

**XXIV CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS  
MEXICO 2011**

**ESPAÑA – INFORME NACIONAL**

**TEMA ESTRATÉGICO A – SOSTENIBILIDAD DEL  
SISTEMA DE TRANSPORTES POR CARRETERA:  
“REDUCCIÓN DEL IMPACTO DE LAS  
CARRETERAS EN EL CAMBIO CLIMÁTICO”**

**Francisco Javier Alejandro** ([fjalejandre@fomento.es](mailto:fjalejandre@fomento.es))

Subdirector General de Planificación

**Justo Borrajo Sebastián** ([jborrajo@fomento.es](mailto:jborrajo@fomento.es))

Jefe de Área de Carreteras de Gran Capacidad

**Mercedes Gómez Álvarez** ([mgalvarez@fomento.es](mailto:mgalvarez@fomento.es))

Jefe de Servicio de Tecnología de Carreteras

Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento)

**Jesús Merchán Rubio** ([jmerchan@fomento.es](mailto:jmerchan@fomento.es))

Coodinador

Secretaría de Estado de Transportes (Ministerio de Fomento)

## RESUMEN

El efecto del transporte sobre el cambio climático reviste especial importancia al ser fuente de tres de los seis gases principales que, de acuerdo con el Protocolo de Kyoto, contribuyen al efecto invernadero. En España las emisiones de GEI originadas por las actividades de transporte suponen el 25,4% de las totales, que aunque lejos del 50% que supone la industria, supera ampliamente a la agricultura. En cuanto al reparto modal la carretera es el origen del 89,2 por 100 de las emisiones, correspondiendo el 53,2 por 100 a los turismos y motocicletas, el 33,5 por 100 a los vehículos pesados (autobuses y camiones) y el 13,3 por 100 a los vehículos de transporte ligeros. Los notables esfuerzos realizados a través de normativas sobre motores y combustibles han permitido reducir notablemente las emisiones específicas por unidad de energía consumida, si bien el aumento de la demanda y la creciente matriculación de vehículos más potentes o con motorización diesel han contrarrestado parte de los esfuerzos tecnológicos. En este informe se analiza la posible contribución del sistema de transporte por carretera a la mejora de la eficiencia energética desde la planificación, el diseño, la construcción o la explotación de infraestructuras así como en la gestión de la demanda de tráfico y la información al usuario.

### 1. CONTEXTO GENERAL

El transporte es uno de los sectores económicos más importantes ya que, además de sus características propias como tal, contribuye al desarrollo y competitividad del resto de sectores. Este carácter transversal provoca que sea mucho más difícil integrar consideraciones ambientales en su regulación y desarrollo.

Las políticas de transportes actuales pretenden la consecución de un sistema más eficiente y seguro que, impulsando el desarrollo económico, preserve el medio ambiente, favorezca la cohesión social y territorial y la salud de los ciudadanos y que, al mismo tiempo, reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Las emisiones de GEI en el sector del transporte han ido creciendo de una forma continua en las últimas décadas. Según las últimas previsiones realizadas las emisiones serían en 2010 las mismas que en 2005, pero un 27 por 100 superiores a los niveles de 1990. Por ello, el Consejo de la Unión Europea ha propuesto que en 2020 se consiga reducir un 20 por 100 la emisión de GEI en la Unión Europea, con respecto a 1990.

En España las emisiones de GEI originadas por las actividades de transporte superaron en 2006 los 108 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que supone el 25,4 por 100 de las emisiones totales de GEI, que aunque alejado de la industria que supone aproximadamente el 50%, supera ampliamente a la agricultura, tercer sector que más contribuye a la emisión de GEI.

Esta cifra supone además un aumento del 88 por 100 con respecto a las millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidas en 1990. Este incremento está directamente relacionado con el crecimiento notable de la demanda, que se ha traducido en que el peso del sector en las emisiones pasase del 21,4 por 100 en 1990 al anteriormente comentado 25,4 por 100 en 2006.

En cuanto al reparto modal la carretera es el origen del 89,2 por 100 de las emisiones, correspondiendo el 53,2 por 100 a los turismos y motocicletas, el 33,5 por 100 a los

vehículos pesados (autobuses y camiones) y el 13,3 por 100 a los vehículos de transporte ligeros.

En la distribución por tipo de vías el 49,6 por 100 se produjeron en vías de gran capacidad, preferentemente en viajes interurbanos, el 36,6 por 100 corresponde al ámbito urbano y el 13,8 por 100 a situaciones intermedias.

Las principales actuaciones de las Administraciones Públicas españolas para reducir las emisiones de gases efecto invernadero se llevan a cabo mediante instrumentos de planificación: Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes 2005-2020, Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 y sus Planes de acción, y el Plan de Energías Renovables 2005-2010.

Por su parte, la Comisión Europea ha establecido acuerdos voluntarios con los fabricantes europeos, japoneses y coreanos de vehículos privados para reducir las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> de los turismos nuevos. Así, según un informe de dicha Comisión de 2009 la media comunitaria de las emisiones de los coches nuevos era de 158 g CO<sub>2</sub>/Km en 2007 frente a 185g CO<sub>2</sub>/Km en 1995 (en España estos valores eran de 152 g CO<sub>2</sub>/Km y 175 g CO<sub>2</sub>/Km respectivamente).

