



# Evaluación del impacto de los vehículos pesados de transporte de mercancías tipo T2S3 al pasar de 40 a 44t de M.M.A.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Departament d'Infraestructura del Transport  
i del Territori





## Un estudio realizado por:



## Equipo redactor:

Dr. José Magín Campos Cacheda

Dra. Adriana Haydee Martínez Reguero



# Índice

<b>1</b>	Introducción y objetivos	4
<b>2</b>	Resumen ejecutivo	4
2.1	Determinación del nivel de agresividad sobre los pavimentos	4
2.2	Determinación del volumen de tráfico que opera en España en vehículos pesados de más de 40 t de m.m.a. y estimación del potencial de uso de vehículos pesados con una m.m.a. de 44 t	7
2.3	Estimación del incremento de abrasión sobre los firmes provocados por el cambio vehículos pesados con una m.m.a. de 44 t	13
2.4	Estimación de la variación de los costes de mantenimiento de los firmes	14
2.5	Aumento de la productividad de los vehículos	16
2.6	Impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero	16
2.7	Impacto económico	18
<b>3</b>	Determinación del volumen de tráfico que opera en España en vehículos pesados de más de 40 t de m.m.a. y estimación del potencial de uso de vehículos pesados con una m.m.a. de 44 t	20
<b>4</b>	Evaluación del aumento de agresividad de los vehículos pesados tipo t2s3 y t3s3 al pasar de 40 a 44t de carga sobre los firmes de carreteras españolas	43
<b>5</b>	Impactos y costes sobre la infraestructura	56

# 1 Introducción y objetivos

La capacidad de carga de mercancía de los vehículos de transporte es un factor esencial de los costes de transporte. La legislación se ha ido acomodando a las necesidades de transporte de las empresas de forma que los pesos y dimensiones máximas autorizadas han ido aumentando progresivamente a lo largo de los años. La Directiva Europea 96/53/CE establece el peso y las dimensiones máximas de los vehículos de transporte de mercancías en el tráfico internacional. Sin embargo establece que los Estados miembros pueden autorizar la circulación en su territorio de vehículos destinados al transporte nacional de mercancías que no se ajusten a las dimensiones y pesos en ella indicados. En España el 83% de las mercancías transportadas (en toneladas) corresponde a transporte interior. Varios países europeos han hecho uso de esta facultad y han introducido las regulaciones para el uso de nuevas capacidades de transporte.

El transporte de mercancía con vehículos con una masa de 44 toneladas o superior están permitidos con carácter general en numerosos países de la UE mediante vehículos de cinco ejes (tractoras de 2 ejes y semirremolques de 3 ejes –T2S3). En otros países está permitido el transporte con vehículos T2S3 con MMA de 42 toneladas con carácter general. En España las 44 toneladas con 5 ejes sólo están permitidas con tractora de 3 ejes (T3S2, T3S3) para el transporte combinado, con contenedor ISO de 40 pies, y con la limitación de 150 km.

El presente estudio pretende analizar de forma cuantitativa el impacto del aumento de la MMA (Masa Máxima Autorizada) a 44 toneladas en España para los vehículos T2S3, comúnmente utilizados en el transporte, en los apartados:

- Potencial de uso de las 44 tn.
- Impacto en el desgaste de los firmes de las infraestructuras.
- Impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Impacto económico.

El conocimiento de estos datos pretende facilitar a los responsables de la regulación del transporte de mercancías, a los usuarios y a operadores del transporte, el realizar un análisis objetivo de los beneficios e impactos que la introducción de esta medida comportaría en España.

## 2 Resumen ejecutivo

### 2.1 Determinación del nivel de agresividad sobre los pavimentos

Se ha determinado el efecto del aumento de carga al pasar de 40 a 44t en los vehículos pesados tipos T2S3 y T3S3, sobre todas las firmes de carreteras definidos por la Norma 6.1 IC Secciones de firme, Orden Ministerio de Fomento 3460/2003.

#### Metodología

La metodología de trabajo ha consistido en el cálculo del estado tensional de las distintas estructuras de firmes analizadas, producido por las cargas por eje de los vehículos pesados tipos T2S3 y T3S3, considerando diferentes configuraciones de carga (40, 42 y 44t). Los parámetros determinados han sido la deformación tangencial máxima en la fibra inferior de las capas de mezclas bituminosas  $\epsilon_h$  y la tensión tangencial máxima en la fibra inferior de las capas tratadas con cemento  $\sigma_h$ . Ambos parámetros han permitido evaluar la agresividad de cada uno de los vehículos pesados sobre las distintas estructuras de firme evaluadas.

Para determinar estos parámetros se ha utilizado el software BISAR 3.0: Bitumen Stress Analysis in Roads, desarrollado por la empresa SHELL.

La agresividad de cada camión se ha calculado a partir del daño causado por el paso de sus ejes sobre una capa del firme. La agresividad de un vehículo pesado AVP es la suma de las agresividades de cada uno de sus ejes. Se ha considerado como eje de referencia un eje simple con ruedas gemelas de 13 toneladas de peso total.

### Hipótesis de cálculo

Estructuras: se han analizado todas las secciones de firmes flexibles y semirrígidos del catálogo de la Norma 6.1 IC (2003), abarcando desde la categoría de tráfico T00 (la más alta) hasta la categoría de tráfico T42 (la más baja), sobre las tres categorías de explanada disponibles: E1, E2 y E3. Como firmes semirrígidos se han contemplado sólo las secciones de mezcla bituminosa sobre suelo-cemento, tipificadas para todas las categorías de tráfico.

Adherencia entre capas: total

Vehículos pesados: se han analizado dos tipos de vehículos pesados, uno tipo T2S3 con 15.5 t (vacío), 40, 42 y 44 t, y uno tipo T3S3 con 44t (cargados).

Vehículo tipo T2S3, formado por:

- Eje simple, rueda simple
- Eje simple, ruedas gemelas
- Eje tridem, ruedas simples o gemelas

Vehículo tipo T3S3, formado por:

- Eje simple, rueda simple
- Eje tándem, ruedas gemelas
- Eje tridem, ruedas simples o gemelas

Con ambos tipos de vehículos pesados se han analizado los efectos de sus ejes considerando en primer lugar los ejes tridem con ruedas simples y en segundo lugar, después de haber determinado las secciones más críticas para la primera hipótesis, los ejes tridem con ruedas gemelas.



Figura 1. Configuración de ejes de los vehículos pesados T2S3 y T3S3.

Cargas por eje, presiones de contacto y radio de la huella:

- Carga máxima admisible por eje motor: 11,5t.
- Carga máxima permitida por eje tandem: 16t (separación entre ejes superior a 1 m e inferior a 1,30 m), ó 18t (distancia entre ejes igual o superior a 1,30 m e inferior a 1,80 m).
- Carga máxima permitida por eje tridem: 21t (distancia entre ejes igual o inferior a 1,30 m), 24t (distancia entre ejes superior a 1,30 m e inferior o igual a 1,40 m).
- Presiones de contacto: 0,662 MPa para ejes simples, tándem y tridem con ruedas gemelas, y 0,700 MPa para los ejes tridem con ruedas simples.
- Radio de la huella del neumático: manteniendo la presión de contacto del neumático sobre el pavimento, se ha calculado el radio del círculo con área equivalente a la de contacto.

En el presente estudio, al sobrecargar los ejes para simular el efecto de 42t y 44t, se han superado los valores máximos admisibles de carga por eje descritos en los párrafos precedentes. Por esta razón, en el caso de permitirse la circulación de vehículos pesados tipo T2S3 con 42 y 44t, debería modificarse la reglamentación vigente relativa a las cargas máximas permitidas.

Coefficiente  $\alpha$  para el cálculo de la agresividad: se han considerado dos hipótesis, la propuesta por SETRA, de 5 para los materiales bituminosos y 12 para los tratados con cemento (que denominaremos Hipótesis A), y la propuesta por las normas de secciones de firme de la Comunidad Valenciana, de 4 y 8 respectivamente (que denominaremos Hipótesis B).

**Resultados del cálculo del coeficiente de agresividad – Hipótesis A ( $\alpha$  igual a 5 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 12 para las capas de suelo-cemento)**

En primer lugar se procedió a realizar una serie de cálculos de tanteo para confirmar las tendencias del coeficiente de agresividad de los distintos vehículos pesados. Así se pudo comprobar que:

- Los resultados de la agresividad de los vehículos sobre las secciones de firme apoyadas sobre una explanada tipo E2 siempre arrojan valores intermedios a los obtenidos para las secciones de firme apoyadas sobre explanadas tipo E1 y E3. Por tanto, se decidió concentrar los cálculos para las explanadas de mínima y máxima capacidad soporte, E1 y E3.
- Los resultados de la agresividad de los vehículos pesados sobre las secciones de firmes para una misma categoría de explanada también muestran tendencias crecientes de agresividad a medida que la categoría de tráfico pesado se reduce; por ello se ha decidido simplificar los cálculos y aplicarlos a las secciones de firme para las categorías de tráfico T00, T1, T31 y T41.

A modo de resumen, se presenta una tabla donde se han recogido los valores mínimos, medios y máximos de los cocientes entre los coeficiente de agresividad, calculados para cada categoría de tráfico pesado analizada y con cada vehículo pesado (Tabla 1).

	Mínimo	Medio	Máximo
T2S3 15,5 t / T2S3 40t	0,02	0,20	0,32
T2S3 42 t / T2S3 40 t	1	1,29	1,76
T2S3 44 t / T2S3 40 t	1	1,74	3,06
T3S3 44 t / T2S3 40 t	0,13	0,53	1,15

Tabla 1. Resumen de los cocientes entre los coeficientes de agresividad. Hipótesis A.

**Resultados del cálculo del coeficiente de agresividad – Hipótesis B ( $\alpha$  igual a 4 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 8 para las capas de suelo-cemento)**

A modo de resumen, se presenta una tabla donde se han recogido los valores mínimos, medios y máximos de los cocientes entre los coeficiente de agresividad, calculados para cada categoría de tráfico pesado analizada y con cada vehículo pesado para esta hipótesis B (Tabla 2) .

	Mínimo	Medio	Máximo
T2S3 15,5 t / T2S3 40t	0,09	0,27	0,36
T2S3 42 t / T2S3 40 t	1	1,19	1,45
T2S3 44 t / T2S3 40 t	1	1,43	2,09
T3S3 44 t / T2S3 40 t	0,26	0,60	1,12

Tabla 2. Resumen de los cocientes entre los coeficientes de agresividad. Hipótesis B.

### Conclusiones de la determinación del nivel de agresividad sobre los pavimentos

Del estudio realizado y bajo las hipótesis de cálculo que se han ido realizando a lo largo del mismo, se desprende que cuando la carga del vehículo pesado pasa de 40 a 44t, considerando el eje tridem configurado con ruedas simples, se produce una variación de la agresividad superior en los firmes semirrígidos que sobre los firmes flexibles, cuyos valores quedan comprendidos entre los de aquéllos. En el caso de que el eje tridem se configure con ruedas gemelas, se reducen los aumentos de agresividad más elevados.

Todos estos valores dependen tanto de la sección de firme considerada como de la capa en la que se produce el fallo. En general, cuando se calculan los coeficientes de agresividad de cada configuración de carga respecto al eje tipo, las secciones más críticas corresponden a las categorías de tráfico más bajo, por tanto, de menor espesor.

Estos valores son muy dependientes de los coeficientes  $\alpha$  considerados. De esta manera, la hipótesis B (con valores españoles) es más favorable que la hipótesis A (con valores franceses).

## 2.2 Determinación del volumen de tráfico que opera en España en vehículos pesados de más de 40 t de M.M.A. y estimación del potencial de uso de vehículos pesados con una M.M.A. de 44 t

### Volumen del tráfico de vehículos pesados en España

Para el análisis de la distribución de tráfico de los vehículos pesados de mercancías que operan en España se ha procedido al tratamiento de los datos contenidos en la Encuesta Permanente de Transportes de Mercancías por Carretera (EPTMC) referidos al año 2011, al ser éste el último año del que se tenían datos pormenorizados.

A partir del análisis de los datos individuales se han obtenido los siguientes resultados para el transporte total de mercancías por carretera en España:

toneladas	1.466.501.644
toneladas-kilómetro	206.839.878.701
Operaciones globales (Op.G.)	200.825.340
Operaciones con carga (Op.C.)	110.407.659
% de retornos en vacío	45,02 %
vehículos-kilómetro globales	19.047.840.830

Tabla 3. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Tal y como se explica en la propia EPTMC 2011, durante el año 2011 se produjo una caída del 8,4 % en las operaciones, del 6,4 % en las toneladas y del 1,5 % en las toneladas-kilómetro. Estos descensos son similares a los registrados en 2010, si bien algo inferior en toneladas, ya que en ese año la caída fue del 8,5 %. No podemos proveer el dato de la variación de los vehículos-kilómetro totales por no disponer de los datos individualizados de 2010.

Entre los datos recogidos en la EPTMC 2011 se encuentra la tipología de mercancías transportadas, codificadas según los grupos de códigos NST 2007, que se pueden consultar en la tabla siguiente. Esta información se ha utilizado para disgregar los datos generales en todos los cálculos empleados.



CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
01	Productos de la agricultura, la ganadería, la caza y la silvicultura; pescado y otros productos de la pesca
02	Hulla, antracita y lignito; petróleo crudo y gas natural
03	Minerales metálicos y otros minerales y productos de la minería; turba; uranio y torio
04	Productos alimenticios, bebidas y tabaco
05	Productos de la industria textil y de la confección; cuero y productos de cuero
06	Productos de madera y corcho (excepto muebles); artículos de cestería y espartería; pasta de papel, papel y productos de la industria del papel; edición, artes gráficas y material grabado
07	Coque y productos de petróleo refinado
08	Productos químicos y fibras artificiales y sintéticas; productos de caucho y plásticos; combustible nuclear
09	Otros productos minerales no metálicos
10	Metales básicos; productos metálicos, excepto maquinaria y equipo
11	Maquinaria y equipo mecánico n.c.o.p.; maquinaria de oficina y equipo informático; maquinaria y material eléctrico n.c.o.p.; equipos y aparatos de radio, televisión y comunicaciones; equipo e instrumentos médico-quirúrgicos, de precisión y ópticos; relojería
12	Material de transporte
13	Muebles; otros artículos manufacturados n.c.o.p.
14	Materiales secundarios en bruto; residuos municipales y otros residuos
15	Correo, paquetes
16	Equipos y materiales utilizados en el transporte de mercancías
17	Mercancías trasladadas durante mudanzas privadas y profesionales; equipaje y artículos que acompañan a los viajeros; vehículos de motor trasladados para su reparación; otros bienes no de mercado n.c.o.p.
18	Mercancías agrupadas: distintos tipos de mercancías transportadas conjuntamente
19	Mercancías no identificables: mercancías que por cualquier razón no pueden identificarse y no pueden, por tanto, clasificarse en los grupos 01 a 16.
20	Otros artículos n.c.o.p.
98	Vehículo vacío

Tabla 4. Grupos de códigos NST 2007. Fuente: EPTMC 2011.

Una vez establecido el marco de referencia global del transporte de mercancías por carretera en España, se ha pasado al análisis de la cuota de mercado de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes.

De esta manera, se han establecido los parámetros básicos del transporte por carretera para dicha tipología de vehículos (operaciones, toneladas, toneladas-kilómetro y vehículos-kilómetro) por tipo de mercancía transportada. También se ha determinado el porcentaje respecto al global del transporte por carretera que supone la participación de este tipo de vehículos para cada uno de los parámetros analizados.

La contribución de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes es muy significativa, resultando en un 58 % del total de las toneladas transportadas, un 79 % de las toneladas-kilómetro realizadas, un 38 % de las operaciones de transporte y un 63 % de los vehículos-kilómetro recorridos.

En estos resultados están agregados los datos relativos a los vehículos con autorización de circulación con una M.M.A. de 40 t, los correspondientes a vehículos con autorización de circulación con una M.M.A. de 42 t y los de los vehículos con autorización de circulación con una M.M.A. de 44 t. Para realizar posteriormente los análisis de la repercusión de autorizar el incremento de la M.M.A. desde 40 t a 44 t se han disgregado los datos correspondientes a cada categoría de vehículos.

En este caso, la mayor participación en el transporte de mercancías por carretera corresponde a los



vehículos pesados de 40 t de M.M.A. con un 57 % del total de las toneladas transportadas, un 77 % de las toneladas-kilómetro realizadas, un 37,5 % de las operaciones de transporte y un 61 % de los vehículos-kilómetro recorridos. Los valores obtenidos para los vehículos pesados de 42 t de M.M.A. y 44 t de M.M.A. muestran una baja participación en el total del transporte de mercancías realizado por carretera en España (valores en torno al 1 % para los primeros y en torno al 0,2 % para los segundos).

Atendiendo al análisis sectorial en función de la variable vehículos-kilómetro para dichos vehículos de 40 t de M.M.A. podemos apreciar cómo destacan los sectores Productos alimenticios, bebidas y tabaco, con un 15 % del total, Productos de la agricultura, la ganadería, la caza y la silvicultura; pescado y otros productos de la pesca con un 13 % del total, Correo, paquetes con un 7 % del total y Productos químicos y fibras artificiales y sintéticas; productos de caucho y plásticos; combustible nuclear con un 6 % del total.

#### Estimación del trasvase de mercancía a vehículos pesados de mercancías de 44 t de M.M.A.

A partir del análisis de los datos individuales de la EPTMC 2011 se ha determinado el valor medio de la tara de los vehículos pesados de mercancías, con lo que podemos establecer la capacidad máxima de carga de los vehículos pesados de 40 t y de 44 t, el incremento de productividad en cada viaje sustituyendo el vehículo de 40 t por uno de 44 t (ambos a carga completa), y la disminución del número de vehículos asociada a dicha sustitución de vehículos pesados de 40 t por los de 44 t.

M.M.A.	tara	capacidad de carga	inc cap	% inc cap	% reducción veh
40	15,5	24,5			
42	15,5	26,5	2	8,16	7,55
44	15,5	28,5	4	16,33	14,04

Tabla 5. Capacidad de carga de los vehículos pesados de 40 t, 42 y 44 t, incremento de la capacidad de carga y reducción del nº de vehículos asociada. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Como hemos visto anteriormente, a tenor de los datos analizados, en el sector del transporte de mercancías se ha ido produciendo un cambio progresivo hacia el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes. Por este motivo la posible captación de flujos de tráfico desde otras categorías inferiores se antoja complicada, debido a la continuada implantación de los vehículos de 40 t o más de M.M.A.

De este modo podemos afirmar que el potencial de uso de los vehículos pesados de mercancías de 44 t pasa por el trasvase de mercancías de vehículos pesados de mercancías de 40 t que están circulando a capacidad completa o a un porcentaje muy elevado de dicha capacidad.

El valor de captación de tráfico de los vehículos autorizados para circular a 44 t depende de la posibilidad de trasvasar cargas que agoten la capacidad del vehículo en peso sin limitaciones del volumen asociado a dichas cargas. De los datos recogidos en la EPTMC no se puede establecer cuáles son las cargas que presentan una limitación en peso o en volumen para su transporte en camión, pero podemos comprobar cuáles son las cargas que, a día de hoy, sí agotan la capacidad de carga (100 % en peso) de los vehículos pesados de transporte de mercancías de 40 t de M.M.A. Dichas categorías son las susceptibles de no limitar en volumen la carga del vehículo y, por lo tanto, son las susceptibles de ser traspasadas a vehículos de mayor M.M.A.

Se han considerado sólo aquellas categorías que presentan un porcentaje representativo respecto al total de operaciones realizadas, eliminando aquellas que tienen valores inferiores al 1 %. De esta manera obtenemos que los tipos de mercancía susceptibles de trasvasarse a vehículos de 44 t de M.M.A. son: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 y 14. De la bondad de esta consideración nos avalan los análisis realizados a los vehículos con porcentajes de ocupación en peso comprendidos entre el 90 y el 100 %, y entre el 80 y el 90 % que nos da las mismas categorías de mercancías limitadas en peso.

En la captación de mercancía a transportar desde vehículos pesados de mercancías de 40 t que están circulando a capacidad completa tenemos que tener en cuenta que existen una serie de restricciones que impedirán a priori el traspaso completo de toda la mercancía movida por este tipo de vehículos. Por un lado tenemos las restricciones internacionales. Mientras no exista una normativa europea armonizada en este tema no será posible que circulen los vehículos de 44 t de M.M.A. de forma general entre los países europeos, lo cual retrasará la implantación de uso de este tipo de vehículos en esta categoría de tráfico, que según la EPTMC 2011 supone un 2,9 % del total de las operaciones de transporte que se realizan en España. También hay que tener en cuenta que ciertos tipos de vehículos no están preparados para la implantación de este incremento de M.M.A. (como por ejemplo los vehículos cisterna), por lo que dicha implantación será mucho más progresiva. Por otro lado hay que tener en cuenta que existirán unas restricciones a la implantación de dicho incremento de M.M.A. a vehículos que cumplan con la normativa europea de emisiones, que puede ser más o menos restrictiva según el ámbito de aplicación, aunque en principio podemos intuir un nivel mínimo de exigencia Euro 3 o Euro 4, lo cual limita el parque inicialmente disponible. Por todos estos motivos se han determinado dos escenarios de implantación del incremento de M.M.A. a 44 t: el escenario A, en el cual la captación de mercancías sobre los vehículos pesados de mercancías de 40 t que están circulando a capacidad completa es del 80 %, y el escenario B, en el cual dicha captación llega al 100 %.

Por otra parte se ha tenido también en cuenta la posibilidad de trasvase de mercancías desde vehículos que no circulen actualmente agotando su capacidad de carga en peso, pero que presenten un valor elevado de uso de dicha capacidad. De esta manera se han analizado los valores correspondientes a vehículos que circulan con una ocupación de entre el 80 y el 90 % de su capacidad en peso y para vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 %. Establecer un valor de traspaso de la mercancía transportada por estas categorías de vehículos es complicado, pero atendiendo a estudios similares realizados anteriormente podemos admitir como plausible una captación de mercancía transportada de un 15 % en el escenario A y un 30 % en el escenario B de los vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 % de su capacidad en peso y despreciar el traspaso de mercancía de los vehículos que circulan con ocupaciones inferiores.

	Escenario A	Escenario B
Ocupación 90-100%	15%	30%
Ocupación 100%	80%	100%

Tabla 6. Porcentaje de captación de los vehículos de más de 40 t de M.M.A. de cada categoría de vehículos de 40 t de M.M.A. para cada escenario.

