

# Herramientas para el control de las emisiones atmosféricas en los entornos portuarios

## Tools for the Control of Atmospheric Emissions in Port Environments

Coralina Hernández Trujillo<sup>1\*</sup>, Laura Crespo García<sup>2</sup>, María Eugenia Prieto Estévez<sup>3</sup>, Isabel María Moreno Aranda<sup>4</sup>, Ana Lloret Capote<sup>5</sup>

### Resumen

Los entornos portuarios funcionan como grandes nodos de comunicación en los que se desarrollan diversas actividades vinculadas al transporte marítimo que abarcan distintos sectores tales como el transporte, el sector industrial o la gestión de residuos y tienen un impacto en la calidad del aire del entorno y, por tanto, en la salud de los ciudadanos. Esto hace que las Autoridades Portuarias deban disponer de herramientas que le permitan conocer cuáles son las actividades que más peso tienen en la contaminación del entorno portuario, así como herramientas que permitan anticiparse y evitar operaciones portuarias que produzcan altos niveles de contaminación. En este trabajo se describen algunas de las herramientas que se están desarrollando con el objetivo de mejorar la gestión de la calidad del aire en los entornos portuarios.

**Palabras clave:** huella de carbono (HC), contaminación del aire, calidad del aire, transporte marítimo, entorno portuario, control de emisiones en tiempo real, herramientas de control de la contaminación atmosférica.

### Abstract

*Port environments work as large communication nodes where various activities linked to maritime transport are carried out, covering different sectors such as transport, the industrial sector or waste management. These activities have an impact on the air quality and, therefore, on citizens' health. This leads Port Authorities to have tools to enable them to know which activities have the highest impact on the pollution of the port environment, as well as anticipating and avoiding port operations that produce high levels of air pollution. This work describes some of the tools that are being developed with the aim of improving air quality management in port environments.*

**Keywords:** carbon footprint, air pollution, air quality, maritime transport, port environment, real time emissions monitoring, air pollution control tools.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las actividades ligadas al transporte marítimo producen importantes emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes atmosféricos, ruido y contaminantes del agua. Durante las últimas décadas el transporte marítimo ha experimentado un enorme desarrollo, debido en parte al crecimiento del comercio con economías emergentes como China e India y, en general, al aumento de la globalización en el sector comercial.

Según el último estudio de la OMI (Organización Marítima Internacional) sobre gases de efecto invernadero (IMO, 2020) la proporción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo

dentro de las emisiones antropogénicas mundiales aumentó de un 2,76 % en 2012 a un 2,89 % en 2018 y se prevé, siguiendo varios escenarios económicos y energéticos, que las emisiones aumenten al 90-130 % de las emisiones de 2008 en 2050.

En cuanto a las emisiones de contaminantes atmosféricos, el sector marítimo se encuentra entre los principales emisores de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, con porcentajes que rondan el 8 % y 15 %, respectivamente, de los totales globales (Maragkogianni, Papaefthimiou y Zopounidis, 2016). A nivel europeo, la Agencia Europea de Medioambiente señala, por ejemplo, que el 16 % de las emisiones de NO<sub>x</sub>, el 4 % de material particulado con un diámetro aerodinámico menor que 10 μm (PM<sub>10</sub>), el 7 % de PM<sub>2,5</sub> y el 16 % de las emisiones de SO<sub>x</sub> en Europa tienen origen en el transporte marítimo (EEA, 2017).

Sin embargo, a pesar del papel globalizador del transporte marítimo, la mayoría de las emisiones contaminantes del aire se producen cerca de la costa y, por tanto, tienen un impacto en las zonas costeras. En promedio, el 70 % de las emisiones se liberan a una distancia de 400 km de la costa, por lo que puede tener importantes impactos en la calidad del aire de las regiones costeras (Viana *et al.* 2014).

Si nos centramos en los entornos portuarios, especialmente los grandes puertos, son lugares donde se ubican

\* Autora de contacto: [coralina.hernandez@cedex.es](mailto:coralina.hernandez@cedex.es)

<sup>1</sup> Licenciada en Matemáticas. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

<sup>2</sup> Ingeniera agrónoma. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

<sup>3</sup> Ingeniera naval. Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

<sup>4</sup> Licenciada en Ciencias Ambientales. Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

<sup>5</sup> Licenciada en Ciencias del Mar. Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

numerosas actividades de logística vinculadas al transporte marítimo, potencialmente contaminadoras de la atmósfera y emisoras de gases de efecto invernadero. Este tejido productivo abarca distintos sectores tales como el transporte, el sector industrial, incluido la generación de energía o la gestión de residuos.

Además, el emplazamiento de los puertos, por lo general, está cerca de grandes ciudades y ecosistemas marinos, lo que hace que las Autoridades Portuarias tengan que prestar especial atención a las emisiones que se producen en ellos y también en sus áreas de influencia, ya que es habitual que en sus inmediaciones se desarrollen otras actividades no concesionadas que influyen en la calidad del aire del puerto por su proximidad al mismo.

Todo ello hace que desde Puertos del Estado (PdE) se impulsen diferentes proyectos cuyo objetivo es mejorar el control de las fuentes de emisión en los puertos para poder disminuir la presión en el territorio. El objetivo de este trabajo es describir las herramientas que se están desarrollando en dichos proyectos relacionados con la mejora en la gestión de la calidad del aire en el contexto de los entornos portuarios.

