



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE



Fundación Biodiversidad

Proyecto



# MEMORIA TÉCNICA

*Elaborado por: Manuel Pujadas  
Aida Domínguez*

*Unidad de Emisiones Contaminantes  
Departamento de Medio Ambiente  
CIEMAT*

*(Versión pública)*



## El Proyecto CORETRA ha sido

financiado por



realizado por



con la colaboración técnica de **Technet**



## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. EVALUACIÓN DE LAS ACTUACIONES.....	3
2.1 Objetivos .....	3
2.2 Actuaciones previstas .....	4
2.3 Desarrollo de las actuaciones ejecutadas .....	7
2.4 Evaluación de las actuaciones ejecutadas .....	8
3. RESULTADOS .....	11
3.1 Campañas de medida <i>on-road</i> de emisiones del parque circulante.....	11
3.2 Medidas <i>on-road</i> de penachos sintéticos .....	14
3.3 Ensayos en Banco motor.....	21
4. ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE MEDIDAS <i>ON-ROAD</i> EN LA COMUNIDAD DE MADRID. DETECCIÓN DE ALTOS EMISORES.....	27
4.1 Porcentaje de Altos Emisores en función del Plume Size registrado .....	27
4.2 Porcentaje de Altos Emisores en función de la VSP .....	31
4.3 Influencia de la temperatura ambiente sobre el porcentaje de Altos Emisores .....	35
4.4 Casos ejemplo de vehículos registrados en varias ocasiones .....	38
5. CONCLUSIONES Y VALORACIÓN GENERAL DE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO .....	41
6. BIBLIOGRAFÍA .....	46



## 1. INTRODUCCIÓN

La **Ley 34/2007**, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera es la norma de mayor rango actualmente en vigor en España por la que se regula todo lo relacionado con el control y la vigilancia de la contaminación atmosférica en nuestro país. El objetivo global de esta Ley es establecer las bases necesarias para la prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica con el fin de intentar evitar o al menos reducir los daños que de ella puedan derivarse sobre las personas, el medio ambiente y bienes de cualquier índole. Elemento clave de esta estrategia de lucha contra la contaminación atmosférica es el control de las emisiones primarias en los propios términos fuente, de forma que la reducción de las mismas debe ser siempre un objetivo a perseguir.

**El Real Decreto 102/2011**, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, desarrolló la citada Ley 34/2007 y traspuso la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Este Real Decreto establece que para aquellos contaminantes en que se observen comportamientos similares en cuanto a fuentes, dispersión y niveles en diferentes zonas o aglomeraciones, la Administración General del Estado debe elaborar planes nacionales de mejora de la calidad del aire. Por esta razón el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente diseñó y aprobó el “Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016: **Plan AIRE**” [1].

El Plan *AIRE* realiza un diagnóstico de la situación actual de la calidad del aire en España y las conclusiones a la que llega constituyen la base sobre la que se plantea un conjunto de acciones que buscan cumplir un objetivo fundamental: “impulsar medidas que actúen ante los problemas de calidad del aire más generalizados en nuestro país, de forma que se respeten los valores legalmente establecidos de calidad del aire.” En su análisis preliminar este Plan asume el gran peso que tienen las emisiones procedentes del tráfico de vehículos en el deterioro de la calidad del aire urbano de nuestras ciudades y una de las conclusiones más importantes es que la evolución del parque automovilístico español en los últimos años ha tenido claroscuros. El perfil del parque circulante se ha transformado notablemente y las características principales de la evolución experimentada son las siguientes: se ha producido un fuerte aumento del número de vehículos, con un importante rejuvenecimiento general del parque y con un aumento muy significativo del porcentaje de vehículos diésel. Como consecuencia de estos cambios, existen efectos positivos como los derivados

de la entrada de vehículos de última generación, menos contaminantes que los de normas anteriores, pero esta reducción potencial en las emisiones se ha visto compensada por el aumento del tamaño de la flota y por esa “dieselización” del parque circulante (que alcanzó el 60% en 2013) puesto que los motores diésel generan mayor emisión de partículas y de NO<sub>2</sub> que los motores de gasolina.

El Plan *AIRE*, propuso un conjunto de objetivos específicos y de medidas concretas (horizontales y sectoriales) que teóricamente deberían alcanzarse e implementarse entre 2013 y 2016. En concreto, en el ámbito relacionado con Transportes-Tráfico-Movilidad se definieron 12 objetivos y se propuso la adopción de 33 medidas. Uno de esos objetivos específicos fue la “Identificación de vehículos de alto potencial contaminador” que a su vez llevaba asociada una medida: “La normalización de una tecnología para el empleo de sensores remotos en la medición de las emisiones de los vehículos”.

El proyecto CORETRA “Control Remoto de las Emisiones del Tráfico” fue presentado a la convocatoria de 2014 de la *Fundación Biodiversidad* [2] precisamente para abordar la problemática relacionada con las dificultades técnicas que existen para la normalización de los sistemas de medida remota de las emisiones del tráfico y finalmente la propuesta fue aprobada por la *Fundación Biodiversidad* que junto con el *CIEMAT* [3] son los organismos que lo han financiado. CORETRA aborda un tema novedoso a nivel europeo porque, aunque las técnicas remotas ópticas [4, 5, 6, 7] ya se han aplicado en algunos países en medidas de emisiones de tráfico, especialmente en USA [8, 9], las experiencias desarrolladas en Europa han sido meramente exploratorias o bien se han aplicado al estudio de casos o situaciones específicas [10].

Desde hace tiempo las técnicas de detección remota se vienen aplicando en los ámbitos de la vigilancia de la calidad del aire ambiente y del control de emisiones de fuentes fijas, aunque en este último caso su uso se haya limitado esencialmente a la monitorización de emisiones canalizadas (chimeneas industriales). Esto ha sido posible porque en los dos ámbitos algunas técnicas remotas han demostrado su adecuación a las exigencias de las correspondientes normativas técnicas y por ello han podido ser homologadas, aspecto esencial e ineludible para posibilitar su utilización en aplicaciones sujetas a la normativa ambiental. En el caso de las emisiones de fuentes móviles (vehículos, etc.), las técnicas remotas capaces de su caracterización no han sido hasta el momento homologadas en Europa lo que en la práctica ha impedido su empleo con carácter oficial.

El proyecto CORETRA ha intentado resolver ciertas lagunas técnicas y aportar información para ayudar a cambiar esta situación y conseguir que en el futuro más o menos próximo las técnicas de medición remota de emisiones de vehículos puedan formar parte de la batería de medios técnicos a



disposición de las Administraciones públicas españolas competentes en calidad ambiental y tráfico (MAGRAMA, CC.AA., DGT, etc.), de forma que se logre un control más eficaz de las emisiones producidas por el tráfico, con una reducción real de las mismas y, en definitiva, una mejora de la calidad del aire.

Este proyecto ha abordado en profundidad cuestiones de carácter metrológico instrumental (incertidumbre de las medidas, aplicabilidad, etc.) vinculadas a este tipo de sistemas remotos y también ha intentado documentar de manera actualizada el comportamiento emisor del parque circulante español (distribución estadística de emisiones) utilizando este tipo de sensores remotos para realizar un acopio masivo de datos sobre las emisiones generadas por los vehículos que circulan actualmente por nuestras carreteras. A partir de estos resultados se ha logrado obtener una imagen bastante clarificadora del comportamiento del parque de turismos español y avanzar en la definición de aspectos imprescindibles para concretar un primer marco normativo que ampare y regule el uso con fines legales de estas técnicas remotas de medida de emisiones contaminantes de automóviles, asumiendo que será el Estado quien tendrá el control metrológico sobre esos instrumentos de medida [11].

## **2. EVALUACIÓN DE LAS ACTUACIONES**

El proyecto CORETRA se ha desarrollado siguiendo el planteamiento reflejado en la propuesta aprobada por la Fundación Biodiversidad que responde a unos objetivos muy concretos y se basa en la aplicación de una metodología de trabajo novedosa en nuestro país.

### **2.1 Objetivos**

El objetivo general del proyecto CORETRA es el siguiente:

El estudio de aspectos metrológicos relevantes vinculados al rendimiento y la operación de las técnicas de medida remota de las emisiones contaminantes de vehículos en circulación normal (*on-road*) y el análisis de viabilidad de su potencial aplicación en el control individualizado de las emisiones de vehículos con vistas a la identificación de los vehículos Altos Emisores (AE) que circulan por las carreteras españolas.

Para ello en CORETRA se han planteado los siguientes objetivos específicos complementarios:

- Diseño e implementación de procedimientos experimentales que permitan el análisis y evaluación desde un punto de vista metrológico del comportamiento de los equipos de medida remota de emisiones de vehículos *on-road*.
- Obtención mediante el uso de técnicas remotas de una amplia base de datos experimental actualizada y representativa de las emisiones que produce el parque circulante español actual.
- Análisis de la viabilidad técnica de incorporar al marco normativo español la identificación de vehículos Altos Emisores a través del control remoto *on-road* de las emisiones del tráfico.

## 2.2 Actuaciones previstas

Para la consecución de estos tres objetivos independientes y complementarios se ha seguido el esquema de trabajo previsto en el cronograma de actividades descrito en la propuesta del proyecto. Estas actividades han sido las siguientes:

**Actividad 1.** Medidas *on-road* con instrumentos remotos RSD para la adquisición masiva de datos de emisión del parque móvil circulante.

**Actividad 2.** Experimentos con RSD *on-road* con vehículos de emisión cero (emisiones de referencia).

**Actividad 3.** Acondicionamiento técnico del Banco motor del CIEMAT.

**Actividad 4.** Experimentos con RSD en Banco motor (emisiones controladas).

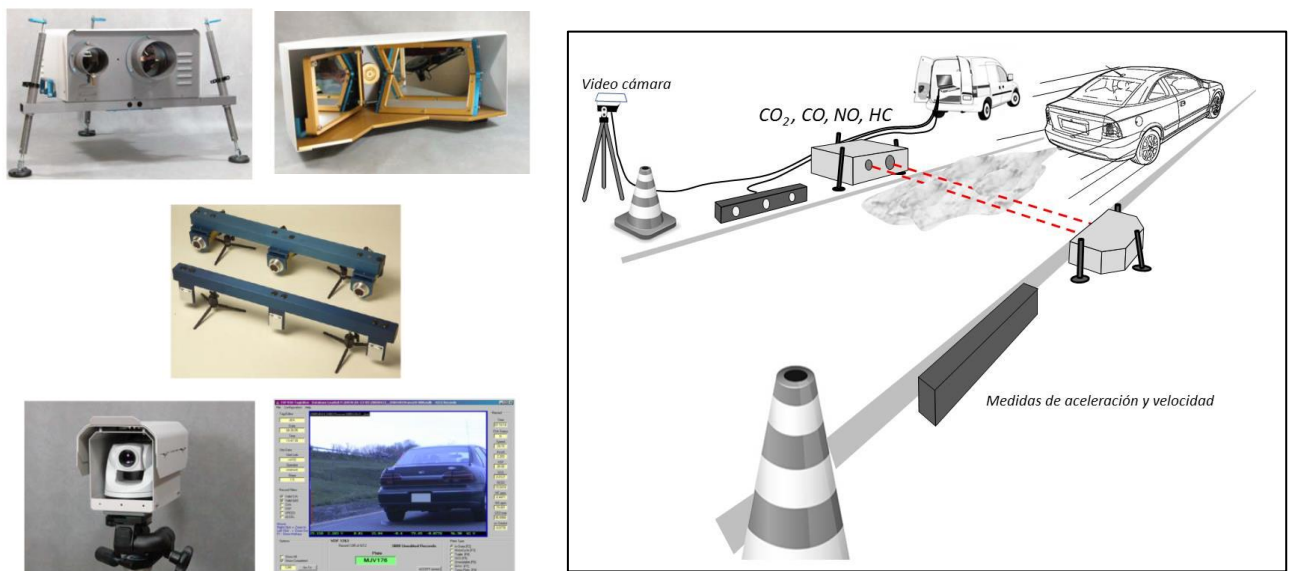
**Actividad 5.** Tratamiento de datos.

**Actividad 6.** Elaboración de Informe de resultados.

La implementación exitosa de todas estas actividades en los nueve meses de duración del proyecto ha sido posible gracias a que en España ya se habían desarrollado algunos estudios y proyectos de I+D utilizando este tipo de tecnología. En concreto, la empresa TECHNET [12], a través del laboratorio de ensayos RSLab [12], tenía experiencia contrastada en la utilización del sistema de AccuScan™ RSD4600, instrumento de medida remota de emisiones de vehículos, patentado y fabricado por la empresa ESP (USA) [13]. RSLab cuenta con la acreditación de ENAC [14] como laboratorio de ensayo experto en la utilización de esta tecnología para la realización de ese tipo de medidas y por ello se ha contado con su colaboración a través de la contratación de una Asistencia Técnica.

Aunque el instrumento RSD4600 fabricado por ESP es el equipo de que disponía TECHNET y aunque no es el último modelo de este tipo de sistemas existente el mercado, sí se trata de un equipo suficientemente avanzado en su gama, por ello se ha considerado suficientemente representativo del estado del arte de esta tecnología y el sistema utilizado en las actividades del proyecto CORETRA.

El instrumento RSD4600 permite la realización de medidas remotas, por medios ópticos no intrusivos, de las emisiones de los vehículos en condiciones reales de circulación por carretera. El sistema utiliza en concreto dos haces de luz, uno en la región ultravioleta (UV) y otro en el rango infrarrojo (IR), de forma que estos haces cruzan la carretera en un camino perpendicular al eje de la vía en la que se van a realizar las medidas de emisiones y más o menos en una trayectoria paralela a la superficie. Los haces son reflejados en un espejo de arista de cubo en donde y vuelven por un camino similar hasta el equipo de medida en donde son detectados y analizados. A partir del estudio de las absorciones producidas por los gases en bandas espectrales específicas del UV y el IR, este equipo mide las concentraciones de monóxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrocarburos (HC) presentes en los penachos de gases de escape de los vehículos cuando éstos pasan frente al equipo. Durante el proceso de medida el sistema recoge también información sobre la velocidad y aceleración de cada vehículo registrado y toma imágenes del mismo (OCR o reconocimiento óptico de caracteres). A través del estudio de las placas de matrícula se pueden obtener las características técnicas de todos los vehículos registrados.



Componentes del sistema remoto AccuScan™ RSD4600 y esquema de la medida de emisiones *on-road*.

**Datos técnicos correspondientes a las medidas y resultados producidos por el instrumento AccuScan™ RSD4600:**

El equipo RSD4600 proporciona como datos de salida las ratios de las concentraciones de CO/CO<sub>2</sub>, NO/CO<sub>2</sub> y HC/CO<sub>2</sub> presentes en cada penacho medido y el fabricante en su información técnica [15] vincula la incertidumbre de estos datos a dos posibles situaciones:

- Cuando el contenido de CO<sub>2</sub> en el penacho detectado supera el 20%.cm (concentración linealmente integrada en el camino óptico definido), esas incertidumbres máximas son del 10%:

<b>CO<sub>2</sub> plume &gt; (greater than) 20%-cm</b>		
<b>Static background conditions and mean value</b>		
CO% / CO <sub>2</sub> %	±0.007 or ±10%	of reading, whichever is greater
HC ppm / CO <sub>2</sub> % (propane)	±6.6 or ±10%	of reading, whichever is greater
NO ppm / CO <sub>2</sub> %	±10 or ±10%	of reading, whichever is greater
CO%	±0.1 or ±10%	of reading, whichever is greater
HC (propane) ppm	±100 or ±10%	of reading, whichever is greater
NO ppm	±150 or ±10%	of reading, whichever is greater

**Static background conditions and mean value of CO<sub>2</sub> plume > 20 %-cm:**

- Cuando el contenido de CO<sub>2</sub> en el penacho detectado es inferior a 20%.cm, esas incertidumbres máximas llegan hasta el 15% :

<b>CO<sub>2</sub> plume &lt; (less than) 20%-cm</b>		
<b>Static background conditions and mean value</b>		
CO% / CO <sub>2</sub> %	±0.015 or ±15%	of reading, whichever is greater
HC ppm / CO <sub>2</sub> % (propane)	±10 or ±15%	of reading, whichever is greater
NO ppm / CO <sub>2</sub> %	±10 or ±15%	of reading, whichever is greater
CO%	±0.15 or ±15%	of reading, whichever is greater
HC (propane) ppm	±150 or ±15%	of reading, whichever is greater
NO ppm	±225 or ±15%	of reading, whichever is greater

**Static background conditions and mean value of CO<sub>2</sub> plume < 20 %-cm:**

## 2.3 Desarrollo de las actuaciones ejecutadas

Las actividades desarrolladas en CORETRA han seguido el siguiente esquema de trabajo:

**A1.** Campañas de medida *on-road* de emisiones del parque circulante:

Realización de 2 Campañas de medida de emisiones de vehículos con un equipo RSD4600, en carreteras de la Comunidad de Madrid y en dos épocas del año diferentes.

