



**Ciemat** Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



Puertos del Estado

**PROYECTO HADA**  
**Herramienta Automática de Diagnóstico**  
**Ambiental**  
**LIFE2 ENV/E/000274**

**INFORME**

**EMIPORT**

**Modelo de emisiones de partículas en**  
**entornos portuarios**

**Realizado por**

**Fernando Martín e Inmaculada Palomino**

**Unidad de Contaminación Atmosférica**  
**Departamento de Medio Ambiente**  
**CIEMAT**

**Diciembre de 2004**

# INDICE

<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>DESCRIPCION DE EMIPORT (PROGRAMACION Y ESTRUCTURA DE FICHEROS)</b>	<b>3</b>
<b>Programa INPUT-EMIPORT.FOR ---- INPUT-EMIPORT.EXE</b>	<b>3</b>
<b>Programas EMIPORT-PM10.FOR (EXE) y EMIPORT-GROS (EXE)</b>	<b>9</b>
<b>ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS ASOCIADOS A LAS EMISIONES EN EMIPORT</b>	<b>11</b>
<b>Datos a generar de cada contaminante (fichero de emisiones para PORTPUFF)</b>	<b>11</b>
<b>¿Cómo especificar coordenadas de los puntos de emisión?</b>	<b>12</b>
<b>Altura de emisión</b>	<b>13</b>
<b>Tamaño inicial de cada puff</b>	<b>13</b>
<b>Otras variables.</b>	<b>14</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE CALCULO DE EMISIONES</b>	<b>15</b>
<b>Fuentes de información para cálculo de emisiones</b>	<b>15</b>
<b>Factores AP-42-EPA</b>	<b>15</b>
<b>Factores HADA</b>	<b>24</b>
<b>RESUMEN Y CONCLUSIONES</b>	<b>34</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>36</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>36</b>
<b>APENDICE</b>	<b>37</b>

## INTRODUCCION

Un dato clave en la estimación y predicción de los niveles de concentración de contaminantes es conocer cuanto contaminante se ha emitido, cuando, dónde y en qué condiciones. Las respuestas a cuándo y dónde se ha emitido el contaminante puede responderse de una forma bastante aproximada en el caso de un puerto delimitado la zona afectada por operaciones con graneles sólidos y acotando el período de tiempo en el que se desarrollan. Esta labor debe ser realizada por los gestores medioambientales del puerto para lo cual necesitan tener conocimiento lo más exacto posible de las operaciones portuarias.

Las demás preguntas (cuanto y en qué condiciones se emite el contaminante) no tienen una respuesta sencilla, ya que no estamos tratando chimeneas que puede ser monitorizadas incluso en continuo, sino que tratamos con lo que se conocen como fuentes difusas o fugitivas. Las operaciones portuarias pueden ser diversas (carga, descarga, transporte, almacenamiento, etc), puede ser realizadas de formas muy diversas y con herramientas diferentes (grandes grúas con cucharones de diversos tamaños, tolvas, apilamiento en parvas, carga y descarga en camiones, etc) y el cuidado y precaución con el que se realizan también puede ser muy diferente. A esto hay que añadir la diversidad de materiales y la disparidad de condiciones atmosféricas y del material que pueden influir de forma muy clara en la emisión de partículas a la atmósfera.

Es muy difícil, por no decir imposible, pretender un control y conocimiento absoluto de cómo se están realizando las operaciones con graneles en todo momento. Por todo ello, se ha planteado el desarrollo de un modelo de emisiones bautizado como EMIPORT que sea capaz de proveer de tasas de emisión de partículas PM10 y sedimentables en función del tipo de operación, material y condiciones del mismo y las condiciones de la atmósfera. Se pretende que ese modelo esté basado en la mejor información disponible y en la información que se ha generado dentro de las actividades de investigación del proyecto HADA - Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental (LIFE2 ENV/E/000274). Se propone que sea un modelo flexible, que permita una rápida actualización de datos.