Además del principal gas de efecto del transporte (CO<sub>2</sub>) existen otros gases y partículas contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), y partículas (PM), que también conviene considerar en los planes de transporte y los estudios que los desarrollan.

## **2. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES DEBIDO AL TRANSPORTE POR CARRETERA**

La emisión de contaminantes por el transporte por carretera tiene importantes efectos sobre la calidad del aire y la salud, si bien son más notables en los entornos urbanos y metropolitanos donde la congestión y la propia estructura de las ciudades agravan esos efectos.

Dichas emisiones provienen fundamentalmente de la quema de combustibles, así como, en muy menor medida de la pérdida de gases refrigerantes.

Se pueden considerar cuatro tipos fundamentales de contaminantes derivados del transporte por carretera:

- Gases de efecto invernadero (GEI): CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>
- Precursores del ozono troposférico: NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, COVNM (compuestos orgánicos volátiles no metánicos) y CO
- Sustancias acidificantes: NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>
- Partículas: PM<sub>10</sub> (partículas en suspensión de diámetro superior a las 10 micras)

El efecto del transporte sobre el cambio climático reviste especial importancia, destacando que de los seis gases principales que contribuyen al efecto invernadero contemplados por el Protocolo de Kyoto, el transporte es fuente de tres de ellos.

De los tres Gases de Efecto Invernadero citados, el fundamental por su importancia entre las emisiones procedentes del transporte por carretera es el CO<sub>2</sub>. Su relación con el transporte es clara siendo su formación resultado de la quema de combustibles (gasolina y gasoil) en la combustión interna de los motores. También es importante por sus efectos, lo que hace que las estimaciones de emisiones de GEI se presenten en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente

Atendiendo ya a la evolución en España del consumo energético y la emisión de contaminantes, observamos que durante los años noventa se produjo un crecimiento intenso (4,3% anual acumulativo) del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte por carretera, que alcanzó el 5,0% en la segunda mitad de la década.

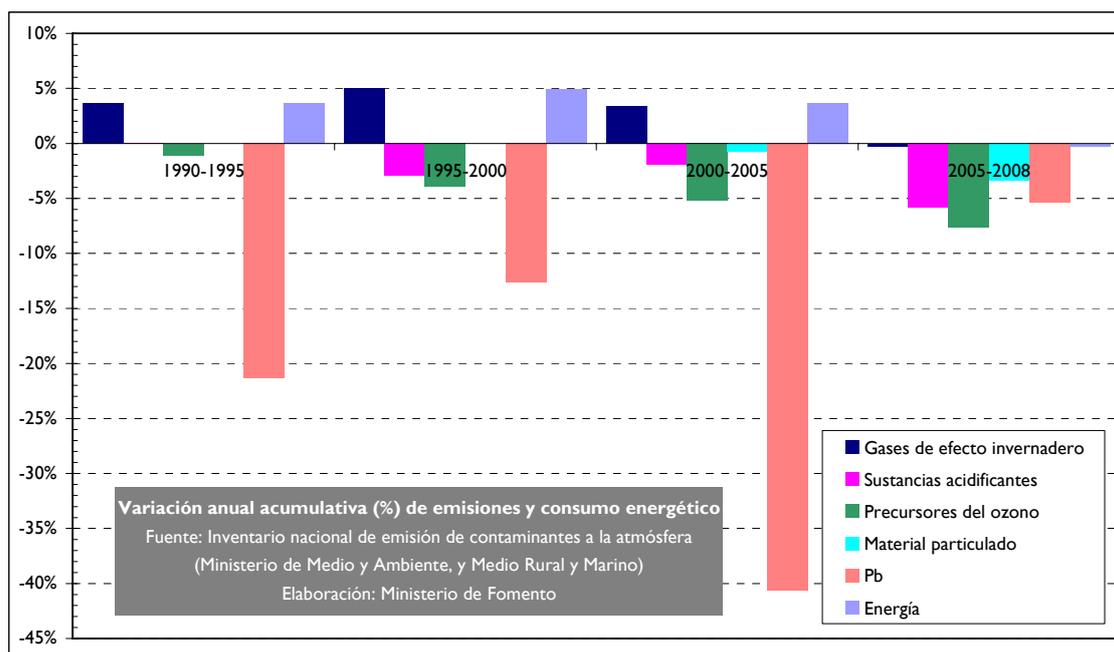


Figura 1. Variación de las emisiones y del consumo energético del transporte por carretera

Este crecimiento se suavizó hasta el 3,6% en la primera mitad de la presente década, mostrando ya un decrecimiento (-0,3%) en la segunda mitad debido a la crisis y la consiguiente disminución de la actividad económica, que afecta de manera notable al transporte.

Estas tendencias se mantienen en 2009, pues —según la Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos— se produjeron unos descensos con respecto a 2008 del 4,5% en el consumo de gasolinas y del 5,4% en el de gasóleos.

Los notables esfuerzos realizados a través de normativas sobre motores y combustibles (introducción de catalizadores y filtros, gasolinas sin plomo y de bajo contenido en azufre, biocarburantes, etc) han permitido reducir notablemente las emisiones específicas por unidad de energía consumida, si bien el aumento de la demanda y la creciente matriculación de vehículos más potentes o con motorización diesel han contrarrestado parte de los esfuerzos tecnológicos, causando descensos menos acusados en términos absolutos y relativos.