**A2.** Medidas *on-road* de penachos sintéticos (gases de referencia):

Realización de medidas con el equipo RSD4600 sobre penachos gaseosos generados sintéticamente a partir de botellas de gases certificados. Los experimentos se han llevado a cabo en diferentes configuraciones con el fin de poder estudiar los posibles efectos que las condiciones dinámicas y ambientales del aire pueden tener sobre la calidad de las medidas.

**A3.** Acondicionamiento del banco motor:

Con el fin de poder utilizar el banco motor del CIEMAT equipado con un motor diésel Euro 4 (VAG 2.0 TDI 140cv tipo BKD) y un freno dinamométrico Schenck W150 para la realización de ensayos controlados de medida de emisiones con RSD4600 en diferentes condiciones de VSP (vehicle specific power) del motor, fue necesario modificar el sistema de refrigeración agua-aire del conjunto motor-freno dinamométrico porque su configuración original no permitía trabajar con valores de VSP superiores a 15. Este acondicionamiento del banco motor exigió una actuación profunda de rediseño remodelación del sistema de refrigeración existente.

**A4.** Ensayos en banco motor:

Medidas con RSD4600 de las emisiones generadas en banco motor con freno dinamométrico, automatizado y comandado desde un ordenador. Estos experimentos buscan averiguar si existe algún tipo de influencia en la respuesta del sensor remoto ante diferentes valores del parámetro VSP (vehicle specific power), aspecto crucial sobre el que el fabricante del equipo y el propio alcance de la acreditación ENAC al laboratorio RSLab imponen restricciones.

Las actividades **A5** y **A6** también han sido desarrolladas según lo previsto.

## 2.4 Evaluación de las actuaciones ejecutadas

### A1. Campañas de medida on-road de emisiones del parque circulante:

Las dos campañas de medida de emisiones de tráfico realizadas en el proyecto CORETRA fueron subcontratadas por CIEMAT a TECHNET/RSLab que, como se ha explicado anteriormente, es la única empresa española que cuenta con la capacidad técnica y experiencia suficientes como para poder llevar a cabo el tipo de estudio que se precisaba. Ambas campañas se llevaron a cabo en estaciones del año distintas (otoño 2014 e invierno 2015). Por razones logísticas, presupuestarias y de tiempo, las medidas se realizaron únicamente en carreteras de la Comunidad de Madrid pero se considera que la Base de Datos obtenida durante estas campañas refleja de manera muy representativa la realidad del parque circulante existente en esta región, y en primera aproximación puede considerarse razonablemente representativo del perfil del parque circulante español. Partiendo de esta hipótesis de trabajo, el posterior análisis en profundidad de esta base de datos proporcionará un conocimiento del comportamiento emisor del parque automovilístico nacional actualizado. Se considera que el desarrollo de esta acción ha sido muy positivo.

### A2. Medidas *on-road* de penachos sintéticos (gases de referencia):

Para cumplir el objetivo de estudiar metrológicamente el funcionamiento de los equipos de medida remota de emisiones de vehículos se planteó la necesidad de determinar la incertidumbre de los resultados generados por el instrumento RSD 4600 a partir del empleo de elementos de referencia certificados o contrastados. Esto se puede resolver de dos formas: implementando medidas sobre materiales patrón o utilizando mensurandos de valor desconocido pero realizando medidas en paralelo con otro sistema (equipo de referencia) de incertidumbre conocida y adecuada.

En el caso de las medidas remotas de emisiones de vehículos *on-road* existe una limitación fundamental: que los mensurandos a determinar son únicos y no reproducibles. Ello se debe a que el penacho de gases generado por cada vehículo en el momento en que éste pasa ante un equipo de medida de emisiones se produce a partir de una condición de carga del motor específica (dependiente de variables como la velocidad y aceleración instantáneas, pendiente de la carretera, temperatura del motor, etc.) y en unas condiciones ambientales y dispersivas concretas (viento, temperatura, humedad, concentraciones de fondo, etc.). Se trata, por tanto, de eventos singulares y las concentraciones gaseosas generadas no pueden ser replicadas exactamente para permitir nuevas determinaciones, por lo que no es posible evaluar fácilmente las incertidumbres reales asociadas a

este tipo de medidas *on-road*. En consecuencia, para poder evaluar la incertidumbre de los resultados se requiere plantear ensayos específicos que sí permitan generar un conjunto amplio de datos sobre los que sí se pueda realizar un análisis pormenorizado de la incertidumbre de cada caso individual así como una evaluación estadística del conjunto.

Las técnicas ópticas empleadas por los sensores remotos *on-road* son capaces de medir concentraciones gaseosas linealmente integradas en el camino óptico definido por las posiciones relativas de su emisor y su detector de luz. Puesto que la geometría y dimensiones reales de los penachos analizados son desconocidas, además de rápidamente variables, estas técnicas no permiten obtener las concentraciones absolutas de los gases constituyentes. Por esta razón este tipo de sensores remotos como el RSD4600 sólo ofrecen resultados de ratios de concentración de algunos de los compuestos gaseosos presentes en los penachos analizados y para que esas determinaciones rápidas se puedan realizar con éxito es preciso que se cumplan unas condiciones mínimas. En el caso concreto del equipo RSD4600, el propio sistema dispone de un procedimiento de aceptación/rechazo automático de las medidas que realiza y sólo son consideradas válidas cuando la concentración integrada de CO<sub>2</sub> en el penacho supera un determinado umbral y cuando el tiempo de persistencia del mismo en el camino óptico es >0.5 seg. Para cada medida aceptada como válida el RSD4600 determina y reporta un parámetro denominado Plume Size (PS) relacionado directamente con la concentración integrada de CO<sub>2</sub> presente en cada penacho analizado. El fabricante del RSD4600 asegura que cuando una medida ha sido considerada válida las incertidumbres asociadas a las ratios de CO/CO<sub>2</sub>, NO/CO<sub>2</sub> y HC/CO<sub>2</sub> nunca superan el 15% y que cuando las concentraciones integradas de CO<sub>2</sub> son superiores a 20%.cm los datos reportados tienen una incertidumbre máxima del 10%.

A partir de las medidas con penachos sintéticos realizadas en esta Actividad se han podido obtener resultados muy fiables sobre el comportamiento metrológico del RSD4600 por lo que la evaluación de esta actividad es muy positiva.

### **A3. Acondicionamiento del banco motor:**

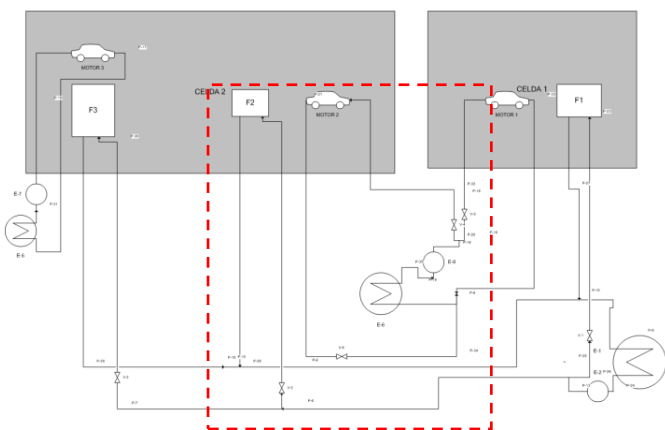
Tal y como estaba previsto, se acometieron los trabajos de reacondicionamiento del sistema del sistema de refrigeración del banco motor del CIEMAT que fue necesario abordar para poder dar cumplimiento al objetivo de evaluar metrológicamente el funcionamiento del instrumento RSD4600 con emisiones de un motor sometido a diferentes condiciones de Potencia Vehicular Específica (VSP). Este era un requisito necesario para completar la caracterización de la incertidumbre del

equipo de medida pero suponía en la práctica trabajar llevando el motor de que se dispone en el laboratorio a unas condiciones de VSP muy exigentes que debían mantenerse el tiempo necesario para que la temperatura de los gases de escape se estabilizara.

En condiciones de tráfico real, valores de VSP elevados (mayores de 22) sólo se adquieren en momentos puntuales de la conducción pero en estos ensayos estaríamos en valores superiores que deberían ser alcanzados de manera repetida, por lo que tanto el motor como el freno alcanzarían temperaturas muy elevadas que de no poderse controlar implicarían daños estructurales irreversibles, por esta razón se consideró un aspecto crucial garantizar una refrigeración adecuada de ambos sistemas.

Fue necesario realizar un rediseño de los sistemas de refrigeración existentes en el banco motor para finalmente proceder a su reforma, por lo que los trabajos consistieron en:

- a) Rediseño del circuito de refrigeración de las celdas de motores del laboratorio. Fue necesario modificar el trazado original de tuberías para independizar la parte correspondiente al motor de la utilizada en el freno.
- b) Instalación de las nuevas tuberías. Se sustituyeron las mangueras originales por nuevas mangueras con sus correspondientes válvulas y elementos de purga. En las zonas más difíciles por cuestiones de limitación de espacio se utilizaron mangueras flexibles.
- c) Cuando se realizó la instalación de todo el material, se procedió al llenado con refrigerante de la instalación para la detección y eliminación de las fugas existentes.



Esquema e imágenes de las actuaciones en el banco motor del CIEMAT (recuadro).

Después de todos los tests realizados a la nueva configuración del sistema de refrigeración del conjunto motor-freno a utilizar en CORETRA, se considera que la ejecución de esta actividad ha sido correcta y satisfactoria.



#### A4. Ensayos en Banco motor:

Una vez remodelado el circuito de refrigeración del Banco motor, los experimentos programados para estudiar los posibles efectos del parámetro VSP sobre las medidas del sensor remoto RSD4600. Como se indicó anteriormente, las medidas realizadas por el RSD4600 sobre vehículos en carretera no pueden ser evaluadas individualmente en términos metrológicos por lo que para estudiar la influencia de la VSP resulta imprescindible definir ensayos controlados en banco motor. De este modo, se pueden realizar experimentos repetitivos llevando cada vez al motor a condiciones de VSP idénticas a las anteriores o diferentes y estudiar qué pasa con los resultados de las medidas de ratios de concentraciones de gases ofrecidas por el RSD. Para ello también fue imprescindible contar con el equipo OBS 2200 de Horiba, un sistema de medida de emisiones no remoto, que se utilizó en paralelo y que fue tomado como referencia. De este modo, los resultados del RSD4600 fueron contrastados con los de este equipo y de este modo evaluados.

La ejecución de esta actividad también fue acorde según lo previsto y por tanto la evaluación es positiva.

### 3. Resultados

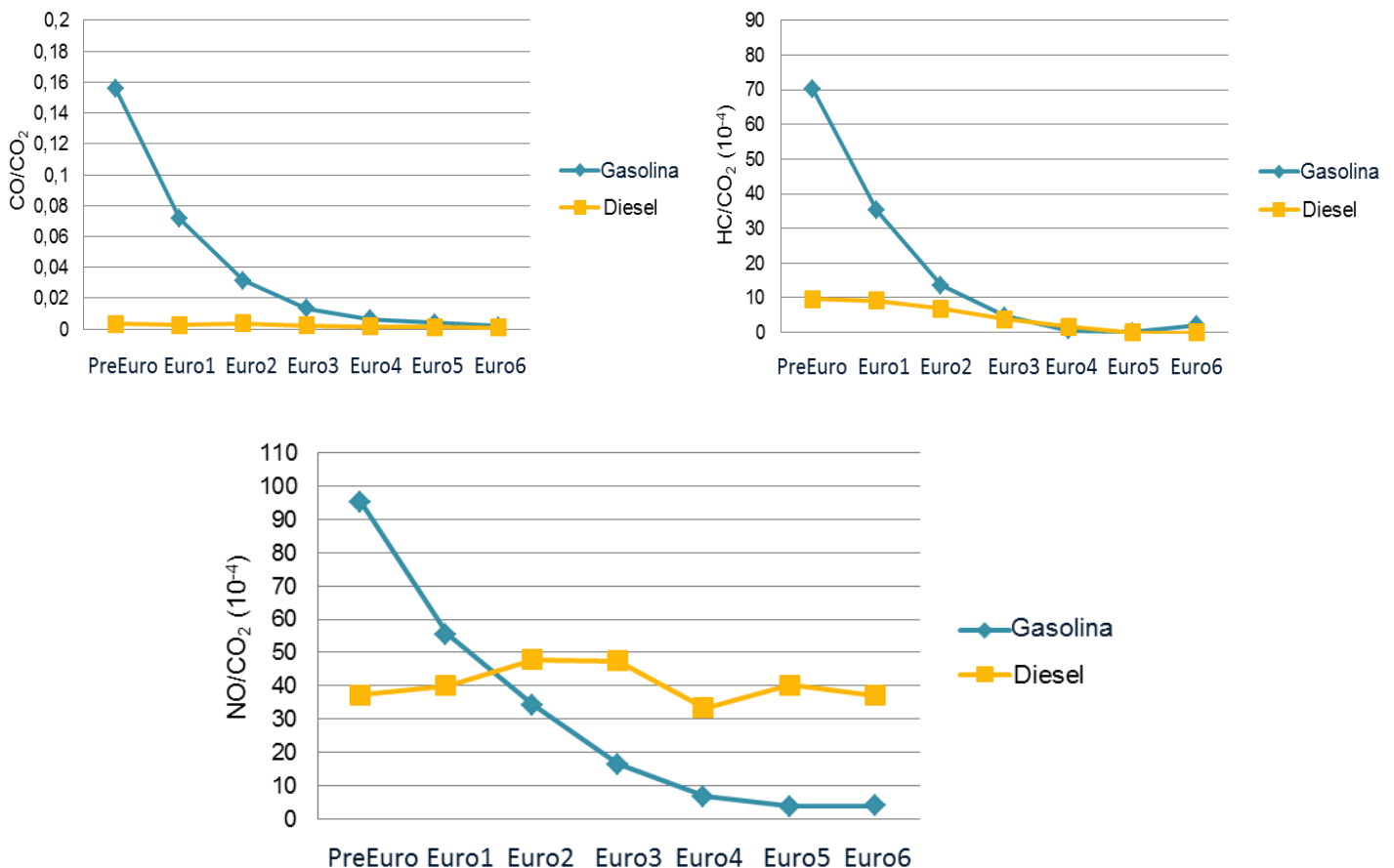
#### 3.1 Campañas de medida *on-road* de emisiones del parque circulante

Como consecuencia de las dos campañas de medidas de emisiones con el RSD4600, realizadas durante el proyecto CORETRA en 28 puntos de la red de carreteras de la Comunidad de Madrid (ver mapa), se han obtenido datos de unos 197.000 vehículos, de los cuales algo más de 182.000 fueron vehículos M1 (turismos) y de éstos unos 140.000 fueron vehículos individuales no repetidos.



A partir de una evaluación estadística preliminar de los resultados se han podido extraer algunas conclusiones interesantes :

- A lo largo del tiempo la introducción de las diferentes normativas Euro ha tenido una repercusión positiva global en el comportamiento emisor medio del parque circulante pero bastante desigual.
- En el caso de los vehículos M1 con motor de gasolina las emisiones medias para cada normativa Euro han seguido un comportamiento descendente sostenido. En la figura 1 se observa claramente esta tendencia en las ratios de emisión de  $CO/CO_2$ ,  $HC/CO_2$  y  $NO/CO_2$  para el parque global de turismos de gasolina.
- En el caso de los vehículos M1 diésel, el comportamiento emisor medio en las sucesivas normas Euro ha sido diferente según el contaminante. En el caso de las ratios  $CO/CO_2$  y  $HC/CO_2$  , se ha constatado que a lo largo del tiempo se ha producido un ligero descenso, pero en el caso de la ratio  $NO/CO_2$  prácticamente no se han producido cambios. Los datos de la figura 1 muestran que las limitaciones introducidas paulatinamente a través de las sucesivas normas Euro no han tenido reflejo en las emisiones reales medias de  $NO/CO_2$  registradas, salvo en el caso de los vehículos diésel Euro4.



