

Emisiones de CO₂ debidas al transporte marítimo de un producto: una propuesta metodológica de cálculo



Ernest Benedito-Benet
Carles Rúa-Costa

Doctor

Ingeniero Industrial, Responsable de Proyectos Estratégicos y de Innovación del Puerto de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales. Dpto. de Organización de Empresas. Avda Diagonal, 647 – 08028 Barcelona. Tfno: +34 934 054010. ernest.benedito@upc.edu

Recibido: 09/02/2012 • Aceptado: 15/06/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4647>

CO₂ EMISSIONS FROM MARITIME TRANSPORT OF A PRODUCT: A METHODOLOGICAL PROPOSAL OF ASSESSMENT

ABSTRACT

- We propose a methodology for calculating CO₂ emissions from maritime transport of a product. The guide is useful for companies who want to know the carbon footprint of their products.

We have reviewed the literature on methodologies for calculating CO₂ emissions. The aim of methods found is, generally calculating emission inventories in a territory for a year. When attempted to adapt these methodologies to calculate emissions attributable to a particular product we found several difficulties related to the lack of information about the emission sources. The main contribution of this guide is that the calculation result is the amount emitted per unit of product following the principles of relevance, comparability, consistency, transparency and accuracy. Additional contributions of our guide are: easy to use, and is independent of the amount of CO₂ emission sources.

The paper also shows the most critical aspects of the calculation and provides a guide to treat them properly. Finally we describe two cases of using the guide, by Autoritat Portuària de Barcelona.

- **Keywords:** CO₂ emissions, environmental pollution, carbon footprint, maritime transport.

RESUMEN

El objetivo principal del trabajo es proponer una metodología para calcular las emisiones de CO₂ atribuibles a un producto al ser transportado por vía marítima. La guía es útil para las compañías que deseen saber la huella de carbono de sus productos.

Para diseñar la metodología se ha revisado la literatura sobre metodologías de cálculo de emisiones de CO₂; la mayoría de ellas se han diseñado para inventariar las emisiones de CO₂ en un territorio durante un año. Cuando se intentan adaptar estas metodologías al cálculo de las emisiones atribuibles a un producto concreto aparecen varias dificultades relacionadas con el desconocimiento de las fuentes emisoras. La novedad más importante que aporta la propuesta metodológica es que permite calcular/estimar la cantidad de CO₂ emitida por unidad

de producto cumpliendo con los principios comúnmente aceptados de relevancia, comparabilidad, consistencia, transparencia y precisión del cálculo. Otros aspectos destacables de la propuesta son: la facilidad de implementación, al estar planteada en un número muy reducido de pasos a seguir, y que es independiente de la cantidad de fuentes emisoras que se quieran tener en cuenta.

En el presente trabajo también se ponen de manifiesto las principales dificultades a tener en cuenta al realizar el cálculo y se explica cómo tratarlas adecuadamente. Finalmente se describen dos casos prácticos de utilización de la guía por parte de la Autoritat Portuària de Barcelona.

Palabras clave: Emisiones de CO₂, polución ambiental, huella de carbono, transporte marítimo.

1. INTRODUCCIÓN

Reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), y en particular del CO₂, es en una prioridad para las administraciones públicas, las empresas, la comunidad científica y los particulares, por su contribución al calentamiento global de la atmósfera. Según *Carbon Trust* [1], el próximo paso que deben dar las compañías para reducir las emisiones es gestionar las emisiones de CO₂ a lo largo de la cadena de suministro. Para ello, es especialmente relevante disponer de indicadores de eficiencia emisora de GEI (expresada en gCO₂/kg), de las cadenas de suministro. Estos indicadores, además, pueden ser de gran ayuda para valorar la huella de carbono de un producto.

Dentro de la cadena de suministro de alcance internacional, el transporte marítimo es la actividad que más impacto tiene en su eficiencia emisora [2]. Así mismo, la *Organización Marítima Internacional* estima que el transporte marítimo fue el causante en 2007 de la emisión de 1046 millones de toneladas de CO₂, el 3,3% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial ([3]). A pesar de la importancia de las emisiones del transporte marítimo, existen muy pocos estudios sobre el cálculo de la eficiencia emisora de este tipo de transporte.

