-0.047
18	NOX	[g/km]	0.801	0.431			0.536	0.536
19	CO	[g/km]	1.075	0.674			0.788	0.788
20	CO2	[g/km]	303.243	219.626			243.408	243.408
21								
22								
23	<b>Fuel Consumption from Bag Emissions</b>							
24		Unit	Phase 1	Phase 2	Phase3	Phase4	Total	Total Weighted
25	Fuel Consumption	[l/100km]	11.108	8.324			9.116	9.116
26	Fuel Economy	[km/l]	9.002	12.013			10.970	10.970
27	Fuel Economy	[mi/gal]	21.174	28.255			25.801	25.801
28								
29	<b>Fuel Consumption from Tunnel Emissions</b>							
30		Unit	Phase 1	Phase 2	Phase3	Phase4	Total	Total Weighted
31	Fuel Consumption	[l/100km]	11.464	8.303			9.202	9.202
32	Fuel Economy	[km/l]	8.723	12.044			10.867	10.867
33	Fuel Economy	[mi/gal]	20.516	28.327			25.560	25.560
34								
35								
36	<b>Particles</b>							
37		Unit	Phase 1	Phase 2	Phase3	Phase4	Total	Total Weighted
38		[g/km]	0.101	0.058			0.070	0.070

Fuente: Centro de Control y Certificación Vehicular, 3CV.

Figura 3-2: Formato de resultados de test en laboratorio

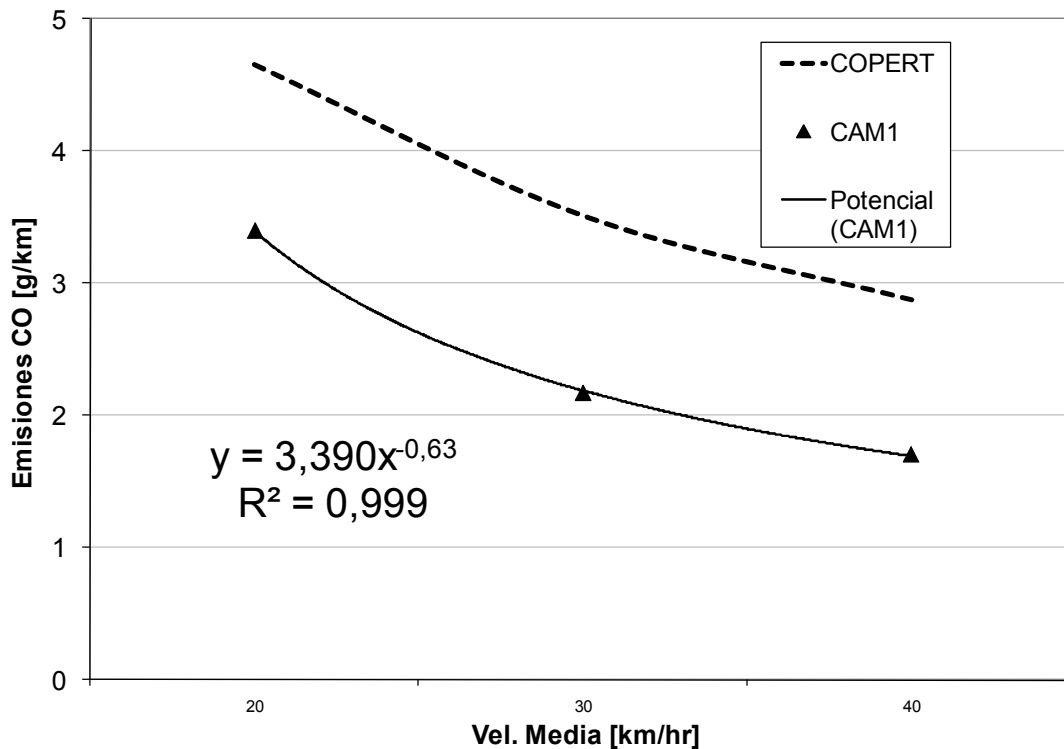


Figura 3-3: Curva experimental versus curva de referencia

### 3.3.2 Datos desde Equipos Portátiles

El procesamiento de los datos desde equipos portátiles tiene un grado de complejidad mayor, debido al hecho que las condiciones de manejo entre los distintos test de manejo son muy diferentes. Como se explica ampliamente en la sección 2.2.1, la metodología PSV se hace cargo de este problema, normalizando las emisiones según las condiciones de velocidad, aceleración y pendientes, expresando las tasas de emisión en función de BINs.

El primer post procesamiento de los datos fue realizado en los trabajos de memoria previos (Henriquez G., 2007; Madrid G., 2007; Nikolic M., 2007). En ellos se determinó el retraso entre las señales de cada uno de los equipos de medición y se corrigieron las emisiones instantáneas. Los trabajos previos contemplaron a la vez descartar cualquier dato que muestre evidentes errores en el proceso de medición. De este modo, los datos de entrada para el proceso de PSV ya han sido objeto de un primer filtro.



Entonces, se procede a determinar las emisiones por BIN de energía. Para este proceso se requirió del apoyo de ISSRC, quien procesó los datos a través del programa desarrollado por dicha institución llamado VSP Evaluation<sup>2</sup>. Todos los datos procesados en los trabajos anteriores, se ingresan al programa y se procesan en conjunto, acumulando un número importante de segundos de medición, que es la suma del tiempo medido para cada test. Es importante destacar que los datos ingresados se han diferenciado previamente según las categorías vehiculares definidas en la sección 2.3, por lo tanto los resultados entregados por ISSRC son los BINs promedio por categoría. Estos valores medios serán normalizados y comparados mediante la metodología descrita en la sección 2.2.2.

Para los vehículos livianos y medianos existen 10 sub-ciclos de conducción a intervalos de 10 km/hr aproximadamente generados en memorias anteriores (Araya Csaszar, 2008), con los cuales fue posible definir las curvas de emisión en función de la velocidad. Para camiones, el presente estudio realizó esta labor a partir de datos de seguimiento operacional obtenidos en el estudio "Determinación de factores de emisión para vehículos pesados en la Región Metropolitana" encargado por CONAMA-RM a la Universidad de Chile, y procediendo bajo la metodología reportada por Rojas (Rojas E., 2003), se construyen ciclos de conducción para las tres categorías de camiones en estudio: livianos, medianos y pesados.

Los ciclos obtenidos tienen distintas velocidades medias de operación e intentan cubrir un rango de velocidades característico de la operación de camiones que circulan en condiciones urbanas. A continuación se describen los siguientes ciclos, todos ellos con 600 segundos de duración:

- Camiones Livianos, 11 ciclos, velocidades medias entre 2 y 70 km/h
- Camiones Medianos, 11 ciclos, velocidades medias entre 6 y 73 km/h
- Camiones Pesados, 11 ciclos, velocidades medias entre 9 y 75 km/h

No es necesario que cada categoría tenga el mismo número de ciclos, lo importante es cubrir en forma homogénea el rango de velocidades

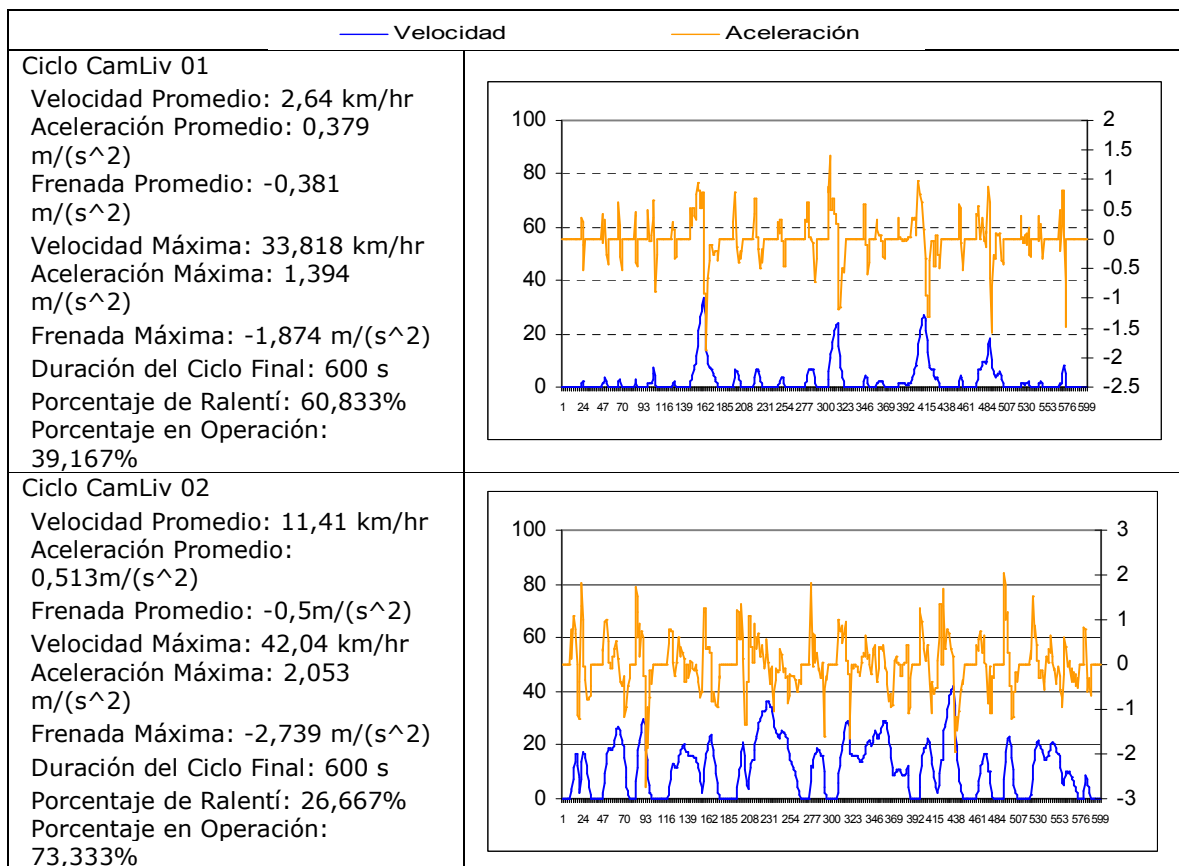
---

<sup>2</sup> El procedimiento se explica en la página web oficial de ISSRC, <http://www.issrc.org>

medias indicado, de manera tal que se puedan construir regresiones de datos adecuadas en cada intervalo.

### 3.3.2.1 Camiones Livianos

En las figuras siguientes se muestran los ciclos utilizados para construir las curvas de emisión en función de la velocidad media de operación, para camiones livianos. Estos ciclos tienen distintas velocidades medias, las que van en aumento progresivamente. En los gráficos sucesivos, el eje de la izquierda es Velocidad en km/hr, en tanto que el de la derecha es la aceleración en  $m/s^2$ .



<span style="color: blue;">—</span> Velocidad <span style="color: orange;">—</span> Aceleración	
<p><b>Ciclo CamLiv 03</b>            Velocidad Promedio: 17,31 km/hr            Aceleración Promedio: 0,53 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,589 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 49,226 km/hr            Aceleración Máxima: 2,922 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -3,37 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 19%            Porcentaje en Operación: 81%</p>	
<p><b>Ciclo CamLiv 04</b>            Velocidad Promedio: 22,99 km/hr            Aceleración Promedio: 0,46 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,592 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 50,541 km/hr            Aceleración Máxima: 1,888 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -3,447 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 14%            Porcentaje en Operación: 86%</p>	
<p><b>Ciclo CamLiv 05</b>            Velocidad Promedio: 30,52 km/hr            Aceleración Promedio: 0,437 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,515 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 58,616 km/hr            Aceleración Máxima: 2,055 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,608 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 9,167%            Porcentaje en Operación: 90,833%</p>	
<p><b>Ciclo CamLiv 06</b>            Velocidad Promedio: 37,73 km/hr            Aceleración Promedio: 0,394 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,475 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 69,08 km/hr            Aceleración Máxima: 2,305 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,294 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 4,833%            Porcentaje en Operación: 95,167%</p>	

	— Velocidad	— Aceleración
<p>Ciclo CamLiv 07</p> <p>Velocidad Promedio: 42,68 km/hr  Aceleración Promedio: 0,382 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Promedio: -0,476 m/(s<sup>2</sup>)  Velocidad Máxima: 70,728 km/hr  Aceleración Máxima: 1,986 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Máxima: -2,682 m/(s<sup>2</sup>)  Duración del Ciclo Final: 600 s  Porcentaje de Ralentí: 5%  Porcentaje en Operación: 95%</p>		
<p>Ciclo CamLiv 08</p> <p>Velocidad Promedio: 49,17 km/hr  Aceleración Promedio: 0,33m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Promedio: -0,442m/(s<sup>2</sup>)  Velocidad Máxima: 76,006 km/hr  Aceleración Máxima: 1,561 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Máxima: -2,35 m/(s<sup>2</sup>)  Duración del Ciclo Final: 600  Porcentaje de Ralentí: -2,667%  Porcentaje en Operación: 102,7%</p>		
<p>Ciclo CamLiv 09</p> <p>Velocidad Promedio: 50,44 km/hr  Aceleración Promedio: 0,295 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Promedio: -0,384 m/(s<sup>2</sup>)  Velocidad Máxima: 75,821 km/hr  Aceleración Máxima: 2,065 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Máxima: -2,537 m/(s<sup>2</sup>)  Duración del Ciclo Final: 600 s  Porcentaje de Ralentí: 2,5%  Porcentaje en Operación: 97,5%</p>		
<p>Ciclo CamLiv 10</p> <p>Velocidad Promedio: 65,27 km/hr  Aceleración Promedio: 0,28 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Promedio: -0,269 m/(s<sup>2</sup>)  Velocidad Máxima: 83,062 km/hr  Aceleración Máxima: 1,605 m/(s<sup>2</sup>)  Frenada Máxima: -2,637 m/(s<sup>2</sup>)  Duración del Ciclo Final: 600 s  Porcentaje de Ralentí: -3,5%  Porcentaje en Operación: 103,5%</p>		

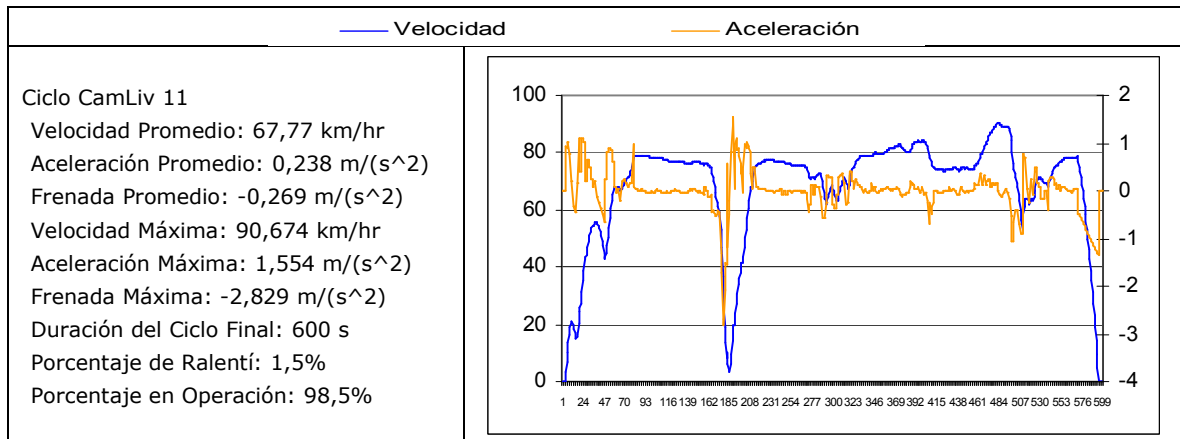
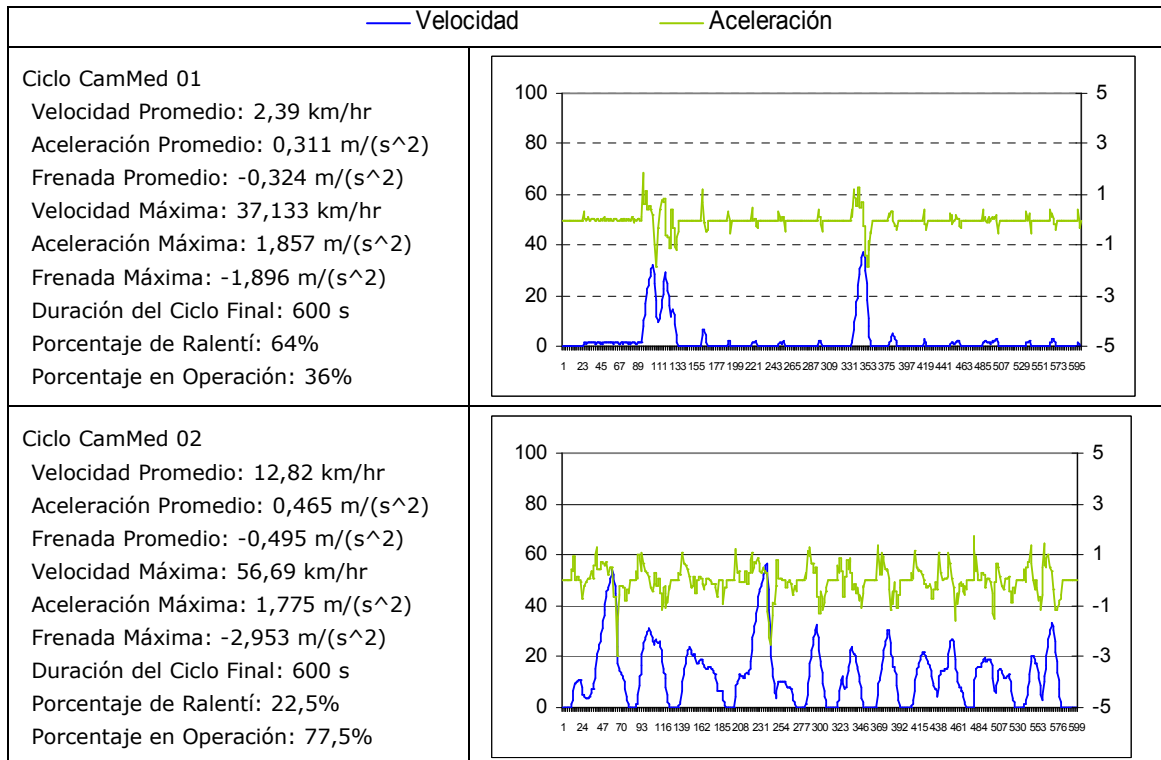


Figura 3-4: Ciclos Camiones Livianos, velocidades medias entre 5 y 70 km/h

### 3.3.2.2 Camiones Medianos

En las figuras siguientes se muestran los ciclos utilizados para construir las curvas de emisión en función de la velocidad media de operación, para camiones medianos. Como antes, el eje de la izquierda es Velocidad en km/hr, en tanto que el de la derecha es la aceleración en m/s<sup>2</sup>.



<span style="color: blue;">—</span> Velocidad <span style="color: green;">—</span> Aceleración	
<p>Ciclo CamMed 03</p> <p>Velocidad Promedio: 16,69 km/hr            Aceleración Promedio: 0,496 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,57 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 48,485 km/hr            Aceleración Máxima: 1,996 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,413 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 21,167%            Porcentaje en Operación: 78,8%</p>	
<p>Ciclo CamMed 04</p> <p>Velocidad Promedio: 22,86 km/hr            Aceleración Promedio: 0,523 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,666 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 56,968 km/hr            Aceleración Máxima: 1,741 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,392 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 14,833%            Porcentaje en Operación: 85,167%</p>	
<p>Ciclo CamMed 05</p> <p>Velocidad Promedio: 33,01 km/hr            Aceleración Promedio: 0,553 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,652 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 57,894 km/hr            Aceleración Máxima: 2,372 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -4,445 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 13,5%            Porcentaje en Operación: 86,5%</p>	
<p>Ciclo CamMed 06</p> <p>Velocidad Promedio: 38,49 km/hr            Aceleración Promedio: 0,49 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,64 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 70,376 km/hr            Aceleración Máxima: 2,5 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -3,354 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 10,167%            Porcentaje en Operación: 89,8%</p>	

	— Velocidad	— Aceleración
<p>Ciclo CamMed 07</p> <p>Velocidad Promedio: 45,39 km/hr</p> <p>Aceleración Promedio: 0,484 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Promedio: -0,626 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Velocidad Máxima: 75,691 km/hr</p> <p>Aceleración Máxima: 1,883 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Máxima: -2,773 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Duración del Ciclo Final: 600 s</p> <p>Porcentaje de Ralentí: 8%</p> <p>Porcentaje en Operación: 92%</p>		
<p>Ciclo CamMed 08</p> <p>Velocidad Promedio: 48,59 km/hr</p> <p>Aceleración Promedio: 0,394 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Promedio: -0,536 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Velocidad Máxima: 81,006 km/hr</p> <p>Aceleración Máxima: 1,867 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Máxima: -4,743 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Duración del Ciclo Final: 600 s</p> <p>Porcentaje de Ralentí: 3,333%</p> <p>Porcentaje en Operación: 96,7%</p>		
<p>Ciclo CamMed 09</p> <p>Velocidad Promedio: 52,09 km/hr</p> <p>Aceleración Promedio: 0,38 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Promedio: -0,507 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Velocidad Máxima: 83,525 km/hr</p> <p>Aceleración Máxima: 1,867 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Máxima: -4,743 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Duración del Ciclo Final: 600 s</p> <p>Porcentaje de Ralentí: 4,167%</p> <p>Porcentaje en Operación: 95,8%</p>		
<p>Ciclo CamMed 10</p> <p>Velocidad Promedio: 58,03 km/hr</p> <p>Aceleración Promedio: 0,355 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Promedio: -0,425 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Velocidad Máxima: 83,951 km/hr</p> <p>Aceleración Máxima: 2,248 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Frenada Máxima: -3,112 m/(s<sup>2</sup>)</p> <p>Duración del Ciclo Final: 600 s</p> <p>Porcentaje de Ralentí: 6%</p> <p>Porcentaje en Operación: 94%</p>		

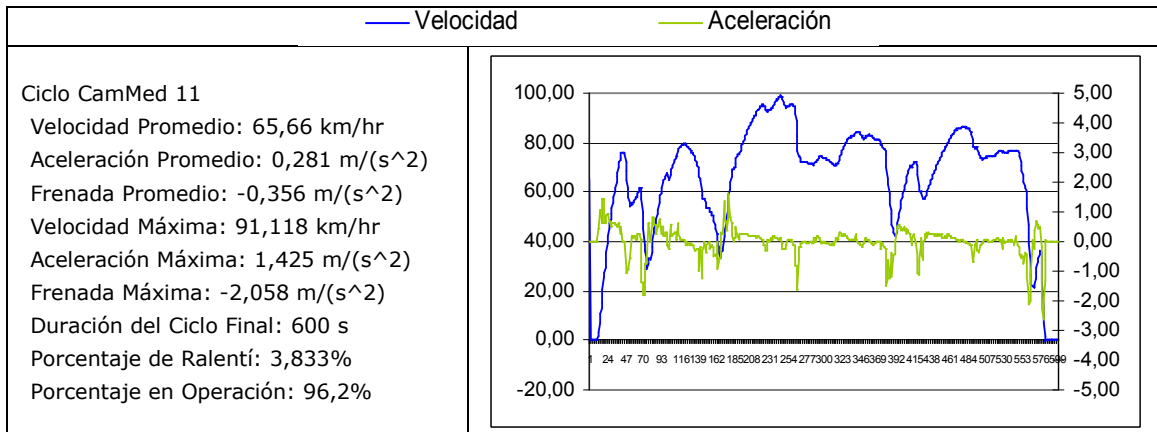
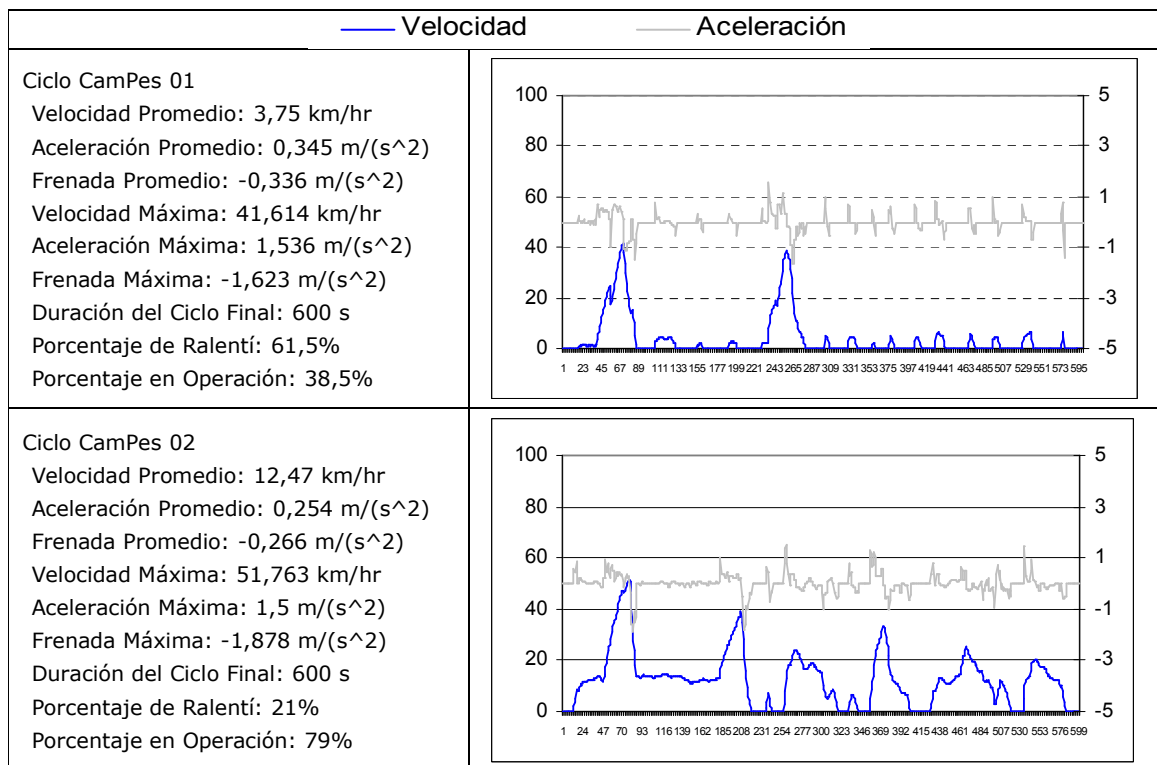


Figura 3-5: Ciclos Camiones Medianos, velocidades medias entre 6 y 73 km/h

### 3.3.2.3 Camiones Pesados

En las figuras siguientes se muestran los ciclos utilizados para construir las curvas de emisión en función de la velocidad media de operación, para camiones pesados. Una vez más, el eje de la izquierda es Velocidad en km/hr, en tanto que el de la derecha es la aceleración en m/s<sup>2</sup>.





