

Evaluación de las emisiones de CO₂ del tráfico por carretera (herramienta CO₂TA)

LAURA CRESPO GARCÍA (*) y FERNANDO JIMÉNEZ ARROYO (**)

RESUMEN Ahora, después de varios años de investigación para conocer mejor los fundamentos y variables que definen las más modernas herramientas de cálculo de emisiones en las distintas etapas de los proyectos de transporte, se pretende recoger todo lo aprendido en este periodo, plasmándolo en la herramienta de “Evaluación de las emisiones de CO₂ del Tráfico por carretera (CO₂TA)” en pauta interurbana. Ésta surge como respuesta al creciente interés de la Administración por comenzar a incluir la variable Cambio Climático en los procesos de toma de decisiones de Políticas, Planes, Programas y Proyectos a evaluar mediante la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) y la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), aunque como ya se verá a lo largo del artículo, se adapta mejor a la Evaluación de Impacto Ambiental. Además, CO₂TA tiene el valor añadido de ayudar a introducir conceptos relacionados con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), centrándose de forma concreta en la Huella de Carbono y la Huella Energética.

ASSESSMENT OF CO₂ EMISSIONS FROM ROAD TRAFFIC (CO₂ TA)

ABSTRACT After several years of depth research into the knowledge of the basis of different emission calculation tools that study various stages of transportation projects, the Centre for Public Works Studies and Experimentation (CEDEX) intends to collect everything learned in this period in the tool “Assessment of CO₂ emissions from road traffic (CO₂TA)” on intercity pattern. This is a response to the growing Administration interest of beginning to include the Climate Change issue in decision-making processes of plans, programs and projects policies, which are assessed by Strategic Environmental Assessment (SEA) and Environmental Impact Assessment (EIA). However, as discussed throughout the paper, CO₂TA is better suited to EIA. Furthermore, CO₂TA represents the added value of helping to introduce concepts related to Life Cycle Assessment (LCA), specifically focusing on the carbon and energy footprint.

Palabras clave: Evaluación de impacto Ambiental (EIA), Análisis del Ciclo de Vida (ACV), Huella de carbono (HC), Huella Energética, COPERT4.

Keywords: Environmental Impact Assessment (EIA), Life Cycle Analysis (LCA), Carbon footprint, Energy footprint, COPERT4.

1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos que solicitan las normativas europea y nacional en relación a la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) y la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) vienen configurándose desde hace años como un instrumento imprescindible para incorporar criterios ambientales en los procesos de toma de decisiones. La necesidad de estos instrumentos aparece con la puesta en marcha de normativas de carácter preventivo que se formulan en la Unión Europea (UE). Esto hace que estas técnicas sean herramientas muy eficaces al proporcionar mayor información, con la posibilidad de com-

par las diferentes opciones, dando fiabilidad y confianza en la toma de decisiones, y permitiendo elegir entre las diferentes alternativas posibles de una actividad proyectada en base a criterios científicos y técnicos.

De forma paralela a la elaboración de estos instrumentos normativos, se han ido desarrollando otras herramientas ambientales de carácter opcional que también ayudan en los procesos de toma de decisiones, incorporando una perspectiva de análisis de ciclo de vida. Estas herramientas pretenden abarcar todos los impactos ambientales de diferentes actuaciones a lo largo de su vida útil, considerando el concepto de ACV. Estos instrumentos, como la huella energética, cen-

(*) Ingeniero Agrónomo. Jefa de Área de Contaminación Atmosférica y Cambio Climático. Área de Contaminación Atmosférica y Cambio Climático. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Alfonso XII, 3. 28014 Madrid. E-mail: laura.crespo@cedex.es

(**) Licenciado en Ciencias Ambientales. Profesional libre. E-Mail: fernando.jimenez.arr@gmail.com

trada en el consumo de energía, o la huella de carbono, con su correspondiente reflejo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pueden estimar impactos concretos debidos al consumo de energía y las emisiones de GEI, causa del mayor problema ambiental que sufre el planeta. Las normas ISO 14040 de ACV y 14064 de Gases de efecto Invernadero o el Greenhouse Gas Protocol (GHG protocol) son ejemplos representativos de todo ello.

Siguiendo las metodologías de ayuda en la elección entre varias alternativas en un proceso de toma de decisiones e incluyendo el concepto de ciclo de vida de un producto o servicio, se garantiza que se tienen en cuenta las repercusiones previsibles sobre el medio ambiente a lo largo de la vida útil de una actividad. De aquí la necesidad de desarrollar herramientas o instrumentos que permitan cuantificar los efectos de una actuación concreta, porque sólo lo que se puede medir se puede comparar. Este procedimiento también va a facilitar el seguimiento de las actuaciones, lo que va a permitir cuantificar medidas correctoras que se estimen necesarias, así como valorar las diferentes opciones para mejorar el servicio hasta obtener las más sostenibles, en términos de eficacia y eficiencia.

Hasta el momento, entre los impactos ambientales con presencia significativa en los procesos de toma de decisiones no estaba incluida la variable cambio climático. Sin embargo, en los últimos años, la creciente preocupación por conocer las causas y efectos del calentamiento global ha propiciado que se empiece a analizar y a tener presente por parte de las autoridades ambientales en sus procesos de toma de decisiones, llegando a incluir este concepto en la nueva Ley 21/2013 de evaluación ambiental de 9 de diciembre 2013.

La lucha contra el cambio climático tiene una doble vertiente, por un lado la *Adaptación* a los efectos producidos por las variaciones en el clima futuro de los diferentes territorios y formas de vida que en ellos se desarrollan, y por otro la *Mitigación* de las emisiones de GEI de origen antrópico, responsables de estos cambios según el consenso científico representado en el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Hay que señalar que los aspectos ligados a la mitigación tienen en cuenta el uso que se viene dando a los combustibles fósiles en la sociedad más actual, estableciendo una relación directa con el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, sobre todo cuando se habla de transporte. Considerar estos aspectos en la toma de decisiones ayudará a valorar los impactos relacionados con el consumo energético en las diferentes alternativas de desarrollo, teniendo en cuenta un escenario futuro con importantes restricciones en cuanto a la disponibilidad de los recursos energéticos derivadas del agotamiento de los combustibles fósiles.

En el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA) del CEDEX se ha venido dando soporte técnico a diferentes administraciones con responsabilidades en los dos aspectos a considerar de este problema global. No obstante, este artículo va a centrarse en exclusiva en el desarrollo la herramienta de "Evaluación de las emisiones de CO₂ del Tráfico por carretera (CO₂TA)", relacionada con la cuantificación de las emisiones, y por tanto con efectos en la mitigación del cambio climático y, por extensión, con los conceptos de incluir el ahorro y la eficiencia energética, ligados al transporte en sus etapas preliminares de diseño, como pieza importante de la toma de decisiones en las legislaciones antes descritas (EAE y EIA), sobre todo la EIA.

Entre todos los sectores que conforman el sistema productivo, el transporte es el que supone mayor peso en el conjunto total de las emisiones de GEI y en el consumo de energía final; siendo el transporte por carretera el modo más intensivo,

llegando a acaparar el 25% de las emisiones de GEI y el 30% del consumo de energía final¹ de todo el sistema. Por esta razón el grupo investigador se ha centrado en este sector, desarrollando CO₂TA con la intención de ayudar en la comparación de alternativas de transporte por carretera en pauta interurbana, incluyendo además el concepto de ACV, centrado el análisis en la huella de carbono y la huella energética. Además se da el caso de que el transporte está incluido entre los sectores difusos (transporte, residencial, servicios, agricultura y residuos), sectores para los que el Estado español ha asumido un compromiso de reducción de emisiones en el horizonte 2020 de un 10% en relación a los niveles de emisión del año 2005².

CO₂TA ha contado a lo largo de su proceso de diseño con la colaboración y el respaldo de diferentes Administraciones competentes, agentes y actores implicados en el desarrollo de la infraestructura de transporte por carretera y en el estudio de los impactos producidos a lo largo de su vida útil, como la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (DGCEMN), del MAGRAMA, con la perspectiva y consideraciones que impone el órgano ambiental; la Dirección General de Carreteras (DGC), del Ministerio de Fomento, imponiendo la óptica como órgano promotor y/o sustantivo y la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) como la administración competente en proponer y potenciar políticas de lucha contra el Cambio Climático.

2. ANTECEDENTES

Cuando se analiza diferente bibliografía relacionada con el ACV en el transporte por carretera en pauta interurbana, se llega a la conclusión de que aún falta mucho por andar hasta poder disponer de herramientas contrastadas que completen la cuantificación de emisiones y consumo energético de las diferentes fases y subfases de las que se compone un proyecto de infraestructuras de transporte por carretera a lo largo de su vida útil. Faltan inventarios debidamente construidos que recorran de forma ordenada y sistemática cada una de las fases que integran una obra de infraestructura. Además, cuando se comparan los proyectos de este tipo no se tiene la certeza de que se estén evaluando los mismos conceptos en cada uno de los diferentes estudios. Este hecho se pone en evidencia al comparar los resultados obtenidos en el proyecto CLEAM³, que apunta que alrededor de un 70% de las emisiones de CO₂ se produce la fase de tráfico, con los obtenidos en el proyecto OASIS⁴, donde se refiere que el 80% del consumo energético del ciclo de vida de un proyecto de transporte por carretera tiene lugar en la fase de explotación (Figura 1).

Como esquema de trabajo en el futuro se propone la estructura planteada en la Figura 2, que describe las fases de un proyecto de transporte por carretera en pauta interurbana, que puede ser usado como referencia para otras pautas, otros modos de transporte e incluso para cualquier otro tipo de proyecto, por describir fases muy genéricas.