Así, se observa que la reducción de las emisiones de sustancias acidificantes ha pasado del -1,5% anual acumulativo en la década de los noventa al -3,4% en la actual, cifras que aumentan hasta el -2,5% y -6,1%, respectivamente, para los precursores del ozono. En cuanto al plomo, éste prácticamente ha desaparecido de los carburantes, por lo que en 2008 sus emisiones eran inferiores al 1% con respecto al valor de 1990.

En el siguiente gráfico se observa la evolución de la intensidad energética de las emisiones, es decir, el cociente entre la emisión de contaminantes y el contenido energético de los carburantes, con respecto al año 2000 (se toma como referencia por ser el primer año con datos de material particulado).

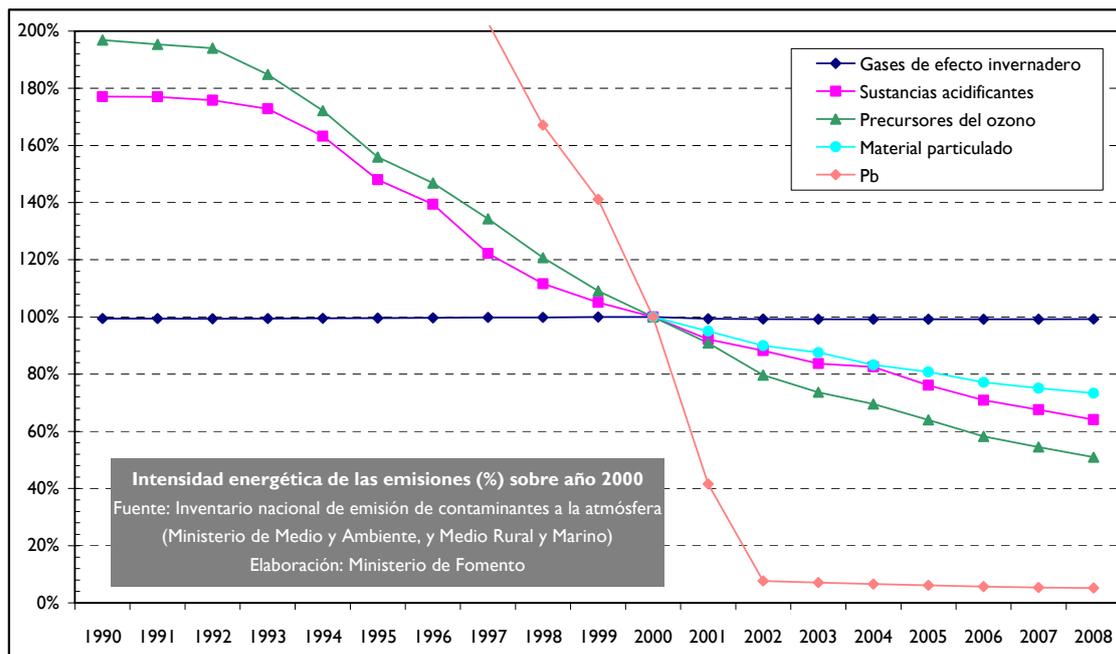


Figura 2. Variación de la intensidad energética de las emisiones

La evolución de las sustancias acidificantes y precursores del ozono es constante desde mediados de los noventa por la renovación del parque de vehículos y la introducción de normativas Euro más estrictas, mientras que para los gases de efecto invernadero se mantiene prácticamente invariable —la relación entre emisión de dióxido de carbono y contenido energético de los carburantes es constante—, solamente con un pequeño descenso durante los últimos años achacable al creciente uso de los biocarburantes.

En cuanto al consumo energético por tipo de vehículo, durante los años noventa creció a ritmos superiores al 5% anual acumulativo en turismos y vehículos ligeros, que se sitúan alrededor del 2% en la presente década.

Por el contrario, tanto para vehículos pesados como para motos, el crecimiento es más intenso durante la presente década, incluso a pesar de los efectos de la crisis de estos últimos años.

La figura 3 muestra que, prácticamente desde 1990, el turismo es responsable del 60% del consumo energético, mientras que los vehículos pesados y autobuses aportan otro 30%.