A partir de estos valores de captación de mercancías sobre los vehículos pesados de mercancías de 40 t se han establecido también unos porcentajes de uso de los vehículos pesados de mercancías de 42 y 44 t, teniendo en cuenta que no todos los vehículos pesados de mercancías de 40 t pasarán directamente a una carga completa que agote la capacidad del vehículo, sino que habrá una implementación progresiva hacia vehículos con una M.M.A. de 42 t y otros con una M.M.A. de 44 t.

De esta manera, en el escenario A, los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 % se reparten en un 33 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42t y un 67 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44t. Igualmente, en el escenario A, los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación del 100% de su capacidad en peso se reparten en un 25 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 75 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44t.

Para el escenario B los valores son similares, considerando que los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 % se reparten en un 33 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 67 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44 t. De igual manera, en el escenario B, los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación del 100 % de su capacidad en peso se reparten en un 30 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 70 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44 t.

	Escenario A		Escenario B	
	Veh 42 t.		Veh 44 t.	
Ocupación 90-100%	33%	67%	33%	67%
Ocupación 100%	25%	75%	30%	70%

Tabla 7. Porcentaje de captación de los vehículos de 42 y 44 t de M.M.A. de cada categoría de vehículos de 40 t de M.M.A. para cada escenario.

Aplicando los porcentajes mencionados a cada escenario se obtiene la captación de flujos de mercancías por parte de los vehículos pesados de mercancías de 42 y 44 t de M.M.A. desde los vehículos pesados de mercancías de 40 t de M.M.A. que están circulando a capacidad completa o a un porcentaje muy elevado de dicha capacidad. Esta captación de tráfico se corresponde con un 14,14 % en el escenario A y un 18,84 % en el escenario B del global de los veh-km con carga realizados por todos los vehículos pesados de mercancías que circulan en España. Respecto a los veh-km de los vehículos con una M.M.A. de 40 t, el escenario A supone una captación del 21,93 % y el escenario B supone una captación del 29,22 %.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que dicha captación de tráfico por parte de los vehículos pesados de mercancías de 42 y 44 t de M.M.A. se corresponde asimismo con una reducción de las operaciones realizadas correspondiente al incremento de la capacidad de carga de los vehículos, que supone un menor número de vehículos circulando a plena carga para llevar la misma cantidad de mercancía. Dicha reducción se corresponde, como ya se presentó anteriormente, con unos valores de 7,55 y 14 %, cuya aplicación por tipos de mercancía y a nivel global se puede ver en la tabla siguiente.

Veh-km con carga transpasados de vehículos de 40 t a 42 t y 44 t						
Tipo mercancía	Escenario A			Escenario B		
	oc >90 y <100	oc = 100	total	oc >90 y <100	oc = 100	total
1	53.594.691	280.538.157	334.132.848	107.189.382	350.672.696	457.862.078
2	1.454.806	13.537.593	14.992.399	2.909.612	16.921.991	19.831.603
3	17.783.905	237.247.280	255.031.184	35.567.809	296.559.100	332.126.909
4	52.646.760	462.129.687	514.776.447	105.293.520	577.662.109	682.955.629
5	0	0	0	0	0	0
6	16.429.265	129.920.315	146.349.581	32.858.531	162.400.394	195.258.925
7	7.156.969	64.745.619	71.902.588	14.313.937	80.932.024	95.245.961
8	25.335.568	170.260.507	195.596.075	50.671.135	212.825.634	263.496.769
9	16.897.654	192.782.314	209.679.967	33.795.307	240.977.892	274.773.199
10	19.669.512	168.810.033	188.479.545	39.339.024	211.012.541	250.351.565
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	13.648.017	104.124.204	117.772.221	27.296.034	130.155.255	157.451.289
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
Total	224.617.145	1.824.095.709	2.048.712.854	449.234.291	2.280.119.636	2.729.353.927
% sobre global con carga	1,55	12,59	14,14	3,10	15,74	18,84
% sobre veh 40t con carga	2,40	19,53	21,93	4,81	24,41	29,22

Tabla 8. Captación de los vehículos de 42 y 44 t de M.M.A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Reducción de las operaciones con carga con vehículos de 42 y 44t								
	Escenario A				Escenario B			
	Origen	Destino		reducción	Origen	Destino		reducción
Tipo mercancía	veh 40 t	veh 42 t	veh 44t		veh 40 t	veh 42 t	veh 44t	
1	1.292.519	290.230	830.171	172.119	1.718.368	456.236	1.039.228	222.904
2	366.433	81.787	235.496	49.150	483.053	127.768	291.959	63.325
3	5.720.506	1.263.853	3.680.086	776.567	7.433.234	1.953.258	4.487.931	992.045
4	1.899.600	424.220	1.220.753	254.627	2.506.095	663.096	1.514.781	328.219
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	462.555	103.978	297.062	61.515	615.894	163.634	372.519	79.741
7	949.084	210.201	610.413	128.470	1.237.537	325.711	747.374	164.452
8	716.808	160.584	460.504	95.720	949.882	251.833	574.330	123.718
9	1.457.061	323.980	936.762	196.319	1.910.505	504.108	1.154.265	252.132
10	560.087	125.575	359.791	74.720	743.041	197.095	449.304	96.641
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	649.549	146.665	416.968	85.917	870.311	231.870	526.638	111.803
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>14.074.201</b>	<b>3.131.073</b>	<b>9.048.005</b>	<b>1.895.124</b>	<b>18.467.920</b>	<b>4.874.609</b>	<b>11.158.330</b>	<b>2.434.980</b>
% sobre global con carga	12,75	2,84	8,20	1,72	16,73	4,42	10,11	2,21
% sobre veh 40t con carga	33,12	7,37	21,29	4,46	43,46	11,47	26,26	5,73

Tabla 9. Reducción de las operaciones con carga correspondientes a veh de 42 y 44 t de M.M.A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

De esta manera resulta que la introducción de la posibilidad de aumentar la M.M.A. de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes a 44 t supone una reducción de 1.895.124 operaciones de transporte con carga en el escenario A, que se corresponde con una disminución del 1,72 % respecto a las operaciones globales con carga de todo el sector (que están cifradas en 110.407.659 operaciones) y un 4,46 % respecto a las operaciones con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t. En el escenario B se obtienen 2.434.980 operaciones de transporte menos, que corresponden a una disminución del 2,21 % respecto a las operaciones globales con carga y un 5,73 % respecto a las operaciones con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

A estos valores de operaciones de transporte con carga eliminadas hay que añadirles también los correspondientes viajes en vacío que se eliminan. Como ya se apuntó anteriormente, la EPTMC 2011 fija el valor de las operaciones en vacío en un 45,02 % para el sector del transporte de mercancías y en un 43,65 % para el grupo de los vehículos de 40 t de M.M.A. Como no tenemos datos para suponer la evolución de los retornos en vacío asociados a la implantación del incremento de M.M.A., vamos a tomar como valor representativo de las operaciones en vacío el mismo que nos indica la EPTMC 2011 para los vehículos de 40 t de M.M.A.

Así se obtiene una reducción en el escenario A de 827.222 operaciones en vacío, que se corresponde con una disminución del 0,91 % respecto a las operaciones globales en vacío (que están cifradas en 90.417.681 operaciones) y un 2,51 % respecto a las operaciones en vacío de los vehículos con una M.M.A. de 40 t . Para el escenario B se obtienen 1.062.869 operaciones en vacío menos, que se corresponde con una disminución del 1,18 % respecto a las operaciones globales en vacío y un 3,23 % respecto a las operaciones en vacío de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

Por lo tanto, si sumamos el total de operaciones con carga y en vacío que se eliminan, obtenemos que en el escenario A tenemos una reducción de 2.722.345 operaciones, que se corresponde con una disminución del 1,36 % respecto a las operaciones globales del sector y un 3,61 % respecto a las operaciones de los vehículos con una M.M.A. de 40 t. Para el escenario B se obtienen 3.497.849 operaciones menos, que se corresponde con una disminución del 1,74 % respecto a las operaciones globales de todo el sector y un 4,64 % respecto a las operaciones de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

Reducción de las operaciones con vehículos de 42 y 44 t.			
	Escenario A		
	con carga	sin carga	totales
Valor	1.895.124	827.222	2.722.345
% sobre global	1,72	0,91	1,36
% sobre 40t	4,46	2,51	3,61
	Escenario B		
	con carga	sin carga	totales
Valor	2.434.980	1.062.869	3.497.849
% sobre global	2,21	1,18	1,74
% sobre 40t	5,73	3,23	4,64

Tabla 10. Reducción de las operaciones correspondientes a veh de 42 y 44 t de M.M.A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

### 2.3 Estimación del incremento de abrasión sobre los firmes provocados por el cambio vehículos pesados con una M.M.A. de 44 t

Una vez calculada la variación de tráfico asociada a una modificación de la normativa que permita a los vehículos pesados de mercancías que actualmente tienen una limitación de 40 t de M.M.A. circular con un nuevo límite de 44 t de M.M.A. y la agresión que producen sobre los distintos tipos de firme los diferentes tipos de vehículos considerados, podemos realizar la estimación de la variación del desgaste del pavimento que supone el uso de vehículos con esta limitación de 44 t.

Se considera aquí como más adecuada para el cálculo de dicho desgaste la Hipótesis B, ya que es la que se configura con parámetros establecidos por administraciones españolas.

A partir de esta Hipótesis B tenemos toda una serie de valores que nos determinan la agresividad sobre el pavimento de los vehículos pesados de mercancías en función del tipo de firme (flexible o semirrígido), el tipo de explanada y la categoría de tráfico. Como no se dispone de un catálogo que nos permita determinar el reparto exacto de cada tipo de firme y de explanada con su correspondiente categoría de tráfico real en la red de carreteras española se ha optado por calcular los extremos de la distribución correspondiente, determinando así los casos de agresividad máxima y mínima.

De esta forma consideraremos en los cálculos unas variaciones del coeficiente de agresividad de un incremento del 109 % en el peor de los casos, un incremento nulo en el mejor de los casos y un valor medio de incremento del 43 %, correspondientes al uso de vehículos pesados de mercancías del tipo T2S3 de 44 t de M.M.A. respecto a los vehículos pesados de mercancías de 40 t de M.M.A. del tipo T2S3. Igualmente consideraremos unas variaciones del coeficiente de agresividad de un incremento del 45 % en el peor de los casos, un incremento nulo en el mejor de los casos y un valor medio de incremento del 19 %, correspondientes al uso de vehículos pesados de mercancías del tipo T2S3 de 42 t de M.M.A. respecto a los vehículos pesados de mercancías de 40 t de M.M.A. del tipo T2S3.

Además tendremos también en cuenta la reducción de la agresividad sobre el pavimento provocada por el descenso del nº de vehículos de 40 t de M.M.A. que circulan, tanto cargados como sin carga. En el caso de los vehículos sin carga se han establecido igualmente los valores correspondientes de variación del coeficiente de agresividad correspondientes a la circulación de vehículos pesados de mercancías sin carga respecto a los vehículos pesados de mercancías de 40 t de M.M.A. del tipo T2S3.

Aplicando los valores mencionados al número de operaciones correspondientes a los vehículos pesados de mercancías de 42 y 44 t de M.M.A., y teniendo en cuenta la reducción de operaciones respecto al uso de vehículos pesados de mercancías de 40 t de M.M.A, da como resultado que en el escenario A (captación de un 15 % sobre vehículos cargados entre el 90 y el 100 % y captación de un 80 % sobre vehículos a plena carga) la variación en la agresividad sobre el firme correspondiente al incremento de M.M.A. de los vehículos pesados de mercancías supone un valor comprendido entre una reducción de dicha agresividad de un -2,61 % y un incremento de la misma de un 12,05 %, con un valor medio de un incremento del 3,14 % teniendo en cuenta sólo las operaciones correspondientes a los vehículos de más de 40 t de M.M.A. Por su parte, para el escenario B (captación de un 30 % sobre vehículos cargados entre el 90 y el 100 % y captación de un 100 % sobre vehículos a plena carga) se obtiene que la variación en la agresividad sobre el firme correspondiente al incremento de M.M.A. de los vehículos pesados de mercancías supone un valor comprendido entre una reducción de dicha agresividad de un -3,36 % y un incremento de la misma de un 15,32 %, con un valor medio de un incremento del 3,98 % teniendo en cuenta sólo las operaciones correspondientes a los vehículos de más de 40 t de M.M.A.

En cambio, si relativizamos dicha variación de agresividad al conjunto de todas las operaciones de transporte de vehículos pesados de mercancías realizadas en España obtenemos que en el escenario A tendremos una variación de la agresividad sobre el firme comprendida entre una reducción de un -0,98 % y un incremento de la misma de un 4,52 %, con un valor medio de un incremento del 1,18 %. Por su parte, para el escenario B tendremos una variación de dicha agresividad comprendida entre una reducción de un -1,26 % y un incremento de la misma de un 5,75 %, con un valor medio de un incremento del 1,49 %.

Todos estos valores se recogen en la siguiente tabla resumen.

	Escenario A			Escenario B		
	mínimo	medio	máximo	mínimo	medio	máximo
Sobre operaciones de 40t	-2,61	3,14	12,05	-3,36	3,98	15,32
Sobre operaciones totales	-0,98	1,18	4,52	-1,26	1,49	5,75

Tabla 11. Variación de la agresividad sobre los firmes (en %) debido al uso de vehículos de 42 y 44 t de M.M.A.

## 2.4 Estimación de la variación de los costes de mantenimiento de los firmes

Para analizar el desgaste o grado de fatiga de los firmes causado por los vehículos tipo T2S3 y T3S3, con las cargas analizadas, se ha recurrido a un análisis de ejes equivalentes sobre ambos tipos de firmes, flexibles y semirrígidos y se ha calculado el consumo de fatiga provocado por un determinado número de aplicaciones de carga.

Para realizar un análisis cercano a la realidad de lo que sucedería si parte del total de vehículos tipo T2S3 fuese cargado con 44 toneladas en lugar de 40t, se ha analizado un tramo de carretera de alta intensidad media diaria de vehículos:

- Carretera: C-17
- Poblaciones Centelles y Mallà
- Pk: 45+080 –53+050
- Longitud del tramo: 7,97 km
- IMD: 42.268 veh/día
- Porcentaje de vehículos pesados: 9,44%
- Datos de estación permanente, fuente: Servei Territorial de Carreteres de Barcelona, Dades d'aforaments 2011.

Se procede a continuación a calcular el efecto de fatiga que podría causar el paso del vehículo tipo T2S3 bajo tres escenarios diferentes, consecuentes con el apartado "Estimación del trasvase de mercancía a vehículos pesados de mercancías de 44 t de M.M.A." de este estudio:

- Escenario Base: 100% vehículos cargados con 40t
- Escenario A: los vehículos cargados con 40t descienden un 33 % (67 %) y aparecen los vehículos de 42t con un 7 % y vehículos de 44t con un 21 %.
- Escenario B: los vehículos cargados con 40t descienden un 43 % (57 %) y aparecen los vehículos de 42t con un 11 % y vehículos de 44t con un 26 %.

El incremento del consumo de fatiga al pasar del escenario Base al escenario A es del 2,62 % en el caso de un firme flexible, y del 3,33 % en un firme semirrígido cuando se realiza el análisis considerando la hipótesis A. Al pasar del escenario Base al escenario B, estos porcentajes suben al 3,49 % y 4,28 % respectivamente.

Cuando el cálculo se lleva a cabo bajo la hipótesis B, el incremento de fatiga al pasar del escenario Base al escenario A es del 2,15 % para un firme de tipo flexible y del 2,87 % para un firme de tipo semirrígido. Y cuando se cambia del escenario Base al escenario B estos valores ascienden a 2,92 % y 3,73 % respectivamente.

Para estimar el coste de conservación y mantenimiento de los firmes, se ha recurrido a la información publicada por la Dirección General de Programación Económica y Presupuestos, Subdirección General de Estudios Económicos y Estadísticas, del Ministerio de Fomento en su Anuario Estadístico 2011:

- Coste de conservación y mantenimiento de la red a cargo del estado: 987.045.000 €
- Longitud de la Red a cargo del estado: 25.835 km
- Coste unitario de conservación de la red a cargo del estado: 38.205,73 €/km

Cabe aclarar que el coste referenciado es un valor global, aplicado a la conservación y mantenimiento de toda la carretera, y no sólo el destinado a los firmes, por lo que el valor real que le correspondería a esta partida sería inferior. Lamentablemente no se dispone de suficiente información como para hacer una estimación de este último y por tanto, los cálculos de los costes serán más conservadores.

La tabla siguiente muestra los costes resultantes de aplicar los porcentajes obtenidos en el apartado anterior a los distintos escenarios analizados sobre el tramo de carretera seleccionado. La información disponible sobre costes no discrimina según sea el tipo de firme flexible o semirrígido, por lo que el coste del escenario Base se ha mantenido constante en ambos casos (Ver tabla 12).



Escenario	Coste según Hipótesis A (€)		Coste según Hipótesis B (€)	
	Firme flexible	Firme semirrígido	Firme flexible	Firme semirrígido
Base: 100% 40t	304500	304500	304500	304500
Inicial: 67% 40t-7% 42t-21% 44t	312496	314633	311026	313222
Final: 57% 40t-11% 42t-26% 44t	315133	317523	313371	315833
Diferencia A respecto a Base	7996	10133	6526	8723
Diferencia B respecto a Base	10633	13023	8872	11334

Tabla 12. Costes de mantenimiento en tareas rutinarias para el tramo de carretera seleccionado para los firmes flexibles y semirrígidos bajo hipótesis A y B, considerando los escenarios Base, A y B. Longitud del tramo: 7.97 km.

Extrapolando los resultados obtenidos en este análisis de un tramo de carretera al total de la red a cargo del estado se puede obtener una estimación del incremento de costes de conservación anuales de dicha red. Se considera aquí como más adecuada para el cálculo la Hipótesis B, ya que es la que se configura con parámetros establecidos por administraciones españolas.

	Firme flexible	Firme semirrígido
escenario A	21,22	28,33
escenario A	21,22	28,33

Tabla 13. Incremento de costes anuales de mantenimiento de la red de carreteras a cargo del estado (en M€) debido al uso de vehículos de 42 y 44 t de M.M.A.

## 2.5 Aumento de la productividad de los vehículos

Uno de los elementos que también se deben tener en cuenta a la hora de valorar los escenarios de cambio planteados en este estudio es el aumento de la productividad asociada al uso de vehículos con mayor capacidad de carga. Dicho aumento de capacidad implica un mayor margen de beneficio para las empresas transportistas y una disminución de los vehículos que circulan por la red de carreteras españolas.

Como ya se había indicado anteriormente, los incrementos de productividad en cada viaje sustituyendo el vehículo de 40 t por uno de 42 t o de 44 t (ambos a carga completa), pueden estimarse en un 8,2 % y un 16,3 % respectivamente. De igual manera, la disminución del número de vehículos asociada a dicha sustitución de vehículos pesados de 40 t por los de 42 t o 44 t supone un 7,5 % o un 14 % (Ver tabla 14).

M.M.A.	tara	capacidad de carga	inc cap	% inc cap	% reducción veh
40	15,5	24,5			
42	15,5	26,5	2	8,16	7,55
44	15,5	28,5	4	16,33	14,04

Tabla 14. Capacidad de carga de los vehículos pesados de 40 t, 42 y 44 t, incremento de la capacidad de carga y reducción del nº de vehículos asociada. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

## 2.6 Impacto en la emisión de gases de efecto invernadero

Los vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. tienen una configuración física muy similar a la de los de 40 t de M.M.A., pero debido al incremento del peso total del vehículo vamos a tener un menor rendimiento en el funcionamiento del motor, expresado en un aumento del consumo de combustible por kilómetro recorrido.

Debido a este incremento de consumo, tendremos también un incremento en las emisiones contaminantes (gases de

efecto invernadero o GEI) asociadas a dichos vehículos, que por otra parte se verán compensadas por el descenso de los vehículos-kilómetro asociados al uso de este tipo de vehículos.

En la tabla siguiente se pueden apreciar los valores de dichas emisiones contaminantes por tipología de vehículo y velocidad de circulación (Tabla 15)

Aplicando estos valores de emisión de GEI a los diferentes escenarios planteados en el presente estudio se obtiene el balance ambiental entre el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. y los de 40 t de M.M.A.

En los cálculos se han empleados los valores de emisiones correspondientes a la velocidad media de los vehículos y se han aplicado los valores de vehículo diesel articulado de 34-40 t para los vehículos pesados de 40 t de M.M.A. y los valores de vehículo diesel articulado de 40-50 t para los vehículos pesados de 42 y 44 t de M.M.A.

TIPO VEHÍCULO	SUBCATEGORÍA	VELOCIDAD		
		URBANA (Ciudad)	MEDIA (Resto de vías)	ALTA (Autopistas y autovías)
Camiones diesel	Articulado 14 - 20 t	1.254,75	546,14	487,02
	Articulado 20 - 28 t	1.566,96	705,97	603,19
	Articulado 28 - 34t	1.632,66	746,3	628,98
	Articulado 34- 40t	1.916,96	854,09	701,59
	Articulado 40- 50t	2.081,89	952,15	778,07

Tabla 15. Factores de emisión en g CO<sub>2</sub> / km en función de la velocidad. Fuente: Oficina Catalana del Canvi Climàtic. Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH). 2013

En las tablas siguientes se resumen los veh-km y las emisiones contaminantes asociadas al uso de vehículos pesados de 44 t de M.M.A. (Tablas 16 y 17).

	Escenario A		Escenario B	
	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh
Con carga	1.776.380.860	272.331.994	2.376.219.989	353.133.938
Sin carga	357.763.105	54.847.664	478.570.706	71.121.175

Tabla 16. Variación de los veh-km anuales con vehículos de 42 y 44 t en los diferentes escenarios considerados.

	Escenario A		
	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh	balance
Con carga	174.192	-232.596	-58.404
Sin carga	0	-46.845	-46.845
Total	174.192	-279.441	-105.249
	Escenario B		
	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh	balance
Con carga	233.012	-301.608	-68.596
Sin carga	0	-60.744	-60.744
Total	233.012	-362.352	-129.340

Tabla 17. Variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> (en toneladas de CO<sub>2</sub> anuales) con vehículos de 42 y 44 t en los diferentes escenarios considerados respecto al uso de vehículos de 40t.

