



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

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE FACTORES DE EMISIÓN**  
**PARA VEHÍCULOS LIVIANOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**JAIME ORLANDO HENRIQUEZ GONZALEZ**

PROFESOR GUÍA:  
MAURICIO OSSES ALVARADO

PROFESOR CO-GUÍA:  
ROBERTO CORVALÁN PAIVA

INTEGRANTE DE LA COMISIÓN:  
JUAN CARLOS GOICOECHEA NEUMANN

SANTIAGO DE CHILE  
AGOSTO 2007

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: JAIME HENRIQUEZ  
GONZALEZ  
FECHA: 18 de agosto de 2007  
PROF. GUÍA: Sr. MAURICIO OSSES

## DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS LIVIANOS

Un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un determinado contaminante emitido a la atmósfera con la actividad asociada a la emisión de aquel contaminante. Este trabajo contempla la estimación de factores provenientes de fuentes móviles, específicamente de vehículos livianos que utilizan gasolina, diesel, y gas natural.

El objetivo general de este trabajo es generar antecedentes para la determinación de factores de emisión de vehículos livianos y medianos de transporte en la región Metropolitana de Santiago, en forma experimental, bajo condiciones reales de operación. Se realizaron campañas de medición de contaminantes atmosféricos, tales como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos totales (HCT) y material particulado respirable (MP<sub>2,5</sub>), además de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El trabajo experimental consistió en utilizar equipos portátiles de medición de gases y partículas. Posteriormente se realizó el procedimiento de cálculo considerando para ello factores ambientales, tales como: temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, además de la relación atómica del combustible H/C. Finalmente los resultados obtenidos se compararon con factores de emisión propuestos por la literatura y empleados por la autoridad ambiental Metropolitana.

Se establecieron factores de emisión para 15 tecnologías diferentes, separadas de acuerdo al tipo de combustible que utilizan, el tipo de vehículo y la norma por la que se rigen, lo que genera 60 valores para gases contaminantes y 5 para material particulado. En el caso de los NO<sub>x</sub>, las correcciones por humedad implican diferencias del orden de 4 a 5%. Una diferencia similar se refleja en los resultados finales de CO, HCT y CO<sub>2</sub>, si estos son expresados en base seca o base húmeda. Al comparar con la literatura, los vehículos diesel comerciales presentan valores más altos en el caso experimental para la mayoría de los gases, mientras que los vehículos diesel de pasajeros presentan valores más altos para NO<sub>x</sub> y más bajos para CO y HCT. En el caso del material particulado, los resultados experimentales son inferiores que los de la literatura en ambos casos.

Existe una notoria disminución de las emisiones a medida que se incorporan nuevas tecnologías en el control de emisiones. Al momento de calcular los factores de emisión es importante considerar las variables ambientales y relación atómica de combustible, y así no cometer errores de expresar los resultados en base equivocada. Por otra parte, se sugiere seguir realizando campañas de medición experimentales a fin de establecer factores de emisión en forma real y no teórica.

*A MI MADRE*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Plácida y Jaime, por su apoyo siempre incondicional, por su amor y entrega, y por la paciencia que han debido tener por estos largos años.

A mis hermanas, Claudia y Cecilia, por su comprensión en mis momentos de arrebato y por el amor que me han entregado.

A mi tíos Guillermo, Jorge y Omar, por su apoyo y enseñanza.

Al profesor Mauricio Osses, que pasó de ser mi profesor a mi jefe, y luego a mi amigo, quién depositó su confianza en mi y me apoyó en un momento muy difícil de mi carrera. Al profesor Roberto Corvalán, co-guía de este trabajo, por su aporte desinteresado, metódico y estricto en cada consulta que realicé.

A mis amigos Tapia, Bocha, Tolvett, entre mucho otros, que fueron participes de una u otra forma en la realización de este trabajo.

Como olvidar a los brisqueros, Mono, Garetop, KKboy, la negra, APP, Hellen, Gordo, Ptt, con quienes pase grandes momentos de alegría y diversión en esta larga estadía universitaria.

A mis amigos de siempre, los del barrio, o los de Er Puerche, mi gran amigo y yunta Jorgech, Carola (Mi yeina), el gabo, Care sopaipilla (Tano), watón danny y el chico pony (Eduardo) que juntos son las arañas potonas, el chino Rios (Raul), la cata, la otra cata, por esos inolvidables partidos y carretes, y esos tantos combinados Q.E.P.D.

Por último, quisiera agradecer a Cristina, por su amor y ternura, que en el último tiempo me ha apoyado incondicionalmente, transformandose en alguien demasiado importante en mi vida, y espero que en lo que quede de ella.

# Índice General

<b>Índice de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes Generales . . . . .	1
1.2 Motivación . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.3.1 Objetivo General . . . . .	3
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	3
<b>2 Antecedentes Teóricos</b>	<b>4</b>
2.1 Generalidades sobre contaminación atmosférica . . . . .	4
2.1.1 Monóxido de Carbono (CO) [2] . . . . .	5
2.1.2 Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ) . . . . .	6
2.1.3 Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) . . . . .	7
2.1.4 Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs) . . . . .	8
2.1.5 Hidrocarburos Totales (HCT) . . . . .	9
2.1.6 Particulado o Partículas . . . . .	9
2.1.7 Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) . . . . .	10
2.2 Sistemas de análisis de medición de gases contaminantes . . . . .	10
2.2.1 Analizador NDIR (Detector infrarrojo no dispersivo) . . . . .	11
2.2.2 Analizador NDUV (Detector ultravioleta no dispersivo) . . . . .	12
2.2.3 Analizador FID (Detector de ionización de llama) . . . . .	12
2.2.4 Analizador de quimiluminiscencia . . . . .	13
2.3 Influencias del Motor en las emisiones . . . . .	15
2.3.1 Motores Otto . . . . .	15
2.3.2 Motores Diesel . . . . .	18
2.3.3 Tecnología Diesel Actual . . . . .	18
2.4 Cálculo de Factores de Emisión . . . . .	19

2.4.1	Factor de Emisión para Hidrocarburos Totales (HC)	19
2.4.2	Factor de Emisión para Monóxido de Carbono (CO)	20
2.4.3	Factor de Emisión para Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	20
2.4.4	Factor de Emisión para Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	21
2.4.5	Factor de Emisión para Material Particulado (MP)	21
2.5	Métodos de Muestreo	21
2.5.1	Corrección por Temperatura y Humedad Relativa	22
2.5.2	Corregidos por Alineamiento	24
2.6	Modelo de cálculo de Factores de Emisión	25
2.7	Normativa de Emisión de Contaminantes	29
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>31</b>
3.1	Descripción del Equipo Experimental	31
3.1.1	Equipo de medición para vehículos con motor Otto	32
3.1.2	Equipo de medición para vehículos con motor Diesel	33
3.1.3	Medidor de masa para material particulado (DMM-230)	33
3.2	Método de Muestreo	35
3.2.1	Medidor de Flujo de Escape (EFM)	35
3.2.2	Dilutor	36
3.3	Circuito	37
3.4	Muestra de la flota vehicular	39
3.5	Montaje y desarrollo de las pruebas	42
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>44</b>
4.1	Cálculo numérico de los factores de emisión	44
4.2	Análisis de Factores de Emisión por tecnología	50
4.2.1	Resultados obtenidos para Vehículos livianos de Pasajeros a gasolina.	51
4.2.2	Resultados obtenidos para Vehículos livianos Comerciales a Gasolina	53
4.2.3	Resultados obtenidos en Vehículos livianos de Pasajeros Diesel	55
4.2.4	Resultados obtenidos en Vehículos livianos Comerciales Diesel	57
4.2.5	Resultados obtenidos en Vehículos livianos a gas natural	59
4.2.6	Resultados obtenidos en Vehículos de tecnología híbrida	61
4.3	Determinación de Factores de Emisión por tecnología	63
4.4	Comparación de los resultados con la literatura	69
4.4.1	Vehículos a gasolina	69
4.4.2	Vehículos con motor Diesel	73
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>78</b>

5.1	Conclusión y discusiones sobre el cálculo numérico de los factores de emisión. . . .	79
5.2	Conclusión y discusiones sobre el análisis de factores de emisión por tecnología. . .	80
5.3	Conclusión y discusiones sobre la determinación de Factores de Emisión por tecnología	81
5.4	Conclusión y discusiones sobre la comparación con un modelo de la literatura . . .	82

**Bibliografía** **83**

**A Anexos** **A-1**

A.1	Vehículos a Gasolina, GNC y híbrido . . . . .	A-1
A.2	Vehículos diesel . . . . .	A-4

# Índice de Figuras

2.1	Esquema del funcionamiento del analizador NDIR. . . . .	11
2.2	FID. . . . .	13
2.3	Esquema del funcionamiento del analizador de quimiluminiscencia. . . . .	14
2.4	Muestra de la no sincronización de los analizadores. . . . .	25
3.1	Analizador de emisiones SEMTECH-G. . . . .	32
3.2	Analizador de emisiones SEMTECH-D. . . . .	33
3.3	Equipo para la medición de Material Particulado DMM-230. . . . .	34
3.4	Esquema de la operación del Dekati. . . . .	34
3.5	Medidor de Flujo de escape y tomador de muestra. . . . .	36
3.6	Dilutor del Dekati. . . . .	37
3.7	Esquema del funcionamiento del Dilutor. . . . .	37
3.8	Ciclo de prueba definido para las mediciones realizadas. . . . .	38
4.1	Comparación del factor de conversión de base seca a base húmeda entre el obtenido teóricamente y el entregado por el equipo SEMTECH. . . . .	46
4.2	Comparación del factor de corrección por humedad del NO <sub>x</sub> entre el obtenido teóricamente y el entregado por el equipo SEMTECH. . . . .	47
4.3	Comparación de las emisiones de CO entre las obtenidas teóricamente y las entregadas por el equipo. . . . .	48
4.4	Comparación de las emisiones de NO <sub>x</sub> entre las obtenidas teóricamente y las entregadas por el equipo. . . . .	49



4.5	Factores de Emisión en vehículos de pasajeros a gasolina no catalíticos (VLP G-0).	52
4.6	Factores de Emisión en vehículos de pasajeros catalíticos Tipo 1 (VLP G-1).	52
4.7	Factores de Emisión en vehículos de pasajeros catalíticos Tipo 2 (VLP G-2).	53
4.8	Factores de Emisión en vehículos comerciales no catalíticos (VLC G-0).	54
4.9	Factores de Emisión en vehículos comerciales catalíticos Tipo 1 (VLC G-1).	54
4.10	Factores de Emisión en vehículos comerciales catalíticos Tipo 2 (VLC G-2).	55
4.11	Factores de Emisión en vehículos de pasajeros Diesel Tipo 1 (VLP D-1).	56
4.12	Factores de Emisión en vehículos de pasajeros Diesel Tipo 2 (VLP D-2).	56
4.13	Factores de Emisión en VLP vehículos de pasajeros Diesel Tipo 3 (D-3).	57
4.14	Factores de Emisión en vehículos comerciales Diesel Tipo 1 (VLC D-1).	58
4.15	Factores de Emisión en vehículos comerciales Diesel Tipo 2 (VLC D-2).	58
4.16	Factores de Emisión en vehículos comerciales Diesel Tipo 3 (VLC D-3).	59
4.17	Factores de Emisión en vehículos de pasajeros a gas natural (VLP GNC).	60
4.18	Factores de Emisión en vehículos comerciales a gas natural (VLC GNC).	61
4.19	Factores de Emisión en vehículo híbrido (VLP HIB).	62
4.20	Factores de Emisión para Hidrocarburos en Vehículos Livianos según tecnología.	63
4.21	Factores de Emisión para monóxido de carbono en Vehículos Livianos según tecnología.	65
4.22	Factores de Emisión para óxidos de nitrógeno en Vehículos Livianos según tecnología.	66
4.23	Factores de Emisión para dióxido de carbono en Vehículos Livianos según tecnología.	67
4.24	Factores de Emisión para material particulado en Vehículos Livianos según tecnología.	68
4.25	Comparación de factores de emisión para HC entre metodología IVE y modelo COPERT III.	70
4.26	Comparación de factores de emisión para CO entre metodología IVE y modelo COPERT III.	71
4.27	Comparación de factores de emisión para NO <sub>x</sub> entre metodología IVE y modelo COPERT III.	72

4.28	Comparación de factores de emisión para HC entre metodología IVE y modelo COPERT III. . . . .	74
4.29	Comparación de factores de emisión para CO entre metodología IVE y modelo COPERT III. . . . .	75
4.30	Comparación de factores de emisión para NO <sub>x</sub> entre metodología IVE y modelo COPERT III. . . . .	76
4.31	Comparación de factores de emisión para MP entre metodología IVE y modelo COPERT III. . . . .	77

# Índice de Tablas

2.1	Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos de pasajeros a gasolina [9]. . . . .	26
2.2	Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos de pasajeros a gasolina, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 91/441/EEC [9]. . . . .	26
2.3	Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos comerciales a gasolina menores a 3.5[ton] [9]. . . . .	27
2.4	Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos comerciales a gasolina, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 93/59/EEC [9]. . . . .	27
2.5	Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos de pasajeros diesel menores a 2.5[ton], que cumplen con la directiva 91/441/EEC [9]. . . . .	28
2.6	Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos de pasajeros diesel, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 91/441/EEC [9]. . . . .	28
2.7	Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos comerciales diesel menores a 3.5[ton], que cumplen con la directiva 93/59/EEC [9]. . . . .	28
2.8	Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos comerciales diesel, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 93/59/EEC [9]. . . . .	28
2.9	Vehículos Livianos de Pasajeros . . . . .	30
2.10	Vehículos Livianos Comerciales . . . . .	30
3.1	Definición de Vehículos Livianos y Medianos ( <i>Fuente: Elaboración propia</i> ). . . . .	41
3.2	Detalle de flota experimental ( <i>Fuente: Elaboración propia</i> ). . . . .	42
4.1	Cantidad de pruebas consideradas para la obtención de los resultados de cada agente contaminante. . . . .	51

5.1	Factores de Emisión para vehículos que utilizan gasolina, vehículo híbrido y vehículos a gas natural. . . . .	78
5.2	Factores de Emisión para vehículos con motor diesel. . . . .	79

# Capítulo 1

## Introducción

Un Factor de Emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un determinado contaminante emitido a la atmósfera con la actividad asociada a la emisión de aquel contaminante. Los factores de emisión de fuentes móviles usualmente son expresados en unidad de masa por unidad de distancia, es decir, la cantidad másica del agente contaminante emitido en un trayecto dado  $[g/km]$ , y en el caso de ser ensayado en un laboratorio también puede ser expresado en unidades de masa por potencia  $[g/kWh]$ . Tales factores facilitan la estimación de las emisiones de varias fuentes de contaminación atmosférica.

Los factores de emisión pueden ser apropiados en un sin número de situaciones, tal como realizar la construcción de inventarios de emisión en una determinada área, estimando las emisiones de cada fuente específica. Estos inventarios pueden tener muchos propósitos incluyendo modelos de dispersión, análisis ambiental y desarrollo de estrategias de control.

### 1.1 Antecedentes Generales

Desde principio de los años 90, el Estado de Chile ha realizado una gestión ambiental pública para controlar las políticas ambientales y establecer metas claras en cuanto al manejo de la calidad del aire en las distintas ciudades del territorio nacional. Para esto se ha diseñado una serie de medidas estratégicas y acciones concretas orientadas a la reducción de emisiones desde los distintos tipos de fuentes presentes, siendo el sector transporte una fuente importante.

El funcionamiento de vehículos de transporte que usan motor de combustión interna, genera diversos tipos de contaminantes, los cuales pueden ser medidos y analizados hoy en día mediante un dinamómetro de chasis. Sin embargo, para que esto sea posible, es necesario determinar un

ciclo de conducción representativo para simular los diferentes estados de manejo a los que está sometido un vehículo.

En forma periódica y sistemática deben actualizarse los datos de factores de emisión, debido a que tanto las tecnologías presentes en el parque automotriz así como los modos de conducción evolucionan en el tiempo. El último inventario de emisiones desarrollado para la región Metropolitana de Santiago consideró factores de emisión determinados experimentalmente a una muestra de 160 vehículos livianos y medianos. Para el caso de los vehículos livianos, estos factores utilizaron ciclos de marcha que representan razonablemente los modos de conducción y categorías vehiculares del período 1998 - 2000, mientras que para los vehículos medianos se abordaron los factores de emisión de la literatura.

## **1.2 Motivación**

Dado que el dinamómetro de chasis requiere establecer ciclos de conducción representativos, las condiciones de conducción no son un 100 % reales, es por ello que la determinación de factores de emisión obtenidos a través de mediciones a bordo resulta atractivo, ya que cuenta con la ventaja de que al tomar una muestra lo suficientemente representativa, es posible obtener en forma más directa los factores de emisión para cada categoría vehicular midiendo emisiones en condiciones reales de conducción para lo cual ya no habría que determinar ciclos de conducción representativos.

El estudio fue financiado por SECTRA<sup>1</sup>, en el marco de un estudio que pretende actualizar la base de datos de los factores de emisión mencionada anteriormente, por lo que resulta completamente atractivo y motivador el formar parte del equipo que establecerá dicha base de datos.

La medición de factores de emisión utilizando equipos portátiles en vehículos livianos y medianos, es una prueba jamás realizada anteriormente en Chile, se ha realizado en diversos países de Europa, y en América latina se ha realizado sólo en Brasil, lo cual hace este trabajo aún mas interesante.

---

<sup>1</sup>SECTRA: Secretaria Interministerial de Planificación de Transporte

## **1.3 Objetivos**

A continuación se presentarán los objetivos de este trabajo, separados en generales y principales.

### **1.3.1 Objetivo General**

- Generar antecedentes para la determinación de factores de emisión para vehículos livianos y medianos de transporte en la región Metropolitana de Santiago, en forma experimental (Con equipos portátiles de medición).

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar campañas de medición de contaminantes atmosféricos, tales como: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarburos totales (HCT) material particulado respirable ( $\text{MP}_{10}$ ) en vehículos livianos y medianos,
- Desarrollar metodologías para la determinación de factores de emisión en vehículos livianos de transporte,
- Generar una base de datos con los factores de emisión obtenidos en este trabajo, tomando una muestra significativa del actual parque automotriz.

## Capítulo 2

# Antecedentes Teóricos

Los factores de emisión pueden ser obtenidos en forma experimental y teórica. Para obtenerlos experimentalmente, existen diversos equipos y/o analizadores para la obtención de los gases contaminantes emitidos por los escapes de un vehículo. Por otra parte, la teoría establece la determinación de factores de emisión, a partir de una serie de variables, entre las que cabe destacar:

- Velocidad media,
- Antigüedad del vehículo,
- Cilindrada,
- Entre otros.

### 2.1 Generalidades sobre contaminación atmosférica

Las emisiones se pueden clasificar de varias formas, y acá se verán algunas de estas clasificaciones. Primeramente, las emisiones las podemos clasificar en biogénicas, las cuales corresponden a emisiones producidas por procesos naturales, tales como la descomposición de elementos biológicos, que producen metano ( $CH_4$ ), y en antropogénicas, que son las que tienen que ver con las actividades humanas, tales como la industria, generación de energía, transporte, etc. Así también se pueden clasificar las emisiones según su efecto. Existen los contaminantes locales, los cuales, tal como su nombre lo indica, poseen un efecto sólo en el área donde son emitidos, tales como el material particulado, los  $NO_x$ , etc., y los contaminantes globales, que su efecto es a nivel de planeta, sin importar su lugar de origen. Este es el caso del dióxido de carbono y el metano, entre otros.

Así también los contaminantes pueden ser clasificados como contaminantes primarios, que son aquellos que son directamente emitidos por una fuente, los contaminantes secundarios son aquellos



que pueden ser producidos en la atmósfera por procesos físicos o químicos, a partir de contaminantes primarios u otras sustancias presentes como resultado de emisiones de fuentes estacionarias o móviles, y los contaminantes de transferencia son el paso de un contaminante de un medio a otro.

Los siguientes contaminantes son considerados como primarios [1]:

- Monóxido de Carbono (CO)
- Hidrocarburos totales (HCT)
- Óxidos de Azufre ( $SO_x$ )
- Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ )
- Material Particulado (MP)

Además, los siguientes contaminantes pueden ser considerados como contaminantes secundarios[1]:

- Ozono ( $O_3$ )
- Oxidantes fotoquímicos
- Hidrocarburos oxidados

En lo que sigue, se hará una descripción de los principales contaminantes atmosféricos.

### **2.1.1 Monóxido de Carbono (CO) [2]**

El monóxido de carbono (CO), es un gas tóxico formado en las cámaras de combustión debido a una escasa fuente de oxígeno. Dentro de edificios, las fuentes importantes incluyen el humo del cigarrillo, equipos domésticos que queman combustible, y cocinas con aplicaciones de gas. Afuera, la fuente principal, que explica el casi 90 % de monóxido de carbono, es el escape de los motores de gasolina, por otra parte, las hogueras, los incendios forestales y su tratamiento erróneo entre otros, forman una parte grande del 10 % restante.

El monóxido de carbono es uno de los agentes contaminadores más peligrosos para la salud humana porque causa una reducción en la capacidad de llevar oxígeno en la sangre, dando por resultado los dolores de cabeza, fatiga, problemas respiratorios, y en algunos casos la muerte. Puesto que el gas es inodoro, insípido y descolorido, a menudo no hay advertencia de la persona expuesta. Es, por lo tanto, importante evitar la acumulación del monóxido de carbono en espacios

vivos, tales como esos causados por los calentadores de interiores mal mantenidos.

El gas en sí mismo del monóxido de carbono sobrevive en la atmósfera típicamente por cuatro semanas, tiempo durante el cual se oxida gradualmente y forma dióxido de carbono. Estos últimos años, mucho se ha hecho para reducir el monóxido de carbono emitido por el escape de los motores de gasolina con el uso extenso de los catalizadores de tres vías, que convierten el gas en dióxido de carbono. De hecho, los catalizadores más eficientes pueden reducir los niveles de CO del gas de escape en casi el 90 %. Así, el CO debe pronto convertirse en un agente contaminante del pasado.

La preocupación principal por la contaminación del CO está en áreas urbanas, particularmente en países con un porcentaje bajo de vehículos de gasolina modernos con catalizadores de tres vías.

### **2.1.2 Dióxido de Azufre ( $SO_2$ )**

El dióxido de azufre es un gas ácido descolorido que es producido por la quema de combustibles fósiles para generar calor y electricidad. Puede ser encontrado en las áreas donde las centrales eléctricas utilizan el carbón o petróleo pesado como combustible.

La contaminación del dióxido de azufre es más intensa en condiciones inmóviles del aire, ya sea en verano o invierno. Como agente contaminador, se produce naturalmente como resultado de la actividad volcánica y la oxidación del azufre.

La política de construir chimeneas altas ha servido solamente para transportar el dióxido de azufre por medio del viento a otras regiones, donde la precipitación combinada con el dióxido de azufre forman la lluvia ácida. La lluvia ácida daña los árboles, otra vegetación, y las plantas. También daña edificios, causa la degradación del suelo y la contaminación del río, y ha dado lugar a la ciencia de la contaminación transfronteriza. También ha popularizado el uso de los modelos matemáticos de largo alcance de la calidad del aire, que son ampliamente utilizados ahora por los científicos ambientales.

El dióxido de azufre se oxida con la luz del sol para formar partículas secundarias, tales como sulfato del amonio y ácido sulfúrico. Las concentraciones grandes de dióxido de azufre pueden conducir a la irritación aguda de los ojos, de la nariz, y de la garganta. Sin embargo, el ataque químico del tejido pulmonar puede también deteriorar la respiración, teniendo como resultado la

bronquitis química. La gente que sufre de enfermedades pulmonares como el asma (cerca del 10 % de la población) experimentará una deterioración en su respiración como consecuencia de la exposición a las altas concentraciones del dióxido de azufre.

### 2.1.3 Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )

El término  $\text{NO}_x$  hace referencia al óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) y al dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), puesto que ambos compuestos se encuentran siempre juntos en la atmósfera. Mientras hay fuentes naturales de  $\text{NO}_x$ , tales como tormentas eléctricas e incendios forestales, la fuente principal es la combustión de combustibles fósiles. Las emisiones de los medios de transporte explican cerca del 50 % de  $\text{NO}_x$  por todo el mundo, con las centrales eléctricas explicando el casi 20 %. Las fuentes interiores de óxidos de nitrógeno incluyen fumar tabaco y el uso de equipos domésticos que funcionan a gas y aceite.

El problema con los óxidos del nitrógeno está muy asociado a regiones urbanas, donde la principal causa es el transporte.

Los óxidos de nitrógeno reaccionan con los hidrocarburos en presencia de la luz del sol brillante para formar ozono, que es uno de los agentes contaminantes secundarios más importantes de la atmósfera. Otra reacción fotoquímica en la atmósfera convierte el dióxido de nitrógeno en ácido nítrico y nitratos, que se pueden transportar a través del viento y ser removido por la lluvia para formar la lluvia ácida.

Algunos de los nitratos formados también permanecen en la atmósfera como partículas muy finas de menos de 10 micrones de diámetro ( $\text{MP}_{10}$ ), indicando que los óxidos de nitrógeno contribuyen a una proporción substancial de partículas secundarias.

El óxido de nitrógeno no es perjudicial para los seres humanos cuando es inhalado con las concentraciones presentes en la atmósfera. Sin embargo, el dióxido de nitrógeno, un gas rojizo, tiene efectos serios para la salud cuando es inhalado en altas concentraciones, y puede causar la inflamación aguda de los pasos de aire en concentraciones moderadas, particularmente en personas con asma. El período de vida atmosférico del dióxido de nitrógeno es típicamente un día, momento después del cual se convierte en ácido nítrico y otros compuestos químicos.

Sin duda, que controlar las emisiones del óxido de nitrógeno sigue siendo el desafío más grande para mejorar la calidad urbana del aire por todo el mundo, particularmente porque este agente contaminador es una fuente química importante en la formación de los agentes contaminadores secundarios tales como ozono y partículas.

#### **2.1.4 Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs)**

Los compuestos orgánicos volátiles, o VOCs, pueden ser hidrocarburos (alcanes, alkenes, y compuestos aromáticos), a los halocarburos (por ejemplo tricloroetileno), a oxigenantes (los alcoholes, los aldehidos, y las cetonas). Existen como vapor en la atmósfera, y se clasifican como agentes contaminadores. Los compuestos orgánicos volátiles contribuyen substancialmente a la formación de agentes contaminadores secundarios tales como ozono, por la reacción química en luz solar con los óxidos de nitrógeno.

El hidrocarburo más abundante de la atmósfera es el metano ( $CH_4$ ), y tiene un período de vida muy largo. Mientras que la reactividad del metano es muy lenta, hay por ejemplo una cantidad enorme de metano en la atmósfera que puede ser mirada como fuente inagotable de ozono. Como tal, hace la contribución más grande al nivel de ozono. VOCs son originados por muchas fuentes - móviles, estacionarias, y naturales- y algunas, tales como benceno y 1,3-butadieno, están mucho en el ojo público debido a sus características cancerígenas.

Los árboles y las plantas son fuentes naturales de VOC, y emiten uno de los hidrocarburos más reactivos en términos de formación del ozono.

Los VOCs son de creciente preocupación de los encargados técnicos en la industria, quienes están supervisando cuidadosamente sus productos. Los fabricantes de vehículos y las compañías petroleras realizan medidas especiales en el escape y las emisiones evaporativas en los vehículos, por lo que los gases son analizados en términos de cada componente del hidrocarburo. Los fabricantes químicos están revisando la composición de sus productos (por ejemplo, según lo utilizado en pinturas decorativas y el acabado del vehículo) con el objeto de mejorar la calidad del aire.

Aunque los VOCs son de especial preocupación en meses los del verano, debido a las reacciones fotoquímicas que generan ozono, algunos hidrocarburos son de preocupación todo el año, destacándose el benceno y el 1.3-butadieno, particularmente debido a sus impactos adversos en la salud humana.

### 2.1.5 Hidrocarburos Totales (HCT)

Las emisiones de hidrocarburos no quemados consisten en combustible no quemado o quemado en forma parcial. El término hidrocarburo significa compuesto orgánico en estado gaseoso; hidrocarburos sólidos son parte del material particulado. El mecanismo que lidera las emisiones de hidrocarburos desde el motor diesel es completamente diferente al que prepondera en los motores a gasolina. En este último, una mezcla casi homogénea de aire-combustible es comprimida, y la llama pasa a través de la cámara de combustión. Las emisiones de hidrocarburos aparecen en el motor a gasolina cuando la mezcla aire-combustible se esconde en lugares inaccesibles a la llama. El lugar más significativo es el volumen contenido entre el pistón y la pared del cilindro, sobre el anillo del pistón. En un motor diesel sólo el aire es comprimido dentro de este volumen. En efecto, esto reduce el aire disponible para la combustión, pero esto no permite que una importante cantidad de combustible escape de la combustión. En el motor diesel, con una combustión no homogénea, las emisiones de HCT resultan de problemas de la mezcla de aire y combustible, y no se ven afectadas por la razón aire-combustible. Existen dos mecanismos principales por los cuales el combustible escapa de la combustión principal en un motor diesel:

- Sobre-mezcla, regiones de extrema pobreza formadas antes de la ignición, y
- Mezclas bajas de combustible inyectado a baja velocidad cerca del final de la combustión.