<span style="color: blue;">—</span> Velocidad <span style="color: gray;">—</span> Aceleración	
<p>Ciclo CamPes 03</p> <p>Velocidad Promedio: 17,46 km/hr            Aceleración Promedio: 0,334 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,388 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 51,412 km/hr            Aceleración Máxima: 2,171 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,294 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 18,333%            Porcentaje en Operación: 81,7%</p>	
<p>Ciclo CamPes 04</p> <p>Velocidad Promedio: 23,91 km/hr            Aceleración Promedio: 0,287 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,393 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 55,801 km/hr            Aceleración Máxima: 1,281 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,118 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 10,667%            Porcentaje en Operación: 89,3%</p>	
<p>Ciclo CamPes 05</p> <p>Velocidad Promedio: 31,35 km/hr            Aceleración Promedio: 0,303 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,407 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 61,912 km/hr            Aceleración Máxima: 1,621 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,151 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 8,167%            Porcentaje en Operación: 91,8%</p>	
<p>Ciclo CamPes 06</p> <p>Velocidad Promedio: 36,72 km/hr            Aceleración Promedio: 0,367 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,474 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 68,042 km/hr            Aceleración Máxima: 2,485 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,531 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 4,667%            Porcentaje en Operación: 95,3%</p>	

<span style="color: blue;">—</span> Velocidad <span style="color: gray;">—</span> Aceleración	
<p>Ciclo CamPes 07</p> <p>Velocidad Promedio: 44,82 km/hr            Aceleración Promedio: 0,304 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,418 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 75,321 km/hr            Aceleración Máxima: 1,407 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,117 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 0%            Porcentaje en Operación: 104,5%</p>	
<p>Ciclo CamPes 08</p> <p>Velocidad Promedio: 48,37 km/hr            Aceleración Promedio: 0,327 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,428 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 82,636 km/hr            Aceleración Máxima: 1,476 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,091 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 2,667%            Porcentaje en Operación: 97,3%</p>	
<p>Ciclo CamPes 09</p> <p>Velocidad Promedio: 54,38 km/hr            Aceleración Promedio: 0,284 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,365 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 85,507 km/hr            Aceleración Máxima: 1,801 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -2,732 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 4,667%            Porcentaje en Operación: 95,3%</p>	
<p>Ciclo CamPes 10</p> <p>Velocidad Promedio: 68,11 km/hr            Aceleración Promedio: 0,226 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Promedio: -0,266 m/(s<sup>2</sup>)            Velocidad Máxima: 83,118 km/hr            Aceleración Máxima: 1,443 m/(s<sup>2</sup>)            Frenada Máxima: -1,625 m/(s<sup>2</sup>)            Duración del Ciclo Final: 600 s            Porcentaje de Ralentí: 0,667%            Porcentaje en Operación: 99,3%</p>	

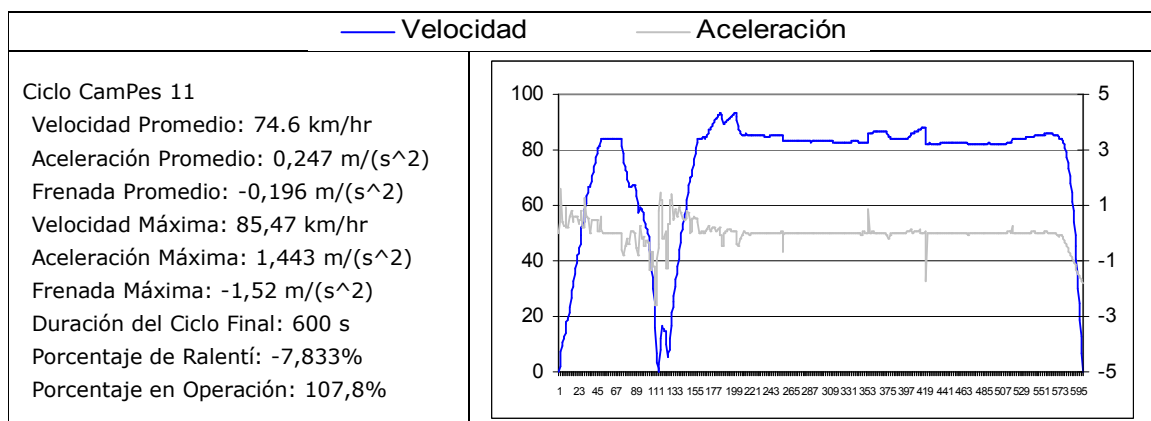


Figura 3-6: Ciclos Camiones Pesados, velocidades medias entre 9 y 75 km/h

### 3.4 Campaña experimental para buses

Para una mejor caracterización de las emisiones de buses de transporte público realizada en estudios anteriores, se requiere la realización de mediciones adicionales a las ya disponibles. El presente estudio incorpora 25 mediciones adicionales a las ya. Las categorías de buses diesel son las siguientes:

Tabla 3-1: Categorías de buses para mediciones experimentales

Tipo de vehículo	Categoría	Descripción	# de vehículos
Buses	Estándar Transantiago	Articulado	5
		Rígido	5
	Pre-Transantiago	EURO I	5
		EURO II	5
		EURO III	5
	Total		25

Las mediciones se realizaron para una muestra de 5 vehículos representativos de cada una de las 5 categorías vehiculares definidas en el cuadro anterior. La tabla siguiente describe la muestra en estudio, indicando las principales características de cada bus.

Tabla 3-2: Muestra de buses del transporte público.

Norma	Tipo Bus	Veh. No.	Identificación					Observ.
			Año	CHASIS		CARROCERIA	Filtro de Partículas	
				Marca	Modelo	Marca		
E-I	Pre Transantiago	1	1994	MBz	OF-1318	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		2	1994	MBz	OF-1318	Inreca	S/Filtro	Test ok
		3	1994	MBz	OF-1318	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		4	1993	MBz	OF-1318	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		5	1994	MBz	OF-1318	Metalpar	S/Filtro	Test ok
E-II		6	2000	MBz	OH-1420	Marcopolo	S/Filtro	Test ok
		7	1998	MBz	OH-1420	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		8	2000	MBz	OH-1420	Marcopolo	S/Filtro	Test ok
		9	1997	MBz	OH-1420	Ciferal	S/Filtro	Test ok
		10	1997	MBz	OH-1420	Ciferal	S/Filtro	Test ok
E-III		11	2005	MBz	OH-1115	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		12	2004	MBz	OH-1115	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		13	2004	MBz	OH-1115	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		14	2004	MBz	OH-1115	Metalpar	S/Filtro	Test ok
		15	2004	MBz	OH-1115	Metalpar	S/Filtro	Test ok
E-III	Estándar Transantiago Articulado	16	2006	VOLVO	B9SALF	Caio	C/ Filtro	Test ok
		17	2006	VOLVO	B9SALF	Caio	C/ Filtro	Test ok
		18	2006	VOLVO	B9SALF	Caio	S/Filtro	Test ok
		19	2006	VOLVO	B9SALF	Caio	S/Filtro	Test ok
		20	2006	VOLVO	B9SALF	Caio	S/Filtro	Test no valido
E-III	Estándar Transantiago Rígido	21	2005	VOLVO	B7RLE	Caio	C/ Filtro	Test ok
		22	2006	VOLVO	B7RLE	Marcopolo	S/Filtro	Test ok
		23	2006	VOLVO	B7RLE	Marcopolo	S/Filtro	Test ok
		24	2006	VOLVO	B7RLE	Marcopolo	S/Filtro	Test ok
		25	2006	VOLVO	B7RLE	Marcopolo	S/Filtro	Test ok

### 3.4.1 Metodología específica

La metodología utilizada, responde al procedimiento estándar fijado para todos los estudios de factores de emisión realizados en los laboratorios de 3CV. El combustible utilizado en todas las pruebas, es Diesel comercial con 50ppm de Azufre. Cada vehículo incluido en los ensayos experimentales de emisión fue sometido a un mismo ciclo de conducción, con dos fases por ciclo, y tres repeticiones de cada ciclo. El primer ciclo es de carácter preparatorio y no se efectúan mediciones de contaminantes ya que la función de esta primera prueba es obtener condiciones estables de temperatura y operación del conjunto vehículo/dinamómetro. Habiéndose desarrollado satisfactoriamente la primera repetición, se procede inmediatamente a las dos pruebas siguientes, que contemplan la medición de contaminantes, y sus resultados son promediados al momento de analizar los valores finales de emisión y consumo de combustible. Los ciclos de conducción utilizados corresponden a los ciclos de Transantiago<sup>3</sup>, descritos a continuación:

- **Ciclo Transantiago Antes (CTSAL):** para buses tipo M con chasis rígido anterior a la implementación del sistema de transporte público. El ciclo tiene una velocidad promedio de 22,55 km/hr y un porcentaje de tiempo detenido de 20%.

Tabla 2.14: Características principales del Ciclo CTSAL

Características	Fase 1: 3 a 23 [Km/hr]		Fase 2: 23 a 60 [Km/hr]		Ciclo Total
	Real	Ciclo	Real	Ciclo	
<b>Nº puntos [seg]</b>	102737	600	99569	600	<b>1200</b>
<b>Ralentí [%]</b>	27%	30%	8%	10%	<b>20%</b>
<b>Operación [%]</b>	73%	70%	92%	91%	<b>80%</b>
<b>Aceleración [%]</b>	44%	n/d	57%	n/d	<b>50%</b>
<b>Frenada [%]</b>	28%	n/d	34%	n/d	<b>30%</b>
<b>Vel. Prom. [Km/hr]</b>	20.37	20.73	33.41	33.81	<b>22.55</b>
<b>Acel. Prom. [m/s<sup>2</sup>]</b>	0.51	0.58	0.50	0.58	<b>0.58</b>
<b>Fren Prom. [m/s<sup>2</sup>]</b>	-0.73	-0.89	-0.83	-0.951	<b>-0.90</b>
<b>Vel. max. [Km/hr]</b>	71.32	49.41	87.03	64.52	<b>64.52</b>
<b>Correlación [%]</b>	100%	79%	100%	88%	<b>n/d</b>

<sup>3</sup> Determinados en el estudio "Desarrollo de Pruebas de Campo Para la Evaluación Comparada de Tecnologías de Buses para Santiago.", 2007, encargado por el Banco Mundial a la Universidad de Chile.

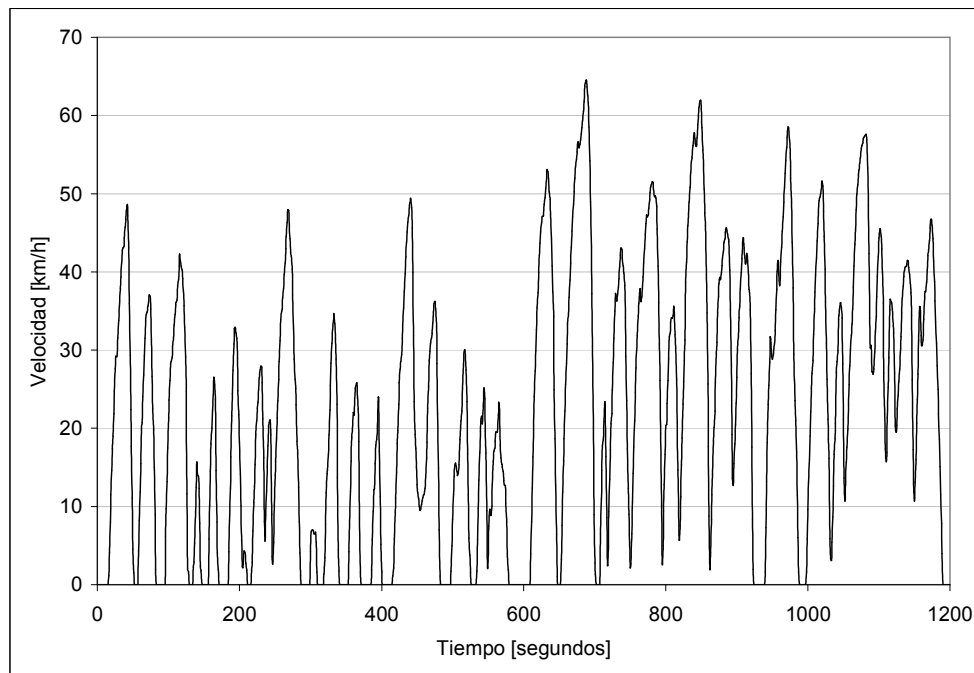


Figura 2.18: Ciclo de conducción CTSAL

- **Ciclo Transantiago Modelado 1 (CTSM-1):** ciclo modelado que representa las condiciones de conducción después de la implementación del sistema de transporte público, para buses tipo C2 con chasis articulado. La velocidad promedio del ciclo es de 20.11 km/h y el tiempo detenido es de 29% (Tabla 2.15).

Tabla 3-3: Características principales del Ciclo CTST-1

Características	Fase 1: 3 a 19 [Km/hr]		Fase 2: 19 a 60 [Km/hr]		Ciclo Total
	Real	Ciclo	Real	Ciclo	
<b>Nº puntos [seg]</b>	69771	600	70694	600	<b>1200</b>
<b>Ralentí [%]</b>	39%	38%	16%	19%	<b>29%</b>
<b>Operación [%]</b>	61%	62%	84%	81%	<b>71%</b>
<b>Acelerando [%]</b>	34%	n/d	47%	n/d	<b>40%</b>
<b>Frenada [%]</b>	27%	n/d	36%	n/d	<b>32%</b>
<b>Vel. Prom. [Km/hr]</b>	20.07	21.93	32.04	32.89	<b>20.11</b>
<b>Acc. Prom. [m/s<sup>2</sup>]</b>	0.52	0.61	0.52	0.59	<b>0.60</b>
<b>Fren Prom. [m/s<sup>2</sup>]</b>	-0.63	-0.78	-0.67	-0.70	<b>-0.72</b>
<b>Vel max. [Km/hr]</b>	63.75	49.15	68.52	59.73	<b>59.73</b>
<b>Corr. [%]</b>	100%	70%	100%	89%	<b>n/d</b>

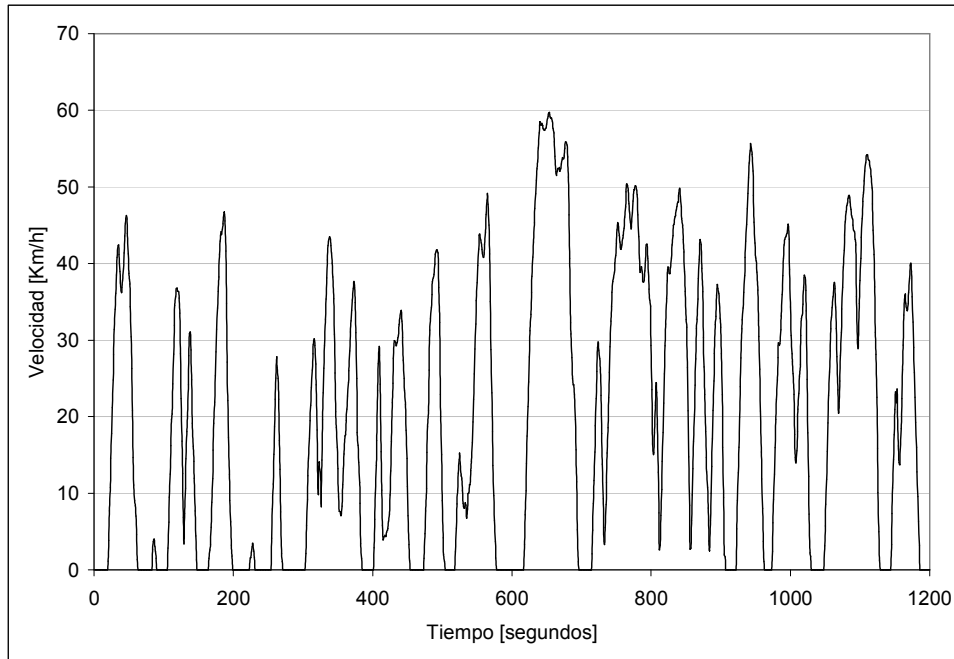


Figura 3-7: Ciclo de conducción CTSM-1

- **Ciclo Transantiago Modelado 2 (CTSM-2):** ciclo modelado que representa las condiciones de conducción después de implementación del sistema de transporte público, para buses tipo B2 con chasis rígido. La velocidad promedio del ciclo es de 20.37 km/h y el tiempo detenido es de 29%.

Tabla 3-4: Características principales del Ciclo CTST-2

Características	Fase 1: 3 a 20 [Km/hr]		Fase 2: 20 a 60 [Km/hr]		Ciclo Total
	Real	Ciclo	Real	Ciclo	
<b>Nº puntos [seg]</b>	82667	600	84603	600	<b>1200</b>
<b>Ralentí [%]</b>	39%	39%	15%	18%	<b>29%</b>
<b>Operación [%]</b>	61%	61%	85%	82%	<b>71%</b>
<b>Acelerando [%]</b>	34%	n/d	48%	n/d	<b>40%</b>
<b>Frenada [%]</b>	27%	n/d	36%	n/d	<b>32%</b>
<b>Vel. Prom. [Km/hr]</b>	21.21	21.72	33.23	33.65	<b>20.37</b>
<b>Acc. Prom. [m/s<sup>2</sup>]</b>	0.58	0.69	0.55	0.63	<b>0.66</b>
<b>Fren Prom. [m/s<sup>2</sup>]</b>	-0.68	-0.82	-0.71	-0.79	<b>-0.79</b>
<b>Vel max. [Km/hr]</b>	62.12	48.45	76.58	61.28	<b>61.28</b>
<b>Corr. [%]</b>	100%	77%	100%	89%	<b>n/d</b>

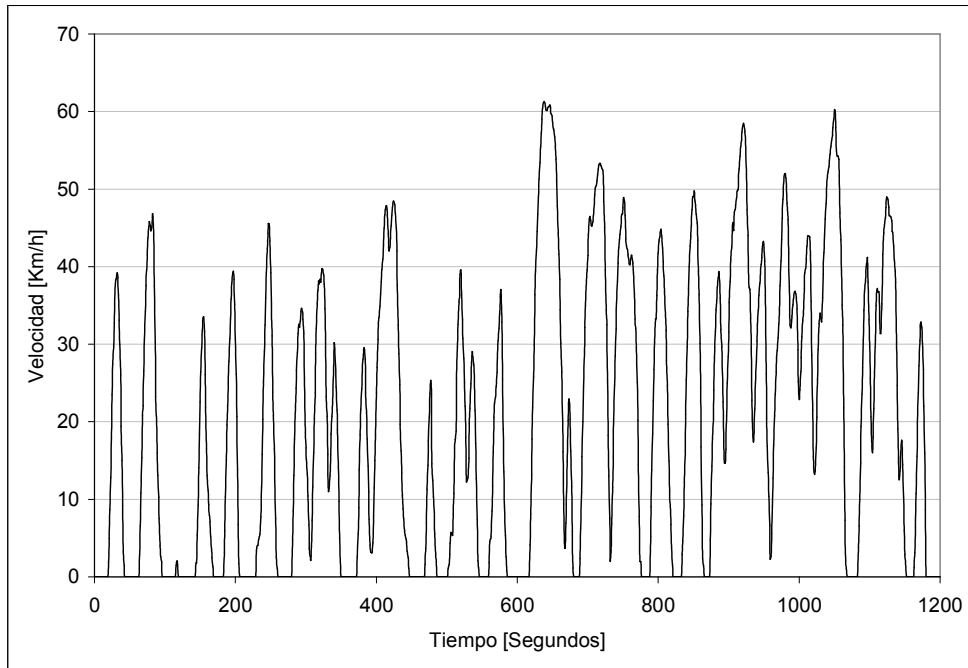


Figura 3-8: Ciclo de conducción CTSM-2



## 4 RESULTADOS

A continuación se presenta el resultado de la aplicación de las metodologías descritas en la sección 3 del presente informe. En principio se entregan el análisis de estudios previos aplicando la metodología descrita en 3.4 y 3.3, sobre datos obtenidos para vehículos livianos y medianos, camiones y buses que transitan por las arterias de la RM.

El post procesamiento de los datos se expresa en la forma de curvas de emisión en función de la velocidad media de operación, tal como las presenta el estándar internacional Copert (European Environment Agency, 2003), en sus distintas versiones. La figura siguiente muestra los valores de referencia ("MODEM" y "COPERT VII") para la categoría Camión Mediano Sin Norma, versus los datos experimentales de la misma categoría: DIMEC - P, para aquellos obtenidos por equipos portátiles; y DIMEC - D para aquellos obtenidos de pruebas efectuadas en el dinamómetro de chasis.