Como se puede observar, el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. supone un descenso de las emisiones contaminantes asociadas a los mismos, que se puede estimar en 105.249 t de CO2 anuales en el escenario A y en 129.340 t de CO2 anuales en el escenario B. Estos valores de reducción de las emisiones se corresponden con un descenso de las mismas de un 5,01 % para el escenario A y de un 4,62 % en el escenario B respecto a emplear vehículos pesados de transporte de mercancías de 40 t de M.M.A.

## 2.7 Impacto económico

### Incremento de los costes variables de operación de los vehículos y de la productividad t-km.

Como ya se ha comentado anteriormente, los vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. tienen una configuración física muy similar a la de los de 40t de M.M.A., pero debido al incremento del peso total del vehículo vamos a tener un menor rendimiento en los parámetros de operación del vehículo, que se traduce en un aumento del consumo de combustible por kilómetro recorrido, un mayor desgaste de neumáticos, un incremento de la frecuencia de las reparaciones y un incremento del coste de mantenimiento del vehículo.

Combustible	consumo	38,5	l/100 km
	precio	1,202	€/l
	precio	0,463	€/km
Neumáticos	vida útil	135.000	km
	unidades	12	neumáticos
	precio	763,790	€
	precio	0,068	€/km
Mantenimiento	precio	0,021	€/km
Reparaciones	precio	0,037	€/km
Total		0,589	€/km

Tabla 18. Parámetros básicos de coste variable de operación para vehículos de 40 t de M.M.A. Fuente: ACOTRAM 2.4.0.

combustible	consumo	+ 7 %
neumáticos	vidal útil	- 5%
mantenimiento	precio	+ 1%
reparaciones	precio	+ 1%

Tabla 19. Parámetros básicos de coste variable de operación para vehículos de 44 t de M.M.A. respecto a los de 40 t. Fuente: Comité National Routier. "Rapport sur les conséquences économiques d'un éventuel passage a 44 tonnes". 2004.

Combustible	consumo	41,195	l/100 km
	precio	1,202	€/l
	precio	0,495	€/km
Neumáticos	vida útil	128.250	km
	unidades	12	neumáticos
	precio	763,790	€
	precio	0,071	€/km
Mantenimiento	precio	0,021	€/km
Reparaciones	precio	0,038	€/km
Total		0,626	€/km

Tabla 20. Parámetros básicos de coste variable de operación para vehículos de 44 t de M.M.A.

Los valores básicos para la comparación del uso de las dos tipologías de vehículos se han obtenido del programa ACOTRAM del Ministerio de Fomento, que nos da los valores de los costes de operación de los vehículos de transporte de mercancías en base a la información del Observatorio de costes de transporte de mercancías por carretera, también del Ministerio de Fomento. Los valores empleados corresponden a un vehículo articulado de carga general de 40 t de M.M.A. con precios referidos a 31 de enero de 2011 (todos los precios considerados con IVA).

Para realizar la comparación necesitaríamos los mismos valores para un vehículo articulado de carga general de 44 t de M.M.A., pero en el Observatorio de costes de transporte de mercancías por carretera del Ministerio de Fomento sólo tenemos valores para el vehículo articulado portacontenedores de 44 t de M.M.A., cuyos valores son los mismos que los del vehículo articulado de carga general de 40 t de M.M.A. en el caso del consumo de combustible por kilómetro recorrido y del desgaste de los neumáticos, existiendo sólo una variación de costes en las reparaciones y mantenimiento del vehículo. Por este motivo se han considerado aquí los valores de variación de los costes establecidos en el informe "Rapport sur les conséquences économiques d'un éventuel passage a 44 tonnes" del Comité National Routier francés.

Con estos valores de incremento se pueden establecer los valores de los costes de operación de un vehículo articulado de carga general de 44 t de M.M.A. con precios referidos a 31 de enero de 2011 (todos los precios considerados con IVA). De esta manera se obtiene que el uso de vehículos articulados de carga general de 44 t de M.M.A. supone un incremento de costes variables de operación de un 6,2 % respecto al uso de vehículos articulados de carga general de 40 t de M.M.A. con precios referidos a 31 de enero de 2011.

Teniendo en cuenta sólo esta variación de los costes variables de operación de los vehículos, y aplicando los valores extraídos del programa ACOTRAM del Ministerio de Fomento, podemos establecer que el coste total de operación de los vehículos de transporte de mercancías pasaría de un valor de 1,046 €/km recorrido con vehículos de 40 t de M.M.A. a 1,076 €/km recorrido con vehículos de 44 t de M.M.A., lo que supone un incremento de costes de un 2,86 % por cada veh-km recorrido (que integra el total de kilómetros realizados por los vehículos, ya sean con o sin carga).

De esta misma manera podemos calcular también cuál será la variación de los costes por tonelada transportada y kilómetro recorrido, que nos resultan (aplicando una capacidad de carga de 24,5 t para un camión de 40 t de M.M.A. y de 28,5 t para un camión de 44 t de M.M.A.) en un valor de 0,043 €/t-km con vehículos de 40 t de M.M.A. y en un valor de 0,038 €/t-km con vehículos de 44 t de M.M.A., lo que supone un descenso de costes de un 11,63 % por cada t-km.

### Variación de los costes totales

Aplicando estos valores de costes variables de operación a los diferentes escenarios planteados en el presente estudio se obtiene el balance entre el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. y los de 40 t de M.M.A. En las tablas siguientes se resumen los veh-km y los costes variables asociados al uso de vehículos pesados de 44 t de M.M.A. (Tablas 21 y 22).

	Escenario A		Escenario B	
	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh
Con carga	1.776.380.860	272.331.994	2.376.219.989	353.133.938
Sin carga	357.763.105	54.847.664	478.570.706	71.121.175

Tabla 21. Variación de los veh-km anuales con vehículos de 42 y 44 t.

	Escenario A		
	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh	balance
Con carga	64,93	-160,42	-95,49
Sin carga	0	-32,31	-32,31
Total	64,93	-192,73	-127,80
	Escenario B		
	veh de 44 t de M.M.A.	reducción veh	balance
Con carga	86,85	-208,02	-121,17
Sin carga	0	-41,90	-41,90
Total	86,85	-249,92	-163,06

Tabla 22. Variación de los costes variables de operación (en M€ anuales) con vehículos de 42 y 44 t en los diferentes escenarios considerados respecto al uso de vehículos de 40t.

Como se puede observar, el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. supone un descenso de los costes variables de operación asociados a los mismos, que se puede estimar en 128 M€ anuales en el escenario A y en 163 M€ anuales en el escenario B. Estos valores de reducción de costes variables de operación se corresponden con un descenso de los mismos de un 8,81 % para el escenario A y de un 8,44 % en el escenario B respecto a emplear vehículos pesados de transporte de mercancías de 40 t de M.M.A.

Si realizamos el cálculo de la variación de costes totales considerando que sólo varían los costes de operación, aplicando los valores de €/km recorrido, se obtienen los resultados siguientes (Tablas 23 y 24) .

	Escenario A		Escenario B	
	Origen: veh 40t	Destino: veh de 44t	Origen: veh 40t	Destino: veh de 44t
Con carga	2.048.712.854	1.776.380.860	2.729.353.927	2.376.219.989
Sin carga	412.610.769	357.763.105	549.691.881	478.570.706
Totales	2.461.323.623	2.134.143.966	3.279.045.807	2.854.790.694

Tabla 23. Variación de los veh-km anuales con vehículos de 42 y 44 t en los diferentes escenarios considerados.

	Escenario A		Escenario B	
	Origen: veh 40t	Destino: veh de 44t	Origen: veh 40t	Destino: veh de 44t
Coste anual €	2.574,54	2.296,34	3.429,88	3.071,75
Reducción €		-278,21		-358,13
%		-10,8		-10,4

Tabla 24. Variación de los costes totales (en M€ anuales) con vehículos de 42 y 44 t en los diferentes escenarios considerados respecto al uso de vehículos de 40t.

Como se puede observar, el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías de 44 t de M.M.A. supone un descenso de los costes totales asociados a los mismos, que se puede estimar en 278 M€ anuales en el escenario A y en 358 M€ anuales en el escenario B. Estos valores de reducción de costes variables de operación se corresponden con un descenso de los mismos de un 10,8 % para el escenario A y de un 10,4 % en el escenario B respecto a emplear vehículos pesados de transporte de mercancías de 40 t de M.M.A.

### 3 Determinación del volumen de tráfico que opera en España en vehículos pesados de más de 40 t de M.M.A. y estimación del potencial de uso de vehículos pesados con una M.M.A. de 44 t

#### Tipología de vehículos analizados

En este estudio se analiza inicialmente el uso de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes, es decir:

- T2S3: tractora de dos ejes y semirremolque de tres ejes
- T3S2: tractora de tres ejes y semirremolque de dos ejes
- T3S3: tractora de tres ejes y semirremolque de tres ejes

Todos los vehículos antes mencionados, por su configuración de fábrica, tienen la posibilidad de poder admitir una M.M.A. de 44 t, estableciéndose la limitación de circulación en valores inferiores a ésta por motivos de desgaste de los pavimentos.

De esta manera, todas estas categorías de vehículos pesados comparten la restricción de circular por las carreteras españolas con una masa máxima autorizada (M.M.A.) de 40 t. Dicha M.M.A. se refiere al conjunto de la masa propia del vehículo motor más la del elemento de transporte de la mercancía (semirremolque o remolque), que configura la tara, a la cual se suma la capacidad de carga del vehículo, entendida ésta como peso bruto, es decir, el conjunto del peso de la mercancía transportada más el peso de sus correspondiente elementos auxiliares de estiba y/o unitización, como paletas o contenedores.

Particularmente se permite la circulación de vehículos pesados con una M.M.A. de 44 t siempre que estén configurados por un vehículo motor de 3 ejes con semirremolque de 2 ó 3 ejes llevando, en transporte combinado, un contenedor o caja móvil cerrados, igual o superior a 20 pies y homologado para el transporte combinado. De la misma forma se permite la circulación de vehículos pesados con una M.M.A. de 42 t siempre que estén configurados por un vehículo motor de 2 ejes con semirremolque de 3 ejes llevando, en transporte combinado, un contenedor o caja móvil cerrados, igual o superior a 20 pies y homologado para el transporte combinado.

### **Volumen del tráfico de vehículos pesados en España**

Para el análisis de la distribución de tráfico de los vehículos pesados de mercancías que operan en España se ha procedido al tratamiento de los datos contenidos en la Encuesta Permanente de Transportes de Mercancías por Carretera (EPTMC) referidos al año 2011, al ser éste el último año del que se tenían datos pormenorizados.

Dicha Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (EPTMC) es una investigación muestral de carácter continuo, elaborada por la Subdirección General de Estudios Económicos y Estadísticas (SGEEE) del Ministerio de Fomento, y cuyo objetivo principal consiste en investigar las operaciones de transporte de los vehículos pesados españoles, para, con ello, medir el grado de actividad del sector.

La población objeto de estudio está formada por los vehículos pesados matriculados en España autorizados para el transporte de mercancías por carretera, es decir, las cabezas tractoras con capacidad de arrastre de más de 3,5 toneladas y los vehículos rígidos o camiones con capacidad de carga útil superior a 3,5 toneladas y con un peso máximo autorizado superior a 6 toneladas.

En la distribución pública de los resultados de la EPTMC 2011, que se puede descargar gratuitamente en la página web del ministerio ([http://www.fomento.gob.es/mfom/lang\\_castellano/estadisticas\\_y\\_publicaciones/informacion\\_estadistica/transporte/eptmc/eptmc\\_publicacion/defaulteptmc2011.htm](http://www.fomento.gob.es/mfom/lang_castellano/estadisticas_y_publicaciones/informacion_estadistica/transporte/eptmc/eptmc_publicacion/defaulteptmc2011.htm)), podemos encontrar una explotación básica agregada de los resultados de dicha encuesta, que resulta relevante pero también insuficiente para el análisis a realizar en el presente estudio. Por este motivo se procedió a contactar con el Ministerio de Fomento para obtener los ficheros de microdatos individuales anonimizados de la EPTMC 2011, resumidos en un conjunto de 271.625 registros con 30 campos diferentes, los cuales nos fueron amablemente cedidos para su uso en el presente trabajo de investigación.

Por tratarse de un conjunto discreto de datos usado para explicar el comportamiento de un colectivo de orden superior, se ha procurado adecuadamente para el análisis de las variables seleccionadas disponer de un número de observaciones suficiente para que los resultados puedan considerarse mínimamente representativos. Desde luego, el grado de exactitud o fiabilidad de la información derivada del tratamiento de dichos datos compete a los autores del presente estudio, siendo el Ministerio de Fomento un mero proveedor de la información bruta analizada.

A partir del análisis de los datos individuales se han obtenido los siguientes resultados para el transporte total de mercancías por carretera en España:

Toneladas	1.466.501.644
Toneladas-kilómetro	206.839.878.701
Operaciones globales (Op.G.)	200.825.340
Operaciones con carga (Op.C.)	110.407.659
% de retornos en vacío	45,02 %
Vehículos-kilómetro globales	19.047.840.830

Tabla 1. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Tal y como se explica en la propia EPTMC 2011, durante el año 2011 se produjo una caída del 8,4 % en las operaciones, del 6,4 % en las toneladas y del 1,5 % en las toneladas-kilómetro. Estos descensos son similares a los registrados en 2010, si bien algo inferior en toneladas, ya que en ese año la caída fue del 8,5 %. No podemos proveer el dato de la variación de los vehículos-kilómetro totales por no disponer de los datos individualizados de 2010.

Entre los datos recogidos en la EPTMC 2011 se encuentra la tipología de mercancías transportadas, codificadas según los grupos de códigos NST 2007, que se pueden consultar en la tabla siguiente. Esta información se ha utilizado para disgregar los datos generales en todos los cálculos empleados. (Tabla 2).

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
01	Productos de la agricultura, la ganadería, la caza y la silvicultura; pescado y otros productos de la pesca
02	Hulla, antracita y lignito; petróleo crudo y gas natural
03	Minerales metálicos y otros minerales y productos de la minería; turba; uranio y torio
04	Productos alimenticios, bebidas y tabaco
05	Productos de la industria textil y de la confección; cuero y productos de cuero
06	Productos de madera y corcho (excepto muebles); artículos de cestería y espartería; pasta de papel, papel y productos de la industria del papel; edición, artes gráficas y material grabado
07	Coque y productos de petróleo refinado
08	Productos químicos y fibras artificiales y sintéticas; productos de caucho y plásticos; combustible nuclear
09	Otros productos minerales no metálicos
10	Metales básicos; productos metálicos, excepto maquinaria y equipo
11	Maquinaria y equipo mecánico n.c.o.p.; maquinaria de oficina y equipo informático; maquinaria y material eléctrico n.c.o.p.; equipos y aparatos de radio, televisión y comunicaciones; equipo e instrumentos médico-quirúrgicos, de precisión y ópticos; relojería
12	Material de transporte
13	Muebles; otros artículos manufacturados n.c.o.p.
14	Materiales secundarios en bruto; residuos municipales y otros residuos
15	Correo, paquetes
16	Equipos y materiales utilizados en el transporte de mercancías
17	Mercancías trasladadas durante mudanzas privadas y profesionales; equipaje y artículos que acompañan a los viajeros; vehículos de motor trasladados para su reparación; otros bienes no de mercado n.c.o.p.
18	Mercancías agrupadas: distintos tipos de mercancías transportadas conjuntamente
19	Mercancías no identificables: mercancías que por cualquier razón no pueden identificarse y no pueden, por tanto, clasificarse en los grupos 01 a 16.
20	Otros artículos n.c.o.p.
98	Vehículo vacío

Tabla 2. Grupos de códigos NST 2007. Fuente: EPTMC 2011.



De esta manera se puede establecer la presentación de los valores de las operaciones realizadas, de las toneladas transportadas, de las toneladas-kilómetro realizadas y de los vehículos-kilómetro recorridos por tipo de mercancía transportada, como se puede apreciar en la siguiente tabla (Tabla 3).

Tte. mercancías en todo tipo de vehículos pesado								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	op. t.	%	veh-km	%
1	124.320.990	8,48	34.308.635.979	16,59	8.971.352	4,47	2.131.533.089	11,19
2	21.720.807	1,48	1.213.707.770	0,59	892.888	0,44	53.362.370	0,28
3	443.336.718	30,23	15.306.438.596	7,40	23.587.221	11,75	691.367.423	3,63
4	183.114.911	12,49	41.526.219.058	20,08	14.084.004	7,01	2.684.229.596	14,09
5	4.811.399	0,33	1.794.990.267	0,87	586.929	0,29	179.047.040	0,94
6	43.014.178	2,93	11.788.386.790	5,70	3.440.342	1,71	775.834.726	4,07
7	71.292.225	4,86	5.325.381.388	2,57	4.540.289	2,26	338.223.595	1,78
8	64.394.920	4,39	16.826.133.498	8,13	4.602.215	2,29	1.114.569.683	5,85
9	223.874.483	15,27	16.155.739.121	7,81	17.119.793	8,52	970.757.851	5,10
10	50.644.784	3,45	13.613.846.811	6,58	4.042.357	2,01	871.984.688	4,58
11	12.697.847	0,87	3.836.037.441	1,85	1.651.441	0,82	363.303.410	1,91
12	24.583.627	1,68	9.661.786.829	4,67	2.910.281	1,45	1.048.021.954	5,50
13	5.871.615	0,40	2.380.938.400	1,15	970.219	0,48	425.969.306	2,24
14	89.160.927	6,08	8.401.558.782	4,06	8.241.286	4,10	485.901.587	2,55
15	36.279.944	2,47	12.974.108.948	6,27	3.778.728	1,88	1.110.930.563	5,83
16	26.660.886	1,82	5.020.118.833	2,43	7.504.724	3,74	702.763.610	3,69
17	1.027.640	0,07	119.318.249	0,06	244.483	0,12	24.555.642	0,13
18	11.192.125	0,76	4.607.400.908	2,23	925.467	0,46	369.973.547	1,94
19	28.501.619	1,94	1.979.131.034	0,96	2.313.641	1,15	144.781.054	0,76
98	28.501.619	0,00	0	0,00	90.417.681	45,02	4.560.730.097	23,94
<b>Total</b>	<b>1.466.501.644</b>	<b>100%</b>	<b>206.839.878.701</b>	<b>100%</b>	<b>200.825.340</b>	<b>100%</b>	<b>19.047.840.830</b>	<b>100%</b>

Tabla 3. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España por tipo de mercancía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Una vez establecido el marco de referencia global del transporte de mercancías por carretera en España, pasamos al análisis de la cuota de mercado de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes.

De esta manera, al igual que en caso anterior, se han establecido los parámetros básicos del transporte por carretera para dicha tipología de vehículos (operaciones, toneladas, toneladas-kilómetro y vehículos-kilómetro) por tipo de mercancía transportada. También se ha determinado el porcentaje respecto al global del transporte por carretera que supone la participación de este tipo de vehículos para cada uno de los parámetros analizados.

Tte. mercancías en vehículos de MMA >= 40 t								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	84.148.600	9,91	28.463.056.635	17,45	4.206.439	5,46	1.600.239.772	13,41
2	18.371.661	2,16	992.893.107	0,61	724.906	0,94	41.606.678	0,35
3	256.195.234	30,16	11.506.306.505	7,06	10.475.288	13,60	464.344.486	3,89
4	114.835.064	13,52	33.085.935.360	20,29	5.839.602	7,58	1.782.979.580	14,94
5	3.248.524	0,38	1.495.508.732	0,92	270.416	0,35	126.293.220	1,06
6	29.302.772	3,45	9.441.744.728	5,79	1.611.800	2,09	541.322.175	4,54
7	51.592.118	6,07	4.095.374.257	2,51	2.438.735	3,17	197.018.375	1,65
8	44.906.327	5,29	13.587.568.879	8,33	2.341.506	3,04	772.561.083	6,47
9	78.153.794	9,20	11.236.571.329	6,89	3.492.848	4,53	546.546.454	4,58
10	34.858.433	4,10	11.139.060.829	6,83	1.735.011	2,25	567.019.460	4,75
11	6.956.685	0,82	2.959.536.190	1,81	557.175	0,72	230.827.466	1,93
12	15.719.973	1,85	6.874.987.637	4,22	1.273.907	1,65	528.502.169	4,43
13	3.588.351	0,42	1.688.602.102	1,04	318.695	0,41	159.341.814	1,34
14	40.305.283	4,75	6.588.996.564	4,04	1.890.226	2,45	301.151.189	2,52
15	24.522.420	2,89	10.310.851.583	6,32	1.969.019	2,56	802.612.891	6,73
16	16.526.995	1,95	3.951.813.616	2,42	2.794.412	3,63	483.823.256	4,05
17	241.444	0,03	37.113.556	0,02	22.750	0,03	3.667.023	0,03
18	8.526.731	1,00	4.077.725.158	2,50	563.941	0,73	293.562.787	2,46
19	17.317.552	2,04	1.533.718	0,94	885.753	1,15	79.086.751	0,66
98	0	0,00	0	0,00	33.615.166	43,64	2.410.668.960	20,20
<b>Total</b>	<b>849.317.962</b>	<b>100,00</b>	<b>163.067.365.654</b>	<b>100,00</b>	<b>77.027.598</b>	<b>100,00</b>	<b>11.933.148.590</b>	<b>100,00</b>
<b>% sobre global</b>	<b>57,91</b>		<b>78,84</b>		<b>38,36</b>		<b>62,65</b>	

Tabla 4. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de M.M.A. mayor o igual a 40 t por tipo de mercancía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la contribución de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes es muy significativa, resultando en un 58 % del total de las toneladas transportadas, un 79 % de las toneladas-kilómetro realizadas, un 38 % de las operaciones de transporte y un 63 % de los vehículos-kilómetro recorridos.

En estos resultados están agregados los datos relativos a los vehículos con autorización de circulación con una M.M.A. de 40 t, los correspondientes a vehículos con autorización de circulación con una M.M.A. de 42 t y los de los vehículos con autorización de circulación con una M.M.A. de 44 t. Para realizar posteriormente los análisis de la repercusión de autorizar el incremento de la M.M.A. desde 40 t a 44 t se han disgregado los datos correspondientes a cada categoría de vehículos, como se puede comprobar en las tablas siguientes.