### 2.1.6 Particulado o Partículas

Una preocupación considerable está siendo expresada por la *World Health Organization* (WHO) sobre el impacto en la salud del material particulado aerotransportable o partículas suspendidas en la atmósfera. Estas partículas están clasificadas de acuerdo a su diámetro. Los de especial preocupación en los seres humanos son los de 10 micrómetros de diámetro o menos. Hay tres principales fuentes de partículas de este tamaño:

- Partículas emitidas desde los motores diesel, usualmente menores que 2.5 micrometros de diámetro.
- El humo acarreado desde la extracción y combustión del carbón, el polvo levantado por los vehículos en los caminos, muchos de los cuales son más gruesos y superiores a 2.5 micrometros de diámetro.
- Partículas secundarias de menos de 2,5 micrómetros de diámetro. Éstos se forman a partir de la oxidación fotoquímica del dióxido de sulfuro y del dióxido de nitrógeno para formar

principalmente los sulfatos y los nitratos de amonio, así como la formación de aerosoles orgánicos secundarios de la degradación química de hidrocarburos.

Las primeras 2 fuentes de partículas están clasificadas como primarias, porque son emitidas directamente sobre la atmósfera y tienen un impacto inmediato sobre la concentración de  $PM_{10}$ , sin experimentar otro proceso de reacción química. Estas partículas ( $PM_{10}$ ) son de peculiar atención para la salud, porque estas pequeñas partículas alcanzan la zona más profunda del pulmón.

### **2.1.7 Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )**

El dióxido de carbono está aumentando en la atmósfera debido al proceso de combustión envuelto en el quemado de petróleo, carbón y gas. Es uno de los más abundante entre los gases de efecto invernadero, comprendiendo el 72 % del total en peso, entre otros están el metano, clorofluorocarbonos (CFCs), y óxidos nitrosos.

La tierra se mantiene caliente por la energía solar atrapada por la atmósfera. Es aceptado que la temperatura de la tierra está aumentando aproximadamente  $1^\circ C$  cada treinta años - un proceso conocido extensamente como calentamiento global.

El dióxido de carbono no es un agente contaminante que concierne a la salud por sí mismo; es la contribución al calentamiento global lo que está causando preocupación, y está forzando a los gobiernos a convenir reducciones de este gas durante la próxima década, un caso notable fue la Conferencia de Líderes del Mundo de Kyoto en 1998.

Actualmente, el transporte explica el 25 % de emisiones de dióxido de carbono y la presión de aumentar los volúmenes de tráfico es enorme. Así, ciertas nacionales están tasando el combustible con la esperanza de curvar el crecimiento de ser propietarios de vehículos.

## **2.2 Sistemas de análisis de medición de gases contaminantes**

Algunos de los analizadores para medir la cantidad emitida de gases por agentes contaminantes, tales como  $CO_2$  (Dióxido de Carbono), THC (Hidrocarburos Totales),  $NO_x$  (Óxidos de Nitrógeno), ente otros, son los que se describen a continuación.

### 2.2.1 Analizador NDIR (Detector infrarrojo no dispersivo)

El analizador NDIR es principalmente utilizado para la determinación de concentraciones en volumen de CO y CO<sub>2</sub> en los gases de escape.

Un analizador NDIR se basa en el mismo principio de absorción de la radiación infrarroja (IR) que hace que los gases de efecto invernadero jueguen un papel protagonista. Un analizador NDIR consiste en una fuente Infrarroja en un extremo de este y un detector Infrarrojo en el otro, separados por una cámara donde se introduce un gas. El gas en cuestión absorbe parte de la radiación IR que proviene de la fuente y el detector de IR convierte en voltaje la dosis de radiación infrarroja que le llega. De esta manera si la concentración de CO o CO<sub>2</sub> presente en la muestra de gas (aire ambiente, por ejemplo) varía, la señal en el detector también lo hará. Haciendo circular un gas con una concentración de CO<sub>2</sub> conocida, se puede calibrar el analizador de tal manera que el voltaje de salida del detector se puede convertir directamente en concentraciones de CO<sub>2</sub>. Aunque el principio físico es extremadamente simple, la metodología experimental se complica enormemente debido a la falta de linealidad del detector, al ruido ocasionado por la absorción de IR por parte del vapor de agua atmosférico (importante absorbente de IR, y tremendamente variable), las concentraciones de CO<sub>2</sub> de los gases de referencia debido a derivas en los cilindros, etc.

Un esquema del NDIR es el que se puede apreciar en la figura 2.1

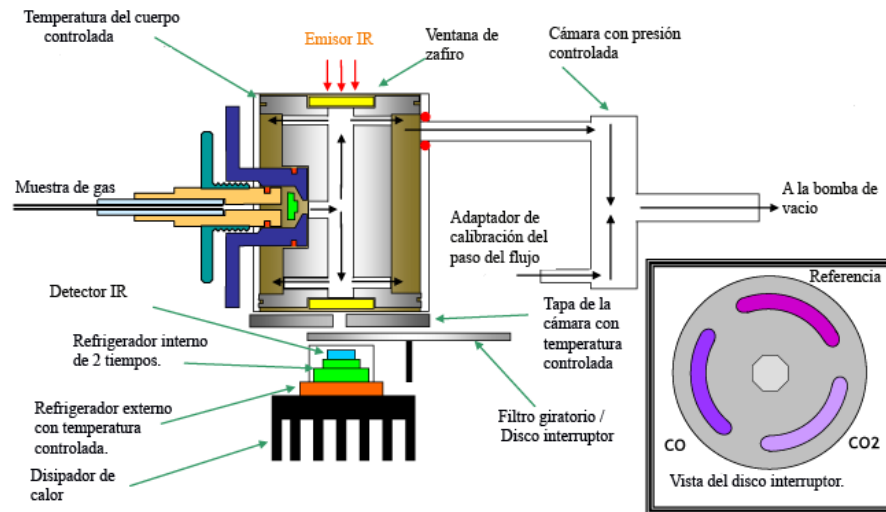


Figura 2.1: Esquema del funcionamiento del analizador NDIR.

### 2.2.2 Analizador NDUV (Detector ultravioleta no dispersivo)

El analizador NDUV, se puede utilizar para medir las concentraciones crudas de  $\text{NO}_x$  en el escape. Se acepta generalmente un NDUV para la medición de  $\text{NO}_x$ , aún cuando el equipo mide sólo NO y  $\text{NO}_2$ , puesto que los motores y los sistemas convencionales de post-tratamiento no emiten cantidades significativas de otras especies de  $\text{NO}_x$ .

Principio de medición: Los Hidrocarburos y  $\text{H}_2\text{O}$  pueden interferir positivamente con el analizador NDUV, causando una respuesta similar a la del  $\text{NO}_x$ . Si el analizador NDUV usa algoritmos de compensación que utilizan medidas de otros gases, para encontrar esta verificación de la interferencia, simultáneamente conduce tales medidas a probar los algoritmos durante la verificación de la interferencia del analizador.

Previo al análisis en el NDUV, la muestra del escape se seca con un filtro a temperatura ambiente, seguido por un enfriador termoeléctrico. Esto quita los hidrocarburos pesados encontrados en el flujo del escape, que causaría de una u otra manera la contaminación del lente óptico.

### 2.2.3 Analizador FID (Detector de ionización de llama)

El FID, es un detector utilizado en la cromatografía de gases, específicamente para medir la cantidad total de hidrocarburos no quemados a la salida del escape (Figura 2.2). Es uno de los detectores más usados y versátiles. Básicamente es un quemador de hidrógeno/oxígeno, donde se mezcla el efluente de la columna (gas portador y analito) con hidrógeno. Inmediatamente, este gas mezclado se enciende mediante una chispa eléctrica, produciéndose una llama de alta temperatura. La mayoría de compuestos orgánicos al someterse a altas temperaturas pirolizan y se producen iones y electrones, que son conductores eléctricos. Este hecho se aprovecha estableciendo una diferencia de potencial de unos centenares de voltios entre la parte inferior del quemador y un electrodo colector situado por encima de la llama. La corriente generada es baja (del orden de los  $10^{-12}[\text{A}]$ ), por lo tanto debe ser amplificada mediante un amplificador de alta impedancia.

El proceso de ionización que se da en la llama es complejo, pero se puede aproximar el número de iones producidos al número de átomos de carbono transformados en la llama. Esto produce que sea un detector sensible a la masa (al número de átomos de carbono que salen de la columna) más que a la concentración, por lo tanto, no le afectan demasiado los cambios en el flujo de salida.



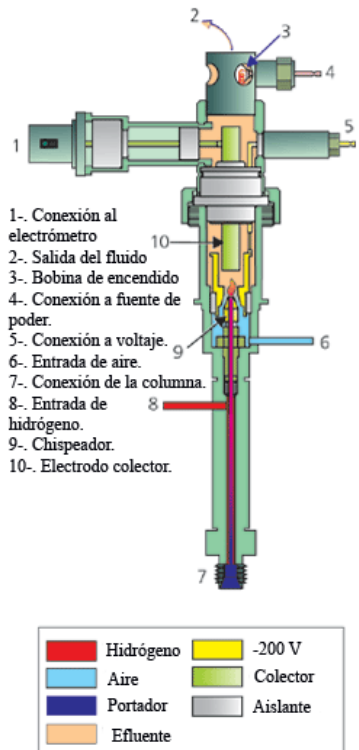


Figura 2.2: FID.

## 2.2.4 Analizador de quimiluminiscencia

El principio de operación de estos analizadores se basa en el método de quimiluminiscencia. El instrumento mide la intensidad luminosa de la reacción quimiluminiscente entre el óxido nítrico (NO) y el ozono (O<sub>3</sub>). Está diseñado para medir la concentración de óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno totales (NO<sub>x</sub>). La determinación de NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> se realiza a partir de la reacción en fase gaseosa del óxido nítrico (NO) y el ozono (O<sub>3</sub>), la cual produce una emisión de luz característica (quimiluminiscencia), cuya intensidad es proporcional a la concentración de óxido nítrico en la muestra. Específicamente:



La emisión de luz (hv) se produce cuando las moléculas excitadas de NO<sub>2</sub> decaen hacia estados de menor energía. Para medir el dióxido de nitrógeno es necesario reducir el NO<sub>2</sub> a NO, para este efecto se utiliza un convertidor catalítico de molibdeno calentado a 315°C.

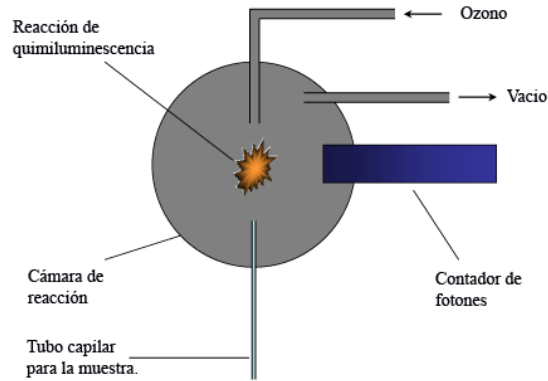


Figura 2.3: Esquema del funcionamiento del analizador de quimiluminiscencia.

La muestra de aire entra al analizador a través de un capilar para controlar el flujo de entrada y es dirigida hacia una válvula solenoide de 3 vías. El solenoide puede dirigir la muestra de aire directamente a la cámara de reacción o a través del convertidor de molibdeno. Cuando la muestra de aire pasa a través de la cámara de reacción la luminiscencia emitida corresponderá a la concentración de NO presente en la muestra ( $NO_{\text{muestra}}$ ), cuando la muestra pasa previamente por el convertidor la luminiscencia emitida corresponderá a la suma de NO muestra más el  $NO_2$  reducido, la concentración determinada es equivalente a la concentración total de óxidos de nitrógeno  $NO_x$  ( $NO + NO_2 = NO_x$ ). La concentración de  $NO_2$  se calcula de la diferencia entre NO y  $NO_x$ .

## **2.3 Influencias del Motor en las emisiones**

Dado que las emisiones de gases contaminantes dependen directamente del estado de funcionamiento del motor, se mostrarán diversos factores que alteran estas emisiones dependiendo del tipo de motor.

### **2.3.1 Motores Otto**

Las anomalías en el funcionamiento del motor, van directamente relacionadas en las proporciones de los diferentes gases emitidos por el escape del vehículo.

#### **Emisiones de Monóxido de Carbono (CO)**

Las emisiones de monóxido de carbono son causadas por un exceso de gasolina en la mezcla. La falta de oxígeno para formar el dióxido de carbono origina la aparición de altas concentraciones de monóxido. Es necesario reducir la proporción de gasolina para que la emisión de CO vuelva a los niveles adecuados.

La combustión incompleta origina depósitos de carboncillo en la culata, en los electrodos de las bujías, en las válvulas y en la cabeza del pistón. Estos depósitos originan puntos calientes dando lugar a detonaciones y funcionamiento irregular del motor en aceleraciones.

En los vehículos dotados de carburador, las emisiones elevadas de CO también pueden estar causadas por un ralentí irregular o defectos en el sistema de arranque en frío.

El filtro de aire sucio o conductos de aire obstruidos también incrementan las emisiones de CO por la falta de aire en la admisión. Lo mismo sucede cuando la junta de culata está quemada o el aceite lleva muchos kilómetros sin cambiarse, ya que genera depósitos de carboncillo.

Los valores medidos de CO se indican en porcentaje sobre el volumen total de gases emitidos. El resultado obtenido tiene que estar dentro de los márgenes indicados por el fabricante. Como norma general se pueden considerar los siguientes valores de CO:

- Entre 2,5 y 0,5% para motores alimentados por carburador.

- Entre 1,5 y 0,5 % para motores alimentados por inyección.
- Entre 0,3 y 0,1 % para motores provistos de catalizador.

### **Emisión de Hidrocarburos HC**

La aparición de partículas de hidrocarburos sin quemar es causada por un exceso de gasolina en la mezcla. La falta de oxígeno impide que la totalidad de la gasolina se queme, resultando una combustión incompleta y dando lugar a emisiones de partículas de combustible (hidrocarburos) por el escape. Para evitar las emisiones de hidrocarburos es necesario reducir la cantidad de gasolina que se introduce al motor. Las emisiones de hidrocarburos también pueden estar causadas por deficiencias en el sistema de encendido, una chispa eléctrica pobre no es capaz de asegurar la completa combustión de la mezcla.

Las averías del sistema de encendido suelen ser a causa de:

- Bujías en mal estado con electrodos desgastados, cerrados o con depósitos de carbonilla.
- Excesivo avance del encendido.
- Alta resistencia en el circuito de alta tensión: cables, distribuidor o bobina.

Una mezcla pobre también puede causar altos valores de HC y puede ser originada por:

- Mal ajuste del sistema de alimentación.
- Inyectores sucios o bloqueados, tanto en posición abierta como cerrada.
- Entradas de aire por la zona de admisión.
- Incorrecto reglaje de válvulas.
- Periodo de inyección incorrecto, por defecto o por exceso.
- Presión de combustible insuficiente.
- Sensores de temperatura con un incorrecto funcionamiento.

La combustión del aceite también genera altos valores de HC emitidos y su origen puede ser:

- Excesivo desgaste de los segmentos y falta de compresión en los cilindros.

- Holgura excesiva de las válvulas en su guía, o sus retenes en mal estado.
- Fuga de aceite hacia los cilindros por la junta de culata.

La medición de los hidrocarburos se expresa en partes por millón (ppm) y los resultados obtenidos deben estar dentro de los márgenes indicados por el fabricante. Aunque estos valores se incrementan según el uso del vehículo y el desgaste de sus piezas, se pueden considerar valores estimados los siguientes:

- Hasta 300 ppm para motores alimentados por carburador.
- Entre 50 y 150 ppm para motores alimentados por inyección.
- Menos de 50 ppm para motores provistos de catalizador.

### **Emisiones de Oxígeno O<sub>2</sub>**

La presencia de oxígeno en los gases de escape indica que la combustión no es perfecta. El oxígeno indica que parte del combustible no se ha quemado, dando origen a emisiones de hidrocarburos y de monóxido de carbono. Las mezclas pobres originan una gran emisión de oxígeno y las mezclas ricas casi las anulan por completo, pero sin llegar hasta el cero.

Una alta emisión de oxígeno puede ser causada por:

- Defectos en el sistema de encendido por irregularidades en el salto de la chispa.
- Tomas de aire a través del sistema de escape
- Insuficiente introducción de la sonda por tubo de escape
- Tomas de aire en el sistema de admisión originando mezclas muy pobres.

La medición del oxígeno se realiza sobre la totalidad de los gases emitidos y se expresa como un porcentaje. Los resultados obtenidos deben estar dentro de los márgenes indicados por el fabricante. Pudiendo considerar los siguientes datos como orientativos:

- Entre 1,5 y 0,7 % en motores alimentados por carburador.
- Entre 0,8 y 0,4 % en motores alimentados por inyección.
- Entre 0,4 y 0,1 % en motores provistos de catalizador.

### 2.3.2 Motores Diesel

La formación de  $NO_x$  depende directamente de la temperatura. Temperaturas de combustión más altas producen  $NO_x$  mayores. Por ende, el control de  $NO_x$  en un motor, se logra al reducir las temperaturas máximas de combustión y la duración de estas altas temperaturas en la cámara de combustión. El MP, por otro lado, es principalmente el resultado de la combustión incompleta de combustible diesel. Las tecnologías de control para reducir MP generalmente se enfocan en mejorar la combustión del combustible, lo que trae como resultado temperaturas de combustión y  $NO_x$  mayores. Algunas estrategias usadas actualmente para controlar las emisiones diesel de  $NO_x$  y MP incluyen turboalimentadores, refrigeración complementaria (intercooling), cambios del diseño de la cámara de combustión, retardamiento de la sincronía de inyección, e inyección de combustible a alta presión.

Motores diesel avanzados y sistemas de control de emisiones están comenzando a aparecer en los países industrializados. A modo de ejemplo, las siguientes características podrían ser incluidas separadamente o en combinación en el sistema de control de emisiones de escape.

- Inyección directa (DI)
- Forma de cámara de combustión óptima y rotación del aire de entrada
- Turbo alimentador (compresión del aire de entrada por sobre condiciones ambientales)
- Refrigeración complementaria (Intercooling)

### 2.3.3 Tecnología Diesel Actual

El turboalimentador reduce tanto las emisiones de  $NO_x$  y de MP en cerca de un 33 %, comparado con un motor naturalmente aspirado. El turboalimentador aumenta la presión (y temperatura) del aire que entra al motor. Esto permite que más combustible se agregue para incrementar la potencia de salida y al mismo tiempo se inhibe la formación de MP. La potencia para manejar el turboalimentador se extrae del flujo de escapes del motor. En otras palabras, el turboalimentador aumenta la potencia y eficiencia de un motor, lo que se puede traducir en menores emisiones.

El *intercooling* del aire turboalimentado desemboca en reducciones aún mayores de  $NO_x$  y MP al bajar la temperatura del aire cargado después de que éste ha sido calentado por el turboalimentador durante la compresión. El aire frío es más denso que el aire caliente y en consecuencia, esta aproximación complementa el turboalimentador al mejorar aún más el llenado del cilindro.

Cambios en el diseño de la cámara de combustión incluyen modificaciones a la forma de la cámara, ubicación del espiral de la inyección, volúmenes de fisura, y relaciones de compresión. Estos cambios pueden repercutir en reducciones considerables de  $\text{NO}_x$  y MP al cambiar las condiciones que ocurren durante la combustión.

El retardo en la sincronización de la inyección se usa para reducir la temperatura máxima de llama y por ende las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Sin embargo, el retardo de sincronización típicamente baja la eficiencia, causando mayor consumo de combustible y un aumento en las emisiones de MP. La inyección de combustible a alta presión puede recuperar algo de la pérdida de eficiencia al mejorar la atomización del spray de combustible y utilización de aire, lo que provoca una combustión más completa.

## 2.4 Cálculo de Factores de Emisión

Para obtener los factores de emisión de cada contaminante, se deben obtener las emisiones segundo a segundo de cada agente contaminante. Los equipos entregan concentraciones de emisión en [%] o en [ppm] de cada agente. A continuación se describe la metodología de cálculo para los factores de emisión.

Primero que nada se debe determinar la concentración de cada agente contaminante, el flujo de escape, la densidad de cada gas y la distancia recorrida durante el periodo de medición. Luego el factor de emisión de cada contaminante en [g/km] se obtiene de la manera que sigue.

### 2.4.1 Factor de Emisión para Hidrocarburos Totales (HC)

$$FE_{HC} = \sum_{i=0}^n \frac{HC_{conc_i} \times 10^{-6} \times Flujo_i \times \rho_{HC}}{Distancia\ recorrida[km]} \quad (2.1)$$

donde:

- $FE_{HC}$  es el factor de emisión para los Hidrocarburos Totales expresado en  $\left[\frac{g}{km}\right]$ ,
- $HC_{conc_i}$  es la concentración de Hidrocarburos medida por el analizador FID en [ppmC] en el instante  $i$ ,
- $Flujo_i$  es el flujo del escape medido en el instante  $i$  en  $\left[\frac{ft^3}{seg}\right]$ ,

- $\rho_{HC} = 16,33 \left[ \frac{g}{ft^3} \right]$  es la densidad de los hidrocarburos en el gas de escape, asumiendo un promedio de tasa carbono-hidrógeno de 1:1.85, a 20°C y 101[kPa] [4].

#### 2.4.2 Factor de Emisión para Monóxido de Carbono (CO)

$$FE_{CO} = \sum_{i=0}^n \frac{CO_{conc_i} \times 10^{-2} \times Flujo_i \times \rho_{CO}}{Distancia recorrida[km]} \quad (2.2)$$

donde:

- $FE_{CO}$  es el factor de emisión para el Monóxido de Carbono expresado en  $\left[ \frac{g}{km} \right]$ ,
- $CO_{conc_i}$  es la concentración de Monóxido de Carbono medida por el analizador NDIR en [%] en el instante  $i$ ,
- $Flujo_i$  es el flujo del escape medido en el instante  $i$  en  $\left[ \frac{ft^3}{seg} \right]$ ,
- $\rho_{CO} = 32,97 \left[ \frac{g}{ft^3} \right]$  es la densidad del Monóxido de Carbono, a 20°C y 101[kPa] [4].

#### 2.4.3 Factor de Emisión para Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

$$FE_{NO_x} = \sum_{i=0}^n \frac{NOx_{conc_i} \times 10^{-6} \times Flujo_i \times \rho_{NO_x}}{Distancia recorrida[km]} \quad (2.3)$$

donde:

- $FE_{NO_x}$  es el factor de emisión para los óxidos de Nitrógeno expresado en  $\left[ \frac{g}{km} \right]$ ,
- $NOx_{conc_i}$  es la concentración de óxidos de Nitrógeno medida por el analizador NDUV en [ppm] en el instante  $i$ ,
- $Flujo_i$  es el flujo del escape medido en el instante  $i$  en  $\left[ \frac{ft^3}{seg} \right]$ ,
- $\rho_{NO_x} = 54,16 \left[ \frac{g}{ft^3} \right]$  es la densidad del óxido de Nitrógeno en el gas de escape, asumiendo que están en la forma de dióxido de nitrógeno, a 20°C y 101[kPa] [4].



#### 2.4.4 Factor de Emisión para Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

$$FE_{CO_2} = \sum_{i=0}^n \frac{CO2_{conc_i} \times 10^{-2} \times Flujo_i \times \rho_{CO_2}}{Distancia recorrida[km]} \quad (2.4)$$

donde:

- $FE_{CO_2}$  es el factor de emisión para el Dióxido de Carbono expresado en  $\left[\frac{g}{km}\right]$ ,
- $CO2_{conc_i}$  es la concentración de Dióxido de Carbono medida por el analizador NDIR en [%] en el instante  $i$ ,
- $Flujo_i$  es el flujo del escape medido en el instante  $i$  en  $\left[\frac{ft^3}{seg}\right]$ ,
- $\rho_{CO_2} = 51,81 \left[\frac{g}{ft^3}\right]$  es la densidad del dióxido de Carbono, a 20°C y 101[kPa] [4].

#### 2.4.5 Factor de Emisión para Material Particulado (MP)

$$FE_{MP} = \sum_{i=0}^n \frac{FC \times Flujo_i \times FD_i \times MP_i \times 10^{-6}}{Distancia recorrida[km]} \quad (2.5)$$

donde:

- $FE_{MP}$  es el factor de emisión para el Material Particulado expresado en  $\left[\frac{g}{km}\right]$ ,
- $FC = 0,0004719$  es el factor de conversión de unidades, para pasar de  $\left[\frac{ft^3}{min}\right]$  a  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ ,
- $Flujo_i$  es el flujo del escape en el instante  $i$  en  $\left[\frac{ft^3}{seg}\right]$ ,
- $FD_i$  es el factor de dilución en el instante  $i$ ,
- $MP_i$  es la masa de material particulado medido por el equipo DMM-230 en el instante  $i$  en  $[\mu g]$ .

## 2.5 Métodos de Muestreo

Para el análisis de los datos entregados por los equipos, es necesario procesarlos por la influencia de la temperatura y la humedad relativa sobre estos. Además, los analizadores entregan información de cada contaminante en unidades de partes por millón [ppm] y en porcentaje de volumen [%]. Es por esto que para determinar los factores de emisión, los cuales están determinados en

$\left[\frac{g}{km}\right]$  se requiere un post-procesamiento.

En consecuencia de lo anterior, los datos entregados por los equipos serán procesados tanto por temperatura y humedad relativa como por alineamiento (*off set*) detallándose a continuación.

### 2.5.1 Corrección por Temperatura y Humedad Relativa

En las emisiones del escape del vehículo, las concentraciones de cada contaminante son medidos en una base seca. Por otra parte, los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) dependen considerablemente de las condiciones ambientales en las cuales están siendo medidos, es decir, temperatura y humedad relativa. Es por esto que para determinar los factores de emisión, específicamente los  $NO_x$ , se deben aplicar ciertas constantes que dependen de las condiciones anteriormente señaladas, así como del tipo de combustible que se está utilizando.

#### Cálculo del factor de corrección de base seca a base húmeda

Para calcular las emisiones másicas usando el flujo del escape, toda concentración de gas medida en una base seca debe ser primero convertida a una concentración húmeda. Esto es porque cuando los analizadores van a medir, el vapor de agua es previamente removido de la concentración, y los resultados estarán referidos a una base seca. Esto sucede para la mayoría de los gases excepto para los Hidrocarburos totales (THC), los que ya están referidos a una base húmeda. La concentración húmeda se puede calcular al multiplicar la concentración seca (medida) por el factor de conversión de seco a húmedo [5],  $K_{s-h}$ :

$$[conc]_{humeda} = [conc]_{seca} \times K_{s-h}$$

El factor de corrección de seco a húmedo es una función de la concentración del vapor de agua que fue removido de la muestra por condensación.

$$K_{s-h} = 1 - [H_2O]_{condensado}$$

El agua removida por condensación es una función de la humedad final de la muestra seca y la cantidad de agua en el escape antes de ser secada.

$$[H_2O]_{condensado} = [H_2O]_{escape} - [H_2O]_{residual}$$

La siguiente ecuación puede ser usada para determinar el factor de corrección en la conversión de las mediciones en base seca a una base húmeda [6]:

$$K_{s-h} = \frac{1}{1 + \alpha \times 0,005 \times [CO_{dry}(\%) + CO_{2\ dry}(\%)] - 0,01 \times H_{2\ dry}(\%)} \quad (2.6)$$

donde:

$$H_{2\ dry}(\%) = \frac{0,5 \times \alpha \times CO_{dry} \times [CO_{dry}(\%) + CO_{2\ dry}(\%)]}{CO_{dry}(\%) + 3 \times CO_{2\ dry}(\%)}$$

$\alpha = H/C$  razón atómica del combustible de ensayo.

### Cálculo del factor de corrección de humedad para $NO_x$

Para corregir los efectos de la humedad en los resultados obtenidos para los óxidos de nitrógeno, deberán aplicarse las siguientes fórmulas según corresponda:

- Motor Diesel [7]

$$K_H = \frac{1}{1 - 0,0182 \times (H - 10,71)} \quad (2.7)$$

- Motor de encendido por chispa (Otto) [7]

$$K_H = \frac{1}{1 - 0,0329 \times (H - 10,71)} \quad (2.8)$$

en que [7]:

$$H = \frac{6,211 \times R_a \times P_d}{P_B - \frac{P_d \times R_a}{100}} \quad (2.9)$$

donde:

$K_H$  = Factor de corrección por humedad para los óxidos de nitrógeno;

$H$  = humedad absoluta, expresada en gramos de agua por kilogramo de aire seco;

$R_a$  = humedad relativa del aire ambiente, expresada en porcentaje [%];

$P_d$  = presión de vapor saturado a la temperatura ambiente de bulbo seco, expresada en [kPa] o [mbar];

$P_B$  = presión atmosférica, expresada en  $[kPa]$  o  $[mbar]$ <sup>1</sup>.