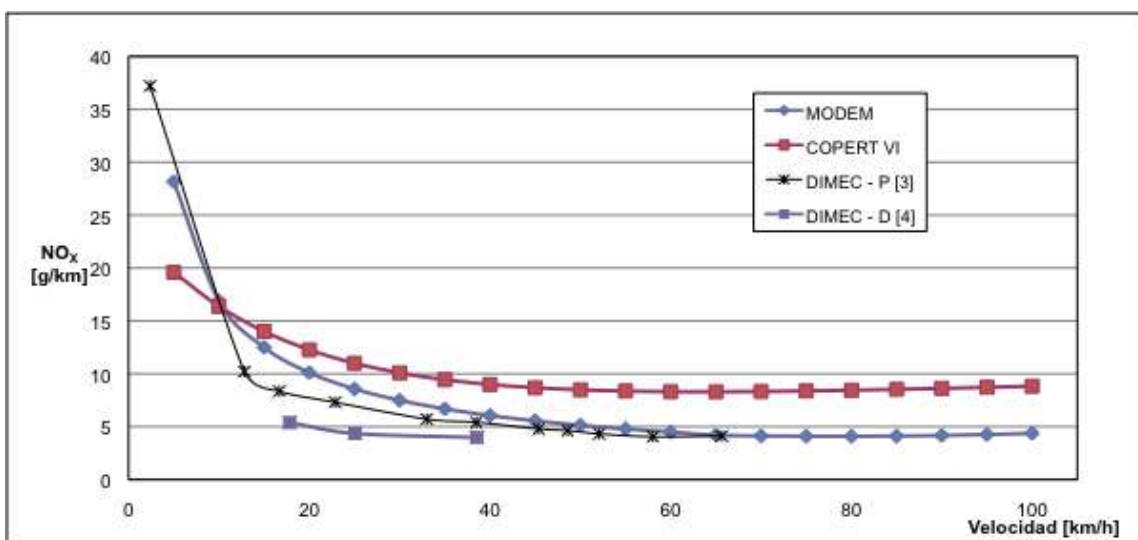


Figura 4-1: Curvas de emisión en función de la velocidad media, para varias fuentes. Categoría vehicular "Camión Mediano - Sin norma"

Producto de las campañas experimentales llevadas a cabo en estudios previos ya mencionados, se determinaron diversos factores de emisión para vehículos livianos y medianos, y camiones. El principal aporte del presente trabajo es expresar los resultados obtenidos anteriormente, normalizándolos como tasas de emisión en función de la velocidad

media de operación, gracias a la metodología descrita en la sección 2.2.1.

Por otra parte, en el caso de buses se presentan los resultados obtenidos por este estudio, en las dependencias del laboratorio de 3CV procesados de acuerdo a la metodología descrita en 2.2.2 y 3.3.1. Si bien se construyeron curvas de emisión en función de la velocidad de operación para todas las categorías en estudio, estas no se presentan por razones de espacio, aunque se adjuntan como anexo digital al presente documento.

No obstante lo anterior, los párrafos siguientes buscan dar al lector una noción resumida de las diferencias encontradas para cada una de las categorías de interés. Para ejemplificar los antecedentes disponibles, la presente sección muestra las emisiones evaluadas a una velocidad característica, la misma que será utilizada en secciones posteriores para comparar los resultados experimentales locales, con aquellos utilizados actualmente por CONAMA, y aquellos publicados en COPERT IV. Es así como a continuación se presentan los factores de emisión experimentales determinados por estudios locales evaluados a una velocidad media característica, comparando en detalle cada una de las tecnologías disponibles en el estudio. Dado que las mediciones de MP se realizan con equipos de naturaleza distinta, dichos resultados se presentan de manera separada.

Al finalizar el reporte de resultados por categoría, se entregan las curvas de emisión en función de la velocidad determinadas en el presente trabajo.

#### ***4.1 Vehículos Livianos y Medianos***

Respecto de las emisiones gaseosas (CO, NO<sub>x</sub> y HC) se observa en general para esta categoría vehicular, que la mejora en norma de emisión es correspondida en las observaciones experimentales con una baja en los registros para HC y CO. En el caso de NO<sub>x</sub>, dicha característica se mantiene para las subcategorías de vehículos a gasolina (tanto en vehículos particulares como en comerciales), sin embargo, el comportamiento es errático en el caso de los vehículos que usan combustible diesel observándose, por ejemplo, un aumento de la emisión para la tecnología Euro 3 versus Euro 1, representados por una muestra de 9 vehículos para ambas categorías. Si se observan las emisiones de material particulado, se tiene nuevamente este fenómeno, ahora para la sub categoría de vehículos comerciales.

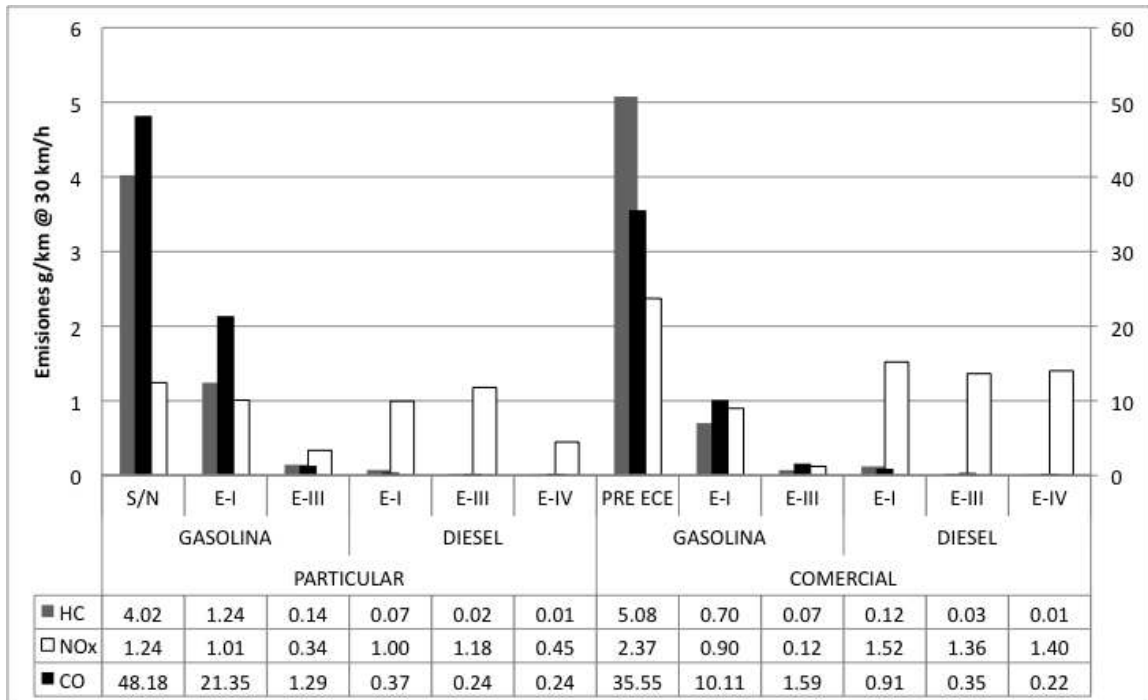


Figura 4-2: Factores experimentales para vehículos livianos y medianos, HC, CO, NO<sub>x</sub>

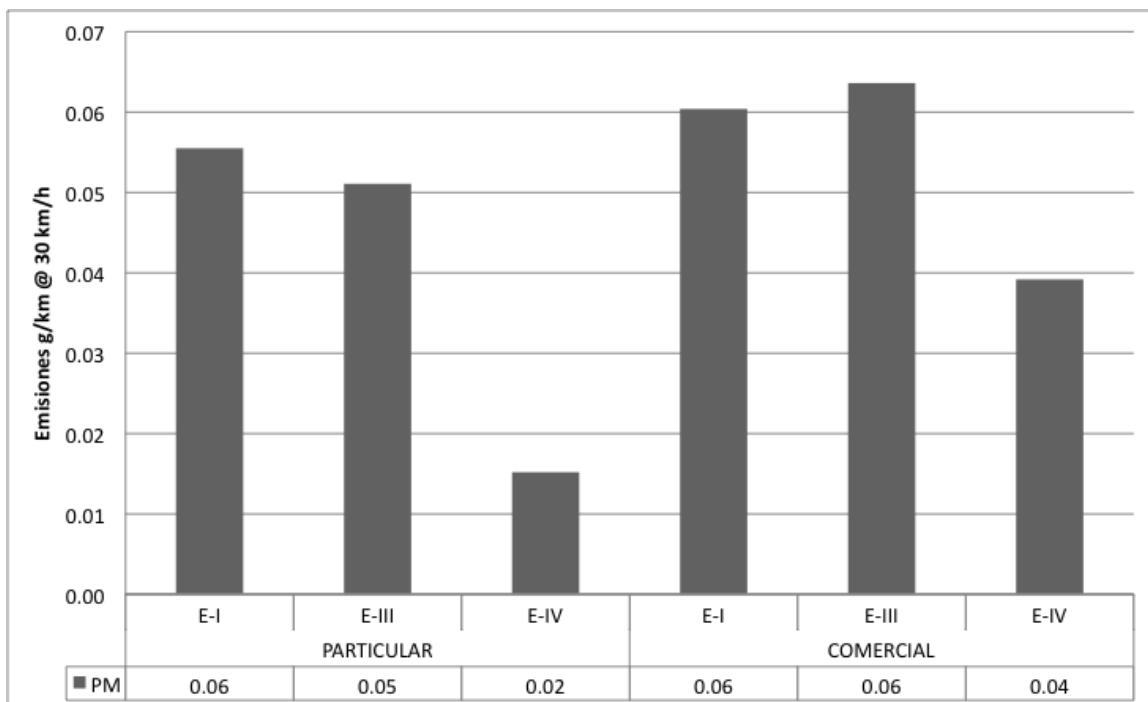


Figura 4-3: Factores experimentales para vehículos livianos y medianos, MP

#### 4.1.1 Curvas de emisión para vehículos livianos y medianos

Cada una de las curvas encontradas se presenta a continuación en sus formas algebraicas. Ellas tienen validez entre los 5 y 90 km/h a menos que se indique lo contrario.

Tabla 4-1: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, vehículos livianos y medianos.

Categoría	Norma	Coeficientes	HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
Vehículos de pasajeros Gasolina (VPG)	E-I	a	45.01	3.691	597	N/A
		b	-0.71	-0.32	-0.74	N/A
		R <sup>2</sup>	0.995	0.971	0.997	N/A
	E-III	a	17.64	4.07	188.3	N/A
		b	-0.78	-0.41	-0.64	N/A
		R <sup>2</sup>	0.981	0.888	0.946	N/A
	E-IV	a	2.323	-1.00E-06	5.97	N/A
		b	-0.82	0.000258	-0.45	N/A
		c	-	-0.01308	-	N/A
		d	-	0.522927	-	N/A
		R <sup>2</sup>	0.968	0.955	0.815	N/A
	Vehículos de pasajeros Diesel (VPD)	E-I	a	1.019	7.156	4.465
b			-0.77	-0.58	-0.73	-0.58
R <sup>2</sup>			0.994	0.983	0.985	0.964
E-III		a	0.315	4.597	1.55	2.06E-01
		b	-0.84	-0.4	-0.55	-0.41
		R <sup>2</sup>	0.988	0.803	0.883	0.873
E-IV		a	0.338	4.00E-07	2.301	0.03
		b	-1.03	-8.00E-05	-0.66	-0.2
		c	-	0.006	-	-
		d	-	-0.209	-	-
		e	-	3.154	-	-
		R <sup>2</sup>	0.984	0.988	0.962	0.905

Notas:

1. Con dos coeficientes la ecuación es de la forma  $E = a \cdot V^b$
2. Con tres coeficientes, la ecuación es de la forma  $E = a \cdot V^2 + b \cdot V + c$
3. Con cuatro coeficientes, la ecuación es de la forma  $E = a \cdot V^3 + b \cdot V^2 + c \cdot V + d$

Tabla 4-2: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, vehículos livianos y medianos.

Categoría	Norma	Coefficientes	HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
Vehículos comerciales Gasolina (VCG)	E-I	a	60.79	9.563	255.6	N/A
		b	-0.73	-0.41	-0.58	N/A
		R <sup>2</sup>	0.995	0.985	0.918	N/A
	E-III	a	8.118	2.955	80.5	N/A
		b	-0.72	-0.35	-0.61	N/A
		R <sup>2</sup>	0.985	0.908	0.971	N/A
	E-IV	a	-4.00E-07	-5.00E-07	-5.00E-05	N/A
		b	8.00E-05	0.000101	0.009	N/A
		c	-0.004	-0.00558	-0.438	N/A
		d	0.13	0.211963	7.977	N/A
		R <sup>2</sup>	0.978	0.993	0.963	N/A
	Vehículos comerciales Diesel (VCD)	E-I	a	1.907	13.87	9.47
b			-0.81	-0.65	-0.699	-0.72
R <sup>2</sup>			0.9996	0.982	0.985	0.982
E-III (Ver nota 4 para PM)		a	0.025	9.808	8.00E-05	-2.00E-06
		b	-0.177	-0.58	-0.006	0.0003
		c	-	-	0.453	-0.01019
		d	-	-	-	0.183071
		R <sup>2</sup>	0.871	0.928	0.901	0.999
E-IV		a	0.2197	4.308	2.514	0.176
		b	-0.63	-0.33	-0.71	-0.446
		R <sup>2</sup>	0.963	0.712	0.977	0.862

Notas:

1. Con dos coeficientes la ecuación es de la forma  $E = a \cdot V^b$
2. Con tres coeficientes, la ecuación es de la forma  $E = a \cdot V^2 + b \cdot V + c$
3. Con cuatro coeficientes, la ecuación es de la forma  $E = a \cdot V^3 + b \cdot V^2 + c \cdot V + d$
4. Entre 0 y 50 km/hr

Para todas las categorías se obtienen altos niveles de correlación para las curvas de emisión encontradas, presentando solamente un valor de R<sup>2</sup> inferior a 0.8 para los valores de NO<sub>x</sub> la categoría Vehículos Comerciales Euro IV, y un grupo reducido de ellas cuya correlación es inferior a 90%, entre los cuales se puede mencionar el CO para VPG con tecnología Euro IV y Euro III, HC para VCD Euro III y finalmente MP en VCD - Euro IV y VPD Euro III.

## 4.2 Camiones

Los resultados de estudios anteriores (Madrid G., 2007) se presentan en la Figura 4-4 para NO<sub>x</sub>, CO y HC, y en la Figura 4-5 para MP. En estos resultados se observa una aceptable correlación entre tecnología y emisiones medidas experimentalmente, aunque siempre está presente un alejamiento de las tendencias esperadas para algunos casos particulares. Especial atención requieren los camiones pesados, donde el comportamiento observado es muy errático para CO y MP.

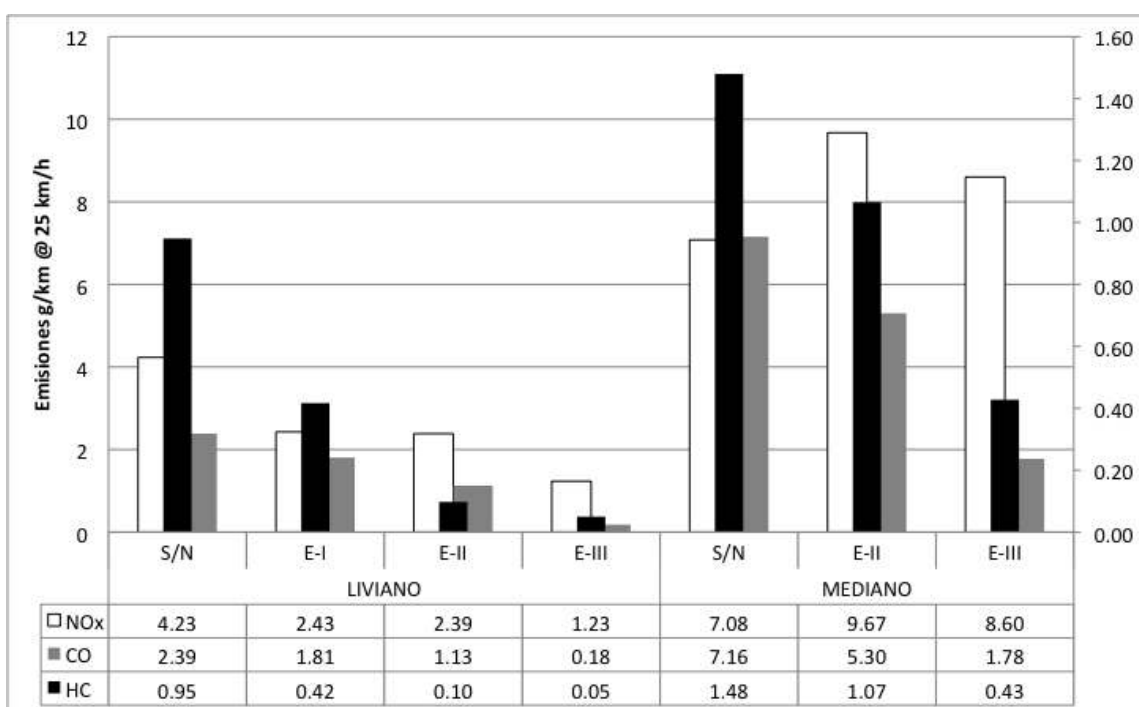


Figura 4-4: Factores experimentales para camiones, HC, CO, NO<sub>x</sub>

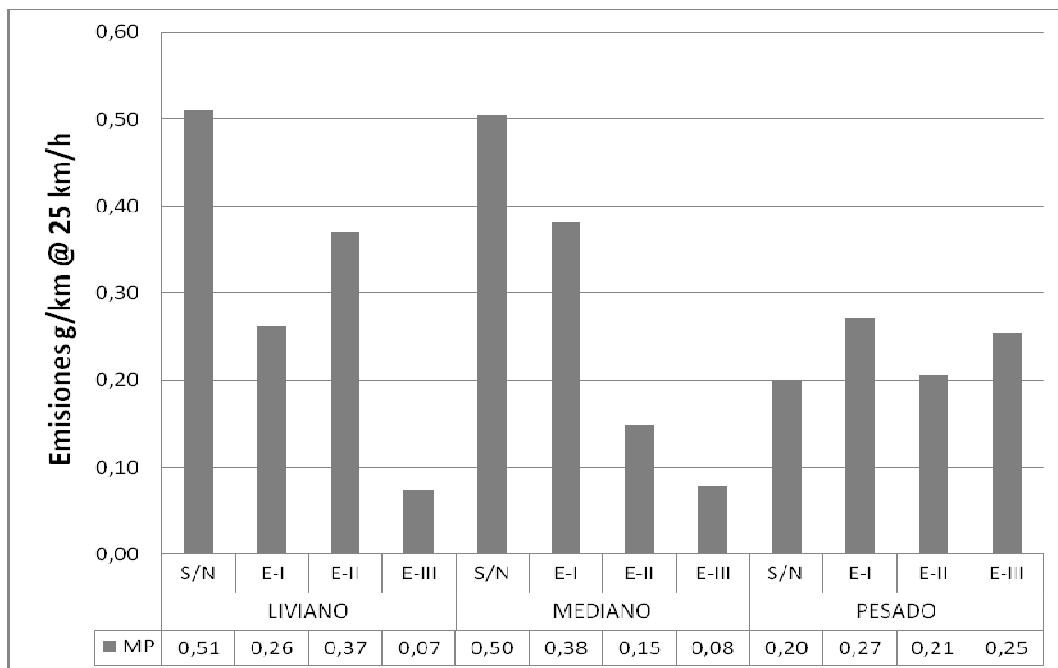


Figura 4-5: Factores experimentales para camiones, MP

#### 4.2.1 Curvas de emisión para camiones

A partir de los datos procesados para camiones, se construyen 48 curvas de emisión las cuales se presentan a continuación con los coeficientes de correlación respectivos. La expresión general es una curva potencial de la forma  $E = a \cdot V^b$  y todos los valores de  $R^2$  están sobre el 90% a excepción de la curva de MP presentada para la categoría de camiones pesados Euro II, donde se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,66.

Las expresiones presentadas tienen validades entre los 5 y 70 km/h a menos que se indique lo contrario.

Tabla 4-3: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, camiones livianos.

LIVIANOS	$E = a \cdot V^b$			
Norma	Contaminante	a	b	R <sup>2</sup>
S/N	HC	14.548	-0.8483	0.9992
	NO <sub>x</sub>	30.628	-0.6149	0.9937
	CO	30.508	-0.7918	0.9987
	MP	3.9585	-0.636	0.9984
E-I	HC	5.826	-0.8195	0.9986
	NO <sub>x</sub>	30.551	-0.7867	0.9987
	CO	20.381	-0.7529	0.9968
	MP	1.3632	-0.5122	0.9847
E-II	HC	0.8667	-0.6786	0.9963
	NO <sub>x</sub>	19.212	-0.6481	0.9922
	CO	8.3914	-0.6241	0.9935
	MP	1.715	-0.4757	0.9861
E-III	HC	0.5822	-0.7632	0.9965
	NO <sub>x</sub>	10.979	-0.6793	0.9922
	CO	3.6438	-0.9312	0.9972
	MP	0.5635	-0.6289	0.9943

Tabla 4-4: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, camiones medianos.

MEDIANOS	$E = a \cdot V^b$			
Norma	Contaminante	a	b	R <sup>2</sup>
S/N	HC	18.62	-0.7867	0.9981
	NO <sub>x</sub>	60.713	-0.6676	0.9907
	CO	36.464	-0.5059	0.9808
	MP	2.3617	-0.4798	0.9843
E-I	HC	12.513	-0.8778	0.9997
	NO <sub>x</sub>	47.305	-0.6485	0.9963
	CO	21.633	-0.6001	0.9847
	MP	1.3636	-0.3961	0.9755
E-II	HC	12.665	-0.8147	0.9991
	NO <sub>x</sub>	50.566	-0.6317	0.9856
	CO	29.348	-0.8728	0.9994
	MP	1.119	-0.6264	0.9911
E-III	HC	9.594	-0.9838	0.9998
	NO <sub>x</sub>	40.175	-0.6978	0.995
	CO	34.141	-1.0563	0.9995
	MP	0.5695	-0.6151	0.9932



Tabla 4-5: Resultados experimentales para niveles de emisión en función de la velocidad, camiones pesados.

PESADOS	$E = a \cdot V^b$			
Norma	Contaminante	a	b	R <sup>2</sup>
S/N	HC	25.251	-0.8526	0.9963
	NO <sub>x</sub>	70.616	-0.5963	0.9644
	CO	37.859	-0.8377	0.9958
	MP	1.1172	-0.5339	0.9261
E-I	HC	10.797	-0.7388	0.9927
	NO <sub>x</sub>	88.886	-0.6811	0.9756
	CO	28.397	-0.6717	0.9863
	MP	3.9399	-0.8306	0.8045
E-II	HC	15.714	-0.836	0.9965
	NO <sub>x</sub>	49.214	-0.5054	0.9465
	CO	43.024	-0.6505	0.9872
	MP	2.1864	-0.7332	0.6633
E-III	HC	5.1323	-0.7721	0.9945
	NO <sub>x</sub>	61.877	-0.613	0.9714
	CO	17.9	-0.7178	0.9923
	MP	4.9058	-0.9193	0.9962

### 4.3 Buses

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para buses, separados por cada una de las categorías definidas. Los resultados presentan un formato uniforme para facilitar el análisis posterior. Para todos los gráficos, se presentan las emisiones en gramos por kilómetro (g/km), obtenidas en el ciclo ensayado correspondiente al tipo de bus. En primera instancia, se muestra el promedio de las emisiones obtenidas para todos las pruebas realizadas sobre dinamómetro de chasis, de todos los estudios relacionados, con la cantidad de buses que respaldan el promedio, y la correspondiente desviación estándar, separados por tecnologías como buses pre-Transantiago, buses Transantiago Articulados y buses Transantiago Rígidos. En segundo lugar, se presentan los resultados por test para cada categoría en estudio.

### **4.3.1 Buses sin filtro de partículas**

Los primeros resultados presentados, corresponden a mediciones realizadas sobre buses, que no poseen un mecanismo de post tratamiento de las emisiones. Este grupo representa a la gran mayoría de los buses que actualmente recorren las arterias de la Región Metropolitana de Santiago.

En la Figura 4-6 se entregan los resultados de emisión para HC, para los ciclos ya mencionados anteriormente. Se aprecia que el comportamiento de las emisiones promedio de las pruebas realizadas sigue la tendencia esperada por categoría, exceptuando las categorías pre-Transantiago Euro-II y Transantiago Volvo B9. La tecnología Euro III que presentan los buses Transantiago Volvo B7, emite un 85% menos que la Euro I de aquellos buses con estándar previo al nuevo sistema de transporte. Para entender el comportamiento inesperado de las categorías ya mencionadas, es necesario analizar más a fondo cada una de las pruebas llevadas a cabo, análisis que se realiza en los párrafos siguientes.

Al detenerse en las desviaciones estándar que presenta cada categoría, se tiene que los buses pre-Transantiago, presentan las mayores variabilidades en sus resultados (entre 0,14 y 0,22), en tanto que el mismo parámetro es mucho menor en los buses más nuevos (en el peor caso, la desviación estándar es igual a 0,07). Este comportamiento es esperable, debido a la variabilidad en las edades de los individuos de las flotas más antiguas. La misma figura muestra los intervalos de confianza construidos con las varianzas calculadas, y definiendo un nivel de confiabilidad igual al 90%.