**Figura 1.** Emisiones medias de la flota diésel M1 (turismos) según la correspondiente norma Euro.

El comportamiento que se muestra en la figura 1 para los M1 en esta norma se ha observado también en los vehículos del resto de categorías Euro4 diésel. No obstante, este descenso en la emisión media se interrumpe e invierte con la norma Euro 5. En el caso de la Euro6, sí se observa un ligero descenso en la ratio media de NO/CO<sub>2</sub> respecto al valor en Euro5, pero el parque circulante registrado ha sido pequeño y en términos estadísticos no es suficientemente significativo aunque sí resulta sintomático.

- Sin entrar en más detalles, los datos registrados indican que no existe comportamiento relativamente uniforme de los vehículos en ninguna norma Euro. Esto significa que en función de los modelos (cilindrada y marca) de los vehículos dentro de cada norma existe una notable variabilidad en sus emisiones reales. Existen modelos que se han ido adaptando paulatinamente a las restricciones impuestas por las sucesivas normas Euro y otros cuyo comportamiento en carretera difiere mucho del teórico previsto. Esto explica la extraña evolución de las ratios medias de NO/CO<sub>2</sub> para los motores diésel en las diferentes normativas Euro..

- A partir de los resultados globales de las ratios de emisión registradas se proponen los siguientes valores límite superiores para la identificación de vehículos M1 Altos Emisores (AE) del parque circulante:  $NO/CO_2 = 88 \times 10^{-4}$  ;  $HC/CO_2 = 80 \times 10^{-4}$  ;  $CO/CO_2 = 0,18$

Estos límites tan conservadores se han elegido con criterios estadísticos de forma que la identificación de AE sea óptima en el sentido de que afecte a aquellos vehículos que más contribuyen al total de emisiones pero repercutiendo sobre al menor porcentaje posible de la flota. Particularizando en los vehículos M1(92 % de la flota), se considera que los AE de esta categoría contribuyen de forma considerable al total de las emisiones del parque circulante de ahí la importancia de su detección y posterior corrección. Se estima que con los criterios propuestos, entre el 5-6% del parque circulante lo constituyen vehículos AE y que su contribución a las emisiones de CO, HC y NO totales es del orden del 39 %, 38 % y 19 % respectivamente. En el apartado 4 se realizará un análisis más detallado de esta problemática.

El estudio en profundidad de los datos de emisiones obtenidos durante las campañas está fuera del alcance del proyecto CORETRA y, por tanto, de este Informe Técnico. No obstante, el análisis detallado de estos resultados será abordado con posterioridad.

### 3.2 Medidas *on-road* de penachos sintéticos

Las técnicas ópticas empleadas por los sensores remotos *on-road* son capaces de medir concentraciones gaseosas linealmente integradas en el camino óptico definido por las posiciones relativas de su emisor y su detector de luz. Puesto que la geometría y dimensiones reales de los penachos analizados son desconocidas, además de rápidamente variables, estas técnicas no permiten obtener las concentraciones absolutas de los gases constituyentes. Por esta razón este tipo de sensores remotos como el RSD4600 sólo ofrecen resultados de ratios de concentración de algunos de los compuestos gaseosos presentes en los penachos analizados y para que esas determinaciones rápidas se puedan realizar con éxito es preciso que se cumplan unas condiciones mínimas. En el caso concreto del equipo RSD4600, el propio sistema dispone de un procedimiento de aceptación/rechazo automático de las medidas que realiza y sólo son consideradas válidas cuando la concentración integrada de CO<sub>2</sub> en el penacho supera un determinado umbral y cuando el tiempo de persistencia del mismo en el camino óptico es >0.5 seg. Para cada medida aceptada como válida el RSD4600 determina y reporta un parámetro denominado *Plume Size (PS)* relacionado directamente con la concentración integrada de CO<sub>2</sub> presente en cada penacho analizado. El fabricante del RSD4600 asegura que cuando una medida ha sido considerada válida las incertidumbres asociadas a las ratios de CO/CO<sub>2</sub>, NO/CO<sub>2</sub> y HC/CO<sub>2</sub> nunca superan el 15% y que cuando las concentraciones integradas de CO<sub>2</sub> son superiores a 20%.cm los datos reportados tienen una incertidumbre máxima del 10%.

#### 3.2.1 Diseño de los experimentos con penachos sintéticos

Para evaluar metrológicamente la respuesta del equipo RSD4600 se han diseñado un conjunto de experimentos singulares en cuya implementación se han respetado los protocolos de medida previstos por el fabricante del RSD.

El objetivo de estos ensayos fue determinar la incertidumbre de medida del RSD en un rango amplio de ratios de emisión bajo distintos tamaños de penacho. En condiciones de tráfico real, el *PS* se ve influenciado por diferentes variables que hacen que su valor sea muy fluctuante. Algunos de estos factores son las propias emisiones del vehículo el momento de la medida, los flujos aerodinámicos que genera con su movimiento, la posición del tubo de escape, el viento, etc.

El procedimiento aplicado en estos ensayos se basó en la generación de penachos gaseosos de composición química conocida a partir de mezclas certificadas de CO, NO, HC y CO<sub>2</sub>, cuyas

concentraciones han sido seleccionadas para ser compatibles con las que presentan las emisiones de los vehículos (penachos sintéticos). Para ello las botellas de gas multicomponente patrón se conectaron mediante tubos a un dispositivo dispensador de gas basado en el empleo de electroválvulas de control manual que permitían controlar las emisiones canalizadas finalmente hasta un tubo abierto. Con este sistema se podían liberar a la atmósfera cantidades variables de la mezcla gaseosa patrón y para conseguir que estos penachos sintéticos tuvieran un comportamiento similar (geometría, grado dilución, etc.) a los producidos por vehículos, el sistema de generación se instaló en un vehículo 100% eléctrico de “cero emisiones”. En estas condiciones los gases de referencia eran emitidos desde un tubo que simulaba el escape del vehículo eléctrico, lo que permitió generar los penachos sintéticos tanto en modo dinámico (vehículo en movimiento) como estático (vehículo parado) y desde alturas similares a las del tubo de escape de un vehículo convencional. (Imágenes 1 a y b)

Las múltiples emisiones pulsadas generadas en las diferentes configuraciones fueron analizadas por el RSD 4600 obteniéndose una nutrida base de resultados de  $CO/CO_2$ ,  $NO/CO_2$  y  $HC/CO_2$  con sus correspondientes *PS*. De este modo se pudo estudiar la respuesta del RSD ante penachos de composición idéntica pero con características físicas muy diferentes. En todos los casos las medidas se realizaron en ausencia de lluvia y se utilizaron longitudes de camino óptico variables, siempre representativas de las dimensiones habituales que se encuentran en los carriles de nuestras carreteras, incluyendo arceles.

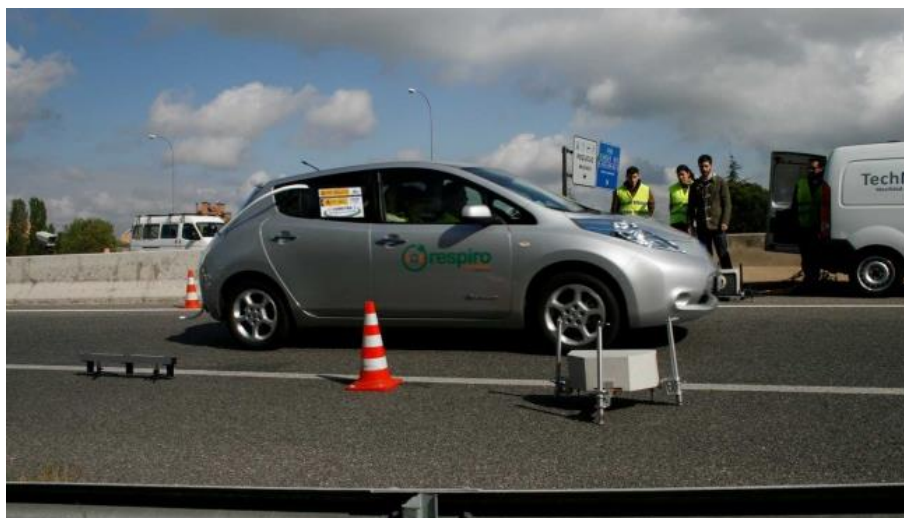
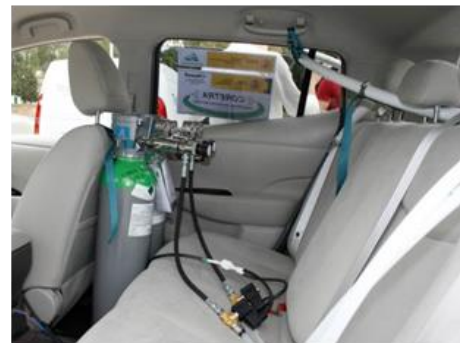
Durante estos experimentos se utilizaron botellas multicomponentes suministradas por la empresa Air Liquide [16] con una incertidumbre nominal del 2% para las concentraciones de todos los gases. Se utilizaron tres rangos distintos de concentraciones (ver Tabla 1) al objeto de simular tres tipos de niveles de emisión: elevado (C1), medio (C2) y bajo (C3). El rango representado por C1 corresponde a un vehículo que puede considerarse alto emisor. Para cada mezcla patrón ensayada se utilizaron dos botellas certificadas diferentes con concentración nominal igual pero con concentraciones reales certificadas ligeramente distintas.

Para cumplir el protocolo previsto por el fabricante e intentar evitar problemas puntuales en la calibración del propio RSD, el equipo fue calibrado varias veces durante cada día de medidas. Este tipo de errores pueden llegar a distorsionar los resultados al generar errores sistemáticos (diferencia entre el patrón y la media aritmética de las ratios) que podrían llegar a ser difíciles de detectar en el conjunto global de las medidas.

Tabla 1- Concentraciones y ratios de emisión de las botellas utilizadas para realizar los experimentos. Para denominar a las botellas se ha utilizado la siguiente nomenclatura  $C_{i_j}$  en donde  $i$  (1,2 ó 3) indica el rango de concentración solicitada y  $j$  (1 ó 2) el nº de botella de ese rango.

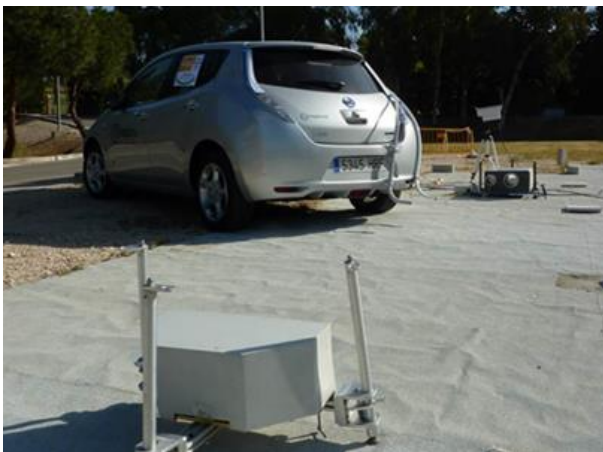
	NO (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	HC (ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	NO/CO <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> )	HC/CO <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> )	CO/CO <sub>2</sub>
C1_1	6005	6005	1279,1	3,45	12,49	480,78	102,41	0,28
C1_2	6032	6032	1281,6	3,44	12,62	477,97	101,55	0,27
C2_1	409,6	411,4	1120,4	4,91	11,22	36,51	99,86	0,44
C2_2	398,7	401,1	1117,7	4,91	11,2	35,60	99,79	0,44
C3_1	1979,9	1987,1	1205,6	4	12,04	164,44	100,13	0,33
C3_2	1985	1991,4	1207	4	11,99	165,55	100,67	0,33

### ENSAYOS ON-ROAD



**Imágenes 1a.** Vehículo eléctrico (NISSAN Leaf), con montaje de sistema dispensador de gases patrón y realización de **ensayos dinámicos** para la obtención de medidas con penachos sintéticos.

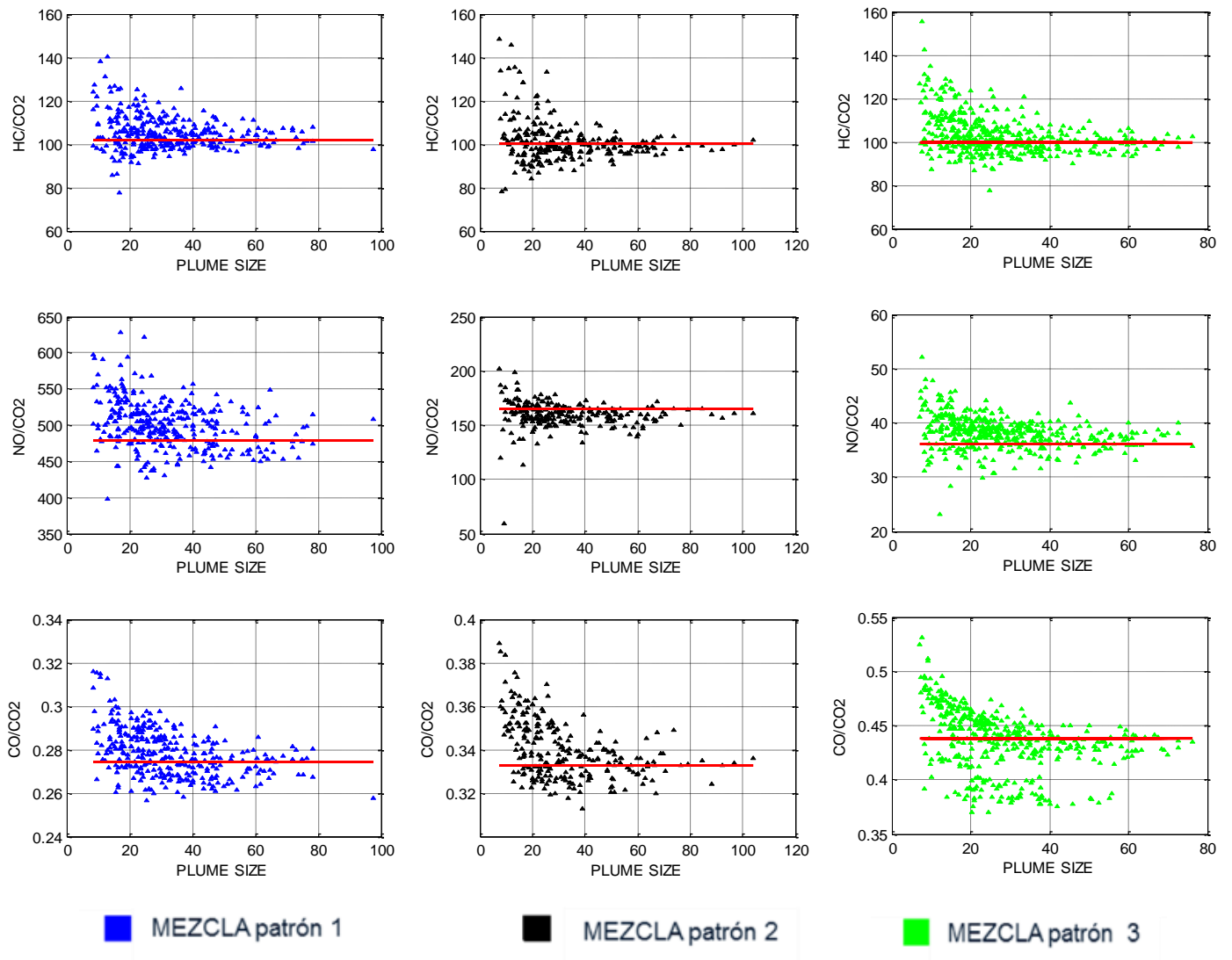
## ENSAYOS ESTÁTICOS



**Imágenes 1b.** Vehículo eléctrico (NISSAN Leaf), con montaje de sistema dispensador de gases patrón y realización de **ensayos estáticos** de medidas de penachos sintéticos.

### 3.2.2 Resultados: Incertidumbre vs Plume Size

El amplio número de ensayos con penachos sintéticos realizados con éxito (992 experimentos) permitió generar un robusto conjunto de resultados sobre el que pudo plantear un análisis estadísticamente consistente de la calidad de las medidas proporcionadas por el RSD4600. En concreto, estos ensayos permitieron estudiar la incertidumbre de los resultados frente a las concentraciones de los gases medidos y frente al valor del Plume Size registrado.