¹ Fuente: Sistema Español de Inventario (SEI) y Balances energéticos anuales (IDAE).

² Objetivos 20-20-20 de la UE. http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.

³ Construcción limpia, eficiente y amigable con el medio ambiente. Tarea 4.4. Herramienta de cálculo y análisis de las emisiones de CO₂ producidas por una infraestructura durante su fase de construcción y de explotación. Grupo investigador de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

⁴ Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles. TAREA 6. Optimización de recursos energéticos. Subtarea: Determinación de la huella energética en la fase de operación de la autopista. Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

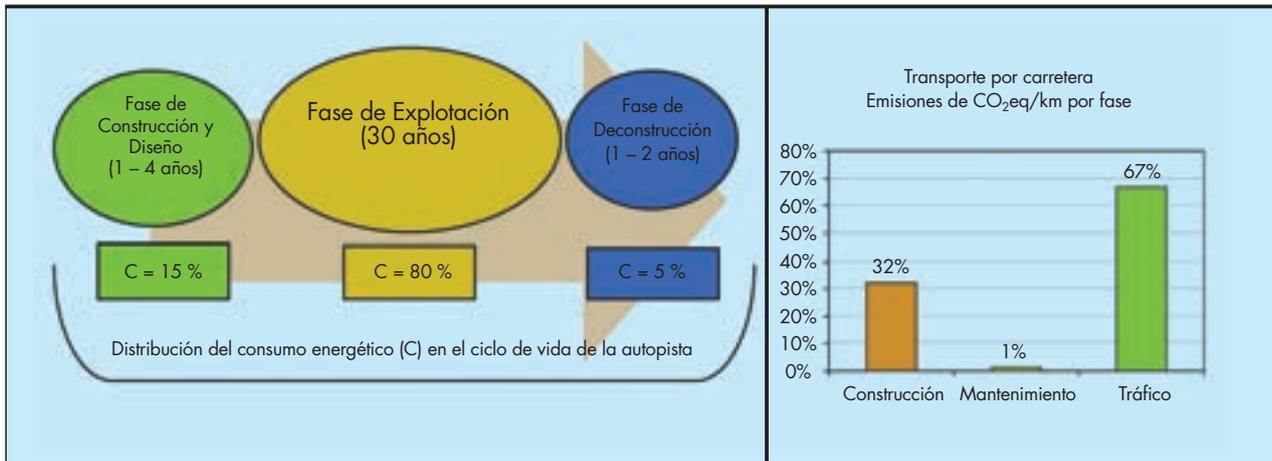


FIGURA 1. Ciclo de vida de una Carretera. Fuente: Proyecto OASIS. Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (Izqd). Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Proyecto CLEAM. Universidad Complutense de Madrid (Dcha).

FASE INFRAESTRUCTURA	FASE TRÁFICO			
Construcción	Construcción	Mantenimiento	Operación	Desmantelamiento
Mantenimiento				
Operación				
Desmantelamiento				

FIGURA 2. Esquema de fases del TRANSPORTE POR CARRETERA. Fuente: Elaboración propia en base al estudio de referencia "Life cycle assessment of railways and rail transports - Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line. September 2010". Swedish Environmental Research Institut (IVL).

Además, otros autores, para referirse al concepto de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siguen un planteamiento descriptivo del proceso o flujo de energía, con la denominación Well to Wheel (WTW), del pozo a la rueda (Figura 3).

CO₂TA se centra en la subfase operación incluida en la fase de tráfico y en el proceso que va del tanque a la rueda (TTW), que es la parte que más atención ha recibido tanto desde los ámbitos de investigación como desde las instituciones europeas. Este esfuerzo está justificado al tratarse de la fracción más importante en cuanto a consumos energéticos y emisiones de CO₂ de este tipo de proyectos (fase marcada en la Figura 1).

3. METODOLOGÍA

La herramienta CO₂TA, construida para la valoración de alternativas de un proyecto de transporte por carretera en pauta interurbana, se ha diseñado teniendo en cuenta las re-

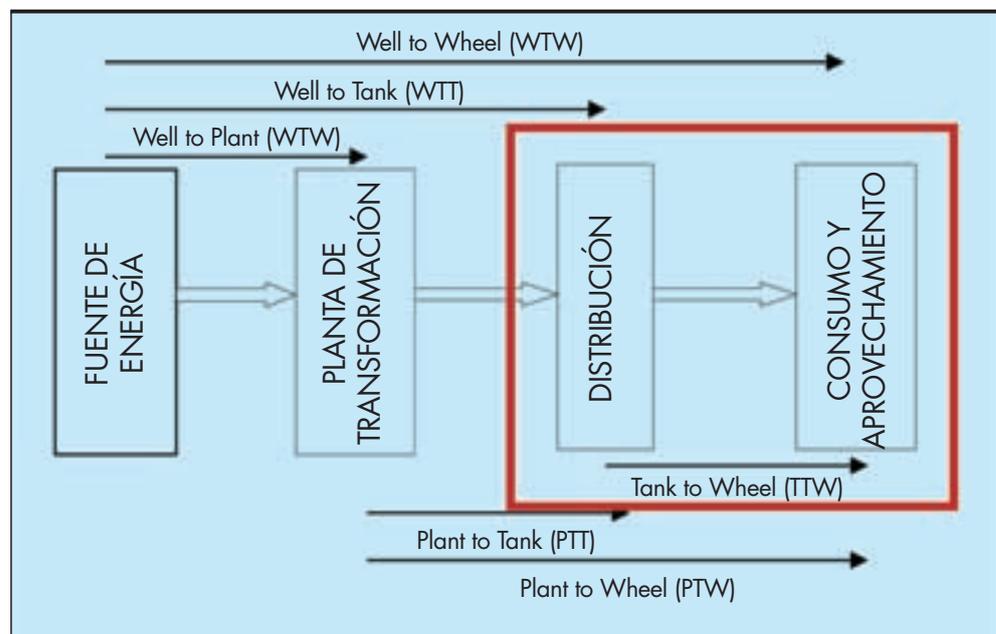


FIGURA 3. Esquema general de flujos de energía. Fuente: Elaboración propia.

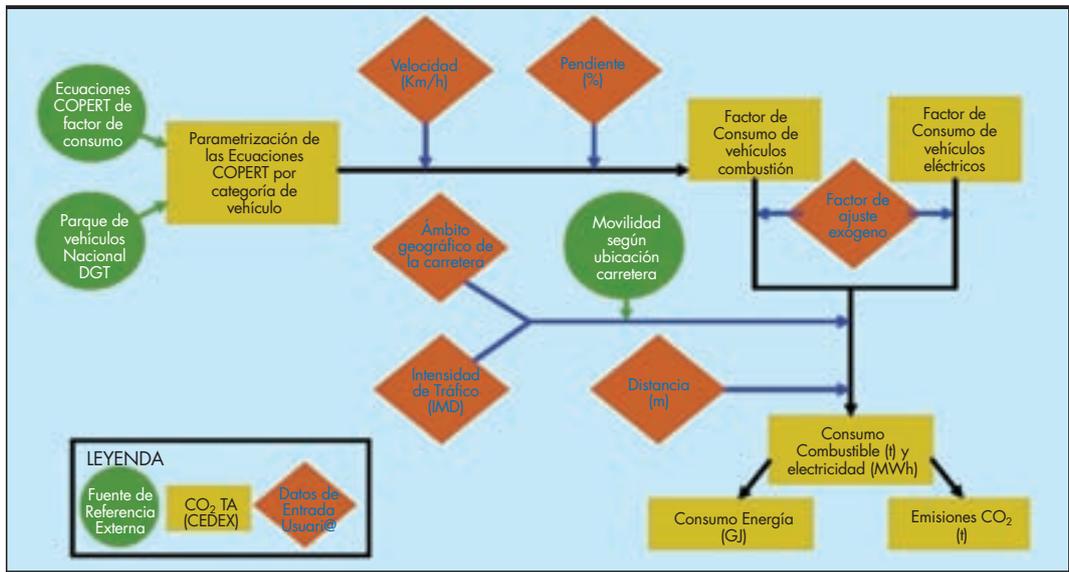


FIGURA 4. Esquema de funcionamiento de CO₂TA para cada año de referencia y cada alternativa. Fuente: Elaboración propia.

ferencias especializadas más actuales para el caso de vehículos de tracción eléctrica y se ha basado en la Guía de Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera EMEP/EEA⁵ 2009, que ha servido de patrón para el diseño de la herramienta “Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT)” en su versión COPERT4 9.1⁶, en el caso de vehículos de combustión interna.

Junto a esta información de base se necesita realizar una serie de suposiciones⁷ sobre la evolución del parque y la movilidad con la intención de completar el periodo de vida útil de un proyecto, reparando en años tomados como de referencia para definir dos periodos de prospectiva, que se describen a continuación:

- Periodo 1: Desde el Año 0 del proyecto (a definir por el usuario) hasta el año 2020.
- Periodo 2: Desde el año 2021 al año 2030.

El estudio de las emisiones abarca desde el año 0 o año de puesta en servicio hasta el año 2030, lo que será de especial utilidad en la planificación y evaluación de los proyectos de carretera, al valorar las posibilidades de las diferentes alternativas y permitir la cuantificación de las distintas iniciativas de gestión en un horizonte temporal amplio, ayudando a introducir los conceptos de análisis de ciclo de vida (ACV), huella de carbono y huella energética en los procesos de toma de decisiones.