EMIPORT es una pieza clave en el sistema de modelos que se ha desarrollado dentro del proyecto HADA para predicción y control de la contaminación atmosférica en entornos portuarios y que está siendo implantado en ocho puertos españoles: A Coruña, Barcelona, Cartagena, Huelva, Tarragona, Valencia, Bilbao y Santander. EMIPORT deberá generar el fichero de emisiones que utilizará posteriormente PORTPUFF (Martín y Palomino, 2004; Palomino y Martín, 2004) en su proceso de simular la dispersión de contaminantes y predecir sus concentraciones en la zona de influencia de cada uno de los puertos implicados en el Proyecto HADA - Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental (LIFE2 ENV/E/000274). (ver figura 1).

# SISTEMA DE MODELOS

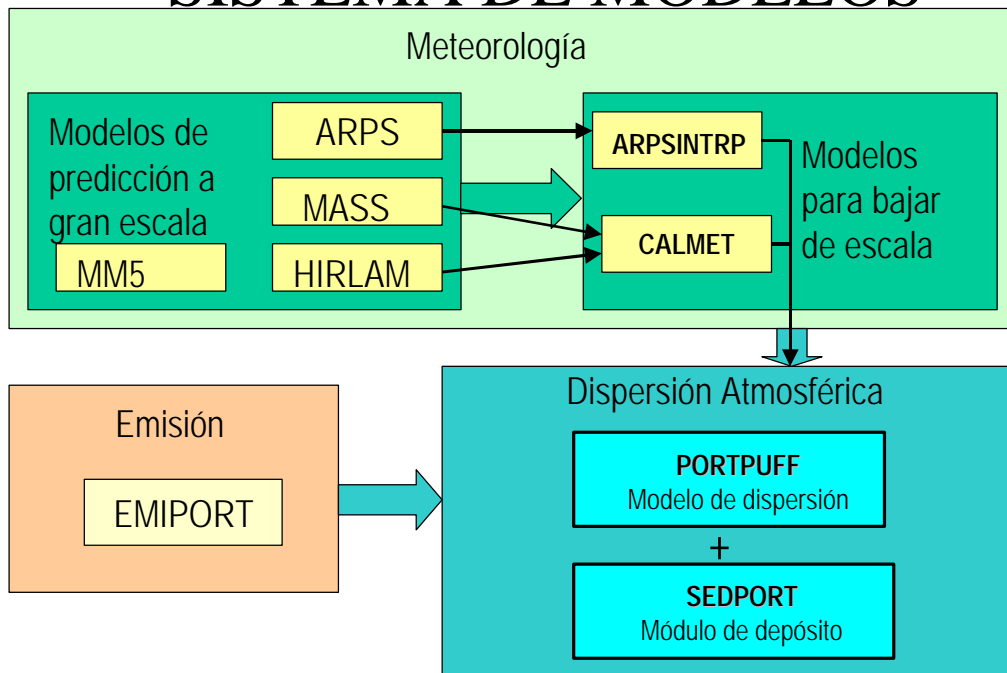


Figura 1. Esquema del sistema de modelos que se ha desarrollado dentro del proyecto HADA para predicción y control de la contaminación atmosférica en entornos portuarios.

## DESCRIPCION DE EMIPORT (PROGRAMACION Y ESTRUCTURA DE FICHEROS)

En esta sección se describen los aspectos de programación y estructura de ficheros de EMIPORT. En la tabla 1, se muestran los aspectos generales de esta estructura. Esta constituido por un preprocesador llamado INPUT-EMIPORT.FOR y dos programas de cálculo de emisiones EMIPORT-PM10.FOR y EMIPORT-GROS.FOR.