Tte. mercancías en vehículos de MMA = 40 t								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	82.482.787	9,93	28.092.592.171	17,54	4.129.300	5,48	1.576.810.413	13,48
2	18.041.450	2,17	926.865.900	0,58	712.279	0,94	38.928.424	0,33
3	251.209.485	30,23	11.246.461.736	7,02	10.273.760	13,62	454.455.074	3,88
4	113.143.848	13,62	32.726.576.651	20,44	5.753.111	7,63	1.761.109.030	15,05
5	2.914.659	0,35	1.365.637.247	0,85	241.631	0,32	112.777.921	0,96
6	28.612.507	3,44	9.272.724.359	5,79	1.576.636	2,09	530.894.339	4,54
7	51.026.850	6,14	4.016.067.272	2,51	2.416.312	3,20	193.782.674	1,66
8	43.908.369	5,28	13.352.392.874	8,34	2.288.848	3,04	758.352.964	6,48
9	75.114.832	9,04	10.899.919.730	6,81	3.359.568	4,46	530.784.827	4,54
10	34.081.599	4,10	10.867.154.948	6,79	1.699.266	2,25	554.074.426	4,74
11	6.526.737	0,79	2.828.025.949	1,77	523.439	0,69	222.822.729	1,90
12	15.537.614	1,87	6.843.975.515	4,27	1.260.863	1,67	523.576.656	4,48
13	3.370.680	0,41	1.647.871.777	1,03	303.752	0,40	155.389.894	1,33
14	39.561.533	4,76	6.511.725.764	4,07	1.853.308	2,46	297.283.323	2,54
15	24.044.431	2,89	10.090.916.901	6,30	1.938.898	2,57	788.269.745	6,74
16	16.133.890	1,94	3.841.987.422	2,40	2.725.772	3,61	469.265.539	4,01
17	226.028	0,03	34.888.406	0,02	21.723	0,03	3.520.634	0,03
18	8.267.937	0,99	4.068.394.773	2,54	552.561	0,73	293.089.083	2,51
19	16.754.844	2,02	1.488.846.720	0,93	858.987	1,14	76.701.757	0,66
98	0	0,00	0	0,00	32.915.550	43,65	2.356.377.387	20,14
<b>Total</b>	<b>830.960.083</b>	<b>100,00</b>	<b>160.123.026.117</b>	<b>100,00</b>	<b>75.405.564</b>	<b>100,00</b>	<b>11.698.266.838</b>	<b>100,00</b>
<b>% sobre global</b>	<b>56,66</b>		<b>77,41</b>		<b>37,55</b>		<b>61,42</b>	

Tabla 5. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de 40 t de M.M.A. por tipo de mercancía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Tte. mercancías en vehículos de MMA = 42 t								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	1.421.046	9,18	331.587.455	14,00	65.961	4,88	21.716.749	11,30
2	281.447	1,82	44.006.493	1,86	10.541	0,78	1.652.038	0,86
3	4.785.314	30,90	238.615.000	10,07	191.181	14,15	9.331.057	4,86
4	1.586.916	10,25	353.735.018	14,93	82.344	6,10	21.635.294	11,26
5	312.262	2,02	122.893.555	5,19	27.757	2,05	13.183.017	6,86
6	587.836	3,80	129.262.787	5,46	27.416	2,03	7.330.471	3,82
7	237.563	1,53	26.276.644	1,11	11.980	0,89	1.329.967	0,69
8	754.953	4,87	176.128.837	7,43	37.300	2,76	9.602.885	5,00
9	2.339.055	15,10	211.776.173	8,94	101.189	7,49	10.336.807	5,38
10	706.297	4,56	249.469.613	10,53	32.851	2,43	12.213.717	6,36
11	104.784	0,68	55.914.427	2,36	9.714	0,72	4.113.035	2,14
12	64.409	0,42	23.295.903	0,98	7.297	0,54	4.390.918	2,29
13	206.355	1,33	37.388.469	1,58	13.914	1,03	3.662.078	1,91
14	735.044	4,75	64.621.102	2,73	34.304	2,54	3.245.155	1,69
15	354.864	2,29	169.223.243	7,14	22.313	1,65	11.486.529	5,98
16	320.018	2,07	92.594.545	3,91	51.573	3,82	11.968.846	6,23
17	15.416	0,10	2.225.150	0,09	1.027	0,08	146.388	0,08
18	258.794	1,67	9.330.385	0,39	11.380	0,84	473.704	0,25
19	414.959	2,68	30.821.286	1,30	19.438	1,44	1.634.663	0,85
98	0	0,00	0	0,00	591.271	43,77	42.694.250	22,22
<b>Total</b>	<b>15.487.333</b>	<b>100</b>	<b>2.369.166.088</b>	<b>100</b>	<b>1.350.749</b>	<b>100</b>	<b>192.146.566</b>	<b>100</b>
<b>% sobre global</b>	<b>1,06</b>		<b>1,15</b>		<b>0,67</b>		<b>1,01</b>	

Tabla 6. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de 42 t de M.M.A. por tipo de mercancía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Tte. mercancías en vehículos de MMA = 44 t								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	244.767	7,61	38.877.009	6,76	11.179	3,74	1.712.610	3,89
2	48.764	1,52	22.020.713	3,83	2.086	0,70	1.026.215	2,33
3	432.328	13,44	21.229.768	3,69	19.194	6,42	836.253	1,90
4	104.300	3,24	5.623.690	0,98	4.148	1,39	235.257	0,53
5	21.603	0,67	6.977.930	1,21	1.029	0,34	332.282	0,76
6	102.429	3,19	39.757.581	6,91	7.748	2,59	3.097.365	7,04
7	327.704	10,19	53.030.341	9,22	10.442	3,49	1.905.734	4,33
8	243.005	7,56	59.047.167	10,27	15.359	5,14	4.605.233	10,47
9	699.907	21,76	124.875.426	21,71	32.092	10,73	5.424.821	12,33
10	10.537	2,19	22.436.268	3,90	2.894	0,97	731.317	1,66
11	362.952	11,29	75.595.813	13,14	25.597	8,56	3.962.555	9,01
12	117.949	3,67	7.716.218	1,34	5.747	1,92	534.595	1,21
13	11.316	0,35	3.341.855	0,58	1.029	0,34	262.843	0,60
14	84.282	2,62	12.649.699	2,20	5.762	1,93	710.884	1,62
15	123.125	3,83	50.711.439	8,82	7.808	2,61	2.857.618	6,49
16	73.086	2,27	17.231.648	3,00	17.067	5,71	2.588.872	5,88
17	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
18	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
19	147.749	4,59	14.050.882	2,44	7.329	2,45	750.331	1,71
98	0	0,00	0	0,00	122.441	40,96	12.427.874	28,24
<b>Total</b>	<b>3.215.805</b>	<b>100</b>	<b>575.173.448</b>	<b>100</b>	<b>298.950</b>	<b>100</b>	<b>44.002.660</b>	<b>100</b>
<b>% sobre global</b>	<b>0,22</b>		<b>0,28</b>		<b>0,15</b>		<b>0,23</b>	

Tabla 7. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de 44 t de M.M.A. por tipo de mercancía.  
Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Como se puede comprobar, la mayor participación en el transporte de mercancías por carretera corresponde a los vehículos pesados de 40 t de M.M.A. con un 57 % del total de las toneladas transportadas, un 77 % de las toneladas-kilómetro realizadas, un 37,5 % de las operaciones de transporte y un 61 % de los vehículos-kilómetro recorridos. Los valores obtenidos para los vehículos pesados de 42 t de M.M.A. y 44 t de M.M.A. muestran una baja participación en el total del transporte de mercancías realizado por carretera en España.

Atendiendo al análisis sectorial en función de la variable vehículos-kilómetro para dichos vehículos de 40 t de M.M.A. podemos apreciar cómo destacan los sectores Productos alimenticios, bebidas y tabaco, con un 15 % del total, Productos de la agricultura, la ganadería, la caza y la silvicultura; pescado y otros productos de la pesca con un 13 % del total, Correo, paquetes con un 7 % del total y Productos químicos y fibras artificiales y sintéticas; productos de caucho y plásticos; combustible nuclear con un 6 % del total.

#### Estimación del trasvase de mercancía a vehículos pesados de mercancías de 44 t de M.M.A.

Tal y como se ha podido comprobar con los datos presentados anteriormente, un porcentaje muy considerable de las mercancías que circulan por carretera en España lo hacen empleando vehículos pesados de 40 t de M.M.A.

Cualquier cambio destinado a incrementar la productividad de dicha categoría de vehículos redundaría de forma muy positiva en el mercado del transporte de mercancías por carretera, mediante una disminución de los costes de transporte, una disminución en costes ambientales, una racionalización del sector y una mejora en el mercado logístico. Por este motivo se analiza aquí la mejora derivada de permitir la circulación de vehículos pesados de mercancías que actualmente tienen una limitación de 40 t de M.M.A. con un nuevo límite de 44 t de M.M.A.

Para establecer las mejoras derivadas de dicho cambio primero tenemos que determinar el incremento en la capacidad de carga del vehículo que se va a obtener. Para esto es necesario determinar la tara (masa propia del vehículo motor más la del elemento de transporte de la mercancía, que en nuestro caso se refiere a un semirremolque) correspondiente a los vehículos de esta categoría que circulan por nuestro país.

A partir del análisis de los datos individuales de la EPTMC 2011, se puede analizar cuál es la distribución de la tara de esta categoría de vehículos y establecer un valor medio para los análisis posteriores. Dicho valor medio se corresponde con una tara de 15,5 t.

t	%
<15	19
15	18
16	60
>16	3

Tabla 8. Tara de los vehículos de 40 t de M.M.A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Con este valor medio de la tara de los vehículos pesados de mercancías podemos establecer la capacidad máxima de carga de los vehículos pesados de 40 t y de 44 t, el incremento de productividad en cada viaje sustituyendo el vehículo de 40 t por uno de 44 t (ambos a carga completa), y la disminución del número de vehículos asociada a dicha sustitución de vehículos pesados de 40 t por los de 44 t.

M.M.A.	tara	capacidad de carga	inc cap	% inc cap	% reducción veh
40	15,5	24,5			
42	15,5	26,5	2	8,16	7,55
44	15,5	28,5	4	16,33	14,04

Tabla 9. Capacidad de carga de los vehículos pesados de 40 t, 42 y 44 t, incremento de la capacidad de carga y reducción del nº de vehículos asociada. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Una vez establecidos estos valores de incremento de la productividad de los vehículos de 44 t respecto a los de 40 t (16,33 %) y de reducción del número de vehículos que circularía a carga completa (14,04 %), podemos realizar el cálculo de la estimación del trasvase de carga que se podría realizar para ser transportada en vehículos de 44 t a plena carga.

Como hemos visto anteriormente, a tenor de los datos analizados, en el sector del transporte de mercancías se ha ido produciendo un cambio progresivo hacia el uso de vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes. Por este motivo la posible captación de flujos de tráfico desde otras categorías inferiores se antoja complicada, debido a la continuada implantación de los vehículos de 40 t o más de M.M.A.

De igual manera podemos despreciar el cambio modal desde el transporte ferroviario de mercancías. Las variaciones de productividad introducidas por el cambio propuesto son influyentes en el global del sector del transporte por carretera, pero de forma individualizada (por envío realizado) no revisten un cambio significativo que pudiera redundar en una mejora tan importante como para justificar un cambio de modo.

Asimismo vamos a despreciar la componente asociada a la aparición de transportes inducidos por dicho cambio, ya que, al no introducir una nueva modalidad de transporte, sino una modificación de una ya existente, no aparece un número significativo de usuarios no presentes antes en el sector por la no existencia de dicho servicio, con lo cual hablaríamos de valores inducidos totalmente despreciables.

De este modo podemos afirmar que el potencial de uso de los vehículos pesados de mercancías de 44 t pasa por el trasvase de mercancías de vehículos pesados de mercancías de 40 t que están circulando a capacidad completa o a un porcentaje muy elevado de dicha capacidad.

Para establecer el valor correspondiente a dicho trasvase de mercancías se ha realizado el análisis de los valores individuales de la EPTMC para poder determinar el valor de los parámetros básicos del transporte por carretera (operaciones, toneladas, toneladas-kilómetro y vehículos-kilómetro) para los vehículos de 40 t con un porcentaje de ocupación de su capacidad de carga del 80, 90 y 100 % en peso, los cuales se presentan en las tablas siguientes.





Tte. mercancías en vehículos de MMA = 40 t con ocupación >= 80% y < 90% en peso								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	8.109.163	11,74	4.238.433.280	25,00	394.408	11,78	209.293.206	25,20
2	714.946	1,03	188.158.365	1,11	35.379	1,06	9.290.332	1,12
3	13.190.446	19,09	432.808.146	2,55	633.497	18,92	20.408.376	2,46
4	12.232.548	17,71	3.753.671.903	22,14	595.289	17,78	183.613.814	22,11
5	432.891	0,63	199.099.894	1,17	21.498	0,64	9.966.555	1,20
6	2.361.355	3,42	732.027.751	4,32	112.435	3,36	34.907.446	4,20
7	3.109.269	4,50	284.553.049	1,68	147.850	4,42	13.761.390	1,66
8	4.430.600	6,41	1.321.479.156	7,79	212.850	6,36	63.805.400	7,68
9	5.550.050	8,03	736.216.791	4,34	269.287	8,04	35.757.227	4,31
10	3.610.138	5,23	917.964.654	5,41	170.523	5,09	43.480.121	5,23
11	1.300.747	1,88	452.569.834	2,67	64.369	1,92	22.078.201	2,66
12	1.304.482	1,89	595.631.685	3,51	63.977	1,91	28.929.611	3,48
13	387.516	0,56	152.919.353	0,90	18.954	0,57	7.523.509	0,91
14	4.813.425	6,97	464.947.868	2,74	234.373	7,00	22.544.230	2,71
15	3.008.376	4,35	1.240.246.936	7,32	149.626	4,47	63.517.404	7,65
16	515.167	0,75	175.762.510	1,04	25.216	0,75	8.708.021	1,05
17	10.626	0,02	3.187.698	0,02	531	0,02	159.385	0,02
18	1.525.241	2,21	812.973.303	4,80	75.439	2,25	40.276.572	4,85
19	2.474.406	3,58	251.873.389	1,49	122.611	3,66	12.552.402	1,51
98	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<b>Total</b>	<b>69.081.389</b>	<b>100</b>	<b>16.954.525.565</b>	<b>100</b>	<b>3.348.113</b>	<b>100</b>	<b>830.573.202</b>	<b>100</b>
% sobre global con carga	4,71		8,20		3,03		5,73	
% sobre veh 40t con carga	8,31		10,59		7,88		8,89	

Tabla 10. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de 40 t de M.M.A. por tipo de mercancía para una ocupación >= 80% y <90% en peso. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Tte. mercancías en vehículos de MMA = 40 t con ocupación >= 90% y < 100% en peso								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	21.881.460	11,07	8.286.396.963	21,34	913.057	11,15	357.297.941	21,63
2	5.691.209	2,88	244.476.273	0,24	222.327	2,72	9.698.706	0,59
3	61.034.548	30,87	2.935.382.253	2,92	2.512.018	30,68	118.559.364	7,18
4	27.659.379	13,99	8.130.697.571	8,10	1.169.740	14,29	350.978.398	21,25
5	309.736	0,16	172.416.213	0,17	13.712	0,17	7.593.668	0,46
6	7.973.712	4,03	2.593.547.750	2,58	335.118	4,09	109.528.436	6,63
7	11.428.793	5,78	1.137.678.106	1,13	454.946	5,56	47.713.124	2,89
8	11.450.229	5,79	4.011.158.560	3,99	478.854	5,85	168.903.784	10,23
9	19.556.822	9,89	2.705.682.426	2,69	792.700	9,68	112.651.023	6,82
10	9.190.421	4,65	3.104.801.684	3,09	381.621	4,66	131.130.079	7,94
11	519.185	0,26	289.037.564	0,29	22.981	0,28	12.611.577	0,76
12	1.115.645	0,56	876.177.926	0,87	48.730	0,60	38.476.643	2,33
13	243.839	0,12	150.555.987	0,15	10.526	0,13	6.545.994	0,40
14	12.577.245	6,35	2.185.601.077	2,18	518.890	6,34	90.986.780	5,51
15	2.034.361	1,03	849.329.019	0,85	89.022	1,09	38.406.100	2,33
16	937.297	0,47	284.078.182	0,28	40.607	0,50	12.493.413	0,76
17	11.476	0,01	6.885.428	0,01	531	0,01	318.770	0,02
18	1.119.345	0,57	572.628.515	0,57	49.186	0,60	25.278.372	1,53
19	2.999.145	1,52	291.389.632	0,29	131.965	1,61	12.613.591	0,76
98	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<b>Total</b>	<b>197.713.845</b>	<b>100</b>	<b>38.827.921.126</b>	<b>52</b>	<b>8.186.532</b>	<b>100</b>	<b>1.651.785.764</b>	<b>100</b>
% sobre global con carga	13,48		18,77		7,41		11,40	
% sobre veh 40t con carga	23,79		24,25		19,27		17,68	

Tabla 11. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de 40 t de M.M.A. por tipo de mercancía para una ocupación >= 90% y < 100% en peso. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Tte. mercancías en vehículos de MMA = 40 t con ocupación >= 100% en peso								
Tipo mercancía	t	%	t-km	%	operaciones	%	veh-km	%
1	36.745.937	8,63	8.631.966.295	14,01	1.444.451	8,58	350.672.696	14,029
2	10.986.921	2,58	441.997.063	0,72	416.355	2,47	16.921.991	0,677
3	170.177.880	39,98	7.594.788.9112	12,33	6.679.629	39,69	296.559.100	11,864
4	53.059.976	12,47	14.010.849.521	22,74	2.155.174	12,81	577.662.109	23,110
5	465.758	0,11	231.958.253	0,38	20.522	0,12	10.345.535	0,414
6	12.736.726	2,99	3.966.972.086	6,44	515.359	3,06	162.400.394	6,497
7	28.387.426	6,67	2.037.387.048	3,31	1.101.053	6,54	80.932.024	3,238
8	20.270.209	4,76	5.266.803.127	8,55	806.225	4,79	212.825.634	8,514
9	42.830.355	10,06	6.004.401.463	9,75	1.672.695	9,94	240.977.892	9,641
10	15.690.803	3,69	5.148.649.663	8,36	628.554	3,74	211.012.541	8,442
11	936.007	0,22	370.437.584	0,60	37.458	0,22	15.320.564	0,613
12	3.247.860	0,76	1.273.211.228	2,07	133.245	0,79	52.499.142	2,100
13	623.372	0,15	315.070.880	0,51	25.911	0,15	13.136.302	0,526
14	17.879.188	4,20	3.228.583.256	5,24	714.644	4,25	130.155.255	5,207
15	2.723.586	0,64	1.442.188.699	2,34	113.256	0,67	60.078.956	2,404
16	1.580.510	0,37	395.020.014	0,64	64.938	0,39	16.352.650	0,654
17	12.751	0,00	6.885.428	0,01	531	0,00	286.893	0,011
18	1.873.609	0,44	687.307.282	1,12	77.105	0,46	28.829.452	1,153
19	5.396.963	1,27	551.776.375	0,90	220.785	1,31	22.599.642	0,904
98	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<b>Total</b>	<b>425.625.837</b>	<b>100</b>	<b>61.606.254.177</b>	<b>100</b>	<b>16.827.890</b>	<b>100</b>	<b>2.499.568.770</b>	<b>100</b>
<b>% sobre global con carga</b>	<b>29,02</b>		<b>29,78</b>		<b>15,24</b>		<b>17,25</b>	
<b>% sobre veh 40t con carga</b>	<b>51,22</b>		<b>38,47</b>		<b>39,60</b>		<b>26,76</b>	

Tabla 12. Principales variables del tte. de mercancías por carretera en España en vehículos de 40 t de M.M.A. por tipo de mercancía para una ocupación = 100% en peso. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

El valor de captación de tráfico de los vehículos autorizados para circular a 44 t depende de la posibilidad de trasvasar cargas que agoten la capacidad del vehículo en peso sin limitaciones del volumen asociado a dichas cargas. De los datos recogidos en la EPTMC no se puede establecer cuáles son las cargas que presentan una limitación en peso o en volumen para su transporte en camión, pero podemos comprobar cuáles son las cargas que, a día de hoy, sí agotan la capacidad de carga (100 % en peso) de los vehículos pesados de transporte de mercancías de 40 t de M.M.A. Dichas categorías son las susceptibles de no limitar en volumen

la carga del vehículo y, por lo tanto, son las susceptibles de ser traspasadas a vehículos de mayor M.M.A.

Se han considerado sólo aquellas categorías que presentan un porcentaje representativo respecto al total de operaciones realizadas, eliminando aquellas que tienen valores inferiores al 1 %. De esta manera obtenemos que los tipos de mercancía susceptibles de trasvasarse a vehículos de 44 t de M.M.A. son: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 y 14. De la bondad de esta consideración nos avalan los análisis realizados a los vehículos con porcentajes de ocupación en peso comprendidos entre el 90 y el 100 %, y entre el 80 y el 90 % que nos da las mismas categorías de mercancías limitadas en peso.

En la captación de mercancía a transportar desde vehículos pesados de mercancías de 40 t que están circulando a capacidad completa tenemos que tener en cuenta que existen una serie de restricciones que impedirán a priori el traspaso completo de toda la mercancía movida por este tipo de vehículos. Por un lado tenemos las restricciones internacionales. Mientras no exista una normativa europea armonizada en este tema no será posible que circulen los vehículos de 44 t de M.M.A. de forma general entre los países europeos, lo cual retrasará la implantación de uso de este tipo de vehículos en esta categoría de tráfico, que según la EPTMC 2011 supone un 2,9 % del total de las operaciones de transporte que se realizan en España. También hay que tener en cuenta que ciertos tipos de vehículos no están preparados para la implantación de este incremento de M.M.A. (como por ejemplo los vehículos cisterna), por lo que dicha implantación será mucho más progresiva. Por otro lado hay que tener en cuenta que existirán unas restricciones a la implantación de dicho incremento de M.M.A. a vehículos que cumplan con la normativa europea de emisiones, que puede ser más o menos restrictiva según el ámbito de aplicación, aunque en principio podemos intuir un nivel mínimo de exigencia Euro 3 o Euro 4, lo cual limita el parque inicialmente disponible. Por todos estos motivos se han determinado dos escenarios de implantación del incremento de M.M.A. a 44 t: el escenario A, en el cual la captación de mercancías sobre los vehículos pesados de mercancías de 40 t que están circulando a capacidad completa es del 80 %, y el escenario B, en el cual dicha captación llega al 100 %.