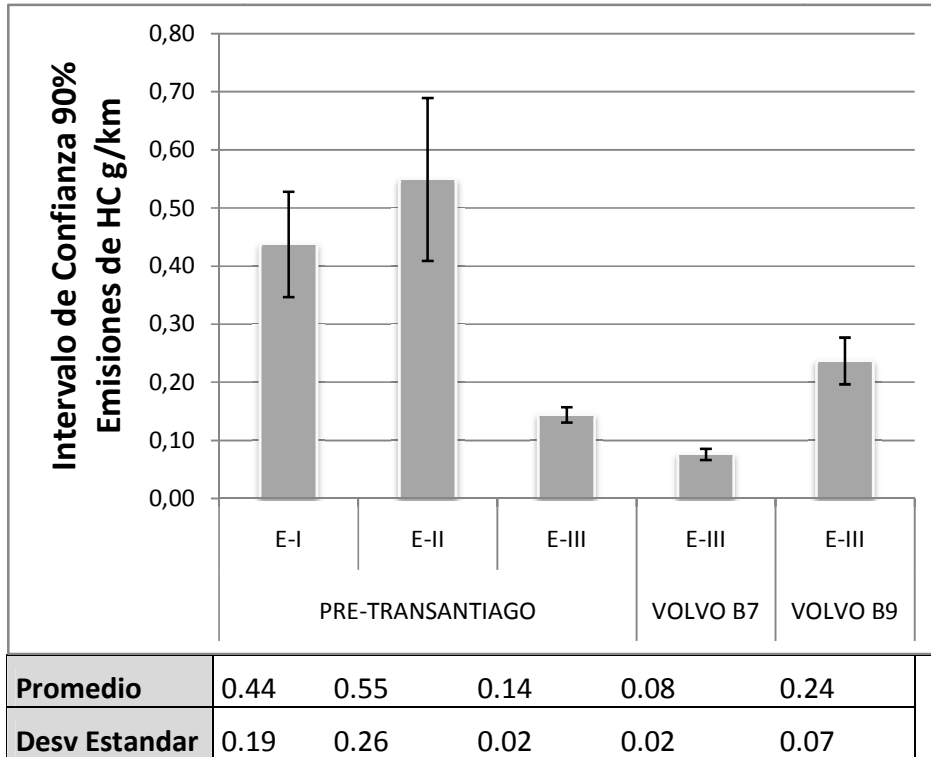


Figura 4-6: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión HC

Al observar la Figura 4-7, la cual muestra los resultados por test, se tiene que el aumento de emisión para el primer caso, viene dado dos razones: en primer lugar, el muy buen desempeño entregado por el bus "b24" que baja el promedio de esta sub-categoría, y en segundo lugar, se tiene que el bus "b26" presenta un nivel de emisión de HC muy alto, y fuera del rango que presentan los cuatro buses restantes para esta categoría. Cabe destacar, el hecho de que el único bus medido en el proyecto GEF de esta categoría con datos registrados para HC, presenta una muy buena correlación con sus pares, a pesar de la diferencia de tiempo entre un estudio y otro. No se puede afirmar lo mismo en la categoría Pre-Transantiago Euro-III, donde las diferencias entre un estudio y otro son importantes.

Para los buses de estándar Transantiago, se observa que aquellos del tipo Volvo B7, o también llamados "Rígidos", presentan una excelente correlación para las emisiones obtenidas en los tres estudios. Este hecho no se replica en los buses B9, donde las emisiones de HC presentan diferencias hasta el doble entre un estudio y otro.

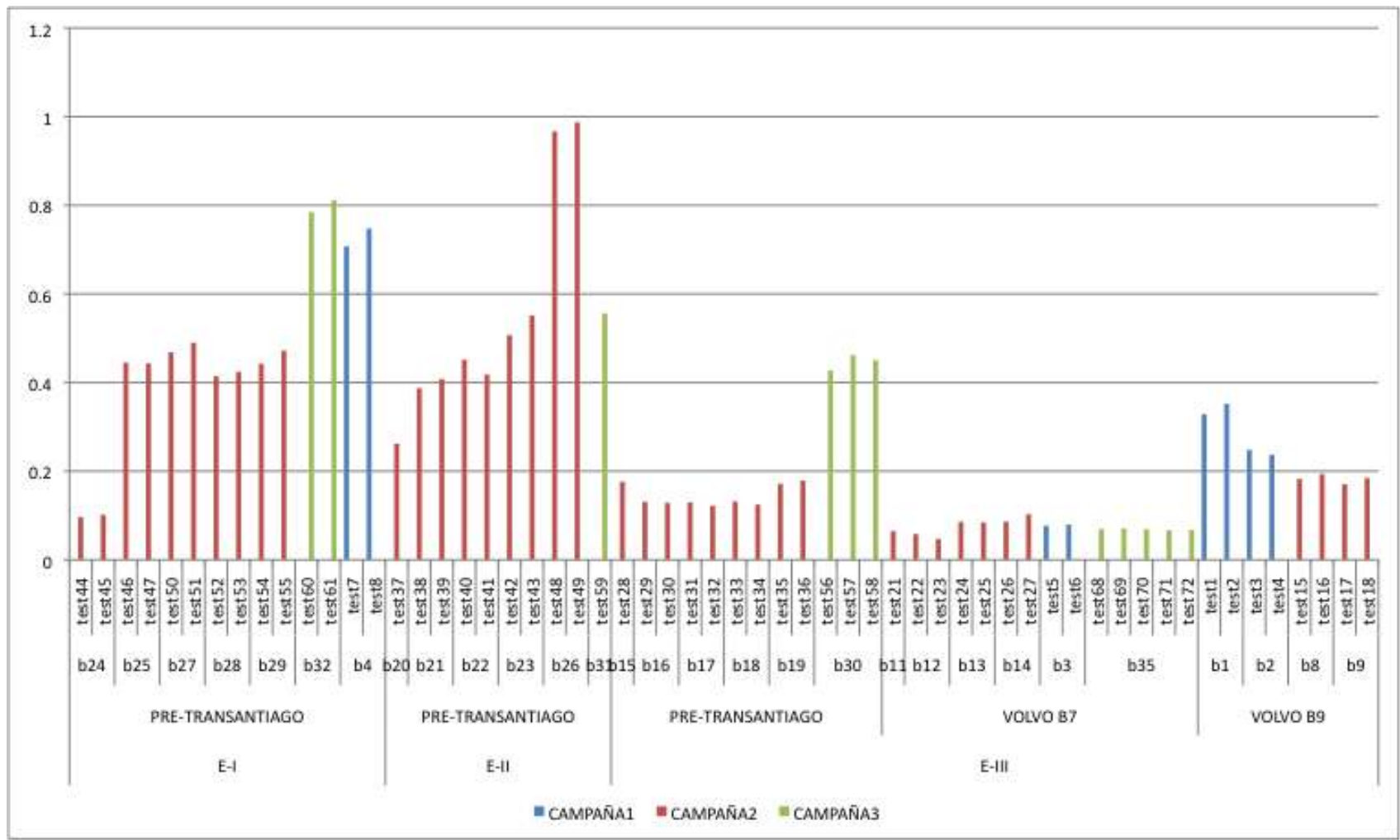


Figura 4-7: Resultados detallados por test, HC

Al observar las emisiones de NOx (Figura 4-8), se tiene que las diferencias entre categorías se estrechan. Los valores obtenidos arrojan una disminución de 34% entre las tecnologías Euro I y Euro III, en los buses de estandar pre-Transantiago. Los buses de estandar Transantiago, muestran emisiones mayores para los dos tipos en estudio. En el peor caso, la diferencia es de 22% respecto de la categoría Euro III Pre-Transantiago.

Para la categoría Pre-Transantiago, las desviaciones estandar son menores respecto de la media, en comparación con las emisiones de HC. En el peor de los casos (Euro II), la desviación representa cerca del 20% del promedio. Para los buses Transantiago, la desviación se acerca al 30% de la media, siendo el de los buses Volvo B7 el caso más adverso.

La Figura 4-9 comprueba lo dicho anteriormente. Al observar los resultados caso a caso, se tiene una muy buena correlación entre valores obtenidos por cada categoría y se comprueba un comportamiento de mayor emisión de NOx para el caso de los vehículos del estandar transantiago en estudio.

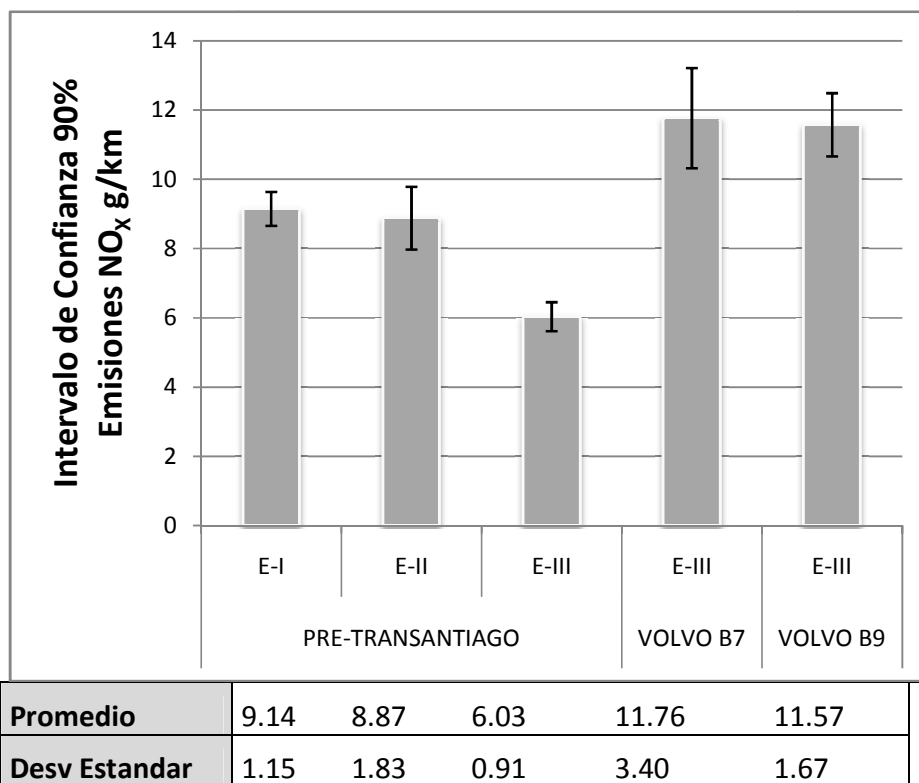


Figura 4-8: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, NOx

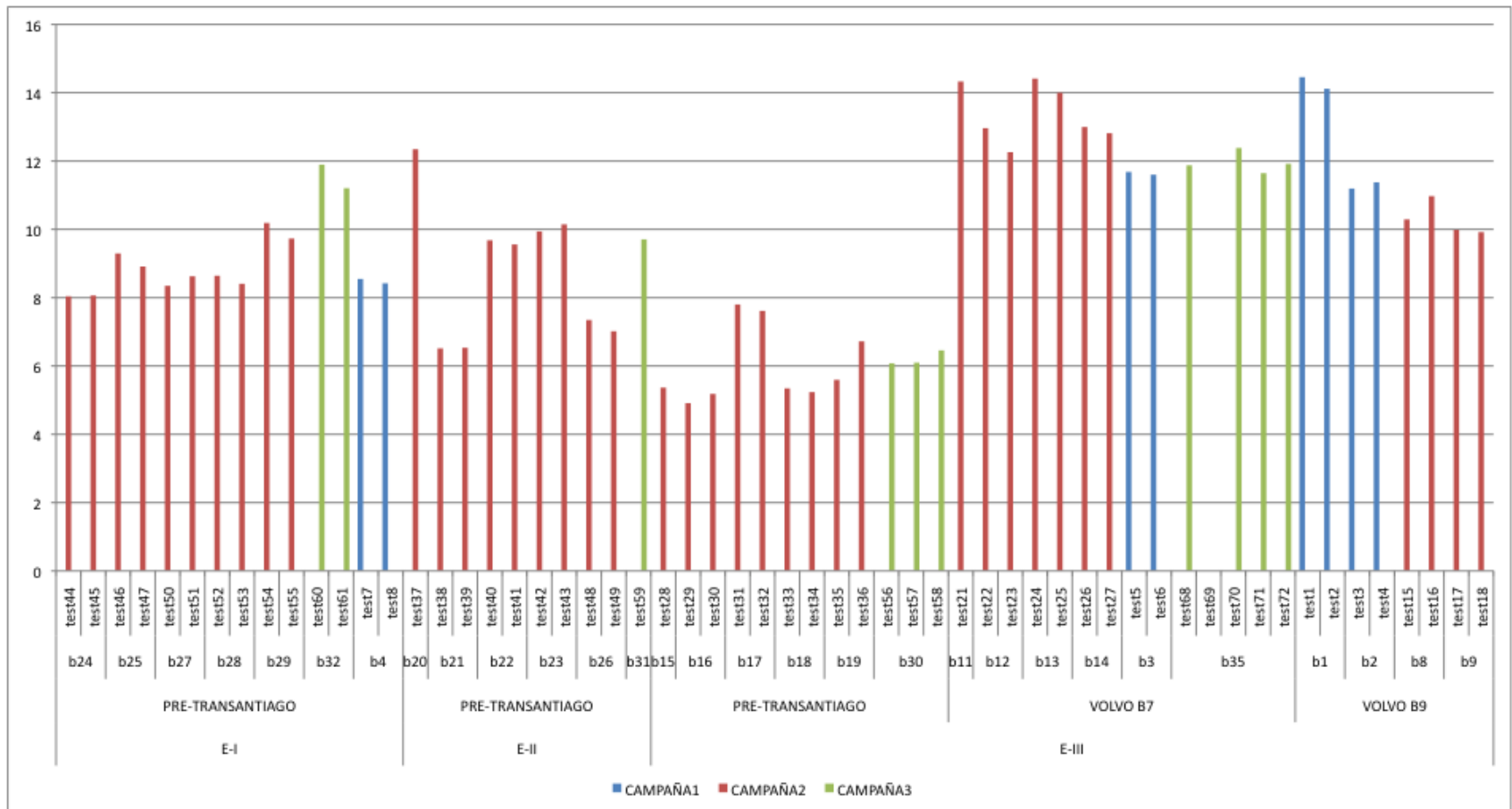


Figura 4-9: Resultados detallados por test, NOx

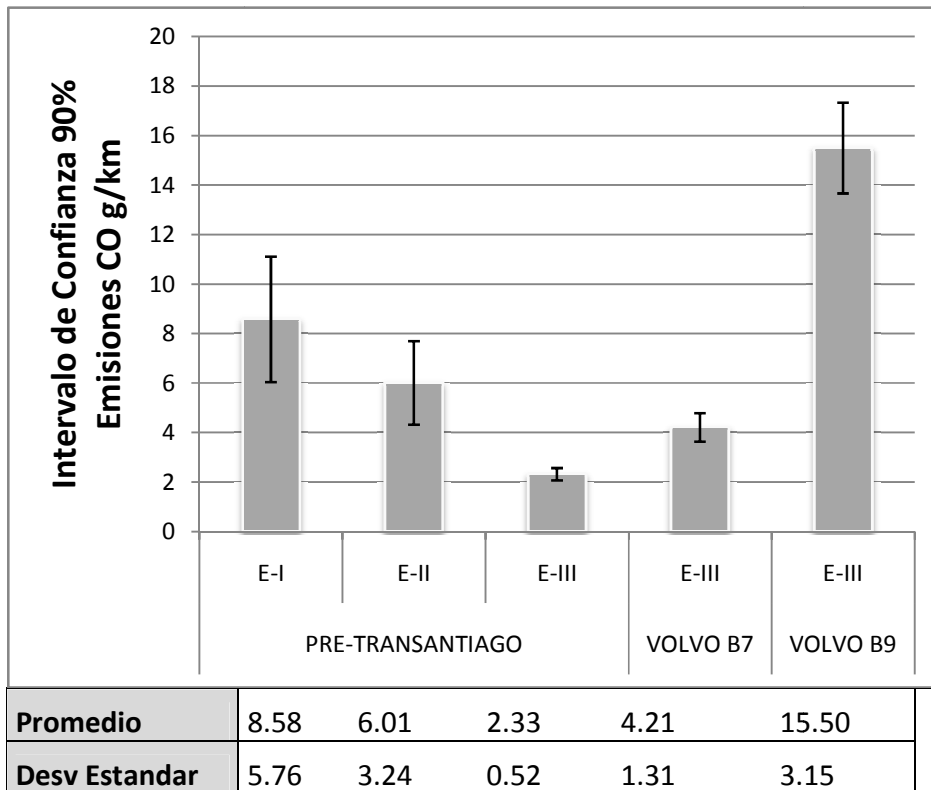


Figura 4-10: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO

Para CO se tiene una disminución en las emisiones entre Euro I y Euro III (Volvo B7) del 51%, en tanto que el caso de los buses Volvo B9, las emisiones presentan un aumento de aproximadamente 45%. Respecto de las desviaciones estándar, se aprecia una gran dispersión para los buses Euro I y Euro II en tanto que los buses Euro III muestran una dispersión de 31% respecto de la media. Al revisar las emisiones obtenidas caso a caso, se comprueba la dispersión en los datos experimentales.

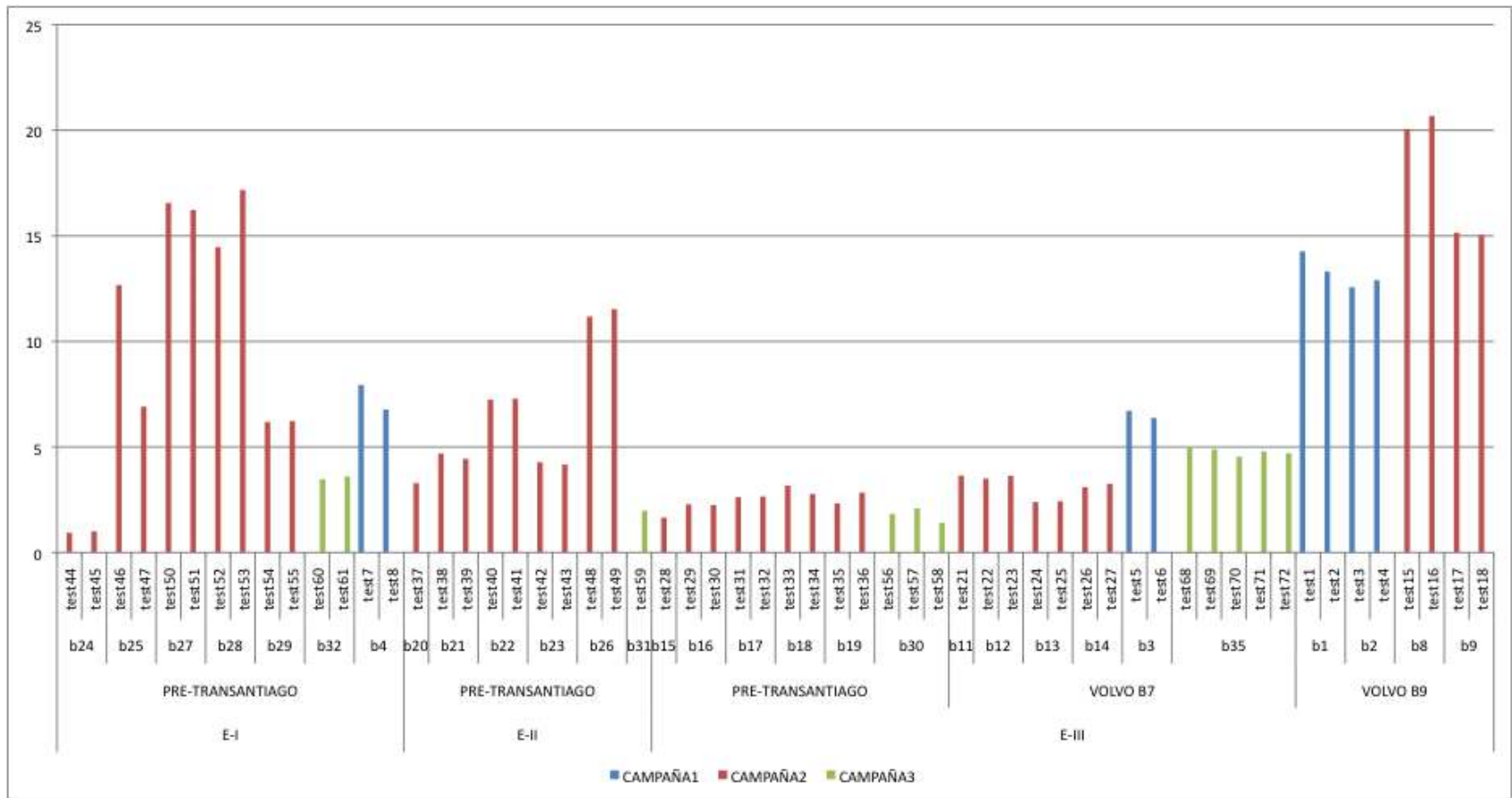


Figura 4-11: Resultados detallados por test, CO



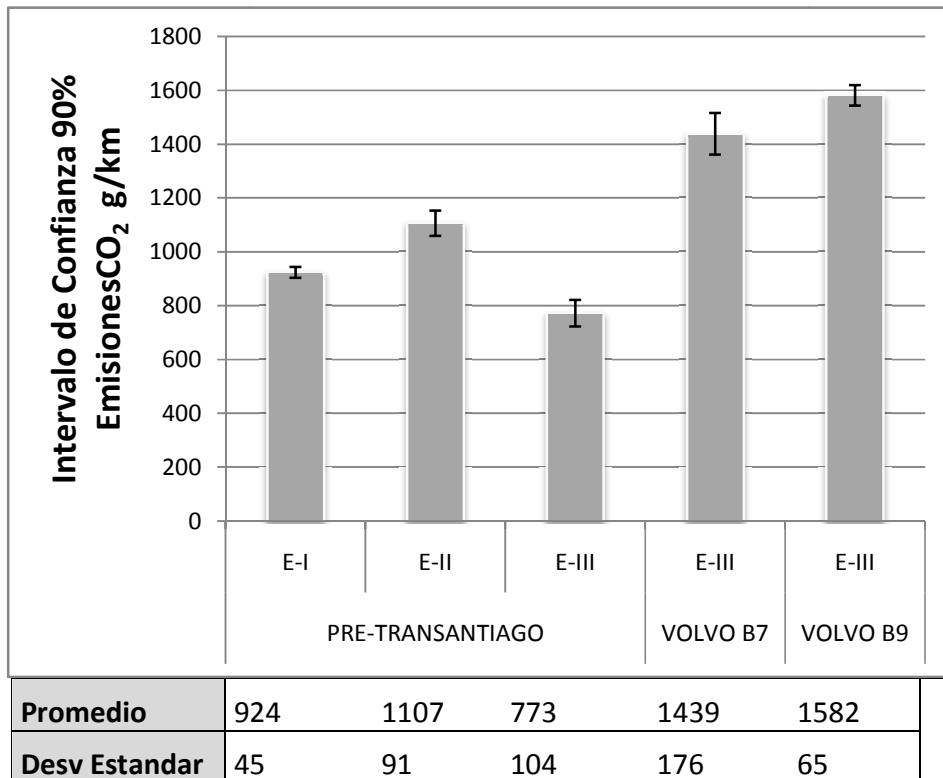


Figura 4-12: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO<sub>2</sub>

Hay que recordar que las emisiones de CO<sub>2</sub> son directamente proporcionales a la medida del consumo de combustible. Experimentalmente se tienen, para las emisiones de CO<sub>2</sub>, diferencias atribuibles a los distintos tamaños de motor involucrados. Al observar las desviaciones estándar y los resultados obtenidos prueba por prueba, se tiene una baja dispersión de los valores experimentales.