**Figura 2.** Ratios de todos los contaminantes obtenidos con las distintas mezclas patrón. Los valores de los ratios de referencia en cada caso se indican con las líneas rojas.

En la Figura 2 se representan los resultados de todas las medidas realizadas con penachos sintéticos y en la Tabla 2 se presenta un resumen del análisis estadístico de todos los valores obtenidos con el



RSD para los tres tipos de ratios de gases. En cada rango de concentraciones (C1, C2 y C3) las medias y medianas de los valores medidos se comparan con las tres ratios patrón.

**Tabla 2- Resumen de los principales resultados estadísticos de los ensayos con penachos sintéticos.**

	NO/CO <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> )			HC/CO <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> )			CO/CO <sub>2</sub>		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Botella de referencia									
Número de ensayos	321	427	244	321	427	244	321	427	244
Valor máximo	628,80	52,15	201,00	140,40	155,60	148,20	3,16E-01	5,31E-01	3,89E-01
Valor mínimo	397,7	23,22	59,55	77,81	77,83	78,32	0,2567	0,37	0,3129
Media	500,50	38,16	159,60	105,00	103,00	101,20	2,78E-01	4,36E-01	3,40E-01
Mediana	499,20	38,19	160,30	103,70	101,00	99,24	2,78E-01	4,38E-01	3,36E-01
Desviación estándar	33,29	3,02	12,40	7,87	9,08	9,74	1,08E-02	2,90E-02	1,36E-02
Rango	231,10	28,93	142,20	62,59	77,80	69,88	5,91E-02	1,61E-01	7,62E-02
Ratio Patrón	479,38	36,05	165,00	101,98	99,83	100,40	2,74E-01	4,38E-01	3,33E-01
Error sistemático	21,12	2,11	-5,40	3,02	3,17	0,80	4,00E-03	-1,70E-03	6,66E-03
Incertidumbre total (%)	6,65	7,92	7,77	7,50	8,81	9,63	3,88	6,64	3,99

La incertidumbre total en cada caso ha sido calculada como el cociente entre la desviación estándar (de cada ratio y concentración) y la media obtenida en los experimentos para esa ratio y concentración en concreto. Todas las incertidumbres son inferiores al 10%. El resultado de la incertidumbre indica la repetibilidad en la medida pero, como se puede ver en las distintas gráficas de la figura 2, existe una dependencia muy marcada de la desviación de los valores respecto al *PS* registrado en cada caso. Esta dependencia hace que para cualquier ratio y concentración se observen desviaciones estándar significativamente mayores en los casos en que el Plume Size ha sido bajo (especialmente para  $PS < 20$ ). En esta figura se puede observar también el efecto puntual de una calibración del RSD realizada de modo inadecuado en campo (de ver el grupo de puntos con error sistemático en el gráfico inferior derecho, ratio CO/CO<sub>2</sub> con Mezcla 3).

Para analizar la dependencia de la incertidumbre frente al valor del *PS* se ha realizado un análisis clasificando los resultados de las medidas en tres rangos de *PS*:

$$PS < 20, 20 < PS < 40 \text{ y } PS > 40.$$

En las siguientes tablas se muestran los parámetros estadísticos más relevantes de las medidas de la ratios NO/CO<sub>2</sub> (Tabla 3), HC/CO<sub>2</sub> (Tabla 4) y CO/CO<sub>2</sub> (Tabla 5).

**Tabla 3- Parámetros estadísticos de la ratio NO/CO<sub>2</sub> para las distintas concentraciones y dependiendo del Plume Size**

NO/CO <sub>2</sub>	C1			C2			C3		
	<20	20-40	>40	<20	20-40	>40	<20	20-40	>40
Plume size									
Número de experimentos	74	155	92	146	203	78	65	108	70
Valor máximo	628,78	621,59	557,11	52,15	44,01	43,77	201,78	178,54	172,53
Valor mínimo	397,66	426,60	441,14	23,22	29,81	32,66	112,97	132,33	139,54
Media	520,31	498,22	487,54	39,16	37,84	37,12	162,86	159,65	157,86
Mediana	520,97	497,82	486,03	39,14	38,62	38,14	163,25	159,74	159,01
Desviación estándar	38,63	29,73	25,97	3,90	2,37	1,97	15,40	8,55	7,11
Rango	231,12	194,99	115,97	28,93	14,20	11,10	88,81	46,21	32,99
Ratio Patrón	479,38	479,38	479,38	36,05	36,05	36,05	165,00	165,00	165,00
Error sistemático	40,93	18,84	8,17	3,11	1,78	1,07	-2,14	-5,35	-7,14
Incertidumbre total	7,42	5,97	5,33	9,96	6,26	5,31	9,45	5,36	4,50

**Tabla 4- Parámetros estadísticos de la ratio HC/CO<sub>2</sub> para las distintas concentraciones y dependiendo del Plume size**

HC/CO <sub>2</sub>	C1			C2			C3		
	<20	20-40	>40	<20	20-40	>40	<20	20-40	>40
Plume size									
Número de experimentos	74	155	92	146	203	78	65	108	70
Valor máximo	140,41	125,94	115,64	155,63	124,10	109,63	148,20	133,39	109,63
Valor mínimo	77,81	91,06	96,54	87,42	77,83	90,07	78,32	86,86	90,31
Media	107,60	104,86	103,19	108,21	100,55	99,51	104,60	100,56	98,88
Mediana	105,59	103,98	101,99	107,40	99,54	99,93	102,22	98,49	98,88
Desviación estándar	11,94	6,83	3,96	11,25	6,79	4,14	15,02	7,89	3,35
Rango	62,59	34,88	19,10	68,21	46,27	19,56	69,88	46,54	19,32
Ratio Patrón	101,98	101,98	101,98	99,83	99,83	99,83	100,40	100,40	100,40
Error sistemático	5,62	2,88	1,21	8,38	0,73	-0,31	4,20	0,16	-1,52
Incertidumbre total	11,10	6,51	3,84	10,40	6,75	4,16	14,36	7,85	3,39

**Tabla 5- Parámetros estadísticos de la ratio CO/CO<sub>2</sub> para las distintas concentraciones y dependiendo del Plume Size**

CO/CO <sub>2</sub>	C1			C2			C3		
	<20	20-40	>40	<20	20-40	>40	<20	20-40	>40
Plume size									
Número de experimentos	74	155	92	146	203	78	65	108	70
Valor máximo	3,16E-01	2,97E-01	2,91E-01	5,31E-01	4,74E-01	4,50E-01	3,89E-01	3,70E-01	3,49E-01
Valor mínimo	2,60E-01	2,57E-01	2,58E-01	3,82E-01	3,70E-01	3,75E-01	3,22E-01	3,13E-01	3,20E-01
Media	2,85E-01	2,78E-01	2,73E-01	4,55E-01	4,27E-01	4,27E-01	3,50E-01	3,37E-01	3,33E-01
Mediana	2,83E-01	2,78E-01	2,73E-01	4,60E-01	4,34E-01	4,30E-01	3,50E-01	3,35E-01	3,33E-01
Desviación estándar	1,26E-02	9,87E-03	6,97E-03	2,87E-02	2,63E-02	1,78E-02	1,54E-02	1,18E-02	6,69E-03
Rango	5,55E-02	4,07E-02	3,30E-02	1,49E-01	1,04E-01	7,49E-02	6,69E-02	5,71E-02	2,92E-02
Ratio Patrón	2,74E-01	2,74E-01	2,74E-01	4,38E-01	4,38E-01	4,38E-01	3,33E-01	3,33E-01	3,33E-01
Error sistemático	1,10E-02	3,96E-03	-1,47E-03	1,66E-02	-1,14E-02	-1,08E-02	1,70E-02	4,43E-03	4,36E-04
Incertidumbre total	4,42	3,55	2,55	6,31	6,17	4,16	4,36	3,49	2,01

Estos resultados muestran que el *Plume Size* de un penacho, vinculado con su dimensión/grado de dilución/concentración de CO<sub>2</sub>, es un excelente indicador de la calidad de las medidas de las ratios de concentraciones gaseosas medidas con el RSD4600, de forma que para valores de *PS* > 20 las incertidumbres medias de las medidas realizadas por el RSD4600 son inferiores al 10% en todos los casos. Esto es así porque la persistencia e integridad de un penacho a lo largo del camino óptico de medida es una de las circunstancias que más influyen en la calidad de los resultados proporcionados por el RSD. Cuanto más rápidamente se diluya el penacho analizado menor será el tiempo efectivo de medida ya que en pocos instantes las concentraciones estarán por debajo del límite de detección del instrumento. En consecuencia, valores bajos del *PS* pueden estar asociados a penachos sometidos al efecto dispersivo del viento, a la dilución provocada por el propio movimiento del vehículo, a vehículos con muy bajas emisiones o a cargas instantáneas del motor inadecuadas para la realización de este tipo de medidas. En estas circunstancias la incertidumbre de las ratios obtenidas puede superar el 10 %.

### 3.3 Ensayos en Banco motor

Como se ha explicado anteriormente, la posibilidad de medir con técnicas remotas las emisiones de un vehículo está limitada fundamentalmente por el “tamaño” del penacho generado (*PS*). El valor del Plume Size no sólo condiciona la calidad de las medidas, tal y como se ha demostrado en el apartado anterior, sino que si el *PS* es insuficiente se está limitando la posibilidad misma de realizar las medidas remotas. Un *PS* escaso puede ser indicador de que el motor del vehículo no se encuentra sometido a una condición de aceleración y carga suficientes y por ello, o bien no se produce un penacho suficiente o, en caso de que se puedan realizar las medidas, los resultados obtenidos en estas condiciones no serán representativos del comportamiento emisor real del motor del vehículo. Por consiguiente, para que se puedan realizar medidas remotas *on-road* es necesario que los motores se encuentren en un punto de trabajo adecuado, es decir, de forma que su potencia vehicular específica (VSP-Vehicle Specific Power) [6] instantánea sea adecuada y el consumo instantáneo de combustible suficiente.

El parámetro VSP es un término técnico utilizado en evaluación de emisiones de vehículos y se define como la potencia instantánea por unidad de masa del vehículo que en el momento de la medida de emisiones genera su motor para conseguir su estado dinámico (velocidad y aceleración), incrementando su energía cinética y potencial, y vencer las cargas derivadas de la pendiente de la carretera, la resistencia aerodinámica, la resistencia de rodadura, etc. Las unidades de la VSP son kW/t.

La capacidad de medida del RSD4600 y la calidad y representatividad de los resultados obtenidos también dependen del valor de la VSP de los vehículos, lo que en la práctica esto implica también existe un rango de VSP dentro del cual es posible realizar de manera fiable este tipo de medidas remotas.

Para estudiar la posible dependencia de los resultados de las medidas del RSD con la VSP, se precisa estudiar la calidad de las medidas en función de ese parámetro. Como se indicó anteriormente, cada una de las medidas producidas por el RSD4600 sobre vehículos en carretera no pueden ser evaluadas individualmente, por lo que resulta imprescindible definir ensayos controlados en banco motor. De este modo, se pueden realizar experimentos repetitivos llevando el motor a condiciones de VSP idénticas y estudiando cómo varían los resultados de las medidas del RSD al variar los valores de VSP. De este modo se pueden estudiar los efectos sobre las ratios de emisión medidas por el instrumento RSD4600 a partir de los resultados ofrecidos por otro sistema de medida que se utilizaría en paralelo y que se tomaría como referencia.

### **3.3.1 Diseño de los experimentos**

Los experimentos fueron implementado en una celda de banco motor del CIEMAT equipada con un motor diésel Euro 4 (VAG 2.0 TDI 140cv tipo BKD) y un freno dinamométrico Schenck W150, ambos controlados desde ordenador conectado al sistema Spark<sup>E</sup> 2003 de Horiba. Para poder realizar estos experimentos en un rango suficientemente amplio de valores consigna de VSP y sin poner en peligro la integridad del motor, el sistema de refrigeración del banco motor tuvo que ser previamente redimensionado y modificado. A partir de las especificaciones técnicas del vehículo (masa, área frontal, coeficiente de resistencia aerodinámica, coeficiente de resistencia a la rodadura y rendimiento de la transmisión) se obtiene la potencia necesaria para que el vehículo circule a una determinada velocidad y aceleración. A partir de los desarrollos de transmisión conocidos y suponiendo la marcha más adecuada a cada velocidad se calcula el régimen y par correspondientes a esa velocidad y aceleración que quiere reproducirse.

Las emisiones generadas por el motor para cada condición de VSP fueron canalizadas mediante un tubo convenientemente aislado hasta un punto exterior a la celda del banco motor desde donde se podía generar el penacho correspondiente en el camino óptico del RSD 4600, en una configuración similar a la utilizada en las medidas con penachos sintéticos en modo estático. Desde ese mismo punto se tomaba una parte alícuota del caudal de gases de emisiones para llevarla al sistema de medida de gases que fue utilizado como de referencia. Éste sistema fue un OBS 2200 de Horiba que forma parte de la dotación permanente del Laboratorio Móvil de medida de emisiones de vehículos

del CIEMAT. El OBS 2200 de Horiba es un instrumento de medida de emisiones instantáneas, el conjunto de analizadores de gases que posee permite proporcionar resultados de emisiones másicas reales (g/s) de  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ , HC y  $\text{H}_2\text{O}$ . Los óxidos de nitrógeno totales son medidos por Quimioluminiscencia en caliente (HCLD) y el CO,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  son medidos por Infrarrojos no Dispersivos en caliente (HNDIR) y los HC son medidos por Ionización de llama en caliente (HFID). Para evitar la contaminación del espacio de medida en el laboratorio de motores, después de cada medida con RSD el camino óptico y el entorno de trabajo eran ventilados eficientemente para evitar acumulación de contaminantes e interferencias entre ensayos consecutivos y en los tiempos entre medidas con el RSD las emisiones del motor eran canalizadas hasta una chimenea exterior dotada con aspirante que se montó al efecto (ver imágenes 2).



**Imágenes 2.** Banco motor (Laboratorio de motores de la Unidad de Emisiones Contaminantes, CIEMAT). Montaje experimental de los ensayos de medidas de emisiones con RSD6400 para el estudio de la dependencia de las ratios de emisión con la Potencia Vehicular Específica (VSP).

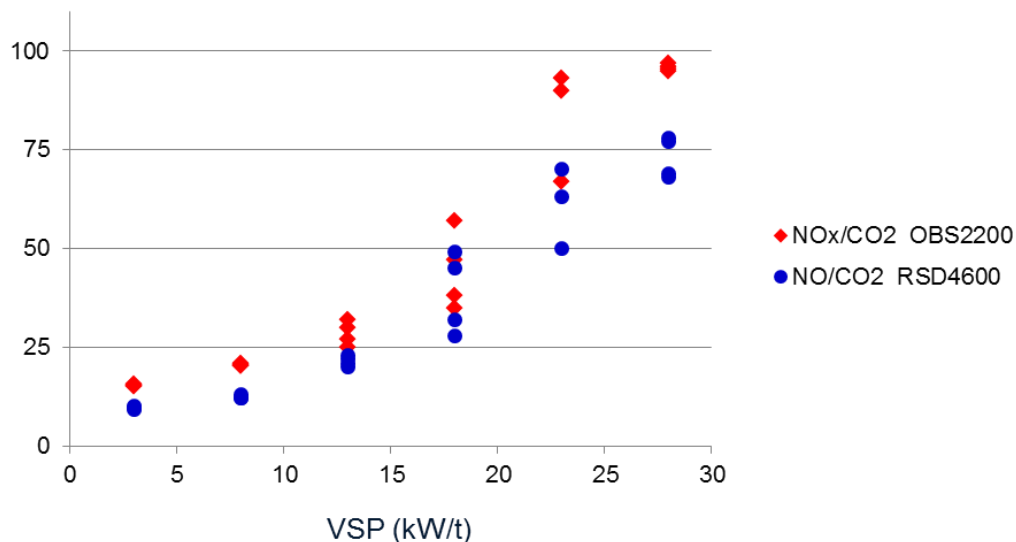
### 3.3.2 Resultados: NO/CO<sub>2</sub> vs VSP

Durante el desarrollo de estos ensayos se pudieron implementar seis niveles de VSP diferentes, barriendo prácticamente todo el rango de valores registrados durante las campañas de medidas *on-road*. Se seleccionaron los siguientes valores: 3, 8, 13, 18, 23 y 28 kW/t. Para cada uno de los valores de VSP le corresponden las condiciones operativas del motor contenidas en la Tabla 6.