El presente trabajo intenta ayudar a cubrir el déficit mencionado, mediante una propuesta metodológica para calcular las emisiones atribuidas al transporte marítimo de un producto entre dos puntos. La metodología que se propone cumple los principios comúnmente aceptados de relevancia, comparabilidad, consistencia, transparencia y precisión del cálculo ([4] y [5]). La guía puede ser útil para las compañías que deseen saber la huella de carbono de sus productos y para las administraciones que deseen conocer la eficiencia emisora al producir un producto. La novedad más importante que aporta esta guía es que permite calcular/estimar la cantidad de CO₂ emitida por unidad de producto cumpliendo con los principios enunciados. Otros aspectos destacables de la guía son: su facilidad de implementación, al estar planteada en un número muy reducido de pasos a seguir, y que es independiente de la cantidad de fuentes emisoras que se quieran tener en cuenta.

La *Autoridad Portuaria de Barcelona* (APB) ha empezado a utilizar, recientemente, esta guía para calcular las emisiones de CO₂ atribuidas al transporte de productos con origen o destino en el Puerto de Barcelona. En la sección 4 se muestran dos casos prácticos realizados por la APB sobre el cálculo de emisiones en una ruta.

2. HERRAMIENTAS/METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN O DE MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES: UNA REVISIÓN

Existen diversas metodologías para calcular las emisiones de contaminantes atmosféricos y en particular de GEI, que se pueden clasificar según la finalidad que tenga el cálculo:

- Inventariar la distribución de las emisiones en un territorio. Por ejemplo “*Air pollutant emission inventory*

guidebook 2009” [4].

- Inventariar las emisiones de una compañía u organización (por ejemplo “*The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard*” [5] e “ISO 14064-1. 2006. Greenhouse Gases – Part 1” [6]. Las guías publicadas difieren en los detalles pero coinciden en los supuestos principales y en la metodología [7].
- Inventariar las emisiones durante la vida de un producto. La metodología utilizada es el *análisis del ciclo de vida* (ACV). El ACV trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba)[8].
- Inventariar las emisiones de una actividad: Rizet y Keita (2005) [9] analiza la influencia de la organización de la cadena de suministro sobre la demanda de transporte y la cantidad de energía correspondiente. Para ello calcula y compara las emisiones de CO₂ producidas a lo largo de dos cadenas de suministro. Techné (1998) [10] y Entec (2002) [11] presentan metodologías para calcular/estimar las emisiones de CO₂ en el transporte marítimo. Existen otros modelos y métodos basados en la actividad marítima para calcular las emisiones de contaminantes (Corbett y Koehler, 2003 [12], Schrooten y De Vlieger, 2008 [13] y Schrooten *et al.* 2009 [14]).
- Obtener indicadores de eficiencia medioambiental de una actividad. Se trata de indicadores que expresen la cantidad emitida por unidad de medida de la actividad. Por ejemplo: indicadores de la eficiencia de una cadena de suministro [2], IMO EEDI, IMO EEOI [3]. En Leonardi y Browne (2010) [15] se propone un método para calcular la huella de carbono de las cadenas de suministro internacionales. El cálculo se centra en las emisiones de GEI del transporte marítimo.

Cuando se intentan adaptar estas metodologías al cálculo de las emisiones atribuibles a un producto concreto aparecen varias dificultades relacionadas con la identificación de las fuentes emisoras relevantes y de cómo deben realizarse los cálculos. El cálculo de estas emisiones presenta las siguientes dificultades:

1. Conocer todas las fuentes emisoras relacionadas con el transporte marítimo de mercancías
2. Calcular o estimar las emisiones producidas por cada fuente
3. Repartir las emisiones de cada fuente entre los productos transportados

Algunas de estas dificultades se pueden superar con las metodologías existentes. Por ejemplo la metodología de análisis del ciclo de vida aplicada a la actividad del transporte marítimo puede ayudar a determinar todas las fuentes emisoras. Los artículos sobre cálculo de emisiones de CO₂ debidas a la quema de combustible (por ejemplo [10] y [11]) pueden

ser de ayuda para las dificultades del punto 2. El reparto de las emisiones es la parte menos abordada por la literatura.