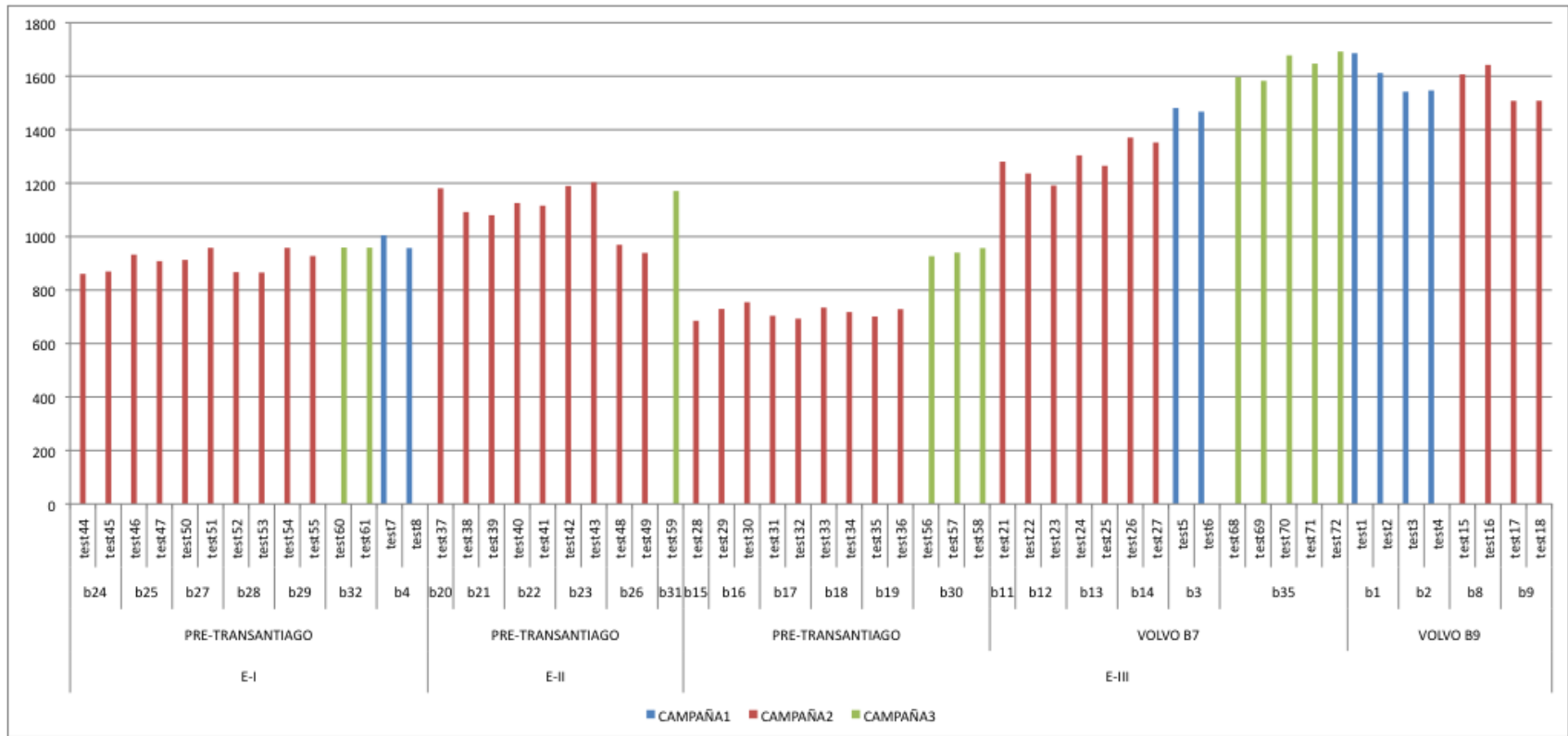


Figura 4-13: Resultados detallados por test, CO<sub>2</sub>

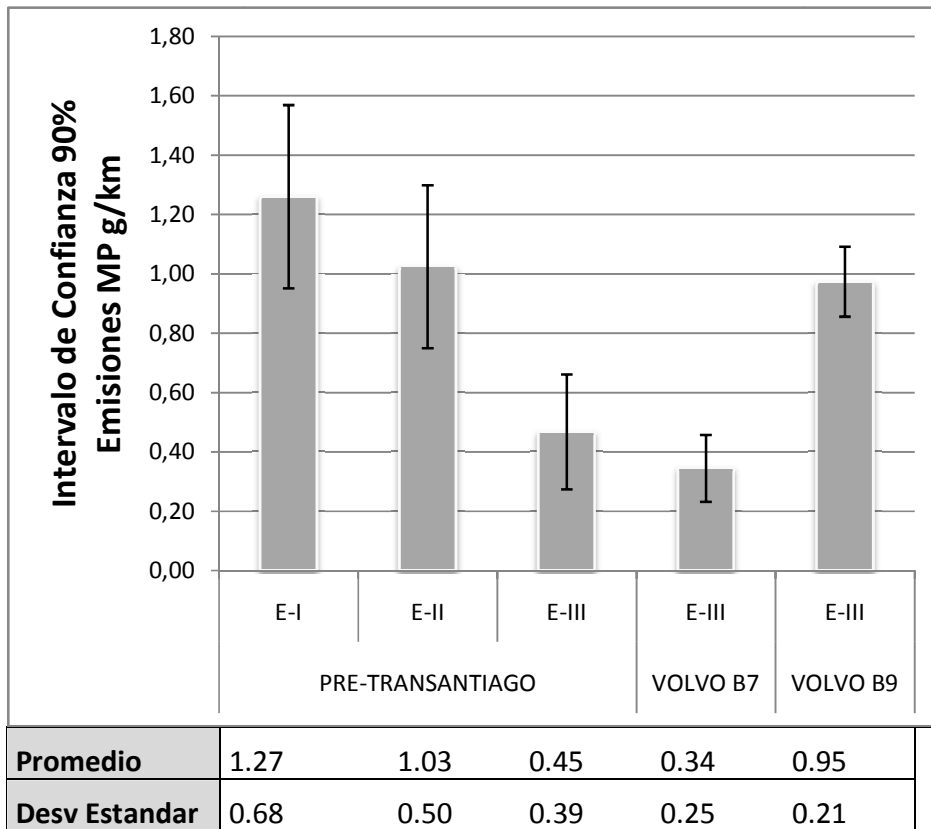


Figura 4-14: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, MP

Respecto de las emisiones promedio de material particulado, se tiene una disminución consistente entre las diferentes tecnologías. La diferencia porcentual en emisiones entre los buses Euro I y Euro II en torno a 19%, en tanto que la disminución relativa entre las tecnologías Euro II y Euro III probadas en el presente estudio está entre 67% para los buses Transantiago Rígidos y 7% para los buses Transantiago Articulados. Los buses Pre-transantiago Euro III presentan una disminución cercana al 56%, respecto del mismo estandar, pero que cumple la norma Euro II.

Al revisar los resultados prueba a prueba, se observa una gran dispersión para los buses norma Euro I (56% respecto de la media obtenida). En cuanto a las desviaciones estandar para la tecnología Euro II, se tiene que ésta representa un 79% de la media para esta categoría; esto es esperable dado la antigüedad de estas flotas. Para la tecnología Euro III Pre-transantiago, esta desviación es mayor alcanzando el 87% respecto de la media, sin embargo esto se explica por los niveles de emisión alcanzados por el bus "b30", que distorsiona la media.

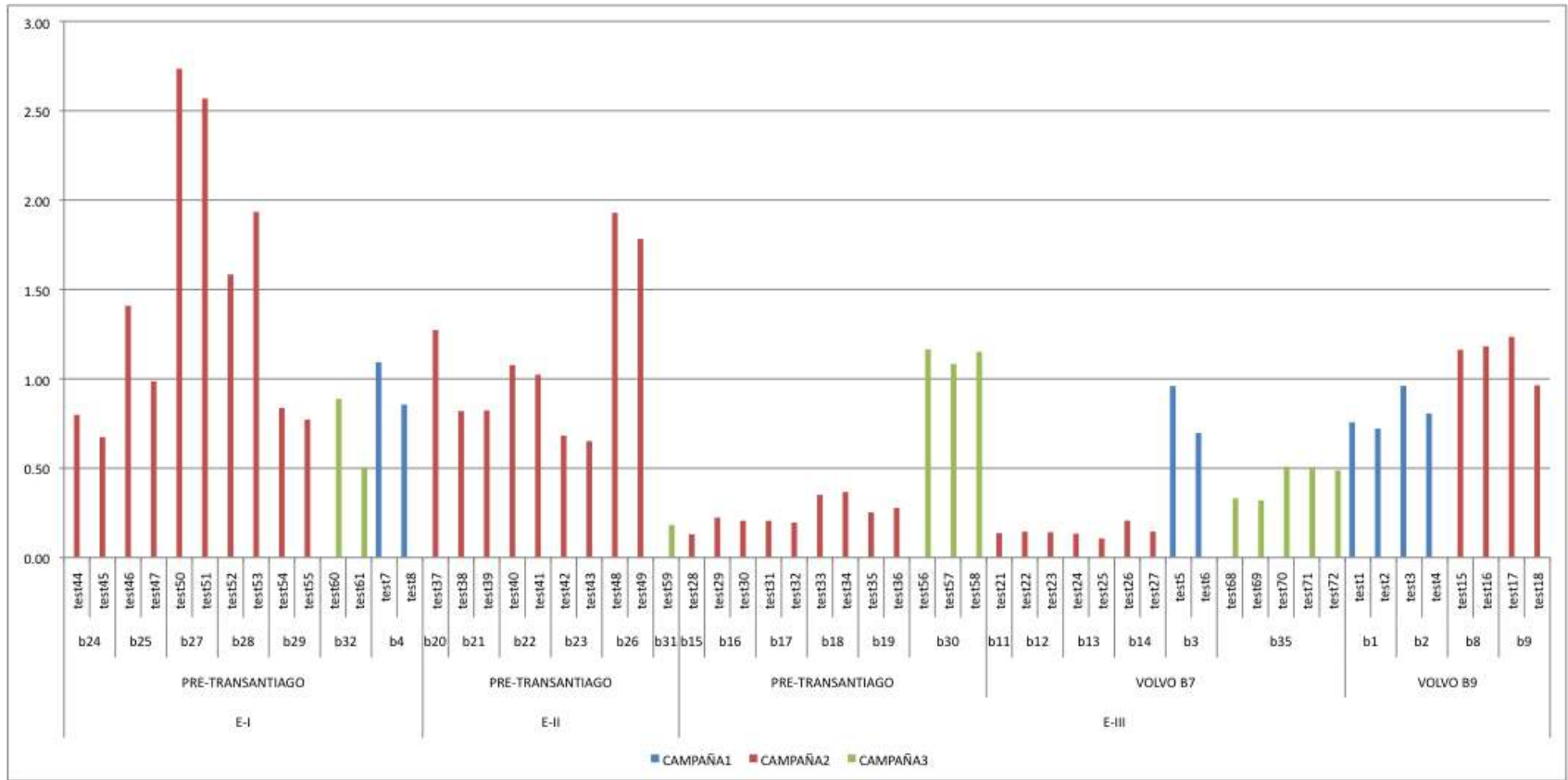


Figura 4-15: Resultados detallados por test, MP

### 4.3.2 Buses con filtro de partículas

En las figuras siguientes, se muestran gráficamente los resultados obtenidos para la subcategoría de buses que disponen de post-tratamiento para los productos de la combustión. Los cuadros tienen la misma escala que los casos sin filtro para facilitar la comparación entre ambos casos.

En general la tecnología busca hacerse cargo de las emisiones de MP, y en casos particulares, los filtros presentan una externalidad positiva reduciendo las emisiones de CO y HC. A continuación se resumen las tecnologías de post tratamiento ensayadas. Cabe señalar que la tecnología de filtros de partículas presentes en los buses sometidos a ensayo corresponde al sistema CRT®.

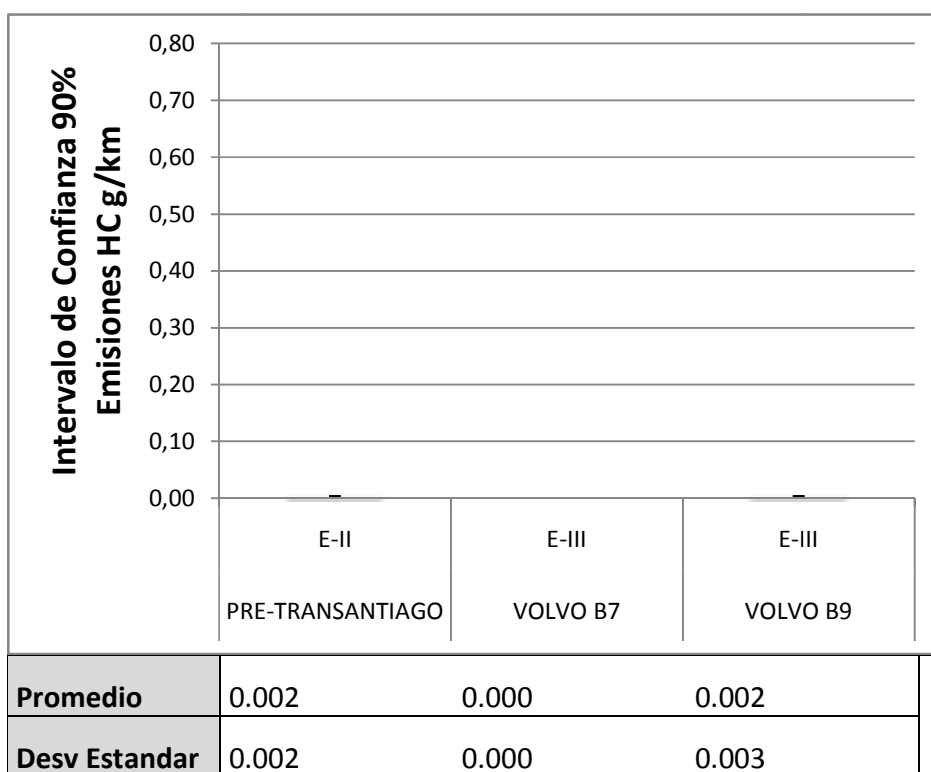


Figura 4-16: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, HC

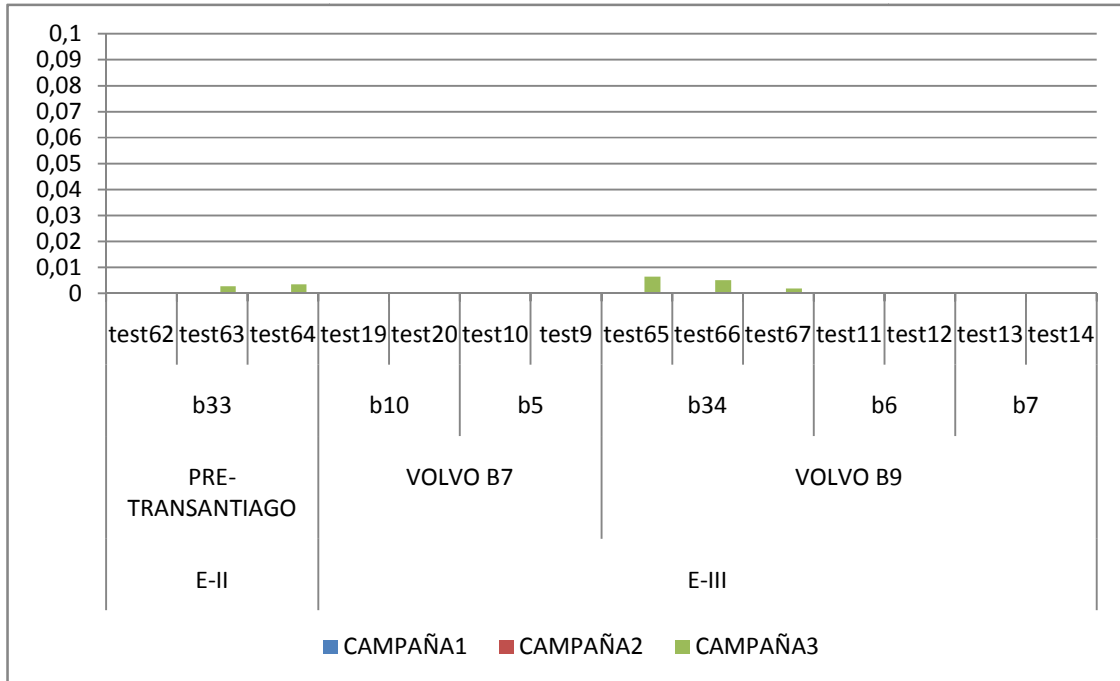


Figura 4-17: Resultados detallados por test, HC

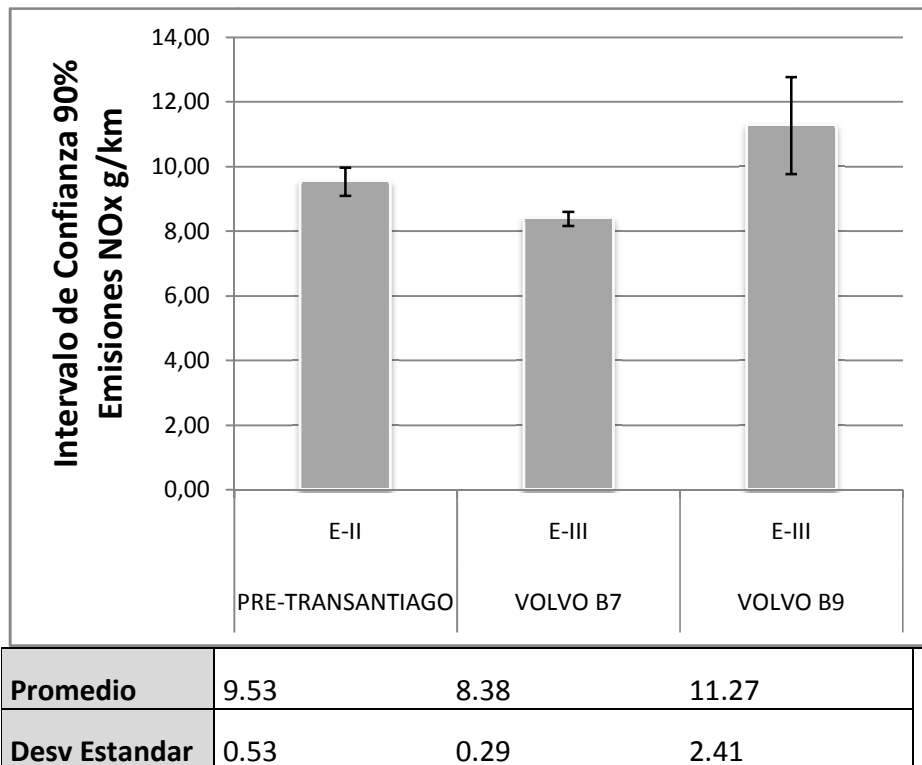


Figura 4-18: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, NOx

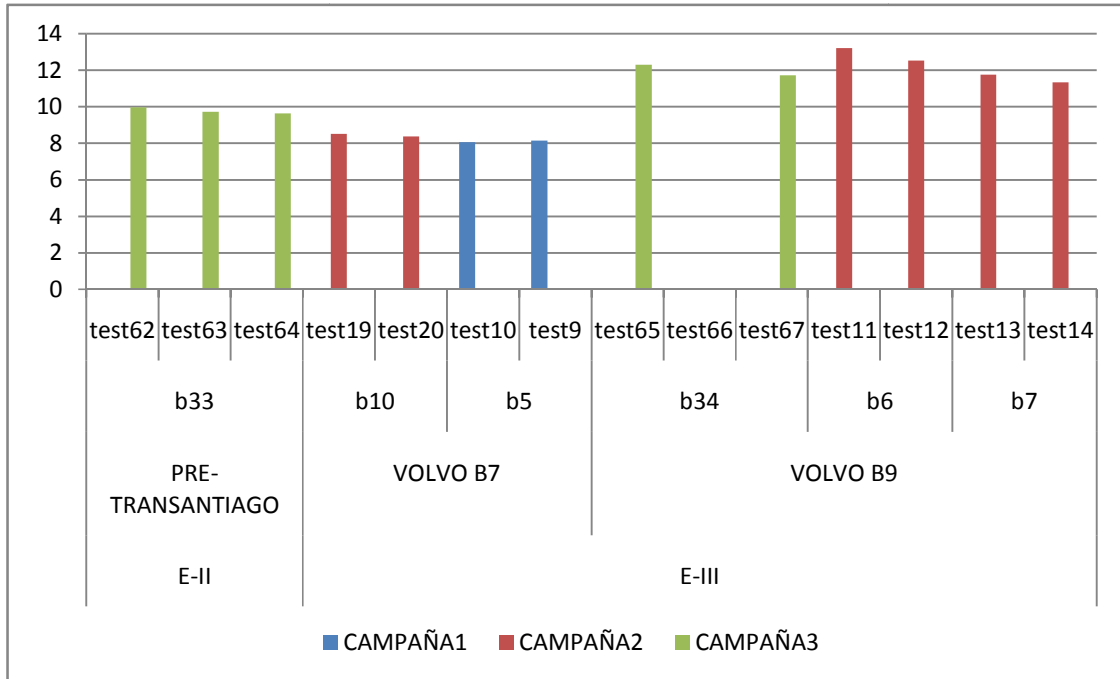


Figura 4-19: Resultados detallados por test, NO<sub>x</sub>

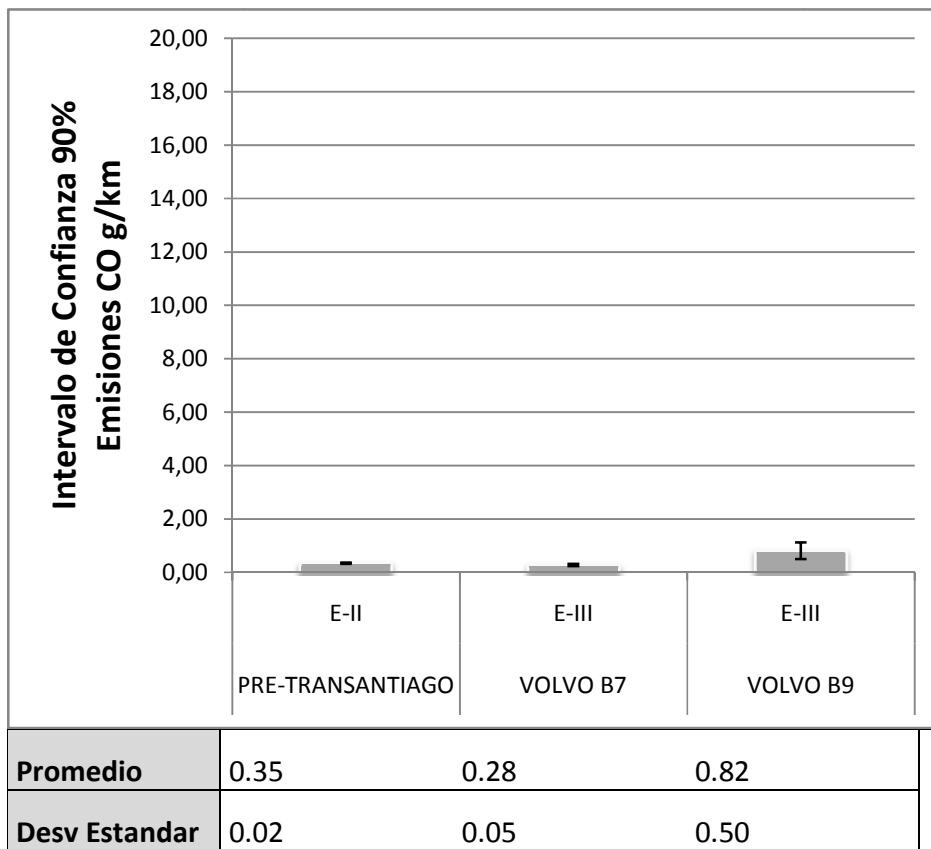
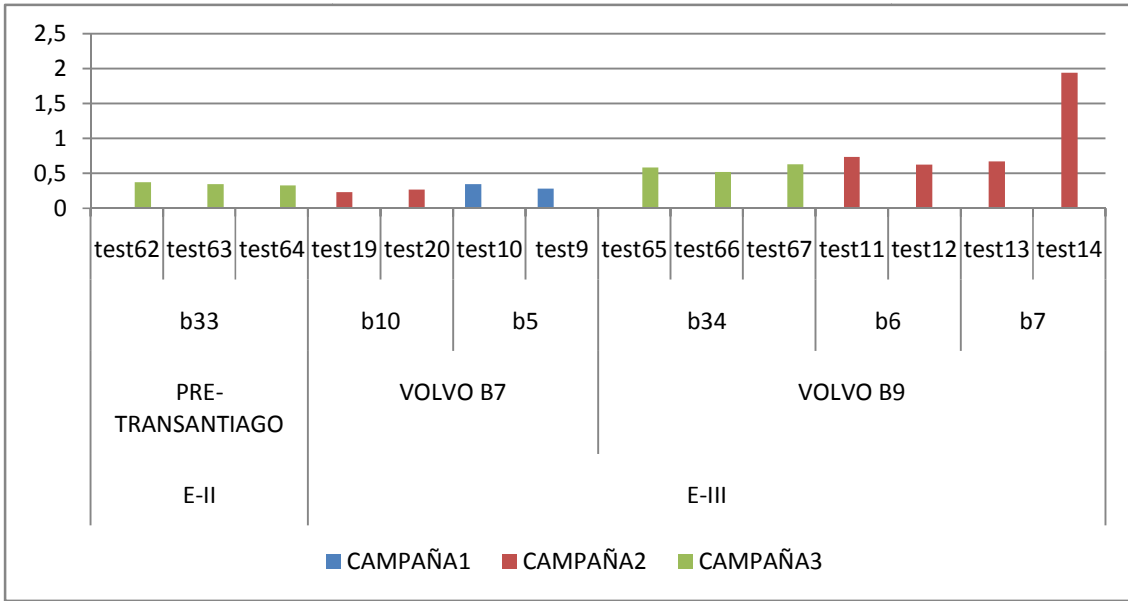