## 2. GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico que se indican en el Protocolo de Kioto como máximos responsables del efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global son: el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los hidrofluorocarbonos (HFCs), los perfluorocarbonos (PFCs), el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) y, desde la COP 18 celebrada en Doha a finales de 2012, el trifluoruro de nitrógeno ( $\text{NF}_3$ ).

Sin embargo, el  $\text{CO}_2$  es el GEI que influye en mayor medida al calentamiento del planeta, y es por ello que las emisiones de GEI se miden en función de este gas. La unidad de  $\text{CO}_2\text{eq}$  es la unidad universal de medida que indica el potencial de calentamiento atmosférico o potencial de calentamiento global (PCG)<sup>1</sup> de cada uno de estos GEI, expresado en términos del PCG de una unidad de  $\text{CO}_2$ .

El 5º Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, se considera, por ejemplo, que los potenciales de calentamiento global del  $\text{CH}_4$  y del  $\text{N}_2\text{O}$  son 25 y 298 veces superiores, respectivamente, que el del  $\text{CO}_2$  (UNFCCC, 2011). De modo que, sin considerar las emisiones de HFC, PFC,  $\text{SF}_6$  y  $\text{NF}_3$ , las emisiones de  $\text{CO}_2\text{eq}$  se calcularían, aplicando la expresión siguiente:

$$Ud\ CO_2\ eq = Ud\ CO_2 + 25 \cdot Ud\ CH_4 + 298 \cdot Ud\ N_2O$$

### Contaminantes atmosféricos

Un contaminante atmosférico es cualquier sustancia presente en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza.

En relación con la salud, el ozono troposférico ( $\text{O}_3$ ) y las partículas (PM10 y PM2,5) son los contaminantes más preocupantes dado que la exposición a los mismos puede acarrear consecuencias que van desde leves efectos en el sistema respiratorio a alergias o incluso mortalidad prematura.

El ozono no se emite directamente, sino que se forma a partir de ciertos precursores en presencia de luz solar. Es por ello que no se tiene en cuenta a la hora de evaluar las emisiones en los puertos, sin embargo, sus principales precursores sí: compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), que tienen su origen en los procesos de combustión (tráfico e industria) y en menor medida, metano ( $\text{CH}_4$ ) resultado de la evaporación de los combustibles y de fermentación de la materia orgánica (origen biogénico)<sup>2</sup>.

Las partículas pueden emitirse directamente a la atmósfera (las llamadas partículas primarias) o formarse en ella como “partículas secundarias” a partir de gases como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), los óxidos de nitrógeno (NOx) y el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

Los principales contaminantes atmosféricos que se tienen en cuenta en este trabajo son los siguientes:

**Tabla 1.** Contaminantes atmosféricos más relevantes en los entornos portuarios

Contaminante	Nomenclatura
Dióxido de nitrógeno	$\text{NO}_2$
Dióxido de azufre	$\text{SO}_2$
Partículas de diámetro aerodinámico menor de 10 $\mu\text{m}$	PM10
Partículas de diámetro aerodinámico menor de 2,5 $\mu\text{m}$	PM2,5
Compuestos orgánicos volátiles no metánicos	COVNM