La presión de vapor saturado a la temperatura ambiente de bulbo seco ( $P_d$ ) se puede calcular teniendo la temperatura del punto de condensación (Temperatura ambiente  $T_{pc}$ ) como sigue [8]:

$$P_d[kPa] = a + (b \times T_{pc}) + (c \times T_{pc}^2) + (d \times T_{pc}^3) + (e \times T_{pc}^4) + (f \times T_{pc}^5) \quad (2.10)$$

donde:

$a = 0,6109579$  constante,

$b = 4,440515 \times 10^{-2}$  constante,

$c = 1,425658 \times 10^{-3}$  constante,

$d = 2,629981 \times 10^{-5}$  constante,

$e = 3,115099 \times 10^{-7}$  constante,

$f = 2,201172 \times 10^{-9}$  constante.

### 2.5.2 Corregidos por Alineamiento

Los equipos que toman la muestra de los agentes contaminantes (Semtech-G y Semtech-D), para la obtención de los factores de emisión, cuentan con los analizadores antes descritos, los cuales a su vez cuentan con sistemas propios de análisis segundo a segundo, es decir, para el tiempo total transcurrido durante el circuito de prueba, los analizadores entregan las concentraciones de gases contaminantes para cada segundo transcurrido. Sin embargo, estos resultados dependen de las condiciones o estados de esfuerzo a los que está siendo sometido el motor, entonces para cada peak de velocidad, aceleración o desaceleración, los analizadores entregan también peaks. Estos resultados deben ser alineados con el flujo del escape del vehículo, medido por el EFM, el cual también entrega datos segundo a segundo.

Los datos de gases contaminantes no están necesariamente alineados segundo a segundo con los datos del flujo, debido a la independencia de cada analizador. A continuación, en la figura 2.4, se puede apreciar la no sincronización que hay entre los analizadores, por lo que hay que aplicar los llamados *offset*.

---

<sup>1</sup>Tanto para  $P_d$  como para  $P_B$  deben utilizarse las mismas unidades

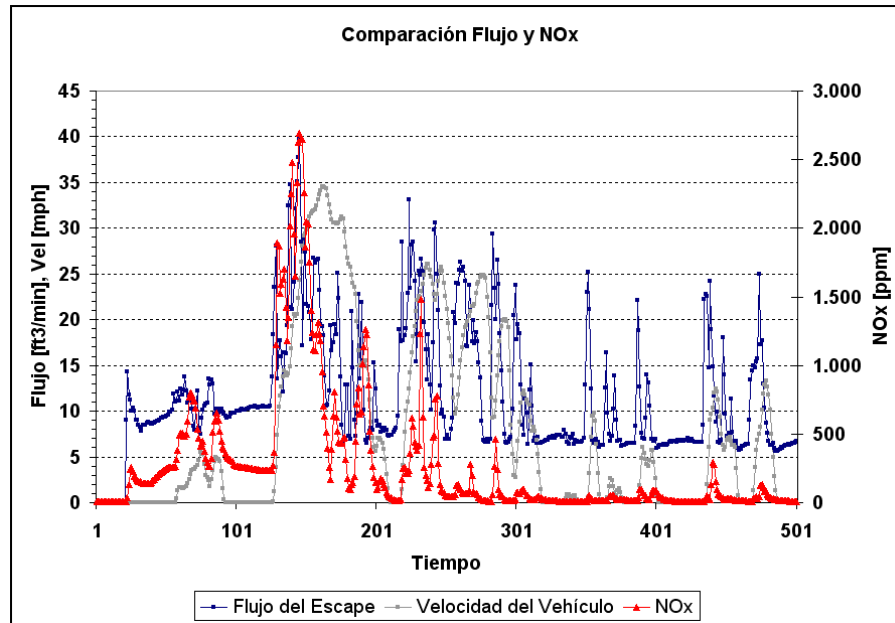


Figura 2.4: Muestra de la no sincronización de los analizadores.

Los problemas que se presentan durante la realización de las pruebas, es que si bien se hace un alineamiento al inicio del muestreo de cada analizador, a medida que transcurre la prueba, se producen nuevos desfases con respecto al flujo de salida del escape, que es el principal indicador de los estados en los que se encuentra el motor, como también lo es la velocidad. Un análisis importante para el desarrollo de este proyecto, es la posibilidad de establecer nuevos alineamientos u offset por intervalos para cada prueba.

## 2.6 Modelo de cálculo de Factores de Emisión

En la actualidad existen diversos programas que sirven para calcular factores de emisión, entre los que se puede destacar el COPERT III<sup>2</sup>.

Este modelo fue propuesto para los países miembros de la Agencia Europea de Medioambiente (EEA), el cual compila y actualiza los resultados de CORINAIR<sup>3</sup> sobre factores de emisión de distintas categorías de vehículos terrestres.

COPERT III asume que los factores de emisión dependen sólo de la *Velocidad promedio del*

<sup>2</sup>Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport

<sup>3</sup>CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic

vehículo, la que debe ser estimada para cada categoría y clase vehicular.

A continuación, desde la tabla 2.1 hasta la tabla 2.8 se muestran los factores de emisión desarrollado por el modelo COPERT III [9] para distintas directivas o normativas que serán aplicadas a las tecnologías utilizadas en este trabajo.

Tabla 2.1: Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos de pasajeros a gasolina [9].

Tipo de Vehículo	Contaminante	Cilindrada [l]	Rango de Velocidad [ $\frac{km}{h}$ ]	Factor de Emisión [ $\frac{g}{km}$ ]
Convencionales	HC	$CC < 1,4$	10 - 130	$2.189 - 0.034V + 0.000201V^2$
		$1.4 < CC < 2$	10 - 130	$1.999 - 0.034V + 0.000214V^2$
Convencionales	CO	$CC < 1,4$	10 - 130	$14.577 - 0.294V + 0.002478V^2$
		$1.4 < CC < 2$	10 - 130	$8.273 - 0.1511V + 0.000957V^2$
Convencionales	NO <sub>x</sub>	$CC < 1,4$	10 - 130	$-0.926 + 0.7192 \times \ln(V)$
		$1.4 < CC < 2$	10 - 130	$1.387 - 0.0014V + 0.000247V^2$
EURO I o 91/441/EEC	HC	$CC < 1,4$	5 - 130	$0.628 - 0.01377V + 8.52 \times 10^{-5}V^2$
		$1.4 < CC < 2$	5 - 130	$0.4494 - 0.00888V + 5.21 \times 10^{-5}V^2$
		$CC > 2$	5 - 130	$0.5086 - 0.00723V + 3.3 \times 10^{-5}V^2$
EURO I o 91/441/EEC	CO	$CC < 1,4$	5 - 130	$9.846 - 0.2867V + 0.0022V^2$
		$1.4 < CC < 2$	5 - 130	$9.617 - 0.245V + 0.0017285V^2$
		$CC > 2$	5 - 130	$12.826 - 0.2955V + 0.00177V^2$
EURO I o 91/441/EEC	NO <sub>x</sub>	$CC < 1,4$	5 - 130	$0.5595 - 0.01047V + 10.8 \times 10^{-5}V^2$
		$1.4 < CC < 2$	5 - 130	$0.526 - 0.0085V + 8.54 \times 10^{-5}V^2$
		$CC > 2$	5 - 130	$0.666 - 0.009V + 7.55 \times 10^{-5}V^2$

Tabla 2.2: Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos de pasajeros a gasolina, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 91/441/EEC [9].

Cilindrada [l]	Vehículos de pasajeros a gasolina	HC [%]	CO [%]	NO <sub>x</sub> [%]
$CC < 1,4$	EURO II - 94/12EC	79	32	64
	EURO III - 98/69/EC	85	44	76
$1,4 < CC < 2$	EURO II - 94/12EC	79	32	64
	EURO III - 98/69/EC	86	44	76
$CC > 2$	EURO II - 94/12EC	76	32	64
	EURO III - 98/69/EC	84	44	76

Tabla 2.3: Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos comerciales a gasolina menores a 3.5[ton] [9].

<b>Tipo de Vehículo</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Rango de Velocidad <math>[\frac{km}{h}]</math></b>	<b>Factor de Emisión <math>[\frac{g}{km}]</math></b>
Convencionales	HC	10 - 110	$5.4734 - 0.117V + 67.7 \times 10^{-5}V^2$
Convencionales	CO	10 - 110	$57.789 - 1.5132V + 0.01104V^2$
Convencionales	NO <sub>x</sub>	10 - 110	$1.9547 + 0.0179V$
EURO I o 93/59/EEC	HC	10 - 120	$0.5462 - 0.01047V + 5.77 \times 10^{-5}V^2$
EURO I o 93/59/EEC	CO	10 - 120	$19.127 - 0.5215V + 0.0037V^2$
EURO I o 93/59/EEC	NO <sub>x</sub>	10 - 120	$0.666 - 0.009V + 7.55 \times 10^{-5}V^2$

Tabla 2.4: Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos comerciales a gasolina, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 93/59/EEC [9].

<b>Vehículos comerciales a gasolina</b>	<b>HC [%]</b>	<b>CO [%]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [%]</b>
EURO II - 96/69/EC	76	39	66
EURO III - 98/69/EC	86	48	79

Tabla 2.5: Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos de pasajeros diesel menores a 2.5[ton], que cumplen con la directiva 91/441/EEC [9].

Contaminante	Cilindrada [l]	Rango de Velocidad $\left[\frac{km}{h}\right]$	Factor de Emisión $\left[\frac{g}{km}\right]$
HC	Todas	10 - 130	$0.1978 - 0.003925V + 2.24 \times 10^{-5}V^2$
CO	Todas	10 - 120	$1.4497 - 0.03385V + 21 \times 10^{-5}V^2$
NO <sub>x</sub>	Todas	10 - 120	$1.4335 - 0.026V + 17.52 \times 10^{-5}V^2$
MP	Todas	10 - 130	$0.1804 - 0.004415V + 3.33 \times 10^{-5}V^2$

Tabla 2.6: Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos de pasajeros diesel, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 91/441/EEC [9].

Vehículos de pasajeros Diesel	HC [%]	CO [%]	NO <sub>x</sub> [%]	MP [%]
EURO II - 94/12/EC	0	0	0	0
EURO III - 98/69/EC Stage 2000	15	0	23	28
EURO IV - 96/69/EC Stage 2005	31	0	47	55

Tabla 2.7: Dependencia de la velocidad sobre los factores de emisión en vehículos comerciales diesel menores a 3.5[ton], que cumplen con la directiva 93/59/EEC [9].

Contaminante	Rango de Velocidad $\left[\frac{km}{h}\right]$	Factor de Emisión $\left[\frac{g}{km}\right]$
HC	10 - 110	$0.2162 - 0.00284V + 1.75 \times 10^{-5}V^2$
CO	10 - 110	$1.076 - 0.026V + 22.3 \times 10^{-5}V^2$
NO <sub>x</sub>	10 - 110	$2.0247 - 0.03181V + 24.1 \times 10^{-5}V^2$
MP	10 - 110	$0.1932 - 0.004885V + 4.5 \times 10^{-5}V^2$

Tabla 2.8: Porcentaje de reducción sobre las emisiones para futuros vehículos comerciales diesel, aplicado a vehículos que cumplen con la directiva 93/59/EEC [9].

Vehículos comerciales Diesel	HC [%]	CO [%]	NO <sub>x</sub> [%]	MP [%]
EURO II - 96/69/EC	0	0	0	0
EURO III - 98/69/EC Stage 2000	38	18	16	33
EURO IV - 96/69/EC Stage 2005	77	35	32	65



## 2.7 Normativa de Emisión de Contaminantes

Norma de Emisión son aquellos valores máximos, de gases y partículas, que un vehículo puede emitir bajo condiciones normalizadas, a través del tubo de escape o por evaporación.

La importancia del control de las emisiones de  $\text{NO}_x$  al aire radica en que estos gases contaminantes provocan efectos adversos en la salud de las personas, tales como irritación en los pulmones y disminución de la resistencia ante enfermedades respiratorias, particularmente en individuos con enfermedades respiratorias pre-existentes, como asma. Además son gases precursores de otros dos contaminantes urbanos importantes:

- Ozono ( $\text{O}_3$ ) y
- Material Particulado.

La norma establece un método de medición y estándares adecuados para los vehículos en uso, capaz de detectar en forma más eficaz las altas emisiones de  $\text{NO}_x$ , o el uso de convertidores de baja eficiencia. Esto se traducirá en la reducción de emisiones que hoy día estos vehículos presentan por mantención o uso de convertidores inapropiados.

Dadas las particulares condiciones de presión y temperatura en las que se genera el  $\text{NO}_x$ , se requiere de un procedimiento de medición con carga. Esto es mediante el uso de un dinamómetro de chasis que oponga resistencia a la rodadura de los vehículos, para medir sus emisiones en condiciones normalizadas de velocidad y potencia. Un procedimiento de este tipo se encuentra estandarizado por la *Environment Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos de Norteamérica, en el documento *Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emisión Standards, Quality Control Requirements and Equipment Specifications, Technical Guidance*, el que se ha considerado como referencia para esta norma.

No obstante ser el objetivo de la norma el control de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , el cual corresponde a la suma de NO (óxido de nitrógeno) y  $\text{NO}_2$  (dióxido de nitrógeno), la Environment Protection Agency (EPA) define para el procedimiento antes indicado, solamente la medición del NO. Esto obedece a que los equipos de medición para determinar ambos componentes del  $\text{NO}_x$  resultan ser sofisticados y de alto costo. En todo caso, en los vehículos con motor de ciclo Otto, el NO es el componente de mayor magnitud dentro de las emisiones de  $\text{NO}_x$  (80 % a 95 % del los  $\text{NO}_x$  corresponde al NO), y en general su control permite, indirectamente el control de los  $\text{NO}_x$ . Asimismo, no es posible medir y controlar los NO (o  $\text{NO}_x$ ), con independencia de la medición del Monóxido

de Carbono (CO) y los Hidrocarburos (HC), puesto que en el proceso de combustión estos tres contaminantes se encuentran vinculados y por tanto, los límites para estos tres gases (NO, CO y HC), deben establecerse en conjunto, considerando su estrecha relación. Por lo anterior, deben considerarse también en esta norma los estándares para CO y HC, en el procedimiento de medición en carga.

Los vehículos motorizados livianos que ingresen al país, para circular, deberán reunir características técnicas que los habiliten para cumplir, en condiciones normalizadas, con los niveles máximos de emisión de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas. En las tablas 2.9 y 2.10 se detallan estos niveles máximos de emisión provenientes del sistema de escape para cada tipo de vehículo [10]:

Tabla 2.9: Vehículos Livianos de Pasajeros

HC totales [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	Partículas [g/km]
0.25	2.11	0.62	0.125

Tabla 2.10: Vehículos Livianos Comerciales

HC Totales [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	Partículas [g/km]
0.5	6.2	1.43	0.16

## Capítulo 3

# Metodología

En este estudio se aplica la metodología IVE (*International Vehicle Emissions*), la cual se basa en protocolos establecidos como características de conducción, partidas de vehículos, encuestas de flota y videos de los circuitos elegidos, que se cumplan en forma rigurosa y técnica, obteniendo información valiosa para las simulaciones posteriores de los gases efecto invernadero, de los factores de emisión, el patrón de comportamiento del parque automotriz, perfiles de velocidad, entre otras variables.

El modelo Internacional de Emisiones Vehiculares, es un modelo computacional diseñado para estimar emisiones del motor del vehículo en países en vías de desarrollo. El modelo ayudará a ciudades y a regiones a desarrollar estimaciones de las emisiones para:

- Focalizar control de estrategias y planeación del transporte sobre estas que sean más eficaces;
- Predecir cómo diferentes estrategias afectarán las emisiones locales, y
- Progreso en la medida de reducción de emisiones en un cierto plazo.

El modelo incluirá contaminantes locales del aire, emisiones de gases efecto invernadero, y contaminantes tóxicos.

### 3.1 Descripción del Equipo Experimental

Para obtener los datos de las concentraciones en volumen de los gases contaminantes se utilizan los analizadores descritos anteriormente. Los ensayos realizados en este trabajo utilizaron equipos que cuentan con el conjunto de analizadores y otros instrumentos de medición indispensables para la

obtención de las emisiones y de los factores de emisión. A continuación se describen estos equipos.

### 3.1.1 Equipo de medición para vehículos con motor Otto

El analizador SEMTECH-G (Sensors EMISSION TECHNOLOGY - Gasoline), mostrado en la figura 3.1.1, es primordialmente usado para el monitoreo de emisiones a bordo de vehículos que utilizan como combustible la gasolina. El analizador puede además ser usado para el monitoreo de emisiones de otras aplicaciones móviles, y también aplicaciones estacionarias tales como motores con celda combustible [5].

La siguiente es una lista de los subsistemas de medición incluidos en el analizador de emisiones SEMTECH-G:

- Detector de ionización de llama (Heated Flame Ionization Detector(FID)) para la medición de hidrocarburos totales.
- Analizador de ultravioleta no dispersivo (NDUV) para la medición del óxido de nitrógeno.
- Analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR) para la medición del monóxido de carbono y del dióxido de carbono.
- Sensor electroquímico para la medición del oxígeno.
- Sistema de posicionamiento global (GPS) para localizar el vehículo, obtener la altitud y velocidad.
- Medidor de Temperatura y Humedad relativa ambiente.



Figura 3.1: Analizador de emisiones SEMTECH-G.

### 3.1.2 Equipo de medición para vehículos con motor Diesel

El analizador SEMTECH-D, mostrado en la figura 3.2, es primordialmente utilizado para el monitoreo de emisiones a bordo de vehículos que utilizan como combustible el diesel, equipos agrícolas y de la construcción. El analizador puede además ser usado para el monitoreo de emisiones en otras aplicaciones móviles que están dentro de la minería y la marítima [12].

La siguiente es una lista de los subsistemas de medición incluidos en el analizador de emisiones SEMTECH-D:

- Detector de ionización de llama (Heated Flame Ionization Detector(FID)) para la medición de hidrocarburos totales.
- Analizador de ultravioleta no dispersivo (NDUV) para la medición del óxido de nitrógeno.
- Analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR) para la medición del monóxido de carbono y del dióxido de carbono.
- Sensor electroquímico para la medición del oxígeno.
- Sistema de posicionamiento global (GPS) para localizar el vehículo, obtener la altitud y velocidad.
- Medidor de Temperatura y Humedad relativa ambiente.



Figura 3.2: Analizador de emisiones SEMTECH-D.

### 3.1.3 Medidor de masa para material particulado (DMM-230)

El *Dekati Mass Monitor* (DMM-230), mostrado en la figura 3.3, mide la concentración másica del material particulado segundo a segundo. Su tecnología está basada en el Impactador Eléctrico de Baja Presión (*ELPI*). Básicamente mide el número de la distribución del tamaño de la partícula pesada aerodinámicamente usando una combinación de partículas cargadas, una serie de

impactadores y una serie de amperímetros que están conectados a los impactadores, para entregar información sobre el número de la concentración desde la corriente leída por los amperímetros.



Figura 3.3: Equipo para la medición de Material Particulado DMM-230.

El DMM es un dispositivo de lectura en tiempo real diseñado para medir la emisión másica de particulado en el rango de tamaños de 0.03 a 1.2 [ $\mu m$ ]. El principio de operación está basado en un cargador de partículas, medidor de densidad, clasificación del tamaño de partículas con un impactador inercial, y una detección eléctrica de las partículas cargadas (Figura 3.4). Ambas, distribución de diámetros medios aerodinámicos y móviles de las partículas son medidas simultáneamente, permitiendo el análisis de la densidad de la partícula en tiempo real. Dado que el principio de medición de la densidad del DMM se basa en una distribución de tamaño de partícula simétrica, se utiliza un tratamiento termal para remover partículas volátiles.

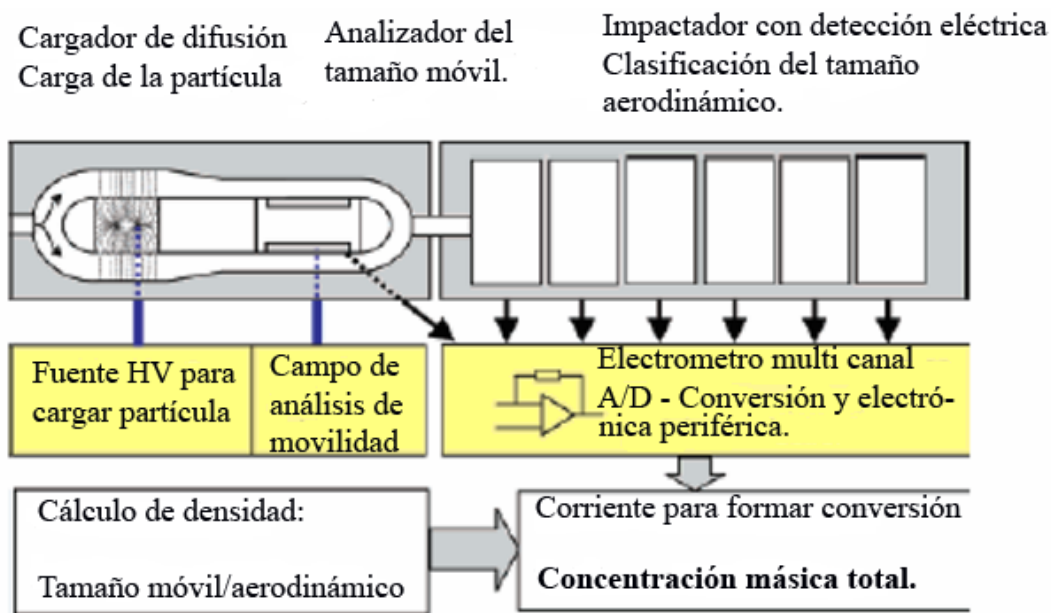


Figura 3.4: Esquema de la operación del Dekati.

## 3.2 Método de Muestreo

Para poder realizar las mediciones con los equipos anteriormente señalados, se debe contar además con instrumentos que tomen la muestra desde el escape del vehículo. Para el caso de los vehículos con motor *Otto* o de ignición por chispa se ocupó sólo el EFM (*Exhaust Flow Meter*) que es el instrumento encargado de tomar la muestra de los gases, y en el caso de los vehículos con motor Diesel, se debe incorporar además el instrumento que diluye la muestra de material particulado, el Dilutor.

### 3.2.1 Medidor de Flujo de Escape (EFM)

El EFM (*Exhaust Flow Meter*) es un flujómetro rígido y compacto diseñado para la medición del flujo crudo total del escape de vehículos con motor de compresión y vehículos con motor de ignición por chispa. Los equipos SEMTECH-D y SEMTECH-G utilizan los datos del flujo junto con las componentes de las concentraciones del escape para calcular emisiones másicas instantáneas y totales. El EFM utilizado en la determinación de factores de emisión es el mostrado en la figura 3.5

Principio de funcionamiento: En el siglo 18, Bernoulli fue el primero establecer la relación entre la energía estática y cinética en un flujo. Uno de los usos más inmediatos de la ecuación de Bernoulli fue la medida de la velocidad con un tubo de Pitot. Los tubos de Pitot fueron inventados por Henri Pitot en 1732 para medir la velocidad de líquidos que fluían. Un tubo pitot mide la diferencia entre dos presiones: la presión estática y la presión de impacto total. La presión estática ( $P_S$ ) es la presión de funcionamiento en la pipa o el conducto, contra la corriente al tubo de pitot. La presión de impacto total ( $P_T$ ) es la suma de las presiones estáticas y cinéticas y se detecta pues la corriente que fluye afecta la abertura pitot. La velocidad del punto del acercamiento ( $V_P$ ) puede ser calculada tomando la raíz cuadrada de la diferencia entre la presión total ( $P_T$ ) y la presión estática ( $P_S$ ) y multiplicando esto por el cociente de una constante dimensional ( $C$ ) y de la densidad fluida ( $\rho$ ).

$$V_P = \frac{C}{\rho} (P_T - P_S)^{1/2} \quad (3.1)$$

Dado que el índice de flujo volumétrico es obtenido multiplicando la velocidad del punto ( $V_P$ ) por el área de sección transversal de la pipa o del conducto, es esencial que la medida de la velocidad esté hecha en una profundidad de la inserción que corresponda a la velocidad media.

Una dificultad con los flujómetros basados en la diferencia de presiones ( $\Delta P$ ) es un limitado rango dinámica. Debido a la relación de la raíz cuadrada, los cambios grandes en  $\Delta P$  reflejan solamente cambios pequeños en el flujo. Para superar este problema, el EFM incorpora 4 sensores de  $\Delta P$  con las gamas que atraviesan dos órdenes de magnitud. Cada sensor se diseña específicamente para ciertos segmentos de la gama del flujo. Con este arreglo, el escape del vehículo se puede medir exactamente sobre su rango entero de la marcha lenta al caudal máximo.



Figura 3.5: Medidor de Flujo de escape y tomador de muestra.

### 3.2.2 Dilutor

El dilutor del Dekati (Figura 3.6), permite el muestreo de altas concentraciones de particulado en forma de aerosol, temperaturas y humedad ambiente. Es especialmente útil en la medición del escape de vehículos y combustión de aerosoles y conveniente para cualquier aplicación si se puede extraer una muestra para el análisis de particulado sobre los 7 a 8  $\left[\frac{l}{min}\right]$ . Esta muestra puede ser extraída desde cualquier parte en el sistema de escape, y puede ser tan grande como la presión sea prácticamente estable y la temperatura este bajo los 450[°C]





Figura 3.6: Dilutor del Dekati.

Principio de funcionamiento: El principio de operación del dilutor está basado en la baja presión causada por el gas de dilución que atraviesa un inyector anular. Esta baja presión grafica una muestra del flujo a través del inyector. Si el flujo del gas de dilución se aumenta, la baja presión aumenta correspondientemente y el flujo de la muestra se aumenta (Figura 3.7). Así, la tasa de dilución permanece constante, si la presión en el tubo de escape es constante (es decir, la presión a través del inyector sigue siendo constante), que es prácticamente el caso de medición en el extremo de la pipa. El flujo del aire de dilución es controlado usando un orificio crítico en la entrada del aire presurizada.

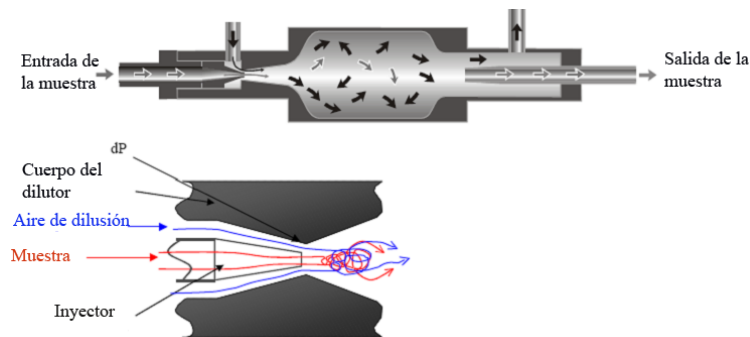


Figura 3.7: Esquema del funcionamiento del Dilutor.

### 3.3 Circuito

La determinación de la masa de contaminantes emitidos por un vehículo motorizado depende directamente del ciclo de conducción utilizado en su determinación, por lo que resulta imprescindible definir adecuadamente este concepto.

Un ciclo de conducción es un conjunto de secuencias de tiempo-velocidad, que provienen de información, estadísticamente representativa, de un área en estudio previamente determinada. Estas secuencias de operación describen los modos y patrones característicos de conducción (ralentí,



describen a continuación<sup>1</sup>:

**Sector 1:** Blanco Encalada → Vergara → Toesca → Santa Isabel → . En este trayecto las emisiones del vehículo son determinadas para bajas velocidades y ralentí, debido a la alta congestión que se produce en la zona.

**Sector 2:** Carmen → Avda. Las Industrias → . El vehículo en un principio es sometido a aceleraciones y desaceleraciones bruscas, debido a la presencia de dispositivos de reducción de velocidad, y luego se puede alcanzar velocidades crucero, así como mediciones de ralentí debido a los semáforos.

**Sector 3:** Avda. Departamental → . El vehículo puede alcanzar mayores velocidades, también con mediciones en ralentí.

**Sector 4:** Autopista Central. El vehículo alcanza velocidades de hasta los  $100 \left[ \frac{km}{h} \right]$  durante un tiempo prolongado. Aquí el motor es sometido a variados esfuerzos.

### 3.4 Muestra de la flota vehicular

Se entenderá como *vehículos motorizados livianos* a todos aquellos vehículos con un peso bruto de menos de 2700[kg], excluidos los de tres o menos ruedas. Los vehículos livianos, se clasifican en vehículos de pasajeros y comerciales.[10]

**Vehículos livianos de pasajeros:** Son todos los vehículos motorizados livianos diseñados principalmente para el transporte de personas. Se incluyen en esta definición, las camionetas livianas o furgones con un peso bruto menor a 2700[kg] y que son derivadas de vehículos que fueron originalmente diseñados para el transporte de pasajeros.