El horizonte temporal definido hasta 2030 permite tener en cuenta buena parte de la vida útil de una infraestructura de carretera y, al mismo tiempo, proyectar una serie de supuestos más allá del 2020 sin incurrir en excesivos riesgos de pronóstico por lo dilatado del periodo de prospectiva, más cuando en el horizonte temporal próximo se producirá una ruptura tecnológica por la aparición de la movilidad eléctrica.

En la Figura 4 se sintetiza el proceso que sigue la herramienta para estimar el consumo de electricidad, el consumo de combustible, el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en cada uno de los años marcados como hito o de referencia, para una alternativa concreta de un proyecto de transporte por carretera en pauta interurbana.

Así, para evaluar los consumos y emisiones del tráfico de una alternativa en un proyecto de carretera hasta el año 2030, la herramienta calcula los consumos y emisiones anuales en el año 0 de proyecto, año 2020 y 2030. Una vez obtenidos estos valores, CO₂TA calcula los consumos y emisiones en cada periodo Año 0-2020 y 2021-2030 como semisuma de los valores en los años extremos, multiplicado por el número de años del periodo.

3.1. CONSUMO ANUAL

Partiendo de la información correspondiente para cada uno de los tipos de vehículos CO₂TA (Tabla 1), la herramienta calcula el consumo anual de electricidad o de combustible de cada categoría de vehículo a partir de la siguiente expresión genérica:

$$C_i (t/año) = \sum F C_i \times I M D_{ij} (veh/día) \times L_j (km) \times 365 \text{ días}$$

donde:

C_i = Consumo anual de electricidad o de combustible de la categoría de vehículo i , expresado en t/año o MWh/año, según el caso.

$F C_i$ = Factor de consumo de la categoría de vehículo i , expresado en kWh/km o gramos de combustible/km, según el caso.

$I M D_i$ = Intensidad media diaria de la categoría de vehículo i en la alineación j .

L = Longitud recorrida por el vehículo en la alineación⁸ j , en km.

⁵ EMEP: Cooperative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>

⁶ <http://www.emisia.com/copert/>

⁷ Partiendo las de referencias especializadas en el caso de los vehículos eléctricos y de las ecuaciones de COPERT y de las indicaciones de de la Guía EMEP/EEA en el caso de vehículos de combustión interna.

⁸ Por alineación se entiende aquella parte de un tramo que tenga características semejantes de pendiente. Por tramo se entiende aquella parte de una alternativa que tenga las mismas características de velocidad y movilidad. Estos conceptos están definidos en la Figura 12, apartado 4, explotación.

Vehículos ligeros	Motocicletas
	Turismos con motor de combustión interna
	Turismos híbridos
	Turismos eléctricos
	Furgonetas con motor de combustión interna
	Furgonetas eléctricas
Vehículos pesados	Camiones rígidos
	Camiones articulados
	Autobuses

TABLA 1. Categorías de vehículos considerados por CO₂TA. Fuente: Elaboración propia.

Categoría de vehículo	Año 2020	Año 2030
Turismo eléctrico	0,23 kWh/km	0,23 kWh/km
Furgoneta eléctrica	0,34 kWh/km	0,34kWh/km

TABLA 2. Factores de consumo medio para vehículos eléctricos utilizados por la herramienta. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Fuel Economy Guide 2012. Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos.

3.1.1. Factor de consumo de los vehículos eléctricos

La herramienta supone que los factores de consumo medio para turismos y para furgonetas eléctricos en los años 2020 y 2030 van a ser los mismos que en la actualidad. Estos factores se han estimado a partir de *Fuel Economy Guide 2012* publicada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos (Tabla 2).

3.1.2. Factor de consumo de los vehículos que emplean combustibles fósiles

Como ya se ha avanzado a lo largo del artículo el cálculo del factor de consumo de los vehículos de tracción con combustibles fósiles se apoya en el programa COPERT4 versión 9.1. Este programa desagrega el parque de vehículos por carretera en 241 categorías, que vienen determinadas por unas características específicas de los vehículos: la antigüedad, el combustible utilizado, y la cilindrada del motor en vehículos ligeros y el peso en vehículos pesados. COPERT asigna una ecuación a cada una de estas 241 categorías de vehículo que permite conocer el factor de consumo de combustible en función de la velocidad de circulación media del vehículo.

Para poder incluir en CO₂TA un factor de consumo para cada una de las siete categorías de vehículos que emplean combustibles fósiles (Tabla 1), se ha procedido en primer lugar a identificar cuáles de las 241 categorías del modelo COPERT tienen cabida en cada categoría de vehículos de CO₂TA. A partir de estas consideraciones, mediante un proceso de parametrización, se han generado unas fórmulas simplificadas que permiten obtener el factor de consumo en función de la velocidad de cada una de las categorías de vehículos de CO₂TA a partir de las ecuaciones empleadas por COPERT.

En este ejercicio, cada ecuación representativa de cada categoría COPERT se pondera en función del número de vehículos del parque nacional que se supone representativo del año 0 de explotación del proyecto, y se procede de forma idéntica para el año 2020 y 2030. Por un lado, las ecuaciones correspondientes al Año 0 se han estimado a partir de los datos del parque en el año 2011 facilitados por la Subdirección de Análisis y Vigilancia Estadística de la Dirección General de Tráfico (DGT). Por otro lado, en el caso de los años de referencia 2020 y 2030, las proyecciones diseñadas para el parque de vehículos futuro se estiman teniendo en cuenta la tasa de reposición de vehículos (matriculaciones) y las tasas de achatarramiento o desguace (bajas) que se han venido produciendo hasta el momento en el parque oficial registrado en la DGT entre los años 2005 y 2011 y que se ha asimilado a las diferentes tipologías descritas y trabajadas por COPERT, estableciéndose una serie de pautas de comportamiento por tipo de vehículo que se describen en la Tabla 3.

	Periodo Año 0-2020 (Periodo Crisis 2008-2011)	Periodo 2021-2030 (Periodo Medio 2005-2011)
Motocicletas	Matriculaciones 8 veces superiores a las bajas.	Matriculaciones se compensan con las bajas
Turismos Gasolina	Matriculaciones se compensan con las bajas	Matriculaciones se compensan con las bajas
Turismos Gasóleo	Matriculaciones 3 veces superiores a las Bajas.	Matriculaciones se compensan con las bajas
Furgonetas Gasolina	Matriculaciones son la mitad que las Bajas.	Matriculaciones son la mitad que las Bajas.
Furgonetas Gasóleo	Matriculaciones se compensan con las Bajas.	Matriculaciones son el doble que las Bajas.
Camiones Rígidos Gasolina	Matriculaciones son la mitad que las Bajas.	Matriculaciones se compensan con las bajas
Camiones Rígidos Gasóleo	Matriculaciones son la mitad que las Bajas.	Matriculaciones se compensan con las bajas
Camiones Articulados	Matriculaciones son la mitad que las Bajas.	Matriculaciones se compensan con las bajas
Autobuses	Matriculaciones 0,5 veces superior a las Bajas.	Matriculaciones se compensan con las bajas

TABLA 3. Pautas de comportamiento por tipo de vehículo en periodos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

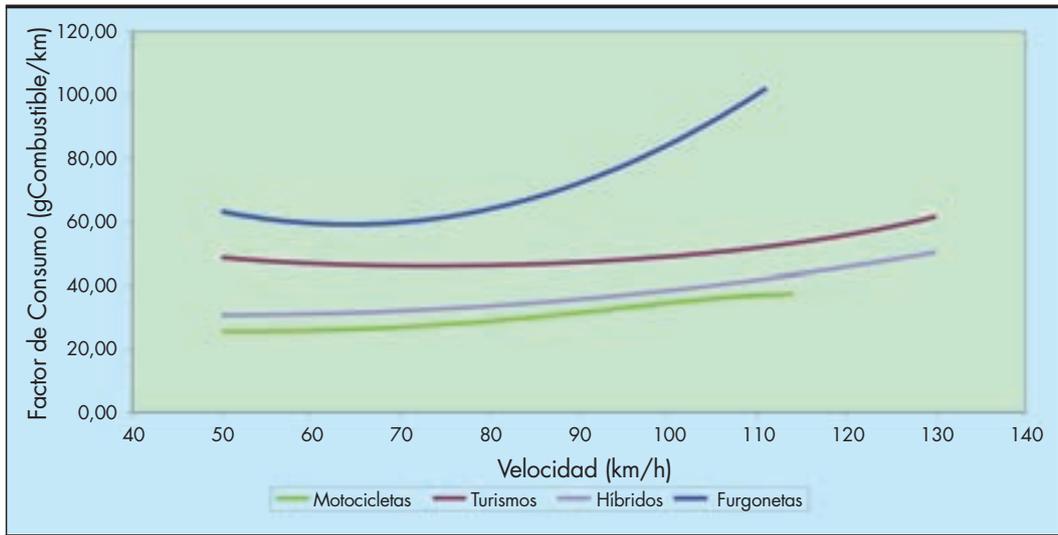


FIGURA 5. Factor de consumo de cada categoría de vehículo ligero en función de la velocidad – Año 2020. Fuente: Elaboración Propia.