**Tabla 6- Condiciones cinemáticas fijadas para asignar los valores de régimen de giro y par para obtener los diferentes VSP en el banco motor.**

VSP	v (km/h)	a ((km/h)/s)	% pendiente	Marcha	Régimen de giro (rpm)	Par motor (N.m)
3	50	0	0	III	2108	24.1
8	85	0	0	IV	2645	50.1
13	106	0	0	V	2719	78
18	106	0	1.6	V	2719	109
23	70	3	0	III	2952	128.7
28	140	0	0.5	VI	2998	150.3

Las emisiones de CO y HC para un motor moderno (especialmente Euro 4) están por debajo de los límites de detección de muchas tecnologías de medidas de emisiones dando valores muy cercanos a cero. Por este motivo en estos ensayos únicamente se realizaron medidas de NO/CO<sub>2</sub> obtenidas con el RSD4600.



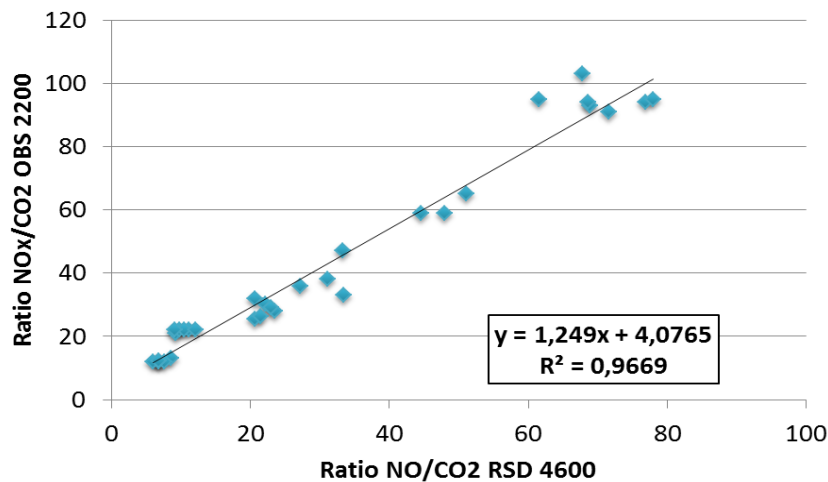
**Figura 3-** Ratios de NO/CO<sub>2</sub> en función del VSP obtenidos con RSD4600 (en azul) y con OBS 2200 (en rojo).

En la Figura3 se presentan los resultados obtenidos durante estos ensayos y en la Tabla 7 se recogen los parámetros estadísticos más relevantes asociados a las ratios obtenidos con el RSD 4600 y el OBS 2200 para los diferentes valores de VSP.

**Tabla 7- Parámetros estadísticos de las medidas de la ratio NO/CO<sub>2</sub> para el RSD 4600 y el OBS 2200 dependiendo de la VSP**

		VSP					
		3	8	13	18	23	28
<b>Número de experimentos</b>	<b>RSD</b>	6	6	6	5	5	4
	<b>OBS</b>	6	6	6	5	5	4
<b>Valor medio NO/CO<sub>2</sub> (10<sup>-4</sup>)</b>	<b>RSD</b>	7,10	10,33	21,92	37,32	56,66	73,08
	<b>OBS</b>	12,23	21,83	28,50	46,80	78,40	94,00
<b>Desviación estándar</b>	<b>RSD</b>	0,87	1,16	1,20	8,69	16,21	5,04
	<b>OBS</b>	0,39	0,41	2,46	12,30	26,70	0,82
<b>Plume Size medio</b>		47,16	72,02	84,23	103,47	89,65	130,30
<b>Diferencia absoluta de las medias</b>		5,13	11,50	6,58	9,48	21,74	20,92
<b>% de desviación de las medias respecto al valor dado por el RSD</b>		72,30	111,31	30,04	25,40	38,36	28,63

El análisis detallado de estos datos permite estudiar la posible influencia del valor de la VSP sobre la calidad de las ratios de emisión proporcionadas por el RSD4600 y también observar algunas tendencias.



**Figura 4- Correlación entre las ratios medidas por el RSD4600 y el OBS 2200**

Lo primero que hay que señalar es que en todos los experimentos el *PS* registrado superó ampliamente el límite de 20, lo cual permite afirmar que estas medidas se obtuvieron en condiciones óptimas para el RSD4600 y las ratios medidas tienen los valores de incertidumbre más bajos posibles.

También parece claro que las ratios de NO/CO<sub>2</sub> generados y registrados con ambos sistemas muestran una inestabilidad creciente cuando aumenta la VSP. En la tabla 7 se observa que la dispersión de las ratios en ambos casos aumenta también con la VSP. Este incremento en la desviación estándar no se debe a anomalías instrumentales en los equipos de medida sino a que en condiciones de alta carga, alta VSP, la temperatura de trabajo del motor es más alta y menos estable con cambios bruscos en la temperatura de los gases de escape. La emisión de óxidos de nitrógeno es fuertemente dependiente de esa temperatura por lo que los valores de la ratio NO/CO<sub>2</sub> presentan mayor variabilidad para valores de VSP elevados.

En la Tabla 7 también se muestra la diferencia absoluta entre las medias de NO/CO<sub>2</sub> obtenidas con ambos equipos. Porcentualmente esta diferencia disminuye cuando el valor de la VSP aumenta, independientemente de la desviación de los datos. En la Figura 4 se muestra la regresión lineal entre las ratios medidas por el RSD 4600 y el OBS 2200. El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> resultante es muy alto (0.97) lo que indica una coherencia muy elevada entre los resultados de ambos sistemas.

Con independencia de que parte de los errores sistemáticos observados, como reflejan los valores de la pendiente de la regresión y del término independiente, se puedan deber a la existencia de ciertos desajustes entre las calibraciones respectivas de ambos sistemas, todo parece indicar que la mayor parte de la diferencia entre los resultados del RSD y los del OBS tomado como referencia se deben a un motivo muy claro: el equipo RSD 4600 sólo mide la especie NO, mientras que el OBS 2200 mide NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>). Esto explicaría la aparente subestimación del RSD del 25% en la medida de las ratios de NO/CO<sub>2</sub>, porque en los gases de escape de un motor diésel Euro 4 o Euro 5 la proporción de NO<sub>2</sub> que se emite supone entre el 25-30% de la emisión total de NO<sub>x</sub> [17]. En el caso de motores diésel Euro 3 y anteriores, la fracción de NO<sub>2</sub> representa el 10-15% de los NO<sub>x</sub> totales emitidos y si se hubiese utilizado un motor de gasolina esta diferencia entre las medidas casi no se habría podido detectar.

Otro hecho muy significativo que se desprende de estos ensayos en banco motor es que existe una relación directa y positiva entre las ratios de NO/CO<sub>2</sub> generados por el motor diésel utilizado y los valores de la VSP que fueron seleccionados para su operación. La ratio va creciendo paulatinamente y si se atiende al límite de esta ratio propuesto para vehículos AE (NO/CO<sub>2</sub>=88.0 10<sup>-4</sup>), este motor habría podido ser identificado como Alto Emisor para VSP = 28, según las medidas del OBS.

Este comportamiento creciente en las ratios de emisión frente a la VSP es más representativo de los motores diésel y deberá tenerse en cuenta en el proceso de identificación de vehículos AE. Para minimizar el riesgo de identificar falsos positivos, será preciso establecer un rango de VSPs adecuado. Es necesario limitar el valor máximo de la VSP utilizable para que las superaciones del



límite de Altos Emisores no se produzcan como resultado de que esos vehículos circularon ante el RSD con una VSP instantánea excesiva, sin que ello supusiera una anomalía en su comportamiento real como fuentes emisoras de contaminantes.

#### **4. Análisis de la Base de Datos de medidas *on-road* en la Comunidad de Madrid. Detección de Altos Emisores.**

Como se explicó en el apartado 3.1, tomando como punto de partida los datos recabados durante las campañas de medidas con RSD4600 llevadas a cabo en la Comunidad de Madrid, se han sugerido unos límites en las ratios de emisión ( $\text{NO}/\text{CO}_2 = 88 \cdot 10^{-4}$ ;  $\text{HC}/\text{CO}_2 = 80 \cdot 10^{-4}$ ;  $\text{CO}/\text{CO}_2 = 0,18$ ) para la determinación de AE en la categoría M1 a través del uso de técnicas remotas (por ejemplo con el instrumento RSD4600).

A continuación se presentan los resultados y las conclusiones que se obtienen al aplicar estos criterios de detección de AE al conjunto de los vehículos registrados en la Base de Datos de medidas *on-road*.

##### **4.1 Porcentaje de Altos Emisores en función del Plume Size registrado**

En la Tabla 8 se presentan los resultados globales de los AE que habrían sido identificados, clasificándolos según el Plume Size (*PS*) registrado en las medidas y según el combustible utilizado por los vehículos.

Existe una dependencia importante con el *PS* del porcentaje de AE detectados. En términos generales, la proporción de altos emisores para valores de *PS* <20 casi dobla al porcentaje que se registra para *PS* >20. También existen diferencias entre los AE detectados en los otros dos rangos de *PS* considerados, aunque en el caso de los vehículos diésel éstas son mayores entre ambos rangos. Probablemente ello es debido a que los *PS* muy altos están asociados, generalmente, a un aumento de la inyección (mezcla enriquecida), lo que provoca un aumento del  $\text{CO}_2$  y, por lo tanto, se podría producir en esas circunstancias una disminución puntual de la ratio  $\text{NO}/\text{CO}_2$  y un descenso en la proporción de AE detectados para valores de *PS* muy altos.

**Tabla 8- Resumen del análisis realizado sobre el porcentaje de Altos Emisores detectados frente al Plume Size medido.**

		Todos	PS		
			<20	20-40	>40
Todos	Total	182804	81377	93994	7433
	Nº Altos Emisores	11845	7103	4568	174
	%	6,48	8,73	4,86	2,34
Diésel	Total	141553	62637	73416	5500
	Nº Altos Emisores	8720	5058	3558	104
	%	6,16	8,08	4,84	1,89
Gasolina	Total	41251	18740	20578	1933
	Nº Altos Emisores	3125	2045	1010	70
	%	7,58	10,91	4,91	3,62

#### 4.1.1 Análisis de los resultados con PS > 20

Asumiendo que durante los experimentos con penachos sintéticos se concluyó que para penachos con  $PS < 20$  la incertidumbre de las ratios medidas podía superar el 10%, se ha realizado un reanálisis detallado de los datos de AE anteriores pero excluyendo los resultados obtenidos con  $PS < 20$ . Los resultados se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9- Distribución de vehículos Altos Emisores en la categoría M1 a partir de los límites propuestos.**

Plume Size >20		Número de vehículos	Altos Emisores	Por límite CO/CO <sub>2</sub>	Por límite HC/CO <sub>2</sub>	Por límite NO/CO <sub>2</sub>	% Altos Emisores
Diésel	Pre Euro	39	2	0	0	2	5,13
	Euro 1	136	9	0	2	7	6,62
	Euro 2	2113	150	1	4	148	7,10
	Euro 3	15005	913	8	6	901	6,08
	Euro 4	31120	845	29	26	792	2,72
	Euro 5	28693	1640	26	45	1572	5,72
	Euro 6	1810	103	1	1	101	5,69
Gasolina	Pre Euro	255	115	8	15	107	45,1
	Euro 1	497	136	10	25	116	27,4
	Euro 2	1787	228	21	32	189	12,8
	Euro 3	6099	329	27	61	252	5,39
	Euro 4	7112	152	15	39	101	2,14
	Euro 5	6334	109	4	52	56	1,72
	Euro 6	427	11	0	6	5	2,58

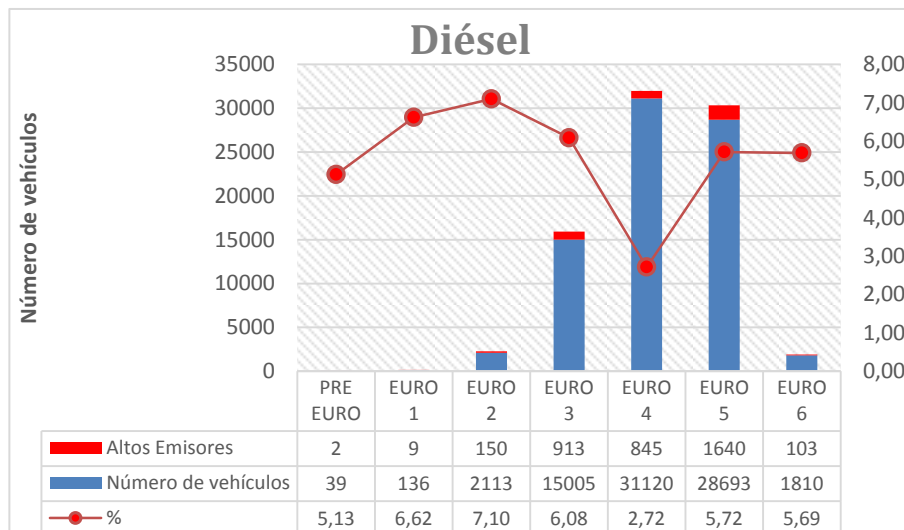
A partir de estos datos se deduce que la población de AE identificados con los criterios mencionados presenta ciertos rasgos y tendencias claras.

Tanto en el caso de los vehículos diésel como en los de gasolina, la mayor parte de los vehículos identificados como AE lo han sido por superar el nivel fijado para la ratio NO/CO<sub>2</sub>.

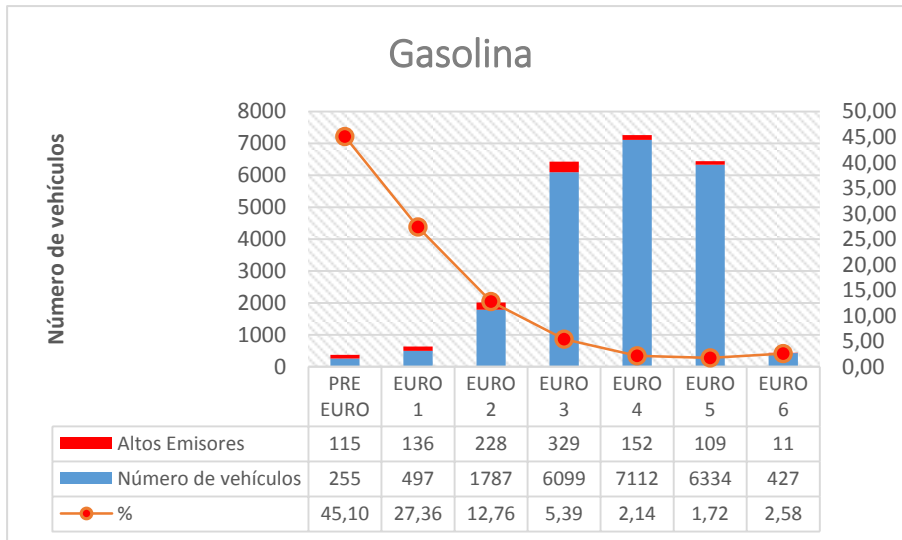
El porcentaje de vehículos de gasolina considerados AE sería especialmente importante en los segmentos más antiguos del parque circulante. En concreto (Tabla 9), la aplicación del límite utilizado para la ratio NO/CO<sub>2</sub> implicaría que cerca del 50% de los vehículos gasolina Pre Euro y algo más del 25% de los gasolina Euro 1 habrían sido identificados como AE. En realidad, esto sólo afectaría al 1% del parque de gasolina, pero sin duda la utilización de éste único límite implicaría un sesgo importante.

También se observa que la tendencia descendente en los porcentajes de AE que se habrían detectado en las categorías de vehículos diésel Euro 2, 3 y 4 se truncaría en las categorías diésel Euro 5 y 6. La representatividad y fiabilidad de estos valores son altas porque corresponden a un número de vehículos muy importante. Se considera que este resultado es relevante y significativo porque confirma un hecho ya detectado en la evaluación de los resultados generales de las campañas de medidas *on-road*: los vehículos diésel de última generación están presentando comportamientos emisores alejados de los previstos en las normativas Euro 5 y 6.