**Vehículos comerciales livianos:** Son los vehículos motorizados livianos con un peso bruto menor a 2700[kg] diseñados para el transporte de carga o derivados de éstos.

Para la determinación de los factores de emisión, se consideró una flota vehicular, tomando una muestra que fuese representativa con respecto al actual parque automotriz. La identificación de cada tecnología clasificada, es la que se muestra en la tabla 3.1. Esta flota está clasificada y subdividida en tres partes, destacando los grupos clasificados según su uso *Vehículos Livianos de Pasajeros (VLP)* y *Vehículos Livianos Comerciales (VLC)*, además estos se subdividen de acuerdo a la tecnología o al tipo de combustible que utilizan: Gasolina (Motor Otto o de ignición por chispa), Petróleo (Motor Diesel) o GNC (Gas Natural Comprimido); los cuales a su

---

<sup>1</sup>Todos los sectores, calles y/o avenidas ubicadas en la Región Metropolitana

vez se clasifican de acuerdo a la normativa que rige para cada tecnología. Esta clasificación viene dada por el año de inscripción del vehículo y la entrada en vigencia de las normas correspondientes.

La nomenclatura que se utilizará para la clasificación general es la que se detalla a continuación: VLX-Y-N, donde:

- VL: Vehículo Liviano,
- X: Indicará si es de Pasajeros (P) o comercial (C),
- Y: Indicará el tipo de combustible que utiliza, gasolina (G), diesel (D), gas natural (GNC) o si es Híbrido (HIB),
- N: Indicará la normativa que rige a cada tecnología, sin normativa (0), con norma antigua (1), norma más estricta (2) y norma muy estricta (3).

Se midieron 120 vehículos en total, y en la tabla 3.2 se detalla la cantidad de vehículos medidos así como la cantidad de pruebas realizadas para cada tecnología durante este trabajo.

Además se incorporaron 3 nuevas tecnologías, que constan de vehículos comerciales y particulares GNC a gasolina y tecnología híbrida.

Tabla 3.1: Definición de Vehículos Livianos y Medianos (*Fuente: Elaboración propia*).

<b>ID</b>	<b>TIPO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
VLP G-0	Vehículos particulares a gasolina no catalíticos	Sedan, Sw con convertidor catalítico, inscritos antes de septiembre de 1992
VLP G-1	Vehículos particulares catalíticos Tipo 1	Sedan, Sw con convertidor catalítico, inscritos a partir de septiembre de 1992
VLP G-2	Vehículos particulares catalíticos Tipo 2	Sedan, Sw con convertidor catalítico, inscritos a partir de enero de 2005
VLP D-1	Vehículos particulares Diesel Tipo 1	Sedan, SW que cumplen con norma Tier 0
VLP D-2	Vehículos particulares Diesel Tipo 2	Sedan, SW que cumplen con norma Tier 1 o Euro III, inscritos a partir de enero de 2005
VLP D-3	Vehículos particulares Diesel Tipo 3	Sedan, SW que cumplen con norma Tier 1 o Euro IV, inscritos a partir de marzo de 2006
VLC G-0	Vehículos comerciales no catalíticos	Jeep, furgones o camionetas sin convertidor catalítico.
VLC G-1	Vehículos comerciales a gasolina catalíticos Tipo 1	Jeep, furgones o camionetas con convertidor catalítico.
VLC G-2	Vehículos comerciales a gasolina catalíticos Tipo 2	Jeep, furgones o camionetas con convertidor catalítico inscritos a partir de enero de 2005.
VLC D-1	Vehículos comerciales Diesel Tipo 1	Jeep, furgones o camionetas que cumplen con norma Tier 0
VLC D-2	Vehículos comerciales Diesel Tipo 2	Jeep, furgones o camionetas que cumplen con norma Tier 1 o Euro III.
VLC D-3	Vehículos comerciales Diesel Tipo 3	Jeep, furgones o camionetas que cumplen con norma Tier 1 o Euro IV.

Tabla 3.2: Detalle de flota experimental (*Fuente: Elaboración propia*).

<b>Categoría</b>	<b>Tipo de Vehículo</b>	<b>Submuestra</b>	<b>Ensayos realizados</b>
VLP G-0	Vehículos de pasajeros gasolineros No catalíticos	10	10
VLP G-1	Vehículos de pasajeros gasolineros catalíticos Tipo 1	19	19
VLP G-2	Vehículos de pasajeros gasolineros catalíticos Tipo 2	13	13
VLP D-1	Vehículos de pasajeros Diesel Tipo 1	9	9
VLP D-2	Vehículos de pasajeros Diesel Tipo 2	5	5
VLP D-3	Vehículos de pasajeros Diesel Tipo 3	3	3
VLC G-0	Vehículos comerciales gasolineros No catalíticos	10	10
VLC G-1	Vehículos comerciales gasolineros catalíticos Tipo 1	11	11
VLC G-2	Vehículos comerciales gasolineros catalíticos Tipo 2	5	5
VLC D-1	Vehículos comerciales Diesel Tipo 1	9	9
VLC D-2	Vehículos comerciales Diesel Tipo 2	9	9
VLC D-3	Vehículos comerciales Diesel Tipo 3	5	5
VLP GNC	Vehículos de pasajeros GNC gasolina	8	8
VLC GNC	Vehículos comerciales GNC gasolina	3	3
VLP HIB	Vehículos con tecnología Híbrida	1	4
	<b>Total flota experimental</b>	<b>120</b>	

Para poder realizar un análisis comparativo de los vehículos a gas natural y el vehículo híbrido, éstos se registrarán con la misma normativa que los vehículos de ciclo Otto (gasolina) de acuerdo al año de inscripción de dicho vehículo.

### **3.5 Montaje y desarrollo de las pruebas**

El centro de operaciones para la realización de las pruebas, fue el Laboratorio Experimental de Motores del departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (*LEM-DIMEC*), ubicado en Unión Latinoamericana #695 de la Comuna de Santiago.

Para comenzar a medir las emisiones másicas de cada contaminante, se deben montar los equipos anteriormente mencionados en el vehículo, que por lo general se hacía en el portamaletas. Por otra parte, la flota utilizada para la medición constaba tanto de vehículos con motor de compresión así como con motor de ignición por chispa. Para este último tipo de vehículos (VLX G-(1 o 2)), era requerido que estuviesen en el laboratorio el día anterior a la realización de las pruebas, para poder realizar partidas en frío, estado en el cual los convertidores catalíticos no están en su

pleno funcionamiento.

Los equipos y artefactos que iban ubicados en el portamaletas, corresponden los medidores de gases (SEMTECH-G o SEMTECH-D), una fuente de poder que alimentara al equipo (Por lo general se utilizó una batería de 12[V] y de 150[A]) y el Exhaust Flow Meter. Adicional a esto, se debía colocar el medidor de temperatura y humedad en algún costado exterior del vehículo, de manera que el flujo opuesto al movimiento del vehículo golpeará en forma directa a este. Por otra parte, el tomador de muestra que va conectado directamente al Exhaust Flow Meter (Figura 3.5), era conectado en uno de sus extremos al tubo de escape del vehículo, cuidando no dejar fugas del flujo de salida.

## Capítulo 4

# Resultados

Una vez realizados los ensayos, se procedió al análisis individual de cada uno de los resultados entregados por el equipo. En una primera determinación, se establecerán los factores de emisión realizando un alineamiento (*offset*) sólo al inicio de los datos entregados por los analizadores, ya que como se dijo, son independientes, y se compararán con una determinación numérica de los factores de emisión

### 4.1 Cálculo numérico de los factores de emisión

Como primer análisis de datos, se determinarán las emisiones para cada tecnología a partir de los datos entregados por los analizadores, es decir, a partir de las concentraciones en volumen de cada gas segundo a segundo, más variables de condiciones ambientales y otros, tales como temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa, flujo del escape y razón atómica del combustible, poder determinar las emisiones de cada gas contaminante, comparar estos resultados con los entregados por el equipo, y establecer conjeturas de acuerdo a la precisión de estos equipos.

Para comenzar se tomarán como datos conocidos:

- Las concentraciones brutas entregadas por cada analizador, que corresponden a  $CO_{dry}$ ,  $CO_{2\ dry}$ ,  $NO_{dry}$ ,  $HCT_{wet}$ ;
- Presión atmosférica,
- Temperatura ambiente,
- Humedad relativa,
- Razón atómica del combustible H/C ( $\alpha$ )



Con estos datos se puede calcular la presión de vapor saturado  $P_d$  con la ecuación 2.10 (Ver sección 2.5), a su vez, con esta variable más la temperatura ambiente y la presión atmosférica es posible determinar a través de la ecuación 2.9 la humedad absoluta  $H$ .

Cada analizador, exceptuando el FID, entrega las concentraciones reflejadas en una base seca, por lo que para poder expresarlas deben ser transformadas a una base húmeda. Con el valor de  $H$  más las concentraciones de  $CO_{dry}$  y  $CO_2$  y  $\alpha$  es posible determinar con la ecuación 2.6 el factor de conversión de base seca a base húmeda  $K_{s-h}$ .

Teniendo todas las concentraciones reflejadas en una base húmeda, sólo basta multiplicar esta concentración por la densidad correspondiente a cada gas, expresada en  $\left[\frac{g}{ft^3}\right]$  y por el flujo del escape en  $\left[\frac{ft^3}{seg}\right]$ , utilizando las fórmulas planteadas en la sección 2.4.

Teniendo estos resultados se determinarán los porcentajes de diferencia entre los valores recién calculados y los entregados por el equipo. Para esto se graficarán los resultados obtenidos segundo a segundo. A continuación se muestran algunos ejemplos de estos.<sup>1</sup>

La figura 4.1 muestra las diferencias obtenidas para el factor de conversión de base seca a base húmeda ( $K_{s-h}$ ) entre el obtenido teóricamente mediante la fórmula 2.6 y el entregado por el equipo, el cual lo hace en forma directa.

---

<sup>1</sup>Los resultados mostrados corresponden para un mismo ensayo.

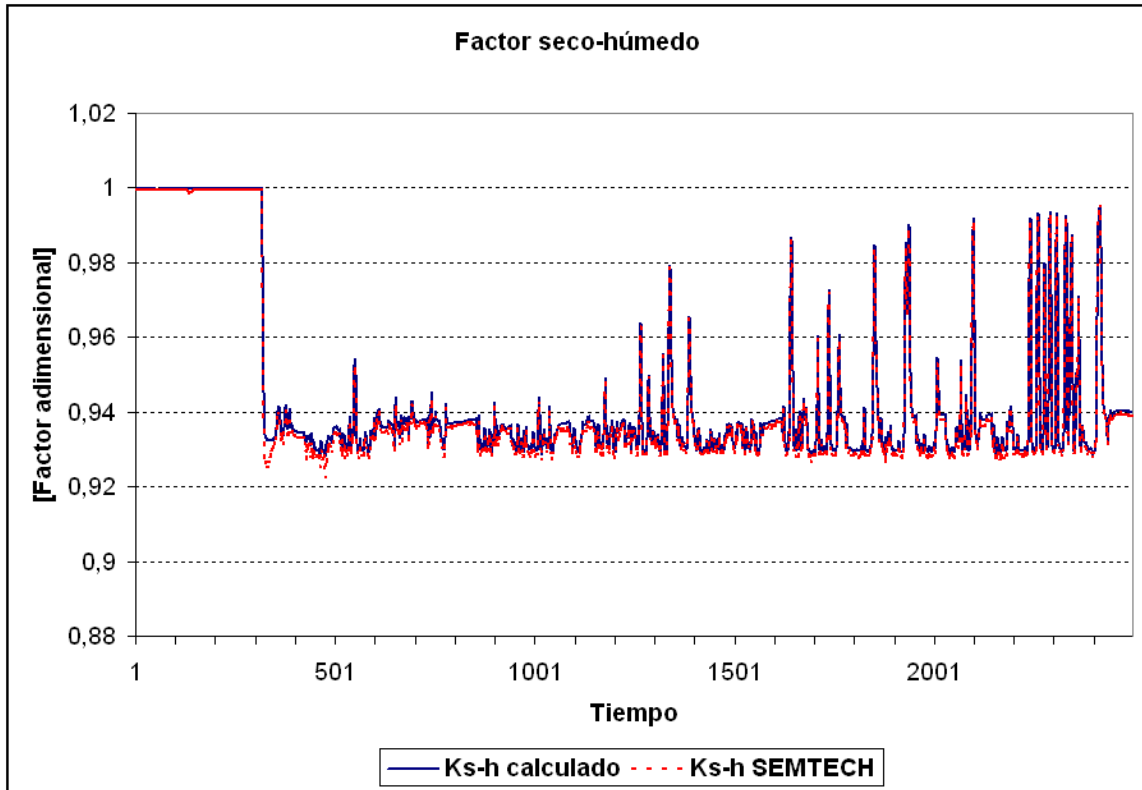


Figura 4.1: Comparación del factor de conversión de base seca a base húmeda entre el obtenido teóricamente y el entregado por el equipo SEMTECH.

De la figura anterior se aprecia que prácticamente no hay diferencia o desfase a medida que pasa el tiempo, obteniéndose un margen de error promedio del 0.1 % y un valor máximo de 0.57 %. Esta diferencia se puede explicar por una variación de decimales de los cálculos realizados, pero resulta ser extremadamente mínima. El gráfico muestra diferencias al inicio del test, que corresponden a puntos donde el equipo medía concentraciones con valor negativo y fueron normalizadas.

La figura 4.2 muestra las diferencias obtenidas para el factor de corrección por humedad del  $\text{NO}_x$  ( $K_H$ ) entre el obtenido teóricamente mediante la fórmula 2.8 y el entregado por el equipo, el cual lo hace en forma directa.

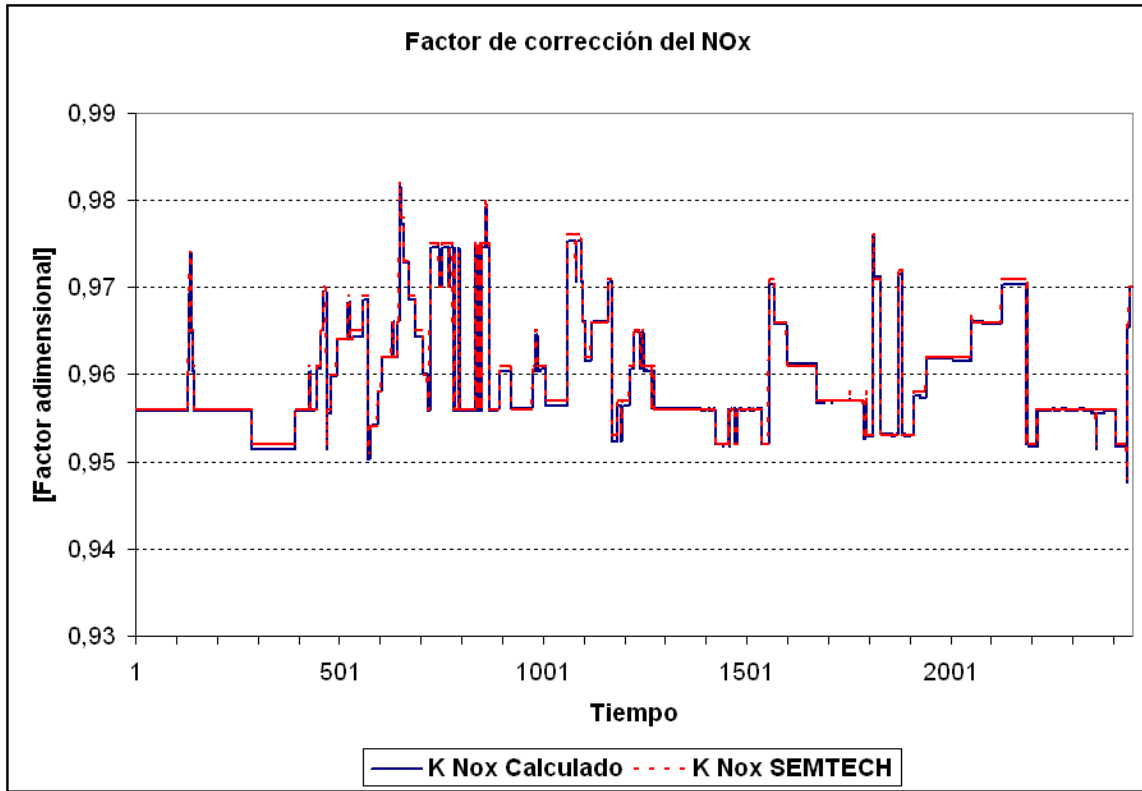


Figura 4.2: Comparación del factor de corrección por humedad del  $\text{NO}_x$  entre el obtenido teóricamente y el entregado por el equipo SEMTECH.

Nuevamente existe una congruencia entre los resultados obtenidos teóricamente y los valores entregados por el equipo en forma directa para el factor de corrección por humedad del  $\text{NO}_x$ . El margen de error promedio esta vez es de un 0.03 % y un valor máximo de 0.1 %, lo que puede considerarse completamente aceptable, indicando que el equipo entrega la información de acuerdo a la teoría.

La figura 4.3 muestra la emisión másica de CO segundo a segundo, tras ser obtenida mediante fórmulas, como también el valor entregado por el equipo SEMTECH.

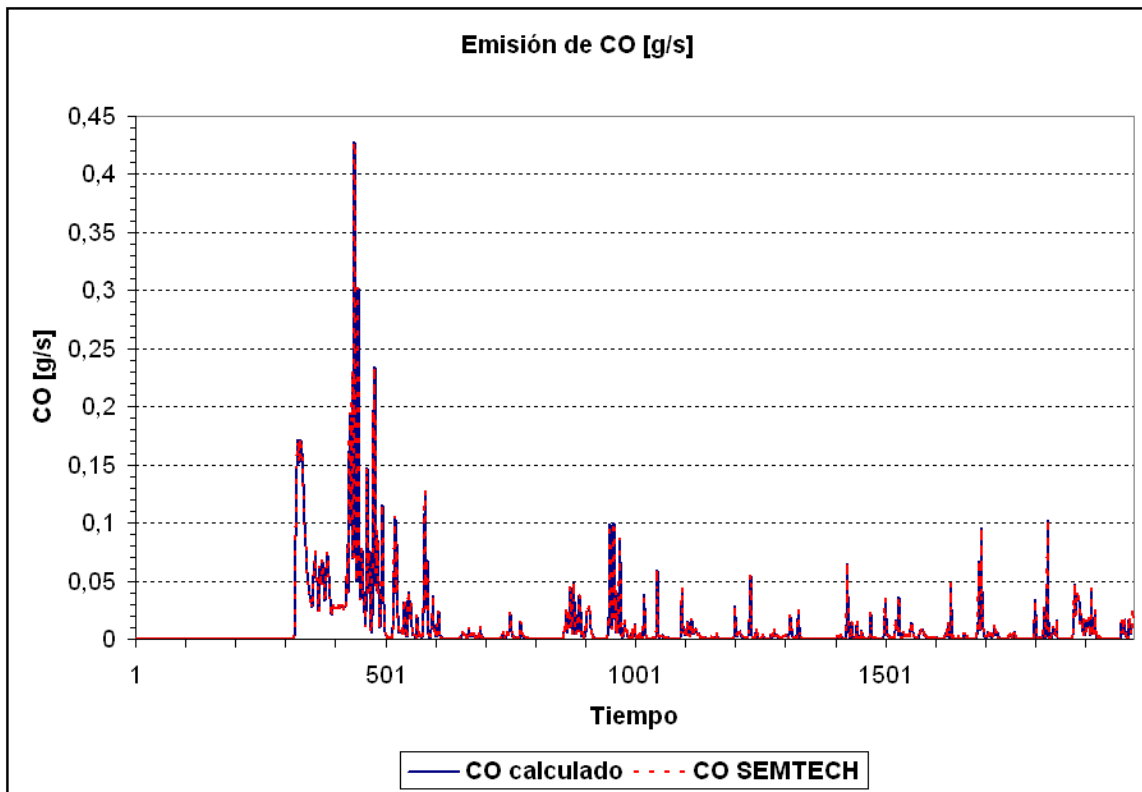


Figura 4.3: Comparación de las emisiones de CO entre las obtenidas teóricamente y las entregadas por el equipo.

Aunque a simple vista no se aprecian grandes diferencias, si se comparan segundo a segundo los 2 valores (teórico y el valor entregado por el equipo) se obtiene un margen de error promedio del 0.375% y un valor máximo de 5.26%. Si se considera el promedio, el error es muy bajo, sin embargo, el valor máximo es alto, esta diferencia se atribuye al hecho de que los analizadores arrojan resultados discretos en sus mediciones de concentraciones, que el equipo SEMTECH normaliza o suaviza para evitar grandes diferencias al pasar de un segundo al otro, y que al aplicar las fórmulas para establecer resultados es difícil encontrar una manera de suavizar dichos puntos.

La figura 4.4 muestra los resultados obtenidos segundo a segundo para las emisiones de óxidos de nitrógeno teóricamente y los valores entregados por el equipo SEMTECH.

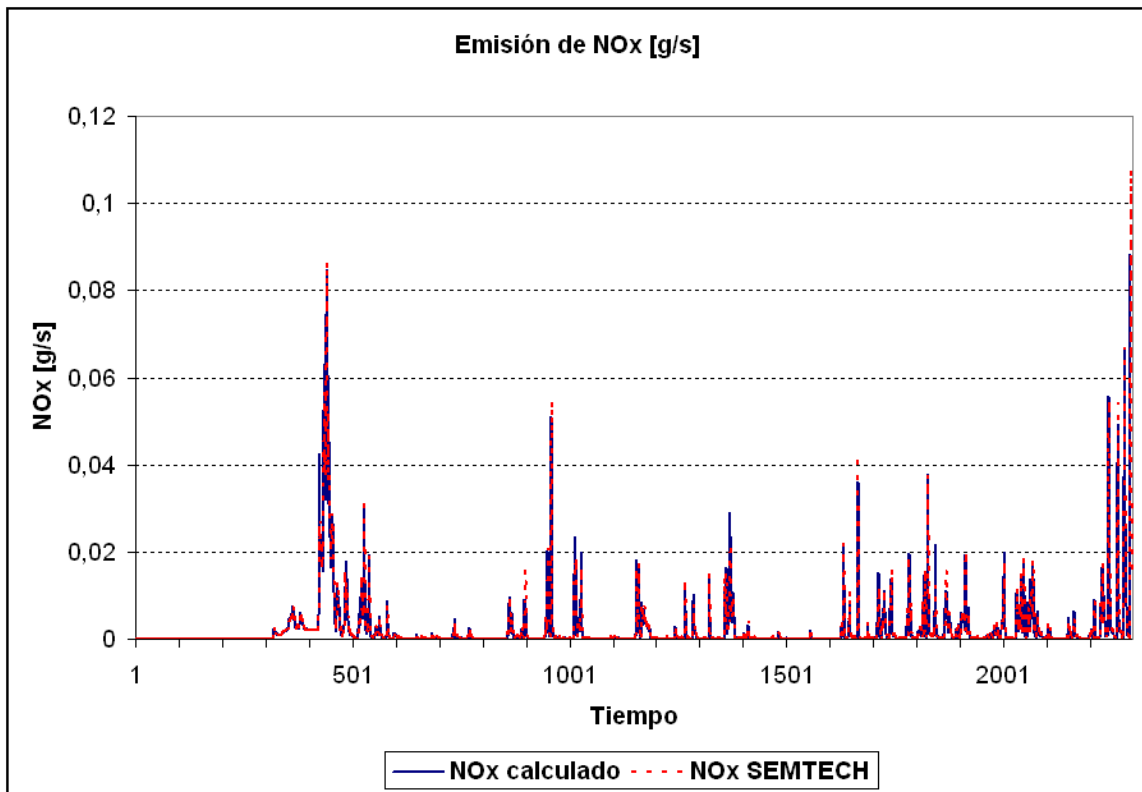


Figura 4.4: Comparación de las emisiones de NO<sub>x</sub> entre las obtenidas teóricamente y las entregadas por el equipo.

Gráficamente es difícil reconocer grandes diferencias entre los valores obtenidos, pero existe un margen de error promedio del 0.13 % y un valor máximo del 0.17 %. Estos valores (tanto el teórico como el entregado por el equipo) resultan ser muy similares, y como era de esperar, se tiene un margen de error promedio muy parecido al obtenido para el factor de corrección por humedad o al factor de conversión de base seca a base húmeda. Además hay que recordar que los analizadores que entregan las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> son distintos (NDIR y NDUV respectivamente), por lo que las anomalías presentados por uno no tienen que, necesariamente, ser reflajadas en el otro, por lo que una alta detección de puntos anómalos por parte del NDUV llevarían a un alto promedio de error.

Un punto importante al momento de comparar resultados fundamentados en la teoría, basados en fórmulas, es el hecho de definir correctamente la razón atómica del combustible en uso,  $\alpha$ , puesto que es un parámetro que el usuario del equipo debe ingresar. Los cálculos fueron realizados

basándose en una razón atómica de combustible  $\alpha = 1,87^2$  en el caso de la gasolina, y un valor de  $\alpha = 1,8$  en el caso de los vehículos diesel, la misma que utilizó el equipo para arrojar sus resultados.

## 4.2 Análisis de Factores de Emisión por tecnología

Por otra parte, se discriminaron o eliminaron algunos test que se pueden considerar no válidos, esto debido a la alta diferencia con respecto a los datos obtenidos para una misma clasificación. Además, ciertas mediciones se realizaron sin medir la concentración de Hidrocarburos emitida, debido a la falta de FID en el equipo, y en el caso de los vehículos Diesel (VLX D-N) muchas pruebas se realizaron sin medir la cantidad de material particulado, debido a que la bomba que ayuda a tomar la muestra en el Dekati presentó averías. Dado lo anterior, se consideró la cantidad de test válidos mostrada en la Tabla 4.1 para el análisis de los factores de emisión para cada agente contaminante.

Como primera instancia se mostrará gráficamente los resultados obtenidos para cada ensayo realizado, clasificándolos de acuerdo a la nomenclatura señalada anteriormente. Esto permite realizar un análisis de tendencia de los factores de emisión de acuerdo a cada tecnología, con lo cual se pueden invalidar test realizados. Los datos numéricos de cada ensayo se pueden encontrar en el anexo A.1 y A.2 para los vehículos a gasolina y diesel respectivamente.

Se compararán los factores de emisión para cada agente contaminante (HC, CO, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>) separados según el tipo de vehículo liviano (pasajeros o comercial), además se compararán de acuerdo a la normativa vigente, aceptando que los vehículos a gas natural(VLX-GNC) y los vehículos con tecnología híbrida (VLP HIB), siguen la misma normativa que los vehículos a gasolina, que va de acuerdo al año de inscripción del vehículo.

---

<sup>2</sup>Internal Combustion Engine Fundamentals, John B. Heywood, 1988.

Tabla 4.1: Cantidad de pruebas consideradas para la obtención de los resultados de cada agente contaminante.

Tecnología	HC	CO	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	MP
VLP G-0	9	10	10	10	no aplicable
VLP G-1	13	19	19	19	no aplicable
VLP G-2	11	12	12	12	no aplicable
VLC G-0	8	10	10	10	no aplicable
VLC G-1	9	11	11	11	no aplicable
VLC G-2	5	5	5	5	no aplicable
VLP D-1	4	6	6	6	2
VLP D-2	4	5	5	5	1
VLP D-3	2	2	2	2	0
VLC D-1	8	9	9	9	4
VLC D-2	6	10	10	10	7
VLC D-3	4	5	5	5	4
VLP GNC	8	8	8	8	no aplicable
VLC GNC	3	3	3	3	no aplicable
VLP HIB	4	4	4	4	no aplicable

#### 4.2.1 Resultados obtenidos para Vehículos livianos de Pasajeros a gasolina.

Desde los gráficos 4.5 al 4.7 se aprecian los factores de emisión para los vehículos clasificados como VLP G-N, donde N corresponde a una de las 3 normas existentes para este tipo de vehículos.

Cada gráfico representa el factor de emisión obtenido para cada ensayo (ordenadas), los que se encuentran detallados en el anexo A.1.