Motocicletas	FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^5)+(Beta*Speed^4)+(Gamma*Speed^3)+(Delta*Speed^2)+(Epsilon*Speed)+Zita)*(1-RF)									
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF	
	0,00	0,00	0,00	0,10	-3,61	80,78	0,00	0,00	0,00	
Turismos	FC(gcomb/km)= (Alpha+Gamma*Speed+Epsilon*Speed^2+Zita/Speed)/(1+Beta*Speed+Delta*Speed^2))*(1-RF)									
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF	
	169,04	0,10	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Turismos híbridos	FC(gcomb/km)= (Alpha+Gamma*Speed+Epsilon*Speed^2+Zita/Speed)/(1+Beta*Speed+Delta*Speed^2))*(1-RF)									
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF	
	38,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Furgonetas	FC(gcomb/km)=((Alpha*Speed^2)+(Beta*Speed)+Gamma+(Delta*Log(Speed))+(Epsilon*Exp(Zita*Speed)))+(Ita*(Speed^Thita)))*(1-RF)									
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF	
	0,02	-2,55	140,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

TABLA 4. Ecuaciones CO₂TA de vehículos ligeros Año 2020. Fuente: Elaboración propia.

Como ejemplo ilustrativo de los resultados obtenidos, en las Figuras 5 y 6 se muestran las curvas de factor de consumo de combustible en función de las velocidades obtenidas para el Año 2020 para cada categoría de vehículo con motor de combustión interna, resultado de esta parametrización. Es importante señalar que se ha realizado este ejercicio suponiendo que la velocidad de los vehículos es siempre superior a 50 km/h, al considerar que en pautas interurbanas es difícil encontrar carreteras con velocidades medias de circulación por debajo de este valor.

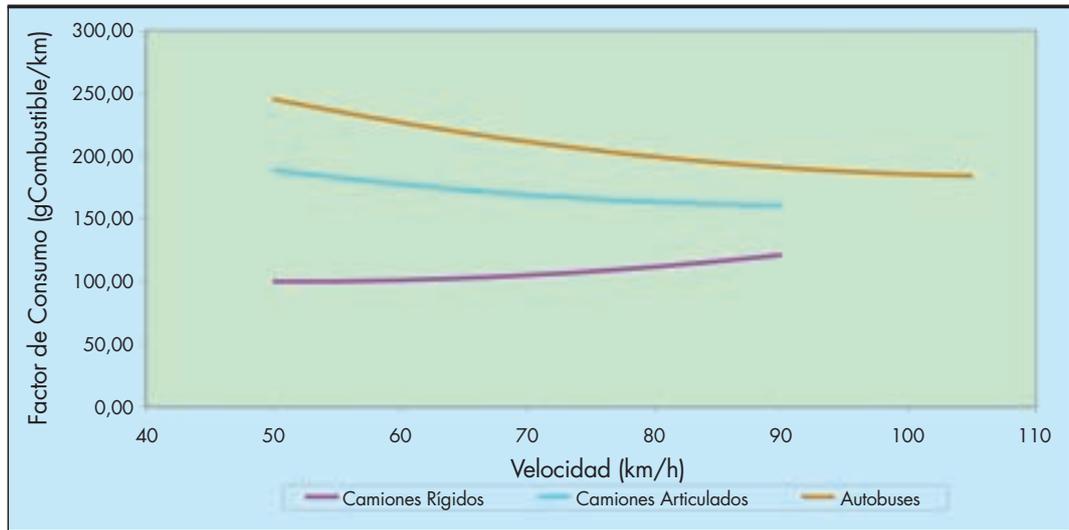
En las Tablas 4 y 5 se muestran las ecuaciones asociadas a cada una de estas curvas. En este punto se puede destacar que, en la práctica, aunque CO₂TA utiliza curvas diferenciadas para estimar el factor de consumo para cada año de referencia distinto, las hipótesis realizadas en los cambios de composición en el parque de vehículos inciden de manera limitada en la determinación de tales curvas.

En el proceso de elaboración de CO₂TA se ha observado que los datos referidos al parque de camiones articulados que provienen de la fuente utilizada en la herramienta CO₂TA, la Subdirección de Análisis y Vigilancia Estadística de la DGT, no se corresponden exactamente con la categoría camiones con remolque del Mapa de Tráfico de donde se obtiene los datos de movilidad.

Por lo tanto sería necesario realizar una nueva consulta para obtener un parque de vehículos pesados de transporte de mercancías más ajustado a la realidad, a partir del cual se tendría que realizar una nueva parametrización de las fórmulas COPERT4 para obtener las correspondientes ecuaciones CO₂TA, con nuevas proyecciones del parque para el año 2020 y 2030 para este tipo de vehículos.

Es probable que el parque de vehículos pesados de transporte de mercancías que se obtenga con este nuevo tratamiento de la información, a utilizar tanto en la parametriza-

FIGURA 6. Factor de consumo de cada categoría de vehículo pesado en función de la velocidad – Año 2020.
Fuente: Elaboración Propia.



Camiones Rígidos	FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^2)-(Beta*Speed)+Gamma								
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF
	0,01	1,41	135,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Camiones Articulados	FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^2)-(Beta*Speed)+Gamma								
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF
	0,01	2,71	288,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Autobuses	FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^2)-(Beta*Speed)+Gamma								
	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Ita	Thita	RF
	0,02	3,72	389,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

TABLA 5. Ecuaciones CO₂TA de vehículos pesados Año 2020. Fuente: Elaboración Propia.

ción de ecuaciones como en las proyecciones para una nueva versión de la herramienta, no tenga un efecto muy significativo en los nuevos resultados. A pesar de todo sería necesario un ajuste de la herramienta introduciendo estas mejoras para, en primer lugar asegurar que esta suposición es cierta, y segundo, para aproximar aún más el funcionamiento de CO₂TA a la realidad.

Este desajuste se ha producido por las dificultades existentes a la hora de relacionar las diferentes tipologías de vehículos de transporte de mercancías por carretera (marcadas por las definiciones recogidas en las legislaciones) en las diferentes fuentes consultadas. Por esta razón, y siempre partiendo desde la perspectiva que ofrece la estimación o el cálculo de consumo de energía y emisiones de CO₂, sería necesario que cada una de las fuentes involucradas (organismos competentes en sus respectivas materias) en el estudio del transporte de mercancías por carretera añadiera, dentro del ámbito de competencia, las variables que fueran pertinentes para poder relacionar el parque de vehículos pesados de transporte de mercancías y la movilidad asociada a este parque, con la metodología COPERT4, que es la fuente de referencia más utilizada a nivel Europeo a

la hora de calcular las emisiones de transporte por carretera, y por tanto de CO₂. Para la mayoría de los agentes involucrados, la metodología COPERT4 no tiene la fuerza suficiente como para marcar maneras de proceder para trabajar la información. Sin embargo, para explotar mejor esta metodología resulta necesario reducir las tipologías de los vehículos al mínimo de las categorías que se consideren representativas del parque y referir a ellas el resto de las variables que se están manejando: número de vehículos, antigüedad de los mismos, movilidad que desarrollan, peso, longitud y curvas COPERT4 representativas del cálculo de las emisiones y del consumo de la energía. Esta manera de proceder ya ha sido pensada con anterioridad en otros proyectos como el “Modelo Español de Tarificación de Carreteras (META)” y “Calculation system for traffic exhaust emissions and energy consumption in Finland (LIPASTO)”.

La denominación de cada uno de estos tipos de vehículos tendría que referirse al mismo concepto en todas las fuentes de datos necesarias para alimentar cualquier herramienta que tenga como objetivo el cálculo de emisiones de CO₂ o consumo energético.

3.1.3. Factor de corrección del factor de consumo de combustible según la pendiente de la carretera

Los factores de consumo de combustible indicados en 3.1.1 y 3.1.2 se refieren a condiciones de circulación sin pendiente en el trazado. La herramienta de cálculo CO₂TA no incorpora ningún factor de corrección por efecto de la pendiente de la carretera para el caso de motocicletas y vehículos eléctricos, pero sí para el resto de categorías de vehículos.

3.1.3.1. Factor de corrección por pendiente en turismos y furgonetas con motor de combustión interna

El programa COPERT4 no incluye la influencia de la pendiente en el caso de vehículos ligeros, a pesar de que existe esta referencia en el proyecto MEET, proyecto que sirvió de base para la elaboración de COPERT. Para solventar la limitación que presentan las ecuaciones de los turismos y furgonetas, la herramienta aplica el factor de corrección proporcionado por la siguiente ecuación obtenida en el marco del proyecto OASIS:

$$\text{Factor de corrección debido a la pendiente} = 0,1437 \times \text{Pendiente (en \% y con signo)} + 0,9995$$

Al tratarse de una función lineal, significa, en la práctica, que los aumentos de consumo por efecto de la pendiente del tráfico de este tipo de vehículos se compensan con los ahorros obtenidos por el tráfico de estos mismos vehículos que circula en sentido contrario. Esto sucede porque CO₂TA considera un reparto de la intensidad de tráfico del 50% por sentido de circulación.

3.1.3.2. Factor de corrección por pendiente de vehículos pesados

En el caso de vehículos pesados, se ha analizado cuál es la variación del factor del consumo obtenido para cada categoría de vehículo (camión rígido, camión articulado y autobús), en función de la pendiente y la velocidad. A partir de las ecuaciones que aporta la Guía EMEP/EEA en relación a los factores de consumo de vehículos pesados en función de la pendiente, y siguiendo la misma metodología que se ha expuesto en el apartado 3.1.2, se han parametrizado ecuaciones correspondientes a las categorías de vehículos pesados CO₂TA para cada una de las categorías de pendientes distintas de 0% que

se reflejan en la Guía y en COPERT (-6%, -4%, -2%, 2%, 4% y 6%). Mediante un ajuste matemático se ha relacionado la curva de consumo parametrizada de "pendiente 0%" con las curvas parametrizadas de factor de consumo en función de la velocidad de pendientes distintas de 0%. Se obtiene una ecuación continua que permite conocer el factor de corrección por pendiente respecto al consumo de combustible con pendiente 0% (Figuras 7 a 9). Este análisis se hace de igual modo para cada uno de los años referencia (Año 0, 2020 y 2030), parametrizando las ecuaciones de categorías de pesados COPERT en ecuaciones CO₂TA en función de la pendiente.