Por otra parte se ha tenido también en cuenta la posibilidad de trasvase de mercancías desde vehículos que no circulen actualmente agotando su capacidad de carga en peso, pero que presenten un valor elevado de uso de dicha capacidad. De esta manera se han analizado los valores correspondientes a vehículos que circulan con una ocupación de entre el 80 y el 90 % de su capacidad en peso y para vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 %. Establecer un valor de traspaso de la mercancía transportada por estas categorías de vehículos es complicado, pero atendiendo a estudios similares realizados anteriormente podemos admitir como plausible una captación de mercancía transportada de un 15 % en el escenario A y un 30 % en el escenario B de los vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 % de su capacidad en peso y despreñar el traspaso de mercancía de los vehículos que circulan con ocupaciones inferiores.

A partir de estos valores de captación de mercancías sobre los vehículos pesados de mercancías de 40 t se han establecido también unos porcentajes de uso de los vehículos pesados de mercancías de 42 y 44 t, teniendo en cuenta que no todos los vehículos pesados de mercancías de 40 t pasarán directamente a una carga completa que agote la capacidad del vehículo, sino que habrá una implementación progresiva hacia vehículos con una M.M.A. de 42 t y otros con una M.M.A. de 44 t.

De esta manera, en el escenario A, los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 % se reparten en un 33 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 67 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44 t. Igualmente, en el escenario A, los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación del 100 % de su capacidad en peso se reparten en un 25 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 75 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44 t.

Para el escenario B los valores son similares, considerando que los vehículos captados a partir de vehículos

que circulan con una ocupación de entre el 90 y el 100 % se reparten en un 33 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 67 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44 t. De igual manera, en el escenario B, los vehículos captados a partir de vehículos que circulan con una ocupación del 100 % de su capacidad en peso se reparten en un 30 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 42 t y un 70 % en vehículos pesados de mercancías con una M.M.A. de 44 t.

<b>Veh-km con carga traspasados de vehículos de 40 t a 42 y 44t. Escenario A</b>			
<b>Tipo mercancía</b>	<b>oc &gt;90 y &lt;100</b>	<b>oc = 100</b>	<b>total</b>
1	53.594.691	280.538.157	334.132.848
2	1.454.806	13.537.593	14.992.399
3	17.783.905	237.247.280	255.031.184
4	52.646.760	462.129.687	514.776.447
5	0	0	0
6	16.429.265	129.920.315	146.349.581
7	7.156.969	64.745.619	71.902.588
8	25.335.568	170.260.507	195.596.075
9	16.897.654	192.782.314	209.679.967
10	19.669.512	168.810.033	188.479.545
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	13.648.017	104.124.204	117.772.221
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
98	0	0	0
<b>Total</b>	<b>224.617.145</b>	<b>1.824.095.709</b>	<b>2.048.712.854</b>
<b>% sobre global con carga</b>	<b>1,55</b>	<b>12,59</b>	<b>14,14</b>
<b>% sobre veh 40t con carga</b>	<b>2,40</b>	<b>19,53</b>	<b>21,93</b>

Tabla 13. Captación de veh-km de los vehículos de 42 y 44 t de M.M.A. en el escenario A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Aplicando los porcentajes mencionados a cada escenario se obtiene la captación de flujos de mercancías por parte de los vehículos pesados de mercancías de 42 y 44 t de M.M.A. desde los vehículos pesados de mercancías de 40 t de M.M.A. que están circulando a capacidad completa o a un porcentaje muy elevado de dicha capacidad.

<b>Veh-km con carga traspasados de vehículos de 40 t a 42 y 44t. Escenario B</b>			
<b>Tipo mercancía</b>	<b>oc &gt;90 y &lt;100</b>	<b>oc = 100</b>	<b>total</b>
1	107.189.382	350.672.696	457.862.078
2	2.909.612	16.921.991	19.831.603
3	35.567.809	296.559.100	332.126.909
4	105.293.520	577.662.109	682.955.629
5	0	0	0
6	32.858.531	162.400.394	195.258.925
7	14.313.937	80.932.024	95.245.961
8	50.671.135	212.825.634	263.496.769
9	33.795.307	240.977.892	274.773.199
10	30.339.024	211.012.541	250.351.565
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	27.296.034	130.155.255	157.451.289
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
98	0	0	0
<b>Total</b>	<b>449.234.291</b>	<b>2.280.119.636</b>	<b>2.729.353.927</b>
<b>% sobre global con carga</b>	<b>3,10</b>	<b>15,74</b>	<b>18,84</b>
<b>% sobre veh 40t con carga</b>	<b>4,81</b>	<b>24,41</b>	<b>29,22</b>

Tabla 14. Captación de veh-km de los vehículos de 42 y 44 t de M.M.A. en el escenario B. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Operaciones con carga traspasadas de vehículos de 40 t a 42 y 44t. Escenario A			
Tipo mercancía	oc >90 y <100	oc = 100	total
1	136.959	1.155.561	1.292.519
2	33.349	333.084	366.433
3	376.803	5.343.703	5.720.506
4	175.461	1.724.139	1.899.600
5	0	0	0
6	50.268	412.287	462.555
7	68.242	880.842	949.084
8	71.828	644.980	716.808
9	118.905	1.338.156	1.457.061
10	57.243	502.844	560.087
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	77.833	571.715	649.549
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
98	0	0	0
<b>Total</b>	<b>1.166.891</b>	<b>12.907.311</b>	<b>14.074.201</b>
% sobre global con carga	1,06	11,69	12,75
% sobre veh 40t con carga	2,75	30,38	33,12

Tabla 15. Captación de operaciones de los vehículos de 42 y 44 t de M.M.A. en el escenario A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

<b>Operaciones con carga traspasadas de vehículos de 40 t a 42 y 44t. Escenario B</b>			
<b>Tipo mercancía</b>	<b>oc &gt;90 y &lt;100</b>	<b>oc = 100</b>	<b>total</b>
1	273.917	1.444.451	1.718.368
2	66.698	416.355	483.053
3	753.605	6.679.629	7.433.234
4	350.922	2.155.174	2.506.095
5	0	0	0
6	100.535	515.359	615.894
7	136.484	1.101.053	1.237.537
8	143.656	806.225	949.882
9	237.810	1.672.695	1.910.505
10	114.486	628.554	743.041
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	155.667	714.644	870.311
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
98	0	0	0
<b>Total</b>	<b>2.333.781</b>	<b>16.134.139</b>	<b>18.467.920</b>
<b>% sobre global con carga</b>	<b>2,11</b>	<b>14,61</b>	<b>16,73</b>
<b>% sobre veh 40t con carga</b>	<b>5,49</b>	<b>37,97</b>	<b>43,46</b>

Tabla 16. Captación de operaciones de los vehículos de 42 y 44 t de M.M.A. en el escenario B. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.



Esta captación de tráfico se corresponde con un 14,14 % en el escenario A y un 18,84 % en el escenario B del global de los veh-km con carga realizados por todos los vehículos pesados de mercancías que circulan en España (14.487.110.734 veh-km). Respecto a los veh-km con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t (9.341.889.451 veh-km), el escenario A supone una captación del 21,93 % y el escenario B supone una captación del 29,22 %.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que dicha captación de tráfico por parte de los vehículos pesados de mercancías de 42 Y 44 t de M.M.A. se corresponde asimismo con una reducción de las operaciones realizadas correspondiente al incremento de la capacidad de carga de los vehículos, que supone un menor número de vehículos circulando a plena carga para llevar la misma cantidad de mercancía.

Dicha reducción se corresponde, como ya se presentó anteriormente, con unos valores de 7,55 y 14,04 %, cuya aplicación por tipos de mercancía y a nivel global se puede ver en las tablas siguientes.

Reducción de las operaciones con carga con vehículos de 42 y 44 t. Escenario A				
Tipo mercancía	Origen	Destino		reducción
	veh 40 t	veh 42 t	veh 44 t	
1	1.292.519	290.230	830.171	172.119
2	366.433	81.787	235.496	49.150
3	5.720.506	1.263.853	3.680.086	776.567
4	1.899.600	424.220	1.220.753	254.627
5	0	0	0	0
6	462.555	103.978	297.062	61.515
7	949.084	210.201	610.413	128.470
8	716.808	160.584	460.504	95.720
9	1.457.061	323.980	936.762	196.319
10	560.087	125.575	359.791	74.720
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	649.549	146.665	416.968	85.917
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
98	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>14.074.201</b>	<b>3.131.073</b>	<b>9.048.005</b>	<b>1.895.124</b>
% sobre global con carga	12,75	2,84	8,20	1,72
% sobre veh 40t con carga	33,12	7,37	21,29	4,46

Tabla 17. Reducción de las operaciones de transporte de mercancías en el escenario A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Reducción de las operaciones con carga con vehículos de 42 y 44 t. Escenario B				
Tipo mercancía	Origen	Destino		reducción
	veh 40 t	veh 42 t	veh 44 t	
1	1.718.368	456.236	1.039.228	222.904
2	483.053	127.768	291.959	63.325
3	7.433.234	1.953.258	4.487.931	992.045
4	2.506.095	663.096	1.514.781	328.219
5	0	0	0	0
6	615.894	163.634	372.519	79.741
7	1.237.537	325.711	747.374	164.452
8	949.882	251.833	574.330	123.718
9	1.910.505	504.108	1.154.265	252.132
10	743.041	197.095	449.304	96.641
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	870.311	231.870	526.638	111.803
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
98	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>18.467.920</b>	<b>4.874.609</b>	<b>11.158.330</b>	<b>2.434.980</b>
% sobre global con carga	16,73	4,42	10,11	2,21
% sobre veh 40t con carga	43,46	11,47	26,26	5,73

Tabla 18. Reducción de las operaciones de transporte de mercancías en el escenario B. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

De esta manera resulta que la introducción de la posibilidad de aumentar la M.M.A. de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes a 44 t supone una reducción de 1.895.124 operaciones de transporte con carga en el escenario A, que se corresponde con una disminución del 1,72 % respecto a las operaciones globales con carga de todo el sector (que están cifradas en 110.407.659 operaciones) y un 4,46 % respecto a

las operaciones con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t. En el escenario B se obtienen 2.434.980 operaciones de transporte menos, que corresponden a una disminución del 2,21 % respecto a las operaciones globales con carga y un 5,73 % respecto a las operaciones con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

A estos valores de operaciones de transporte con carga eliminadas hay que añadirles también los correspondientes viajes en vacío que se eliminan. Como ya se apuntó anteriormente, la EPTMC 2011 fija el valor de las operaciones en vacío en un 45,02 % para el sector del transporte de mercancías y en un 43,65 % para el grupo de los vehículos de 40 t de M.M.A. Como no tenemos datos para suponer la evolución de los retornos en vacío asociados a la implantación del incremento de M.M.A., vamos a tomar como valor representativo de las operaciones en vacío el mismo que nos indica la EPTMC 2011 para los vehículos de 40 t de M.M.A.

Así se obtiene una reducción en el escenario A de 827.222 operaciones en vacío, que se corresponde con una disminución del 0,91 % respecto a las operaciones globales en vacío (que están cifradas en 90.417.681 operaciones) y un 2,51 % respecto a las operaciones en vacío de los vehículos con una M.M.A. de 40 t (32.915.550 operaciones). Para el escenario B se obtienen 1.062.869 operaciones en vacío menos, que se corresponde con una disminución del 1,18 % respecto a las operaciones globales en vacío y un 3,23 % respecto a las operaciones en vacío de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

Por lo tanto, si sumamos el total de operaciones con carga y en vacío que se eliminan, obtenemos que en el escenario A tenemos una reducción de 2.722.345 operaciones, que se corresponde con una disminución del 1,36 % respecto a las operaciones globales del sector y un 3,61 % respecto a las operaciones de los vehículos con una M.M.A. de 40 t. Para el escenario B se obtienen 3.497.849 operaciones menos, que se corresponde con una disminución del 1,74 % respecto a las operaciones globales de todo el sector y un 4,64 % respecto a las operaciones de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

#### Reducción de las operaciones con vehículos de 42 y 44 t.

	Escenario A		
	con carga	sin carga	totales
Valor	1.895.124	827.222	2.722.345
% sobre global	1,72	0,91	1,36
% sobre 40t	4,46	2,51	3,61
	Escenario B		
	con carga	sin carga	totales
Valor	2.434.980	1.062.869	3.497.849
% sobre global	2,21	1,18	1,74
% sobre 40t	5,73	3,23	4,64

Tabla 19. Reducción de las operaciones correspondientes a veh de 42 y 44 t de M.M.A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Por otra parte, aplicando las reducciones antes mencionadas de 7,55 % y 14,04 % a los veh-km, resulta que la introducción de la posibilidad de aumentar la M.M.A. de los vehículos pesados de transporte de mercancías del tipo cabeza tractora más semirremolque en su configuración de cinco o seis ejes a 44 t supone una reducción de tráfico en el escenario A de 272.331.994 veh-km en carga, que corresponden a un 1,88 % de los veh-km con carga globales del sector y a un 2,92 % sobre los veh-km con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

Igualmente obtenemos una reducción de tráfico en el escenario B de 353.133.938 veh-km en carga, que se corresponde con una disminución del 2,44 % respecto a los veh-km con carga globales del sector y a un 3,78 % sobre los veh-km con carga de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

Reducción de los veh-km con carga con vehículos de 42 y 44 t. Escenario A				
Tipo mercancía	Origen	Destino		reducción
	veh 40 t	veh 42 t	veh 44 t	
1	334.132.848	76.666.640	214.144.467	43.321.741
2	14.992.399	3.354.422	9.632.876	2.005.101
3	255.031.184	56.433.768	164.040.113	34.557.304
4	514.776.447	115.419.619	330.683.841	68.672.987
5	0	0	0	0
6	146.349.581	32.945.190	93.975.137	19.429.254
7	71.902.588	16.103.792	46.194.058	9.604.738
8	195.596.075	44.335.511	125.511.258	25.749.306
9	209.679.967	46.603.418	134.811.252	28.265.297
10	188.479.545	42.295.030	121.066.062	25.118.453
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	117.772.221	26.550.509	75.613.898	15.607.814
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
98	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>2.048.712.854</b>	<b>460.707.899</b>	<b>1.315.672.961</b>	<b>272.331.994</b>
% sobre global con carga	14,14	3,18	9,08	1,88
% sobre veh 40t con carga	21,93	4,93	14,08	2,92

Tabla 20. Reducción de los veh-km con carga del transporte de mercancías en el escenario A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

Reducción de los veh-km con carga con vehículos de 42 y 44 t. Escenario B				
Tipo mercancía	Origen	Destino		reducción
	veh 40 t	veh 42 t	veh 44 t	
1	457.862.078	123.175.428	277.499.674	57.186.976
2	19.831.603	5.253.553	11.989.296	2.588.754
3	332.126.909	87.363.453	200.559.813	44.203.644
4	682.955.629	181.160.298	412.972.975	88.822.356
5	0	0	0	0
6	195.258.925	51.923.947	118.118.104	25.216.874
7	95.245.961	25.247.430	57.587.346	12.411.186
8	263.496.769	70.368.017	159.507.493	33.621.259
9	274.773.199	72.482.737	166.002.011	36.288.451
10	250.351.565	66.442.982	151.396.731	32.511.852
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	157.451.289	41.907.666	95.261.036	20.282.586
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
98	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>2.729.353.927</b>	<b>725.325.510</b>	<b>1.650.894.479</b>	<b>353.133.938</b>
% sobre global con carga	18,84	5,01	11,40	2,44
% sobre veh 40t con carga	29,22	7,76	17,67	3,78

Tabla 21. Reducción de los veh-km con carga del transporte de mercancías en el escenario B. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

A estos valores de los veh-km con carga eliminados hay que añadirles también los correspondientes a los viajes en vacío que se eliminan. En este caso hemos aplicado la relación existente entre los veh-km en vacío y los veh-km totales realizados por los vehículos. La EPTMC 2011 fija el valor de esta relación en un 23,94 % para el sector del transporte de mercancías y en un 20,14 % para el grupo de los vehículos de 40 t de M.M.A. Tomaremos como valor representativo el mismo que nos indica la EPTMC 2011 para los vehículos de 40 t de M.M.A.

Así se obtiene una reducción en el escenario A de 54.847.664 veh-km asociados a operaciones en vacío, que se corresponde con una disminución del 1,20 % respecto a los veh-km globales en vacío y un 2,33 % respecto a los veh-km en vacío de los vehículos con una M.M.A. de 40 t. Para el escenario B se obtienen 71.121.175 veh-km en vacío menos, que se corresponden con una disminución del 1,56 % respecto a los veh-km globales en vacío y un 3,02 % respecto a los veh-km en vacío de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

Por lo tanto, si sumamos el total de veh-km con carga y en vacío que se eliminan, obtenemos que en el escenario A existe una reducción de 327.179.657 veh-km, que se corresponde con una disminución del 1,72 % respecto a los veh-km globales del sector y un 2,80 % respecto a los veh-km de los vehículos con una M.M.A. de 40 t. Para el escenario B se obtienen 424.255.113 veh-km menos, que se corresponde con una disminución del 2,23 % respecto a los veh-km globales de todo el sector y un 3,63 % respecto a los veh-km de los vehículos con una M.M.A. de 40 t.

**Reducción de los veh-km con vehículos de 42 y 44 t.**

	Escenario A		
	con carga	sin carga	totales
Valor	272.331.994	54.847.664	327.179.657
% sobre global	1,88	1,20	1,72
% sobre 40t	2,92	2,33	2,80
	Escenario B		
	con carga	sin carga	totales
Valor	353.133.938	71.121.175	424.255.113
% sobre global	2,44	1,56	2,23
% sobre 40t	3,78	3,02	3,63

Tabla 22. Reducción de los veh-km correspondientes a veh de 42 y 44 t de M.M.A. Fuente: elaboración propia a partir de los datos individuales de la EPTMC 2011.

## 4 Evaluación del aumento de agresividad de los vehículos pesados tipo T2S3 y T3S3 al pasar de 40 a 44t de carga sobre los firmes de carreteras españoles

### Objeto del trabajo

Determinar el efecto del aumento de carga al pasar de 40 a 44t en los vehículos pesados tipos T2S3 y T3S3, sobre todas las firmes de carreteras definidos por la Norma 6.1 IC Secciones de firme, Orden Ministerio de Fomento 3460/2003.

### Metodología

La metodología de trabajo ha consistido en el cálculo del estado tensional de las distintas estructuras de firmes analizadas, producido por las cargas por eje de los vehículos pesados tipos T2S3 y T3S3, considerando diferentes configuraciones de carga (15,5, 40, 42 y 44t). Los parámetros determinados

han sido la deformación tangencial máxima en la fibra inferior de las capas de mezclas bituminosas  $\epsilon_i$  y la tensión tangencial máxima en la fibra inferior de las capas tratadas con cemento  $\sigma_i$ . Ambos parámetros han permitido evaluar la agresividad de cada uno de los vehículos pesados sobre las distintas estructuras de firme evaluadas.

Para determinar estos parámetros se ha utilizado el software BISAR 3.0: Bitumen Stress Analysis in Roads, desarrollado por la empresa SHELL.

La agresividad de cada camión se ha calculado a partir del daño causado por el paso de sus ejes sobre una capa del firme, definido según las ecuaciones [1] y [2]:

$$A_i = \left( \frac{\delta_i}{\delta_0} \right)^\alpha \quad \text{para firmes flexibles} \quad [1] \quad \text{Y} \quad A_i = \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^\alpha \quad \text{para firmes semirrígidos} \quad [2]$$

donde:

- $A_i$  es la agresividad causada por un eje
- $\epsilon_i$  es la deformación en la fibra inferior de las capas de mezclas bituminosas debida al eje analizado
- $\epsilon_0$  es la deformación horizontal en la fibra inferior de las capas de mezclas bituminosas debida al eje de referencia
- $\sigma_i$  es la tensión horizontal en la fibra inferior de las capas tratadas con cemento debida al eje analizado
- $\sigma_0$  es la tensión horizontal en la fibra inferior de las capas tratadas con cemento debida al eje de referencia
- $\alpha$  es el coeficiente asociado a la pendiente de la ley de fatiga de los materiales

La agresividad de un vehículo pesado AVP es la suma de las agresividades de cada uno de sus ejes:

$$A_{VP} = \sum_{i=1}^n A_i$$

Se ha considerado como eje de referencia un eje simple con ruedas gemelas de 13 toneladas de peso total, Figura 1. Siguiendo la metodología desarrollada por el SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes) (1), los datos considerados para el eje de referencia son:

$$r = 0,125 \text{ m}$$

$$P = 3,25 \text{ t}$$

$$Q = 0,662 \text{ MPa}$$

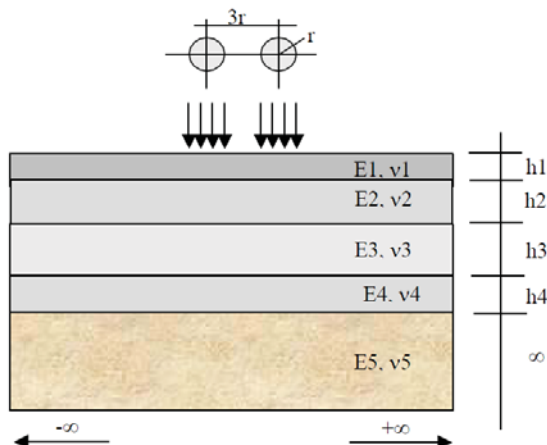


Figura 1: Configuración de ruedas del eje de referencia.

Siendo  $E_i$  y  $\nu_i$  los módulos de Young y coeficientes de Poisson característicos de cada capa del firme.

### Hipótesis de cálculo

Estructuras: se han analizado todas las secciones de firmes flexibles y semirrígidos del catálogo de la Norma 6.1 IC (2003), abarcando desde la categoría de tráfico T00 (la más alta) hasta la categoría de tráfico T42 (la más baja), sobre las tres categorías de explanada disponibles: E1, E2 y E3. Como firmes semirrígidos se han contemplado sólo las secciones de mezcla bituminosa sobre suelo-cemento, tipificadas para todas las categorías de tráfico. Se adjunta en el Anejo 1 del presente estudio el catálogo de secciones estructurales de la Norma 6.1 IC (2003).

Para la caracterización de las distintas capas se han considerado los siguientes módulos de Young y coeficientes de Poisson:

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Mezcla bituminosa	5000	0.35
Zahorra artificial	200 sobre E1 300 sobre E2 500 sobre E3	0.30
Suelo-cemento	1500	0.35
Explanada E1	50	0.40
Explanada E2	100	0.40
Explanada E3	260	0.40

Tabla 1. Módulo de Young y coeficiente de Poisson de las capas de firmes.