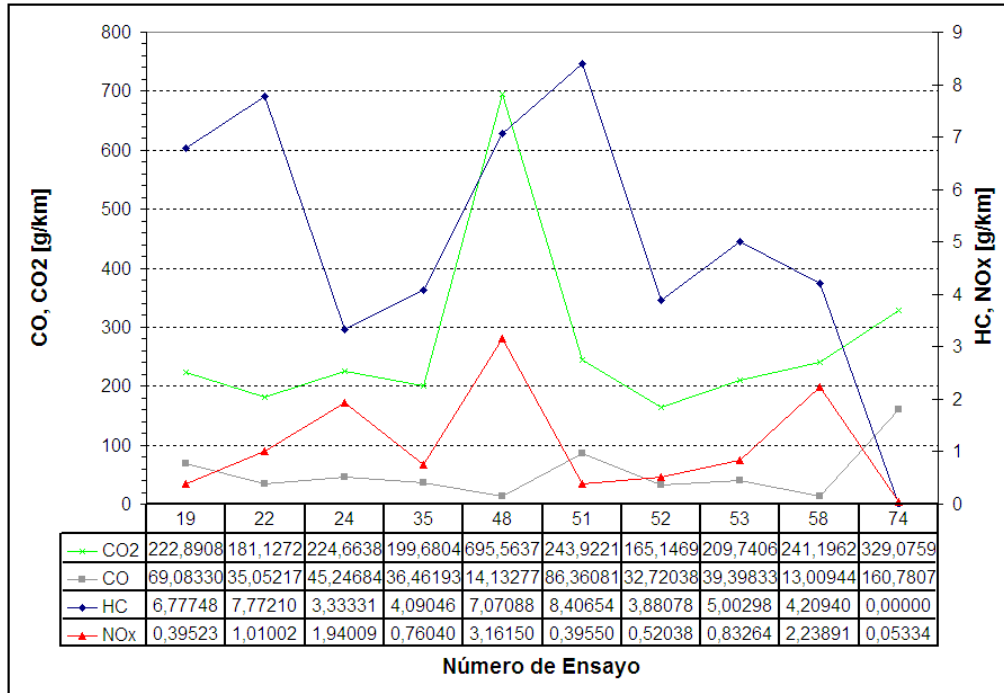


Figura 4.5: Factores de Emisión en vehículos de pasajeros a gasolina no catalíticos (VLP G-0).

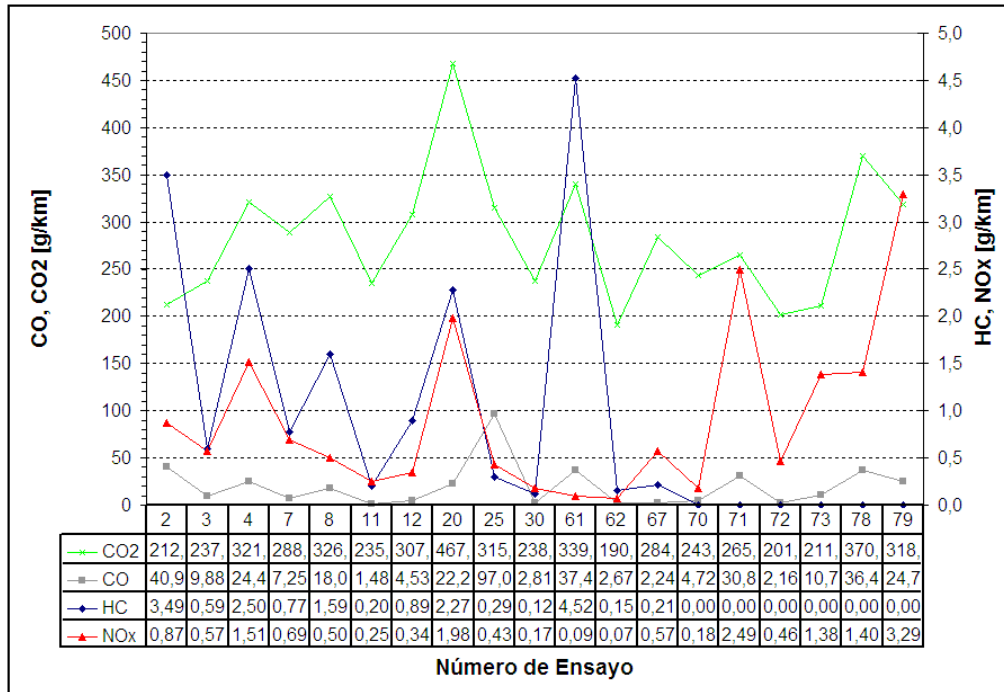


Figura 4.6: Factores de Emisión en vehículos de pasajeros catalíticos Tipo 1 (VLP G-1).



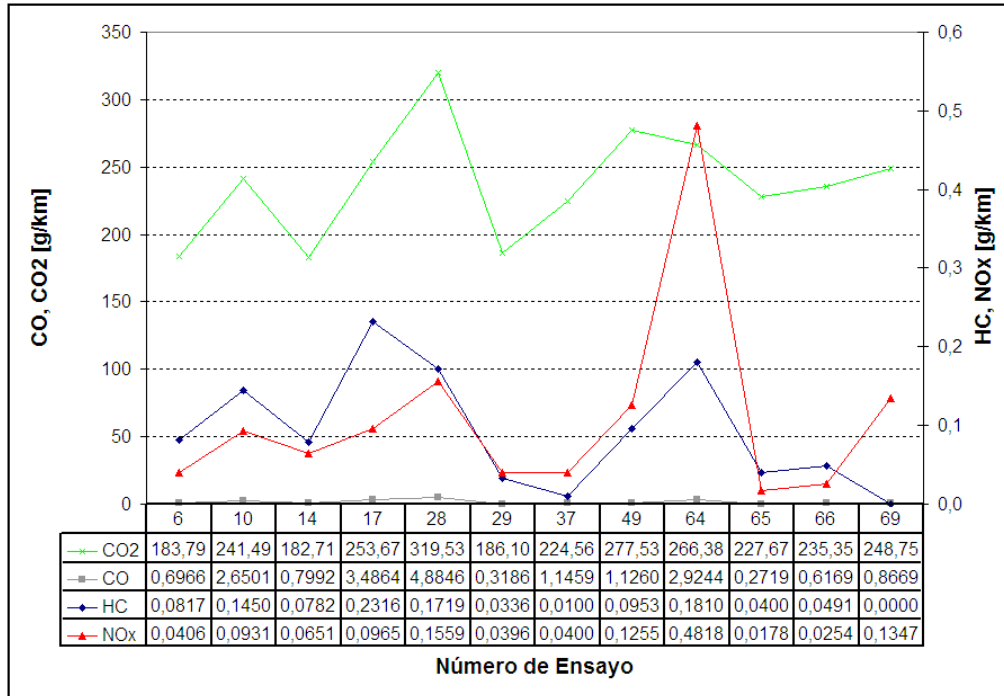


Figura 4.7: Factores de Emisión en vehículos de pasajeros catalíticos Tipo 2 (VLP G-2).

En las figuras anteriores se aprecia que los ensayos que muestran un alto nivel de consumo de combustible, representado por la alta emanación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), poseen además una mayor emisión de óxidos de nitrógeno, lo que afectará al promedio que se considerará para estimar los factores de emisión de cada tecnología, sin embargo, los resultados se considerarán válidos puesto que el alto nivel de consumo se debe además a una cilindrada mayor del vehículo en particular. Por otra parte se aprecia la alta dependencia entre las emisiones de hidrocarburos totales (HC) y el monóxido de carbono (CO), en los ensayos donde la tendencia del CO es similar a la del HC (gráficamente) puede considerarse como una mezcla rica (razón aire/combustible), mientras que en los ensayos que muestran una tendencia no pareja entre el HC y CO pueden considerarse como realizadas bajo una mezcla pobre. Cabe señalar además que los ensayos que presentan un factor de emisión  $HC = 0$  (HC igual a cero) se debe a que no realizaron mediciones de esta concentración de gas debido a la falta de FID.

#### 4.2.2 Resultados obtenidos para Vehículos livianos Comerciales a Gasolina

Desde los gráficos 4.8 al 4.10 se aprecian los resultados individuales de cada ensayo gráficamente para las vehículos con tecnología VLC G-N, donde N representa la norma a la que está sometido el vehículo.

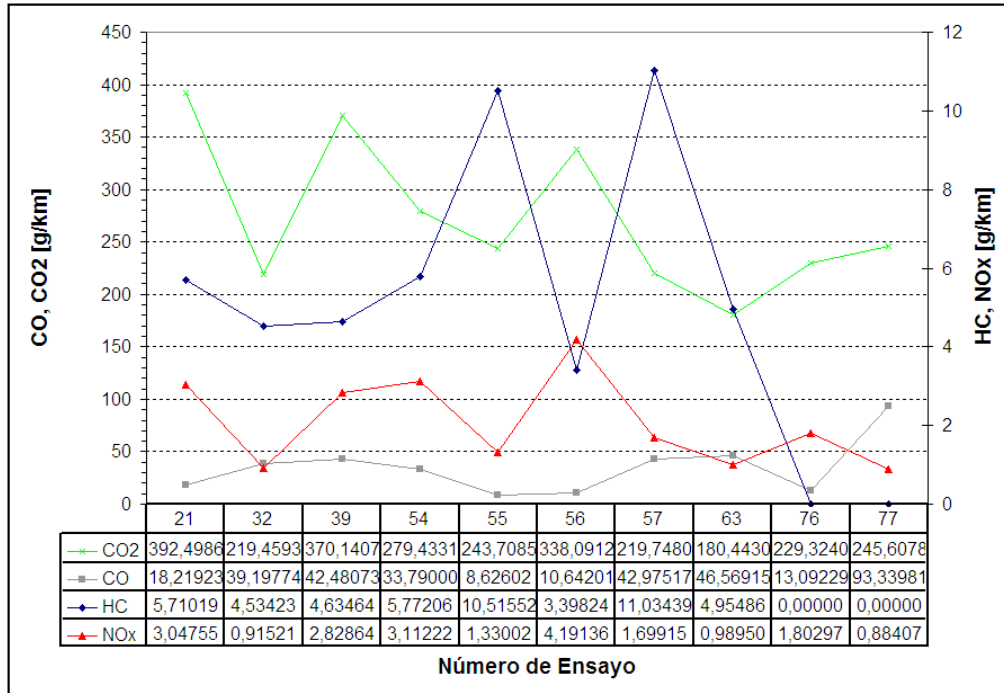


Figura 4.8: Factores de Emisión en vehículos comerciales no catalíticos (VLC G-0).



Figura 4.9: Factores de Emisión en vehículos comerciales catalíticos Tipo 1 (VLC G-1).

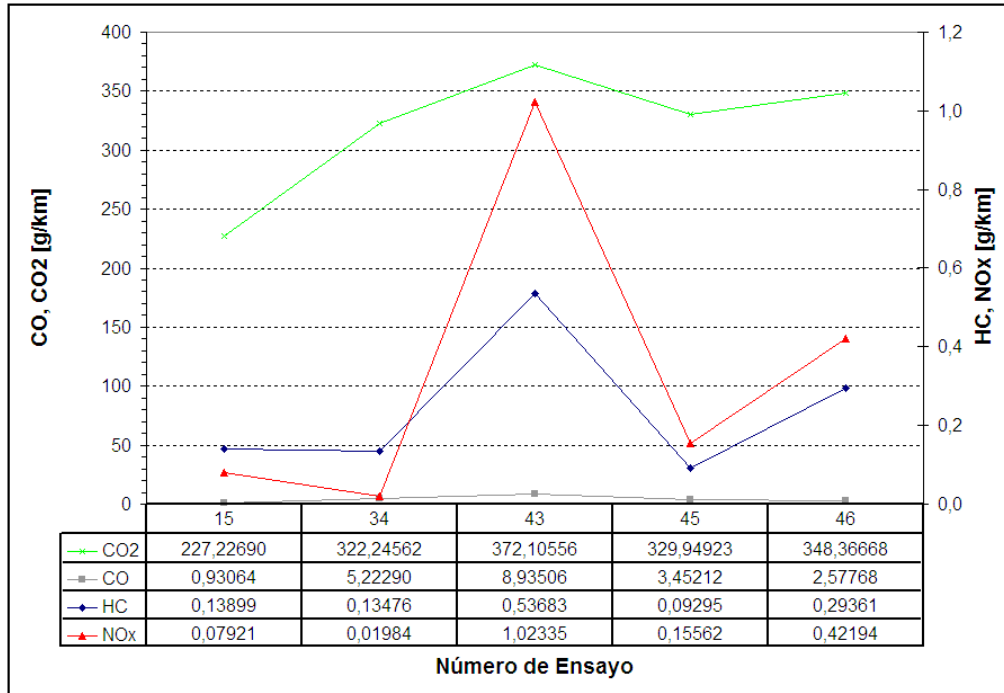


Figura 4.10: Factores de Emisión en vehículos comerciales catalíticos Tipo 2 (VLC G-2).

Nuevamente la tendencia a que con un mayor consumo de combustible se obtienen altas emisiones de  $\text{NO}_x$  es clara. Asimismo la tendencia que de acuerdo al tipo de mezcla, rica o pobre, se obtendrán similitudes gráficas entre el CO y el HC o no, respectivamente, vuelve a destacar. Sin embargo, es de esperar que debido a que la mayoría de los vehículos comerciales tienen un motor de mayor capacidad o cilindrada que sus similares en cuanto a norma, los vehículos de pasajeros, se obtenga un mayor valor de factor de emisión para los  $\text{CO}_2$ , lo que no implica necesariamente que se tenga un mayor factor de emisión de  $\text{NO}_x$ .

### 4.2.3 Resultados obtenidos en Vehículos livianos de Pasajeros Diesel

Desde las figuras 4.11 a la 4.13 se muestran gráficamente los resultados obtenidos para cada ensayo realizado a los vehículos VLP D-N, donde N representa la norma a la que está sometida cada tecnología.

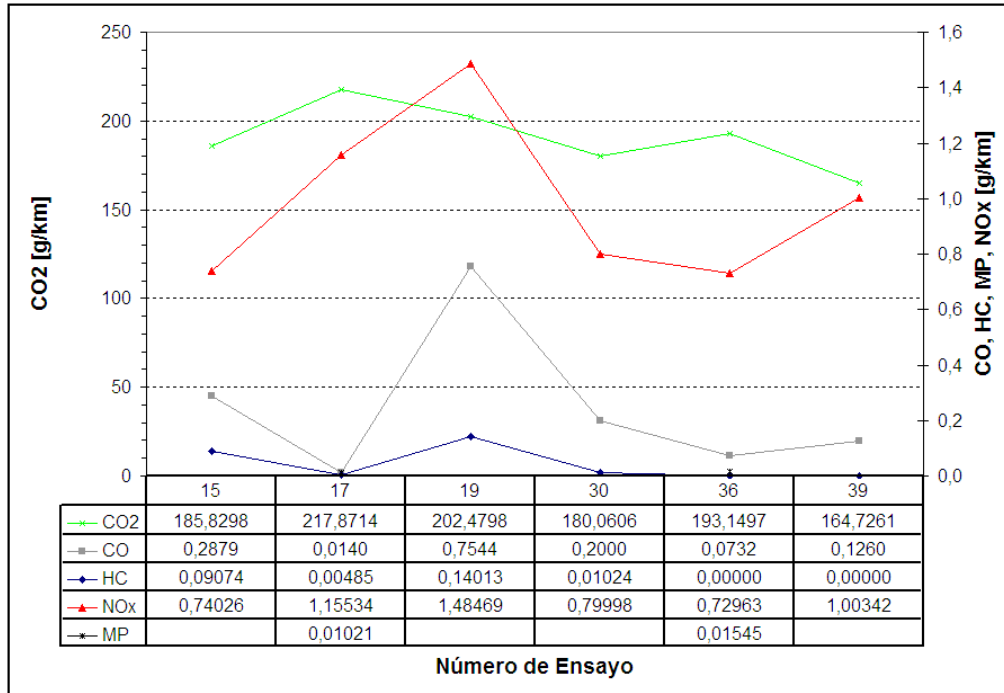


Figura 4.11: Factores de Emisión en vehículos de pasajeros Diesel Tipo 1 (VLP D-1).

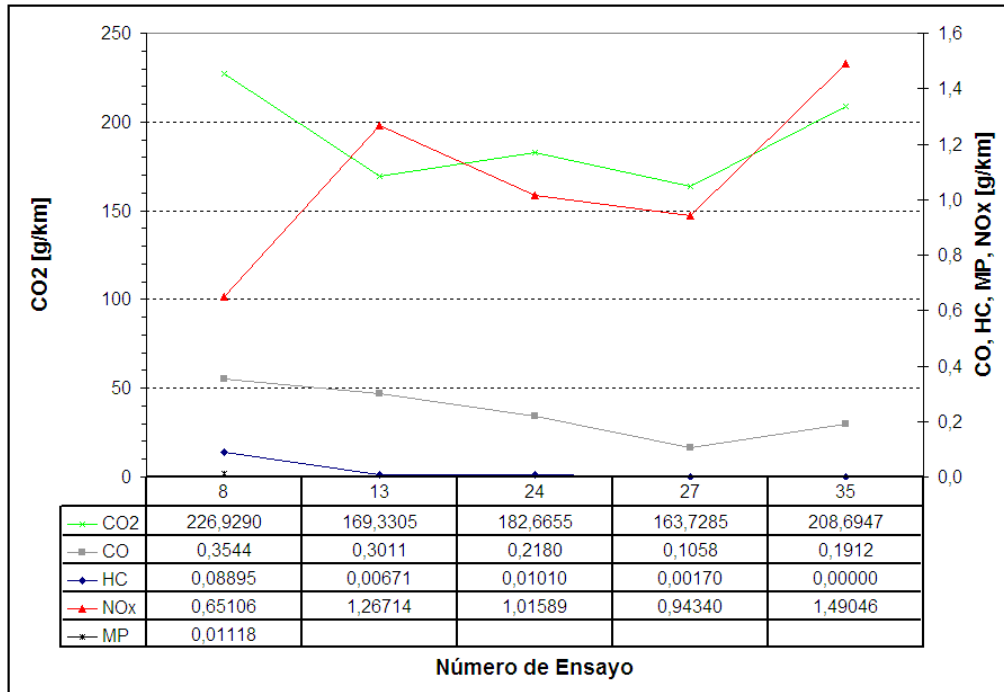


Figura 4.12: Factores de Emisión en vehículos de pasajeros Diesel Tipo 2 (VLP D-2).

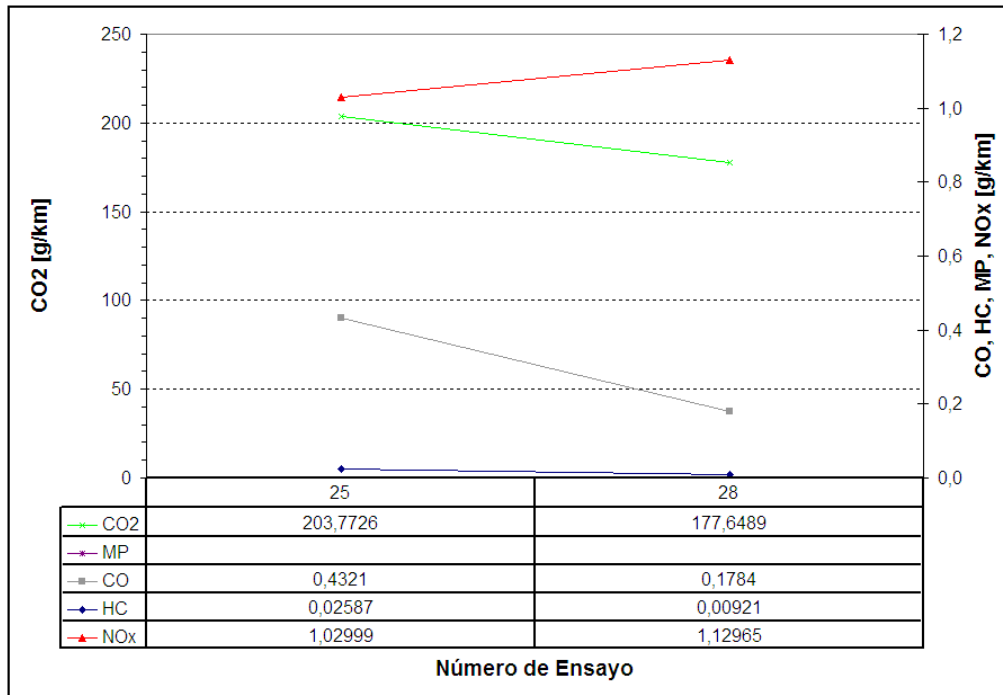


Figura 4.13: Factores de Emisión en VLP vehículos de pasajeros Diesel Tipo 3 (D-3).

De estos gráficos se aprecia la similitud entre las emanaciones de CO y HC, además los óxidos de nitrógeno tienen un comportamiento más parejo de acuerdo al consumo de combustible, representado como se dijo anteriormente por la emisión de dióxido de carbono. Sobre el material particulado se realizarán conjeturas al momento del análisis de promedios de cada tecnología, aunque es importante señalar que también tiene una dependencia con el consumo de combustible del vehículo.

#### 4.2.4 Resultados obtenidos en Vehículos livianos Comerciales Diesel

Desde las figuras 4.14 a la 4.16 se aprecian gráficamente los resultados obtenidos para los ensayos realizados a los vehículos VLP D-N, donde N representa la norma que rige a cada tecnología.

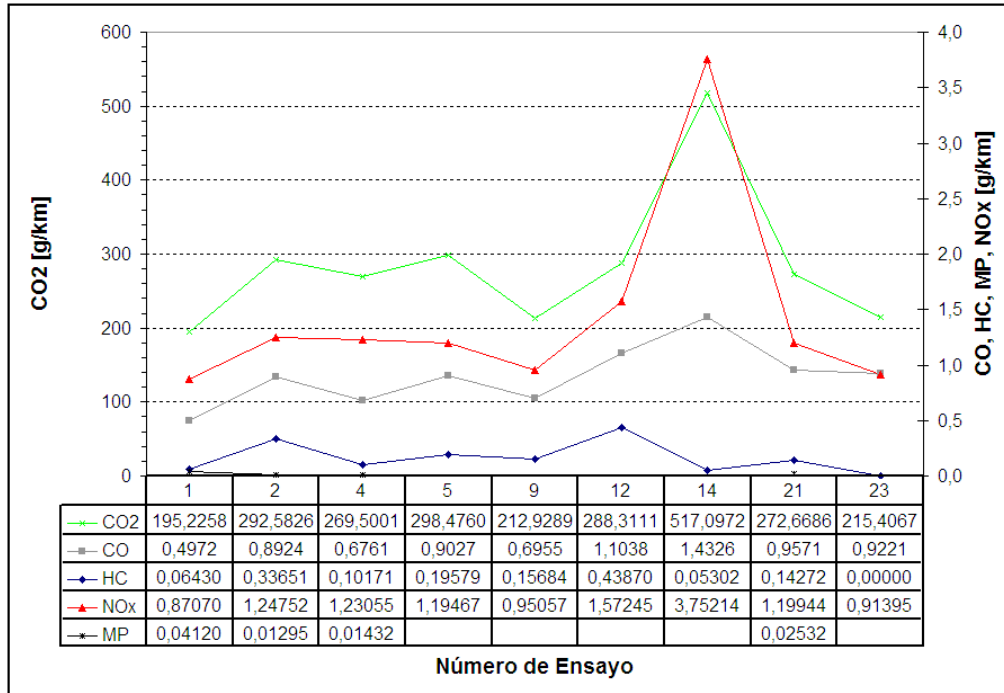


Figura 4.14: Factores de Emisión en vehículos comerciales Diesel Tipo 1 (VLC D-1).

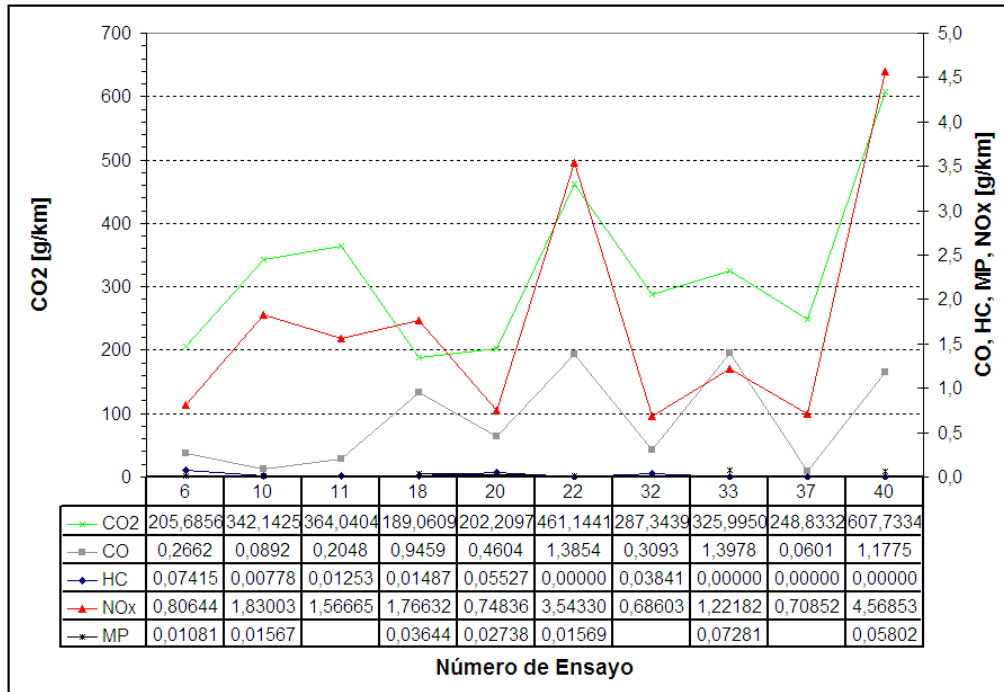


Figura 4.15: Factores de Emisión en vehículos comerciales Diesel Tipo 2 (VLC D-2).

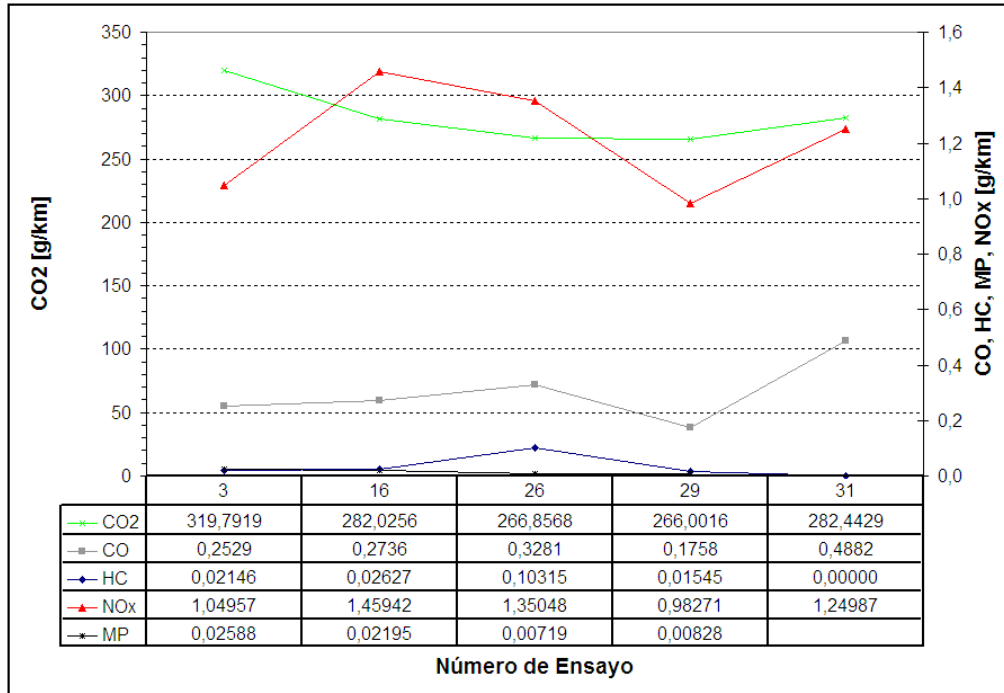


Figura 4.16: Factores de Emisión en vehículos comerciales Diesel Tipo 3 (VLC D-3).

De acuerdo a estos 3 gráficos, se aprecia una similitud nuevamente entre las emisiones de CO y HC, aunque es claro verlo en el gráfico 4.14. Por otra parte, en el gráfico 4.15 se aprecia con claridad la dependencia del  $\text{NO}_x$  con el consumo de combustible, representado por la emisión de  $\text{CO}_2$ . Además se puede apreciar, que de acuerdo al consumo de combustible se obtienen mayores emisiones de material particulado.

#### 4.2.5 Resultados obtenidos en Vehículos livianos a gas natural

En el gráfico 4.17 se muestran los resultados obtenidos para los vehículos VLP GNC, que en su totalidad fueron taxis colectivos. Por este mismo hecho es que se asume que hay puntos discretos en la muestra, debido a la mala mantención realizada a los vehículos.

Cabe señalar que las emisiones de  $\text{NO}_x$  dependen significativamente de la temperatura de combustión, por lo que al tener el GNC un poder calorífico mayor que el de la gasolina, las emisiones serán mayores, sin embargo, al comparar las temperaturas de escape para los vehículos VLX GNC con las de cualquier vehículo a gasolina, los valores para estos últimos eran mucho mayores de lo que se esperaba en comparación que en los GNC. Además estos mismos gases dependen de la fracción de metano que compone al combustible o de la calidad y química de las moléculas de

carbono en combustión, lo cual es variable, llegando incluso a variar entre una estación de servicio y otra. Cabe destacar además, que las mediciones de hidrocarburos se realizó en forma total, no considerando sólo la fracción no metánica, un mayor énfasis a esto se hará posteriormente en el análisis de promedios por tecnología.