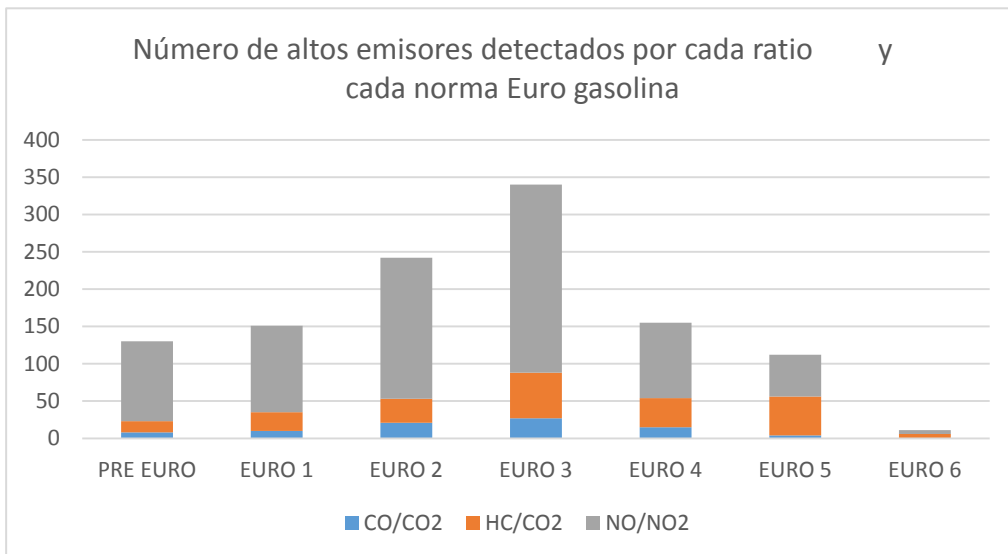
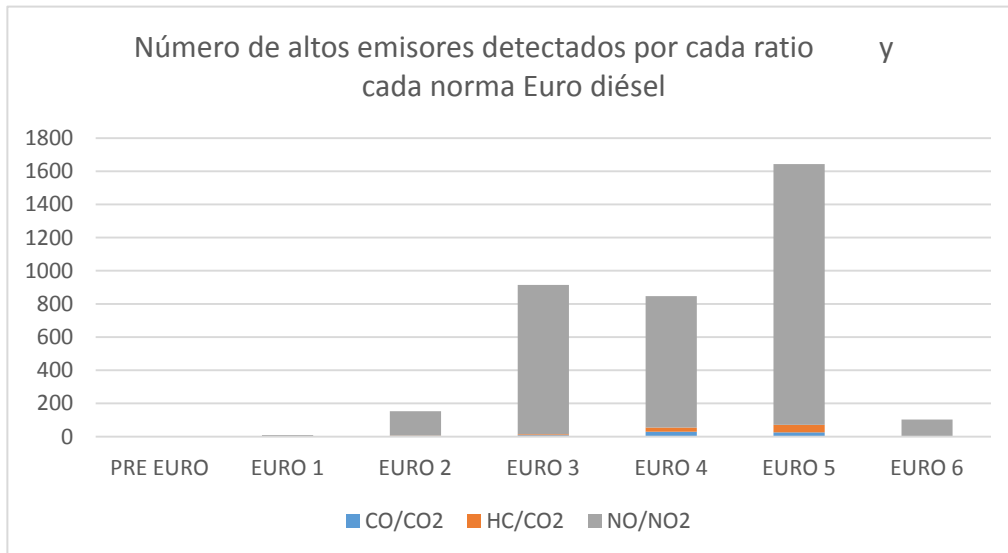
En las Figuras 5, 6 y 7 se grafican los datos de la Tabla 9, pudiéndose observar estas tendencias de manera clara.



**Figura 5- Distribución global de los Altos Emisores según la norma Euro para diésel.**



**Figura 6- Distribución global de los Altos Emisores según la norma Euro para gasolina.**



**Figura 7- Distribución de los Altos Emisores según la ratio límite superado, la norma Euro y el combustible, diésel arriba y gasolina abajo.**

En la figura 5 se observa claramente que los porcentajes de AE en las tipologías diésel varían poco de unas normas Euro a otras, excepto en el caso de la Euro4 en donde la proporción de AE pasa del 6% a casi el 3%. En la Figura 6 destacan los porcentajes de AE en las normas gasolina Pre Euro2 muy superiores al resto, con casi un 50% de AE en la clase Pre Euro. En estas condiciones, parece que la aplicación de límites únicos comunes dentro de cada categoría de vehículos podría llegar a producir distribuciones de AE distorsionadas. En concreto, se podría llegar a sobreestimar la existencia de AE entre los vehículos gasolina más antiguos, subestimándose su presencia entre los más modernos. En el caso del parque diésel eso no ocurriría.

#### 4.2 Porcentaje de Altos Emisores en función de la VSP

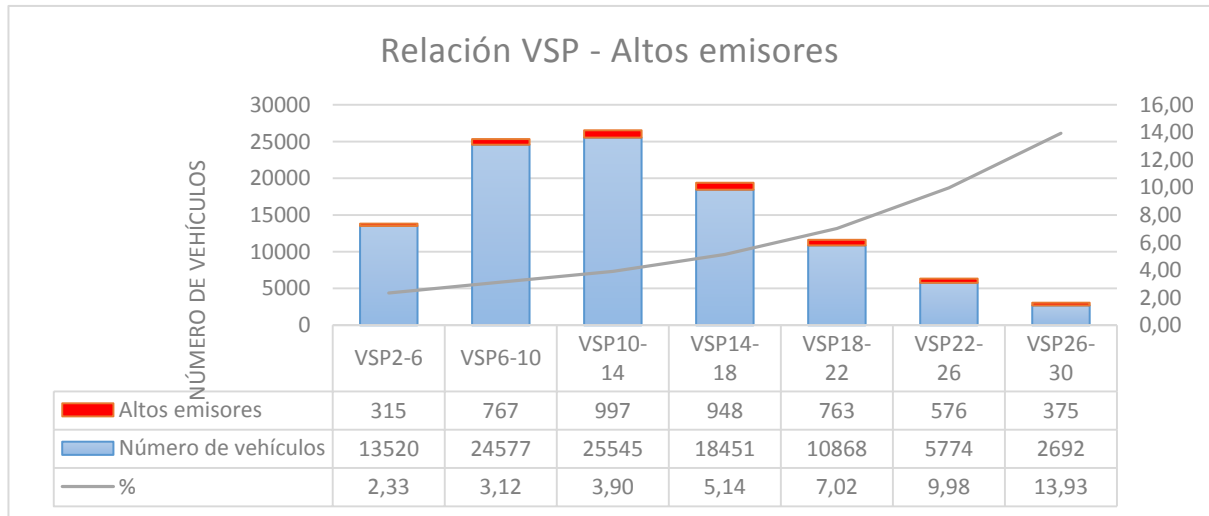
Como se describió en el apartado 6, a partir de los ensayos realizados en banco motor se ha podido documentar la influencia de la VSP sobre el comportamiento emisor de un motor diésel muy común en el parque circulante español. En este sentido cabe preguntarse si sería posible que este parámetro VSP pudiese llegar a afectar de manera determinante al porcentaje de AE que aplicando los límites propuestos se pudieran detectar.

Para despejar esta incógnita se ha realizado un análisis de la distribución de los resultados de las medidas del RSD en función de la VSP detectada y de la categoría de los vehículos. En la Tabla 10 y en la Figura 8 se presentan los resultados de estas distribuciones. Se han considerado todos los datos excluyendo los que presentaban  $PS < 20$ .

**Tabla 10- Datos de la distribución del porcentaje de vehículos Altos Emisores frente a la VSP.**

		Todos	VSP 2-6	VSP 6-10	VSP 10-14	VSP 14-18	VSP 18-22	VSP 22-26	VSP 26-30
<b>Todos</b>	Total	101427	13520	24577	25545	18451	10868	5774	2692
	AE	4741	315	767	997	948	763	576	375
	%	4,67	2,33	3,12	3,90	5,14	7,02	9,98	13,93
<b>Diésel</b>	Total	78916	10050	19048	19965	14400	8563	4670	2220
	AE	3662	215	524	704	712	650	518	339
	%	4,64	2,14	2,75	3,53	4,94	7,59	11,09	15,27
<b>Gasolina</b>	Total	22511	3470	5529	5580	4051	2305	1104	472
	AE	1080	101	243	293	236	113	58	36
	%	4,80	2,91	4,40	5,25	5,83	4,90	5,25	7,63

Se observa como a medida que aumenta la VSP también lo hace el porcentaje de AE identificados, en términos generales, algo previsible tras las conclusiones derivadas de los ensayos en banco motor.



**Figura 8- Distribución global de Altos Emisores en función de la VSP.**

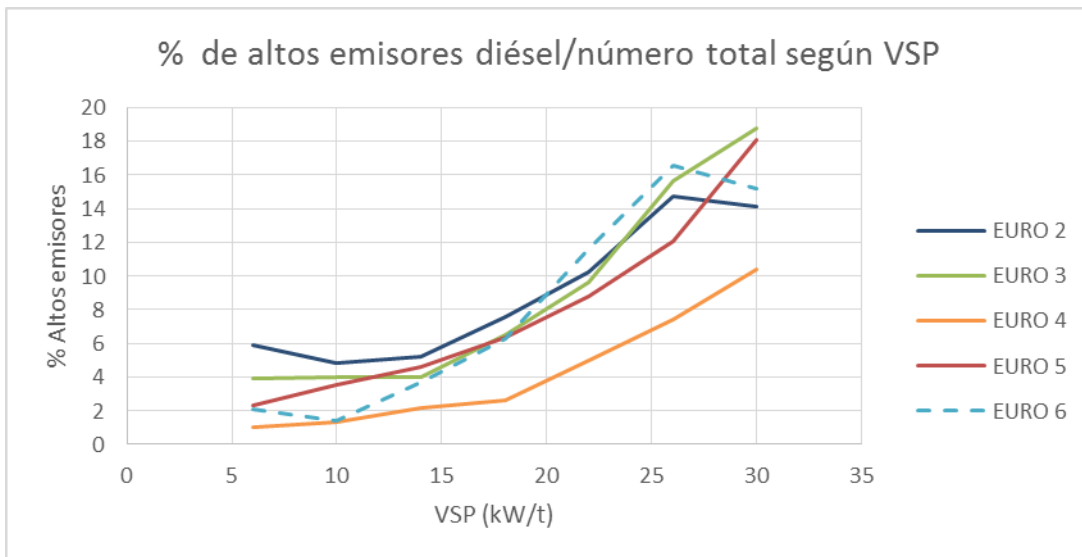
Considerando los procesos de combustión en motores diésel y gasolina, conviene estudiar el efecto de la VSP según los combustibles. En las Tabla 11 y 12 y en las Figura 10 y 10 se muestran estos resultados.

**Tabla 11- Datos de porcentaje de Altos Emisores frente a la VSP distinguiendo por normativa Euro diésel.**

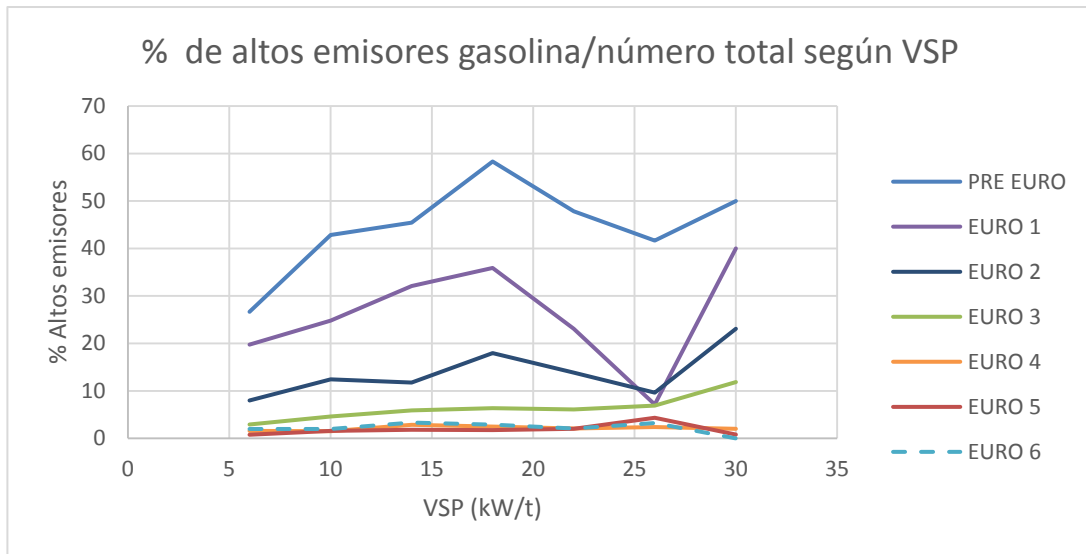
DIESEL		Todos	VSP2-6	VSP6-10	VSP10-14	VSP14-18	VSP18-22	VSP22-26	VSP26-30
D0	Total	39	4	9	9	8	5	3	1
	AE	2	0	1	0	0	0	0	1
	%	5,13	0,00	11,11	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
D1	Total	136	15	30	30	30	16	10	5
	AE	9	0	3	3	0	0	2	1
	%	6,62	0,00	10,00	10,00	0,00	0,00	20,00	20,00
D2	Total	2113	204	478	572	422	244	122	71
	AE	150	12	23	30	32	25	18	10
	%	7,10	5,88	4,81	5,24	7,58	10,25	14,75	14,08
D3	Total	15005	1795	3524	4055	2757	1652	844	378
	AE	913	70	140	162	179	159	132	71
	%	6,08	3,90	3,97	4,00	6,49	9,62	15,64	18,78
D4	Total	31120	4039	7700	7857	5632	3271	1824	797
	AE	845	40	105	169	149	163	136	83
	%	2,72	0,99	1,36	2,15	2,65	4,98	7,46	10,41
D5	Total	28693	3802	6890	6980	5216	3151	1752	902
	AE	1640	89	246	323	331	277	211	163
	%	5,72	2,34	3,57	4,63	6,35	8,79	12,04	18,07
D6	Total	1810	191	417	462	335	224	115	66
	AE	103	4	6	17	21	26	19	10
	%	5,69	2,09	1,44	3,68	6,27	11,61	16,52	15,15

**Tabla 12- Datos de porcentaje de Altos Emisores frente a la VSP distinguiendo por normativa Euro gasolina.**

GASOLINA		Todos	VSP2-6	VSP6-10	VSP10-14	VSP14-18	VSP18-22	VSP22-26	VSP26-30
G0	Total	255	30	70	66	48	23	12	6
	AE	115	8	30	30	28	11	5	3
	%	45,10	26,67	42,86	45,45	58,33	47,83	41,67	50,00
G1	Total	497	76	133	134	78	52	14	10
	AE	136	15	33	43	28	12	1	4
	%	27,36	19,74	24,81	32,09	35,90	23,08	7,14	40,00
G2	Total	1787	301	467	408	323	166	83	39
	AE	228	24	58	48	58	23	8	9
	%	12,76	7,97	12,42	11,76	17,96	13,86	9,64	23,08
G3	Total	6099	954	1520	1512	1067	606	305	135
	AE	329	28	70	89	68	37	21	16
	%	5,39	2,94	4,61	5,89	6,37	6,11	6,89	11,85
G4	Total	7112	1150	1713	1789	1256	718	337	149
	AE	152	18	26	51	31	15	8	3
	%	2,14	1,57	1,52	2,85	2,47	2,09	2,37	2,01
G5	Total	6334	908	1525	1551	1210	692	322	126
	AE	109	7	24	28	21	14	14	1
	%	1,72	0,77	1,57	1,81	1,74	2,02	4,35	0,79
G6	Total	427	51	101	120	69	48	31	7
	AE	11	1	2	4	2	1	1	0
	%	2,58	1,96	1,98	3,33	2,90	2,08	3,23	0,00



**Figura 9- Distribución de Altos Emisores en función de la VSP para vehículos diésel.**



**Figura 10- Distribución de Altos Emisores en función de la VSP para vehículos gasolina.**

En la Figura 10 se representan según la norma de los vehículos los porcentajes de AE diésel en función de la potencia vehicular específica, aunque sin incluir las normas Pre-Euro y Euro1 debido a la baja representatividad estadística de los escasos vehículos registrados. En la figura 10 se representan los datos relativos a los AE gasolina.