<b>INPUT-EMIPORT.FOR</b> <b>INPUT-EMIPORT.EXE</b>		
Programa para preparación de datos de entrada a EMIPORT. Los datos se introducen por pantalla. Desarrollo de interfase con usuario - SOLTEK		
<b>INPUT-EMIPM10.dat</b>  Fichero de salida de INPUT-EMIPORT.FOR cuando se ha elegido PM10 como contaminante. Agrupa los datos relevantes de cada foco emisor.	<b>INPUT-EMIGROS.dat</b>  Fichero de salida de INPUT-EMIPORT.FOR cuando se ha elegido partícula sedimentable como contaminante. Agrupa los datos relevantes de cada foco emisor.	
<b>EMIPORT-PM10.FOR</b> <b>EMIPORT-PM10.EXE</b>  Programa de cálculo de emisiones para cada foco y minuto. Genera el fichero de emisiones que necesita PORTPUFF para PM10.	<b>EMIPORT-GROS.FOR</b> <b>EMIPORT-GROS.EXE</b>  Programa de cálculo de emisiones para cada foco y minuto. Genera el fichero de emisiones que necesita PORTPUFF para sedimentables.	<b>VIENTO.DAT</b> (entrada a EMIPORT) Fichero con datos de viento medio en puerto cada hora. Extraer de CALMETpredicción o de torre meteorológica
<b>EMISION_PM10.dat</b>  Fichero de salida de EMIPORT-PM10. Contiene el fichero de emisiones que precisa PORTPUFF para PM10	<b>EMISION_GROS.dat</b>  Fichero de salida de EMIPORT-PM10. Contiene el fichero de emisiones que precisa PORTPUFF para sedimentables.	

*Tabla 1. Esquema de programas y ficheros de EMIPORT*

### Programa INPUT-EMIPORT.FOR ---- INPUT-EMIPORT.EXE

Este programa es básicamente un preprocesador de los datos necesarios, que debe introducir el usuario, para calcular las emisiones y situarlas en el tiempo y el espacio, así como, estimar otros parámetros asociados.

Este programa es la base para el desarrollo de la interfase con el usuario a realizar con SOLTEK.

El programa sigue el orden de siguiente para solicitar los datos de entrada (para aclaraciones sobre los datos a introducir se recomienda consultar secciones posteriores):

1. Contaminante:
  - introducir 'PM10', si son PM10. (siempre en mayúsculas).
  - Introducir 'GROS', si son partículas sedimentables. (siempre en mayúsculas).
2. Fecha de inicio de período de cálculo de emisiones: (DD MM AA)
3. Fecha de final de período de cálculo de emisiones: (DD MM AA)
4. Hora solar del día de comienzo del período y hora solar del día de finalización del mismo. (00 a 23)
5. Intriducir el número previsto de focos que estrán activos en algún momento del período de cálculo de emisiones. El máximo posible es 50.

Posteriormente, hay que ir introduciendo los siguientes datos para cada foco emisor:

1. COORDENADAS X e Y utm, en Km.
2. Horario de actividad diaria. Se permiten hasta dos períodos.
  - a. Hora inicial y final del periodo 1. (00 a 23).
  - b. Hora inicial y final del periodo 1. (00 a 23).
3. Tipo de material a manipular. Se puede elegir entre varias opciones:
  - a. 1 = Mineral de Mn
  - b. 2 = Cenizas de Pirita
  - c. 3 = Tapioca
  - d. 4 = Alfalfa
  - e. 5 = Carbón de coque
  - f. 6 = Carbón de hulla
  - g. 7 = Fino de sílico-Mn
  - h. 8 = Clinker
  - i. 9 = Fosfato
  - j. 0 = otros

Cuando se elige la opción 0 = Otros, se ha de introducir una densidad del material nuevo. No obstante, cada material lleva asignada una densidad según datos proporcionados por el Instituto Jaume Almera. El programa tiene reservada hasta 20 posibles materiales y densidades. Se debería permitir al usuario guardar en una base de datos el nuevo material introucido y su densidad.

4. Tipo de operación. Hay dos vías posibles, según se haya seleccionado PM10 o GROS como contaminante a tratar:
  - a. En el caso de PM10:
    - i. 1 = RESUSPENSION TRÁFICO CAMIONES
    - ii. 2 = MANIPULACIÓN, CARGA Y DESCARGA DE GRANELES
    - iii. 3 = PRESUSPENSION VIENTO
    - iv. 4 = Carga Buque (Camión > Parva muelle > Grúa > Barco)
    - v. 5 = Descarga buque (Barco > Grúa > Tolva > Camión)
    - vi. 6 = Carga a camión o tren (Parva > Pala > Camión o tren)
  - b. En el caso de GROS:
    - i. 1 = RESUSPENSION TRÁFICO CAMIONES
    - ii. 2 = MANIPULACIÓN, CARGA Y DESCARGA DE GRANELES