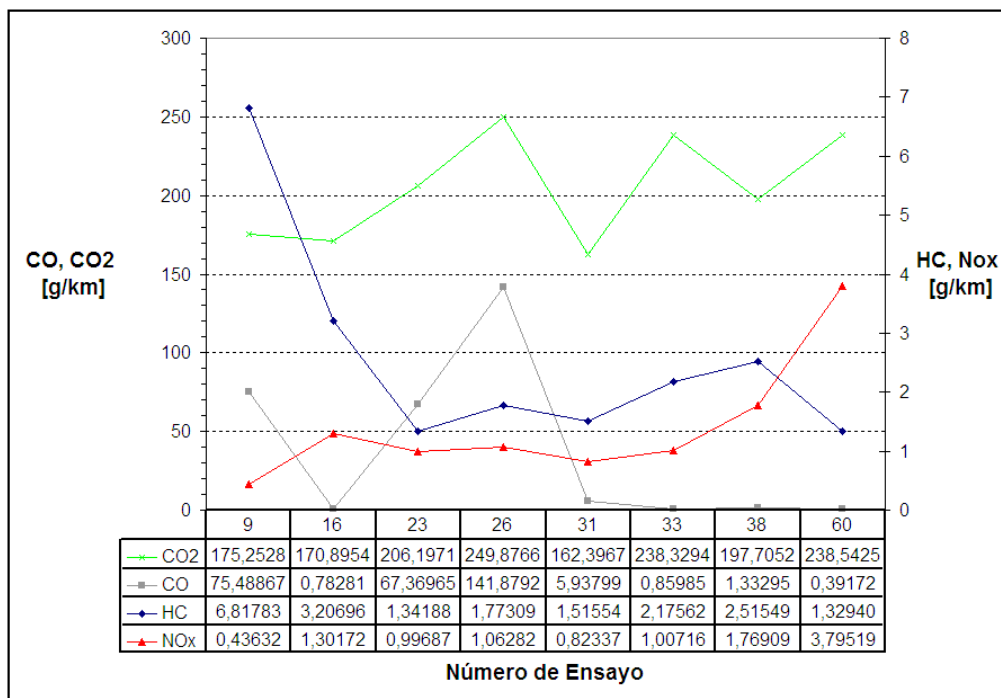


Figura 4.17: Factores de Emisión en vehículos de pasajeros a gas natural (VLP GNC).



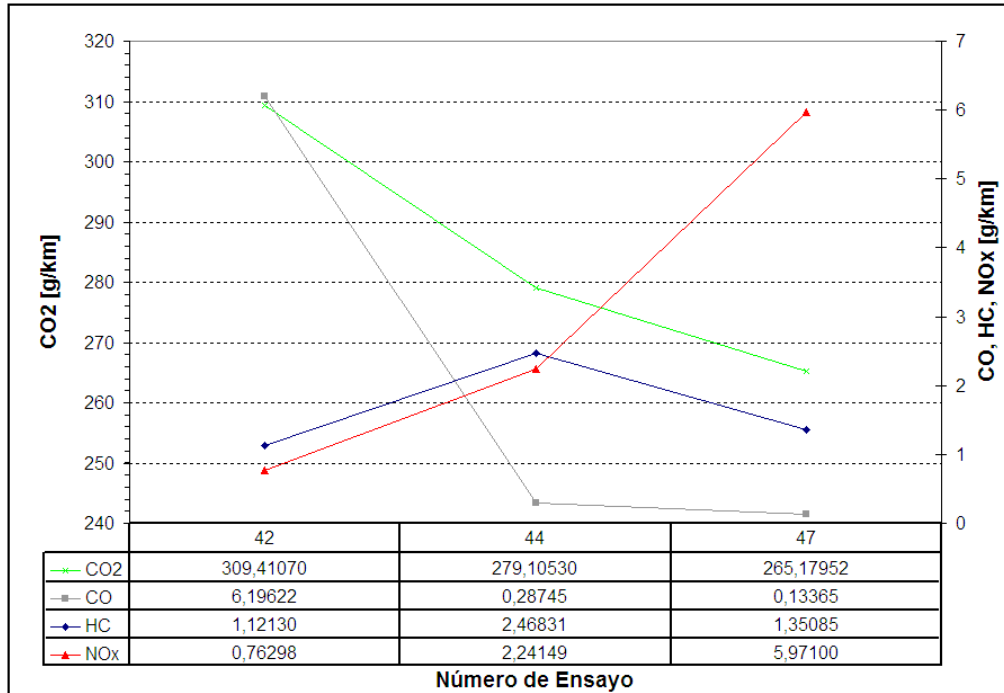


Figura 4.18: Factores de Emisión en vehículos comerciales a gas natural (VLC GNC).

Por otra parte, se aprecia que hay una pequeña inclinación de las emisiones de CO relacionadas con el consumo de combustible. En el caso de los vehículos comerciales, sólo se realizaron 3 ensayos, debido a la poca disponibilidad de estos vehículos en el mercado, sin embargo, se considerarán válidos todos los resultados obtenidos, debido a que los altos valores obtenidos de CO en el ensayo 42, se deben a una mayor capacidad o cilindrada del vehículo, en comparación a los otros 2, que eran de igual marca y modelo.

#### 4.2.6 Resultados obtenidos en Vehículos de tecnología híbrida

En el gráfico 4.19 se muestran los 4 ensayos realizados sobre un mismo vehículo de tecnología híbrida (VLP HIB). Se realizaron ensayos en partida fría (Ensayos 80 y 83) y caliente (Ensayos 81 y 82), para ver las diferencias que se pudiesen obtener. Las que se aprecian notoriamente.

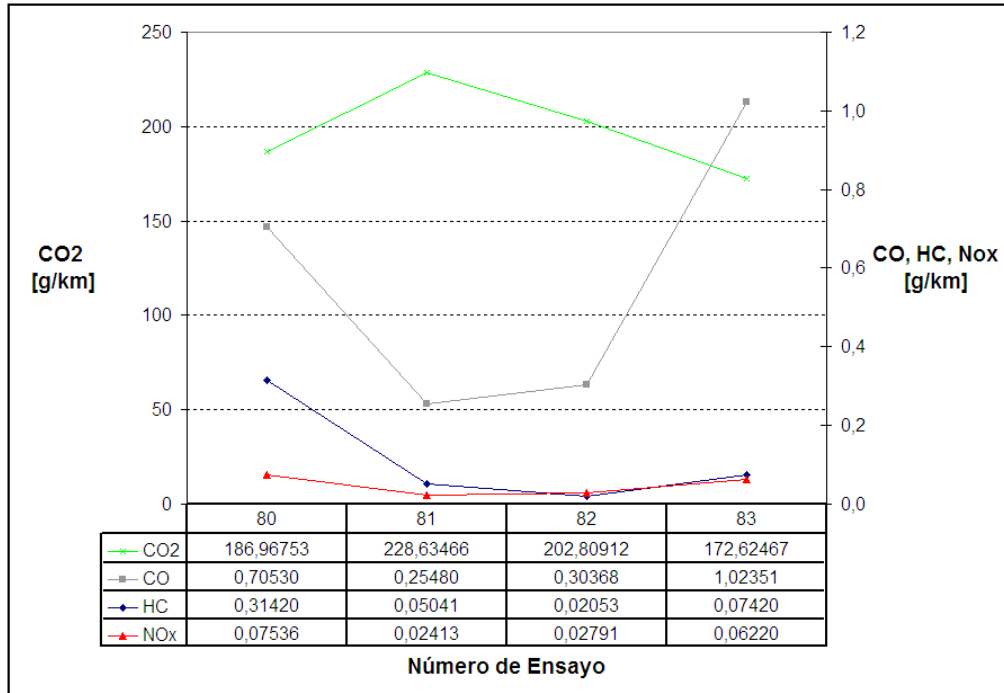


Figura 4.19: Factores de Emisión en vehículo híbrido (VLP HIB).

Las emisiones de HC y CO dependen notoriamente del estado de temperatura en que está el motor. Hay que recordar que se considera partida en frío como un estado de detención total del vehículo por un tiempo mínimo de 8 hrs., y desde que se hace partida al motor hasta que este alcanza una temperatura de 70<sup>o</sup>[C]. Se aprecia que todos los gases dependen de este parámetro exceptuando al CO<sub>2</sub>.

### 4.3 Determinación de Factores de Emisión por tecnología

A continuación se mostrarán los promedios de factores de emisión obtenidos por cada tecnología a partir de los resultados mostrados anteriormente y mostrados también en forma detallada en los anexos A.1 y A.2 para los vehículos que utilizan gasolina o GNC, y Diesel como combustible respectivamente.

En la figura 4.20, se muestran los promedios de factores de emisión para los Hidrocarburos totales (HC).

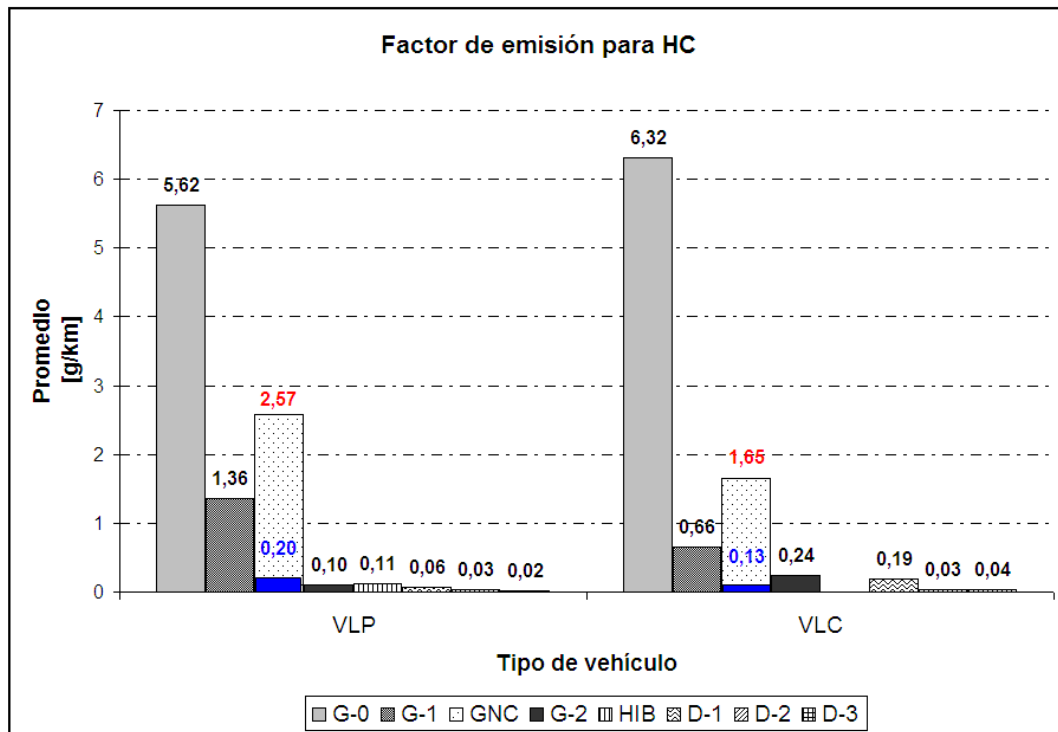


Figura 4.20: Factores de Emisión para Hidrocarburos en Vehículos Livianos según tecnología.

Se aprecia, como era de esperar, que la cantidad de Hidrocarburos es muy alta en el caso de los vehículos sin convertidor catalítico (G-0), pero llama la atención el hecho de que los vehículos a gas natural emitan tantos hidrocarburos en comparación con los vehículos a gasolina con convertidor catalítico inscritos entre los años 1992 y 2004 (VLX G-1). Una explicación a esto es

el hecho de que para los vehículos a gas natural se deben considerar sólo los hidrocarburos no metánicos (HCNM), en reemplazo de los hidrocarburos totales, que es lo que miden los equipos de análisis, ya que el metano no es considerado reactivo en la formación de ozono atmosférico pero sí contribuye enormemente al efecto invernadero y, por lo tanto, no es usado por la EPA como base para la regulación de emisiones. Para este estudio se consideró que la fracción no metánica corresponde al 8% de las emisiones de Hidrocarburos totales, ya que no hay una medida exacta de la composición de este combustible, y puede variar incluso entre un distribuidor y otro, pero es sabido que el GNC está compuesto por entre un 90% y 95% de metano ( $\text{CH}_4$ ).

Si se compara la tecnología híbrida (VLP HIB) con los vehículos a gasolina con convertidor catalítico inscritos desde el año 2005 (VLP G-2), se aprecia una pequeña diferencia, que a pesar de esperar que el promedio del factor de emisión fuese menor en la tecnología híbrida, no sucede. Esto se puede deber a un desfase entre el momento que el motor deja de inyectar combustible y el momento en que comienza a funcionar sólo con electricidad. Sin embargo, la diferencia es mínima, por lo que no se puede asegurar que el vehículo híbrido emita más que su similar los VLP G-2.

En la figura 4.21, se muestran los promedios de factores de emisión para los monóxido de carbono (CO).

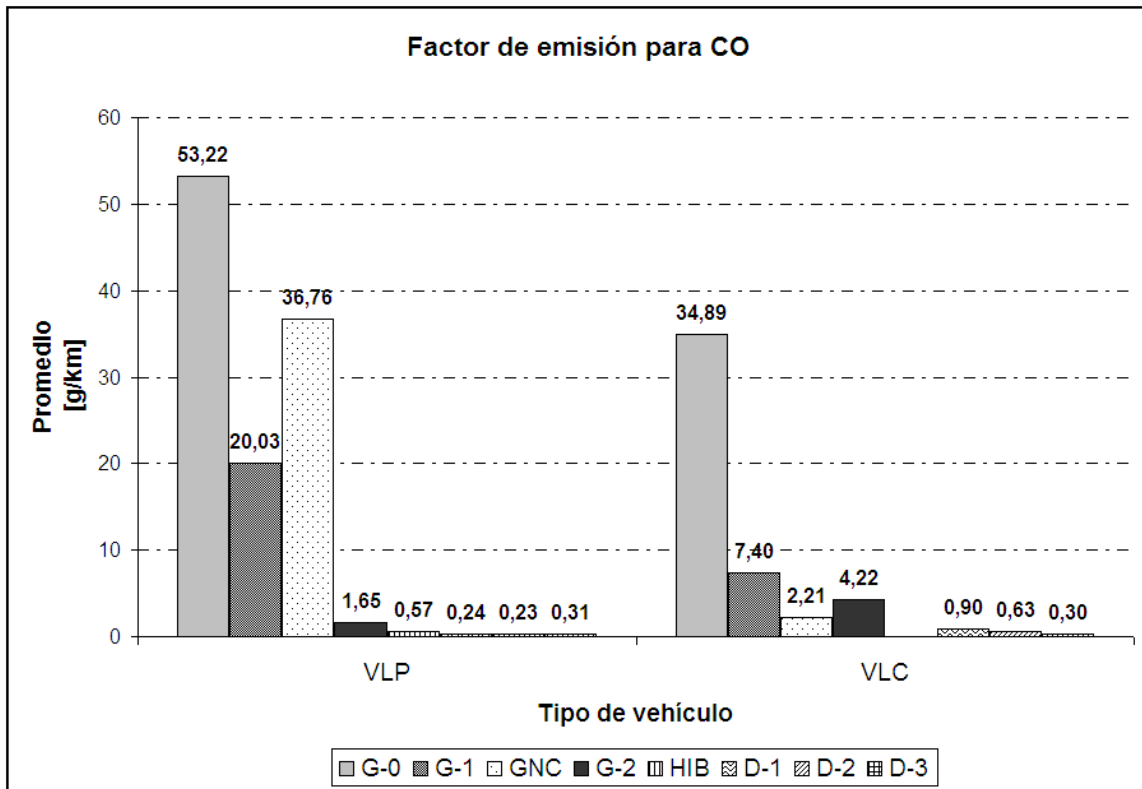


Figura 4.21: Factores de Emisión para monóxido de carbono en Vehículos Livianos según tecnología.

Para este caso, el comportamiento es el esperado, sin embargo, los vehículos de pasajeros a gas natural presentan valores demasiado altos con respecto a sus pares (VLP G-1). Una explicación posible es el hecho de que los vehículos medidos fueron sólo taxis colectivos, por lo que se puede esperar una inadecuada mantención del motor, influyendo en el sistema de inyección al aportar demasiado combustible en la mezcla, o en el sistema de admisión, al entregar poco aire a la mezcla, obteniendo en ambos casos una mezcla rica. Por otra parte, los vehículos comerciales a gas natural presentan menos emisiones que sus pares (VLC G-2), que se puede deber al cuidado que se le ha dado a estos vehículos, al ser de empresas privadas (Metrogas), que fueron los proveedores de los vehículos con esta tecnología. Además, la generación de los kits de conversión de gasolina a GNC que posee cada vehículo influye en las emisiones, sin embargo, no se posee información sobre las generaciones de estos equipos de cada vehículo ensayado.

En la figura 4.22, se muestran los promedios de factores de emisión para los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) para cada tecnología en estudio.

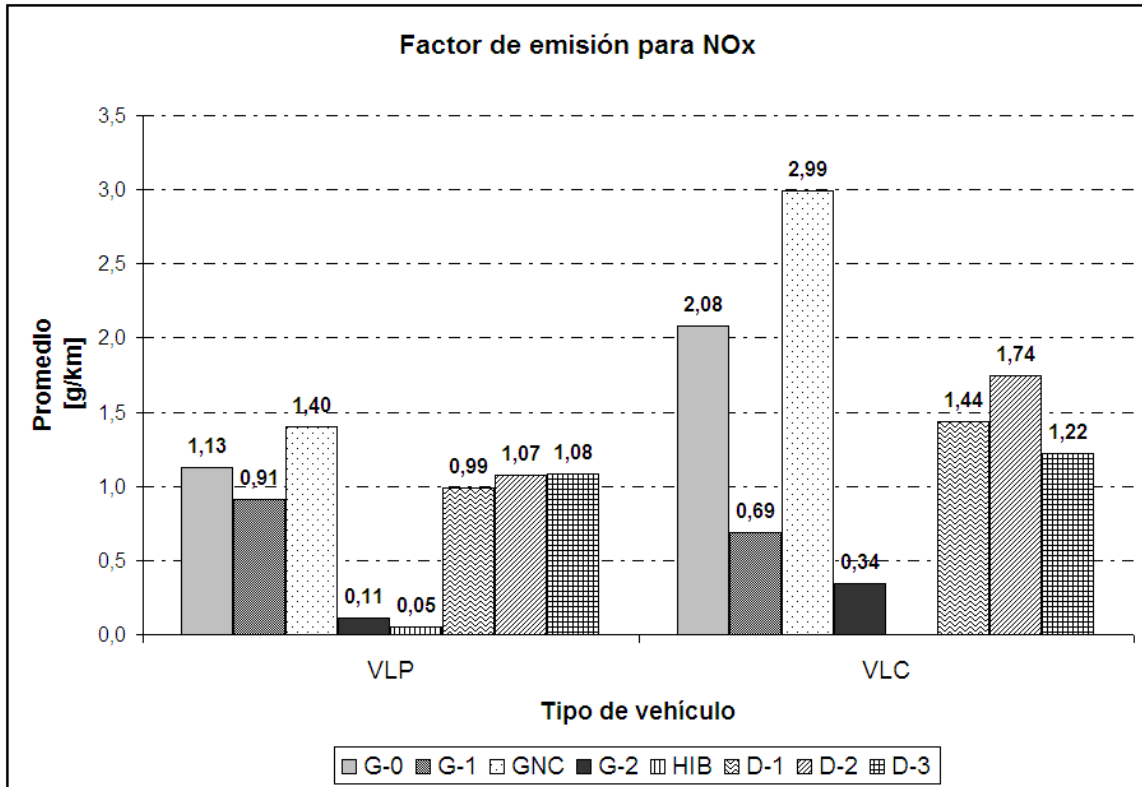


Figura 4.22: Factores de Emisión para óxidos de nitrógeno en Vehículos Livianos según tecnología.

Como se dijo anteriormente, los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ , dependen de las condiciones ambientales en las que se está midiendo, es decir, temperatura y humedad relativa. En los vehículos a gas natural, las temperaturas de combustión son mayores en comparación a los vehículos a gasolina debido al poder calorífico de cada combustible, por lo que se puede asumir que los altos niveles del factor de emisión para  $\text{NO}_x$  en este tipo de tecnología son debido a esto. Si se observa el caso de los vehículos diesel, se aprecia que los niveles de emisión son bastante parejos para cada normativa, sin embargo, al pasar de la tecnología VLX D-2 a VLX D-3, se aprecia una disminución considerable, que se puede ver influenciada por la incorporación de nuevas tecnologías en el control de estos contaminantes, destacando el turboalimentador y el intercooling, ente otros.

En la figura 4.23, se muestran los promedios de factores de emisión para el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

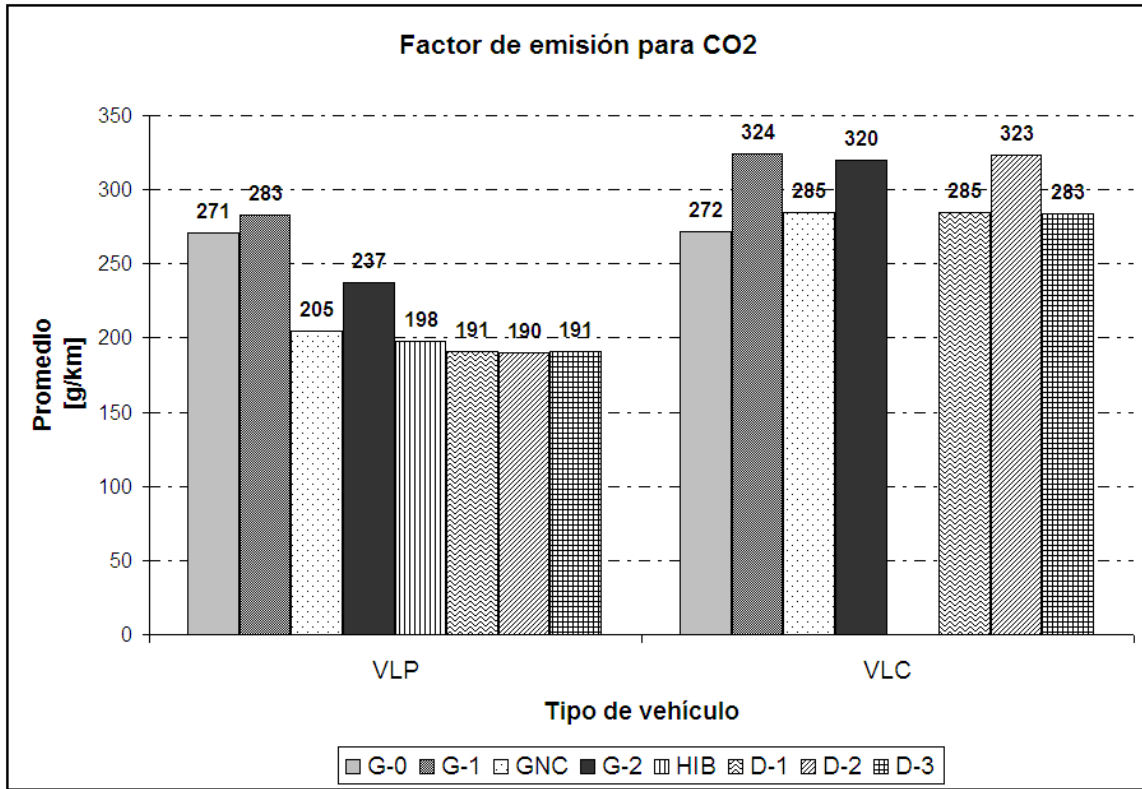


Figura 4.23: Factores de Emisión para dióxido de carbono en Vehículos Livianos según tecnología.

En los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, la disminución apreciada en los vehículos livianos de pasajeros, es proporcional a la disminución de CO (Gráfico 4.21), por lo que se puede conjeturar que los sistemas de inyección logran mezclas más cercanas a la estequiométrica, logrando con esto una mayor cantidad de CO<sub>2</sub>, por otra parte se aprecia una disminución porcentual al pasar de una tecnología a la otra comparando por norma, lo que se puede deber a que a medida que pasan los años hay una mayor tendencia a la adquisición de *city cars* que son vehículos con un menor consumo de combustible, asimismo se aprecia que los vehículos comerciales tienen un mayor promedio de emisión debido a este mismo hecho. Cabe señalar, que la emisión de CO<sub>2</sub> es lo que impide que los rayos de luz solar se reflejen en la tierra, provocando el problema del calentamiento global (efecto invernadero), por lo que no se puede descartar futuras normativas sobre la emisión de estos.

En la figura 4.24, se muestran los promedios de factores de emisión para material particulado (MP).

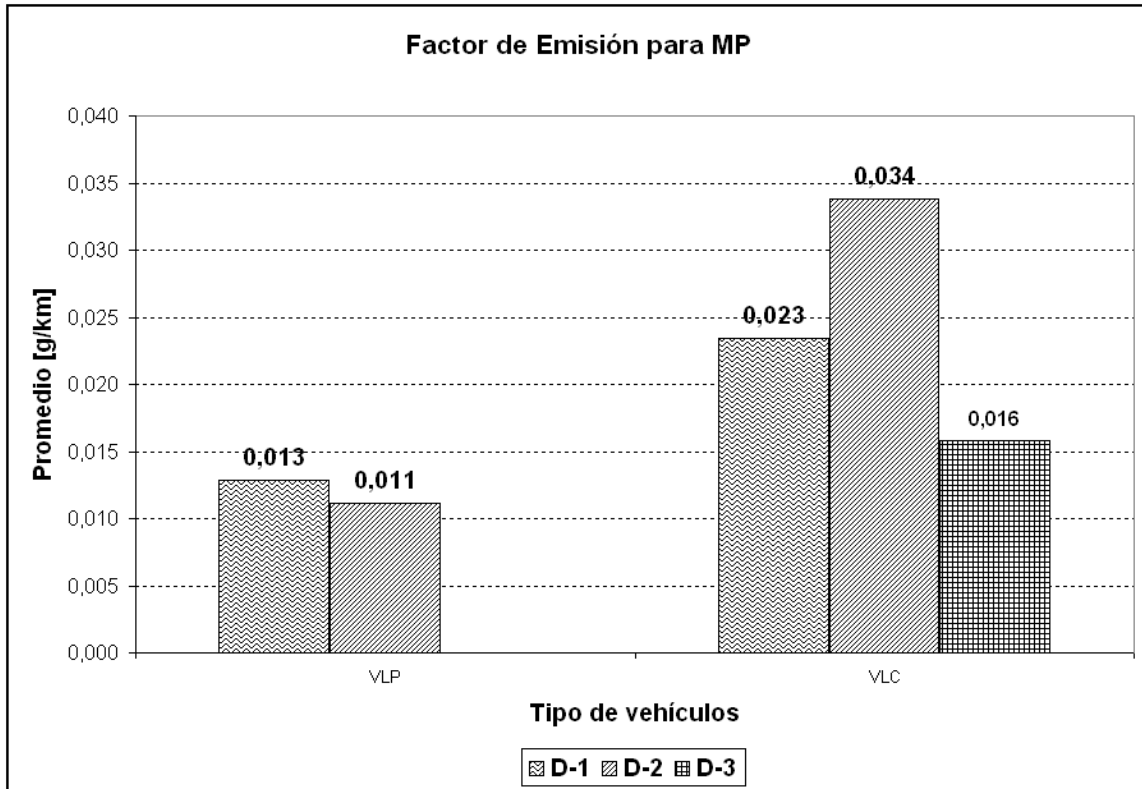


Figura 4.24: Factores de Emisión para material particulado en Vehículos Livianos según tecnología.

Los factores de emisión para material particulado, presentan una tendencia clara a la disminución a medida que se incorporan nuevas normativas para el caso de la tecnología VLP D-N, sin embargo, para el caso de los vehículos VLC D-N, hay un extraño resultado para los vehículos con normativa Tier 1 o Euro III (D-2). Entre las posibles causas de este extraño resultado, puede destacarse el hecho de que en algunos ensayos los vehículos poseían un motor demasiado grande, por lo que se obtiene un mayor consumo de combustible, hecho que incide directamente a una mayor emisión de material particulado.



## 4.4 Comparación de los resultados con la literatura

En esta sección, se compararán los resultados obtenidos de factores de emisión de cada tecnología con un modelo de cálculo de factores de emisión teórico, el que depende de la velocidad promedio de circulación del vehículo durante el ciclo de conducción. El modelo a utilizar será COPERT III. Para esto se determinó la velocidad promedio de circulación de cada ensayo realizado, y se aplicaron las fórmulas que define el modelo expresadas en en la sección 2.6.

### 4.4.1 Vehículos a gasolina

Para aplicar el modelo de factores de emisión a la fracción de vehículos con motor a gasolina de la flota en estudio, se determinó como primera medida la velocidad promedio de cada ensayo realizado, y luego se distribuyó de la siguiente manera para ser comparativo de acuerdo a las normas por las que se rige el modelo.

Los vehículos de pasajeros sin convertidor catalítico (VLP G-0) se consideraron como vehículos convencionales, por lo que se aplicaron los factores de emisión dependientes de la velocidad mostrados en la tabla 2.1 de la sección 2.6 del presente informe.