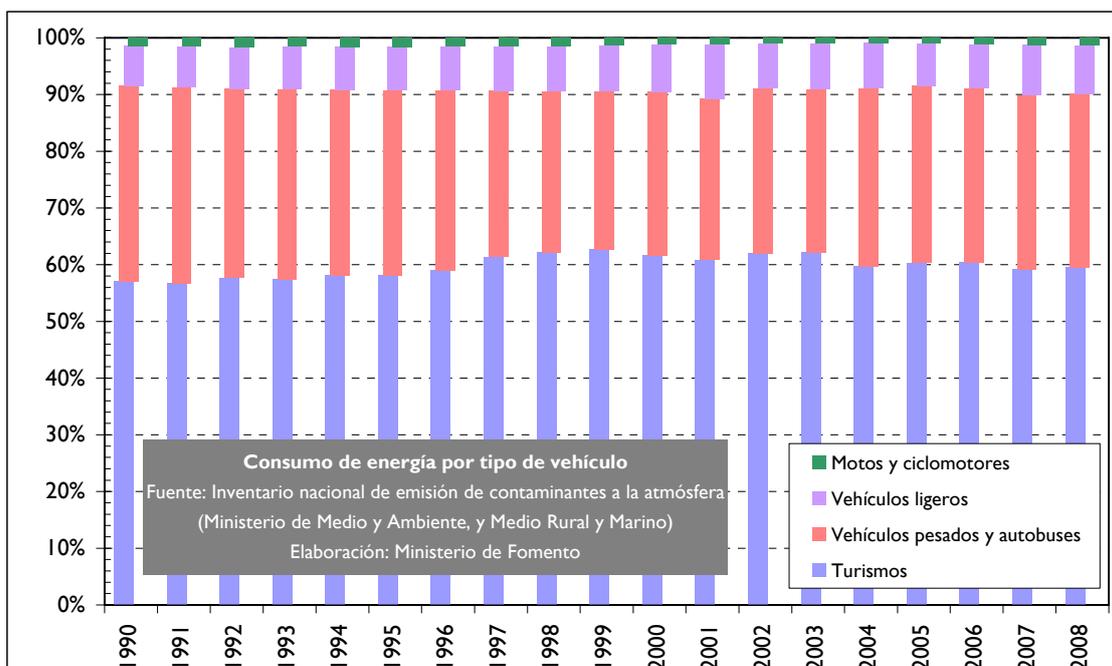


Figura 3. Reparto por tipo de vehículo del consumo energético del transporte por carretera

Atendiendo ahora a las pautas de conducción (o clase de tráfico en cuanto a su recorrido), en la década de los noventa el aumento fue mayor en los entornos urbanos (5,3%) que en los trayectos interurbanos (3,9%) y de corto recorrido o rural (3,5%).

Estos crecimientos son menos intensos en la presente década, además de que los trayectos interurbanos ganan cuota (2,6%) frente a los urbanos (2,0%).

No obstante, el reparto entre pautas de conducción se mantiene invariable desde 1990, con la mitad del consumo energético asociado al transporte interurbano, y de la mitad restante 2/3 correspondiendo al ámbito urbano, tal y como puede observarse en el siguiente gráfico.

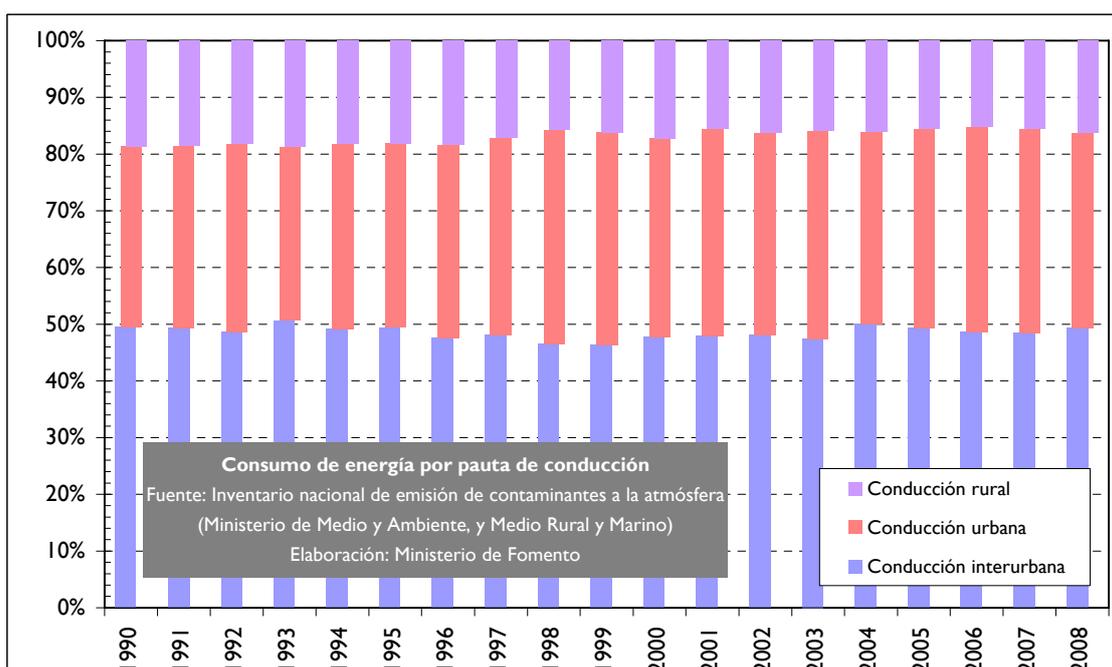


Figura 4. Reparto por pauta de conducción del consumo energético del transporte por carretera

### 3. LÍNEAS GENERALES PARA LA CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

El sistema de transporte por carretera presenta diversas posibilidades para contribuir a la mejora de la eficiencia energética, lo que a su vez redundará en una mayor sostenibilidad y una reducción de los gases de efecto invernadero.

Refiriéndonos a los principales elementos a destacar para realizar esta contribución a la lucha contra el cambio climático, podemos organizarlos en varios grupos en función del concepto donde se engloban las acciones a realizar:

#### 3.1. Planificación de infraestructuras

Con la planificación de infraestructuras podemos realizar un diagnóstico y una prognosis que permitan programar las actuaciones necesarias y organizar los tráficos mediante una adecuada racionalización de la red.

Con ello se intentan evitar o reducir, entre otras cosas, las congestiones de tráfico que son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero.