Como sucede en el caso de las curvas parametrizadas que determinan el factor de consumo en función de la velocidad expuestas en el apartado 3.1.2 las nuevas condiciones que inciden en la composición del parque afectan de manera muy limitada en la determinación de las curvas para estimar el factor de corrección por pendiente para cada año de referencia.

Las ecuaciones que se exponen en las Figuras 7, 8 y 9 se refieren a factores de corrección por pendiente aplicables a todas las velocidades. Las desviaciones que se producen entre COPERT y las curvas obtenidas son significativas, debido a que existe una variación importante entre los factores de corrección en función de la pendiente de las diferentes categorías de vehículos COPERT a diferentes velocidades. Esta opción podría mejorarse siguiendo el esquema planteado en la presentación "Influence of Road Gradient on Emission Factors (CISMA). 21st TFEIP meeting", ajustando las ecuaciones COPERT de factor de consumo de combustible en función de la pendiente para cada categoría CO₂TA de vehículo pesados a una función continua interpolada en tres dimensiones del tipo que se representa en la Figura 10, utilizada a modo de ejemplo para ilustrar lo que se entiende que podría representar una mejor aproximación.

3.1.4. Factor de ajuste exógeno del factor de consumo

Por último, CO₂TA corrige los factores de consumo de cada categoría de vehículo estimados según se describe en los apartados 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 aplicando un factor de ajuste a definir por el usuario para cada grupo de vehículos (ligeros/pesados) y año de referencia del análisis (Año 0, 2020 y 2030) y que permitirá en el futuro incluir ciertas correcciones avaladas en distintos documentos de investigación.

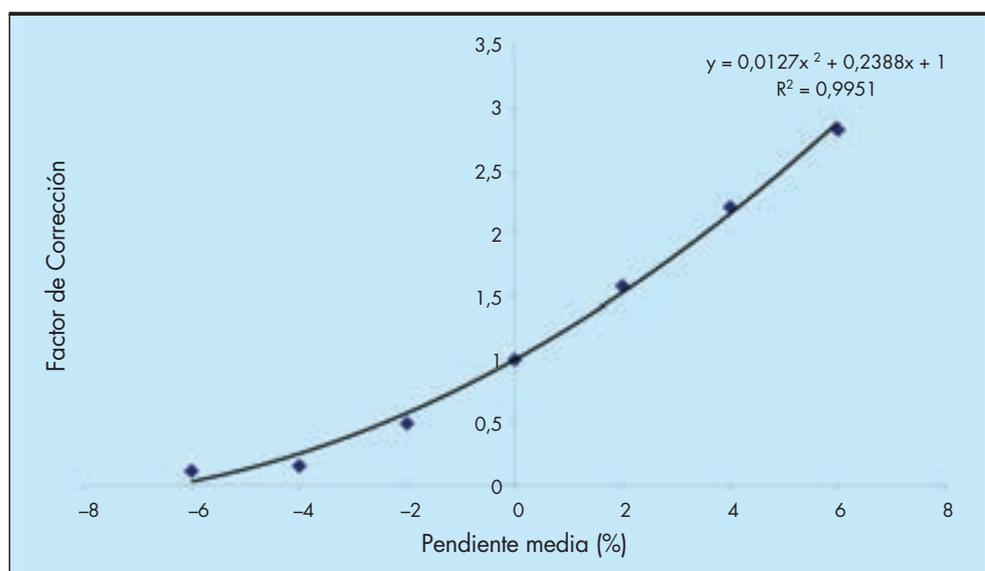


FIGURA 7. Factor de corrección por pendiente para camiones rígidos Año 0.
Fuente: Elaboración propia.

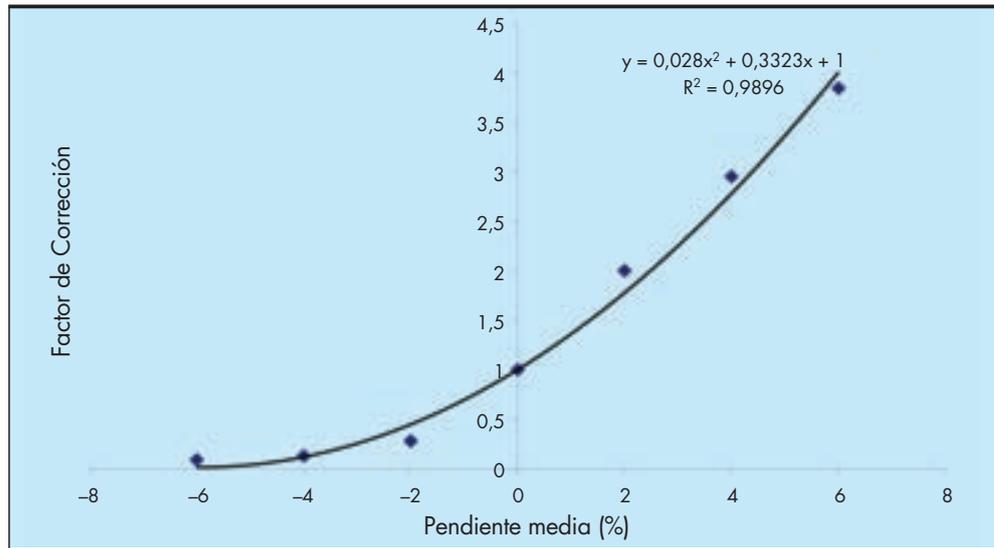


FIGURA 8. Factor de corrección por pendiente para camiones articulados Año 0. Fuente: Elaboración propia.

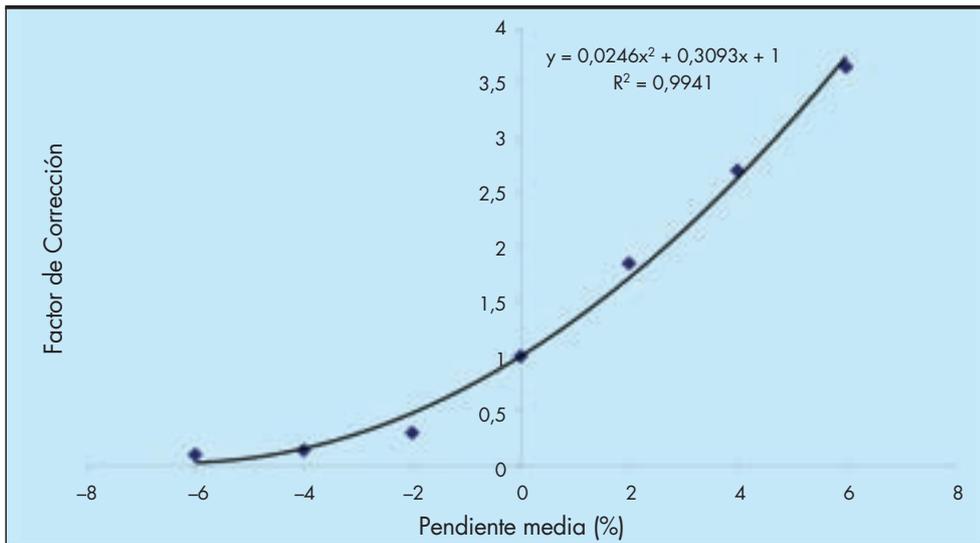


FIGURA 9. Factor de corrección por pendiente para autobuses Año 0. Fuente: Elaboración propia.

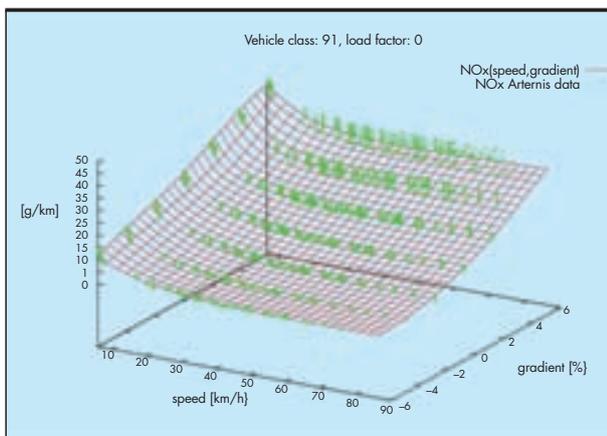


FIGURA 10. Vista 3D de función interpolada continua de emisión de NOx valorando velocidad y pendiente. Fuente: Influence of Road Gradient on Emission Factors (CISMA). 21st Task Force on Emission Inventories and Projections (TFEIP) meeting.

3.2. EMISIONES ANUALES DE CO₂

La estimación de las emisiones anuales de CO₂ generadas por los vehículos que se desplazan por una carretera en pauta interurbana se realiza a partir de los consumos en electricidad y combustible que estos realizan en el año correspondiente. El resultado se expresa en toneladas de CO₂.

3.2.1. Emisiones anuales de CO₂ de los vehículos eléctricos

En el caso de vehículos eléctricos, las emisiones de CO₂ se determinan en función del factor de emisión del mix eléctrico nacional:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ vehículos eléctricos (tCO}_2\text{)} = \text{Consumo (MWh)} \times (1000 \text{ kWh/MWh}) \times \text{Factor emisión MIX (gCO}_2\text{/kWh)} \times (\text{tCO}_2/10^6\text{gCO}_2)$$

La Tabla 6 indica cuál es el factor de emisión que la herramienta supone para el Año 0, 2020 y 2030.