De estos resultados se concluye que las tendencias en las proporciones relativas de AE en las flotas de vehículos diésel y de gasolina tienen comportamientos totalmente distintos en función de la VSP.

*Vehículos diésel:* Descartado el análisis de las normas Pre-Euro y Euro1 por su escasa representatividad estadística, se observa que en el resto de normativas el incremento de VSP implica un aumento del porcentaje de AE en todas las normas. Esta tendencia se produce casi en los mismos términos de dependencia funcional sin distinción de normas y refleja el comportamiento de las emisiones medias (especialmente de óxidos de nitrógeno, debido al incremento de temperatura) frente a VSP ya documentado para los vehículos diésel.

*Vehículos gasolina:* Sólo en las normas Pre-Euro4 el porcentaje de AE muestra cierta dependencia con la VSP, mientras que en las normas posteriores esa proporción apenas varía en todo el rango de VSP registrado. También se observa que en las normas Pre-Euro 3 el porcentaje de AE crece de manera muy significativa con la antigüedad de los vehículos, como se puso de manifiesto en el apartado anterior.

Como conclusiones generales de este análisis puede decirse que, a la vista de los resultados obtenidos con esta proyección sobre la detección de AE aplicando los criterios sugeridos por



TECHNET, resultaría muy conveniente recortar el rango útil de VSP en el que se considera posible realizar identificaciones fiables de Altos Emisores. Esto es especialmente importante para el parque diésel, y el límite superior de VSP podría ser 20 o incluso menor. Por otro lado, también sería conveniente no establecer un único límite genérico de NO/CO<sub>2</sub> para la detección de AE en categoría M1, con independencia de la norma y tipología de los turismos, sino que convendría distinguir entre el parque diésel y gasolina, de forma que puede ser viable establecer un límite único para vehículos diésel pero para el caso de gasolina sería más conveniente plantear al menos dos límites distintos según se trate de Pre-Euro 3 o posteriores.

#### **4.3 Influencia de la temperatura ambiente sobre el porcentaje de Altos Emisores**

Teniendo en cuenta que las emisiones de los vehículos contaminantes se ven influidas también por las condiciones ambientales de humedad y temperatura como han demostrado diferentes estudios internacionales, se consideró importante realizar un análisis de la posible relación entre la identificación de AE y la temperatura ambiente a la que se realizaron esas detecciones. Con el fin de estudiar esta posible relación, se han escogido dos días diferentes de la 2ª campaña de medidas *on-road*, el 2 y el 6 de marzo, por presentar la misma progresión horaria en temperaturas. Todos los datos se obtuvieron en el punto nº 17 (M30 a A42, Salida de Madrid, dirección Toledo) y en el caso de día 2 las medidas se realizaron por la tarde con temperaturas superiores a 25°C mientras que en el caso del día 6 las medidas se realizaron por la mañana a temperaturas inferiores a 15°C. Sólo se han utilizado para este análisis datos con  $PS > 20$ . En la Tabla 13 y en la Figura 11 se presentan los resultados de este análisis.

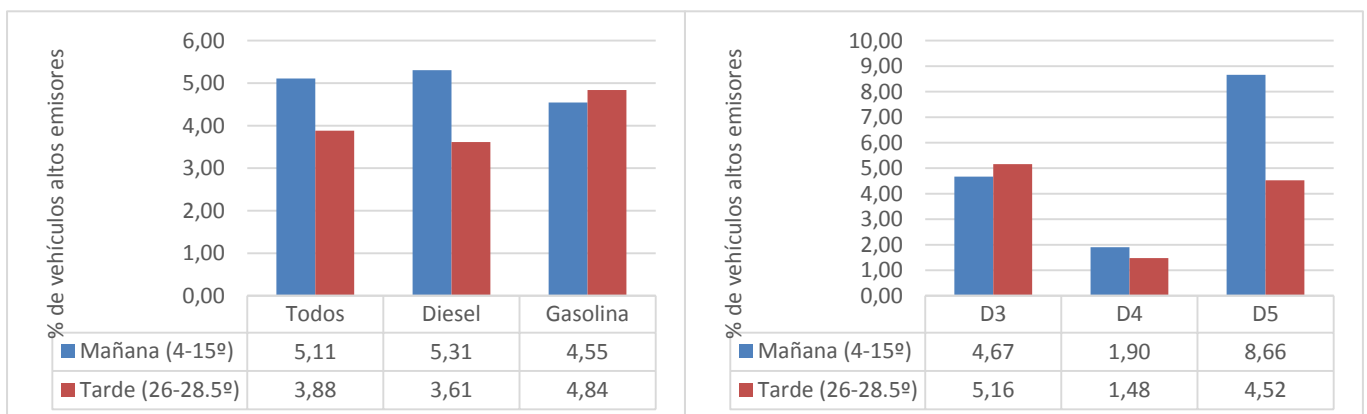
Parece claro que para algunas normas no se pueden extraer conclusiones fiables porque el número de vehículos medidos resultó insuficiente, pero en el resto la estadística resultante sí puede considerarse significativa. En términos generales puede decirse que el porcentaje de Altos Emisores detectados en el parque de gasolina ambos días es esencialmente igual (4,84% el día 2/3 y 4,55% el 6/3), mientras que para el parque diésel sí se observan diferencias notables (3,61% el día 2/3 y 5,31% el 6/3).

En este sentido, conviene destacar lo que ocurre en las normas diésel Euro3, 4 y 5, que presentan un notable número de vehículos en cada caso. Estos resultados concretos estarían poniendo de manifiesto que en algunas normas sí es probable la existencia de una relación causal entre temperaturas ambiente bajas y una mayor incidencia en el porcentaje de AE detectados.

En este sentido, es muy significativo el dato relacionado con los vehículos diésel Euro5 porque la proporción de AE se dobla (pasa del 4,52% al 8,66%) cuando las medidas se obtienen a primeras horas de la mañana. Lamentablemente, los resultados correspondientes a la norma diésel Euro6 no tienen suficiente peso estadístico, aunque parecen apuntar también en esa dirección.

**Tabla 13- Datos de distribución del porcentaje de Altos Emisores frente a la temperatura ambiente registrada en dos días ( 02 y 06/03/15) en que se realizaron medidas en el punto 17 (ver ANEXO Tabla 4.1).**

	06-mar			02-mar		
	Mañana 6:00-10:00 h (4-15°C)			Tarde 14:45-18:45 h (26-28.5°C)		
	Número	Altos emisores	% AE	Número	Altos emisores	% AE
<b>Todos</b>	1018	52	5,11	850	33	3,88
<b>Diésel</b>	754	40	5,31	664	24	3,61
<b>Gasolina</b>	264	12	4,55	186	9	4,84
<b>D0</b>	0	0		0	0	
<b>D1</b>	4	1	25,00	1	0	0,00
<b>D2</b>	11	1	9,09	24	3	12,50
<b>D3</b>	150	7	4,67	155	8	5,16
<b>D4</b>	315	6	1,90	271	4	1,48
<b>D5</b>	254	22	8,66	199	9	4,52
<b>D6</b>	20	3	15,00	14	0	0,00
<b>G0</b>	2	2	100,00	1	1	100,00
<b>G1</b>	5	2	40,00	5	1	20,00
<b>G2</b>	11	2	18,18	12	1	8,33
<b>G3</b>	76	4	5,26	53	5	9,43
<b>G4</b>	90	0	0,00	61	1	1,64
<b>G5</b>	69	1	1,45	52	0	0,00
<b>G6</b>	11	1	9,09	2	0	0,00

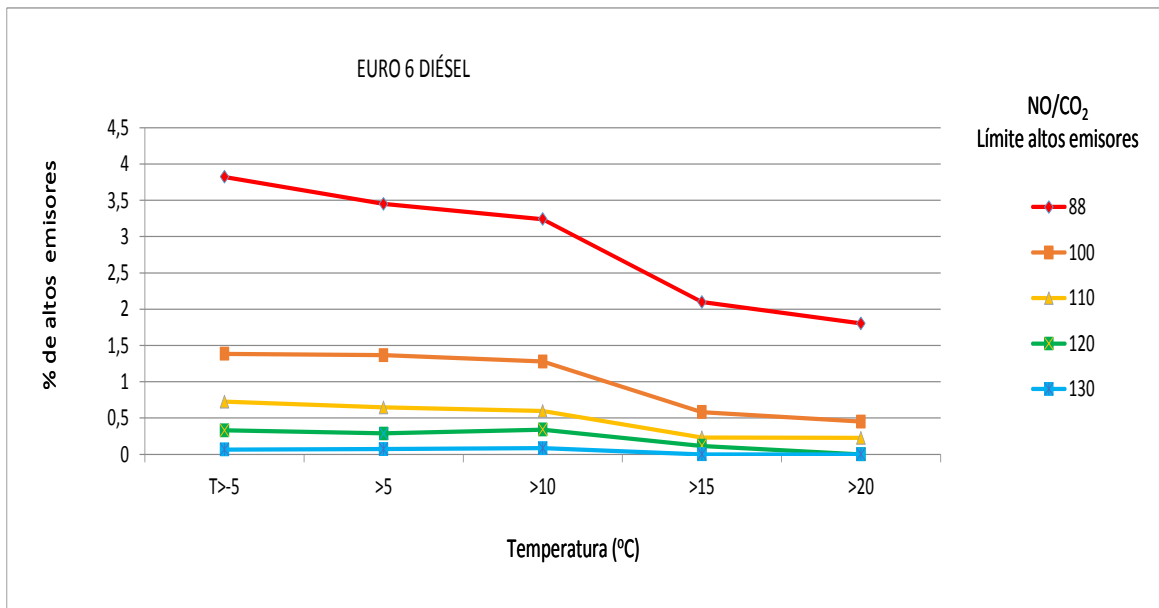


**Figura 11- Distribuciones de AE detectados los días 02 y 06/03/15 en función del tipo de combustible (izquierda) y particularizado para las normas diésel Euro 3, 4 y 5 (derecha).**

Estos resultados son coherentes con las conclusiones a las que han llegado algunos estudios internacionales realizados en los últimos años [18] en los que se ha demostrado que los sistemas de post-tratamiento utilizados para eliminar los óxidos de nitrógeno de las emisiones de escape pueden afectar significativamente al comportamiento emisor de los vehículos provocando variaciones relativamente bruscas de la misma. En general, los sistemas de post-tratamiento más modernos como el EGR de alta presión, el SCR y el LNT (Lean NOx Trap), que suelen equipar vehículos diésel Euro5 y Euro6, suelen ser realmente efectivos cuando funcionan óptimamente, pero lo que se ha comprobado es que en condiciones reales ese funcionamiento es muchas veces parcial. Además, en ambientes fríos estos sistemas tardan mucho más tiempo del previsto en alcanzar el punto de acondicionamiento óptimo y las emisiones que se producen en esos vehículos en condiciones de baja temperatura suelen estar muy por encima de los valores esperados, que se alcanzan más tarde o incluso no llegar a alcanzarse.

Naturalmente este hecho podría llegar a tener una incidencia importante a la hora de identificar vehículos AE, por consiguiente, la temperatura ambiente a la que conviene realizar este tipo de medidas debería también ser acotada para evitar identificar falsos AE provocados por este tipo de condiciones de contorno ambientales.

Se puede concluir que no es recomendable, en términos generales, realizar medidas encaminadas a la detección de vehículos Altos Emisores a temperaturas inferiores a 15°C. Para apoyar esta afirmación se presenta la Figura 122. Se ha particularizado para la categoría Euro 6 diésel, porque pese a no disponer de un número óptimo de vehículos para garantizar la representatividad estadística, es la tipología en la que la temperatura ambiente tiene un efecto más importante sobre las emisiones debido a los sistemas de post-tratamiento actuales. La figura muestra como a partir de 15°C la detección de altos emisores se reduce a la mitad respecto a los valores observados considerando todos los experimentos de entre -5 y 10°C.



**Figura 12-** Distribución de vehículos diésel de la categoría Euro6 detectados como altos emisores dependiendo de la temperatura y del valor límite de NO/CO<sub>2</sub>. Se ha considerado VSP < 20 y PS > 20.

#### 4.4 Casos ejemplo de vehículos registrados en varias ocasiones

Afortunadamente, durante las campañas de medida *on-road* algunos vehículos individuales han circulado en diferentes ocasiones ante el RSD4600 por lo que se han podido estudiar sus emisiones en distintas condiciones ambientales y de VSP. El análisis de este tipo de casos es interesante porque permite chequear las conclusiones a las que se ha llegado a partir de los anteriores análisis.

A continuación se muestran 5 ejemplos que ponen de manifiesto como el efecto individual o combinado de la VSP y la temperatura ambiente puede inducir situaciones en las que un mismo vehículo puede llegar a ser identificado o no como AE. Esto significa que dos parámetros, uno relacionado con la conducción del vehículo (la VSP depende del punto de operación del motor) y otro independiente de la misma (temperatura ambiente) deben ser tenidos muy en cuenta llegar a identificar AE de manera veraz. Los ejemplos seleccionados corresponden a normas diésel Euro 5 y Euro 4, por ser los mayoritarios en el parque. También son de gran interés los vehículos diésel Euro 6 pero en la base de datos no se han localizado ejemplos claros por disponer de un número de vehículos significativamente menor. Todos los ejemplos mostrados tienen un PS>20. En la Tabla 14 se presentan los resultados de estos vehículos preservando su identidad.

**Tabla 14- Ejemplos de vehículos que han sido detectados en varias ocasiones produciendo emisiones claramente diferentes. Se presentan todos los datos asociados a estas medidas.**

	LUGAR	FECHA	HORA	PS	VSP	CO/CO <sub>2</sub>	HC/CO <sub>2</sub>	NO/CO <sub>2</sub>	MARCA	T(°C)	HR(%)	P (mb)
Vehículo 1. Diésel Euro 5 (Probable efecto de la VSP)	A5 Móstoles. Dirección Madrid	02/02/2015	10:48:10	28,44	19,77	1,00E-04	0,22	115,30	OPEL	5,17	72	942
	A5 Móstoles. Dirección Madrid	11/02/2015	10:57:52	25,20	9,35	1,30E-03	-2,89	17,82	OPEL	8,44	61	951
Vehículo 2. Diésel Euro 5 (Probable efecto combinado de T y VSP)	Carretera de Navacerrada a A6	23/01/2015	7:16:22	24,16	24,91	-7,00E-04	0,62	131,56	RENAULT	2,17	60	922
	Bus VAO. Dirección salida de Madrid.	22/10/2014	15:16:17	22,36	21,88	4,00E-04	-2,42	95,57	RENAULT	21,89	40	946
	Bus VAO. Dirección Madrid (Cementerio)	16/10/2014	7:31:34	30,62	7,62	0,00E+00	-0,66	19,05	RENAULT	23,83	51	940
Vehículo 3. Diésel Euro 5 (Probable efecto de T)	M30 a A42. Salida de Madrid. Dirección Toledo	05/03/2015	8:42:35	30,86	11,25	1,00E-04	-1,84	90,95	NISSAN	4,17	56	970
	M30 a A42. Salida de Madrid. Dirección Toledo	03/03/2015	8:54:27	27,38	6,52	-9,00E-04	-2,40	1,73	NISSAN	13,00	75	962
Vehículo 4. Diésel Euro 4 (Probable efecto de T)	A5 Móstoles. Dirección Madrid	02/02/2015	8:47:22	20,17	13,39	5,00E-04	0,56	116,95	SEAT	3,39	75	943
	A5 Móstoles. Dirección Madrid	26/02/2015	8:07:54	43,83	17,83	-1,00E-04	-0,79	83,67	SEAT	10,83	64	956
Vehículo 5. Diésel Euro 4 (Probable efecto de la VSP)	A5 Móstoles. Dirección Madrid	06/02/2015	16:04:38	54,62	24,27	-5,00E-04	2,41	96,20	SKODA	17,11	18	941
	A5 Móstoles. Dirección Madrid	11/02/2015	10:25:20	37,31	18,73	-3,00E-04	1,42	9,35	SKODA	7,72	63	951

**Vehículo 1:** Opel Euro 5 diésel, detectado en dos ocasiones. En la primer (T=5.17°C) el vehículo pasó con VSP = 19.77 kW/t y emitiendo 115 NO/CO<sub>2</sub>, por lo que habría sido considerado AE. En la segunda (T=8.44°C) el vehículo pasó con VSP = 9.35 kW/t y emitiendo 17.82 NO/CO<sub>2</sub>, valor adecuado muy por debajo del límite planteado, por lo que en este caso no habría sido considerado como AE. Las diferencias de VSP podrían explicar los distintos regímenes de emisión de este vehículo.