## 3. EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DE CONTAMINANTES A LA ATMÓSFERA EN LOS PUERTOS ESPAÑOLES

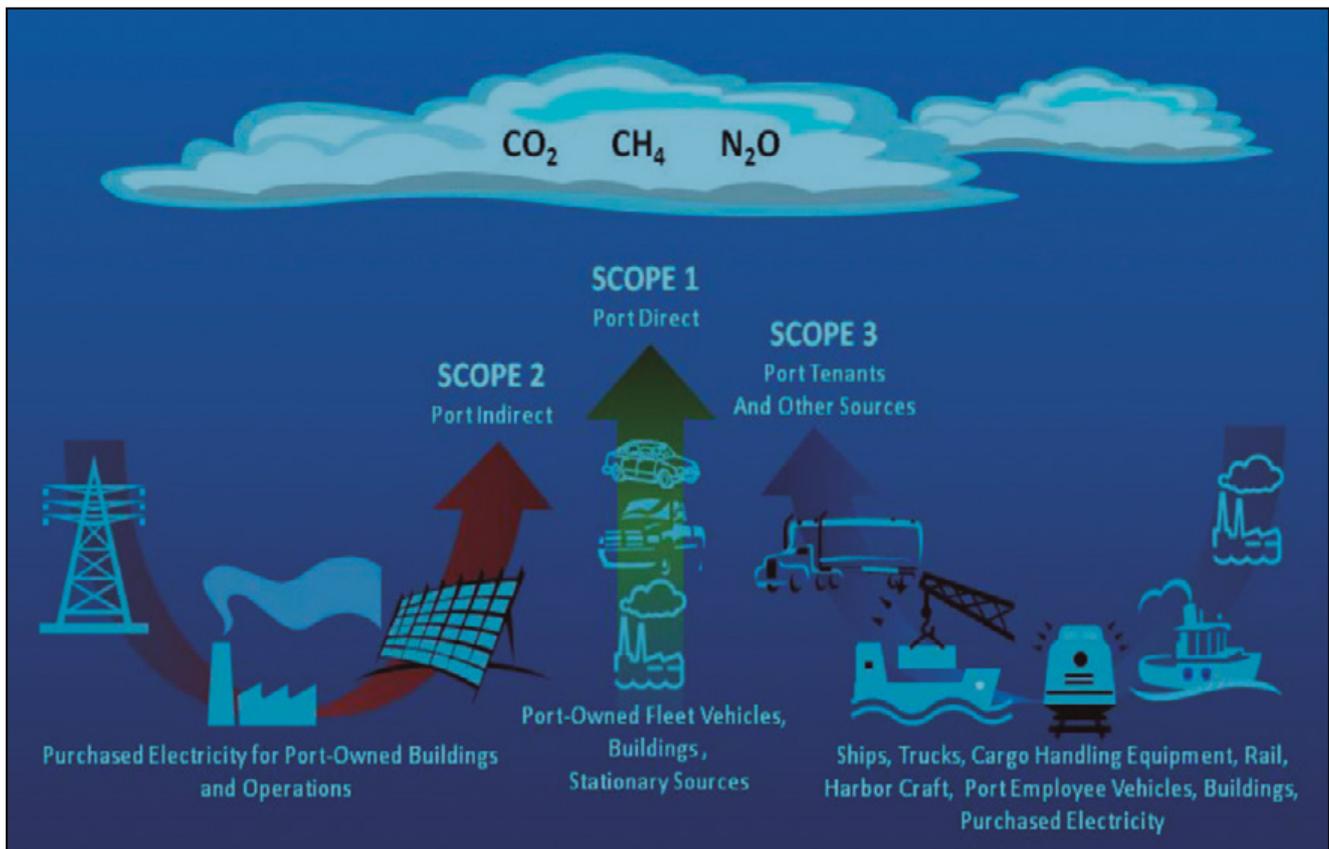
El objeto de este trabajo consiste en el asesoramiento a Puertos del Estado en el cálculo de la huella de carbono y de las emisiones de contaminantes atmosféricos en los recintos portuarios, de todas aquellas actividades asociadas al desempeño de la Autoridad Portuaria en cuestión (AP).

El trabajo se enmarca en una guía metodológica que permite la identificación de los consumos de energía de combustibles fósiles y vectores energéticos procedentes de las distintas actividades que se desarrollan en los puertos, para con posterioridad calcular las emisiones de gases de efecto invernadero y otras emisiones de gases contaminantes asociadas a la actividad portuaria. Se trata de una revisión a la Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono en puertos elaborada por el CEDEX, año 2017, y del inventario de emisiones a la atmósfera elaborado como ejemplo piloto para el puerto de Cartagena en el año 2019.

Esta guía está basada en la metodología *Ghg Protocol* (*Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard*), una iniciativa puesta en marcha por el *World Resources Institute*

<sup>1</sup> Potencial de calentamiento global (PCG): es el factor que describe el impacto de la fuerza de radiación (grado de daño a la atmósfera) de una unidad de un determinado GEI en relación a una unidad de  $\text{CO}_2$

<sup>2</sup> La mayor parte de metano biogénico es generado por una reacción de serpentinización que forma el mineral serpentina.



**Figura 1.** Esquema de la metodología *Ghg Protocol* en los entornos portuarios.

(WRI) y el *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), a través de la cual se pueden ordenar las actividades portuarias para elaborar un inventario de emisiones de forma organizada, sin que se produzcan vacíos de información, o solapamientos de actividades con capacidad emisora de GEI's y contaminantes atmosféricos.

La metodología se basa en definir los límites del estudio. Según la metodología CEDEX este límite viene marcado por el espacio del recinto portuario que depende de la Autoridad Portuaria. En estas actividades debidamente inventariadas, según la metodología *Ghg Protocol*, se cuantifican las emisiones en sus tres alcances (figura 1). El cálculo se extiende a las emisiones de GEI y de contaminantes atmosféricos.

En primer lugar, cabe indicar que las emisiones asociadas a las operaciones de la Autoridad Portuaria se pueden clasificar como emisiones directas o indirectas:

- **Emisiones directas:** son emisiones de fuentes cuya combustión tiene lugar en los recintos portuarios y que son propiedad de o están controladas por la Autoridad Portuaria, o generadas por actividades concesionadas. De una manera muy simplificada, podrían entenderse como las emisiones liberadas in situ en el lugar donde se produce la actividad, por ejemplo, las emisiones debidas al sistema de calefacción si éste se basa en la quema de combustibles fósiles.
- **Emisiones indirectas:** son emisiones consecuencia de las actividades ubicadas en el recinto portuario, pero que se producen en lugares alejados de los sitios de consumo. Estas emisiones se asocian tanto a la Autoridad Portuaria como a las actividades

concesionadas dependientes de ella. Un ejemplo de emisión indirecta es la emisión procedente de la electricidad consumida por la Autoridad Portuaria, cuyas emisiones han sido producidas en el lugar en el que se generó dicha electricidad.