- iii. 3 = PRESUSPENSIÓN VIENTO
- 5. En este punto, las líneas de solicitud de información se bifurcan en tantas ramas como tipos de operación:
  - a. Operación 1:
    - i. N° CAMIONES/DIA
    - ii. PESO MEDIO CAMIONES (toneladas)
    - iii. RECORRIDO MEDIO DE CAMIONES EN CELDA DE MALLA PORTPUFF (KM) (se aconseja 0.3 Km).
    - iv. % DE CONTENIDO DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE.
    - v. % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE'
    - vi. FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
    - vii. % DE SUPERFICIE DE CELDA CON MATERIAL RESUSPENDIBLE
    - viii. ALTURA DE FOCO (METROS)
    - ix. Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)
    - x. Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

Otras variables no aplicables en esta opción, toman dentro del programa un valor cero.

- b. Operación 2:
  - i. MASA TOTAL A MANIPULAR EN CADA PUNTO DE OPERACION (TONELADAS/DIA-PUNTO DE OPERACION)
  - ii. VELOCIDAD MEDIA VIENTO (M/S) en cada instante.
  - iii. % DE CONTENIDO DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE.
  - iv. % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE'
  - v. FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
  - vi. ALTURA DE FOCO (METROS)
  - vii. Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)
  - viii. Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

Otras variables no aplicables en esta opción, toman dentro del programa un valor cero.

- c. Operación 3:
  - i. % DE SUPERFICIE DE CELDA CON MATERIAL RESUSPENDIBLE
  - ii. VELOCIDAD MEDIA VIENTO (M/S) en cada instante.
  - iii. % DE CONTENIDO DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE.

- iv. % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE'
- v. FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
- vi. ALTURA DE FOCO (METROS)
- vii. Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)
- viii. Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

Otras variables no aplicables en esta opción, toman dentro del programa un valor cero.

d. Operación 4:

- i. % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE'
- ii. FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
- iii. ALTURA DE FOCO (METROS)
- iv. Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)
- v. Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

Otras variables no aplicables en esta opción, toman dentro del programa un valor cero.

e. Operación 5:

- i. % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE'
- ii. FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
- iii. ALTURA DE FOCO (METROS)
- iv. Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)
- v. Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

Otras variables no aplicables en esta opción, toman dentro del programa un valor cero.

f. Operación 6:

- i. % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE'
- ii. FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
- iii. ALTURA DE FOCO (METROS)
- iv. Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)



v. Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

Otras variables no aplicables en esta opción, toman dentro del programa un valor cero.

Los datos introducidos son preprocesados y ordenados en los ficheros de salida (INPUT-EMIPM10.dat y INPUT-EMIGROS.dat) con el siguiente formato:

- En una primera línea, se indica:
  - contaminante,
  - día, mes y año iniciales,
  - día, mes y año finales,
  - hora solar del día inicial,
  - hora solar del día final,
  - nº total de horas del período de cálculo y
  - nº de focos activos en algún instante del período.
- En líneas consecutivas (una por foco), se muestra:
  - N° del foco.
  - Coordx y coordy
  - Hora inicial y final del periodo 1. Las horas pueden ir de 0 a 23).
  - Hora inicial y final del periodo 1. Las horas pueden ir de 0 a 23).
  - N° de horas/día en que el foco está activo (no debe haber ningún foco con cero)
  - Tipo de material
  - Densidad del material (gr/cm<sup>3</sup>)
  - Densidad relativa
  - Tipo de operación
  - % DE SUPERFICIE DE CELDA CON MATERIAL RESUSPENDIBLE
  - VELOCIDAD MEDIA VIENTO (M/S) en cada instante.
  - MASA TOTAL A MANIPULAR EN CADA PUNTO DE OPERACION (TONELADAS/DIA-PUNTO DE OPERACION)
  - % DE CONTENIDO DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE
  - % DE HUMEDAD DE MATERIAL PULVURULENTO EN SUPERFICIE
  - FACTOR DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS O SISTEMAS LIMPIOS (ENTRE 0 Y 1, 1 = NO REDUCCION')
  - N° CAMIONES/DIA
  - PESO MEDIO CAMIONES (toneladas)
  - RECORRIDO MEDIO DE CAMIONES EN CELDA DE MALLA PORTPUFF (KM)
  - ALTURA DE FOCO (METROS)
  - Tamaño horizontal inicial de nube de contaminante/4, SIGMAY (m)
  - Tamaño vertical inicial de nube de contaminante/4, SIGMAZ (m)