Figura 4-20: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO



Nota: el valor "test14" fue eliminado en el promedio general presentado en la figura anterior

Figura 4-21: Resultados detallados por test, CO

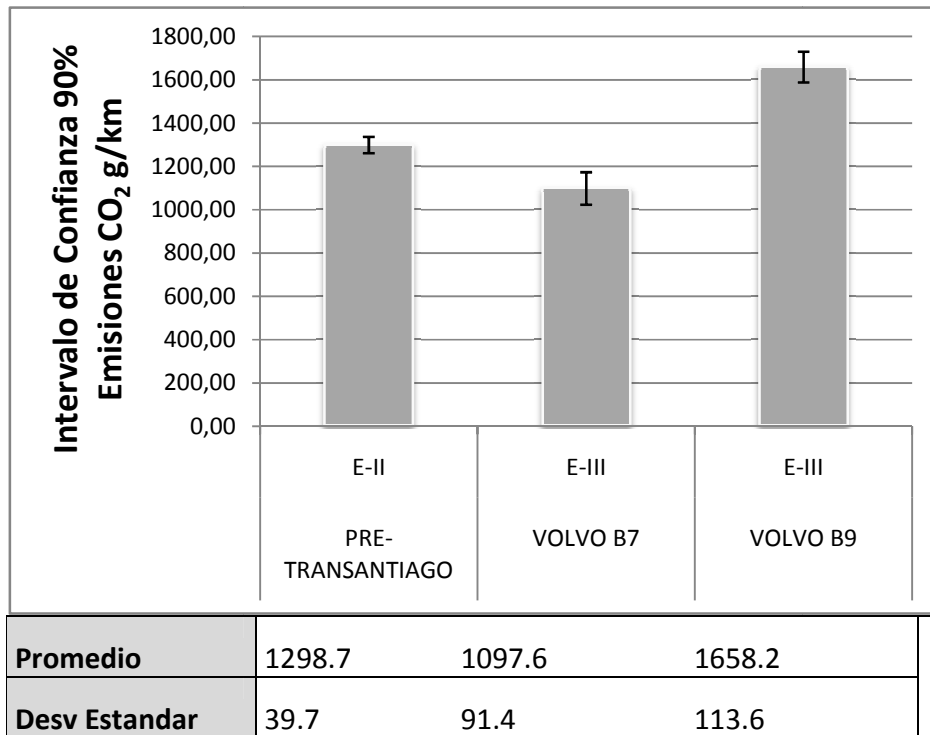


Figura 4-22: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, CO<sub>2</sub>



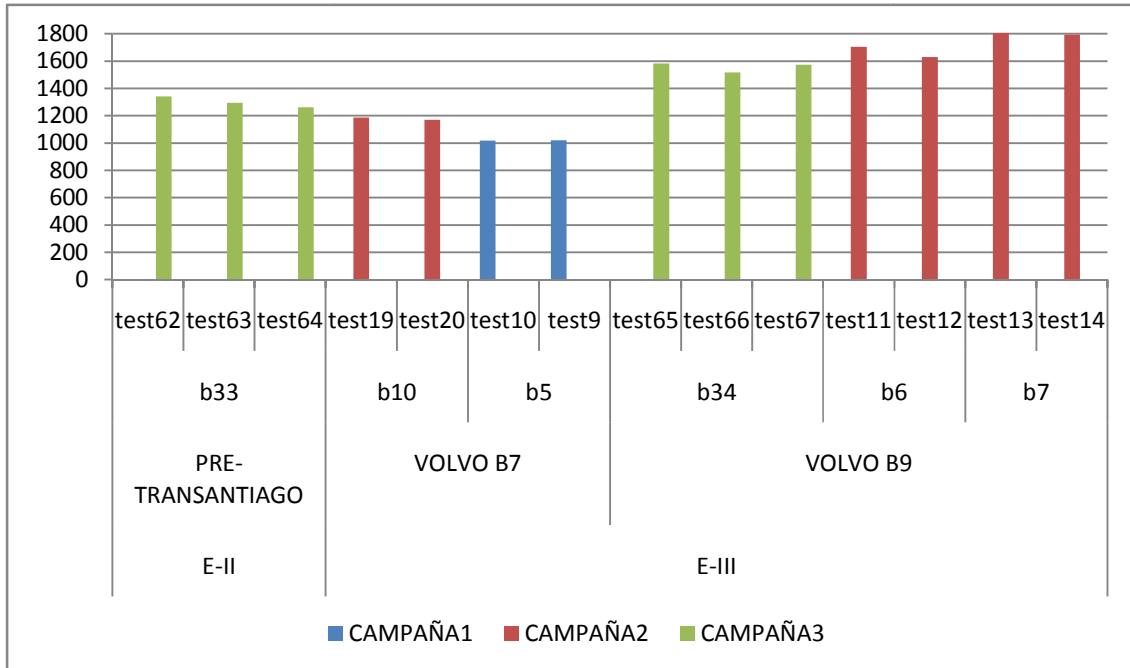


Figura 4-23: Resultados detallados por test, CO<sub>2</sub>

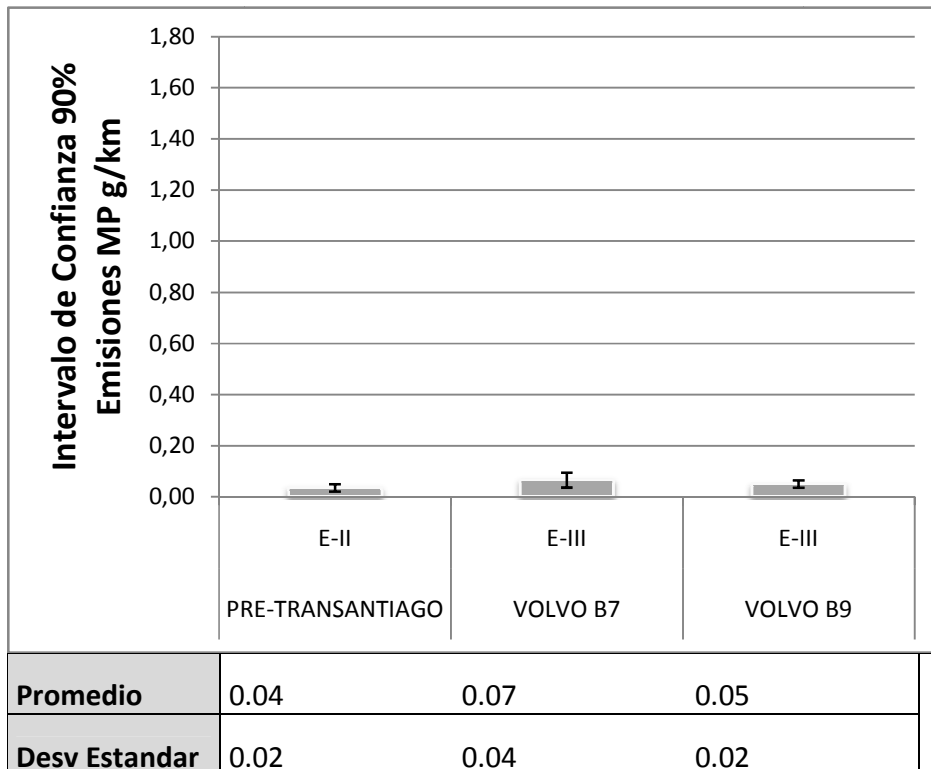


Figura 4-24: Resultados promedio por tipo de bus y norma de emisión, MP

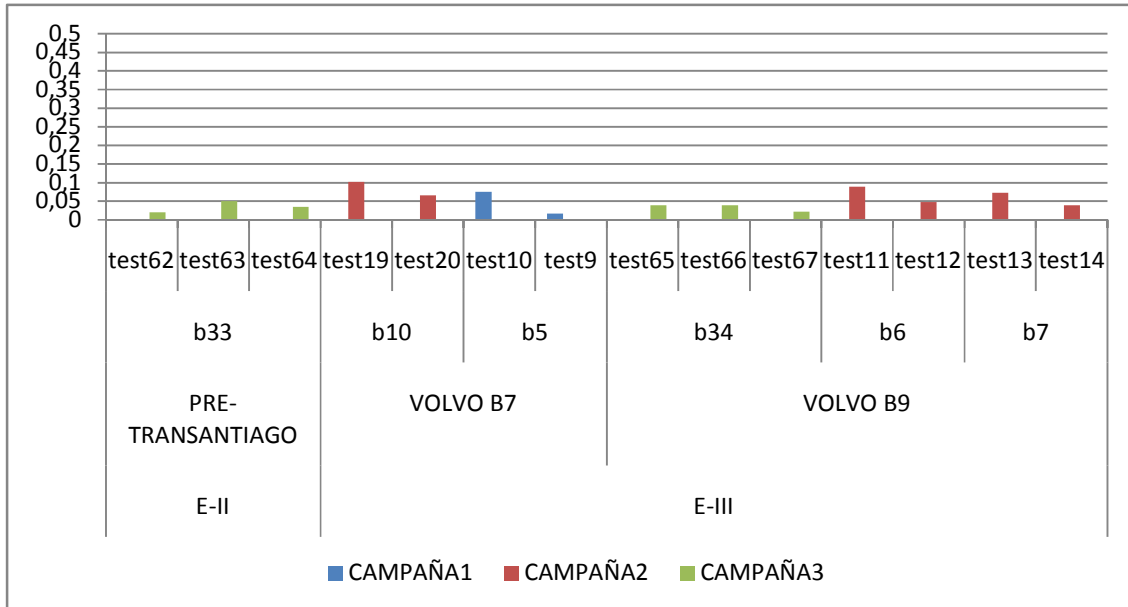


Figura 4-25: Resultados detallados por test, MP

En general, en el caso de los buses con filtro de partículas, se aprecia una disminución en las emisiones de MP, HC y CO, con una muy baja dispersión de los resultados individuales, aunque la muestra por sub categoría es pequeña.

En las figuras siguientes, se muestra la comparación entre un buses con filtros de partícula (C/F), versus aquellos que no presentan este mecanismo de post tratamiento (S/F). Como es de esperar, se observan reducciones promedio importantes en HC, CO y MP de 99,4%, 94,1% y 90,9% respectivamente.

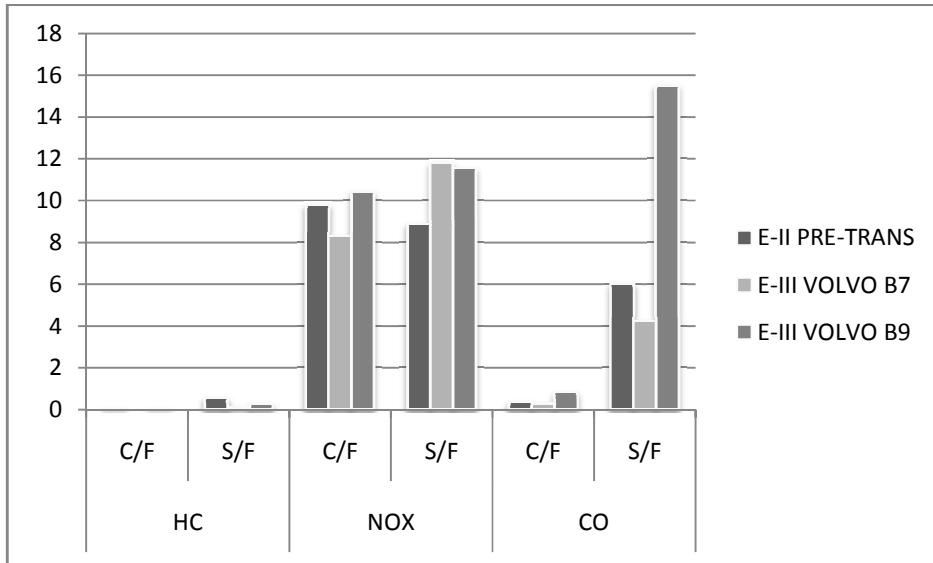


Figura 4-26: Comparación entre emisiones de buses C/F y S/F, HC, NOx y CO [g/km]

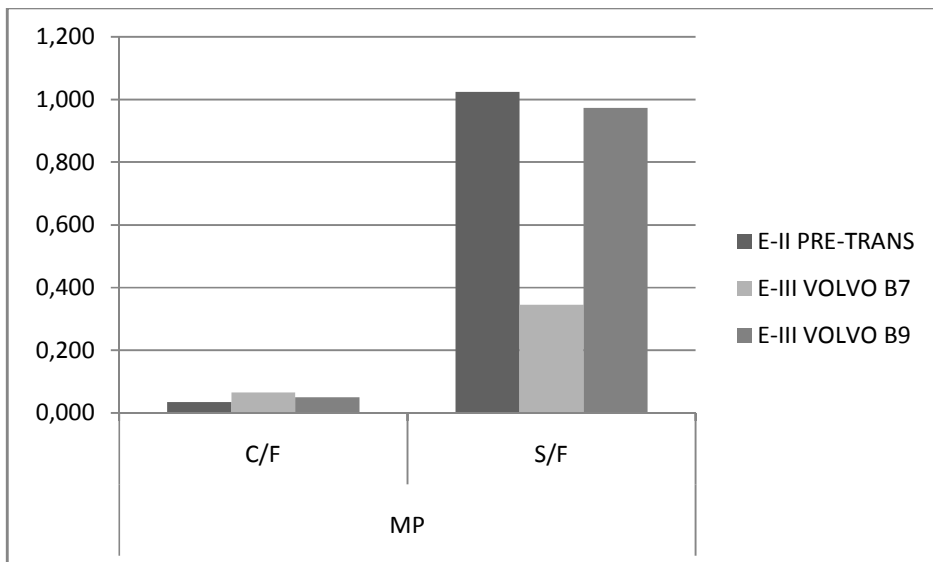


Figura 4-27: Comparación entre emisiones de buses C/F y S/F, MP [g/km]

Tabla 4-6: Reducciones porcentuales entre tecnologías

Norma	Categoría	HC	CO	MP
E-II	PRE-TRANS	99,6%	94,2%	96,6%
E-III	VOLVO B7	s/i	93,3%	81,1%
E-III	VOLVO B9	99,2%	94,7%	94,9%
Promedios		99,4%	94,1%	90,9%

### 4.3.3 Curvas de emisión para buses

A continuación se presentan las curvas de emisión obtenidas para esta categoría, expresada como una curva potencial de la forma  $E = a \cdot V^b$ . Los coeficientes de correlación son buenos, siendo todos mayores a 0,9.

Las expresiones presentadas tienen validas entre los 20 y 35 km/h a menos que se indique lo contrario.

Tabla 4-7: Expresiones para niveles de emisión en función de la velocidad, buses del transporte público sin filtro de partículas.

Expresión general: $E = a \cdot V^b$					
Norma	Coefficientes	HC	NOx	CO	MP
E-I	a	2.782	31.92	29.13	1.966
	b	-0.54	-0.38	-0.38	-0.09
	r2	0.997	0.994	0.994	0.988
E-II	a	8.63	43.21	21.18	1.953
	b	-0.86	-0.49	-0.39	-0.17
	r2	0.999	0.996	0.995	0.992
E-III	a	22.15	39.22	87.09	1.625
	b	-1.38	-0.55	-1.08	-0.56
	r2	0.99	0.978	0.986	0.979
VOLVO B7	a	0.575	73.46	68.4	0.575
	b	-0.62	-0.58	-0.88	-0.21
	r2	0.901	0.999	0.989	0.997
VOLVO B9	a	1.369	64.42	124.1	3.437
	b	-0.56	-0.55	-0.66	-0.4
	r2	0.998	0.998	0.999	0.996

## 5 COMPARACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN

El presente capítulo pretende entregar un análisis global respecto de los resultados comparándolos con los factores de emisión actualmente utilizados en Chile, basados en la tercera versión de COPERT, además de establecer un paralelo con la última actualización de los valores internacionales que les dan origen, presentada por la cuarta versión del ya mencionado método europeo.

Para este efecto, se detalla una comparación para cada uno de los valores promedio por categoría vehicular, de los valores actualmente utilizados por CONAMA provenientes de COPERT III, los valores publicados por la cuarta actualización de la citada fuente, COPERT IV, y los obtenidos experimentalmente en los estudios realizados para la Región Metropolitana de Santiago, ya descritos. Como resultado de la comparación, se proponen modificaciones a los factores de emisión originales.

COPERT define un índice de la calidad estadística de los datos que respaldan las curvas de emisión que entrega, designado por letras como se muestra en la Tabla 5-1. A continuación se realiza un paralelo para las curvas presentadas en el presente trabajo, asignándole el índice correspondiente a cada categoría testeada.

Tabla 5-1: Índices de calidad estadística definidos por COPERT

A :	Factores de emisión con base estadística significativa sobre una gran base de datos medida y evaluada
B :	Factores de emisión con una base estadística no significativa, sobre un arreglo pequeño de datos medidos y re-evaluados
C :	Factores de emisión, estimados en base a la literatura disponible
D :	Factores de emisión estimados aplicando consideraciones de similitud y/o extrapolación

Como ya se señaló, COPERT tiene para la categoría de vehículos livianos y medianos una muy buena base estadística para aquellas más antiguas, es decir Sin norma y Euro I. Sin embargo, las tecnologías posteriores a Euro I presentan ecuaciones que son producto de extrapolaciones en base a las reducciones teóricas que se exige a las normas Euro III y Euro IV. Para el resto de las categorías, no fue posible determinar los respaldos estadísticos correspondientes.

Tabla 5-2: Calidad estadística de las curvas de emisión

Categoría	Norma	Respaldo Estadístico	
		COPERT IV	DIMEC
Vehículos Livianos y medianos de pasajeros a Gasolina	S/Catalítico	A	B (10)
	Euro I	A	B (10)
	Euro III	D	B (10)
Vehículos Livianos y medianos de pasajeros a Diesel	Euro I	A	B (9)
	Euro III	D	B (5)
	Euro IV	D	B (3)
Vehículos Livianos y medianos comerciales a Gasolina	S/Catalítico	A	B (10)
	Euro I	A	B (10)
	Euro III	D	B (10)
Vehículos Livianos y medianos comerciales a Diesel	Euro I	A	B (9)
	Euro III	D	B (9)
	Euro IV	D	B (5)
Camiones Livianos	Convencional	S/I	B (2)
	Euro I	S/I	B (2)
	Euro II	S/I	B (3)
	Euro III	S/I	B (3)
Camiones Medianos	Convencional	S/I	B (2)
	Euro I	S/I	B (4)
	Euro II	S/I	B (3)
	Euro III	S/I	B (2)
Camiones Pesados	Convencional	S/I	B (3)
	Euro I	S/I	B (8)
	Euro II	S/I	B (3)
	Euro III	S/I	B (3)
Buses Pre-Transantiago	Euro I	S/I	B (6)
	Euro II	S/I	B (7)
	Euro III	S/I	B (6)
Buses Transantiago	Rig.-Euro III	S/I	B (7)
	Art.-Euro III	S/I	B (7)

Nota: los números entre paréntesis muestra el tamaño muestral por cada categoría.

Para la comparación entre los distintos factores disponibles, tanto de la literatura (COPERT III y IV), como los experimentales, se define fijar la velocidad media de operación, según la flota de vehículos a analizar. Para vehículos livianos y medianos se utilizará 30 km/h, en tanto que para buses y camiones, la velocidad seleccionada será de 20 km/h y 25

km/h, respectivamente, todas en concordancia con valores habituales obtenidos para los ciclos de conducción para Santiago<sup>4</sup>.

### **5.1 Vehículos livianos y medianos**

A continuación se presenta el análisis para la categoría de vehículos livianos y medianos. En primer lugar se presenta la comparación entre el método actual COPERT III y la actualización internacional del mismo, COPERT IV, considerando el primero como referencia.

Posteriormente, se procede a evaluar las emisiones en dicha velocidad, y comparar los valores considerando dos datos como referencia. En primera instancia, las tasas de emisión actuales para factores de emisión (MODEM/COPERT III), y en segunda instancia COPERT IV. Si los resultados experimentales arrojan un valor idéntico al de la referencia, entonces el valor presentado será igual a un 100%, en tanto que, de observarse una cantidad menor, se observa un valor entre 0 y 99%. Cuando el registro experimental sea superior a la referencia, el valor presentado será mayor que 100%.

Para facilitar el análisis del conjunto de datos, ellos se presentan con flechas de color que buscan graficar el grado de separación entre los valores experimentales, y las referencias de la literatura. Este esquema se utilizará a lo largo toda la presente sección.

#### **5.1.1 COPERT III V/S COPERT IV**

En las tablas siguientes se muestran las diferencias que presenta la actualización de COPERT, respecto a los valores usados a la fecha para el cálculo de inventarios de emisión, según el tipo de flota en estudio.

Para el caso de los vehículos livianos y medianos particulares, vemos que la actualización de COPERT presenta alzas en los factores de emisión para HC y CO, asociados a las tecnologías más antiguas (Sin norma y Euro 1), en tanto que, para las mismas categorías, el factor de emisión para el NOx presenta una disminución cercana al 30%. Para los

---

<sup>4</sup> Los ciclos de conducción obtenidos en estudios anteriores presentan velocidades medias de 28.5 km/hr para los vehículos livianos y medianos. Para los camiones los valores son 28, 25 y 29 para camiones livianos, medianos y pesados respectivamente, en tanto que el estudio de buses muestra ciclos de conducción con un valor promedio de 21.83 km/hr. Por razones de simplicidad, el presente estudio aproxima estas velocidades a los valores señalados.

vehículos más nuevos, Euro III, todas las tasas de emisión son menores, presentando bajas de hasta un 60% en el caso del CO.

Tabla 5-3: Comparación Copert IV / Copert III para Vehículos de Pasajeros

Copert IV/ Copert III @30km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
PARTICULAR	GASOLINA	S/N	↑ 166%	→ 75%	→ 118%	N/A
		E-I	↑ 151%	↓ 68%	↑ 131%	N/A
		E-III	→ 81%	→ 74%	↓ 39%	N/A
	DIESEL	E-I	N/A	N/A	N/A	N/A
		E-III	N/A	N/A	N/A	N/A
		E-IV	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 5-4: Comparación Copert IV / Copert III para Vehículos Comerciales

Copert IV/ Copert III @30km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
COMERCIAL	GASOLINA	S/N	→ 100%	→ 100%	→ 100%	N/A
		E-I	→ 100%	→ 100%	→ 100%	N/A
		E-III	→ 100%	→ 100%	→ 100%	N/A
	DIESEL	E-I	→ 100%	→ 100%	→ 100%	→ 100%
		E-III	→ 100%	→ 104%	→ 100%	→ 100%
		E-IV	N/A	N/A	N/A	N/A

### 5.1.2 Comparación para factores experimentales

A continuación se comparan los resultados experimentales de los estudios comprendidos en el presente estudio y los valores de referencia. Para ello, es necesario establecer que los vehículos a gasolina no presentan valores experimentales para el MP, debido a que la precisión de los equipos disponibles no tienen la sensibilidad adecuada para el nivel de emisiones esperado. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los valores utilizados por MODEM (CONAMA, 2002), no presentan tasas de emisión para los vehículos particulares diesel.