Una vez definidas cuáles son las emisiones directas e indirectas de GEI y de contaminantes atmosféricos y quién los genera, para facilitar el orden de elaboración del inventario de actividades sin redundancias y solapamientos de todas ellas, se sigue el esquema de los tres alcances que define el *Ghg Protocol*:

- **Alcance 1:** emisiones directas de GEI y contaminantes atmosféricos que dependen de la Autoridad Portuaria. Por ejemplo, emisiones provenientes de la combustión en calderas, vehículos, etc., que son propiedad de o están controladas por la Autoridad Portuaria. También incluye las emisiones fugitivas (p.ej. fugas de aire acondicionado, fugas de fluidos refrigerantes por conductos, etc.).
- **Alcance 2:** emisiones indirectas de GEI y contaminantes atmosféricos asociadas a la generación de electricidad adquirida y consumida por la organización, en este caso la Autoridad Portuaria.
- **Alcance 3:** otras emisiones indirectas de GEI y contaminantes atmosféricos dependientes de terceros, concesionarias y empresas que prestan servicios en el recinto de la Autoridad Portuaria. Algunos ejemplos de actividades de alcance 3 son la extracción y producción de materiales que adquiere la organización, los viajes de trabajo a través de medios externos, el transporte de materias primas, de com-

bustibles y de productos (por ejemplo, actividades logísticas) realizados por terceros o la utilización de productos o servicios ofrecidos por otros.

Para elaborar con la mayor precisión un inventario de las actividades del puerto, se prepara un cuestionario que comprende las actividades recogidas en los tres alcances descritos anteriormente.

El cálculo de la huella de carbono por parte de las Autoridades Portuarias, también les puede permitir formar parte del Registro de Huella de Carbono del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

#### 4. ESTIMACIÓN DE EMISIONES PROCEDENTES DE BUQUES EN TIEMPO REAL

Las emisiones del transporte marítimo en los puertos pueden llegar a representar una parte considerable de las emisiones totales que se producen en el entorno portuario. Aunque la proporción de estas dentro del total de emisiones (en el entorno o área de diagnóstico) depende mucho del tiempo de operación de los buques en el puerto, del tipo de buques y del carácter de las actividades que se realizan dentro del recinto portuario, del tipo de tejido industrial del entorno portuario, del tráfico (modos de transporte y número de viajes en el conjunto del área de influencia) que a su vez está condicionado por el tamaño y densidad de la ciudad y área metropolitana, en definitiva, viene definida por el conjunto de las características territoriales. Así, por ejemplo, en puertos como el de Hong Kong o Los Ángeles/Long Beach las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden llegar a suponer hasta el 50 % de las emisiones totales de este contaminante en el entorno portuario (Civic Exchange, 2009) (Starcrest Consulting, 2011).

En general, estas emisiones son producidas a partir de la quema de combustible para proporcionar movimiento o energía auxiliar a bordo de los buques generando cantidades considerables de SO<sub>2</sub>, NOx, CO<sub>2</sub> y material particulado y de menor importancia, pero aún significativa, de COVNM y algunos metales pesados.

Actualmente se está trabajando para facilitar a Puertos del Estado una metodología para el cálculo de emisiones atmosféricas en tiempo real procedentes de buques en entornos portuarios y costeros.

##### Origen de los contaminantes atmosféricos y de los gases de efecto invernadero asociados al tráfico de buques en el entorno portuario

El CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero más abundante en la combustión, se asume que durante la combustión todo el carbono contenido en el combustible se transforma a CO<sub>2</sub>, el factor de emisión de los diferentes combustibles depende del carbono contenidos en ellos. Parte del carbono puede aparecer en forma de material particulado y de CO (combustión incompleta), pero en estos cálculos se asume que esta proporción es mínima y por tanto despreciable.

El CO<sub>2</sub> producido es directamente proporcional al consumo de combustible y este, a su vez, depende de cada tipo de motor, de su potencia, de la potencia de carga con la que trabaja y del tiempo de trabajo.

Por otra parte, el origen de SO<sub>2</sub> está relacionado con el contenido en azufre del combustible empleado en los buques de navegación, generalmente se asume que todos los sulfuros contenidos en el combustible se convierten a SO<sub>2</sub> en la combustión. Para el cálculo del factor de emisión se acepta que los barcos que llegan a los puertos españoles, o que transitan por aguas jurisdiccionales españolas cumplen con la legislación que marca la normativa europea, asumida por la normativa española en cuanto a la composición de los distintos fueles según por donde tenga lugar el tráfico de los buques.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno, estos se generan en la quema de los combustibles a altas temperaturas en un motor de combustión interna. Por consiguiente el factor de emisión depende del tipo de motor donde tiene lugar la combustión. Cuando el motor opera a velocidades bajas durante un largo periodo y a temperaturas altas, resulta más eficiente pero emite mayor proporción de óxidos de nitrógeno. La relación de NO<sub>2</sub>/NOx varía entre 0,05 y 0,1, es decir el NO<sub>2</sub> emitido oscila entre el 5-10 % del total de NOx (ENTEC, 2002). Se asume que la emisión de NO<sub>2</sub> está entorno al 8 % del total de óxidos de nitrógeno. Los factores de emisión de óxidos de nitrógeno y CO varían dependiendo del estado del motor y de su mantenimiento (Moreno-Gutiérrez y Calderay, 2015).