#### 3.2. Diseño de infraestructuras

En el diseño de infraestructuras un elemento importante para la reducción de consumo energético y la disminución de emisiones es la reducción de las pendientes en las carreteras. La consecución de un trazado optimizado en este aspecto constituye una buena opción para conseguir nuestros objetivos dentro de las limitaciones que nos imponga la orografía del terreno.

#### 3.3. Construcción de infraestructuras

Durante la construcción de infraestructuras pueden emplearse técnicas y soluciones que contribuyan de una forma u otra a la sostenibilidad ambiental.

De entre estas soluciones podemos destacar:

- el reciclado de neumáticos para el firme, lo que supone un doble efecto por la puesta en valor de un residuo y el aumento de la durabilidad del pavimento
- la gestión y reutilización de los residuos de construcción, con un efecto evidente
- la iluminación eficiente e inteligente en infraestructuras lineales, ya sea usando las nuevas tecnologías en bombillas LED que rebajan enormemente el consumo con el mismo rendimiento, o programando la activación o desactivación de la iluminación en los correspondientes tramos en función de un horario, la intensidad de la luz natural, o incluso en función de la detección del paso de vehículos en tramos poco transitados. También es posible con la tecnología actual ajustar la intensidad de

cada luminaria a las circunstancias, atenuando la luz y por tanto el consumo, cuando no es necesaria una intensidad lumínica mayor

### 3.4. Explotación de infraestructuras

Existen varias posibilidades de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en cuanto a la explotación de las infraestructuras, si bien en general la mayoría tienen como objetivo la reducción del número de vehículos principalmente mediante el fomento del transporte público y la intermodalidad.

En este caso los beneficios pueden ser dobles ya que por un lado se reduce el número de vehículos circulando en relación con el número de viajeros, con lo que se reducen las emisiones y por otro lado se consigue una disminución de las congestiones al circular menos vehículos, con un efecto adicional de reducción de emisiones.

Entre ellas podemos destacar el uso de vías reservadas para transporte público o vehículos de alta ocupación, la implantación de intercambiadores de transporte, el empleo de aparcamientos disuasorios o la ubicación de paradas de autobús.

Obviamente en estos casos tiene una gran influencia una adecuada planificación en la que estén previstos estos elementos y donde además se contemplen los accesos a puertos y aeropuertos como puntos de intercambio intermodal.

Además de las medidas que tienen como objetivo la reducción del número de vehículos, otras tienen como objetivo la mejora de la eficiencia energética de los mismos. En el caso de zonas urbanas se puede llevar a cabo mediante la limitación de velocidad de los vehículos adaptándola a la velocidad óptima para favorecer la fluidez del tráfico, ya que si existen grandes diferencias de velocidad entre los vehículos puede resultar perjudicada esta fluidez.

### 3.5. Vehículos y combustibles

En cuanto a vehículos y combustibles las principales líneas de actuación para la reducción de emisiones son:

- el fomento del desarrollo tecnológico y de la venta de vehículos híbridos y eléctricos, con ayudas para su investigación y desarrollo tecnológico, incentivos para la compra por parte de los usuarios y para su uso la implantación de una red para recarga que al menos no suponga un inconveniente para los usuarios.
- promoción de vehículos eficientes en las flotas sometidas a concesión
- impuesto de matriculación en función de las emisiones de CO<sub>2</sub>
- el reciclado de vehículos al final de su vida útil
- el uso de biocarburantes

### 3.6. Gestión de la demanda de tráfico

De una forma ciertamente ligada a la explotación de las infraestructuras, otra forma de reducir las emisiones es mediante la gestión de la demanda de tráfico.

Una medida muy efectiva es el fomento del vehículo compartido (car pooling). Consiste en compartir el uso de un automóvil por dos o más personas, generalmente para viajar juntos durante las horas pico hacia el trabajo o un centro educativo. Generalmente todos los participantes son propietarios de un auto y alternan el uso de cada vehículo, economizando en gastos de viaje y contribuyendo a reducir la congestión de tránsito y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero.

Otra medida para la gestión de la demanda es la implantación de parquímetros en las ciudades, que supone un coste de estacionamiento para el usuario y un tiempo límite de estacionamiento que disuade a los viajeros a favor del transporte público o hacia evitar viajes que no son imprescindibles.

También el establecimiento de restricciones de tráfico y/o peajes para circular en ciertas zonas generalmente urbanas resulta útil para gestionar la demanda derivándola hacia el uso del transporte público o evitando viajes que no resultan imprescindibles.

### 3.7. Información sobre el tráfico

El hecho de proporcionar la adecuada información acerca del tráfico a los viajeros también puede producir una reducción de emisiones. En concreto los sistemas inteligentes de transporte y los sistemas de información sobre tráfico dan la posibilidad al viajero de optimizar los recorridos e incluso decidir los medios de transporte más adecuados. De esta forma pueden evitar las congestiones y además contribuyen a que éstas puedan resolverse en lugar de agravarlas.

Obviamente hay otros elementos para mejorar la sostenibilidad del transporte por carretera (reducción de la siniestralidad y los accidentes, disminución del ruido, medidas para reducir los efectos negativos de la fragmentación y ocupación del territorio, etc.) que no han sido citados porque no están relacionados directamente con el cambio climático.