#### 5.1.2.1 Vehículos de pasajeros

Las tablas siguientes muestran las comparaciones correspondientes a los vehículos livianos. En la Tabla 5-5 se aprecia que los valores experimentales presentan diferencias mayores al 100% en casi todos los casos analizados, salvo los casos de la categoría sin norma para NO<sub>x</sub>,



donde la diferencia es de 40% a la baja y la tasa de emisión de los vehículos gasolina Euro 3, donde la diferencia es marginal (2%).

Tabla 5-5: Comparación de resultados experimentales / Copert III para Vehículos de Pasajeros

Datos Exp./ Copert III @30km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
PARTICULAR	GASOLINA	S/N	↑ 233%	↓ 54%	↑ 172%	N/A
		E-I	↑ 852%	↑ 220%	↑ 1280%	N/A
		E-III	↑ 653%	↑ 305%	→ 102%	N/A
	DIESEL	E-I	N/A	N/A	N/A	N/A
		E-III	N/A	N/A	N/A	N/A
		E-IV	N/A	N/A	N/A	N/A

Al comparar los valores experimentales con COPERT IV, se tiene una disminución en las diferencias para los vehículos a gasolina Euro I y sin norma, siendo más significativa para el segundo grupo (con un máximo de un 46% hacia arriba). Para los vehículos Euro I se observa acercamiento para el valor de HC y CO, en tanto que la diferencia aumenta para NO<sub>x</sub>. En el caso del mismo tipo de vehículo, pero de tecnología Euro III, se tiene un aumento en la brecha entre los valores experimentales y los entregados por la referencia internacional. En este aspecto, la peor representación es aquella asociada al HC, donde el valor experimental es 8 veces el de referencia, en segundo lugar se muestra el resultado obtenido para la emisión de NO<sub>x</sub>.

En el caso de los vehículos Particulares Diesel, el comportamiento general de los valores experimentales presenta diferencias razonables, donde en los peores casos el valor de referencia para CO es duplicado para la categoría Euro IV o, en el caso del PM para la misma categoría, es la mitad de lo reportado por COPERT IV.

Tabla 5-6: Comparación de resultados experimentales / Copert IV para Vehículos de Pasajeros

Datos Exp./ Copert IV @30km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
PARTICULAR	GASOLINA	S/N	↑ 140%	→ 72%	↑ 146%	N/A
		E-I	↑ 563%	↑ 326%	↑ 981%	N/A
		E-III	↑ 810%	↑ 416%	↑ 262%	N/A
	DIESEL	E-I	→ 113%	↑ 144%	→ 70%	→ 86%
		E-III	→ 80%	↑ 151%	↑ 184%	↑ 158%
		E-IV	→ 129%	→ 70%	↑ 200%	↓ 48%

### 5.1.2.2 Vehículos Comerciales

Como ya se vio, la diferencia entre COPERT III y COPERT IV se presenta en un 4% para NO<sub>x</sub> en la categoría Euro Diesel. Recordando esto, sólo vale la pena poner atención en la Tabla 5-8 donde se aprecian diferencias de significancia moderada (hasta un factor 2.5 en el HC) para la categoría de vehículos a gasolina, la que es atribuible a los errores experimentales y a la dispersión de los valores entregados por COPERT. En el caso de los vehículos comerciales diesel, se observa en la misma tabla un comportamiento similar, ahora con subestimaciones que llegan en el peor de los casos a un 70% a la baja (HC para la subcategoría Euro III).

Tabla 5-7: Comparación de resultados experimentales / Copert III para Vehículos Comerciales

Datos Exp./ Copert III @30km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
COMERCIAL	GASOLINA	S/N	↑ 197%	→ 95%	↑ 159%	N/A
		E-I	↑ 247%	↑ 194%	↑ 148%	N/A
		E-III	↑ 179%	→ 125%	↓ 45%	N/A
	DIESEL	E-I	↓ 83%	→ 118%	↑ 182%	↓ 69%
		E-III	↓ 28%	↑ 131%	→ 85%	→ 109%
		E-IV	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 5-8: Comparación de resultados experimentales / Copert IV para Vehículos Comerciales

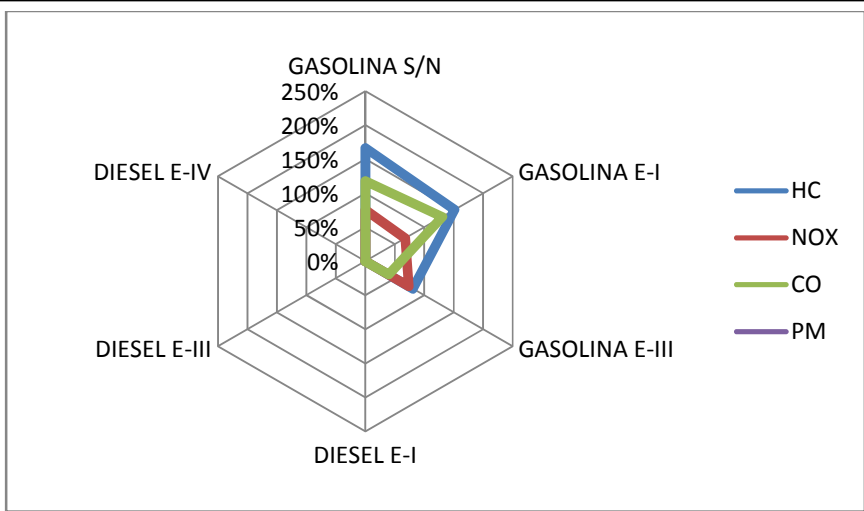
Datos Exp./ Copert IV @30km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
COMERCIAL	GASOLINA	S/N	↑ 197%	→ 95%	↑ 159%	N/A
		E-I	↑ 247%	↑ 194%	↑ 148%	N/A
		E-III	↑ 179%	→ 125%	↓ 45%	N/A
	DIESEL	E-I	↓ 83%	→ 118%	↑ 182%	↓ 69%
		E-III	↓ 28%	→ 126%	→ 85%	→ 109%
		E-IV	↓ 40%	↑ 160%	↓ 70%	→ 128%

A modo de resumen se presentan a continuación un arreglo de gráficos radiales que dan cuenta de la razón entre los factores de emisión actualmente utilizados, y las nuevas tasas de emisión disponibles (COPERT IV y experimentales). La situación en que los datos son iguales a la referencia, el radio será igual a 100%, en tanto que un radio mayor a este, significa una sobre estimación respecto de la referencia, y consecuentemente, un radio menor representa una subestimación.

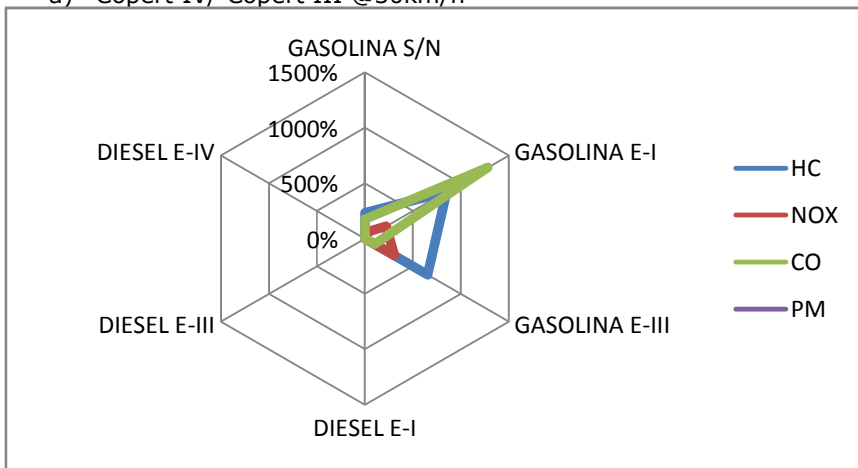
Este tipo de gráfico permite observar todo el espectro de referencias entre los resultados experimentales, los factores de emisión actualmente utilizados por MODEM y la última actualización de la referencia internacional para estos.

El análisis gráfico muestra para los vehículos de pasajeros que el modelo COPERT al año 2007, no presenta variaciones significativas respecto de la versión que da origen a los factores de emisión utilizados por CONAMA. Consecuentemente, para ambas versiones del modelo, los datos experimentales entregan diferencias sustanciales a las estimaciones del modelo, subestimando de manera importante las emisiones de HC y CO.

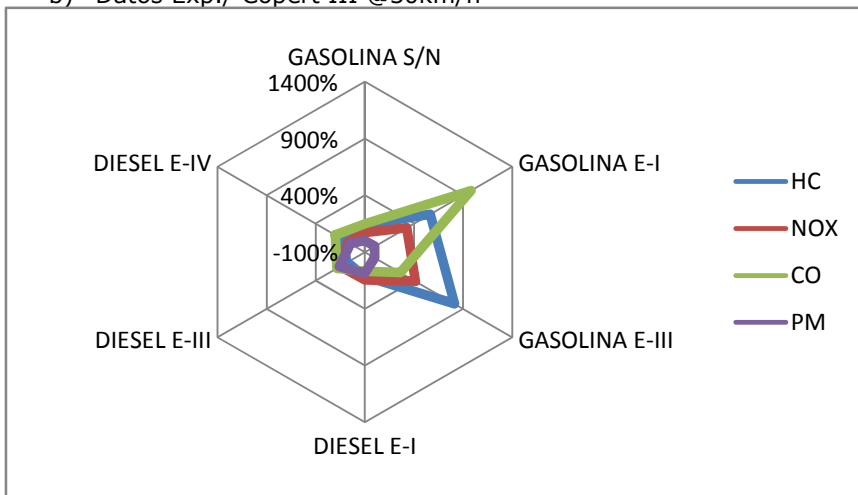
Para los vehículos comerciales, tanto COPERT III como COPERT IV presentan variaciones dentro de la dispersión esperada, siendo la categoría de vehículos comerciales a gasolina la que presenta las diferencias más importantes entre los niveles de emisión predichos por el modelo y los registrados experimentalmente.



a) Copert IV/ Copert III @30km/h



b) Datos Exp./ Copert III @30km/h



c) Datos Exp./ Copert IV @30km/h

Figura 5-1: Comparación para Vehículos Livianos y Medianos Pasajeros

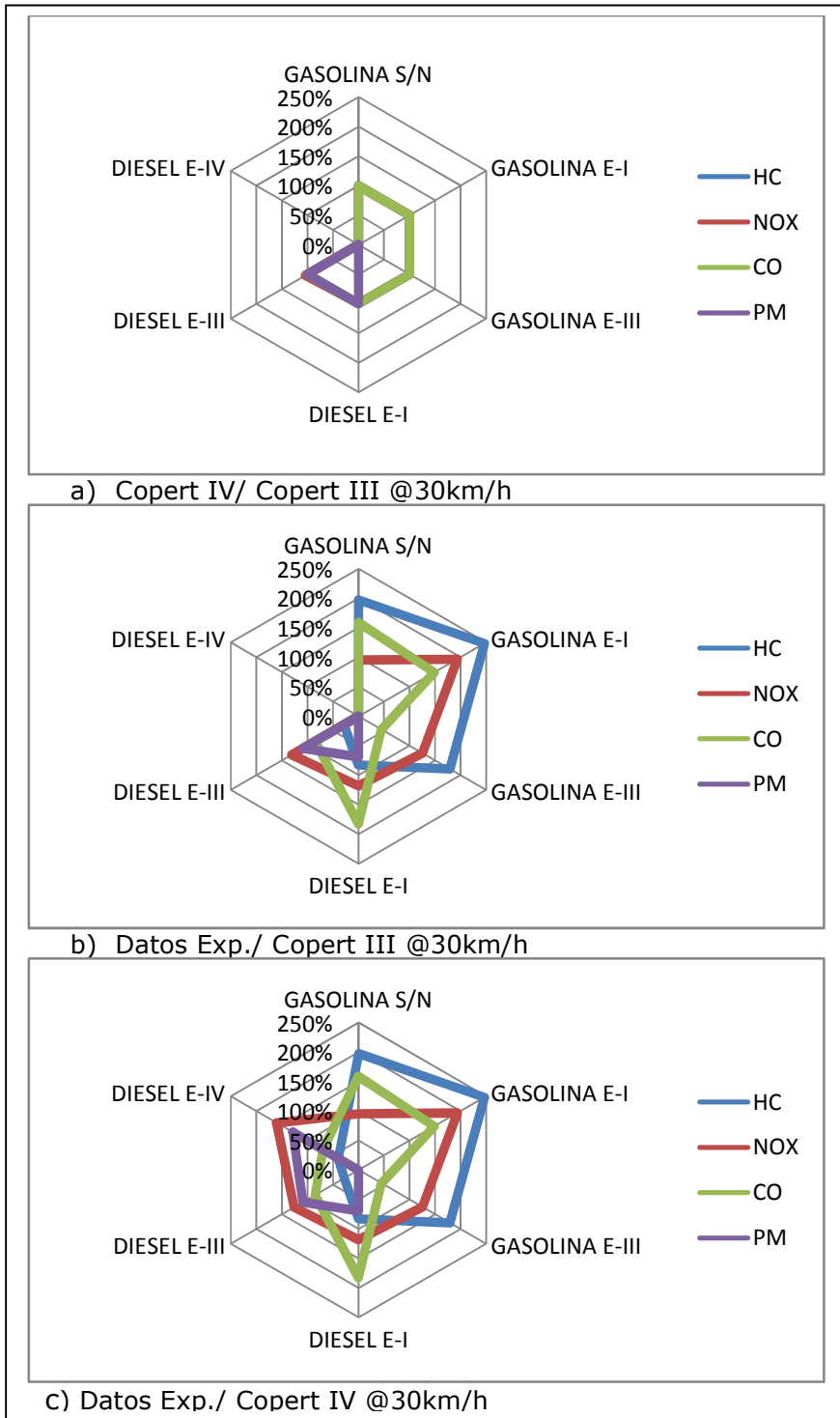


Figura 5-2: Comparación para Vehículos Livianos y Medianos Comerciales

## 5.2 Vehículos pesados de carga

Para el caso de los vehículos pesados del transporte de carga se realiza el mismo análisis presentado para los vehículos livianos y medianos, comparando los factores de Copert III, Copert IV y experimentales.

### 5.2.1 COPERT III V/S COPERT IV

Hay que recordar que, para efectos de COPERT IV, es necesario establecer la pendiente y el nivel de carga a utilizar para el cálculo de emisiones. Para el análisis presentado, se utilizan los factores de emisión para una pendiente (G) de 0% de inclinación y una carga de 50% de la carga total del vehículo (L).

En la Tabla 5-9 se muestran las diferencias entre la actualización de COPERT y los valores utilizados por MODEM (COPERT III). Allí se aprecia que para todas las subcategorías hay modificaciones en los factores de emisión, sin embargo hay un porcentaje importante a la baja respecto de los valores utilizados actualmente en MODEM, para las emisiones de HC y MP. Por ejemplo, respecto del factor de emisión para HC en camiones livianos, existen valores en COPERT IV que representan hasta un 21% de los factores de emisión presentados por COPERT III. Asimismo, se observan alzas significativas en algunas tasas de emisión para NO<sub>x</sub>.

Respecto de los factores de emisión de CO, los camiones livianos presentan una disminución en sus tasas de emisión, siendo en el peor de los casos un 47% del valor usado en MODEM. Para la categoría de camiones medianos las variaciones apuntan a sobre-estimaciones que no superan el 20% en aquellos vehículos que corresponden a las normas de emisión más antiguas, y una sub-estimación de 47% para los camiones medianos norma Euro III. Finalmente, para el caso de los camiones pesados, aquellos que no tienen norma de emisión no presentan diferencias significativas, en tanto que el resto de las categorías muestran un aumento en sus tasas de emisión que va entre 25 y 132% para las tecnologías que cumplen con las normas de emisión Euro II y Euro III, respectivamente.

Tabla 5-9: Comparación Copert IV / Copert III para Camiones

Copert IV/ Copert III @25km/hr			HC		NO <sub>x</sub>		CO		PM
CAMIONES LIVIANOS	S/N	↘	80%	↘	118%	↘	68%	↘	103%
	E-I	↘	21%	↘	117%	↘	47%	↘	62%
	E-II	↘	20%	↘	177%	↘	45%	↘	38%
	E-III	↘	25%	↘	203%	↘	81%	↘	65%
CAMIONES MEDIANOS	S/N	↘	65%	↘	128%	↘	88%	↘	59%
	E-I	↘	36%	↘	110%	↘	84%	↘	55%
	E-II	↘	24%	↘	164%	↘	82%	↘	37%
	E-III	↘	31%	↘	194%	↘	147%	↘	56%
CAMIONES PESADOS	S/N	↘	55%	↘	92%	↘	94%	↘	69%
	E-I	↘	94%	↘	118%	↘	134%	↘	83%
	E-II	↘	68%	↘	173%	↘	125%	↘	88%
	E-III	↘	88%	↘	196%	↘	232%	↘	135%

## 5.2.2 Comparación para factores experimentales

Como se hizo en el caso de los vehículos livianos y medianos, en primera instancia se comparan COPERT III versus los valores experimentales y en segundo lugar los factores presentados por COPERT IV versus los valores obtenidos en el presente estudio.

Tabla 5-10: Comparación valores experimentales / Copert III para Camiones

Datos Exp./ Copert III @25km/hr			HC		NO <sub>x</sub>		CO		PM
CAMIONES LIVIANOS	S/N	↘	40%	↘	101%	↘	60%	↘	109%
	E-I	↘	23%	↘	82%	↘	91%	↘	86%
	E-II	↘	8%	↘	113%	↘	71%	↘	198%
	E-III	↘	6%	↘	84%	↘	16%	↘	57%
CAMIONES MEDIANOS	S/N	↘	62%	↘	83%	↘	179%	↘	54%
	E-I	↘	42%	↘	98%	↘	157%	↘	63%
	E-II	↘	55%	↘	154%	↘	111%	↘	40%
	E-III	↘	35%	↘	142%	↘	102%	↘	30%
CAMIONES PESADOS	S/N	↘	68%	↘	59%	↘	64%	↘	18%
	E-I	↘	84%	↘	102%	↘	149%	↘	37%
	E-II	↘	99%	↘	137%	↘	295%	↘	73%
	E-III	↘	57%	↘	174%	↘	141%	↘	129%

La primera comparación presentada en la Tabla 5-10, indica un comportamiento muy similar al observado en la comparación entre COPERT III y COPERT IV. La tendencia a la sobreestimación por parte de COPERT III respecto de los valores experimentales para las emisiones de HC y MP es patente. En tanto que, se observan subestimaciones en algunas tasas de emisión para el NO<sub>x</sub> y CO, en caso de los camiones medianos y pesados, tendencia que no es seguida por los camiones livianos, que en general han sido bien representados por el modelo, a excepción de la estimación de emisiones de CO en la categoría de livianos S/N y Euro III.

Como es de esperar, la Tabla 5-11 presenta una disminución general en la brecha entre los resultados experimentales y los valores publicados internacionalmente. La gran mayoría de los casos está entre un factor 0.5 y 2 para la razón valor experimental versus Referencia internacional. Los casos de interés son camiones livianos Euro II para el MP y las emisiones del mismo contaminante para los camiones pesados Sin Norma, donde se tienen factores 5 (515%) y 0.3 (26%), respectivamente.

Tabla 5-11: Comparación valores experimentales / Copert IV para Camiones

Datos Exp./ Copert IV @25km/hr		HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
CAMIONES LIVIANOS	S/N	↓ 50%	↘ 85%	↘ 88%	→ 106%
	E-I	↘ 113%	↘ 70%	↑ 194%	↑ 139%
	E-II	↓ 41%	↓ 64%	↑ 158%	↑ 515%
	E-III	↓ 23%	↓ 41%	↓ 20%	↘ 88%
CAMIONES MEDIANOS	S/N	→ 96%	↓ 64%	↑ 205%	→ 92%
	E-I	↘ 116%	↘ 89%	↑ 188%	↘ 115%
	E-II	↑ 225%	→ 94%	↑ 135%	→ 109%
	E-III	↘ 111%	↘ 73%	↓ 69%	↓ 54%
CAMIONES PESADOS	S/N	↘ 123%	↓ 64%	↓ 68%	↓ 26%
	E-I	↘ 89%	↘ 86%	↑ 111%	↓ 45%
	E-II	↑ 147%	↘ 79%	↑ 236%	↘ 83%
	E-III	↓ 65%	↘ 89%	↓ 61%	→ 95%

Al observar la figura siguiente, se encuentra que la actualización de COPERT da cuenta de una sub estimación en NO<sub>x</sub> y CO y sobreestimaciones en el caso de HC y MP. En cuanto a la relación entre el modelo COPERT y los datos experimentales, se tiene que la sobre estimación que presentaba COPERT III para el HC, es resuelta por la actualización del modelo, así como se observan mejoras en cuanto a la estimación de NO<sub>x</sub>. En cuanto a MP, COPERT IV predice apropiadamente las emisiones de este contaminante, aunque en el caso particular de los camiones livianos Euro II, la predicción se separa ampliamente del promedio experimental. En general, el modelo COPERT IV representa de manera aceptable las emisiones para esta categoría.



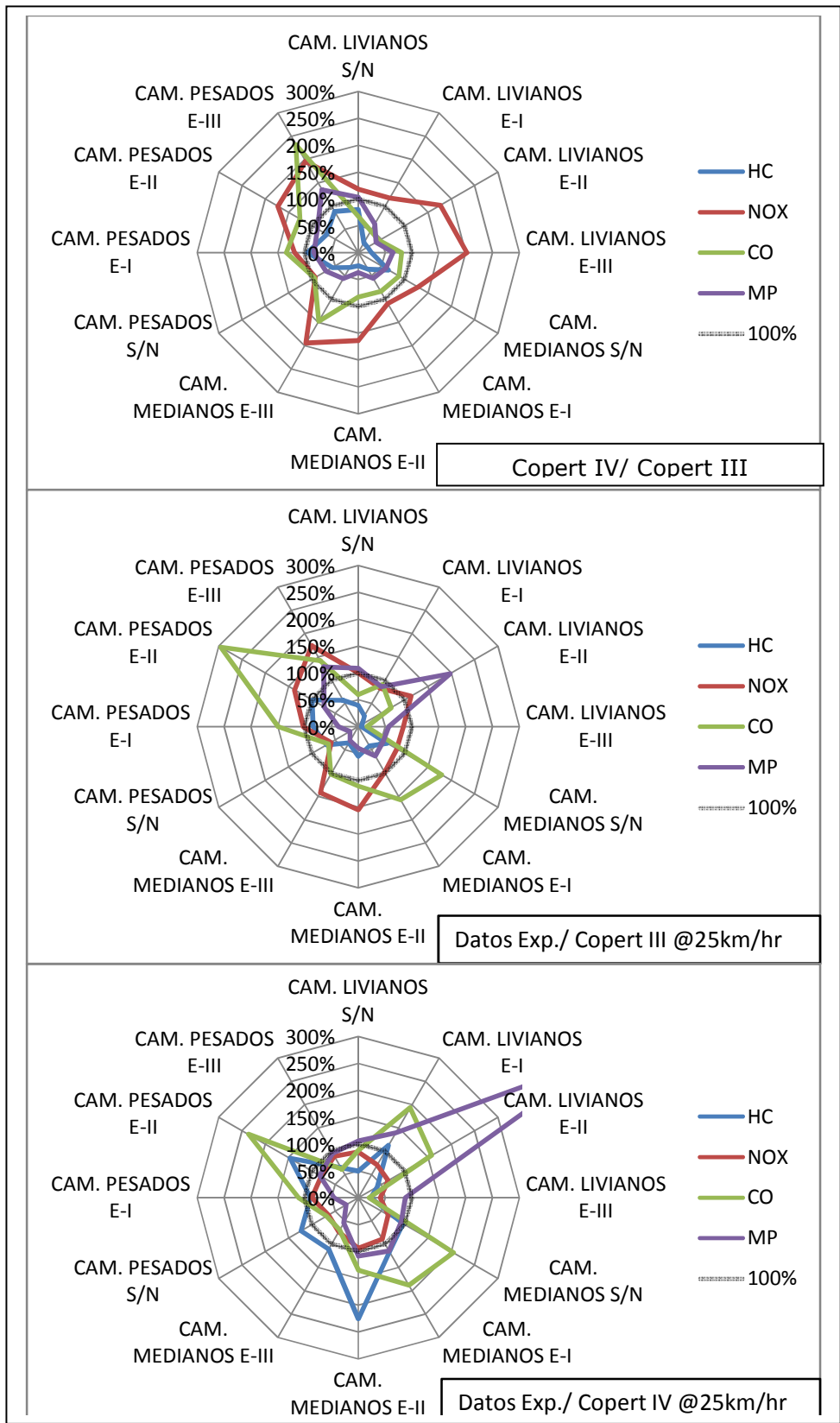


Figura 5-3: Comparación para Camiones

### 5.3 Buses

A continuación se presenta el análisis correspondientes a los vehículos del transporte público de pasajeros, comparando los factores de Copert III, Copert IV y experimentales.