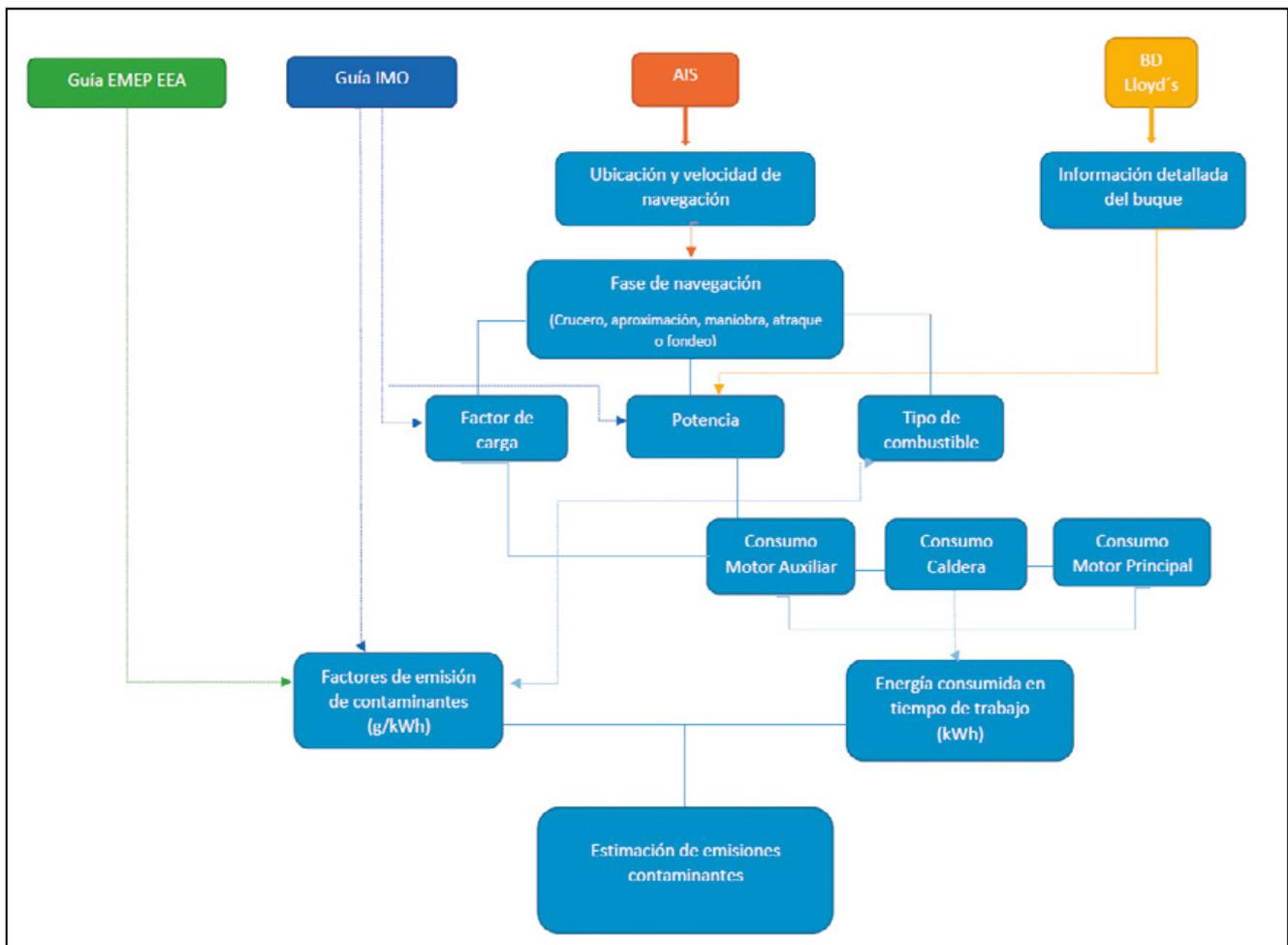
Con respecto al material particulado, es conocido que tiene su origen en los inquemados del combustible, por combustión incompleta. Se asume que las PM<sub>2,5</sub> de origen primario se corresponden con el 90 % del total del material particulado, y las PM<sub>10</sub> con el 95 % del total del material particulado. El contenido de material particulado está relacionado con el contenido en azufre de los combustibles.

#### Metodología

La metodología que se está desarrollando para el cálculo de los contaminantes atmosféricos y de los gases de efecto invernadero asociados al tráfico de buques en el entorno portuario, está basada en el cálculo del consumo de combustible de cada buque en tiempo real. Los tipos de buques estudiados son todos aquellos con tráficos en los puertos españoles: graneleros, tanques, contenedores, carga general, ferris, dragas, embarcaciones de recreo, pesqueros, etc.

Para determinar el consumo de combustible de cada buque en tiempo real, es necesario determinar la potencia que está utilizando el buque en ese momento y que depende de varios factores: la velocidad a la que navegue así como su ubicación, que determinarán la fase operativa en que se encuentre, el tamaño y tipo de buque, el tipo de motor y tipo de combustible.