A continuación se muestran dos ejemplos de estos ficheros de salida. Estos ficheros serán los de entrada a los programas EMIPORT--PM10.FOR y EMIPORT-GROS.FOR.





y en nuevas formulaciones desarrolladas de l procesamiento de datos provistos por los puertos implicados en el proyecto HADA y, especialmente, por las campañas experimentales realizadas por CIEMAT y el Instituto Jaume Almera en el Puerto de Tarragona en los veranos de 2003 y 2004 (CIEMAT-CSIC, 2003 y 2004).

Estos programas incluyen una serie de subrutinas específicas para tratar cada tipo de operación:

1. EMITRAF. Para emisiones debidas a resuspensión de polvo por circulación de vehículos, especialmente vehículos pesados (camiones y palas).
2. EMICARGA. Para tratar cualquier tipo de proceso de carga, descarga y manipulación de graneles.
3. EMIRESUS. Para estimar la emisiones debida a la resuspención por viento fuerte.
4. Carga Buque (Camión → Parva muelle → Grúa → Barco)
5. Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camión)
6. Carga a camión o tren (Parva → Pala → Camión o tren)

En las siguientes secciones, se explican los detalles de los programas EMIPORT.

## ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS ASOCIADOS A LAS EMISIONES EN EMIPORT

### Datos a generar de cada contaminante (fichero de emisiones para PORTPUFF)

Habrá un fichero de emisiones para cada uno de los contaminantes: EMISION\_PM10.dat y EMISION\_GROS.dat.

Estos ficheros deben incluir las siguientes variables:

- x\_utm=coordenada utm, en km, en el eje OX
- y\_utm=coordenada utm, en km, en el eje OY
- zsourc= altura de la fuente, en metros, sobre el suelo
- imo =mes
- idy =d a
- iyr= año
- relhr=hora
- relmin= minuto
- qsourc= tasa de vertido (gr/puff) =(gr/minuto) si nph=60
- stempc= temperatura  C
- efflux= caudal de gases (m3/s)
- sigxini= sigma\_x inicial del puff (m)
- sigzini= sigma\_z inicial del puff (m)

El fichero de emisiones debe cubrir todo el período previsto de simulación con datos cada minuto de emisión de cada uno de los focos. Deben estar todos los focos que en algún momento puedan estar activos. Cuando no lo están, tendrán emisión cero. No es conveniente incluir focos que no están activos en ningún instante del periodo elegido. El orden en que se pongan los datos de emisión será tal que:

- a. Se empieza en la hora, minuto, mes, día y año correspondiente al instante inicial de simulación indicando los datos correspondientes a cada foco emisor en una línea (para cada instante habrá tantas líneas de datos como focos emisores activos o inactivos).
- b. Cada minuto se mostrarán los datos de cada foco. Se indicarn los datos de cada foco en una línea (para cada instante habrá tantas líneas de datos como focos emisores activos o inactivos). Los datos de emisión pueden variar de instante a otro, aunque esto se limitar  a solamente cambios en la ejecución de la actividad de emisión de partículas (inicio o final de operaciones de carga o descarga, cambio de maquinaria o de operación, etc)
- c. Se continuará de la misma manera hasta completar los datos del último minuto del período de simulación previsto para PORTPUFF.
- d. Los datos a incluir en cada línea son los siguientes y en el orden expuesto:

x\_utm y\_utm zsourc(m) imo idy iyr relhr relmini qsourc stemp efflux sigxini sigzini