El factor de emisión correspondiente al Año 0 se ha tomado de la Memoria Ambiental 2011 de Red Eléctrica de España (REE). Para el resto de los años de referencia, se consi-

Factor de emisión del mix energético nacional ⁹ (gramos de CO ₂ /kWh)	Año 0	2020	2030
		255	234,6

TABLA 6. Factores de emisión del mix energético nacional considerados por la herramienta. Fuente: Elaboración propia.

deran los compromisos contraídos por España, para cada uno de los años considerados. El factor de emisión correspondiente al año 2020 se ha calculado a partir del compromiso nacional en el paquete verde comunitario, 20-20-20¹⁰ de la UE. En el año 2011 el porcentaje de participación de energías renovables en el mix energético fue del 32,6%, esto supone que para alcanzar el objetivo marcado por la UE en términos de energía final, sería necesario al menos disponer del 40% de la producción eléctrica mediante energías renovables (lo que permitiría alcanzar el 20% en la energía final del mix energético).

El factor de emisión en 2030 se ha calculado tomando como referencia la *Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050, COM (2011) 112 final*, que supone que el sector eléctrico tiene que reducir sus emisiones entre un 54% y un 68% desde el año 1990 hasta el año 2030¹¹.

3.2.2. Emisiones anuales de CO₂ de los vehículos que utilizan combustibles fósiles

Para estimar las emisiones anuales de CO₂ (E_{CO₂}) producidas por el consumo de carburante del resto de vehículos (motor de combustión) se utiliza la siguiente ecuación¹²:

$$E_{CO_2} = 44.011 \frac{Q}{12.011 + 1.008r_{H/C} + 16.000r_{O/C}}$$

donde Q es el consumo total de carburante y r_{H/C} representa la relación entre el número de átomos de hidrógeno y carbono existente en la composición del carburante. Esta relación es de 1,8 para la gasolina y de 2,0 para el gasóleo. CO₂TA toma un valor de r_{H/C} fijo para cualquier carretera igual a 1,96 en el Año 0, que se obtiene de suponer que el reparto del consumo de carburante es de 79% de gasóleo y 21% de gasolina, valor supuesto por el Inventario Nacional de Emisiones¹³ y que se supone constante a lo largo de todo el periodo de estudio, y por tanto idéntico todos años de referencia.

⁹ Estos factores de emisión consideran las emisiones de CO₂ de la planta a la rueda (PTW), mientras que en el caso de los vehículos de combustión interna se tienen en cuenta las emisiones de CO₂ del tanque a la rueda (TTW). (Ver Figura 3).

¹⁰ En la COM (2010) 265 final "análisis de las opciones para rebasar el objetivo del 20% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y evaluación del riesgo de fugas de carbono", la Comisión ha demostrado la necesaria reducción de GEI hasta el 30%, si realmente se quiere mantener el impulso de la innovación y de la competitividad.

¹¹ Las emisiones del sistema eléctrico del año 1990 se han obtenido del Inventario de emisiones -MAGRAMA- y la producción eléctrica de ese año de las Estadísticas Eléctricas Anuales -Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

¹² Fórmula obtenida de simplificar la fórmula que propone el EMEP/EEA *emission inventory guidebook 2009, updated May 2012. 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv Passenger cars, light-duty trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles. EEA, Copenhagen, 2009*, en la que r_{O/C} es la relación entre el número de átomos de oxígeno y carbono en el carburante, cuyo valor es cero para la gasolina y el gasóleo:

$$E_{CO_2} = 44.011 \frac{Q}{12.011 + 1.008r_{H/C} + 16.000r_{O/C}}$$

Esta fórmula supone que, en última instancia, todo el contenido de carbono del carburante terminará combinándose con oxígeno para formar CO₂.

¹³ Fuente: Volumen 2 del Inventario Nacional de Emisiones 1990-2009, tabla 7.2.8.

3.3. CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA

El consumo de energía se obtiene también a partir del consumo de combustible y se expresa en Gigajulios (GJ).

En el caso de vehículos eléctricos, el consumo de electricidad, expresado en kWh, se transforma de forma directa en GJ multiplicando por 3,6x10⁻³ (1 kWh = 3,6 x 10⁶ julios).

En el caso del resto de vehículos, el consumo anual de energía (E_J) a partir de combustibles fósiles se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$E_J = Q \times VCN$$

El valor Q es el consumo total de carburante en kilogramos y VCN es el valor calórico neto del combustible medido en TJ/Gg. El valor de VCN viene determinado por el valor calórico neto de la gasolina (44,3 TJ/Gg) y del gasóleo (43 TJ/Gg) y por la proporción de combustible de cada tipo utilizada por los vehículos que circulan por la carretera. CO₂TA toma un valor de VCN fijo para cualquier carretera igual a 43,27 TJ/Gg en el Año 0, obtenido de suponer, como para el cálculo de las emisiones de CO₂, que el reparto del consumo es de 79% de gasóleo y 21% de gasolina. Se sigue manteniendo la hipótesis anterior en cuanto a la proporción de consumo de gasolina y de gasóleo en todo el periodo de estudio.

4. EXPLOTACIÓN

CO₂TA es una herramienta desarrollada en una hoja de cálculo Microsoft Excel®, lo que hace que se pueda usar de forma fácil y sencilla, ya que este entorno es conocido por la mayoría de usuarios. Es de uso totalmente libre y abierto para diferentes tipos de responsables con competencias en diferentes ámbitos relacionados con el sector del transporte por carretera que persigan evaluar de emisiones de CO₂.

La herramienta CO₂TA se presenta en un archivo comprimido compuesto de dos archivos en formato Excel:

- Archivo 1: CO₂TA(Calcula).
- Archivo 2: CO₂TA(Compara).

Cada vez que se aplica CO₂TA(Calcula), la herramienta estima las emisiones de CO₂ y los consumos de combustible, electricidad y energía de **una única alternativa** para el periodo comprendido entre el año 0 y el año 2030. Los parámetros que definen las características de la carretera y su tráfico las introduce el usuario por tramos y alineaciones (Figura 11).

En los proyectos de carretera se presentan varias alternativas, que están divididas en tramos, y estos, a su vez, se componen de diferentes alineaciones. Por tramo se entiende una parte de la carretera con iguales características de intensidad de tráfico y velocidad media de circulación y por alineación se entiende aquella parte del tramo que tenga características semejantes de pendiente. El usuario debe proporcionar los datos de longitud y pendiente de cada alineación, así como los de velocidad e intensidad de tráfico promedio en cada tramo. La herramienta está preparada para trabajar con un máximo de cinco tramos y 200 alineaciones en cada tramo.

La herramienta calcula el consumo de electricidad y combustible del tráfico de vehículos en cada una de las alineaciones para el periodo estudiado. El consumo total de cada alternativa será el sumatorio de los consumos de cada una de las alineaciones de cada tramo.

Como se ha señalado a lo largo del artículo CO₂TA(Calcula) evalúa una sola alternativa cada vez que se utiliza. Esto hace que como **primer paso** sea necesario introducir una serie de datos que caracterizan cada una de las alternativas de un proyecto. De este modo el usuario, va a tener que introdu-



FIGURA 11. Organización de una carretera en tramos y alineaciones.
Fuente: Elaboración propia.

cir el nombre de la alternativa en cuestión, el año de puesta en funcionamiento y, diferenciando por tramos, el ámbito donde se produce la actuación. Por defecto la herramienta supone localización estatal, pero el usuario puede elegir también una desagregación a nivel de CC. AA. y nivel provincial.

Posteriormente, en **segundo lugar**, CO₂TA(Calcula) requiere que se introduzca la velocidad media de recorrido diferenciada para cada tramo estudiado y para vehículos ligeros y pesados en los apartados destinados al Año 0, año 2020 y año 2030.

Como **tercer paso** la herramienta solicita al usuario que defina la intensidad del tráfico en cada tramo objeto de análisis, para el Año 0, 2020 y 2030. La intensidad de tráfico se da como Intensidad Media Diaria (IMD), distinguiendo entre vehículos ligeros y vehículos pesados. CO₂TA(Calcula) supone que la IMD de ligeros y de pesados definida por el usuario en cada tramo de carretera se reparte por igual en los dos sentidos de circulación y se aplica a cada sentido de circulación el factor de consumo correspondiente.

Para el año 0 la herramienta asigna la intensidad de tráfico de vehículos ligeros y pesados introducida por el usuario a cada una de las categorías de vehículos CO₂TA de la Tabla 1 utilizando los porcentajes medios de movilidad, expresados en vehículos-km, que se producen en la Red de Carreteras del Estado (RCE) en los ámbitos estatal, regional y provincial en el periodo 2006–2010, mientras que para los años 2020 y 2030 estos porcentajes se obtienen de las proyecciones estimadas a partir de los datos de movilidad utilizados para el Año 0. Los datos de movilidad se obtienen del Mapa de tráfico del Ministerio de Fomento, cuya información viene desagregada exactamente en las categorías CO₂TA de vehículos de combustión interna, a excepción de los turismos híbridos. No obstante, se empieza a considerar la movilidad de vehículos híbridos y eléctricos a partir del año 2020, suponiendo que este tipo de vehículos participan en la movilidad total de forma proporcional a como lo hacen en el conjunto total del parque nacional. Para poder determinar el parque de vehículos híbridos y eléctricos se parte de las estadísticas actuales de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC) y de otras publicaciones de actualidad,

tomando los datos del año 2011 como punto de partida, con los que se obtiene una estimación del parque de este tipo de vehículos en los años considerados como de referencia 2020 y 2030.