A partir de los datos AIS, se puede obtener la ubicación geográfica y velocidad de navegación de cada buque y determinar la fase operativa en que se encuentra: cruceo, aproximación, maniobra, ataque o fondeo. También se obtiene en n° IMO del buque, el cual se cruza con la información de la base de datos Lloyd's (IHS Fairplay 2018) obteniendo información más o menos detallada del buque y de su maquinaria según el buque de que se trate. Así es posible determinar el consumo instantáneo del motor principal a partir del dato de consumo a la velocidad de servicio del buque en algunos casos, en otros este dato no aparece



**Figura 2.** Esquema de la metodología para estimar las emisiones contaminantes procedentes de los buques.

y se calcula este consumo a partir de los datos de potencia máxima instalada y velocidad de diseño del buque.

A este consumo hay que añadirle el de las máquinas auxiliares y la caldera obtenido a partir de la potencia instantánea consumida por el buque en cada fase de navegación y cuyos valores medios se pueden encontrar en el cuarto informe del IMO sobre gases de efecto invernadero (IMO, 2020), en función del tipo y tamaño del buque.

En el caso de que sea necesario obtener el consumo instantáneo de combustible a partir de la potencia, se usarán unos valores de consumo específico de combustible (g fuel / kWh) en función del tipo de combustible, la tipología del motor y la fase de navegación. El tiempo de integración de los consumos de combustible es de 15 minutos<sup>3</sup>. La figura 2 ilustra el esquema básico de esta metodología.

Existen otras metodologías de trabajo para el cálculo de las emisiones contaminantes a la atmosfera por parte de los buques y en todas ellas se parte de la premisa de interpretar que los buques en navegación cumplen con las reglamentaciones ambientales del Estado miembro de navegación (Moreno-Gutiérrez y Calderay, 2015). Para los factores de emisión del dióxido de azufre, la reglamentación<sup>4</sup> impone el límite del 0,1 % de SO<sub>2</sub> de m/m en puertos

del estado español, limitación que entró en vigor y que se mantiene desde enero 2010 y fuera de estos límites, 0,5 % de SO<sub>2</sub> de m/m en vigor a partir de enero de 2020. En el resto de los factores de emisión se emplean los recogidos en la Guía EMEP EEA (EEA, 2019) y el cuarto informe del IMO sobre gases de efecto invernadero (IMO, 2020). Estos dependen del tipo de motor donde tiene lugar la combustión, del tipo de combustible utilizado y de la fase de navegación en la que se encuentre el buque.

Con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, la razón de medir el CO<sub>2</sub>, como CO<sub>2</sub>eq se justifica por el uso actual de combustibles alternativos utilizados en el tráfico marítimo, que se unen a un amplio abanico de vectores energéticos. Los derivados de Gas natural (GNL y GNC) como combustibles son combustibles más eficientes que los combustibles tradicionales (MDO/MGO<sup>5</sup>) y, por tanto, emiten menos CO<sub>2</sub> por unidad de energía, sin embargo emiten más metano cuyo potencial de calentamiento es 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub>. Esta comparación permite medir todo el proceso para la obtención de los combustibles a lo largo de la cadena de valor (W-t-t y t-t W<sup>6</sup>).

<sup>3</sup> Tiempo de integración análogo al que se utilizan en las Redes de Control de Calidad del Aire gestionadas por las CC AA.

<sup>4</sup> Real Decreto 290/2015, de 17 de abril, por el que se modifica el Real Decreto

61/2006, de 31 de enero, por el que se fijan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo, se regula el uso de determinados biocarburantes y el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.

<sup>5</sup> Marine diésel oil/ Marine gas oil.

<sup>6</sup> W-t-t y t-tW: well to tank and tank to wheel.

Se han explorado los factores de emisión de combustibles en uso en los entornos portuarios y los combustibles alternativos (GNL) y se elaborará una metodología de trabajo para cuando los barcos utilicen OPS (conexión a suministro eléctrico).

Para validar esta herramienta se puede acudir a la información recabada por el Reglamento relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE que afecta a buques con un arqueo bruto superior a 5000 toneladas, en lo relativo a las emisiones de CO<sub>2</sub> que generan durante sus viajes desde su último puerto de escala hasta un puerto de escala bajo jurisdicción de un Estado miembro de la UE, y desde un puerto de escala bajo jurisdicción de un Estado miembro hasta su siguiente puerto de escala, así como en el interior de los puertos de escala bajo jurisdicción de un Estado miembro, como el caso de España.

Este Reglamento contempla la redacción y aprobación de un plan de seguimiento de emisiones de CO<sub>2</sub> para cada viaje y para cada buque se debe documentar la llegada o salida en un puerto bajo jurisdicción de un Estado miembro y respecto de cada viaje hacia o desde un puerto bajo jurisdicción de un Estado miembro: el puerto de salida y el puerto de llegada, incluidos el día y la hora de salida y de llegada; la cantidad y el factor de emisión de cada tipo de combustible consumido en total; el CO<sub>2</sub> emitido; la distancia recorrida; el tiempo transcurrido en el mar; la carga transportada; el transporte.

El diseño de un muestreo por viajes, tipología y tamaños de buque permite comparar los resultados de la metodología empleada para la estimación de emisiones en tiempo real con los valores declarados por la empresa explotadora de la actividad del buque.