3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CALCULAR LAS EMISIONES DE CO₂ ATRIBUIDAS AL TRANSPORTE DE UN PRODUCTO

En esta sección se propone y describe una metodología para calcular las emisiones de CO₂ debidas al transporte marítimo de un producto. El resultado del cálculo es la cantidad de emisiones de CO₂ por unidad de producto, expresada por ejemplo en kg(de CO₂)/unidad(de producto) o kg(de CO₂)/kg(de producto). A continuación se describen las etapas a seguir:

3.1 DEFINIR EL USO Y EL ALCANCE DEL CÁLCULO

El cálculo de las emisiones puede utilizarse para diversas finalidades y dichas finalidades condicionan los elementos a tener en cuenta para efectuar el cálculo. Es posible que cálculo de las emisiones forme parte de un cálculo más amplio como por ejemplo, determinar la huella de carbono de un producto o la eficiencia emisora de una cadena de suministro.

En esta etapa, en primer lugar se especificará la finalidad del cálculo. En segundo lugar, teniendo en cuenta la finalidad, se definirá su alcance. El alcance mínimo de los cálculos se corresponde con determinar las emisiones que se producen durante el movimiento del producto entre dos puntos. El alcance máximo se corresponde con el análisis completo del ciclo de vida del transporte marítimo, en el que se tienen en cuenta las emisiones producidas por cada uno de los elementos necesarios para realizar el transporte.

3.2 DETERMINAR LAS FUENTES EMISORAS DE CO₂

Las fuentes emisoras provienen de los bienes (fijos o móviles) y las actividades necesarios para realizar el transporte. Teniendo en cuenta la finalidad y el alcance del cálculo, se considerarán las fuentes cuyas emisiones sean relevantes.

- En el caso del alcance mínimo, la fuente emisora es el movimiento del buque para trasladar la mercancía.
- En el caso del análisis completo del ciclo de vida, existen diversas fuentes de emisión de CO₂ a considerar: en cuanto a los bienes necesarios para realizar el transporte se tiene, por ejemplo, los buques, las infraestructuras de los puertos de origen y destino de la mercancía, las grúas de carga y descarga, los contenedores de mercancía, el combustible; en cuanto a las actividades necesarias, se tiene, por ejemplo, el movimiento del buque, y la carga y descarga de la mercancía.

3.3 ESTIMAR LAS EMISIONES DE CO₂ PRODUCIDAS POR EL MOVIMIENTO DEL BUQUE

Los pasos a seguir para calcular las emisiones en un trayecto son los siguientes:

1. El tramo marítimo se dividirá en subtramos de tal forma que en cada subtramo el buque opera en un único modo (crucero, maniobrando o estacionado).
2. En cada subtramo, se supone que las emisiones (E) son proporcionales a la energía consumida (o al combustible consumido) en el tramo y se calcularán como el producto de la energía (o combustible) consumida multiplicada por el factor de emisión de CO₂ (FE). Si no se dispusiera de los datos del consumo de energía o de combustible, se estimarán a partir del consumo por unidad de tiempo (S), la distancia recorrida (D) y la velocidad media estimada (V) del buque. Las emisiones se calcularán con la fórmula siguiente:

$$E = S \cdot (D/V) \cdot FE \quad (1)$$

3. El consumo de energía por unidad de tiempo se puede calcular utilizando la fórmula siguiente:

$$S(\text{kW}) = FCM \cdot PMI(\text{kW}) \quad (2)$$

- Donde S es la potencia operativa del motor, FCM es el factor de carga del motor y PMI es la potencia máxima instalada de los motores. En la actualidad, los valores de FCM se pueden tomar de Entec (2002) [11] si se considera que el buque opera a velocidad máxima; en otro caso, se puede considerar que FCM es proporcional a la velocidad del buque elevada a la tercera potencia [16]. El valor PMI se puede estimar a partir del GT del buque, utilizando expresiones como las de [17]. El valor estimado de PMI depende de la flota considerada y por tanto puede variar en el tiempo.
4. El consumo de combustible por unidad de tiempo se puede estimar a partir de bases de datos sobre buques [9].
 5. La distancia recorrida se calcula a partir de herramientas o de tablas existentes (por ejemplo en [18] se utiliza una herramienta de acceso on-line).
 6. La velocidad media se puede estimar a partir de bases de datos sobre buques [9]. Si no se dispone de la información, se puede tomar de [11].
 7. El factor de emisión se toma de la literatura. Se puede utilizar 3179 kgCO₂/t(combustible) y 0,690 kgCO₂/kWh [11].