Por otra parte los vehículos de pasajeros con convertidor catalítico inscritos desde el año 1992 al 2005 (VLP G-1), se consideraron como EURO II o regidos por la directiva 94/12/EC por lo que se aplicaron los factores de emisión mostrados en la tabla 2.2. A su vez los vehículos de pasajeros con convertidor catalítico inscritos desde 2005 hasta la fecha de desarrollo de este trabajo (VLP G-2) se consideraron como EURO III o regidos por la directiva 98/69/EC aplicándose los factores de emisión de la misma tabla (2.2).

Sus pares, los vehículos livianos comerciales fueron clasificados y catalogados de la misma manera, por lo que los factores de emisión aplicados a ellos son como sigue:

- VLC G-0 : Vehículos comerciales convencionales. (Tabla 2.3),
- VLC G-1 : EURO II o regidos por directiva 96/69/EC. (Tabla 2.4),
- VLC G-2 : EURO III o regidos por directiva 98/69/EC. (Tabla 2.4).

A continuación, en la figura 4.25 se muestra la comparación por tecnología de la metodología IVE con el modelo COPERT III para los factores de emisión de HC en vehículos a gasolina.

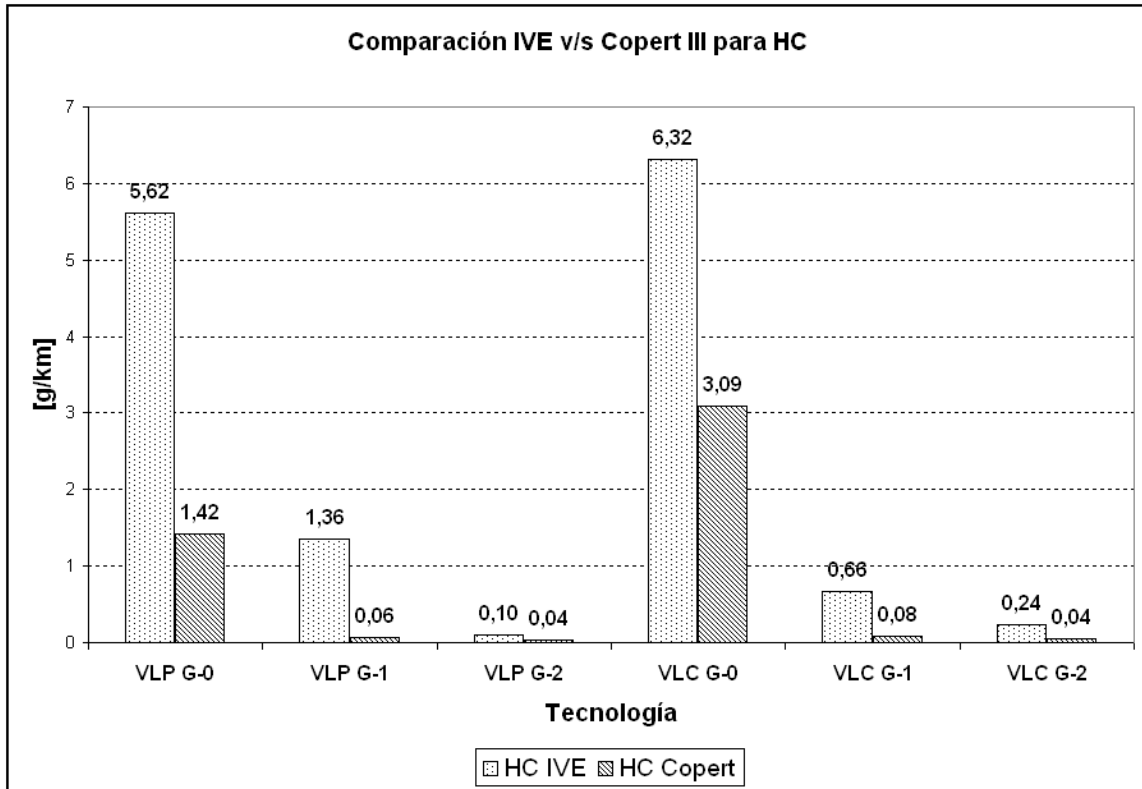


Figura 4.25: Comparación de factores de emisión para HC entre metodología IVE y modelo COPERT III.

Se aprecia claramente que la metodología IVE arroja resultados mayores en todas las tecnologías en comparación con el modelo teórico COPERT III, lo que se puede deber a las diferencias entre los ciclos de conducción, puesto que el modo de conducción empleado en los ensayos, fue más agresivo que el empleado en el ciclo ECE, que es el usado para determinar factores de emisión en el modelo COPERT III.

A continuación, en la figura 4.26 se muestra la comparación por tecnología, en el caso de los vehículos a gasolina, del factor de emisión para monóxido de carbono (CO).

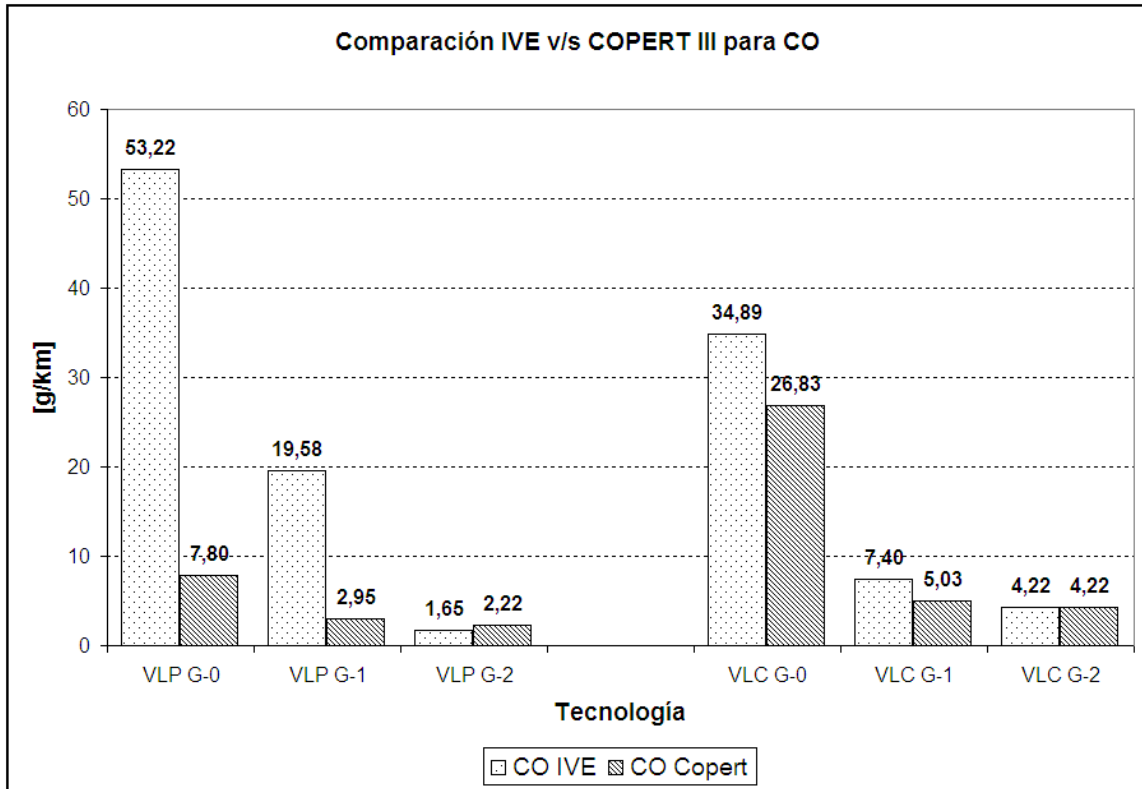


Figura 4.26: Comparación de factores de emisión para CO entre metodología IVE y modelo COPERT III.

Se aprecia para el caso de los VLP G-0, la gran diferencia que hay entre la metodología IVE y el modelo COPERT III, esta se debe al mal estado que hay en el motor de los vehículos antiguos que además no tienen convertidor catalítico así como al hecho de que el modelo COPERT utilizó vehículos que no tienen por qué tener el mismo uso cotidiano que tienen los vehículos medidos, sin embargo, la disminución es bastante significativa al pasar a la tecnología VLP G-1, cerca de un 62% tanto para el caso IVE, como para el modelo COPERT, ahora para el caso de los VLP G-2, los factores de emisión de la metodología IVE son incluso menores que el modelo COPERT, lo que demuestra el buen estado de los convertidores catalíticos de estos vehículos.

Para el caso de los vehículos comerciales la tendencia es parecida, pero con diferencias entre la metodología y el modelo mucho menores.

A continuación en la figura 4.27 se muestran los resultados obtenidos por tecnología al comparar la metodología IVE con el modelo COPERT III en los factores de emisión de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) de vehículos a gasolina.

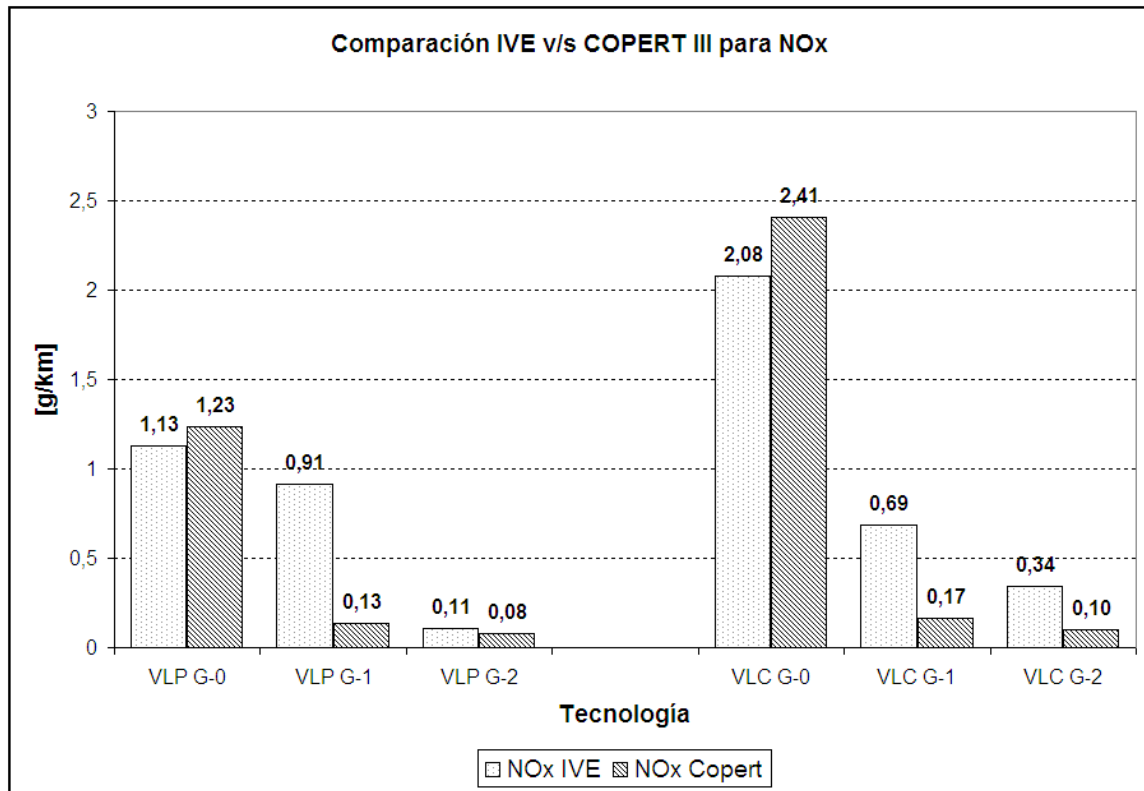


Figura 4.27: Comparación de factores de emisión para  $\text{NO}_x$  entre metodología IVE y modelo COPERT III.

Se puede apreciar una tendencia a la disminución de las emisiones al pasar de una norma a otra más estricta. Sin embargo, al comparar se aprecia un porcentaje alto de diferencia en el caso de los VLP G-1. Esto se puede deber a una mayor temperatura de combustión en este tipo de vehículo. Si se comparan el resto de las tecnologías, las diferencias no son tan grandes, por lo que se puede considerar aceptable los resultados obtenidos.

Un punto importante que cabe señalar al momento de comparar la metodología IVE con el modelo COPERT III, es que este último depende de la velocidad promedio de un ciclo de conducción estandarizado y universalmente aceptado, el ECE, y que se aplicó a todos los vehículos de la muestra utilizada al momento de definir el modelo. En cambio, en la metodología IVE se utilizó un mismo **circuito**, en el que se aplicaron distintos ciclos de conducción, ya que el vehículo era sometido a diferentes estados de sollicitación de acuerdo a como fuese el flujo vehicular al

momento de realizado el ensayo. Es por esto, que se pueden apreciar diferencias significativas al momento de comparar. Esto sucede en el caso de ambos tipos de motores, tanto gasolina y diesel, cuyos resultados se analizan a continuación.

#### **4.4.2 Vehículos con motor Diesel**

Para aplicar el modelo de factores de emisión a la fracción de vehículos con motor diesel, se distribuyó de la siguiente manera para ser comparativo de acuerdo a las normas por las que se rige el modelo COPERT III.

Los vehículos de pasajeros con normativa Tier 0 (VLP D-1) se consideraron como vehículos convencionales, por lo que se aplicaron los factores de emisión dependientes de la velocidad mostrados en la tabla 2.5 de la sección 2.6 del presente informe.

Por otra parte los vehículos de pasajeros diesel inscritos entre los años 2005 y comienzos del 2006 (VLP D-2), se consideraron como EURO III o regidos por la directiva 98/69/EC por lo que se aplicaron los factores de emisión mostrados en la tabla 2.6. A su vez los vehículos de pasajeros diesel inscritos desde 2006 hasta la fecha de desarrollo de este trabajo (VLP D-3) se consideraron como EURO IV o regidos por la directiva 98/69/EC aplicándose los factores de emisión de la misma tabla (2.6).

Sus pares, los vehículos livianos comerciales diesel fueron clasificados y catalogados de la misma manera, por lo que los factores de emisión aplicados a ellos son como sigue:

- VLC D-1 : EURO I o regidos por directiva 91/441/EEC. (Tabla 2.7),
- VLC D-2 : EURO III o regidos por directiva 98/69/EC. (Tabla 2.8),
- VLC D-3 : EURO IV o regidos por directiva 98/69/EC. (Tabla 2.8).

En la figura 4.28 se aprecian los resultados obtenidos de la comparación de factores de emisión para HC entre la metodología y el modelo.

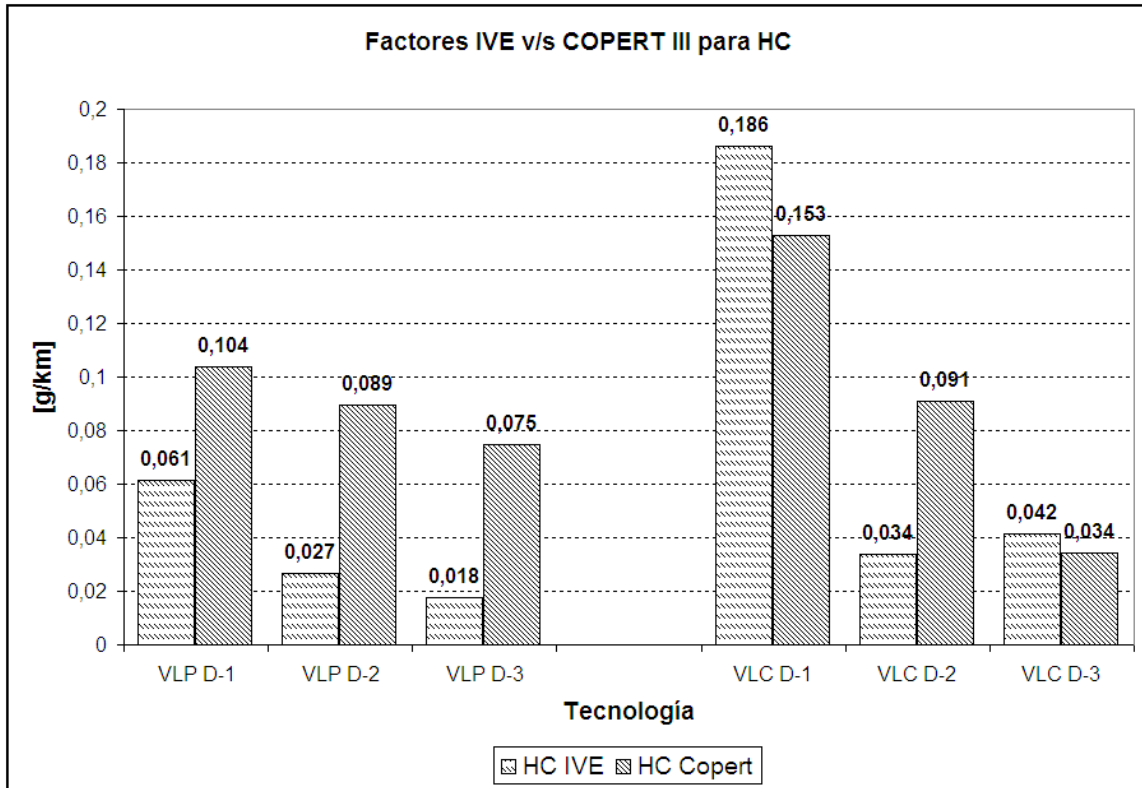


Figura 4.28: Comparación de factores de emisión para HC entre metodología IVE y modelo COPERT III.

Se puede ver una diferencia significativa entre la metodología y el modelo para los resultados obtenidos en los vehículos livianos de pasajeros diesel, resultando este último mucho menor, esto se debe al hecho de que los vehículos VLP D-1, comenzaron a ingresar al país cerca del año 2002, cuando en Europa ya regía la normativa EURO III, pero como la norma chilena establece una normativa Tier 0 sobre este tipo de vehículos, es que se consideraron como EURO I para ser analizados con el modelo COPERT III. Ahora, en el caso de los vehículos comerciales, la tendencia a la disminución a medida que la norma es más rigurosa, no es clara en el caso de los vehículos VLC D-2 con respecto a la metodología IVE. Esto se puede deber al hecho de que la muestra considerada para determinar el factor de emisión en los VLC D-3 tomó sólo 2 ensayos.

Además como se dijo anteriormente, la velocidad promedio determinada para estimar los factores de emisión con el modelo no corresponde a la obtenida en un mismo ciclo de conducción para cada ensayo, como así tampoco lo es en comparación con el ciclo de conducción usado para definir el modelo.

A continuación, en la figura 4.29 se muestra la comparación establecida entre el modelo COPERT III y la metodología IVE para la estimación de factores de emisión para CO.

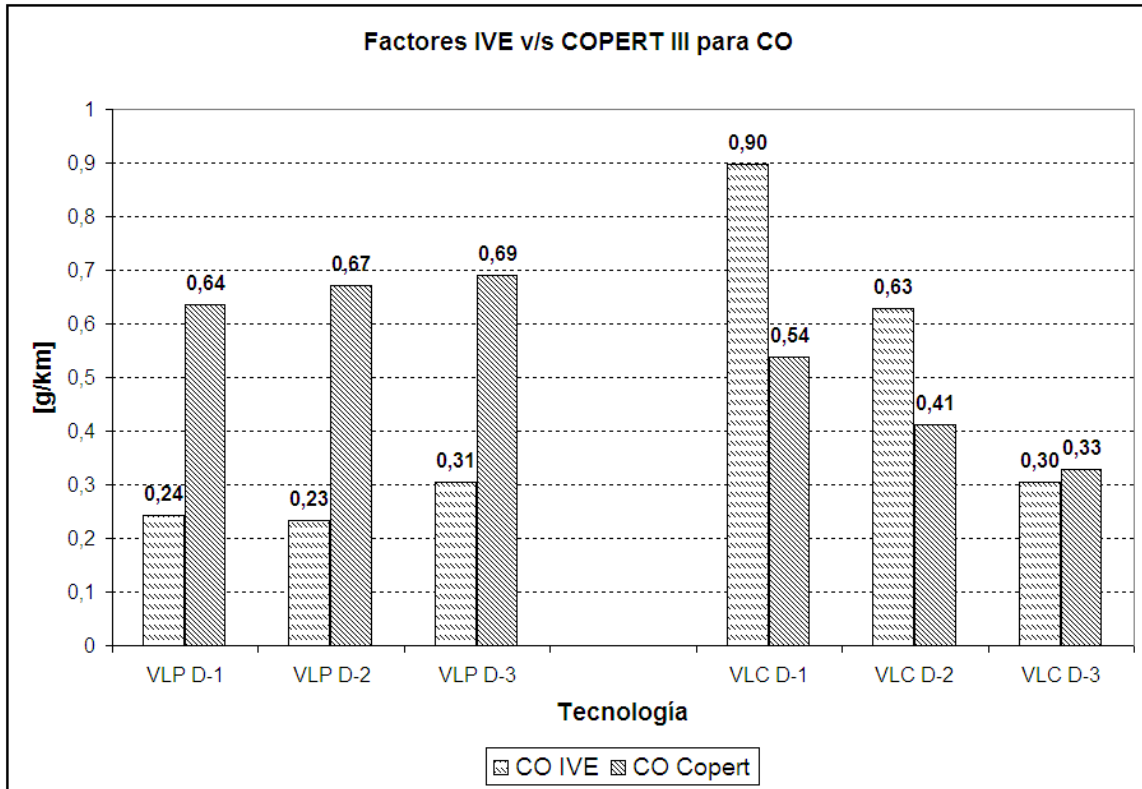


Figura 4.29: Comparación de factores de emisión para CO entre metodología IVE y modelo COPERT III.

Como se aprecia, la tendencia a la disminución es proporcional al aumento de la rigurosidad en el caso de los vehículos VLC D-N, pero en el caso de las tecnologías VLP D-N, hay un aumento en el factor de emisión para el CO en el modelo COPERT III, este se debe a que no hay una disminución porcentual en el modelo para este factor (Ver tabla 2.6) a medida que aumenta la norma, y a que se obtuvieron velocidades promedio mayores en los ensayos de cada tecnología.

En la figura 4.30 se muestran gráficamente los resultados de factores de emisión para el NO<sub>x</sub> tanto en la metodología IVE como el modelo COPERT III.

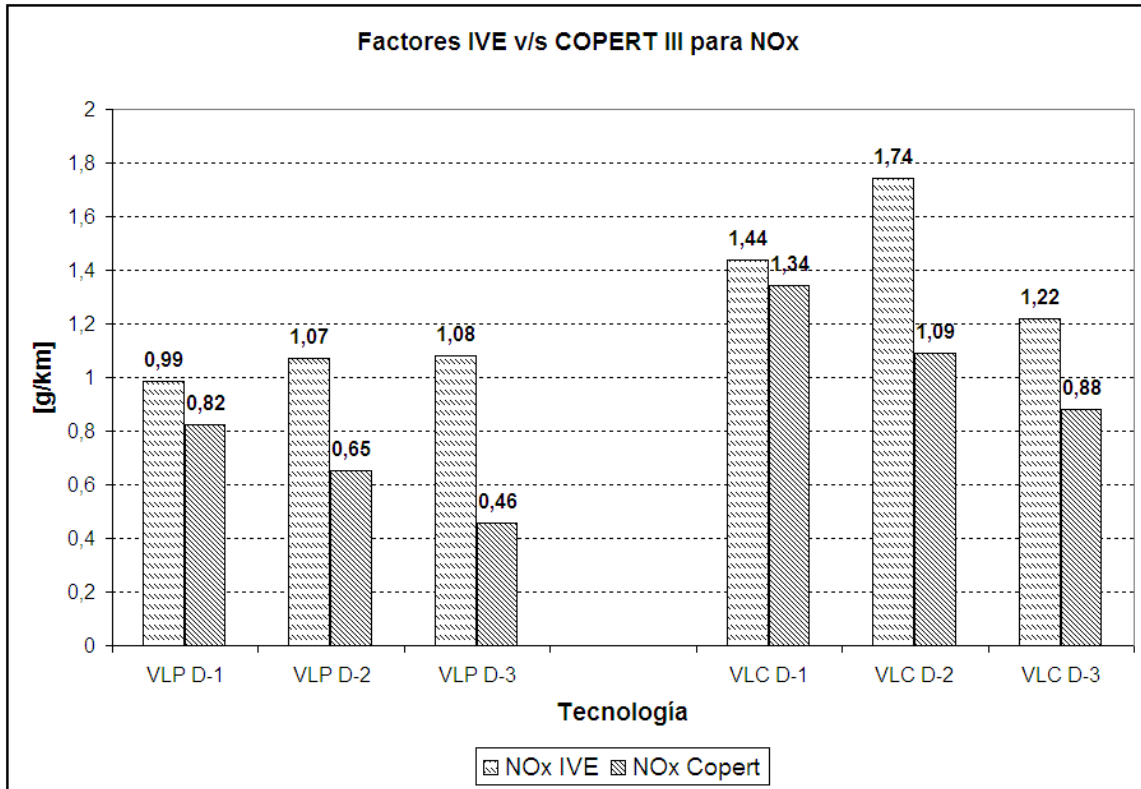


Figura 4.30: Comparación de factores de emisión para NO<sub>x</sub> entre metodología IVE y modelo COPERT III.

Se puede apreciar, que el factor de emisión obtenido con el modelo va decreciendo a medida que aumenta la norma de emisión, sin embargo, para el caso de la metodología IVE, los resultados son mayores, este se puede deber al hecho de que los primeros vehículos en ingresar al país poseían un sistema de inyección mecánica, y en las nuevas tecnologías se presentan sistemas de inyección electrónica, cuya mantención es relativamente complicada debido a que en el país no hay talleres especializados en la reparación o mantención de este sistema de inyección. Además hay que agregar que los vehículos comerciales presentaban motores de mayor capacidad en cuanto a cilindrada, por lo que se obtenía un mayor consumo de combustible y por ende una mayor emanación de NO<sub>x</sub>. También cabe considerar el hecho de que en la actualidad sólo el material particulado es fiscalizado, por lo que los fabricantes de vehículos condicionan a estos a cumplir con las normativas de emisión de MP, olvidando lo que pueda pasar con las emisiones de NO<sub>x</sub>. Esto se puede apreciar analizando también el material particulado, que se muestra a continuación en la figura 4.31.



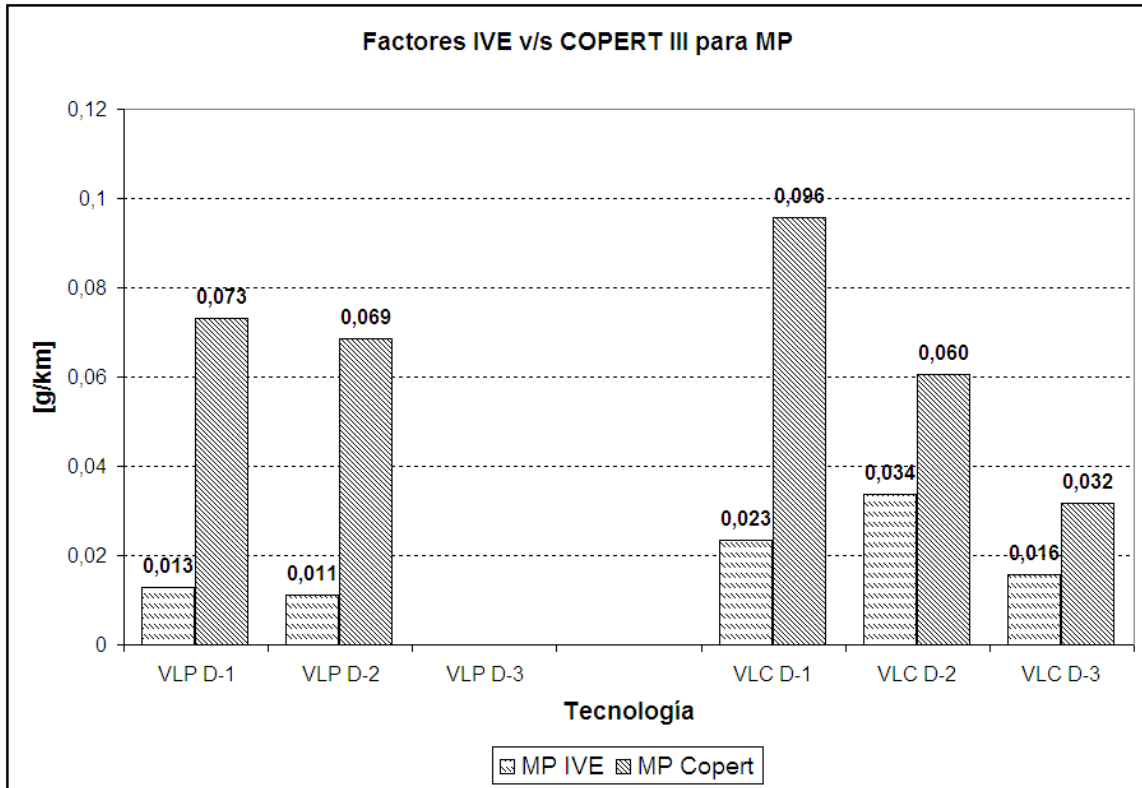


Figura 4.31: Comparación de factores de emisión para MP entre metodología IVE y modelo COPERT III.