En **cuarto lugar** la herramienta permite al usuario introducir un factor de ajuste exógeno si se quieren tener en cuenta otras consideraciones que no están incluidas en la herramienta.

Como **quinto y último paso** el usuario tendrá que introducir los datos de pendiente y distancia de cada una de las alineaciones que forman parte de cada tramo, obteniéndose los **resultados** de consumos de combustible y electricidad, emisiones de CO₂ y consumos energéticos.

Una vez que se han evaluado las diferentes alternativas de las que consta un proyecto de transporte por carretera con CO₂TA(Calcula) utilizaremos el segundo elemento de la herramienta, CO₂TA(Compara). Va a servir al usuario para comparar los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ de las diferentes alternativas que han sido evaluadas utilizando CO₂TA(Calcula).

5. VALIDACIÓN

Se han comparado los resultados obtenidos con CO₂TA con los obtenidos con otras herramientas análogas de las que se tiene conocimiento.

Para hacer las pruebas de contraste se comparan los resultados obtenidos por CO₂TA para el año 0 con los obtenidos mediante el programa COPERT4 versión 10.0 (última disponible) y con la herramienta Huella Energética en la fase de Operación de Autopistas (HERA) desarrollada por el Centro de Investigación del Transporte, TRANSyT-UPM¹⁴ dentro de su participación en el Proyecto OASIS.

La principal conclusión que se extrae de este estudio comparativo es que los resultados obtenidos por CO₂TA en los casos de estudio con trazados sin pendiente son del mismo orden de magnitud (Tabla 7) que los obtenidos usando las otras dos herramientas.

¹⁴ Investigadores principales: Andrés Monzón, Natalia Sobrino y Sara Hernández.

TABLA 7. Consumo de combustible (t) y Emisiones de CO₂ (t) estimadas con las herramientas utilizadas para la validación (CO₂TA, COPERT y HERA).
Fuente: Elaboración propia.

PROYECTO EJEMPLO	CO ₂ TA		COPERT		HERA	
	Consumo de Combustible (t)	Emisiones de CO ₂ (t)	Consumo de Combustible (t)	Emisiones de CO ₂ (t)	Consumo de Combustible (t)	Emisiones de CO ₂ (t)
Ligeros	161	508	160	507	–	–
Pesados	44	137	44	137	–	–
Total	205	645	204	644	203	752

Si se comparan los resultados obtenidos en CO₂TA con los obtenidos a partir de COPERT en relación al estudio de un trazado con cierta pendiente, se produce un incremento en las variaciones existentes. Éstas vienen marcadas, sobre todo, por la consideración de que en CO₂TA el tráfico se produce en ambas direcciones de una carretera, mientras que en COPERT no tiene en cuenta esta suposición. Además, es importante señalar que en COPERT, en el caso de los vehículos ligeros, la pendiente no tiene efecto sobre el consumo de combustible, ni sobre las emisiones. Este efecto sí se ha considerado en CO₂TA, aunque, en la práctica, no tiene incidencia real en el resultado, al considerar una ecuación lineal para obtener el factor de corrección en función de la pendiente y un reparto de la IMD por sentido del 50% (apartado 3.1.3.1). Por el contrario, en el caso de los vehículos pesados, son significativas las variaciones en los resultados de estas dos herramientas cuando se considera la pendiente, sobre todo a altas velocidades y con pendientes muy marcadas, consecuencia del ajuste matemático del factor de corrección en función de la pendiente para vehículos pesados (apartado 3.1.3.2). No obstante, la influencia de este efecto queda diluida en el resultado final, ya que este tipo de vehículos suponen, de media, en torno al 15% de la intensidad de tráfico en una carretera. A pesar de este último apunte, resultaría de interés seguir mejorando la forma de incluir el efecto de la pendiente en el consumo de combustible, y por tanto las emisiones de CO₂, en la herramienta CO₂TA, ya que en algunos corredores la participación de los vehículos pesados en la intensidad de tráfico es altamente significativa.

En este sentido, cuando se comparan los resultados de HERA con los obtenidos en CO₂TA para los trazados con pendiente se puede concluir algo muy parecido a cuando se comparaba la herramienta CO₂TA con COPERT. HERA supone un solo sentido de circulación en cada tramo del proyecto estudiado y, para el caso de vehículos pesados, los parámetros utilizados para introducir el efecto de la pendiente en el consumo de combustible según cada tipología se aproximan mucho a los utilizados por COPERT. Por el contrario, a diferencia de lo que ocurre con COPERT, HERA sí considera el efecto de la pendiente para los vehículos ligeros, aunque no lo aplica de la misma manera que CO₂TA.

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La principal conclusión que se extrae de este análisis es que las variables distancia (km) e intensidad de tráfico (IMD), que determinan la movilidad de los diferentes tipos de vehículos, es decir, kilómetros recorridos, afectan de forma proporcional a los resultados obtenidos por la herramienta.

Sin embargo, los cambios producidos en la velocidad media de circulación (km/h) producen variaciones de menor significación en los resultados, incluso cuando la velocidad media cambia de forma significativa. Estas variaciones vienen marcadas por las ecuaciones obtenidas de la parametrización, que relacionan el factor de consumo de combustible en función de la velocidad (apartado 3.1.2). En el caso de los vehículos eléctricos, las variaciones en el factor velocidad no afectan al consumo de electricidad, al considerar la herramienta consumos constantes por cada kilómetro recorrido.

Por otro lado, los cambios en la pendiente (%) afectan a los resultados en mayor o menor medida dependiendo de la variación estimada, aumentando las diferencias con el incremento de la pendiente (Figuras 7 a 9). Estas variaciones sólo afectan a los consumos y emisiones de vehículos pesados, pero no a las de vehículos ligeros, lo que corrobora lo expuesto a este respecto en los apartados 3.1.3.1 y 5. Los cambios producidos en esta variable no afectan al consumo de electricidad.

Por último destacar que cambios en el factor de ajuste producen variaciones proporcionales en los resultados obtenidos.

7. CONCLUSIONES

- Se podría definir CO₂TA como una herramienta que permite comparar las diferentes alternativas de un proyecto de carretera estimando el consumo de combustible, el consumo de energía y las emisiones de CO₂¹⁵ del tráfico de vehículos que circula por una carretera en pauta interurbana¹⁶, cumpliendo de esta manera con los objetivos de carácter preventivo de las normativas que se formulan desde la UE, como son la EIA y la EAE para corregir los impactos ambientales. Además, ayudaría a incluir los conceptos de huella de carbono y huella energética en los procesos de toma de decisiones.
- Es necesario mejorar y actualizar las fuentes de referencia que sirven para obtener las ecuaciones de factor de consumo en función de la velocidad y la pendiente, los factores de emisión de la electricidad o el parque de vehículos, tanto actual como el proyectado a futuro. Para plantear trabajos en este campo sería recomendable profundizar en la metodología de cálculo del parque del futuro, estimar por un lado el crecimiento vegetativo de la población y en su función determinar el nivel de motorización, acorde con las variables de tipo macroeconómico a presuponer para este país. Además, en este trabajo ha quedado patente que el parque de vehículos de mercancías está compuesto por una serie amplia de tipología de vehículos con características diferenciales, en muchos casos mínimas, que sería preciso encajar en menor número de categorías, y a estas categorías asociar el resto de los atributos a medir para la explotación de este tipo de herramientas, en concreto la movilidad. Esta tarea ayudaría en la parametrización de ecuaciones de las distintas tipologías de vehículos pesados. Además de estas mejoras propuestas en relación a la fase de tráfico, resultaría de gran interés estudiar la forma de considerar las emisiones y consumos energéticos relacionados con la vida útil de la fase de infraestructura de un proyecto de transporte por carretera, lo que permitiría tener en cuenta los consumos y emisiones de todas las fases de este tipo de proyectos, tal y como va a requerir la nueva Ley de Evaluación Ambiental.
- Las emisiones del sector de la carretera son de tal importancia en las emisiones globales del transporte que se debería contar en España con un grupo de trabajo que fuera ajustando y validando las herramientas de medida, tanto de emisiones como de consumos de energía, debidas a este modo de transporte. Este grupo se encargaría de introducir de forma homologada los métodos de cuantificación de emisiones acordados en la UE y, más en concreto, los elaborados por grupos que trabajan la metodología COPERT. Un ejemplo que justifica la creación de este grupo ha sido ya expuesto en este documento "en COPERT no se contempla el consumo de energía y emisiones para los vehículos ligeros en función de la pendiente". Esta cuestión no incorporada a la metodología COPERT, debería producirse cuando estuviera lo suficientemente contrastada y cuantificada según los criterios que marca la metodología EMEP/EMEA, así esta tarea podría desempeñarse por esta comisión. Además, este grupo de trabajo podría acometer en el futuro la inclusión en CO₂TA, o en otras herramientas análogas, las curvas representativas de consumo de energía y de emisiones que definan los comportamientos de nuevos vehículos y de la movilidad del futuro (movilidad eléctrica).

¹⁵ Las emisiones de CO₂ en el transporte por carretera representan la práctica totalidad de emisiones de GEI generadas por este modo de transporte según el Inventario Nacional de emisiones 2011 (99%). Por esta razón la herramienta se va a centrar exclusivamente en la estimación de este gas.

¹⁶ Pauta en la que los vehículos circulan con velocidades medias altas (siempre por encima de los 50 km/h), manteniendo la velocidad relativamente constante y sin que se produzca congestión, de forma que en los vehículos con motores de combustión interna los consumos y las emisiones de CO₂ proceden básicamente con el motor estabilizado térmicamente, por encima de 70°C.