3.4 ESTIMAR LAS EMISIONES DE OTRAS FUENTES EMISORAS

Existe muy poca literatura sobre la estimación de las emisiones del resto de fuentes. El proceso de cálculo puede ser muy laborioso si no se dispone de herramientas que ayuden a realizarlo.

En el caso que la fuente sea un bien (fijo o móvil): se calculará el CO₂ emitido durante la fabricación, transporte y mantenimiento del bien hasta intervenir en el proceso de transporte de la mercancía. El cálculo deberá realizarse en concordancia con el alcance del cálculo de las emisiones definido en la etapa 1. A continuación se formulan algunas observaciones sobre el cálculo de las emisiones de los bienes más comunes, desde una perspectiva de análisis completo de ciclo de vida.

- Buques: [16] utiliza la herramienta on-line en www.eiolca.net de la *Universidad Carnegie Melon* [19] para estimar las emisiones producidas en la construcción de varios modelos de buques.
- Contenedores: deben tenerse en cuenta las emisiones atribuidas al movimiento de contenedores vacíos. El movimiento de contenedores vacíos se debe a que los flujos de entrada y de salidas de contenedores llenos en un puerto no suelen coincidir. En los puertos de la Unión Europea, el 22% de los contenedores manejados en 2007 estaban vacíos [20]. Cuando se transportan vacíos, los contenedores son una mercancía y por tanto puede aplicarse esta misma guía para calcular las emisiones.
- Combustible: las emisiones producidas por la industria petrolera en la extracción, refinado y transporte del combustible se estima que son un 13% de las emisiones producirlas al quemarlo [15].

En el caso que la fuente sea una actividad: se estimarán las emisiones producidas por los elementos que interviene en la actividad, teniendo en cuenta que el causante último de las emisiones es la quema de combustibles fósiles para generar energía. La estimación se calculará como el producto de los siguientes factores:

- Medida de la actividad (*A*). Las unidades de medida son, por ejemplo km u horas.
- Consumo de energía por unidad de actividad (*CEA*): se expresa, por ejemplo en kWh/km.
- Factor de emisión (*FE*): emisión de CO₂ por unidad de energía consumida en la actividad (se expresa, por ejemplo en kgCO₂/kWh). Varía mucho dependiendo de la fuente energética utilizada para generar la energía consumida.

La cantidad de CO₂ emitida será $A \cdot CEA \cdot FE$.

3.5 ATRIBUIR LA CANTIDAD EMITIDA AL PRODUCTO

En esta etapa, se repartirán las emisiones de cada fuente emisora entre los productos transportados. Para cada fuente emisora, se definirá el método de reparto y se realizarán los cálculos.

Un aspecto importante a tener en cuenta al definir el método de reparto es la atribución de emisiones al transporte de contenedores vacíos. En la literatura, esta asignación siempre se considera nula (las emisiones se reparten entre los contenedores llenos). A continuación, mediante un ejemplo, se quiere ilustrar que el método de asignación de emisiones a contenedores vacíos tiene un impacto significativo sobre las emisiones atribuidas a los contenedores con mercancías. El ejemplo trata las emisiones atribuidas al transporte de contenedores de mercancías en las rutas Extremo Oriente-Europa y Europa-Extremo Oriente. Dado que Extremo Oriente es netamente exportador de contenedores llenos respecto a Europa, habrá un flujo de retorno de contenedores vacíos en la ruta Europa-Extremo Oriente. En este ejemplo se supone que las emisiones de todas las fuentes, exceptuando las atribui-

bles a los contenedores vacíos, son iguales en ambas rutas. El reparto de las emisiones en cada ruta será el resultado de dividir las emisiones (*E*) entre la carga del buque (es decir, el número de contenedores que transporta). Se consideran dos hipótesis distintas para hacer el reparto:

- Hipótesis 1: la carga del buque es la misma en ambas rutas y es igual al promedio del número de contenedores llenos que transporta un buque portacontenedores (esta es la hipótesis usual en la literatura). Suponemos que el factor de carga del buque es 0,7 [21]. Las emisiones atribuidas a un contenedor lleno será $E/0,7 \cdot CB$ en ambas rutas (donde *CB* es la capacidad del buque) y las emisiones atribuidas a los contenedores vacíos será cero.
- Hipótesis 2: La carga del buque está formada por los contenedores llenos y los vacíos. Se supone que en ambas rutas el buque va lleno (el factor de carga 1), que los contenedores de la ruta Extremo Oriente-Europa van todos llenos y que los de la ruta Europa-Extremo Oriente únicamente van llenos el 43%. Las emisiones atribuidas al transporte de un contenedor serán:
 - Para la ruta Europa-Extremo Oriente es E/CB , tanto para los contenedores llenos como para los vacíos.
 - Para la ruta Extremo Oriente-Europa: se han de tener en cuenta las emisiones atribuidas a los contenedores vacíos que vuelven a Extremo Oriente por la ruta Europa-Asia. El resultado es $1,57 \cdot E/CB$.

3.6 VALORAR LA VALIDEZ DEL RESULTADO

En esta etapa se valorará la incertidumbre existente en los datos utilizados, se estimará el intervalo de confianza del cálculo y se valorarán los posibles errores en las estimaciones.

El error cometido en la estimación de las emisiones debidas al movimiento del buque es el que tendrá un mayor impacto en el resultado final ya que estas emisiones representan el 83% del total de emisiones en el transporte de mercancía [18].

Para realizar los cálculos, se han propuesto algunas referencias bibliográficas para obtener alguno de los datos necesarios. En este sentido se deberá tener en cuenta que algunos de los datos podrían quedar obsoletos con el paso del tiempo. El motivo es que, cada vez más, se hacen estudios con mediciones que mejoran la precisión de los datos (por ejemplo [22]) y con propuestas de políticas orientadas disminuir las emisiones (por ejemplo [16]).

4. CASOS PRÁCTICOS DE CÁLCULO DE EMISIONES EN UNA RUTA

Recientemente, la APB ha empezado a utilizar la metodología propuesta en el apartado anterior, tanto en estudios estratégicos propios como en estudios para sus clientes. En esta sección se muestran dos estudios comparativos realizados por la APB, en los que se calculan las emisiones en diversas rutas marítimas.

4.1. CASO 1: CÁLCULO DE EMISIONES EN LA RUTA SHORT SEA SHIPPING BARCELONA-LIVORNO

La APB ha utilizado la metodología propuesta, para calcular las emisiones de CO₂ asociadas a diversas líneas de *Short Sea Shipping* (SSS), con el objetivo de compararlas con las emisiones del transporte por carretera. En este apartado se muestra el ejemplo de la línea entre Barcelona y el puerto italiano de Livorno. A continuación se detalla cada etapa del cálculo:

1. Definición del uso y alcance del cálculo: el cálculo forma parte de un estudio para determinar el ahorro de emisiones al transportar mercancías por la ruta de SSS entre el Puerto de Barcelona y el de Livorno, respecto de utilizar la carretera. El alcance lo conforman las emisiones debidas al movimiento del buque entre ambos puertos y se compara con el transporte terrestre por camión entre los puertos de Barcelona y Livorno.
2. Determinar las fuentes de emisión: se considera únicamente las emisiones producidas por el movimiento del buque.
3. Estimar las emisiones por el movimiento del buque: se considera que el trayecto se realiza en un único tramo. Las emisiones se obtienen utilizando (2) y (1), con los datos siguientes:
 - Tipo de buque: Pasajeros, con un $GT = 26600$.
 - Velocidad del buque: 21,7 nudos (estimado por la APB).
 - Distancia entre el Puerto de Barcelona y el de Livorno: 710 km (estimado con la herramienta SIM-PORT de la APB).
 - Potencia del motor instalada: 20116 kW. Se obtiene de [17] a partir del GT del buque.
 - Factor de carga del motor: 0,87 [11].
 - Factor de emisión = 0,690 kgCO₂/kWh [11].

Con todo ello se estima que el buque consume en el trayecto 57081 kg de combustible y produce unas emisiones de 170941 kg(CO₂).

4. Estimar las emisiones de otras fuentes: no se consideran otras fuentes.
5. Atribuir la cantidad emitida a la mercancía: la unidad de medida para efectuar el reparto de las emisiones es la *Unidad de Transporte Intermodal* (UTI), un camión o un semirremolque. La capacidad del buque es 197 UTIs. El factor de carga es 87 %. Por tanto, las emisio-

nes se estiman en 997 kg(CO₂)/UTI.