### Adherencia entre capas: total

Vehículos pesados: se han analizado dos tipos de vehículos pesados, uno tipo T2S3 con 15.5 t (vacío), 40, 42 y 44 t, y uno tipo T3S3 con 44t (cargados), Figura 2.

Vehículo tipo T2S3, formado por:

- Eje simple, rueda simple
- Eje simple, ruedas gemelas
- Eje tridem, ruedas simples o gemelas

Vehículo tipo T3S3, formado por:

- Eje simple, rueda simple
- Eje tándem, ruedas gemelas
- Eje tridem, ruedas simples o gemelas



Figura 2: Configuración de ejes de los vehículos pesados T2S3 y T3S3.

Con ambos tipos de vehículos pesados se han analizado los efectos de sus ejes considerando los ejes tridem con ruedas simples por ser éstos los más representativos del parque.

Distancia entre ejes y reparto de cargas: para el vehículo pesado tipo T2S3 de 40 toneladas se ha utilizado la distancia entre ejes y el reparto de cargas recomendado por un estudio similar realizado en Francia (2), procurando siempre mantener las cargas por eje debajo de la carga máxima permitida en España, y el peso del eje delantero constante, Tabla 2. Para el vehículo en estado vacío se ha considerado un peso de 15.5 toneladas.

Carga máxima admisible por eje motor: 11.5t.



Carga máxima permitida por eje tandem: 16t (separación entre ejes superior a 1 m e inferior a 1.30 m), ó 18t (distancia entre ejes igual o superior a 1.30 m e inferior a 1.80 m). Si el eje motor va equipado con neumáticos dobles y suspensión neumática o cuando el eje motor esté equipado con neumáticos dobles y la masa máxima de cada eje no exceda de las 9.5 toneladas, la carga máxima es 19t.

Carga máxima permitida por eje tridem: 21t (distancia entre ejes igual o inferior a 1.30 m), 24t (distancia entre ejes superior a 1.30 m e inferior o igual a 1.40 m).

En el presente estudio, al sobrecargar los ejes para simular el efecto de 42t y 44t, se han superado los valores máximos admisibles de carga por eje descritos en los párrafos precedentes. Por esta razón, en el caso de permitirse la circulación de vehículos pesados tipo T2S3 con 42 y 44t, debería modificarse la reglamentación vigente relativa a las cargas máximas permitidas.

Presiones de contacto: 0.662 MPa para ejes simples, tándem y 0.700 MPa para los ejes tridem con ruedas simples, de acuerdo con la recomendación del SETRA (1).

Radio de la huella del neumático: manteniendo la presión de contacto del neumático sobre el pavimento, se ha calculado el radio del círculo con área equivalente a la de contacto.

Coefficiente  $\alpha$  para el cálculo de la agresividad: se han considerado dos hipótesis, la propuesta por SETRA (1), de 5 para los materiales bituminosos y 12 para los tratados con cemento (que denominaremos Hipótesis A), y la propuesta por las normas de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (3), de 4 y 8 respectivamente (que denominaremos Hipótesis B) (Tabla 2).

Presión MPa	Carta t	Nº ruedas	Total t	Area cm2	Radio cm	Peso total t
<b>Camión 15.5 t T2S3</b>						
0.662	3.75	2	7.5	566.47	13.43	15.50
0.662	0.80	4	3.2	120.85	6.20	
0.700	0.80	6	4.8	114.29	6.03	
<b>Camión 40 t T2S3</b>						
0.662	3.75	2	7.5	566.47	13.43	40.00
0.662	2.875	4	11.5	434.29	11.76	
0.700	3.50	6	21	500.00	12.62	
<b>Camión 42t T2S3</b>						
0.662	3.75	2	7.5	566.47	13.43	42.00
0.662	3.0075	4	12.03	454.31	12.03	
0.700	3.745	6	22.47	535.00	13.05	
<b>Camión 44t T2S3</b>						
0.662	3.75	2	7.5	566.47	13.43	44.00
0.662	3.14	4	12.56	474.32	12.29	
0.700	3.99	6	23.94	570.00	13.47	
<b>Camión 44t T3S3</b>						
0.662	3.75	2	7.5	566.47	13.43	44.00
0.662	2.50	8	20.0	377.64	10.97	
0.700	2.75	6	16.5	392.86	11.19	

Tabla 2. Reparto de cargas por eje y por rueda.

**Resultados del cálculo del coeficiente de agresividad – Hipótesis A ( $\alpha$  igual a 5 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 12 para las capas de suelo-cemento)**

En primer lugar se procedió a realizar una serie de cálculos de tanteo para confirmar las tendencias del coeficiente de agresividad de los distintos vehículos pesados. Así se pudo comprobar que:

- Los resultados de la agresividad de los vehículos sobre las secciones de firme apoyadas sobre una explanada tipo E2 siempre arrojan valores intermedios a los obtenidos para las secciones de firme apoyadas sobre explanadas tipo E1 y E3. Por tanto, se ha decidido concentrar los cálculos para las explanadas de mínima y máxima capacidad soporte, E1 y E3.
- Los resultados de la agresividad de los vehículos pesados sobre las secciones de firmes para una misma categoría de explanada también muestran tendencias crecientes de agresividad a medida que la categoría de tráfico pesado se reduce; por ello se ha decidido simplificar los cálculos y aplicarlos a las secciones de firme para las categorías de tráfico T00, T1, T31 y T41 (para T0 se obtendrán valores entre los obtenidos para T00 y T1, y para T2 valores entre los obtenidos entre T1 y T31).

Se presentan a continuación los resultados del coeficiente de agresividad de cada vehículo analizado para las explanadas y categorías de tráfico escogidas, respecto al eje de referencia. Los resultados individuales se recogen en el Anejo 2.

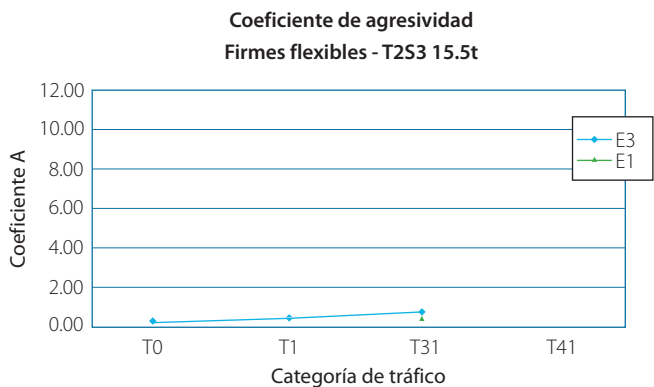


Figura 3: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 15.5t en firmes flexibles. Hipótesis A.

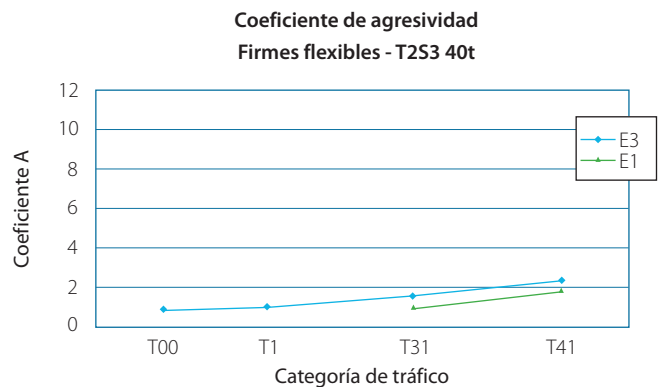


Figura 4: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 40t en firmes flexibles. Hipótesis A.

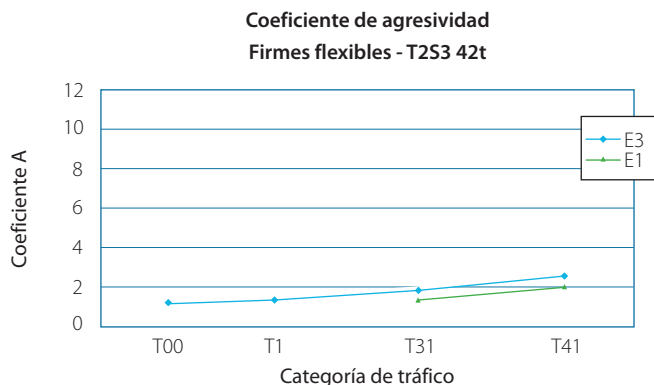


Figura 5: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 42t en firmes flexibles. Hipótesis A.

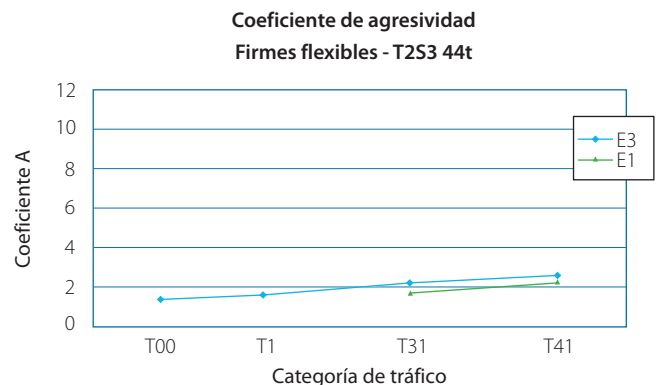


Figura 6: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 44t en firmes flexibles. Hipótesis A.

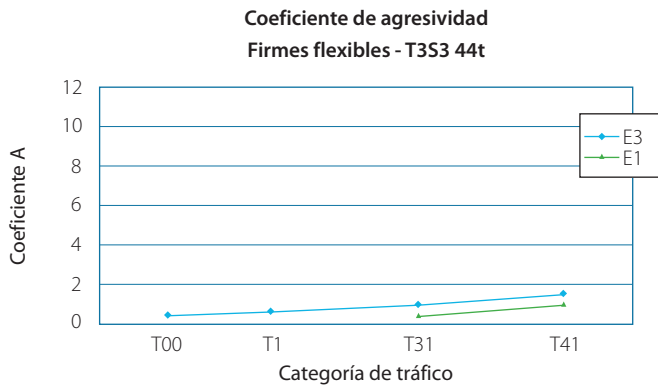


Figura 7: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T3S3 con 44t en firmas flexibles. Hipótesis A.

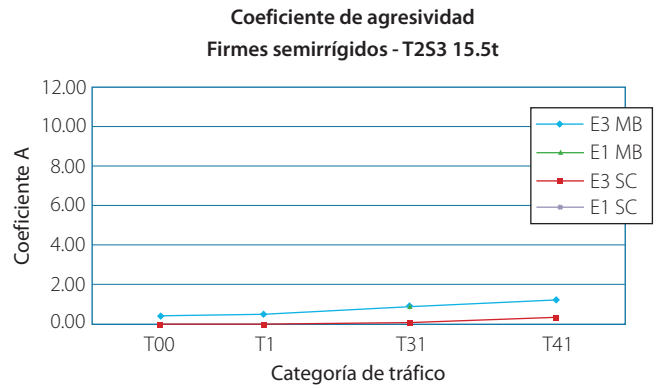


Figura 8: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 15.5t en firmas semirrígidos. Hipótesis A.

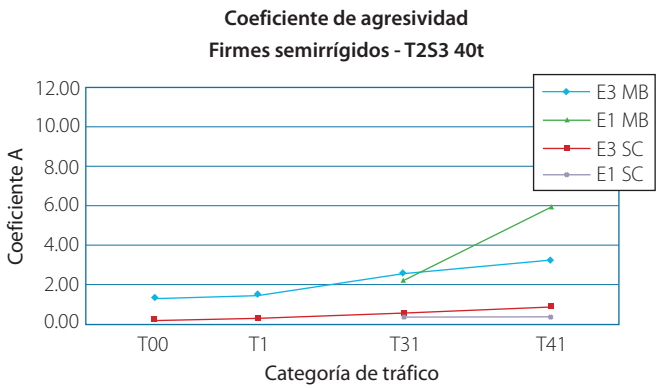


Figura 9: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 40t en firmas semirrígidos. Hipótesis A.

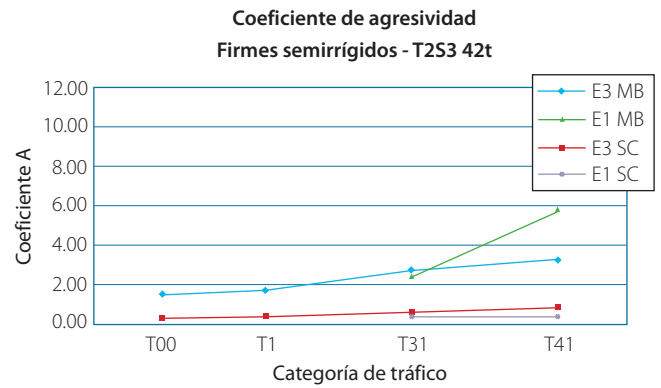


Figura 10: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 42t en firmas semirrígidos. Hipótesis A.

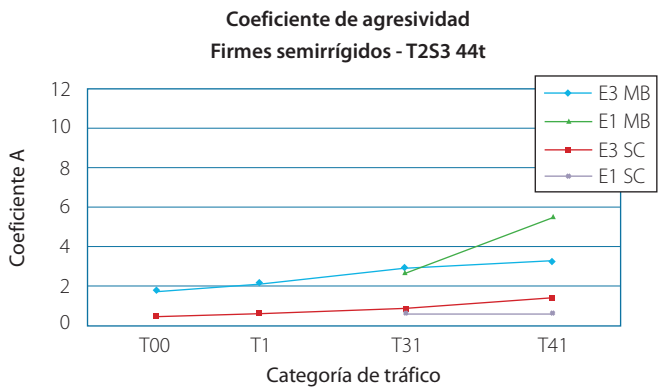


Figura 11: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 44t en firmas semirrígidos. Hipótesis A.

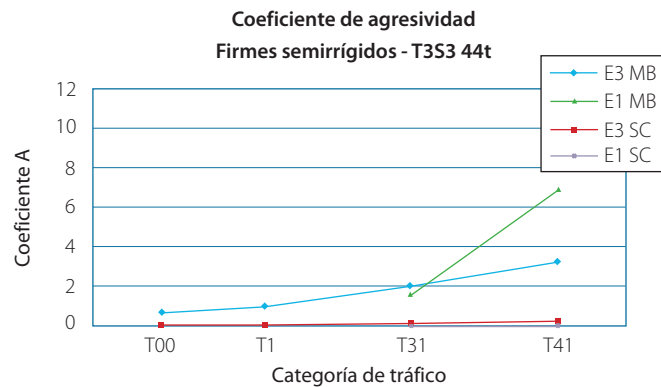


Figura 12: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T3S3 con 44t en firmas semirrígidos. Hipótesis A.

En segundo lugar, se ha calculado el cociente entre los coeficientes de agresividad del vehículo vacío con 15.5t y cargados con 42 y 44t, y el del vehículo cargado con 40t. Figuras 13, 14, 15 y 16.

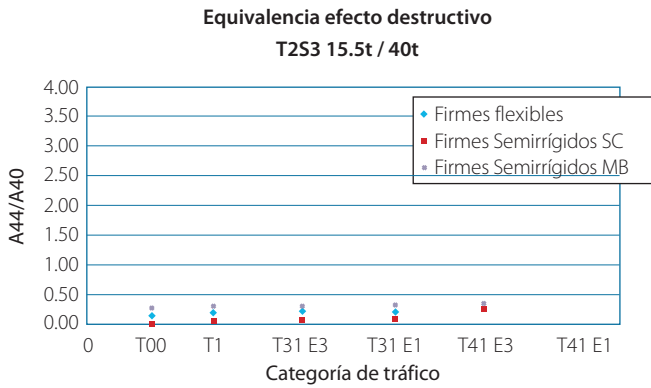


Figura 13: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T2S3 15.5t y T2S3 40t. Hipótesis A.

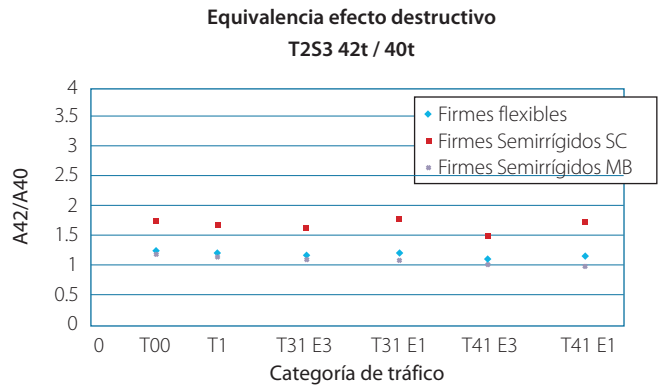


Figura 14: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T2S3 42t y T2S3 40t. Hipótesis A.

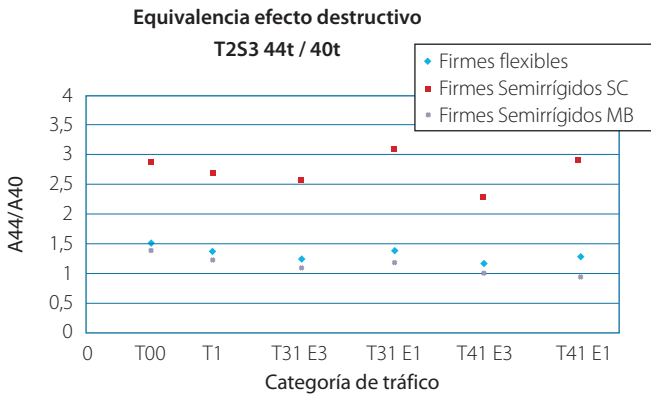


Figura 15: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T2S3 44t y T2S3 40t. Hipótesis A.

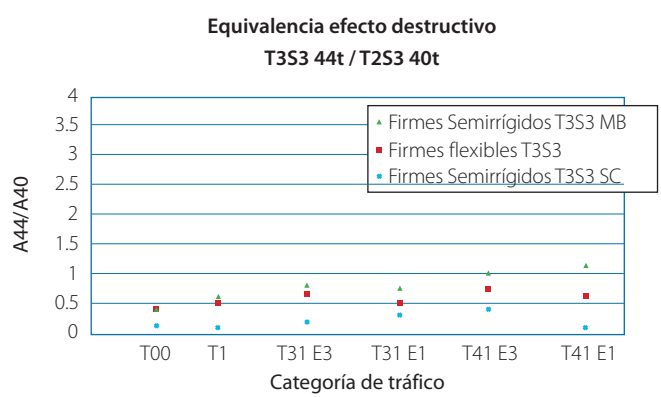


Figura 16: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T3S3 44t y T2S3 40t. Hipótesis A.

A modo de resumen, se presenta una figura donde se han recogido los valores mínimos, medios y máximos de los cocientes calculados en las figuras anteriores para cada categoría de tráfico pesado analizada y con cada vehículo pesado.

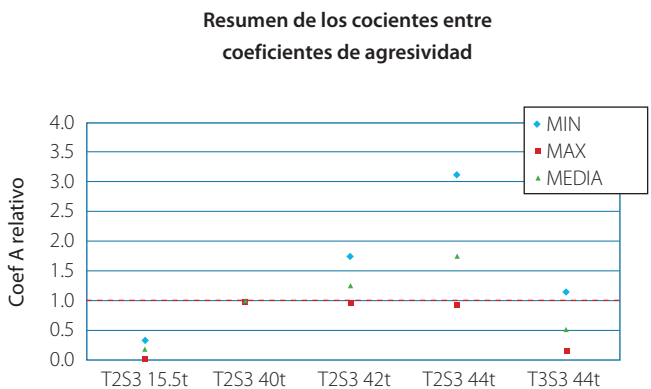


Figura 17: Valores mínimos, medios y máximos de los cocientes entre los coeficientes de agresividad. Hipótesis A.

Los valores graficados en las figuras precedentes se han recogido en las tablas que se presentan a continuación para proceder a su análisis cuantitativo. Los coeficientes correspondientes al vehículo vacío con 15.5t se pueden apreciar en la Tabla 3. Cabe aclarar que ha sido imposible calcular el estado tensional de algunas estructuras correspondientes a la categoría de tráfico más bajo (T41) por las limitaciones del programa de cálculo cuando se aplican tensiones muy bajas (Tabla 3).

En el caso de los vehículos tipo T2S3 cargados con 42 y 44t, sus resultados se aprecian en las Tablas 4 y 5, de donde se desprende que las secciones más críticas son las 0032, 3112 y 4112, en las que se observa el cociente más elevado a causa del fallo de la capa tratada con cemento, destacado en color rojo.

También se aprecian algunas secciones de firme donde el cociente entre los vehículos 42/40 es superior al de los 44/40, debido a que el aumento de carga a presión constante (hipótesis asumida) obliga a incrementar el área de contacto neumático-pavimento, causando un descenso en el parámetro evaluado ( $\epsilon_i$ ), especialmente en los firmes con menor espesor de capa de mezcla bituminosa (semirrígidos con T41) (Tablas 4 y 5).

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES			FIRMES SEMIRRIGIDOS			AiSC 40t	Ai SC 15.5t	R SC 15.5/40
	Ai MB 40t	Ai MB 15.5/40	R MB 15.5/40	AiMB 40t	AiMB 15.5t	R MB 15.5/40			
TRÁFICO									
T00	1.19	0.18	0.15	1.59	0.39	0.25	0.44	0.01	0.02
T1	1.40	0.29	0.21	1.85	0.50	0.27	0.53	0.02	0.04
T31 E3	1.90	0.54	0.28	2.54	0.82	0.32	0.65	0.05	0.08
T31 E1	1.45	0.29	0.20	2.32	0.75	0.32	0.49	0.05	0.10
T41 E3	2.34			3.27	1.00	0.31	1.00	0.21	0.21
T41 E1	2.04			5.15			0.54		

Tabla 3. Cocientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T2S3 de 15.5t y el de 40t. Hipótesis A.

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES			FIRMES SEMIRRIGIDOS			AiSC 40t	Ai SC 42t	R SC 42/40
	Ai MB 40t	Ai MB 42t	R MB 42/40	AiMB 40t	AiMB 40t	R MB 42/40			
TRÁFICO									
T00	0.97	1.18	1.22	1.36	1.60	1.18	0.22	0.38	1.71
T1	1.17	1.39	1.19	1.64	1.87	1.15	0.27	0.45	1.66
T31 E3	1.70	1.92	1.13	2.43	2.59	1.07	0.34	0.53	1.60
T31 E1	1.22	1.46	1.20	2.17	2.37	1.09	0.23	0.41	1.76
T41 E3	2.20	2.38	1.08	3.35	3.34	1.00	0.58	0.86	1.48
T41 E1	1.85	2.06	1.11	5.98	5.79	0.97	0.26	0.45	1.72

Tabla 4. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T2S3 de 42t y el de 40t. Hipótesis A.