## 5. MODELADO OPERATIVO DE EMISIONES Y DISPERSIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DE CONTAMINANTES DENTRO DEL PROYECTO SAMOA

El objetivo de este trabajo es la implementación de un modelo operativo de dispersión de contaminantes atmosféricos dentro del proyecto SAMOA (Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de la Autoridad Portuaria), en cada uno los puertos que gestionan las diferentes

Autoridades Portuarias adscritas al proyecto. El uso de un modelo operativo de dispersión de contaminantes atmosféricos en los puertos permite evaluar la contribución en la contaminación atmosférica de las actividades portuarias en las ciudades próximas a los puertos, lo que redundará en la mejora y gestión de las operaciones portuarias. Reducir el impacto de la contaminación en el entorno repercute en la salud de los ciudadanos y permite ganar espacios de convivencia en el litoral marino que pertenece al puerto, lo que facilita las relaciones puerto-ciudad.

Además de un modelo de dispersión de contaminantes, también se implementará un modelo de trayectorias. El análisis de trayectorias proporciona información del camino que seguirá un determinado contaminante desde una localización concreta durante las siguientes horas. De esta manera, se pueden analizar las áreas que pueden verse afectadas por una determinada actividad. La trayectoria hacia atrás (retrotrayectoria) de una sola partícula contaminante también es útil para identificar de dónde proviene la fuente contaminante.

Para poder realizar las simulaciones de la evolución de las distintas especies contaminantes con el modelo de dispersión, es necesario que cada puerto prepare una serie de parámetros de entrada al modelo, como son la ubicación de las fuentes emisoras y los contaminantes que emiten cada una de ellas (estos son los inputs que se indican en la figura 3). Por tanto, cada Autoridad Portuaria debe tener identificadas este tipo de variables, ya que son fundamentales para hacer un buen uso del modelo. Con el objetivo de ayudar a las Autoridades Portuarias a realizar este trabajo, se están realizando encuestas que permiten, por un lado, conocer el grado de sensibilidad que tiene el puerto con respecto a la calidad del aire y, por otro lado, detectar y recabar información sobre las principales fuentes de emisión que tiene cada puerto.

El uso de este tipo de modelos ayuda a mejorar las operaciones de gestión de los puertos, atraque y maniobra de barcos, y descarga de mercancías. Es un avance más en el objetivo de mejora de la eficiencia del sistema portuario, con el consiguiente ahorro de tiempos de operación, que se traduce en la reducción del consumo de energía-huella de carbono y de emisiones contaminantes a la atmósfera de distintos contaminantes como son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM).

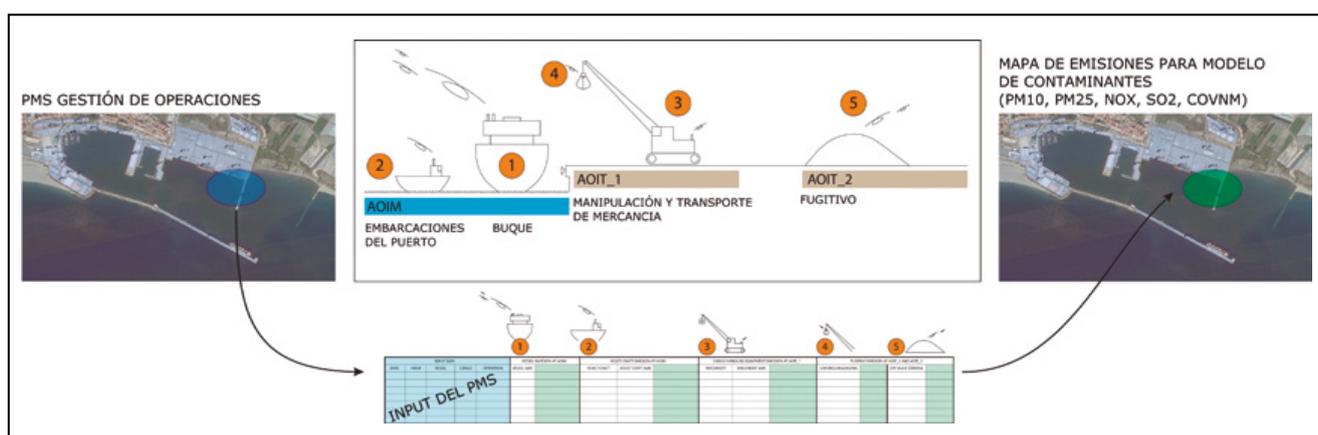


Figura 3. Esquema del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos.

## 6. VENTAJAS DEL USO DE HERRAMIENTAS DE CONTROL DE LAS EMISIONES EN LOS ENTORNOS PORTUARIOS

La emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, procedentes tanto de fuentes naturales como antropogénicas puede incidir en la salud de las personas, en la degradación de materiales que integran el patrimonio cultural arquitectónico, en los seres vivos y funcionamiento de los ecosistemas. En este sentido, los entornos portuarios son espacios que concentran un elevado número de actividades generadoras de contaminación atmosférica que pueden perjudicar la calidad del aire y, por ende, la salud del ciudadano.

Como se ha visto anteriormente, el tráfico de buques puede suponer una fuente importante de emisiones, dependiendo de las características del entorno portuario y las actividades que se desarrollen en él. Las emisiones procedentes de buques se caracterizan por ser el origen de contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado y compuestos orgánicos volátiles, entre otros contaminantes. A estas emisiones se han de añadir las procedentes de tránsito de mercancías en los entornos y recintos portuarios y las de manipulación de mercancías. Estas operaciones, sobre todo las de manipulación de graneles sólidos, suponen una fuente de emisión de material particulado.