6. Validez del resultado: únicamente se considera como fuente emisora la quema de combustible del buque. Teniendo en cuenta que el objetivo del cálculo es comparar las emisiones de la ruta con las emisiones producidas cuando el transporte se hace por carretera, se supone que es suficiente comparar las emisiones producidas por la quema de combustible de ambas alternativas.

En el estudio realizado por la APB, el resultado obtenido (997 kg(CO₂)/UTI) se ha comparado con las emisiones producidas por un camión que realiza el transporte por carretera entre los puertos Barcelona y Civitavecchia. Suponiendo un camión EURO-5, el ahorro en emisiones estimado al usar el SSS es del 18,7%.

Es importante destacar el impacto que algunas de las hipótesis consideradas puede tener en el resultado final del cálculo. Por ejemplo, se ha considerado un factor de carga del buque del 87% que se corresponde con los datos reales del promedio de uso de la línea durante un año. Este factor de carga tiene en cuenta los camiones y semirremolques transportados, así como los vehículos nuevos sin matricular (para importaciones y exportaciones) y vehículos automóviles en régimen de pasaje. Si consideramos el factor de carga correspondiente, únicamente, a camiones y semirremolques, dicho factor es mucho menor y los ahorros no superan el 5,6%.

Otro ejemplo es el buque utilizado. En este caso se ha usado el buque real, pero esto no siempre es así, y es relativamente habitual simplificar los cálculos considerando un buque promedio. En el caso del ejemplo, al tratarse de un buque de pasajeros, el GT es superior a la media de los transbordadores existentes con una capacidad similar, con lo que una simplificación de este tipo distorsionaría los resultados.

El impacto de la modificación de estas hipótesis puede verse en la tabla I, calculada a partir del mix de carga real del buque durante el año 2010.

4.2. CASO 2: CÁLCULO DE EMISIONES EN LA RUTA DE CONTENEDORES SHANGAI-LYON

La APB se ha planteado comparar las emisiones generadas en la ruta Extremo Oriente-centro de Europa, en dos supuestos: en el primer supuesto, la entrada de las mercancías al continente europeo se realiza a través de los puertos de la fachada norte europea y en el segundo supuesto la entrada se realiza a través de los puertos de la fachada mediterránea. En este apartado se describe el estudio de la ruta entre Shanghai

Mercancía que se tienen en cuenta para determinar el factor de carga	Ferry real (GT: 26600)	Ferry promedio en Europa (GT: 18640)	Ferry promedio en el West-Med (GT: 23059)
Camiones, semirremolques, automóviles sin matricular y automóviles de pasaje	-18,7%	-34,4%	-25,4%
Camiones, semirremolques y automóviles sin matricular	-16,2%	-32,4%	-23,1%
Camiones y semirremolques	-5,6%	-23,8%	-13,4%

Tabla I: Cuadro comparativo de los ahorros estimados en las emisiones de CO₂ al considerar diferentes factores de carga y diferentes tipos de barco

y Lyon, considerando que los puertos de entrada son Rotterdam y Barcelona. Para cada ruta se analizan 6 alternativas vinculadas a la capacidad del buque utilizado en el tramo marítimo (3 opciones distintas) y a la vía de transporte en el tramo continental (carretera y ferroviaria). En total se han calculado las emisiones de las 12 opciones resultantes (2 rutas •3 tipos de buque •2 vías de transporte terrestre). En la tabla II se muestran los datos de los buques y en la tabla III, las distancias de los tramos marítimos y continentales.

Tipo de buque	Capacidad buque (TEU)	GT buque	Potencia Motor Instalada	Velocidad en fase crucero (nudos)	Factor de carga del motor
Portacontenedores	7000	86844	59013	19.44	0,9797
Portacontenedores	9000	108292	71536	19.44	0,9797
Portacontenedores	15000	164956	103249	19.44	0,9797

Tabla II: Características de los buques utilizados en el caso 2

Puerto de entrada a Europa	Tramo marítimo (km)
Barcelona	17037
Rotterdam	20561

Tabla III: Distancias de los tramos marítimo y continental utilizados en el caso 2

A continuación se detallan las etapas del cálculo de las emisiones del tramo marítimo:

1. El cálculo forma parte de un estudio para determinar la diferencia entre las emisiones producidas al transportar un contenedor entre Shanghái y Lyon por una ruta que pase por el Puerto de Barcelona y por una ruta que pase por el puerto de Rotterdam.
2. Se consideran las emisiones producidas por el movimiento del buque.
3. Se procede de forma análoga al caso 1, utilizando los datos de las tablas II y III.
4. No se consideran otras fuentes emisoras.
5. La unidad de medida para efectuar el reparto es el TEU. El factor de carga considerado en ambas rutas es 80 %. En la tabla IV se muestran, para cada ruta y tipo de buque, los resultados del cálculo de las emisiones atribuibles al transporte de un contenedor en el tramo marítimo de la ruta Shanghai-Lyon.
6. También es válida la observación del caso 1.

Puerto de entrada	Capacidad del buque (en TEU)		
	7000	9000	15000
Barcelona	3,36	3,17	2,74
Rotterdam	4,00	3,75	3,25

Tabla IV: Estimación de las emisiones de CO₂ (en t(CO₂)/TEU) del tramo marítimo para cada puerto de entrada y capacidad de buque estudiados en el caso 2

Para el transporte ferroviario se ha supuesto un tren eléctrico con un consumo energético de 0,028kWh/t-km (dato de LIPASTO: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/raideliikenne/junat_konttie.htm) y unas emisiones asociadas a la electricidad de 0,4127 kgCO₂/kWh (emisión media por kWh de la electricidad generada en EU27, Agencia Europea de Medio Ambiente). El paso de toneladas a contenedores se realiza con la equivalencia media de 10 t/TEU. Para el transporte por camión se considera un EURO-5. En la

tabla V se muestran, para cada opción de transporte terrestre y para cada tipo de buque, las emisiones de las rutas.

Puerto de entrada y medio de transporte terrestre	Capacidad del buque (en TEU)		
	7000	9000	15000
Barcelona / Carretera	3,80	3,61	3,19
Barcelona / Ferrocarril	3,45	3,25	2,83
Rotterdam / Carretera	4,51	4,26	3,77
Rotterdam / Ferrocarril	4,04	3,79	3,30

Tabla V: Estimación de las emisiones de CO₂ (en t(CO₂)/TEU) del tramo marítimo para cada puerto de entrada, modo de transporte terrestre y capacidad de buque estudiados en el caso 2

En casi todas las combinaciones (medio de transporte terrestre y tipo de buque), las emisiones de la ruta con puerto de entrada Barcelona son inferiores a las de Rotterdam.

5. CONCLUSIONES

El cálculo de las emisiones de contaminantes atribuidas al transporte de un producto entre dos puntos presenta muchas dificultades, algunas de las cuales se describen en la literatura analizada (determinar las fuentes emisoras, el consumo de combustible o energía por unidad de tiempo, el factor de emisión del combustible o energía consumidos, etc.). Se han revisado diversas metodologías y se ha visto que en su mayoría están pensadas para hacer inventario de las emisiones en un área geográfica y no para calcular las emisiones atribuidas al transporte de un producto entre dos puntos. En este artículo se ha propuesto una metodología para realizar estos cálculos. La novedad más importante que aporta la metodología es que permite calcular/estimar la cantidad de CO₂

emitida por unidad de producto cumpliendo con los principios comúnmente aceptados de relevancia, comparabilidad, consistencia, transparencia y precisión del cálculo.

Se han identificado diversas fuentes emisoras entre las que destacan las siguientes:

- El movimiento del buque
- Transporte de contenedores vacíos
- Mantenimiento de las instalaciones portuarias
- Construcción del buque

Se ha visto que la fuente de emisiones más relevante es el movimiento del buque y se ha propuesto un método para calcular las emisiones producidas por dicha fuente. Se han identificado los siguientes factores críticos que influyen en el cálculo:

- Consumo de combustible (o energía) del buque por unidad de tiempo
- Factor de emisión de CO₂
- Distancia recorrida
- Velocidad del buque
- Factor de carga del buque

Se ha mostrado, mediante un ejemplo, la importancia de la atribución de emisiones al transporte de contenedores vacíos.

Se ha visto que el resultado obtenido en la guía tiene una validez temporal debido a que el valor de alguno de los factores varía con el tiempo.