**Vehículo 2:** Renault Euro 5 diésel. Detectado en tres ocasiones y dos emplazamientos distintos. En el primer caso ( $T = 2.17^{\circ}\text{C}$ ) pasó con  $VSP = 24.91 \text{ kW/t}$ , y la ratio medida fue  $131.56 \text{ NO/CO}_2$ . En el segundo ( $T = 22^{\circ}\text{C}$ ) con una  $VSP = 21.88 \text{ kW/t}$  y generando una emisión de  $95.57 \text{ NO/CO}_2$ , y en el tercer caso ( $T = 22^{\circ}\text{C}$ ) con una  $VSP = 7.62 \text{ kW/h}$  y una emisión de  $19.05 \text{ NO/CO}_2$ . En los dos primeros casos el vehículo habría sido considerado como AE pero en el último no. Probablemente la primera superación registrada se debería a una combinación de baja temperatura ambiente y alta VSP. En la segunda superación (menor que la del caso anterior) el problema se debió probablemente a la elevada VSP.

**Vehículo 3:** Nissan Euro 5 diésel. Detectado dos veces. En la primera,  $T = 4.17^{\circ}\text{C}$  y  $VSP = 11.25 \text{ kW/t}$ , pasó emitiendo  $90.95 \text{ NO/CO}_2$ . En la segunda,  $T = 13^{\circ}\text{C}$  y  $VSP = 6.52 \text{ kW/t}$ , y la ratio medida fue  $1.73 \text{ NO/CO}_2$ . La gran diferencia entre ambos ratios de emisión no puede deberse a los valores de la VSP, que son moderados y relativamente similares en ambos casos, por lo que tal vez la diferencia entre los ratios de emisión de las dos pasadas pudiera deberse a las distintas temperaturas ambiente.

**Vehículo 4:** Seat Euro 4 diésel. Detectado dos veces. En la primera, con  $T = 3.4^{\circ}\text{C}$  y  $VSP = 13.4 \text{ kW/t}$ , el vehículo pasó emitiendo  $116.65 \text{ NO/CO}_2$ . En la segunda con  $T = 10.8^{\circ}\text{C}$  y  $VSP = 17.8 \text{ kW/t}$  el ratio medido fue  $83.67 \text{ NO/CO}_2$ . En estos casos los ratios  $\text{NO/CO}_2$  medidas fueron siempre elevadas por lo que muy probablemente el vehículo sea un AE real. No obstante, y más allá de considerar que estas medidas del RSD podrían llevar asociada la máxima incertidumbre posible (10%), los datos muestran también la probable influencia controladora de la temperatura sobre la emisión porque en la segunda pasada del vehículo, aunque la VSP fuese superior a la primera, la emisión fue menor.

**Vehículo 5:** Skoda Euro 4 diésel. Este vehículo fue detectado en dos ocasiones en el mismo punto. En la primera con  $T = 17^{\circ}\text{C}$  y  $VSP = 24.37 \text{ kW/t}$ , emitió  $96.20 \text{ NO/CO}_2$ . En la segunda pasada con  $T = 7.8^{\circ}\text{C}$  y  $VSP = 18.7 \text{ kW/t}$ , se registró una ratio de  $9.35 \text{ NO/CO}_2$ . En este caso, la temperatura no parece haber afectado. Probablemente en la segunda ocasión, el vehículo ya llevase circulado tiempo suficiente como para que los sistemas de post-tratamiento funcionasen correctamente pese a la baja temperatura, en consecuencia, lo más probable es que la diferencia registrada entre ambos ratios de  $\text{NO/CO}_2$  se debiese a que en el primer caso la VSP era bastante alta.

Del análisis de estos casos se deriva que el riesgo de identificación falsa de Altos Emisores es completamente real y que la mejor forma de minimizar la posible incidencia de estos errores es restringir los rangos útiles de VSP y de temperatura ambiente dentro de los cuales se pueden aceptar los resultados de medidas remotas de emisiones de vehículos con detección positiva de AE.

## 5. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto CORETRA, cofinanciado por la Fundación Biodiversidad y el CIEMAT, ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

- En ausencia de Normas CEN aplicables a los equipos de medición remota óptica de emisiones de vehículos, se han definido procedimientos experimentales, basados en la generación de penachos sintéticos producidos en condiciones controladas y con materiales de referencia (gases patrón), para poder realizar un estudio metrológico y una evaluación objetiva, externa e independiente del funcionamiento y las prestaciones reales de estos sistemas de medida remota. Esta cuestión puede ser del máximo interés para cualquier entidad de verificación metrológica que asuma el papel de auditor técnico de este tipo de sensores, como sería el caso en España del Centro Español de Metrología (CEM) [19].
- Los procedimientos diseñados han sido implementados y aplicados al análisis del instrumento AccuScan™ RSD4600, equipo de detección remota óptica de emisiones de vehículos que ha sido considerado como representativo del estado del arte en este ámbito. Durante estos ensayos se ha generado una nutrida Base de Datos de ratios de gases obtenidas al caracterizar con el instrumento RSD4600 numerosos penachos sintéticos siguiendo dichos procedimientos.
- Los resultados de los ensayos controlados han permitido documentar la fiabilidad de las medidas producidas por el RSD4600 así como estudiar la influencia sobre las mismas de diferentes parámetros externos al propio equipo. A partir de los resultados obtenidos en estos ensayos se ha verificado que las medidas de ratios de concentración de gases en penachos de emisión de vehículos proporcionadas por el instrumento RSD4600 están sujetas a ciertos controles de calidad aplicados por el propio equipo. En concreto, este sistema únicamente reporta aquellos valores de las ratios de emisión de  $\text{NO}/\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}/\text{CO}_2$  y  $\text{HC}/\text{CO}_2$  que han superado los criterios de aceptación/rechazo que aplica automáticamente. Uno de esos criterios tiene que ver con el valor del parámetro denominado Plume Size (*PS*) y se ha verificado que cuando este factor es mayor de 20 ( $PS > 20$ ) la incertidumbre de las ratios de concentración medidas por este equipo es inferior al 10%.
- Durante el desarrollo del proyecto CORETRA también se han desarrollado dos campañas de medida de emisiones de vehículos con el instrumento RSD4600 en diferentes puntos de la red viaria interurbana de la Comunidad de Madrid. Se han registrado las emisiones de más de

140.000 vehículos turismos individuales (no repetidos) en condiciones de tráfico real en carretera, lo que ha permitido obtener una Base de Datos actualizada y bastante representativa del comportamiento emisor del parque circulante español actual.

- En estas campañas se han detectado algunas tendencias importantes en las emisiones medias del parque. Es especialmente llamativa la situación de los vehículos diésel de las normas Euro5 y Euro6, puesto que las medidas han demostrado que gran parte de estos vehículos están circulando emitiendo NO con ratios medias de NO/CO<sub>2</sub> superiores a las producidas por los vehículos diésel Euro4 y comparables a las de normas Pre-Euro4. Se trata de comportamientos promedios y por tanto plenamente representativos del conjunto y evidencian que la incorporación masiva en los últimos años de vehículos diésel de última generación no ha contribuido a mejorar la calidad del aire en las áreas urbanas, como cabía esperar. Parece claro que, en relación al problema de la emisión de óxidos de nitrógeno, el efecto real está siendo contrario al esperado. No obstante, existe una notable variabilidad en el comportamiento de los vehículos según modelo y marca, extremo que habrá que estudiar en detalle en el futuro porque en el conjunto de los vehículos diésel modernos (Euro5 y Euro6) coexisten modelos diésel de bajas emisiones con otros de emisiones elevadas, extremo que será analizado en profundidad en el futuro.
- Aplicando criterios estadísticos a los resultados de esta Base de Datos de vehículos y emisiones asociadas se ha propuesto un primer conjunto de valores límite para las ratios de emisión de contaminantes, según la categoría y normativa de los vehículos. La superación de estos valores de emisión por parte de un determinado vehículo podría implicar su identificación como “Alto Emisor” (AE).
- Para evaluar las consecuencias de la aplicación de estos límites, a través de una futura normativa ambiental, alguno de estos valores ha sido aplicado a los vehículos M1 de la Base de Datos obtenida en las campañas. Esto ha permitido extraer varias conclusiones de interés que pueden ayudar en la toma de decisiones de cara a la elaboración de cualquier normativa futura que considere el uso de medidas remotas de emisiones de vehículos como una opción de interés para la identificación de AE, como paso previo a la corrección de su situación y, en definitiva, como vía útil de conseguir una reducción efectiva de las emisiones del tráfico. Los resultados de este ejercicio han demostrado que, además de los criterios estadísticos, será preciso tomar en



consideración otros de carácter técnico a la hora de establecer las condiciones de identificación de vehículos AE.

- Con este análisis se ha constatado que existe un riesgo real pequeño pero no despreciable de identificación de falsos positivos (falsos Altos Emisores), aunque éste no sería imputable al funcionamiento del instrumento de detección remota, sino más bien a la metodología con que esta tecnología pueda ser aplicada. Es preciso establecer condiciones más limitantes a la hora de fijar los posibles límites de emisión, así como fijar márgenes de aplicación de los mismos suficientemente seguros como para detectar de manera fiable los Altos Emisores. En este sentido, se ha señalado que establecer límites comunes de amplio espectro (comunes para todas las normativas y combustibles) puede no ser lo más adecuado. También se ha demostrado que el comportamiento emisor de los vehículos responde a factores tales como la potencia vehicular específica instantánea (VSP) y a la temperatura ambiente, por lo que en ocasiones las emisiones detectadas pueden ser elevadas sin que el vehículo sea un verdadero alto emisor. Estos factores externos pueden condicionar seriamente el comportamiento emisor de un vehículo y no deben ser obviados por su influencia a la hora de identificar AE. Estos comportamientos pueden diferir sensiblemente en función de la tecnología de los motores de los vehículos (combustible, norma Euro, categoría).
- Para minimizar la detección de falsos positivos se propone reducir el rango útil de VSP y establecer una temperatura ambiente mínima para que se puedan realizar identificaciones de AE. Se recomienda no realizarlas si se registran valores de VSP superiores a 18-20, no porque las medidas remotas sean incorrectas en estos casos sino porque a partir de esas condiciones de VSP el comportamiento emisor de los vehículos puede no ser representativo de su verdadera condición como fuente emisora de contaminantes. Respecto a la temperatura ambiente sería conveniente evitar realizar este tipo de determinaciones para temperaturas inferiores a 15-18°C porque se ha demostrado que existe una probabilidad no despreciable de que en estas condiciones se pueda producir un comportamiento ineficiente aunque transitorio de los sistemas de postratamiento de los gases de escape (especialmente en los vehículos más modernos), sin que ello suponga que esos vehículos sean verdaderos Altos Emisores.
- Se recomienda también fijar los límites de las ratios de emisión de los distintos contaminantes discriminando, siempre que se pueda, según el tipo de combustible utilizado, la categoría de los

vehículos y la norma Euro, aunque para diésel un único límite optimizado podría llegar a ser suficiente.

- Se recomienda evitar realizar controles de AE en puntos del viario y en momentos que puedan propiciar la circulación de vehículos con el motor frío porque en esos momentos sus emisiones pueden ser notables y no representativas de su verdadero comportamiento emisor.
- La información recabada en este proyecto permite afirmar categóricamente que sí es posible utilizar tecnologías de medida remota de emisiones *on-road* de manera fiable para realizar estudios de emisiones de una flota de vehículos. La calidad de los datos obtenidos a través de estos sistemas, en términos de incertidumbre de los valores de las ratios de concentración medidas, dependerá de que, tanto en las operaciones de calibrado del equipo como en las de medida propiamente dichas, se hayan seguido los protocolos marcados por el fabricante del instrumento. En todo caso, se recomienda descartar los resultados obtenidos con valores de Plume Size inferiores a 20, aunque el fabricante no lo sugiera. Esto permitirá asegurar una incertidumbre de los datos inferior al 10%.

#### CONCLUSIÓN GENERAL:

Como resumen puede decirse que la conclusión general que se extrae de la ejecución del proyecto CORETRA es que quedan despejadas las dudas existentes sobre la viabilidad técnica del uso de las técnicas de medida remota de emisiones para la detección *on-road* de vehículos Altos Emisores. Desde el punto de vista metrológico la incertidumbre de las medidas que pueden proporcionar este tipo de equipos ha quedado adecuadamente documentada. También ha quedado demostrado que para identificar correctamente **vehículos verdaderos Altos Emisores**, además de utilizar sensores remotos fiables es preciso también establecer las condiciones adecuadas para su uso (límites máximos de emisión suficientemente seguros, rangos de temperatura y de VSP, etc.). En caso de que estas condiciones no sean respetadas existirá un riesgo no despreciable de realizar identificaciones incorrectas de Altos Emisores por cuestiones ajenas al propio instrumento de medida.

La investigación desarrollada en CORETRA no está agotada y además del análisis de la base de datos obtenida en las campañas, se considera que aún quedan asuntos relevantes pendientes que convendría abordar:

- Sería conveniente realizar medidas en otros escenarios geográficos y épocas del año. Con ello se podría asegurar la representatividad de las medidas obtenidas en Madrid en relación al parque circulante real a nivel nacional y evaluar la influencia real de ciertos parámetros ambientales sobre las emisiones de los vehículos que no han podido ser estudiadas. Por ejemplo, la humedad, las temperaturas superiores a 35° donde el uso de elementos auxiliares aumenta el consumo y las emisiones y la obtención de falsos positivos.
- Faltan datos de algunas tipologías específicas de vehículos, como por ejemplo diésel pre Euro o gasolina Euro6. Para el caso de gasolina Euro6 sería necesario realizar una mejor caracterización de la flota porque este tipo de vehículos tiende a aumentar. La incorporación de nuevas tecnologías como el downsizing podría influir negativamente en las emisiones de NO<sub>x</sub> del conjunto de motores de gasolina Euro6.
- Es necesario extender el estudio en otras categorías de vehículos (camiones, furgonetas, etc).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/PLAN\\_AIRE\\_2013-2016\\_tcm7-271018.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/PLAN_AIRE_2013-2016_tcm7-271018.pdf)
2. <http://fundacion-biodiversidad.es/>
3. <http://www.ciemat.es/>
4. Bishop, G.A. et al. . (1989). "IR longpath photometry: a remote sensing tool for automobile emissions". *Analytical Chemistry* 61, 671e677A
5. G. A. Bishop, D. H. Stedman (1996). "Measuring the Emissions of Passing Cars". *Accounts of Chemical Research* 29, 489.
6. J. L. Jiménez Palacios (Tesis Doctoral, MIT, 1999) "Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing"
7. Allison M. Peddle (Tesis Doctoral, Univ. of Denver, 2008) "Performance and calibration of on-road remote sensors"
8. Brent G. Schuchmann et al. "Remote Measurements of On-Road Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles in California; Year 3, 2010", Annual Report
9. <http://www.deq.virginia.gov/Portals/0/DEQ/LawsAndRegulations/2007.on.road.emissions.testing.program.status.report.pdf>
10. Carslaw, D.C. et al. (2011). "Trends in NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> emissions and ambient measurements in the UK", Version: July 2011. Crown.
11. BOE núm. 183 de 2 agosto 2006: REAL DECRETO 889/2006, de 21 de julio, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida.
12. <http://bivento.org/about-us/>
13. [http://esp-global.com/en\\_US/RSD/AccuScan-Products](http://esp-global.com/en_US/RSD/AccuScan-Products)
14. <https://www.enac.es/web/enac/inicio>
15. <http://b-vento.com/wp-content/uploads/2012/03/RSD4600-Brochure-2.pdf>
16. <http://www.es.airliquide.com/>
17. Carslaw, D.C. and Rhys-Tyler, G. (2013) "New insights from comprehensive on-road measurements of NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> from vehicle emission remote sensing in London, UK", *Atmos. Environ.*, 81, 339–347, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.09.026.
18. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC72906>
19. <http://www.cem.es/>