El formato de lectura es libre según la sentencia FORTRAN de PORTPUFF siguiente:

```

READ (LUN(5), *) X_utm, Y_utm, ZSOURC(NS),imo(ns),
+ idy(ns), iyr(ns), relhr(ns,ishr,isg), relmin(ns,ishr,isg),
+ qsourc(ns,ishr,isg), stempc(ns,ishr,isg), efflux(ns,ishr,isg),
+ SIGXINI(ns,ishr,isg),SIGZINI(ns,ishr,isg)

```

Para el caso de dos focos y una hora de simulación, uno comenzando a emitir antes que el otro y terminando en distintos instante y con intensidades, alturas, coordenadas y tamaños iniciales distintos, los datos se dispondrían de la siguiente forma:

```

931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 1 00.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 1 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 2 00.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 2 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 3 00.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 3 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 4 00.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 4 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 5 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 5 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 6 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 6 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 7 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 7 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 8 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 8 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
.....
.....
.....
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 55 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 55 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 56 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 56 80.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 57 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 57 00.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 58 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 58 00.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 0 59 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 0 59 00.0 0 -9.0 5.0 2.0
931.1 4585.8 2.0 4 06 5 1 00 40.0 0 -9.0 100.0 10.0
929.1 4584.2 5.0 4 06 5 1 00 00.0 0 -9.0 5.0 2.0

```

Tabla 4. Ejemplo de fichero de emisiones generado por EMIPORT.

### ¿Cómo especificar coordenadas de los puntos de emisión?

Varias posibilidades:

- o Pinchando puntos sobre un mapa del puerto convenientemente georeferenciado.
- o Escribiendo las coordenadas en alguna ventana desplegable.

Hay que controlar que no se elijan puntos o coordenadas que caigan fueran de dominio de cálculo.

## Altura de emisión

Habrá una altura propuesta para cada tipo de actividad contaminante (altura media a la que se est  trabajando). El usuario debe poder modificarla en cada sesión.

Los valores propuestos se han obtenido del análisis de fotografías realizadas de distintas operaciones portuarias en campañas específicas.

ACTIVIDAD	ALTURA (metros sobre suelo) Z(m) o ZSOURC(m)
Carga Buque (Camion → Parva muelle → Grúa → Barco)	1.0
Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camion)	7.0
Carga a camion o tren (Parva → Pala → Camion o tren)	3.0
Paso camiones	2.0
Resuspensión viento	2.0
Manejo graneles	3.0

Tabla 5. Altura de emisión recomendadas para cada tipo de operación.

Hay que descartar datos negativos o muy grandes (por ejemplo, 100 m)

## Tamaño inicial de cada puff

Queda expresado por dos parámetros sigxini y sigzini. Indican el tamaño alcanzado por la nube de contaminante en los primeros segundos después de su emisión.

Sigxini=ancho de la nube /4.0

Sigzini=alto de la nube/4.0

Los valores a tomar dependen del tipo de actividad contaminante (tamaño de fuente emisora, modo de operación, estado del material, etc) y en el caso de emisiones que afecten a un área, dependerán de las dimensiones de ésta o de cada celda de la malla de cálculo. El usuario debe poder modificarla en cada sesión.

Los valores propuestos se han obtenido del análisis de fotografías realizadas de distintas operaciones portuarias en campañas específicas.

ACTIVIDAD	sigxini (m)	sigzini (m)
Carga Buque (Camion → Parva muelle → Grúa → Barco)	1.5	1.0
Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camion)	4.0	3.0
Carga a camion o tren (Parva → Pala → Camion o tren)	2.5	1.5
Paso camiones *	100.0	10.0
Resuspensión viento*	100.0	10.0
Manejo graneles	3.0	1.5

\* Estos focos se consideran como fuentes de área de dimensiones equivalentes al una celda de la malla de cálculo de PORTPUFF (250x250 m).

Tabla 6. Tamaños iniciales (diámetro/4) de nube de contaminante recomendadas para cada tipo de operación.

## Otras variables

Las variables de **temperatura del contaminante**, no del aire, (stemp), **caudal de gases** (efflux) toman valores fijos siempre de **0 y -9.0, respectivamente**. No se debe permitir modificaciones por el usuario (es mejor que no aparezcan en ninguna ventana desplegable, pero sí aparecerán en el fichero de emisiones que use PORTPUFF).