## **4. REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DEL TRANSPORTE POR CARRETERA A TRAVÉS DE UN PLANEAMIENTO Y EXPLOTACIÓN EFICIENTES**

Para la previsión de emisiones futuras del sector del transporte por carretera los estudios de planificación se basan en las cifras oficiales y reales de:

- El parque automovilístico actual y previsto, distribuidos por categorías, tipos de combustibles y carga útil.
- La longitud y tipología de los tramos de la red de carreteras inicial y prevista en el PEIT 2005-2010
- Las velocidades medias de los diferentes tipos de vehículos por tramos, medidas y previstas con las actuaciones planificadas

- La intensidad media diaria (IMD) de tráfico en cada tramo de la red, y el consumo de combustible en función del tipo de vehículos (gasolina y gasoil), el tipo de viaje (interurbano, periurbano o urbano) y la edad de los mismos.

Las previsiones a 2020 sobre el parque automovilístico indican un rejuvenecimiento progresivo del mismo con una reducción del 30 por 100 de los vehículos ligeros de gasolina y un crecimiento del 80 por 100 del parque de gasoil, lo que hará que el porcentaje de los primeros pase del 61 por 100 en 2004 al 38 por 100 en 2020. No se ha considerado la posible irrupción de los coches eléctricos, previsible, sobre todo, en ámbitos urbanos.

La longitud media anual recorrida por cada vehículo en viajes interurbanos se mantiene constante y crecen los viajes urbanos y periurbanos, realizados por la parte del parque automovilístico más antigua y contaminante.

Los resultados de las previsiones realizadas indican que con las nuevas tecnologías de los vehículos será posible reducir las emisiones de monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, aumentando ligeramente las de óxidos de nitrógeno y significativamente las de CO<sub>2</sub>, que podrían llegar a crecer más de un 20 por 100 en 2020 si no se toman medidas para transferir tráfico a modos más eficientes o al transporte colectivo por carretera, sin tener en cuenta los cambios tecnológicos en los vehículos.

En el PEIT la mejora del comportamiento ambiental del transporte se articula en dos ámbitos: la disminución de los impactos globales del transporte (principalmente en lo referente al cambio climático) y la calidad ambiental en el entorno natural y urbano.

Para conseguirlo, se plantea un sistema integrado del transporte en un marco de complementariedad y coordinación entre los distintos modos y entre las infraestructuras y servicios competencia de distintas Administraciones y Organismos, y se busca la optimización en el uso de las infraestructuras existentes mediante medidas de gestión de la demanda, que en lo referente a la carretera se concretan en:

- Mejora de los accesos y servicios de transporte público a las terminales de los diferentes modos.
- Construcción de vías reservadas para el transporte público y vías de alta ocupación.
- Dotación de aparcamientos disuasorios en las estaciones de ámbito metropolitano.
- Gestión del tráfico para reducir los consumos energéticos.
- Modernización y renovación de flotas de vehículos.

Establecido el marco de la planificación eficiente del transporte por carretera en el Plan Estratégico, en la fase de planeamiento (el cómo conseguirlo) se ha actuado a través de la consideración de la influencia del diseño y la explotación en la reducción de las emisiones contaminantes. Para ello se ha desarrollado una metodología específica que tiene en cuenta, en la fase de estudios de alternativas de actuación, las emisiones generadas por las distintas soluciones planteadas.

La metodología desarrollada permite analizar los factores más determinantes en las emisiones de los distintos gases considerados, con el objeto de poder evaluar las posibles actuaciones que, durante la fase de estudio (planeamiento y proyecto) permiten reducirlos

Las variables que se tienen en cuenta son el entorno, el tipo de carretera, la sección transversal, los accesos, la velocidad de proyecto, las rasantes, las distancias de adelantamiento, etc.

Además, la metodología aplicada también permite analizar los factores que determinan estas emisiones durante la fase de explotación: intensidad de tráfico, tipos de vehículos, velocidades de circulación, etc.

La metodología aplicada se basa en los proyectos COPERT 4 y ARTEMIS de la Agencia Europea de Medio Ambiente, en la que cada tipo de vehículo tiene asignada una fórmula para calcular las emisiones de cada contaminante en función de la velocidad media de recorrido, que se establece a través del Manual de Capacidad Americano (HCM 2000) en la fase de estudio y con datos reales de mediciones de velocidad con coche flotante en la fase de explotación.

Para calcularlas se determinan las características del proyecto o las medidas de explotación que disminuyen en mayor medida la cantidad de emisiones de cada gas. Con ello es posible incluir esta variable en los análisis multicriterio de selección de alternativas.

Así pues, factores como la inclinación de la rasante, el número de carriles y su anchura, los arcones, la velocidad de proyecto, la limitación de velocidad, etc. influirán de manera significativa en las emisiones de gases contaminantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{PM}$ ).

De las experiencias realizadas con autopistas en entornos interurbanos se deduce que la disminución de la velocidad de proyecto no influye prácticamente en las emisiones de  $\text{CO}_2$  y por tanto no puede considerarse una medida útil para dicho objetivo en este tipo de vías.

En cambio, permitir inclinaciones de rasante más elevadas (hasta el 6 por 100) se traduce en incrementos superiores al 50 por 100 en las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , debido al mayor consumo de carburante por aumento de la potencia necesaria y a pesar de la disminución de la velocidad.