El modelo muestra una disminución porcentual del factor de emisión para el material particulado según el modelo COPERT III, pero no así para la metodología IVE. Esto se debe al hecho de que como se dijo anteriormente, en la obtención de los promedios para cada tecnología, habían ciertos puntos discretos que correspondían a vehículos con un motor de mayor cilindrada que otros, por lo que había un mayor consumo de combustible reflejado en la emisión de CO<sub>2</sub> y, por ende una mayor emisión de material particulado.

## Capítulo 5

### Conclusiones

Una conclusión general es el hecho de determinar y establecer Factores de Emisión para vehículos livianos con las tecnologías estudiadas. Estos factores pudieron ser obtenidos en este estudio tras realizar una campaña de medición de emisiones vehiculares, en conjunto con mediciones de características de la actividad realizada, es decir, velocidad del vehículo, distancia recorrida, tiempo empleado, etc.

A continuación, en la tabla 5.1 se presentan los factores de emisión obtenidos en  $\left[\frac{g}{km}\right]$  para las tecnologías de vehículos que utilizan como combustible gasolina, vehículo híbrido y vehículos a gas natural (En estos últimos sólo se considera la fracción no metánica para los hidrocarburos totales).

Tabla 5.1: Factores de Emisión para vehículos que utilizan gasolina, vehículo híbrido y vehículos a gas natural.

<b>Tecnología</b>	<b>HC [g/km]</b>	<b>CO [g/km]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [g/km]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [g/km]</b>
VLP G-0	5,616	53,225	1,131	271,301
VLP G-1	1,358	20,034	0,912	282,982
VLP G-2	0,102	1,649	0,110	237,301
VLP HIB	0,115	0,572	0,047	197,759
VLC G-0	6,319	34,893	2,080	271,846
VLC G-1	0,662	7,396	0,687	323,941
VLC G-2	0,239	4,224	0,340	319,979
VLP GNC	0,207	36,755	1,399	204,900
VLC GNC	0,132	2,206	2,992	284,565

A continuación, en la tabla 5.2 se presentarán los factores de emisión en  $\left[\frac{g}{km}\right]$  para las tecnologías de vehículos con motor diesel.

Tabla 5.2: Factores de Emisión para vehículos con motor diesel.

<b>Tecnología</b>	<b>HC [g/km]</b>	<b>CO [g/km]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [g/km]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [g/km]</b>	<b>MP<sub>2,5</sub> [g/km]</b>
VLP D-1	0,062	0,246	0,986	190,686	0,013
VLP D-2	0,027	0,234	1,073	190,269	0,011
VLP D-3	0,017	0,305	1,079	190,710	n/a
VLC D-1	0,186	0,898	1,437	284,688	0,023
VLC D-2	0,033	0,629	1,745	323,419	0,033
VLC D-3	0,0416	0,30	1,218	283,424	0,015

Para proseguir, se presentarán conclusiones realizadas a cada sección de resultados, de acuerdo al orden en que se presentan en este informe.

## **5.1 Conclusión y discusiones sobre el cálculo numérico de los factores de emisión.**

Como primera conclusión se recalca el hecho de realizar una buena medición de las condiciones ambientales en las que se están realizando las pruebas, específicamente las mediciones de temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica, puesto que de estos parámetros dependen los factores de conversión de base seca a base húmeda, y el factor de corrección por humedad del NO<sub>x</sub>.

Por otra parte, si no se considera el factor de conversión de base seca a húmeda, el porcentaje de error que se puede alcanzar por una sobre-estimación en determinar un factor de emisión es entre el 4 % al 10 %. Es decir, si los resultados se expresan en una base seca, estarán con un porcentaje de diferencia promedio del 7 % con respecto a los resultados expresados en base húmeda.

En el caso de no considerarse el factor de corrección por humedad, los resultados estarán expresados erróneamente, con un error promedio del 5 %, y si además a esto, no se considera el factor de conversión de base seca a base húmeda, el promedio de error alcanza el 12 %.

Es necesario además, conocer la razón atómica del combustible del vehículo que está sometido a los ensayos, puesto que un valor erróneo como  $\alpha = 1$ , por ejemplo, puede llevar a un porcentaje de error de sobre estimación cercano al 10 %.

Se considera que los valores de concentraciones en volumen entregados por los analizadores están correctos, puesto que día a día eran calibrados con gases diseñados especialmente para este fin, y determinar un zero para las mediciones. Esto es muy importante señalar, si se quieren realizar campañas similares a las de este trabajo, es importante que se designe una persona en particular para calibrar diariamente los analizadores, y así obtener resultados correctos en las mediciones.

## **5.2 Conclusión y discusiones sobre el análisis de factores de emisión por tecnología.**

Luego de analizar cada ensayo perteneciente a cada tecnología, se puede apreciar que hay ciertos ensayos que presentan valores a veces mayores y otras veces menores que la tendencia para cada tecnología. Si se analizan estos resultados y se analizan las características del vehículo, se pueden tener ciertas conjeturas al respecto, como por ejemplo, casos en que el vehículo poseía un motor grande y se obtenían valores bajos de factores de emisión para todos los gases en estudio, incluso para el  $\text{CO}_2$ , que es el que refleja el consumo de combustible. Esto se puede deber al hecho de que no siempre se realizaron labores de inspección previa al ensayo, por lo que posiblemente hubieron vehículos cuyo tubo de escape no estaba en las mejores condiciones, y tal vez esto produjo fugas que eran imposibles de detectar por el equipo, tomando una muestra de los gases de escape mucho menor a la que correspondía.

Por el lado contrario, hubieron ensayos que teniendo un motor pequeño, convertidor catalítico, y parecer tener buen estado, arrojaron resultados muy superiores a los esperados, esto se puede deber a una mala mantención del motor del vehículo, a problemas con la inyección, entre otros. Hay ensayos en que al comparar las emisiones de CO y HC, claramente están trabajando bajo una mezcla rica, o mezcla pobre, así como analizar por medio del consumo de combustible la emisión de  $\text{NO}_x$ . Estos son factores que se deben analizar ensayo por ensayo con las características del vehículo, para poder validar o invalidar según corresponda, puesto que se puede inferir claramente sobre las condiciones de emisión.

### 5.3 Conclusión y discusiones sobre la determinación de Factores de Emisión por tecnología

Si se comparan los factores de emisión de los hidrocarburos totales, se nota la disminución porcentual al pasar de una norma a otra más exigente, así como los bajos valores de emisión de HC y CO para los vehículos Diesel. Además es importante poder definir la cantidad porcentual de metano ( $\text{CH}_4$ ) en el GNC al momento de medir hidrocarburos si estos se miden en forma total sin individualización, ya que para este combustible, se debe considerar sólo la fracción no metánica (NMHC).

Si se comparan las emisiones de CO, el único punto que se sale de lo común, corresponde a los vehículos livianos de pasajeros a gas natural, cuya muestra estuvo compuesta en su totalidad por taxis colectivos. Estos son vehículos de trabajo que muchas veces no son sometidos a una mantención adecuada, puesto que deben seguir en circulación diaria y permanente. La mala mantención puede venir incluso ligada a un no cambio de aceite, averías en los cilindros, o en los sistemas de inyección.

Al comparar los factores de emisión para el  $\text{NO}_x$ , se aprecian valores demasiado altos tanto en el caso de los vehículos comerciales como el de los vehículos de pasajeros. Una primera impresión sería establecer que debido al mayor poder calorífico del GNC en comparación de la gasolina, se obtendrán temperaturas de combustión mayores también. Sin embargo, al comparar las temperaturas de escape de los vehículos GNC con las temperaturas de escape de los vehículos a gasolina, estos últimos obtenían valores mayores, por lo que la única alternativa que causa un  $\text{NO}_x$  mayor, es la calidad y química del carbono en combustión, o de la fracción de metano  $\text{CH}_4$  en el combustible.

Debido a esto, es que es importante también definir correctamente la cantidad de componentes metánicas o no metánicas para la determinación de factores de emisión, puesto que de este parámetro dependen 2 gases contaminantes, los HC y los  $\text{NO}_x$ .

Para el caso del material particulado, era de esperar que los vehículos de pasajeros emitieran menos que los comerciales y la tendencia a la disminución a medida que aumenta la normativa también se cumple, exceptuando el punto de los VLC D-2. Ahora bien, puede haber una duda desde el punto de vista de saber que tecnología está correcta, los VLC D-1 o los VLC D-2. Sin embargo, si se aprecian las características de cada vehículo utilizado para la determinación de las tecnologías, hay vehículos con un motor más grande de lo habitual, correspondiendo un mayor

consumo de combustible, y por ende una mayor emisión de material particulado.

## **5.4 Conclusión y discusiones sobre la comparación con un modelo de la literatura**

La principal conclusión de esta sección, es el comportamiento uniforme de reducción porcentual al pasar de una norma a otra con un mayor nivel de restricción, para la mayoría de los contaminantes.

Otro punto importante es destacar el hecho de que el modelo COPERT III es algo teórico, que se planteó después de haber realizado pruebas de emisión en diversos vehículos, pero todos sometidos al mismo ciclo de conducción. Este ciclo puede ser no tan agresivo como el realizado en los ensayos de este trabajo, por lo tanto, al comparar los factores de emisión, se pueden crear diferencias enormes, como lo que sucede en el caso del CO para la tecnología VLP G-0, que si se analizan en su conjunto para la metodología IVE, resultan ser bastante parejos.

Otro contaminante que merece atención es el  $\text{NO}_x$ , que a diferencia de los demás promedios de factores de emisión, tiene una tendencia al alza en el caso de los vehículos con motor Diesel. Esto se puede justificar por el hecho de que los fabricantes de automóviles enfocan sus esfuerzos en reducir las emisiones de MP, descuidando las de los óxidos de nitrógeno, dado que en nuestro país no existen reglamentaciones para este último.

En el caso del material particulado, el modelo COPERT III considera un factor de emisión para  $\text{MP}_{10}$ , mientras que la metodología IVE lo determina para  $\text{MP}_{2,5}$ .

Se recomienda seguir realizando trabajos correspondientes a las campañas descritas en este informe, a fin de establecer factores de emisión en forma real y no teórica, como lo hace actualmente la autoridad ambiental Metropolitana.

## Bibliografía

- [1] John K. Pearson: *Improving Air Quality*, SAE International, United States of America (2001).
- [2] Hans Peter Lenz and Christian Cozzarini: *Emissions and Air Quality*, SAE International, United States of America (1999).
- [3] M. Khare & P. Sharma: *Modelling Urban Vehicle Emissions*, WIT Press, Great Britain (2002).
- [4] Surface Vehicle Emissions Standards Manual: *Constant Volume Sampler System for Exhaust Emissions Measurement*, SAE J1094 JUN92
- [5] Sensors, Inc: *On-Vehicle Gasoline Emission Analyzer SEMTECH-G*, User´s Manual.
- [6] Surface Vehicle Emissions Standards Manual: *Test Procedure For The Measurement Of Gaseous Exhaust Emissions From Small Utility Engines*, SAE J1088 FEB93
- [7] Code of Federal Regulations, 40 CFR 86.144 y 86.1342 SI Units. Disponible en <http://epa.gov/nvfel/methods/noxcorr.pdf>
- [8] Surface Vehicle Emissions Standards Manual: *Measurement of Carbon Dioxide, Carbon Monoxide, and Oxides of Nitrogen in Diesel Exhaust*, SAE J177 JUN95
- [9] COPERT III. Computer program to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors and users manual. *European Environment Agency & European Topic Center on Air Emission*. July 2000.
- [10] Subsecretaría de Transportes: *Normas Sobre Emisiones de Vehículos Motorizados Livianos*, Modificaciones incorporadas : D.S. 280/91; D.S. 150/92; D.S. 145/94; D.S. 207/94; D.S. 165/96; D.S. 16/98(MSGP); D.S. 72/98; D.S. 205/98; D.S. 103/2000; D.S. 189/2000; D.S. 20/2001(MSGP); D.S. 58/2003(MSGP); D.S. 95/2005.
- [11] Diario Oficial de la Unión Europea: *Directiva 2005/78/CE de la comisión de 14 de noviembre de 2005*
- [12] Sensors, Inc: *On-Vehicle Diesel Emission Analyzer SEMTECH-D*, User´s Manual.

- <http://www.conama.cl>
- <http://www.sensors-inc-com>



## **Anexo A**

### **Anexos**

A continuación se entregan los resultados obtenidos para cada ensayo realizado, tanto para vehículos con motor de encendido por chispa como para vehículos con motor Diesel, ordenados por orden de ensayo. Se describen en cada caso la marca, modelo, placa patente única (PPU), año, cilindrada y tecnología a la que pertenece cada vehículo, seguidos de los factores de emisión.

#### **A.1 Vehículos a Gasolina, GNC y híbrido**

Ensayo N°	Tecnología	Marca	Modelo	PPU	Año	CC	HC [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	CO2 [g/km]
1	VLC G-1	Chevrolet	LUV	LH8131	1994	2,3	0,51924	7,2187	0,65637	357,6322
2	VLP G-1	Volkswagen	POLO	RC7857	1997	1,4	3,29015	44,5677	0,93154	225,7915
3	VLP G-1	Citroen	ZX	PG2435	1996	1,4	0,56222	10,5032	0,60752	253,0079
4	VLP G-1	Daewoo	HEAVEN	SJ7174	1998	1,5	2,37599	26,0792	1,61753	353,0701
5	VLC G-1	Suzuki	SAMURAI	RY3152	1998	1,3	0,32431	9,8414	0,30121	282,8482
6	VLP G-2	Toyota	YARIS SPORT	XU9180	2005	1,3	0,07632	0,7004	0,04313	194,7030
7	VLP G-1	Daewoo	ESPERO	KK3174	1994	2	0,72846	7,8933	0,73530	305,4114
8	VLP G-1	Daewoo	ESPERO	KX9587	1994	1,5	1,49400	19,2659	0,53163	345,5512
9	VLP GNC	Hyundai	ACCENT	UE8757	2002	1,5	6,45202	78,0900	0,45531	181,7989
10	VLP G-2	Volkswagen	GOLF	ZP2523	2006	2	0,13571	3,0148	0,09852	256,4108
11	VLP G-1	Toyota	TERCEL	RH1362	1997	1,5	0,19281	1,5606	0,26972	248,9295
12	VLP G-1	Nissan	V16	PK3692	1996	1,5	0,82404	4,7433	0,36788	319,8517
13	VLC G-1	Kia	SPORTAGE	VH3212	2002	2	0,17812	1,1990	0,29268	204,9450
14	VLP G-2	Toyota	YARIS	ZU6495	2006	1,5	0,07285	0,8286	0,06862	193,0445
15	VLC G-2	Renault	SCENIC	YS2918	2005	1,6	0,12916	1,0097	0,08354	240,3440
16	VLP GNC	Nissan	V16	PZ4814	1997	1,6	3,09834	0,8090	1,34682	176,7709
17	VLP G-2	Volkswagen	GOL	XP1687	2005	1,6	0,21367	3,6418	0,10188	268,3817
18	VLC G-1	Land Rover	DISCOVERY	RH2669	1997	3,9	0,44264	6,6465	0,97453	270,1672
19	VLP G-0	Peugeot	205GL	EY5221	1987	1,1	6,27711	72,0892	0,41420	232,6255
20	VLP G-1	Daewoo	ESPERO	PG1223	1997	2	2,21048	24,6137	2,18419	518,1941
21	VLC G-0	Toyota	HIACE	HN3950	1982	4	5,33621	19,5488	3,20883	413,1198
22	VLP G-0	Renault	9TL	EY3684	1987	1,4	7,32902	37,1163	1,05872	186,3108
23	VLP GNC	Daewoo	LANOS	VF2711	2003	1,5	1,24191	67,9995	1,02931	212,7765
24	VLP G-0	Chevrolet	GEMINI	CZ7160	1990	1,5	3,12315	47,4505	2,05540	236,3997
25	VLP G-1	Chevrolet	CORSA	SY6350	1999	1,6	0,27565	101,5928	0,45587	333,3102
26	VLP GNC	Nissan	V16	XH2871	2004	1,6	1,66191	141,6106	1,10190	259,6993
27	VLC G-1	Chevrolet	LUV	TK5409	2000	2,3	0,82362	12,7209	0,78991	475,7398
28	VLP G-2	Chevrolet	CORSA	XE9464	2005	1,6	0,16021	5,1714	0,16505	337,7804
29	VLP G-2	Suzuki	ALTO	YX9114	2007	1,1	0,00274	0,0588	0,03975	188,5566
30	VLP G-1	Peugeot	206	VX7456	2003	1,4	0,11514	3,0832	0,18672	252,5766
31	VLP GNC	Nissan	V16	UE9085	2003	1,6	1,46366	6,6120	0,86120	172,4955
32	VLC G-0	Hyundai	PONY	HX5664	1988	1,2	4,25912	39,5944	0,96822	235,1746
33	VLP GNC	Nissan	V16	XX9241	2004	1,6	2,12092	0,9501	1,05854	249,4835
34	VLC G-2	Suzuki	APV	WJ6682	2006	1,6	0,12537	5,2562	0,02099	341,4506
35	VLP G-0	Seat	FURA	CK1735	1984	0,843	3,84044	39,1151	0,80496	210,0877
36	VLC G-1	Toyota	HILUX	RK2179	1997	2,4	1,05628	13,1188	0,68997	402,7273
37	VLP G-2	Citroen	C3	VW3033	2007	1,6	0,00928	1,2083	0,04137	236,9599
38	VLP GNC	Daewoo	HEAVEN	SS1105	1998	1,6	2,42702	1,4004	1,86183	208,1544
39	VLC G-0	Nissan	D21	KZ9886	1994	2,4	4,37547	45,0856	3,00483	393,3762
40	VLC G-1	Chevrolet	LUV	RY8738	1998	2,3	1,67067	9,4070	2,14234	345,1542
41	VLC G-1	Chevrolet	APACHE	VE4435	2002	2,4	0,43132	12,5266	0,73335	509,2397
42	VLC GNC	Chevrolet	APACHE	XG7563	2005	2,4	1,06074	6,4845	0,79473	322,5493
43	VLC G-2	Chevrolet	APACHE	XG7563	2005	2,4	0,50469	8,8643	1,08035	398,4400
44	VLC GNC	Nissan	D21	YC6461	2005	2,4	2,39485	0,2986	2,33785	290,0456
45	VLC G-2	Nissan	D21	YC6461	2005	2,4	0,08747	3,6463	0,16499	354,7815
46	VLC G-2	Nissan	D21	YC6397	2005	2,4	0,27467	2,8437	0,44245	364,8432
47	VLC GNC	Nissan	D21	YC6397	2005	2,4	1,28493	0,1392	6,21806	275,1821
48	VLP G-0	Mercedes Benz	300SE	AU4482	1988	3	6,66578	14,8731	3,33567	733,5295
49	VLP G-2	Peugeot	307	ZK9127	2006	1,6	0,08938	1,1420	0,13185	294,0649
50	VLC G-1	Suzuki	JIMNY	UT8428	2000	1,3	0,20439	3,7084	0,19685	334,5864
51	VLP G-0	Mercedes Benz	300E	FP3584	1987	3	7,80819	88,6383	0,41110	249,8007
52	VLP G-0	Mitsubishi	LANCER	BH3517	1990	1,3	3,64011	34,5542	0,54352	173,1844
53	VLP G-0	Toyota	TERCEL	KB2644	1992	1,3	4,68248	41,2958	0,87302	222,9492
54	VLC G-0	Chevrolet	LUV	DA8290	1990	1,6	5,36287	35,3014	3,26354	292,5803

55	VLC G-0	Chevrolet	C10	GK7356	1977	4,1	10,03827	8,8383	1,38399	250,4987
56	VLC G-0	Chevrolet	LUV	DJ1675	1990	2,3	3,17958	11,4246	4,38821	354,2197
57	VLC G-0	Volkswagen	GOL PICK UP	FY6436	1988	1,6	10,26394	42,7951	1,76293	227,3699
58	VLP G-0	Mazda	323	HK7275	1978	1,3	3,93292	14,0493	2,35256	252,2373
60	VLP GNC	Chevrolet	CORSA	XH1861	2005	1,6	1,27260	0,3874	3,94027	246,8761
61	VLP G-1	Renault	CLIO	SL2230	1998	1,6	4,24114	38,0569	0,09975	357,1333
62	VLP G-1	Peugeot	306	UD5778	2002	1,6	0,14642	2,8375	0,07576	201,1598
63	VLC G-0	Daihatsu	850	FE1137	1984	0,85	4,58531	48,5194	1,04086	188,7036
64	VLP G-2	Hyundai	ACCENT	YH1823	2005	1,6	0,16625	3,0186	0,50294	263,6726
65	VLP G-2	Toyota	YARIS SPORT	WV4125	2007	1,3	0,03745	0,2742	0,01893	240,3145
66	VLP G-2	Toyota	YARIS SPORT	WK8106	2007	1,3	0,04616	0,7186	0,02675	247,5900
67	VLP G-1	Chevrolet	VECTRA	TU1646	2000	2,2	0,19843	2,4414	0,60735	301,3529
69	VLP G-2	Renault	CLIO	ZP2730	2006	1,6	0,00000	0,8427	0,14109	259,4866
70	VLP G-1	Suzuki	BALENO	ST9978	1998	1,6	0,00000	4,7641	0,17575	255,9487
71	VLP G-1	Daewoo	POINTER	LV9155	1995	1,5	0,00000	32,9155	2,63934	278,0828
72	VLP G-1	Hyundai	ACCENT	VG9665	2002	1,5	0,00000	2,2709	0,48898	213,0723
73	VLP G-1	Fiat	UNO	NL1631	1995	1,1	0,00000	11,4114	1,45705	222,6420
74	VLP G-0	Chevrolet	CHEVETTE	BS3537	1980	1,6	0,00000	159,7955	0,05507	339,8154
75	VLC G-1	Chevrolet	COMBO	VE9071	2003	1,6	0,00000	2,4035	0,34633	325,9521
76	VLC G-0	Mazda	626	DR2324	1992	2	0,00000	14,3498	1,89151	239,6814
77	VLC G-0	Chevrolet	LUV	DY2786	1992	2,3	0,00000	91,8990	0,92280	260,8595
78	VLP G-1	Chevrolet	MONZA	PJ1049	1996	1,8	0,00000	36,9954	1,48391	391,0176
79	VLP G-1	Chevrolet	MONZA	PS7686	1997	1,8	0,00000	26,2692	3,45174	333,8576
80	VLP HIB	Honda	CIVIC	WE6235	2006	1,3	0,29606	0,9560	0,07988	199,9244
81	VLP HIB	Honda	CIVIC	WE6235	2006	1,3	0,04709	0,3879	0,02545	241,9848
82	VLP HIB	Honda	CIVIC	WE6235	2006	1,3	0,01915	0,2938	0,02854	205,0117
83	VLP HIB	Honda	CIVIC	WE6235	2006	1,3	0,06938	1,4029	0,06583	185,3938
84	VLC G-1	Ford	RANGER	NY1959	1996	1,4	0,00000	7,9222	0,99996	358,8372

## **A.2 Vehículos diesel**

Se muestran los resultados obtenidos para los vehículos con motor Diesel. Los datos en color rojo corresponden a los ensayos no válidos, por presentar problemas durante la medición los equipos.

Ensayo N°	Tecnología	Marca	Modelo	PPU	Año	CC	HC [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	CO2 [g/km]	MP[g/km]
1	VLC D-1	CHEVROLET	COMBO	TR-3246	2000	1,70	0,06430	0,4972	0,87070	195,2258	0,04120
2	VLC D-1	KIA	BESTA	NT-4379	1996	2,20	0,33651	0,8924	1,24752	292,5826	0,01295
3	VLC D-3	NISSAN	L200 KATANA	YV-5902	2007	2,50	0,02146	0,2529	1,04957	319,7919	0,02588
4	VLC D-1	RENAULT	TRAFFIC	PT-5732	1997	2,20	0,10171	0,6761	1,23055	269,5001	0,01432
5	VLC D-1	MERCEDES BENZ	MB140D	SK-7475	1998	2,90	0,19579	0,9027	1,19467	298,4760	0,02085
6	VLC D-2	CHEVROLET	CORSA	VC-7337	2002	1,60	0,07415	0,2662	0,80644	205,6856	0,01081
7	VLP D-3	CITROEN	C1	YV-1012	2007	1,40	0,00000	0,3486	0,56067	111,6294	0,00768
8	VLP D-2	FIAT	STRADA	YP-7244	2005	1,70	0,08895	0,3544	0,65106	226,9290	0,01118
9	VLC D-1	SUZUKI	RUGBY	UH-7753	2001	1,90	0,15684	0,6955	0,95057	212,9289	
10	VLC D-2	KIA	BESTA	XS-3663	2004	2,20	0,00778	0,0892	1,83003	342,1425	0,01567
11	VLC D-2	KIA	BESTA	VK-8322	2003	2,20	0,01253	0,2048	1,56665	364,0404	
12	VLC D-1	RENAULT	TRAFFIC	ST-5672	1998	2,10	0,43870	1,1038	1,57245	288,3111	
13	VLP D-2	CITROEN	C3	YG-2498	2005	1,40	0,00671	0,3011	1,26714	169,3305	
14	VLC D-1	CHEVROLET	SILVERADO	NP-3852	1994	6,50	0,05302	1,4326	3,75214	517,0972	
15	VLP D-1	CHEVROLET	F CHEVY	XR-6815	2004	1,70	0,09074	0,2879	0,74026	185,8298	
16	VLC D-3	SSANGYONG	ACTYON	WITHOUT	2007	2,00	0,02627	0,2736	1,45942	282,0256	0,02195
17	VLP D-1	CITROEN	XSARA	XB-6423	2004	1,90	0,00485	0,0140	1,15534	217,8714	0,01021
18	VLC D-2	CHEVROLET	COMBO	WC-1813	2006	1,70	0,01487	0,9459	1,76632	189,0609	0,03644
19	VLP D-1	CHEVROLET	CORSA	VB-2409	2002	1,70	0,14013	0,7544	1,48469	202,4798	0,04487
20	VLC D-2	FIAT	STRADA	VD-2222	2002	1,70	0,05527	0,4604	0,74836	202,2097	0,02738
21	VLC D-1	HYUNDAI	GALLOPER	TP-7219	2000	2,50	0,14272	0,9571	1,19944	272,6686	0,02532
22	VLC D-2	DODGE	RAM	YK-9597	2006	5,90	0,00000	1,3854	3,54330	461,1441	0,01569
23	VLC D-1	SUZUKI	VITARA	UU-9211	2001	1,90	0,00000	0,9221	0,91395	215,4067	
24	VLP D-2	RENAULT	CLIO	XS-2609	2005	1,50	0,01010	0,2180	1,01589	182,6655	
25	VLP D-3	CITROEN	C3	WJ-5797	2006	1,40	0,02587	0,4321	1,02999	203,7726	
26	VLC D-3	PEUGEOT	BOXER	WB-3850	2006	2,00	0,10315	0,3281	1,35048	266,8568	0,00719
27	VLP D-2	PEUGEOT	206	YY-5475	2005	1,40	0,00170	0,1058	0,94340	163,7285	
28	VLP D-3	PEUGEOT	206	ZB-4723	2006	1,40	0,00921	0,1784	1,12965	177,6489	
29	VLC D-3	SUZUKI	XL7	WF-7168	2006	2,00	0,01545	0,1758	0,98271	266,0016	0,00828
30	VLP D-1	HYUNDAI	ACCENT	YC-2175	2004	1,50	0,01024	0,2000	0,79998	180,0606	
31	VLC D-3	TOYOTA	HILUX	WY-8033	2007	2,50	0,00000	0,4882	1,24987	282,4429	
32	VLC D-2	SSANGYONG	KORANDO		2006		0,03841	0,3093	0,68603	287,3439	
33	VLC D-2	KIA	BESTA	XK-1516	2004	2,20	0,00000	1,3978	1,22182	325,9950	0,07281
34	VLC D-2	MAZDA	B2500	WD-2531	2005	2,50	0,00000	0,1962	0,92035	376,4006	0,00001
35	VLP D-2	HYUNDAI	ACCENT	ZC-2681	2005	1,50	0,00000	0,1912	1,49046	208,6947	
36	VLP D-1	CHEVROLET	CORSA	VH-8705	2003	1,70	0,00000	0,0732	0,72963	193,1497	0,01545
37	VLC D-2	CITROEN	BERLINGO	ZN-1353	2006	1,40	0,00000	0,0601	0,70852	248,8332	0,00433
38	VLP D-1	PEUGEOT	206	VT-1905	2003	1,40	0,00000	0,0000	0,00000	0,0000	0,00000
39	VLP D-1	PEUGEOT	206	XS-7604	2004	1,40	0,00000	0,1260	1,00342	164,7261	
40	VLC D-2	DODGE	RAM	ZK-7866	2006	5,90	0,00000	1,1775	4,56853	607,7334	0,05802