Finalmente se ha mostrado la utilidad de la guía describiendo dos casos prácticos aplicados en el puerto de Barcelona.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carbon Trust. Carbon Footprint in the Supply Chain: The Next Step for Business. Report No. CTC616. 2006. Carbon Trust, London.
- [2] Rizet C, Cornélis E, Brown M, et al. "GHG emissions of supply chains from different retail systems in Europe". *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2010. Vol. 2, p. 6154-6164.
- [3] Second IMO GHG Study, 2009. International Maritime Organization (IMO) London, UK, April 2009; Buhaug, Ø.; Corbett, J.J.; Endresen, Ø.; Eyring, V.; Faber, J.; Hanayama, S.; Lee, D.S.; Lee, D.; Lindstad, H.; Markowska, A.Z.; Mjelde, A.; Nelissen, D.; Nilsen, J.; Pålsson, C.; Winebrake, J.J.; Wu, W.-Q.; Yoshida, K.
- [4] EMEP/EEA. 2009. Air pollutant emission inventory guidebook 2009, Published by EEA (European Environment Agency), Technical report No 9/2009.
- [5] WBCSD/WRI. 2004. The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard, revised edition. World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute. USA.
- [6] ISO 14064-1. 2006. Greenhouse Gases – Part 1: Specifications with guidance at organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. International Organization for Standardization, Geneva.
- [7] Piecyk M. 2010. Carbon auditing of companies, supply chains and products. In: Green Logistics, Improving the environmental sustainability of logistic. Edited by: McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing, A. The Chartered Institute of Logistics and Transport (UK). London, Philadelphia, New Delhi.
- [8] UNE-EN ISO 14040:2006. *Gestión ambiental*. 2a edición. Madrid: AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2007.
- [9] Rizet C, Keïta B. Chaînes logistiques et consommation d'énergie : Cas du yaourt et du jean. 2005. Arcueil: INRETS-ADEME.
- [10] Techne 1998. Trozzi C and Vaccaro R. 1998. Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships. Techne report MEET RF98. Deliverable No. 19. European Commission.
- [11] Entec UK Limited. Quantification of emission from ships associated with ship movement from between ports in the European Community. European Commission Final Report, July 2002. Disponible en http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter1_ship_emissions.pdf http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2_ship_emissions.pdf http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter3_end_ship_emissions.pdf
- [12] Corbett JJ, Koehler HW. "Updated emissions from ocean shipping". *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108-D20, p. 4650-4665, <http://dx.doi.org/10.1029/2003JD003751>
- [13] Schrooten L, De Vlieger I, Int Panis, et al. "Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory, an activity-based emission model". *Atmospheric Environment*, 2008. Vol. 42, p. 667-676. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.071>
- [14] Schrooten, L., De Vlieger, I., Int Panis, Chiffi, C., Pastori, E. 2009. Emissions of maritime transport: A European reference System. *Science of the Total Environment*, 2009. Vol. 408, p. 318-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.07.037>
- [15] Leonardi J, Browne M. "A method for assessing the carbon footprint of maritime freight". *International Journal of Logistics: Research and Applications*. Octubre 2010. Vol. 13-5, p. 349-358. DOI: 10.1080/13675567.2010.511607.
- [16] Lindstad H, Asbjørnslett BE, Strømman AH. "Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds". *Energy Policy*. 2011. Vol. 39-6, p. 3456-3464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.044>
- [17] Trozzi C. Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation. Techne consulting report ETC. EF.09(2). September 2010
- [18] Andersen O, Gössling S, Simonsen C, et al. "CO₂ emissions from the transport of China's exported goods". *Energy Policy*. 2010. Vol. 38-10 p. 5790-5798. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.030>
- [19] Carnegie Mellon University. Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA). <http://www.eiolca.net>.
- [20] Amerini G. "Maritime transport of goods and passengers 1997-2007. Statistics in Focus Transport 6/2009". Luxembourg: Eurostat.
- [21] IEA/OECD. Transport, Energy and CO₂. Moving toward sustainability. Paris: IEA Publications, 2009.
- [22] Winnes H, Fridell E. "Particle emissions from ships: dependence on fuel type". *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009. Vol. 59, p. 1391-1398. <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1391>