En entornos urbanos la reducción de la anchura de los carriles de circulación también supone un importante ahorro de emisiones, sobre todo en  $\text{NO}_x$ . Con ello se puede reducir la velocidad de paso de los vehículos si esta es demasiado alta, consiguiendo así una reducción de emisiones sin menoscabar la capacidad, que incluso puede verse beneficiada si dicha velocidad se aproxima al óptimo de capacidad. Además, con la reducción de la anchura de los carriles (hasta 3 m), se puede aprovechar para aumentar su número, lo que además de una mejora de la capacidad reporta también otras mejoras, como la disminución del nivel de ruido.

En las autopistas de accesos urbanas la construcción de carriles BUS-VAO es la medida más eficaz de las analizadas pues puede permitir una reducción de más del 80 por 100 en  $\text{CO}_2$ , considerando que no se produce una inducción de nuevos tráficos de vehículos privados y que la transferencia de viajeros al transporte colectivo permita resolver la congestión existente.

En la fase de explotación la implantación de un sistema de señalización dinámica, para la reducción de la velocidad en función de las condiciones del tráfico, permite reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  en aproximadamente un 30 por 100 y las de  $\text{NO}_x$  en un 40 por 100.

Las restricciones de tráfico de vehículos pesados también consiguen reducciones significativas de las emisiones, que pueden superar el 20 por 100 en CO<sub>2</sub>.

En los estudios informativos que se realizan en la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento para comparar alternativas de trazado para un determinado tramo o itinerario de carretera también se ha utilizado el cálculo de emisiones como una variable más del método multicriterio, que analiza variables económicas, ambientales, funcionales y territoriales.

Los resultados indican que, en general, no suelen existir grandes diferencias entre las alternativas desde el punto de vista de las emisiones, al tener unas características similares, siendo sus diferencias de longitud el factor más determinante. No obstante, aunque los valores absolutos suelen ser parecidos, si existen diferencias que pueden llegar al 20 por 100 en CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

Así, la reducción de la inclinación de la rasante, la disminución de la anchura de calzada y carriles en zonas urbanas y la creación de carriles BUS-VAO son las actuaciones más interesantes desde el punto de vista de la disminución de las emisiones contaminantes siendo, dentro de éstas, las de NO<sub>x</sub> las que son más sensibles y en segundo lugar las de CO<sub>2</sub>.

## **5. APLICACIONES CONCRETAS QUE REDUCEN EL IMPACTO DE LAS CARRETERAS EN EL CAMBIO CLIMÁTICO**

El principio de sostenibilidad va aumentando día a día su protagonismo en todo el mundo y en todos los campos, siendo lógicamente las carreteras uno de ellos. El objetivo es buscar el menor coste global posible en los tres aspectos en los que se sustenta conceptualmente el desarrollo sostenible: el social, el económico y el ambiental.

En la apuesta por la construcción sostenible de las infraestructuras de carreteras, es necesario combinar las actuaciones en varias líneas a la vez: el impulso del uso racional de recursos y materiales, el desarrollo de nuevas tecnologías y la mejora de la durabilidad global.

Como materiales y tecnologías directamente relacionadas con la sostenibilidad en la pavimentación, se están impulsando desde la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento las siguientes:

- Empleo de Polvo de Neumáticos Fuera de Uso (PNFU) en ligantes y mezclas bituminosas
- Reciclado de firmes
- Mezclas bituminosas templadas y semicalientes
- Microaglomerados en frío

### **5.1. Empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en ligantes y mezclas bituminosas**

En relación con el polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU), y siguiendo lo dispuesto en el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de diciembre de 2008, las Administraciones Públicas deben fomentar el

uso del PNFU, en las obras públicas y en particular, en las mezclas bituminosas para la construcción de carreteras, siempre que sea técnica y económicamente posible.

Los tramos experimentales construidos y la experimentación llevada a cabo en los últimos años han hecho posible el desarrollo de normativa técnica específica que ha sido clave en el impulso de esta tecnología, ya que en ella se definen distintos procedimientos, se establecen los criterios y campos de aplicación y se prioriza su empleo siempre que sea técnica y económicamente posible, desarrollando de esta manera lo establecido en el marco legal antes mencionado.

Se definen dos tipos de procedimientos:

- **VÍA HÚMEDA:** que consiste en la mezcla a alta temperatura de PNFU con betún de penetración en una planta de fabricación de betunes modificados o en instalaciones in situ ubicadas en la misma planta de fabricación de mezcla bituminosa.

Con este procedimiento se definen en la normativa tres tipos nuevos de betunes y se establecen las especificaciones que tienen que cumplir. Estos tres nuevos tipos son:

- betunes mejorados con caucho
  - betunes modificados con caucho
  - betunes de alta viscosidad con caucho.
- **VÍA SECA:** que consiste en la incorporación del polvo de caucho de PNFU directamente en la amasadora de mezcla bituminosa como si se tratara de un árido mineral. Al producto que se obtiene se le denomina en la normativa española mezcla bituminosa en caliente con adición de caucho

A través de los distintos tipos de aplicaciones se genera un consumo muy significativo de neumáticos fuera de uso en los firmes de nuestras carreteras, especialmente con los betunes mejorados con caucho para los que se establecen las mismas condiciones y capas que en los betunes de penetración habituales.

Estos betunes mejorados con caucho, respecto de un betún de penetración del mismo grado, proporcionan una mayor temperatura de reblandecimiento, una mejora de la susceptibilidad térmica, mayor viscosidad y un aumento de la recuperación elástica.