- CO₂TA aúna muchas de las ventajas de las aplicaciones desarrolladas en anteriores proyectos como COPERT, OASIS y CLEAM, como son su facilidad de uso y su acceso totalmente libre, así como el hecho de incluir un análisis proyectivo de las emisiones de CO₂ y consumos energéticos del transporte por carretera hasta el año 2030, lo que permite introducir el concepto de huella de carbono y huella energética en los procesos de toma de decisiones (EIA). Además ha contado en su desarrollo con la supervisión y participación de las administraciones públicas que se encargan de estudiar y prevenir los efectos y consecuencias de los proyectos de carretera en relación al cambio climático.

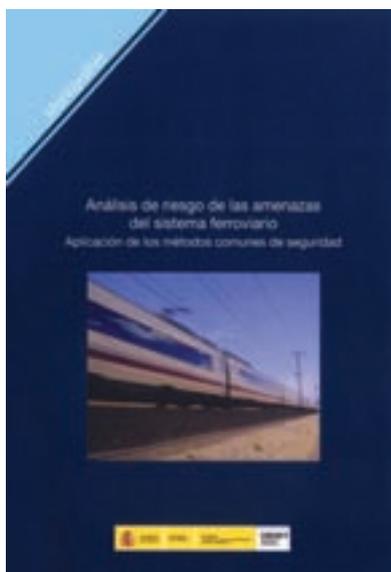
8. AGRADECIMIENTOS

Es importante agradecer la ayuda desinteresada que ha prestado en todo momento **Manuel Avilés Lucas**, Jefe de Servicio de Análisis Estadístico de la **Subdirección de Análisis y Vigilancia Estadística de la DGT**, sin cuya colaboración los resultados no hubieran sido los mismos, por la dificultad de obtener y comprender los datos relacionados con el parque de vehículos nacional necesario para desarrollar los cálculos de CO₂TA. Este agradecimiento se extiende a la OECC y a TRANSyT. Además, con este ejercicio se reconoce la necesidad de una administración coordinada para implementar herramientas que después conduzcan a la cuantificación de políticas que aseguren el bienestar de los ciudadanos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Antonacci, G. Todeschini, I. Cemin, A. (CISMA). 2008. Influence of Road Gradient on Emission Factors. 21st Task Force on Emission Inventories and Projections (TFEIP) meeting. Milán 10 - 11 November, 2008.
- Asociación Española de Profesionales de Automoción (ASEPA). 2010. Vehículos híbridos y eléctricos. Monografías ASEPA 2. ASEPA. Madrid.
- Asín Muñoz, J. 2012. Las infraestructuras de Recarga para el vehículo eléctrico. Revista Ambienta n°100. <http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/secciones/articulos/Ingenieria.htm> (acceso 16 de abril de 2013).
- Asociación Española de Fabricantes de Camiones y Automóviles (ANFAC). Estadísticas. <http://www.anfac.com/estadisticas.action> (acceso 16 de abril de 2013).
- CENIT, Centro de Innovación del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). TRANSyT, Centro de Investigación del Transporte, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Departamento de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid (UCM). 2009. Modelo Español de Tarificación de Carreteras (META). Proyecto de Investigación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Fomento. Madrid.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). 2011. Directrices a considerar en la elaboración del informe de sostenibilidad ambiental para la aplicación de la normativa de planes y programas en infraestructura de transporte, bajo la consideración del cambio climático. CEDEX. Madrid.
- COM (2010) 265 final. Análisis de las opciones para rebasar el objetivo del 20% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y evaluación del riesgo de fugas de carbono.
- COM (2011) 112 final. Hoja de Ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050.
- Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) y European Environmental Agency (EEA). 2009. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009, updated May 2012. 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv Passenger cars, light-duty trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles. EEA. Copenhagen. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009> (acceso 16 de abril de 2013).
- Crespo García, L. Montané López, M. García Cortés, A. y Jiménez Arroyo, F. 2012. Implicaciones de la movilidad en las CC. AA. en sus emisiones de gases de efecto invernadero. Monografías, M-109. CEDEX. Madrid.
- Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.
- Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 2011, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.
- Environmental Protection Agency (EPA) y U.S. Department of Energy (DOE). Fuel Economy Guide 2012. EPA y DOE. 2012. <http://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/guides/feg2012.pdf> (acceso 16 de abril de 2013).
- European Environmental Agency (EEA), EMISIA, S.A., Joint Research Centre (JRC) European Commission. COPERT4 (COMputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) versión 10.0. EMISIA S.A. Noviembre 2012. <http://www.emisia.com/copert/General.html> (acceso 16 de abril 2013).
- Hassel, D. Weber, F. J. 1997. Gradient Influence on Emission and Consumption Behaviour of Light and Heavy Duty Vehicles. TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH. MEET Project. COST 319 Action.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Balances energéticos anuales: 1990 – 2010. http://www.idae.es/index.php/idpag.481/recategoria.1368/re/menu.363/mod.pags/mem_detalle (acceso 16 de abril 2013).
- Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.
- Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Sistema Español de Inventario. Volumen 2: Análisis por Actividades Emisoras. MAGRAMA. <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-volumen2.aspx> (acceso 16 de abril de 2013).
- Ministerio de Fomento. 2005-2010. Mapa de Tráfico. Secretaría General de Infraestructuras. Dirección General de Carreteras. Madrid.
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MINETUR). Estadísticas y Balances Energéticos. Estadísticas Eléctricas Anuales. <http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Publicaciones/ElectricasAnuales/Paginas/ElectricasAnuales.aspx> (acceso 16 de abril de 2013).
- Ministerio del Interior. 2012. Anuario Estadístico General 2011. Dirección General de Tráfico. Madrid.
- Monzón, A. Sobrino, N. Hernández, S. Huella Energética en la fase de Operación de Autopistas (HERA). Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (UPM). <http://www.hera.transyt.upm.es/> (acceso 16 de abril de 2013).
- Monzón, A. Pérez, P.J. Hernández, S. Sobrino, N. García L.G. 2012. Proyecto Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles (OASIS). Tarea 6: Optimización de los recursos energéticos. Entregable final. Subtarea: Determinación de la Huella Energética en la fase de operación de la autopista. Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid.
- Proyecto Construcción limpia, eficiente y amigable con el medio ambiente (CLEAM). 2011. Tarea 4.4. Herramienta de cálculo y análisis de las emisiones de CO₂ producidas por una infraestructura durante su fase de construcción y de explotación. http://www.cleam.es/investigaciones_categorias/es-emisiones (acceso 16 de abril de 2013).
- Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.
- Red Eléctrica de España (REE). 2012. Memoria Ambiental 2011. REE. Madrid.
- Stripple, H., Uppenberg, S. 2010. Life cycle assessment of railways and rail transport. Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd, Göteborg.
- Technical Research Centre of Finland (VTT). Calculation system for traffic exhaust emissions and energy consumption in Finland (LIPASTO). VTT <http://lipasto.vtt.fi/indexe.htm> (acceso 16 de abril de 2013).

EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 516
Año de edición: 2012
P.V.P.: 25€

ANÁLISIS DE RIESGO DE LAS AMENAZAS DEL SISTEMA FERROVIARIO. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS COMUNES DE SEGURIDAD

Este libro que se presenta, es el compendio del trabajo realizado por un grupo de expertos bajo la dirección del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX en el área de la seguridad del sistema ferroviario, para la identificación de aquellas amenazas significativas y su riesgo asociado que, en determinadas circunstancias, pueden interferir en el correcto funcionamiento del sistema ferroviario y que, por tanto, deben ser examinadas con especial atención en los procesos de evaluación de los diferentes subsistemas constitutivos del ferrocarril así como en las fases previas de obtención del Certificado de Seguridad para la puesta en servicio de los mismos. Estas amenazas determinan requisitos esenciales de seguridad a tener en cuenta en los Safety Cases de las diferentes instalaciones o equipos para la concesión de la autorización de circulación de un nuevo vehículo o apertura de una línea o sección de línea. La metodología empleada en el proceso sigue las recomendaciones dadas por la ERA relativas a los Métodos Comunes de Seguridad (MCS) para el análisis del riesgo de amenazas y los criterios y los criterios expuestos en la EN 50126. La estructura que da cuerpo a todo el trabajo, es la Base de Datos General de Amenazas Significativas, Hazard Log, obtenida de la identificación y análisis de las amenazas realizado por un grupo de expertos en base a su experiencia, sobre cada uno de los subsistemas establecidos en las ETIs. De las amenazas consideradas se presentan unos Informes en los cuales, además de realizar una breve exposición de la amenaza y porqué se ha considerado, se incluyen las causas, que a juicio del experto, determinan la amenaza y las recomendaciones a seguir para reducir o mitigar su riesgo, es decir, los requisitos esenciales que a la hora de realizar el proyecto se deben tener en cuenta para mitigar o reducir el riesgo de la amenaza. En definitiva, este libro constituye una herramienta importante de ayuda en el seguimiento de la seguridad del sistema ferroviario y tiene también como objetivo la transmisión de experiencia sobre el funcionamiento real de los subsistemas ferroviarios y de sus puntos más críticos.



Nº de páginas: 438
Año de edición: 2009
Reimpresión: 2013
P.V.P.: 40€

GUÍA TÉCNICA SOBRE TUBERÍAS PARA EL TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

La “Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión” es el resultado de un trabajo realizado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX por encargo de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente. Tiene por objeto compilar la normativa y reglamentación vigente sobre la materia, así como establecer unos criterios generales en lo relativo al proyecto, instalación y mantenimiento de tuberías para el transporte de agua a presión, independientemente de cual sea su destino final (abastecimientos, regadíos, etc.).

Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es