En lo referido a las actividades relacionadas con la industria, en los entornos portuarios podemos encontrar muchos tipos de complejos industriales que se sitúan precisamente alrededor de ellos para aprovechar las posibilidades que estos brindan como grandes nodos de comunicación. Por ejemplo, grandes instalaciones petroquímicas, donde se hace un uso energético y no energético de los combustibles fósiles, como es el caso del puerto de Tarragona, que sustenta uno de los complejos petroquímicos más importantes de Europa, o el puerto de Huelva, con su refinería.

En Asturias encontramos también otros puertos especializados en la industria siderúrgica, el cemento y centrales térmicas de carbón; estas últimas próximas a una reconversión por inminente cierre, o su transformación en centrales térmicas alimentadas con gases de aprovechamiento

siderúrgico, gas natural o biomasa, como son el caso de los puertos de Avilés y Gijón. Otro ejemplo es el puerto de Cartagena, que ha convertido la dársena de Escombreras en la base de diversas empresas del sector energético (figura 4).

Esta variabilidad en el origen de las emisiones producidas en los entornos portuarios, unido al hecho de que las condiciones meteorológicas y de dispersión de contaminantes son diferentes en cada uno de ellos, hace que cada uno tenga una problemática concreta en términos de calidad del aire. Es por ello que, en todos los casos, el uso de cada una de estas herramientas permite cuantificar el peso de estas actividades en la contaminación atmosférica de manera particular para cada puerto y tenerlas en cuenta para poder modelizar los comportamientos en materia de calidad del aire.

Disponer de un inventario de emisiones ayuda a tener datos cuantitativos del aporte a las emisiones de cada una de las actividades que se realizan en el puerto. Esto, a su vez, permite identificar cuáles son las actividades emisoras más importantes a introducir como datos de entrada en el modelo de dispersión de contaminantes. Asimismo, poder conocer en tiempo real las emisiones de los buques que se encuentran atracados en el puerto o navegando en zonas próximas a él también permite completar de una manera más precisa el inventario total de emisiones mediante la integración de datos en periodos de un año y, al mismo tiempo, dando el tratamiento debido puede nutrir al modelo de dispersión de contaminantes.

Toda esta información ayuda a completar un diagnóstico de la situación actual de la calidad del aire en los entornos portuarios, lo que permite perfilar las medidas de mejora que se contemplan en los planes de calidad del aire que elaboran las diferentes Administraciones competentes.

## 7. CONCLUSIONES

La correcta identificación de las diferentes fuentes de emisión de contaminantes que se producen en los entornos portuarios es una pieza clave, no solo para la evaluación de la contribución de las distintas actividades a las emisiones



**Figura 4.** Industria energética situada en la dársena de Escombreras, puerto de Cartagena.

que se producen en los entornos portuarios sino también para su uso en trabajos de modelización, que permiten conocer de manera anticipada los niveles de contaminación producidos por determinadas fuentes puntuales y su incidencia en el territorio.

Como consecuencia de este análisis, se conseguirá una mejor gestión de las actividades contaminantes en los espacios portuarios. En general, muchas de estas actividades son concesionadas, por lo que la Autoridad Portuaria tiene un control limitado sobre ellas, pero el conocimiento de cómo repercute cada una de ellas en la contaminación facilita la búsqueda de soluciones entre Administraciones que cuentan con responsabilidades a veces compartidas en estos espacios.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en diferentes proyectos que se están desarrollando actualmente en el marco de un encargo por parte del Organismo Público Puertos del Estado al CEDEX. Se han formado diferentes grupos de trabajo dirigidos por Enrique Tortosa Solvas, Obdulio Serrano Hidalgo y Enrique Álvarez Fanjul, por parte de Puertos del Estado, en los que también participan el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX, y las empresas GMV y Oritia & Boreas. A todos ellos queremos agradecer su implicación y participación en los proyectos presentados en este trabajo.

## 9. REFERENCIAS

Civic Exchange (2009). *Green Harbours II: Reducing Marine and Port-related Emissions*. Hong Kong .

EEA (2017). *Aviation and shipping - impacts on Europe's environment: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM)*. EEA Report No 22/2017a.

EEA (2019). Part B: Technical chapters; Navigation (shipping). En *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*.

ENTEC (2002). *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*. Final Report.

IMO (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020*. Final Report.

Maragkogianni, A., Papaefthimiou, S., y Zopounidis, C. (2016). *Mitigating Shipping Emissions in European Ports*. London: Springer Nature.

Moreno-Gutiérrez, J., Calderay, F., et al. (2015). Methodologies for estimating shipping and energy consumption: A comparative analysis of current methods. *Energy*, 86, pp. 603-616. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.083>

Starcrest Consulting Group (2011). *Port of Los Angeles inventory of air emissions-2010, Technical Report*.

UNFCCC (2011). Decision 15/CP.17: Report of the Conference of the Parties on its seventeenth. *FCCC/CP/2011/9/Add.2*. Durban.

Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlioger, I., y van Aardenne, J. (2014). Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, 90, pp. 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.046>