Las mezclas bituminosas fabricadas con ellos siguen los mismos sistemas de formulación, fabricación y ejecución y presentan como propiedad diferencial más destacable una mejora de la resistencia frente a deformaciones plásticas.

En cuanto a otras propiedades de las mezclas, parece que mejora la resistencia a fatiga, aunque este es un aspecto sobre el que se sigue investigando, los valores de módulos son algo inferiores, y la sensibilidad al agua y las características superficiales de las mezclas son similares.

En resumen, el estado actual de la técnica permite su empleo de manera generalizada en las obras, lo cual, no solo supone la reutilización de un residuo si no que también mejora la durabilidad del pavimento, incidiendo, por tanto, en dos aspectos complementarios de la sostenibilidad

## 5.2. Reciclado de pavimentos asfálticos y de hormigón

También en relación con el uso racional de los recursos, hay que destacar el aprovechamiento de los materiales de la propia carretera, que por envejecimiento han llegado al final de su vida útil y es necesario retirar y reponer mediante actuaciones de rehabilitación estructural y superficial del firme.

Aunque las distintas técnicas de reciclado están recogidas en la normativa técnica del Ministerio de Fomento desde el año 2001, no ha llegado todavía a generalizarse su empleo, y las estadísticas sobre tasas de reciclado muestran valores muy por debajo de las posibilidades.

La normativa técnica actual incluye pliegos de prescripciones técnicas generales específicos para tres técnicas diferentes de reciclado de firmes: reciclado con cemento, reciclado en frío con emulsión y reciclado de mezclas bituminosas en caliente.

La norma de rehabilitación de firmes establece los criterios y campos de aplicación para cada una de estas técnicas y obliga a realizar un estudio técnico y económico sobre los materiales reciclados de firmes.

Además de esta normativa específica de reciclado, no hay que olvidar la posibilidad de incluir en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente hasta un diez por ciento de mezcla bituminosa procedente del fresado de la carretera como si se tratara de un árido más. Esta práctica, aunque con una tasa baja de reciclado, proporciona un método sencillo e inmediato de aprovechar los residuos procedentes del fresado de las capas envejecidas de la carretera, con adaptaciones muy sencillas en la planta asfáltica y sin necesidad en general de realizar estudios especiales de la formulación de la mezcla.

En definitiva, las técnicas de reciclado de firmes cobran cada vez mayor relevancia. Por una parte por el incremento de obras de conservación frente a las de nueva construcción, y por otra por el protagonismo creciente del principio de sostenibilidad en la construcción que conduce necesariamente tanto a la disminución de generación de residuos como a la de consumo de recursos naturales.

El estado actual de la tecnología permite la aplicación de varias técnicas de reciclado, con distintas aplicaciones y tasas de reciclado. Es necesario ahora promover la generalización de su empleo en todas las obras, por lo que desde el año 2009, se está incluyendo en la redacción de los proyectos de rehabilitación estructural y superficial de firmes la obligación de especificar el aprovechamiento que se da a todo el material fresado del firme empleando técnicas de reciclado en frío o en caliente.

## 5.3. Aplicación de mezclas bituminosas semicalientes y templadas

Dentro del desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con la sostenibilidad, tiene también gran relevancia el impulso del empleo de mezclas bituminosas en las que las temperaturas de fabricación y puesta en obra son sensiblemente menores que las necesarias para las mezclas bituminosas en caliente convencionales. De esta manera se

reduce el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> y se mejoran las condiciones de seguridad y salud en las obras viales.

Este tipo de tecnologías se clasifican en dos grupos en función de la temperatura de fabricación:

- las mezclas semicalientes fabricadas y puestas en obra por encima de los 100 °C (a unos 20 a 30°C menos que las mezclas convencionales)
- las mezclas templadas que se fabrican y ponen en obra por debajo de 100°C.

Para ambos tipos existen varias alternativas de procedimientos y materiales para conseguir la reducción en la temperatura.

Aunque todavía no se ha establecido una normativa específica se han llevado a cabo varios tramos experimentales y hay un interés creciente en aumentar la experiencia e impulsar estas tecnologías.

#### 5.4. Microaglomerados en frío

Por último como tecnología de pavimentación relacionada con la sostenibilidad aunque no novedosa, no hay que olvidar el papel de los microaglomerados en frío en la rehabilitación superficial.

Aprovechando la revisión de las prescripciones técnicas sobre esta unidad de obra, motivada por la entrada en vigor de la normativa europea, se quiere impulsar y destacar la función de los microaglomerados en frío para la mejora del CRT (coeficiente de rozamiento transversal) y de la macrotextura, mejorando la calidad de sus materiales y de las técnicas de ejecución.

Como conclusión, contamos con varias tecnologías de pavimentación relacionadas con la sostenibilidad. Es necesario impulsar y generalizar el empleo sobre las que ya se tiene una experiencia suficientemente contrastada y proseguir con la investigación, el desarrollo y la innovación de las que todavía están en fase menos avanzada.

Por último, además de las técnicas ya mencionadas, es necesario seguir avanzando también en la investigación de pavimentos de baja sonoridad acordes con los actuales requerimientos de la sociedad y como un nuevo reto hacia el futuro, en los firmes de larga duración, pues durabilidad y sostenibilidad están directamente relacionadas.