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES			FIRMES SEMIRRIGIDOS			AiSC 40t	Ai SC 44t	R SC 44/40
	Ai MB 40t	Ai MB 44t	R MB 44/40	AiMB 40t	AiMB 44t	R MB 44/40			
TRÁFICO									
T00	0.97	1.44	1.49	1.36	1.88	1.38	0.22	0.64	2.86
T1	1.17	1.65	1.42	1.64	2.09	1.28	0.27	0.74	2.68
T31 E3	1.70	2.16	1.28	2.43	2.75	1.13	0.34	0.86	2.56
T31 E1	1.22	1.74	1.43	2.17	2.58	1.19	0.23	0.71	3.06
T41 E3	2.20	2.57	1.16	3.35	3.31	0.99	0.58	1.32	2.27
T41 E1	1.85	2.28	1.23	5.98	5.58	0.93	0.26	0.77	2.90

Tabla 5. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T2S3 de 44t y el de 40t. Hipótesis A.

En el caso del vehículo T3S3 con 44t, la sección más crítica es la correspondiente a la sección del firme semirrígido 4112, con un cociente de agresividad de 1.15, puesto que las demás secciones presentaban un cociente inferior a 1, Tabla 6.

	FIRMES FLEXIBLES T3S3			FIRMES SEMIRRIGIDOS T3S3					
EQUIV.	Ai MB 40t	Ai MB 44t	R MB 44/40	AiMB 40t	AiMB 44t	R MB 44/40	AiSC 40t	Ai SC 44t	R SC 44/40
TRÁFICO									
T00	0.97	0.39	0.40	1.36	0.58	0.43	0.22	0.03	0.16
T1	1.17	0.57	0.49	1.64	1.00	0.61	0.27	0.03	0.12
T31 E3	1.70	1.06	0.63	2.43	1.93	0.79	0.34	0.07	0.22
T31 E1	1.22	0.59	0.48	2.17	1.59	0.73	0.23	0.07	0.31
T41 E3	2.20	1.58	0.72	3.35	3.33	1.00	0.58	0.24	0.41
T41 E1	1.85	1.21	0.65	5.98	6.85	1.15	0.26	0.04	0.15

Tabla 6. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T3S3 de 44t y el vehículo tipo T2S3 de 40t. Hipótesis A.

**Resultados del cálculo del coeficiente de agresividad – Hipótesis B (α igual a 4 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 8 para las capas de suelo-cemento)**

Se presentan a continuación los resultados obtenidos del coeficiente de agresividad de cada vehículo analizado para las explanadas y categorías de tráfico escogidas, respecto al eje de referencia, bajo la hipótesis de cálculo B.

**Coeficiente de agresividad  
Firmes flexibles - T2S3 15.5t**

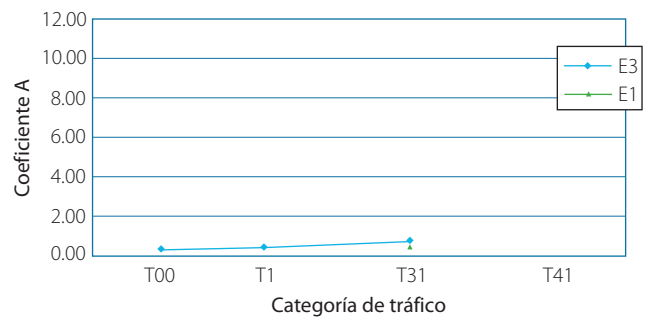


Figura 18: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 15.5t en firmes flexibles. Hipótesis B.

**Coeficiente de agresividad  
Firmes flexibles - T2S3 40t**

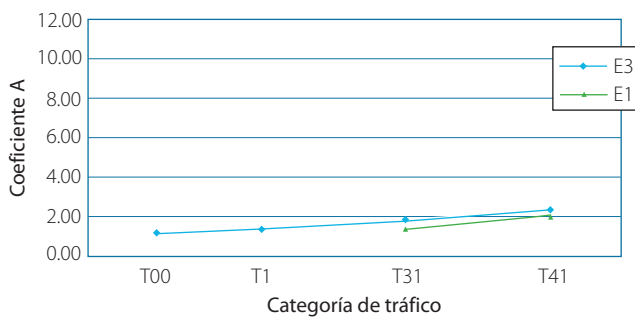


Figura 19: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 40t en firmes flexibles. Hipótesis B.

**Coeficiente de agresividad  
Firmes flexibles - T2S3 42t**

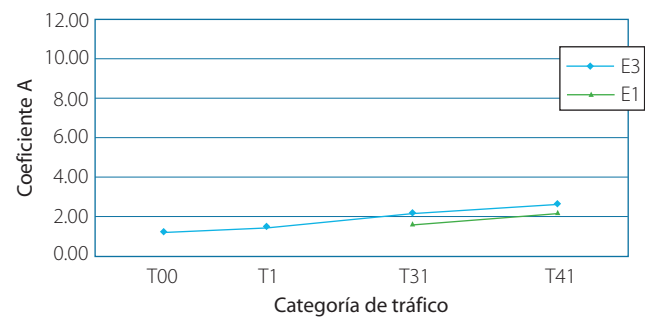


Figura 20: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 42t en firmes flexibles. Hipótesis B.

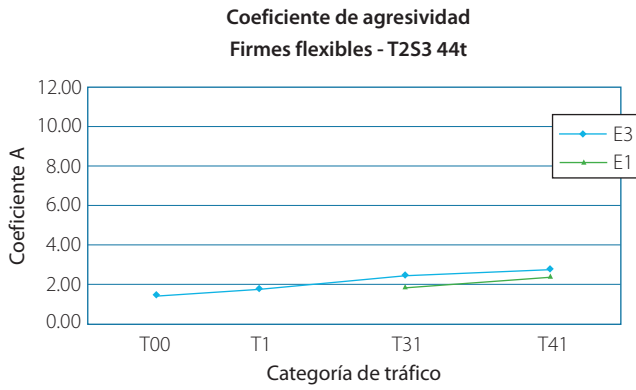


Figura 21: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 44t en firmes flexibles. Hipótesis B.

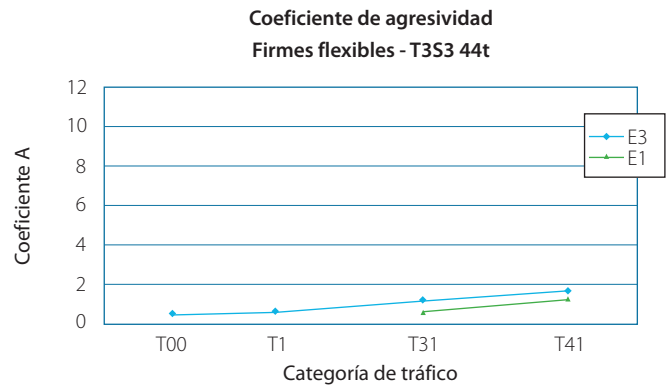


Figura 22: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T3S3 con 44t en firmes flexibles. Hipótesis B.

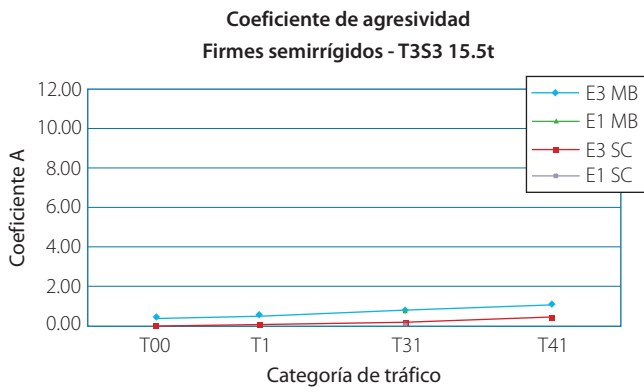


Figura 23: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 15.5t en firmes semirrígidos. Hipótesis B.

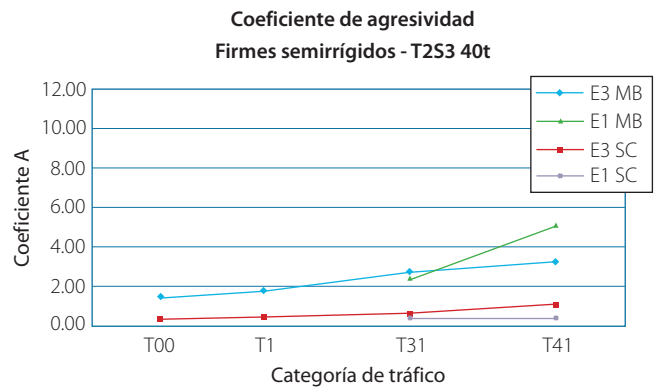


Figura 24: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 40t en firmes semirrígidos. Hipótesis B.

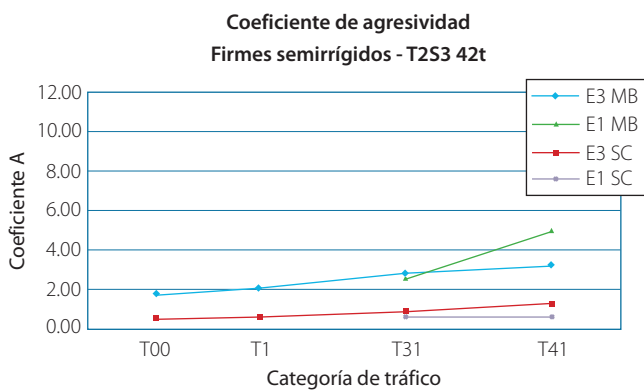


Figura 25: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 42t en firmes semirrígidos. Hipótesis B.

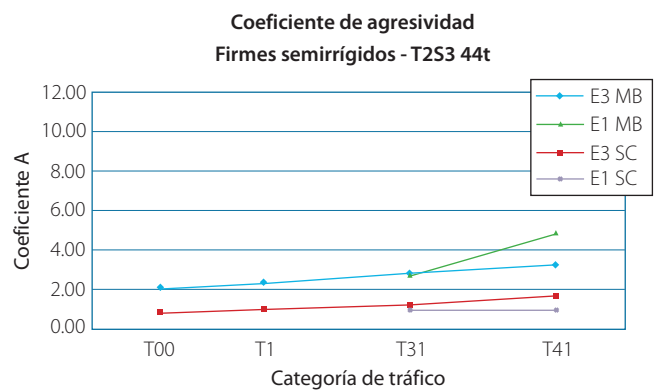


Figura 26: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T2S3 con 44t en firmes semirrígidos. Hipótesis B.

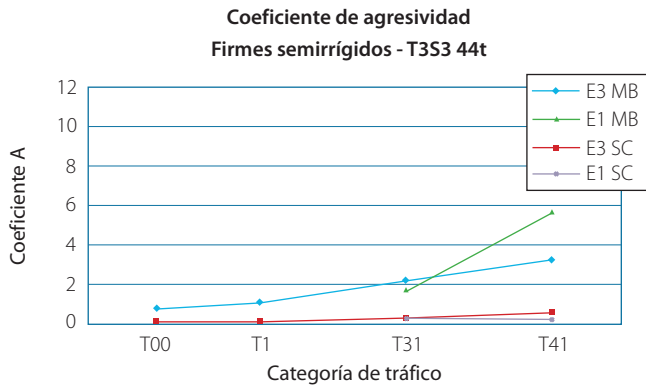


Figura 27: Coeficientes de agresividad para el vehículo tipo T3S3 con 44t en firms semirrígidos. Hipótesis B.

Análogamente al análisis realizado bajo la hipótesis A, se ha calculado el cociente entre los coeficientes de agresividad de los vehículos vacío con 15.5t y cargados con 42 y 44t, y el del vehículo cargado con 40t para la hipótesis B, Figuras 28, 29, 30 y 31.

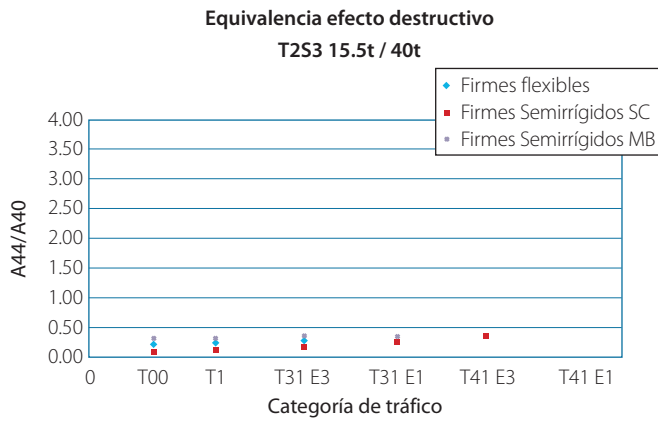


Figura 28: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T2S3 15.5t y T2S3 40t. Hipótesis B.

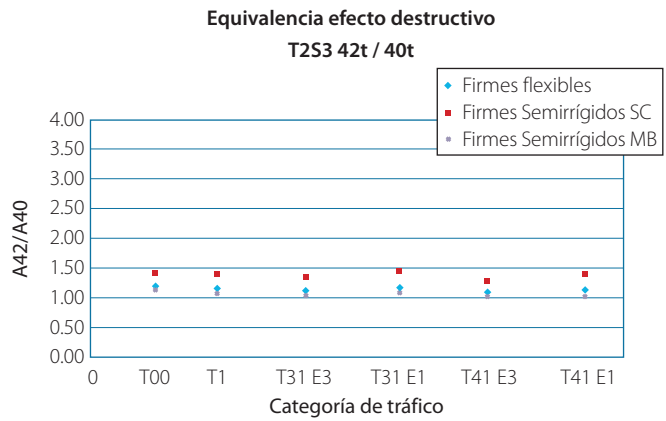


Figura 29: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T2S3 42t y T2S3 40t. Hipótesis B.

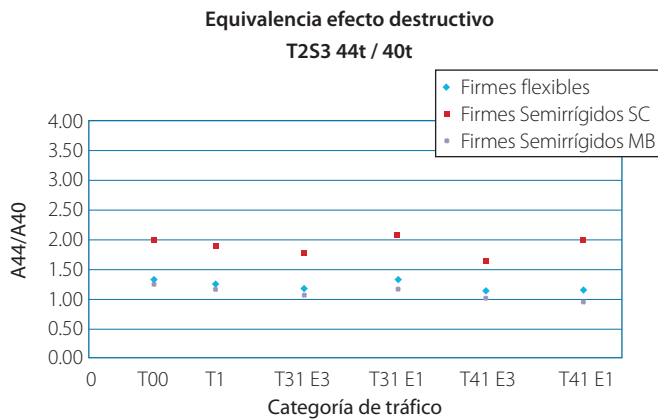


Figura 30: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T2S3 44t y T2S3 40t. Hipótesis B.

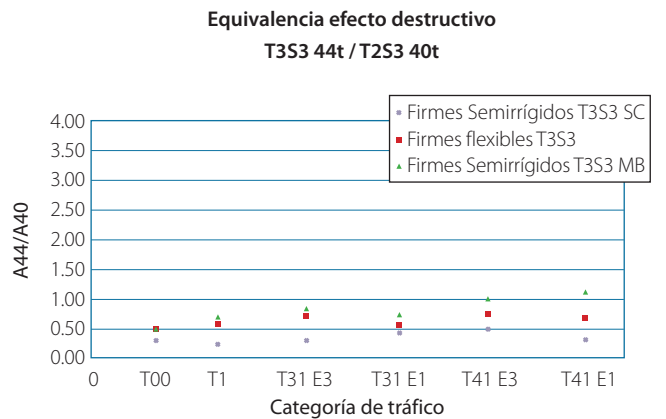


Figura 31: Cociente de los coeficientes de agresividad entre T3S3 44t y T2S3 40t. Hipótesis B.

Para concluir este apartado se recogen los valores mínimos, medios y máximos de los cocientes recogidos en las figuras anteriores para cada categoría de tráfico pesado analizada, con cada vehículo pesado. Figura 32.



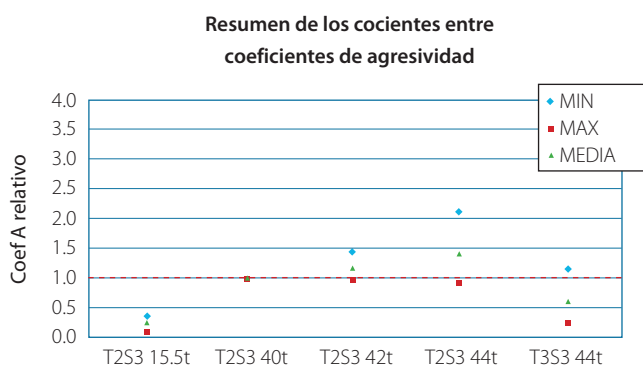


Figura 32: Valores mínimos, medios y máximos de los cocientes entre los coeficientes de agresividad. Hipótesis B.

Los coeficientes correspondientes al vehículo vacío con 15.5t se pueden apreciar en la Tabla 7. Tal como ha sucedido en el análisis de la hipótesis A, ha sido imposible calcular el estado tensional de algunas estructuras correspondientes a la categoría de tráfico más bajo (T41) por las limitaciones del programa de cálculo (Tabla 7).

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES			FIRMES SEMIRRIGIDOS			AiSC 40t	Ai SC 15.5t	R SC 15.5/40
	Ai MB 40t	Ai MB 15.5t	R MB 15.5/40	AiMB 40t	Ai MB 15.5t	R MB 15.5/40			
TRÁFICO									
T00	1.19	0.25	0.21	1.59	0.48	0.30	0.44	0.04	0.09
T1	1.40	0.38	0.27	1.85	0.59	0.32	0.53	0.08	0.15
T31 E3	1.90	0.62	0.33	2.54	0.90	0.36	0.65	0.14	0.22
T31 E1	1.45	0.38	0.26	2.32	0.82	0.35	0.49	0.13	0.27
T41 E3	2.34			3.27	1.12	0.34	1.00	0.35	0.35
T41 E1	2.04			5.15			0.54		

Tabla 7. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T2S3 de 15.5t y el de 40t. Hipótesis B.

Siguiendo la misma tendencia que los resultados obtenidos bajo la hipótesis A, se observa que los coeficientes calculados para los vehículos cargados muestran que las 3 secciones más críticas de firmes semi-rígidos para los vehículos T2S3 con 42 y 44t, son las correspondientes a las secciones 0032, 3112 y 4112, indicadas en las Tablas 8 y 9 en color rojo.

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES			FIRMES SEMIRRIGIDOS			AiSC 40t	Ai SC 42t	R SC 42/40
	Ai MB 40t	Ai MB 42t	R MB 42/40	AiMB 40t	Ai MB 42t	R MB 42/40			
TRÁFICO									
T00	1.19	1.39	1.17	1.59	1.81	1.14	0.44	0.63	1.42
T1	1.40	1.60	1.15	1.85	2.05	1.11	0.53	0.73	1.38
T31 E3	1.90	2.09	1.10	2.54	2.67	1.05	0.65	0.87	1.35
T31 E1	1.45	1.67	1.15	2.32	2.49	1.07	0.49	0.70	1.45
T41 E3	2.34	2.49	1.06	3.27	3.26	1.00	1.00	1.29	1.30
T41 E1	2.04	2.22	1.09	5.15	5.02	0.98	0.54	0.76	1.42

Tabla 8. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T2S3 de 42t y el de 40t. Hipótesis B.

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES			FIRMES SEMIRRIGIDOS			AiSC 40t	Ai SC 44t	R SC 44/40
	Ai MB 40t	Ai MB 44t	R MB 44/40	AiMB 40t	Ai MB 44t	R MB 44/40			
TRÁFICO									
T00	1.19	1.62	1.36	1.59	2.05	1.29	0.44	0.88	2.00
T1	1.40	1.83	1.31	1.85	2.23	1.21	0.53	1.00	1.89
T31 E3	1.90	2.30	1.21	2.54	2.80	1.10	0.65	1.18	1.82
T31 E1	1.45	1.91	1.32	2.32	2.66	1.15	0.49	1.01	2.09
T41 E3	2.34	2.64	1.13	3.27	3.24	0.99	1.00	1.69	1.70
T41 E1	2.04	2.40	1.18	5.15	4.88	0.95	0.54	1.08	2.00

Tabla 9. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T2S3 de 44t y el de 40t. Hipótesis B.

En el caso del vehículo T3S3 con 44t, la única sección crítica es la correspondiente a la sección del firme semirrígido 4112, con un cociente de agresividad de 1.12, puesto que las demás secciones presentan un cociente inferior a 1 (Tabla 10).

EQUIV.	FIRMES FLEXIBLES T3S3			FIRMES SEMIRRIGIDOS T3S3			AiSC 40t	Ai SC 44t	R SC 44/40
	Ai MB 40t	Ai MB 44t	R MB 44/40	AiMB 40t	Ai MB 44t	R MB 44/40			
TRÁFICO									
T00	1.19	0.58	0.49	1.59	0.77	0.48	0.44	0.14	0.31
T1	1.40	0.79	0.56	1.85	1.23	0.67	0.53	0.14	0.26
T31 E3	1.90	1.29	0.68	2.54	2.11	0.83	0.65	0.23	0.35
T31 E1	1.45	0.81	0.56	2.32	1.79	0.77	0.49	0.22	0.44
T41 E3	2.34	1.79	0.76	3.27	3.26	1.00	1.00	0.48	0.48
T41 E1	2.04	1.44	0.71	5.15	5.77	1.12	0.54	0.16	0.30

Tabla 10. Coeficientes de agresividad relativo entre el vehículo tipo T3S3 de 44t y el de 40t. Hipótesis B.

## Conclusiones

Del estudio realizado y bajo las hipótesis de cálculo que se han ido realizando a lo largo del mismo, se desprende que cuando la carga del vehículo pesado pasa de 40 a 44t, considerando un  $\alpha$  igual a 4 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 8 para las capas de suelo-cemento, recogidos en algunas recomendaciones españolas (hipótesis B), y el eje tridem configurado con ruedas simples, se produce una variación de la agresividad de entre 1.13 y 1.36 sobre los firmes flexibles, y de entre 0.95 y 2.09 sobre los firmes semirrígidos, para el vehículo pesado tipo T2S3. Para el vehículo tipo T3S3, el cambio de agresividad oscila entre 0.49 y 0.76 sobre los firmes flexibles, mientras que varía entre 0.26 y 1.12 sobre los firmes semirrígidos.