#### 5.3.1 COPERT III V/S COPERT IV

Copert IV incorpora un factor novedoso para los buses del transporte público, al igual que para camiones. Los factores entregados distinguen las condiciones locales de pendiente (G) y carga (L). Para efectos de comparación, se define una carga L de 50% de la capacidad del bus, y una pendiente G de 0% de inclinación, en concordancia con los criterios definidos para los ensayos aplicados en 3CV.

Al comparar COPERT IV con la versión anterior, se observa una baja en las tasas de emisión de HC cercana a 40%, a excepción de la categoría S/N que presenta un aumento de 30%. Los factores de NOx y CO presentan un aumento respecto de COPERT III.

Tabla 5-12: Comparación Copert IV / Copert III, Buses del transporte público

Copert IV/ Copert III @20km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
PRE-TRANSANTIAGO	S/N	SIN FILTRO	↑ 131%	→ 100%	→ 110%	→ 84%
PRE-TRANSANTIAGO	E-I		↓ 69%	→ 88%	→ 103%	→ 100%
PRE-TRANSANTIAGO	E-II		↓ 49%	↑ 131%	→ 120%	→ 75%
PRE-TRANSANTIAGO	E-III		↓ 62%	↑ 170%	↑ 183%	→ 100%
VOLVO B7	E-III		↓ 62%	↑ 170%	↑ 183%	→ 100%
VOLVO B9	E-III		↓ 66%	↑ 209%	↑ 237%	→ 118%

#### 5.3.2 Comparación para factores experimentales

Al comparar los valores experimentales con COPERT III (ver Tabla 5-13) se aprecia una subestimación en las emisiones de HC, y sobreestimación en el caso del CO y MP. En el caso particular de los buses rígidos, la subestimación en HC es significativa, llegando el valor experimental a representar un 9% de aquel presentado por la referencia internacional al año 2000. Para los buses articulados, también se aprecia una diferencia importante para los valores de CO (9.68 veces) y MP (4.27 veces), en este caso, presentando una subestimación de las emisiones.

Tabla 5-13: Comparación Valores experimentales / Copert III, Buses del transporte público

Datos Exp./ Copert III @20km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
PRE-TRANSANTIAGO	E-I	SIN FILTRO	↓ 37%	↘ 77%	↑ 294%	↑ 266%
PRE-TRANSANTIAGO	E-II		↓ 47%	↘ 106%	↑ 260%	↑ 338%
PRE-TRANSANTIAGO	E-III		↓ 36%	↘ 114%	↑ 193%	↘ 125%
VOLVO B7	E-III		↓ 9%	↑ 196%	↑ 276%	↘ 126%
VOLVO B9	E-III		↓ 26%	↑ 188%	↑ 968%	↑ 427%

Al actualizar los valores de COPERT a la edición del año 2007, se tienen importantes mejoras respecto del caso anterior. Si se observan los casos extremos destacados en el párrafo anterior, se observa que el valor experimental obtenido para HC es 15% del valor de COPERT, para los buses Volvo B7, en tanto que para el CO de buses articulados, el factor entre el valor recomendado internacionalmente y el valor local es de 4 veces (408%), y para MP la misma comparación arroja un factor 3.6.

En general, para los buses probados en laboratorio, se observa que todos los valores experimentales son mucho más cercanos a los valores de la referencia internacional actualizada al año 2007.

Tabla 5-14: Comparación Valores experimentales / Copert IV, Buses del transporte público

Datos Exp./ Copert IV @20km/h			HC	NO <sub>x</sub>	CO	PM
PRE-TRANSANTIAGO	E-I	SIN FILTRO	↓ 53%	↘ 88%	↑ 286%	↑ 265%
PRE-TRANSANTIAGO	E-II		↘ 96%	↘ 80%	↑ 216%	↑ 452%
PRE-TRANSANTIAGO	E-III		↓ 59%	↓ 67%	↘ 106%	↘ 125%
VOLVO B7	E-III		↓ 15%	↘ 115%	↑ 151%	↘ 126%
VOLVO B9	E-III		↓ 40%	↘ 90%	↑ 408%	↑ 362%

Los gráficos siguientes representan la comparación directa de las tablas reportadas en esta sección. El análisis de ellos arroja en primera instancia que la incorporación de los factores niveles de carga y pendiente reduce el nivel de emisiones estimado para las categorías Pre-Transantiago Euro I y Euro II. El resto de las categorías mantiene los niveles de emisión. Al comparar los valores experimentales con COPERT III y COPERT IV se tiene una mejora en la representación del modelo respecto de los datos experimentales. No obstante lo anterior, la metodología COPERT no representa de buena forma la categoría de buses del transporte público.

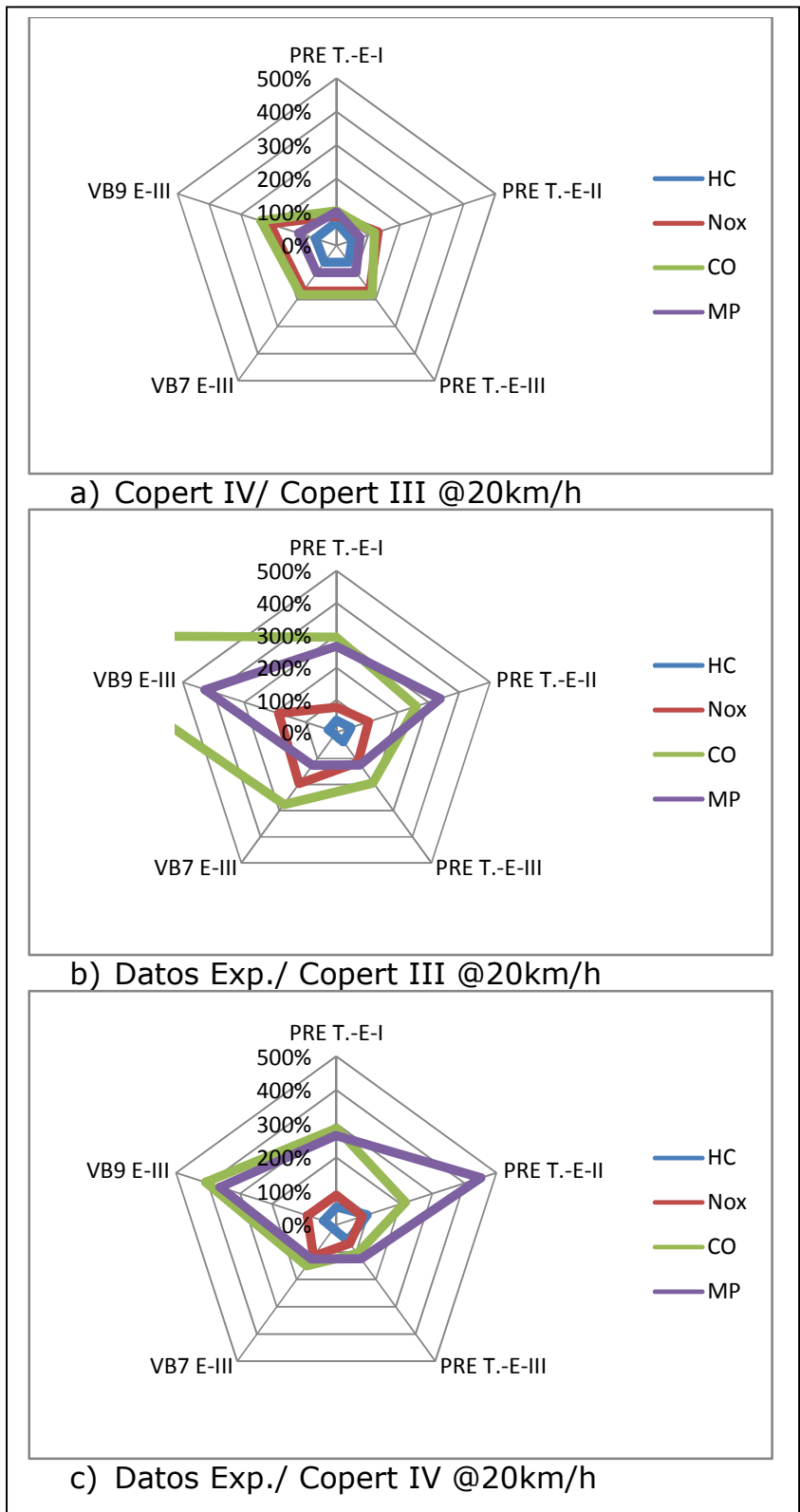


Figura 5-4: Comparación para Buses

#### 5.4 *Ranking por categoría*

Para el análisis final de esta sección del estudio, es fundamental hacer el ejercicio de poner en una escala o ranking las diferencias presentadas entre los valores experimentales, y valores utilizados actualmente para la estimación de emisiones.

Ya se vio que los valores de COPERT III del año 2000 han sido actualizados en respuesta a la necesidad de representar las condiciones de envejecimiento de los vehículos más antiguos, las cuales son variables en el tiempo e impactan los niveles de emisión de los contaminantes en estudio. Al comparar directamente con los valores utilizados actualmente por CONAMA (COPERT III), se agrega el factor de envejecimiento al análisis, y por tanto las diferencias son mayores. Por lo anterior, se hace más relevante comparar los resultados experimentales de este estudio, con aquellos presentados por COPERT IV (2007), de manera de representar los aspectos locales que impactan las emisiones, tales como la forma de conducir en la Región Metropolitana de Santiago, y por supuesto, las condiciones de mantenimiento, que pueden ser distintas a las representadas por el modelo europeo.

En función de lo anterior, se separan aquellos valores extremos, donde el valor experimental duplica al de la referencia actualizada, es decir, el factor presentado en las tablas de la sección anterior, excede el 200%, o donde el valor de la referencia es la mitad del valor medido experimentalmente (50% en las tablas anteriores). En este caso, 30 sobre 110 valores analizados, representan los extremos antes mencionados.

La tabla siguiente muestra las categorías, tipos y contaminantes correspondientes. Si se observa los contaminantes de mayor interés, MP y NO<sub>x</sub>, se observa que para el transporte público, la estimación de Copert IV para MP se aleja de los valores obtenidos experimentalmente para casi todas las categorías. Respecto de los camiones, se tiene que las categorías que presentan mayores diferencias en MP son Livianos Euro II y Pesados Euro I y Sin Norma. Así mismo, en cuanto al NO<sub>x</sub>, los camiones livianos experimentalmente arrojan emisiones inferiores a las calculadas mediante COPERT IV. Respecto de los vehículos livianos y medianos, existen diferencias a considerar en las categorías VPG Euro-I y Euro III para la estimación de NO<sub>x</sub>, donde la subestimación del modelo es patente. Lo mismo ocurre con el MP en la categoría VPD Euro IV.



Tabla 5-15: Comparación valores experimentales / Copert IV, valores extremos (mayores a 200% y menores al 50%)

METODO	CATEGORIA	TIPO	NORMA	CONTAMINANTE	Dif %
DINAMOMETRO DE CHASIS	BUSES S/F	PRE-TRANSANTIAGO	E-I	CO	286%
				MP	265%
		VOLVO B7	E-II	MP	452%
				CO	216%
		VOLVO B9	E-III	HC	15%
				CO	408%
	MP			362%	
	CAMIONES	LIVIANOS	E-II	MP	515%
				HC	41%
			E-III	CO	20%
				HC	23%
				NOX	41%
			S/N	HC	50%
		MEDIANOS	E-II	HC	225%
			S/N	CO	205%
		PESADOS	E-I	MP	45%
			E-II	CO	236%
			S/N	MP	26%
EQUIPOS PORTÁTILES		COMERCIAL	DIESEL	E-III	HC
	E-IV			HC	40%
	GASOLINA		E-I	HC	247%
			E-III	CO	45%
	PARTICULAR	DIESEL	E-IV	MP	48%
				CO	981%
		GASOLINA	E-I	HC	563%
				NOX	326%
			E-III	HC	810%
				NOX	416%
CO	262%				

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### ***6.1 Conclusiones***

Esta sección presenta las conclusiones particulares para los resultados obtenidos y su comparación con estándares nacionales y europeos, además de conclusiones generales respecto de las metodologías empleadas.

#### **6.1.1 Conclusiones Generales**

Respecto de los factores de emisión, se puede concluir la importancia de mantener actualizados estos parámetros. Se observa que las nuevas curvas presentadas por la referencia internacional siguen la línea de las observaciones experimentales. COPERT IV presenta mejoras respecto de la versión anterior, tales como la incorporación de las variables Nivel de Carga y Pendiente para los vehículos pesados, que permite mejorar las estimaciones para el sector transporte donde se están realizando importantes esfuerzos para mejorar las tecnologías disponibles. La incorporación de flotas nuevas al transporte público, y la posible utilización de filtros de partículas para dicho rubro y el del transporte de carga, también obligan a mantener actualizados los factores de emisión locales, mejorando los valores que entrega la literatura internacional.

En esta misma línea, es importante disponer de factores experimentales que permitan identificar de manera precisa los actores responsables de las emisiones contaminantes, de manera de generar los incentivos correctos para lograr cumplir las metas planteadas por las distintas herramientas de gestión ambiental. Por ejemplo, un sistema de emisiones transables depende de la identificación de una mejora respecto de la situación base. Esto es sólo posible a través de una cuantificación precisa de las emisiones asociadas a un tipo de tecnología particular y no a extrapolaciones basadas en las exigencias de reducción para cada nueva norma de emisión.

Si bien se han generado curvas con buenos valores de correlación, la dispersión propia de las mediciones obliga a mejorar el tamaño muestral de muchas de las categorías, entre ellas los vehículos livianos de pasajeros y comerciales, diesel y a gasolina que presentan valores de  $R^2$  inferiores a 0,8. Así mismo, las categorías de camiones al ser tan diversas, presentan un tamaño muestral bajo (inferior a 5 vehículos) que debe ser incrementado para mejorar la representatividad de dichas categorías. En la medida que se tenga una buena base experimental, las



herramientas de gestión ambiental mejorarán su desempeño y permitirán identificar de mejor manera los responsables de las emisiones, y de este modo focalizar los esfuerzos donde realmente se generarán los avances en las condiciones ambientales esperadas para la Región Metropolitana y el país.

Este proceso debe ser periódico, aunque dada la naturaleza de la labor de medición, proceso y validación de los datos, los intervalos de actualización debieran estar en el ámbito del mediano plazo. De acuerdo a la experiencia adquirida, este proceso puede tomar periodos de al menos 2 años, el primero de los cuales, se debiera abocar a la medición de un número significativo de vehículos. Observando las experiencias de otros estudios (Nikolic M., 2007; Rapone, 2007) y la propia, los tamaños muestrales no debieran bajar de la decena lo que implica un universo de 300 vehículos para cubrir al menos las aproximadamente 30 categorías abordadas en el presente trabajo, y por lo tanto un año para la etapa de recolección de datos podría considerarse prudente. Asimismo, el procesamiento requiere de normalizaciones y validaciones que fácilmente podrían abarcar un trabajo a una escala temporal semestral o anual. En definitiva, un programa de actualización podría llevarse a cabo de forma bi o tri-anual.

### **6.1.2 Conclusiones respecto de los Resultados**

Se aplican dos metodologías para la determinación de curvas de emisión en función de la velocidad descritas en el numeral 3 del presente informe. Para vehículos livianos, medianos y pesados del transporte de carga, se procesan exitosamente los datos obtenidos por equipos portátiles en los trabajos previos (Henriquez G., 2007; Madrid G., 2007; Nikolic M., 2007). En tanto que para los buses del transporte público de la RM, se construyen dichas curvas de emisión en función de los datos obtenidos en campañas experimentales en el laboratorio de emisiones vehiculares de vehículos pesados de 3CV procedentes de (Acevedo H., 2007) y el presente estudio.

El método PSV aplicado sobre los valores obtenidos mediante equipos portátiles permite normalizar las emisiones obtenidas experimentalmente bajo distintas condiciones de conducción, a expresiones de emisión en función de la velocidad media de operación. Esto se realiza a través de la creación de sub ciclos de operación con velocidades promedio en intervalos de 10 km/h, y su evaluación en los histogramas de potencia vehicular específica correspondientes a cada BIN de potencia, según los registros segundo a segundo disponibles.

Siguiendo el esquema de COPERT se construyen las curvas de emisión utilizando los resultados obtenidos en el dinamómetro de chasis para las fases de baja y alta velocidad, más la emisión total del ciclo de conducción correspondiente. Las regresiones potenciales realizadas arrojan buenos niveles de correlación para los valores promedio experimentales.

Para todos los casos, la tendencia general es mostrar bajas en los niveles de emisión obtenidos en la medida que se produce la mejora en las tecnologías de control de emisiones, aunque existen casos puntuales donde una tecnología superior presenta emisiones mayores a las de sus pares de tecnologías y normas de emisión más antiguas.

Las curvas obtenidas se reportan en su forma algebraica, con los coeficientes de correlación correspondientes y para todas las categorías en estudio.

### **6.1.3 Conclusiones para la Comparación de Factores de Emisión**

Se comparan los resultados experimentales con los valores utilizados actualmente en el modelo de emisiones vehiculares utilizado por CONAMA para determinar sus inventarios de emisión, MODEM. Adicionalmente, se comparan ambos valores, MODEM y experimentales, con la última actualización del modelo europeo de cálculo de emisiones que dio origen a MODEM, COPERT IV, editada en agosto de 2007.

El primer ámbito para la comparación es el de las calidades estadísticas presentadas por el método europeo, observándose una mejora en la representatividad experimental sobre las categorías Post Euro I respecto de la metodología europea, puesto que esta última extrapola resultados experimentales de vehículos Euro I, de acuerdo a las reducciones exigidas a cada norma (Euro III, Euro IV, etc.).

El segundo tipo de comparación es la relación existente entre las curvas de emisión, evaluadas en un valor típico de velocidad media por categoría de interés. Se verifica que los valores de COPERT III del año 2000 han sido actualizados en respuesta a la necesidad de representar las condiciones de envejecimiento de los vehículos más antiguos, las cuales son variables en el tiempo e impactan los niveles de emisión de los contaminantes en estudio. Al comparar directamente con los valores utilizados actualmente por CONAMA (COPERT III), se agrega el factor de envejecimiento al análisis, y por tanto las diferencias importantes en

algunas categorías. Al comparar los resultados experimentales de este estudio, con aquellos presentados por COPERT IV (2007), la tendencia general es a acercar los datos experimentales a los de referencia, salvo casos particulares.

En la literatura internacional se encuentra que la dispersión en una muestra de vehículos dada es alta, pudiéndose encontrar fácilmente desviaciones estándar de 100% de la media muestral. Por esto, cualquier diferencia entre las curvas experimentales y las de referencia puede ser atribuible a la dispersión propia de esta última. Con esto en mente, al realizar la comparación se separaron los valores donde el valor experimental duplica al de la referencia actualizada, es decir excede el 200%, o donde el valor de la referencia es la mitad del valor medido experimentalmente (50% del valor de referencia). Es así que 30 de las 110 curvas analizadas presentan diferencia de ese orden, lo que equivale a un 27% del total de los factores de emisión presentados. Este porcentaje representa un grupo de especial interés para futuros estudios. En particular para los contaminantes de mayor interés, MP y NO<sub>x</sub>, se observa que para el transporte público, la estimación de Copert IV para MP se aleja de los valores obtenidos experimentalmente para casi todas las categorías. Respecto de los camiones, se tiene que las categorías que presentan mayores diferencias en MP son Livianos Euro II y Pesados Euro I y Sin Norma. Así mismo, en cuanto al NO<sub>x</sub>, los camiones livianos experimentalmente arrojan emisiones inferiores a las calculadas mediante COPERT IV. Respecto de los vehículos livianos y medianos, existen diferencias a considerar en las categorías VPG Euro-I y Euro III para la estimación de NO<sub>x</sub>, donde la subestimación del modelo es patente. Lo mismo ocurre con el MP en la categoría VPD Euro IV.

## **6.2 Recomendaciones**

Esta sección presenta recomendaciones para el uso de los resultados aquí reportados y para futuros estudios en el ámbito de las emisiones vehiculares.

Respecto de los datos experimentales obtenidos, se puede decir que la aplicación de la metodología PSV entrega buenos resultados para la normalización de los datos experimentales, y es muy recomendable que estudios futuros estudien a fondo su desempeño, realizando campañas simultáneas por ambos métodos.

Los datos obtenidos mediante equipos portátiles quedan disponibles no sólo bajo la forma de curvas de emisión en función de la velocidad de operación, sino también como emisiones por nivel de potencia (BIN) cuya representatividad puede ser ampliada en el tiempo. Con estos datos por BIN se pueden estimar las emisiones de cualquier ciclo cuya traza segundo a segundo sea conocida

Los datos provenientes de dinamómetro de chasis quedan a disposición de futuros estudios. En la forma de emisiones por fase forman parte de una base de datos importante para seguir mejorando la calidad de las curvas de emisión presentadas en el presente informe.

Además, la metodología PSV permite analizar los datos obtenidos por los analizadores de gases de 3CV segundo a segundo, y pueden ser incorporados a la base de datos de emisiones por BIN de potencia, adicionándolos a datos obtenidos por equipos portátiles, cuando se disponga de datos de ambas fuentes.

***"This work was carried out with the aid of a grant from the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN II 2017 which is supported by the US National Science Foundation (Grant GEO-0452325)".***

## Bibliografía

1. Acevedo H., C. (2007). *Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público.*
2. Araya Csaszar, A. D. (2008). *Metodología de cálculo de emisiones vehiculares basada en modos de conducción y potencia específica vehicular.*
3. Banco Mundial. (2007). *Desarrollo de Pruebas de Campo Para la Evaluación Comparada de Tecnologías de Buses para Santiago.*
4. CONAMA. (2007). *Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005.* Santiago.
5. CONAMA. (2002). *Actualización modelo de cálculo de emisiones vehiculares.*
6. Damm, C. J., Kuhns, H. D., & Gertler, A. W. (2004). *An Assesment of Motor Vehicle Particulate Matter Emissions Measurements.*
7. European Environment Agency. (2003). *Atmospheric Emission Inventory Guidebook.*
8. Henriquez G., J. (2007). *Determinación experimental de factores de emisión para vehículos livianos .*
9. Jimenez P., J. L. (1999). *Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing.*
10. Madrid G., R. E. (2007). *Estimación de emisiones contaminantes generadas por el parque de vehículos pesados de carga en la Región Metropolitana.*
11. Nikolic M., M. (2007). *Determinación experimental de emisiones producidas por vehículos livianos y comparación de resultados entre cinco ciudades de países en desarrollo.*
12. Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2000). *COPERT III Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport.*
13. Rapone, M. (2007). *Emission Factors Determination of Euro III 1,200- to 1,400-cc Petrol Passenger Cars with PLS Multivariate Regression Model.* Springer Science.
14. Rojas E., D. (2003). *Determinación experimental de ciclos de conducción.*
15. Tolvett C., S. (2009). *Análisis de Emisiones en Ruta de Vehículos Diesel en Ciudad de México, Santiago y Sao Paulo.*