Todos estos valores dependen tanto de la sección de firme considerada como de la capa en la que se produce el fallo. En general, cuando se calculan los coeficientes de agresividad de cada configuración de carga respecto al eje tipo, las secciones más críticas corresponden a las categorías de tráfico más bajo, por tanto, de menor espesor.

Cuando se analiza el vehículo vacío (15.5t) el cambio de agresividad con respecto al vehículo de 40t oscila entre 0.21 y 0.33 para los firmes flexibles, y entre 0.09 y 0.36 para los firmes semirrígidos.

Estos valores son muy dependientes de los coeficientes  $\alpha$  considerados. Así, si consideramos la hipótesis A, más desfavorable con los  $\alpha$  recomendados por SETRA (igual a 5 para las capas de

mezclas bituminosas e igual a 12 para las capas de suelo-cemento), se produce en general, una variación de la agresividad entre 1.49 y 1.16 sobre los firmes flexibles, mientras que sobre los firmes semirrígidos se ubica entre 3.06 y 0.93, para el vehículo pesado T2S3.

Para el vehículo tipo T3S3, el cambio de agresividad oscila entre 0.40 y 0.72 sobre los firmes flexibles, y entre 0.12 y 1.15 sobre los firmes semirrígidos.

Cuando se analiza el vehículo vacío (15.5t) bajo la hipótesis A, el descenso de agresividad con respecto al vehículo de 40t varía entre 0.15 y 0.28 para los firmes flexibles, y entre 0.02 y 0.32 para los firmes semirrígidos.

### Referencias

1. Incidence des PL sur les coûts de construction des chaussées neuves. SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes), abril 2009.
2. Rapport au Parlement sur les enjeux et les impacts relatifs à la généralisation de l'autorisation de circulation des poids lourds de 44 tonnes. Conseil général de l'environnement et du développement durable. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, enero de 2011.
3. Normas de secciones de firme de la Comunidad Valenciana. Conselleria d'Infraestructures i Transport, Valencia, 2009.

Barcelona, 20 de enero de 2013.

### Anejos

ANEJO 1: Norma 6.1-IC "Secciones de firme", aprobada por la Orden FOM 3460/2003 de 28 de Noviembre

ANEJO 2: Cálculo del estado tensional de las estructuras analizadas mediante el programa BISAR 3.0

## 5 Impactos y costes sobre la infraestructura

### Evaluación del consumo de fatiga de los firmes

Para analizar el desgaste o grado de fatiga de los firmes causado por los vehículos tipo T2S3 y T3S3, con las cargas analizadas, se ha recurrido a un análisis de ejes equivalentes sobre ambos tipos de firmes, flexibles y semirrígidos y se ha calculado el consumo de fatiga provocado por un determinado número de aplicaciones de carga.

Para calcular el grado de fatiga del firme se ha empleado la ley de Miner, que se representa por la ecuación (1)

$$F = \sum n_i \cdot Eeq_i / N_i \quad (1)$$

donde:

F: grado total de fatiga

$n_i$ : número de aplicaciones de carga  $i$

$Eeq_i$ : número de ejes equivalentes de la carga  $i$

$N_i$ : número total de aplicaciones de carga  $i$  hasta el agotamiento del firme

Teniendo en cuenta las equivalencias recomendadas en las Normas de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana. Conselleria d'Infraestructures i Transport, Valencia, 2009. Ecuaciones (2), (3) y (4).

$$Eeq_i = \left(\frac{P_i}{13}\right)^\alpha \quad \text{Ecuación} \quad (2)$$

$$Eeq_j = 1.4 \left(\frac{P_j/2}{13}\right)^\alpha \quad \text{Ecuación} \quad (3)$$

$$Eeq_k = 2.3 \left(\frac{P_k/3}{13}\right)^\alpha \quad \text{Ecuación} \quad (4)$$

donde:  
 Eeq<sub>i</sub>, Eeq<sub>j</sub>, Eeq<sub>k</sub>: ejes equivalentes de las cargas i, j y k.  
 P<sub>i</sub>, P<sub>j</sub>, P<sub>k</sub>: carga por eje simple, tándem y trídem, respectivamente, en toneladas  
 α: valor que depende del firme y que se utilizará en este apartado considerando las hipótesis A y B, mencionadas previamente, en el Informe sobre agresividad de los vehículos pesados).

Criterio de fallo: cuando el firme alcanza el umbral de agotamiento, el consumo de fatiga llega al 100%.

### Cálculo del consumo de fatiga causado por el vehículo T2S3 en un tramo de carretera

Para realizar un análisis cercano a la realidad de lo que sucedería si parte del total de vehículos tipo T2S3 fuese cargado con 44 toneladas en lugar de 40t, se ha analizado un tramo de carretera de alta intensidad media diaria de vehículos:

- Carretera: C-17
- Poblaciones Centelles y Mallà
- Pk: 45+080 -53+050
- Longitud del tramo: 7.97 km
- IMD: 42268 veh/día
- Porcentaje de vehículos pesados: 9.44%

Datos de estación permanente, fuente: Servei Territorial de Carreteres de Barcelona, Dades d'aforaments 2011.

### Cálculo del número de ejes equivalentes

A partir de la información disponible sobre el tráfico, se obtiene la categoría de vehículos pesados a los que pertenece el tramo:

- IMD<sub>vp</sub>: 3990.1 (totales)
- IMD<sub>vp</sub> por sentido: 1995 veh. pes/día

Categoría de tráfico: T1

Número de ejes equivalentes: al no disponer de la distribución de cargas de todos los vehículos pesados que componen el parque, las instrucciones de dimensionamiento, tanto del Ministerio de Fomento como de algunas Comunidades Autónomas, así como investigadores expertos en el tema, han recomendado valores representativos de las distintas categorías de tráfico. Así, en el caso de la T1, se ha supuesto:

Número de ejes equivalentes de 13t: 10.4 millones para un firme flexible y 12.5 para un firme semirrígido (Ref: Evaluación técnico-económica de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC. VI Congreso Nacional de firmes, 24-27 mayo de 2004, Kraemer, C. y Albeda R.).

### Cálculo del número de pasadas de vehículos T2S3

Al no disponer de datos específicos de la carretera C-17, se ha recurrido a la información sobre la intensidad de vehículos tipo T2S3 se ha obtenido a partir de la Encuesta Permanente del Transporte de Mercancías por Carretera 2011, así como el porcentaje de vehículos vacíos:

- Porcentaje de vehículos tipo T2S3 con respecto al total de vehículos pesados: 38 % (variable conside-

- rada número de operaciones)
- Porcentaje de vehículos tipo T2S3 vacíos: 45.02%

Por tanto, habrá un 20.89 % de vehículos T2S3 cargados sobre el total de vehículos pesados, que aplicados a la carretera C-17 representan 416.80 vehículos T2S3 cargados por día. Considerando una tasa de crecimiento del parque de un 4%, y una vida de servicio del firme de 20 años, la cantidad de vehículos T2S3 cargados acumulados será de 4,530,198.65. A partir de esta cifra se calculará, en el apartado siguiente, el consumo de fatiga sobre el firme del tramo de carretera escogido.

### **Cálculo del consumo de fatiga de los vehículos tipo T2S3**

Se procede a continuación a calcular el efecto de fatiga que podría causar el paso del vehículo tipo T2S3 bajo tres escenarios diferentes, consecuentes con el "Análisis potencial de uso de vehículos pesados de M.M.A. de 44t" presentado también como una parte de este estudio:

- Escenario Base: 100% vehículos cargados con 40t
- Escenario A: los vehículos cargados con 40t descienden un 33% (67%) y aparecen los vehículos de 42t con un 7% y vehículos de 44t con un 21%.
- Escenario B: los vehículos cargados con 40t descienden un 43% (57%) y aparecen los vehículos de 42t con un 11% y vehículos de 44t con un 26%.

Los cálculos se han llevado a cabo considerando las hipótesis A ( $\alpha$  igual a 5 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 12 para las capas de suelo-cemento) y B ( $\alpha$  igual a 4 para las capas de mezclas bituminosas e igual a 8 para las capas de suelo-cemento), siguiendo los mismos criterios empleados al realizar la "Evaluación del aumento de agresividad de los vehículos pesados tipo T2S3 y T3S3 al pasar de 40 a 44t de carga sobre los firmes de carreteras españoles".

Los resultados correspondientes a la hipótesis A se recogen en las Tablas 1 y 2, para firmes flexibles y semirrígidos respectivamente, mientras que los correspondientes a la hipótesis B se pueden presentar en las Tablas 3 y 4.

Firme flexible		$\alpha = 5$		Ejes acum 13t	N: 10.40E+06
P rueda (t)	P eje (t)	n	Eeq	n*Eeq	f(%)=(n*Eeq/N)*100
<b>Escenario Base 100% 40t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	4530198.65	0.0639	289538.82	2.78
2.875	11.5	4530198.65	0.5417	2454085.48	23.60
3.5	21	4530198.65	0.1041	471648.57	4.54
	40			<b>Fatiga (%)</b>	<b>30.92</b>
<b>Escenario A 67% 40t-7% 42t-21% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	3035233.10	0.0639	193991.01	1.87
2.875	11.5	3035233.10	0.5417	1644237.27	15.81
3.5	21	3035233.10	0.1041	316004.54	3.04
	40				20.71
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	317113.91	0.0639	20267.72	0.19
3.0075	12.03	317113.91	0.6786	215192.27	2.07
3.745	22.47	317113.91	0.1460	46305.81	0.45
	42				2.71
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	951341.72	0.0639	60803.15	0.58
3.14	12.56	951341.72	0.8418	800880.97	7.70
3.99	23.94	951341.72	0.2005	190705.00	1.83
	44				10.12
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>33.54</b>
<b>Escenario B 57% 40t-11% 42t-26% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	2582213.23	0.0639	165037.13	1.59
2.875	11.5	2582213.23	0.5417	1398828.73	13.45
3.5	21	2582213.23	0.1041	268839.68	2.58
	40				17.62
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	498321.85	0.0639	31849.27	0.31
3.0075	12.03	498321.85	0.6786	338159.28	3.25
3.745	22.47	498321.85	0.1460	72766.27	0.70
	42				4.26
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	1177851.65	0.0639	75280.09	0.72
3.14	12.56	1177851.65	0.8418	991566.92	9.53
3.99	23.94	1177851.65	0.2005	236110.95	2.27
	44				12.53
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>34.41</b>

Tabla 1. Consumo de fatiga para un firme flexible bajo hipótesis A, considerando los escenarios Base, A y B.

Firme semirrígido		$\alpha = 12$		Ejes acum 13t	N: 12.50E+06
P rueda (t)	P eje (t)	n	Eeq	n*Eeq	f(%)=(n*Eeq/N)*100
<b>Escenario Base 100% 40t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	4530198.65	0.0014	6159.31	0.05
2.875	11.5	4530198.65	0.2296	1040329.95	8.32
3.5	21	4530198.65	0.0014	6190.15	0.05
	40			<b>Fatiga (%)</b>	<b>8.42</b>
<b>Escenario A 67% 40t-7% 42t-21% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	3035233.10	0.0014	4126.74	0.03
2.875	11.5	3035233.10	0.2296	697021.07	5.58
3.5	21	3035233.10	0.0014	4147.40	0.03
	40				5.64
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	317113.91	0.0014	431.15	0.00
3.0075	12.03	317113.91	0.3943	125049.68	1.00
3.745	22.47	317113.91	0.0031	975.90	0.01
	42				1.01
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	951341.72	0.0014	1293.46	0.01
3.14	12.56	951341.72	0.6615	629349.64	5.03
3.99	23.94	951341.72	0.0066	6262.95	0.05
	44				5.10
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>11.75</b>
<b>Escenario B 57% 40t-11% 42t-26% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	2582213.23	0.0014	3510.81	0.03
2.875	11.5	2582213.23	0.2296	592988.07	4.74
3.5	21	2582213.23	0.0014	3528.39	0.03
	40				4.80
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	498321.85	0.0014	677.52	0.01
3.0075	12.03	498321.85	0.3943	196506.64	1.57
3.745	22.47	498321.85	0.0031	1533.55	0.01
	42				1.59
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	1177851.65	0.0014	1601.42	0.01
3.14	12.56	1177851.65	0.6615	779194.79	6.23
3.99	23.94	1177851.65	0.0066	7754.13	0.06
	44				6.31
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>12.70</b>

Tabla 2. Consumo de fatiga para un firme semirrígido bajo hipótesis A, considerando los escenarios Base, A y B.

Firme flexible		$\alpha = 4$		Ejes acum 13t	N: 10.40E+06
P rueda (t)	P eje (t)	n	Eeq	n*Eeq	f(%)=(n*Eeq/N)*100
<b>Escenario Base 100% 40t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	4530198.65	0.1108	501,867.29	4.83
2.875	11.5	4530198.65	0.6124	2,774,183.59	26.67
3.5	21	4530198.65	0.1934	875,918.77	8.42
	40			<b>Fatiga (%)</b>	<b>39.92</b>
<b>Escenario A 67% 40t-7% 42t-21% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	3035233.10	0.1108	336,251.08	3.23
2.875	11.5	3035233.10	0.6124	1,858,703.01	17.87
3.5	21	3035233.10	0.1934	586,865.58	5.64
	40				26.75
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	317113.91	0.1108	35,130.71	0.34
3.0075	12.03	317113.91	0.7333	232,543.60	2.24
3.745	22.47	317113.91	0.2534	80,370.56	0.77
	42				3.35
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	951341.72	0.1108	105,392.13	1.01
3.14	12.56	951341.72	0.8713	828,937.31	7.97
3.99	23.94	951341.72	0.3266	310,672.30	2.99
	44				11.97
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>42.07</b>
<b>Escenario B 57% 40t-11% 42t-26% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	2582213.23	0.1108	286,064.36	2.75
2.875	11.5	2582213.23	0.6124	1,581,284.65	15.20
3.5	21	2582213.23	0.1934	499,273.70	4.80
	40				22.76
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	498321.85	0.1108	55,205.40	0.53
3.0075	12.03	498321.85	0.7333	365,425.65	3.51
3.745	22.47	498321.85	0.2534	126,296.59	1.21
	42				5.26
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	1177851.65	0.1108	130,485.50	1.25
3.14	12.56	1177851.65	0.8713	1,026,303.34	9.87
3.99	23.94	1177851.65	0.3266	384,641.90	3.70
	44				14.82
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>42.84</b>

Tabla 3. Consumo de fatiga para un firme flexible bajo hipótesis B, considerando los escenarios Base, A y B.



Firme semirrígido		$\alpha = 8$		Ejes acum 13t	N: 12.50E+06
P rueda (t)	P eje (t)	n	Eeq	n*Eeq	f(%)=(n*Eeq/N)*100
<b>Escenario Base 100% 40t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	4530198.65	0.0123	55,598.17	0.44
2.875	11.5	4530198.65	0.3750	1,698,842.63	13.59
3.5	21	4530198.65	0.0163	73,634.71	0.59
	40			<b>Fatiga (%)</b>	<b>14.62</b>
<b>Escenario A 67% 40t-7% 42t-21% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	3035233.10	0.0123	37,250.78	0.30
2.875	11.5	3035233.10	0.3750	1,138,224.56	9.11
3.5	21	3035233.10	0.0163	49,335.26	0.39
	40				9.80
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	317113.91	0.0123	3,891.87	0.03
3.0075	12.03	317113.91	0.5377	170,527.13	1.36
3.745	22.47	317113.91	0.0279	8,856.27	0.07
	42				1.47
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	951341.72	0.0123	11,675.62	0.09
3.14	12.56	951341.72	0.7592	722,282.08	5.78
3.99	23.94	951341.72	0.0464	44,110.37	0.35
	44				6.22
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>17.49</b>
<b>Escenario B 57% 40t-11% 42t-26% 44t</b>					
<b>T2S3 40t</b>					
3.75	7.5	2582213.23	0.0123	31,690.96	0.25
2.875	11.5	2582213.23	0.3750	968,340.30	7.75
3.5	21	2582213.23	0.0163	41,971.79	0.34
	40				8.34
<b>T2S3 42t</b>					
3.75	7.5	498321.85	0.0123	6,115.80	0.05
3.0075	12.03	498321.85	0.5377	267,971.21	2.14
3.745	22.47	498321.85	0.0279	13,917.00	0.11
	42				2.30
<b>T2S3 44t</b>					
3.75	7.5	1177851.65	0.0123	14,455.53	0.12
3.14	12.56	1177851.65	0.7592	894,254.00	7.15
3.99	23.94	1177851.65	0.0464	54,612.84	0.44
	44				7.71
				<b>Fatiga (%)</b>	<b>18.35</b>

Tabla 4. Consumo de fatiga para un firme semirrígido bajo hipótesis B, considerando los escenarios Base, A y B.

Como se puede apreciar a partir de los resultados obtenidos en las Tablas 1 a 4, el incremento del consumo de fatiga al pasar del escenario Base al escenario A es del 2.62% en el caso de un firme flexible, y del 3.33% en un firme semirrígido cuando se realiza el análisis considerando la hipótesis A. Al pasar del escenario Base al escenario B, estos porcentajes suben al 3.49% y 4.28% respectivamente.

Cuando el cálculo se lleva a cabo bajo la hipótesis B, el incremento de fatiga al pasar del escenario Base al escenario A es del 2.15% para un firme de tipo flexible y del 2.87% para un firme de tipo semirrígido. Y cuando se cambia del escenario Base al escenario B estos valores ascienden a 2.92% y 3.73% respectivamente.

### **Estimación del incremento de los costes de conservación y mantenimiento del firme a causa del aumento de la carga en vehículos tipo T2S3**

Las tareas de conservación y mantenimiento de un firme constituyen un conjunto de actuaciones que se desarrollan durante la vida de la carretera persiguiendo dos objetivos básicos: mantener un mínimo nivel de servicio para los usuarios que garantice ciertas condiciones de seguridad y comodidad, y optimizar la vida útil del firme. Para ello existen una serie de tareas que se agrupan en mantenimiento rutinario u ordinario (limpieza, sellado de fisuras, baches, reparación de juntas, etc.) y las llamadas actuaciones extraordinarias (rehabilitaciones estructurales, refuerzos y reconstrucción parcial o total del firme).

En el caso del análisis realizado, el incremento del consumo de fatiga en el firme a causa de la aparición de los vehículos T2S3 con 42 y 44t podría traducirse en un acortamiento del período de tiempo entre las operaciones de tipo puntual, concretamente, entre un refuerzo estructural y el siguiente. Sin embargo, considerando los bajos valores obtenidos al calcular las diferencias entre los porcentajes del consumo de fatiga (del 2.15% al 4.28%), podría no ser necesario recurrir a un aumento de la frecuencia en las operaciones de tipo puntual, siempre que sean las actuaciones de tipo continuo las encargadas de mantener el estado del firme en condiciones similares a las del escenario considerado Base. En este caso, puede asumirse una variación lineal entre el coste de las tareas de mantenimiento planificadas a tal fin y el incremento del consumo de fatiga sufrido por el firme.

Para estimar el coste de conservación y mantenimiento de los firmes, se ha recurrido a la información publicada por la Dirección General de Programación Económica y Presupuestos, Subdirección General de Estudios Económicos y Estadísticas, del Ministerio de Fomento en su Anuario Estadístico 2011:

Coste de conservación y mantenimiento de la red a cargo del estado: 987,045,000 €

Longitud de la Red a cargo del estado: 25,835 km

Coste unitario de conservación de la red a cargo del estado: 38,205.73 €/km

Cabe aclarar que el coste referenciado es un valor global, aplicado a la conservación y mantenimiento de toda la carretera, y no sólo el destinado a los firmes, por lo que el valor real que le correspondería a esta partida sería inferior. Lamentablemente no se dispone de suficiente información como para hacer una estimación de este último y por tanto, los cálculos de los costes serán más conservadores.

La Tabla 5 muestra los costes resultantes de aplicar los porcentajes obtenidos en el apartado anterior a los distintos escenarios analizados sobre el tramo de carretera seleccionado. La información disponible sobre costes no discrimina según sea el tipo de firme flexible o semirrígido, por lo que el coste del escenario Base se ha mantenido constante en ambos casos.

Escenario	Coste según Hipótesis A (€)		Coste según Hipótesis B (€)	
	Firme flexible	Firme semirrígido	Firme flexible	Firme semirrígido
Base: 100% 40t	304500	304500	304500	304500
Inicial: 67% 40t-7% 42t-21% 44t	312496	314633	311026	313222
Final: 57% 40t-11% 42t-26% 44t	315133	317523	313371	315833
Diferencia A respecto a Base	7996	10133	6526	8723
Diferencia B respecto a Base	10633	13023	8872	11334

Tabla 5. Costes de mantenimiento en tareas rutinarias para el tramo de carretera seleccionado para los firmes flexibles y semirrígidos bajo hipótesis A y B, considerando los escenarios Base, A y B. Longitud del tramo: 7.97 km.

### Conclusiones

A modo de ejemplo, se ha analizado un tramo de carretera con una alta intensidad media diaria para evaluar el efecto de la agresividad de los vehículos tipos T2S3 cuando su carga máxima se incrementa en 2 y 4t sobre dos tipos de firme característicos de la red de carreteras españolas, y considerando las hipótesis de efecto destructivo más usuales. Se han analizado los mismos escenarios considerados en el "Análisis potencial de uso de vehículos pesados de M.M.A. de 44t" que acompaña a este estudio.

Finalmente, se han extrapolado los resultados obtenidos sobre el consumo de fatiga causado en cada tipo de firme a los costes de mantenimiento rutinario para dar una idea del incremento que podrían sufrir estas inversiones. No obstante, es preciso aclarar que cada tramo de carretera debe ser considerado un elemento sujeto a un análisis particular cuando se definen las actuaciones de conservación y mantenimiento, por lo que es imposible considerar las cifras aquí calculadas como valores constantes y definitivos que se pueden aplicar indistintamente de las condiciones estructurales reales del firme que se tenga que evaluar.

**Adriana H. Martínez Reguero**  
Barcelona, 10 de mayo de 2013.

## MISIÓN

Contribuir a hacer más eficientes y sostenibles las relaciones entre las empresas de Producción y Distribución, aportando mayor valor al Consumidor a través de la identificación de oportunidades de mejora a lo largo de toda la cadena.



Ronda General Mitre 10

08017 Barcelona

T: 00 34 932 523 900

F: 00 34 932 802 135

[www.aecoc.es](http://www.aecoc.es)