Las variables hora (relhr), minuto (relmin), mes (imo), día (idy) y año (iyr) se refieren al instante y fecha de emisión de cada puff. Hay que tener cuidado de no introducir fechas y horas incoherentes.



## DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE CALCULO DE EMISIONES

### Fuentes de información para cálculo de emisiones:

1. Sedimentables.
  - AP-42-EPA
    - o Paso camiones.
    - o Resuspensión viento.
    - o Manejo graneles.
2. PM10.
  - Factores HADA
    - o Carga Buque (Camión → Parva muelle → Grúa → Barco)
    - o Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camión)
    - o Carga a camión o tren (Parva → Pala → Camión o tren)
  - AP-42-EPA
    - o Paso camiones.
    - o Resuspensión viento.
    - o Manejo graneles.

### Factores AP-42-EPA

Las formulaciones de la AP-42 de EPA, generalmente, están pensadas para partículas de diámetro inferior a 30 µm. Por lo tanto, en algunos casos ha sido necesario realizar una estimación de algunos coeficientes para partículas sedimentables de diámetro muy superior a las 10 µm utilizando técnicas de regresión.

#### 1. Circulación de vehículos

Esto es aplicable a la circulación de vehículos (generalmente camiones) sobre zonas con material pulverulento en el suelo. En zonas, donde no se prevea el paso de vehículos o no tengan material susceptible de resuspenderse, no se deben hacer estos cálculos de emisión.

Según AP-42 (EPA), para el trasiego de vehículos sobre carreteras sin asfaltar y caminos, se debe aplicar la siguiente expresión para el cálculo de las emisiones por Km recorrido por vehículo:

$$E = \frac{k(s/12)^a (W/3)^b}{(M/0.2)^c} \quad (1)$$

donde:

E = factor de emisión (kg/Km-vehículo)

s = contenido de polvo del material en la superficie (%)

W = peso medio del vehículo (toneladas)

M = contenido de humedad del material de la superficie (%)

Constante	PM2.5	PM10	PM30	PM100 (Sedimentables)
<b>k (kg/Km-vehículo)</b>	0.107	0.733	2.819	14.36 <b>AJUSTE: Y=0.0329*X**1.32</b>
<b>a</b>	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>B</b>	0.4	0.4	0.5	0.8 <b>AJUSTE: Y=0.0039*X+0.378</b>
<b>c</b>	0.3	0.3	0.4	0.7 <b>AJUSTE Y = 0.0039*X + 0.277</b>
<b>Nivel de calidad</b>	Medio	Alto	Alto	

Tabla 7. Valores de las constantes de la expresión (1). y ajustados para sedimentables.

Para el cálculo de emisiones en cada celda y minuto de la forma que exige PORTPUFF (gr/puff o gr/min) hay que considerar entonces los siguientes factores:

- $W$  = peso medio del vehículo (toneladas). Habitualmente, los camiones utilizados en estas operaciones son de unas 24 toneladas.
- $M$  = contenido de humedad del material de la superficie (%). Depende de la humedad ambiente, presencia de lluvia o sistemas de riego, forma de almacenamiento. El estado de humedad del suelo puede variar algo de la parte externa (en contacto con el aire ambiente) de la interna. En condiciones calurosas y secas, se recomienda usar valores bajos (0.02-2%). En condiciones de suelo mojado, se recomiendan valores del orden de 10-20%.
- $s$  = contenido de polvo del material en la superficie (%). Depende del estado de agregación del material. Un valor medio sería del orden de un 12% (variando entre 1 y 80%).
- $N$  = número de vehículos (viajes) que circulan cada día en cada celda. Consideramos un viaje como la entrada en la celda, carga o descarga (si procede) y salida de la celda.
- Horario de circulación de vehículos en cada celda.  $NH$  = Horas totales de circulación de vehículos al día.
- $REC$  = Recorrido medio de cada vehículo (en cada viaje) en cada celda. En celdas de 250x250 m considerando viajes de ida y vuelta, podemos estimar un recorrido medio de 0.3 Km.
- $PORSUP$  = Porcentaje de celda con material resuspendible en viales.
- $FACRED$  = Factor de reducción de emisiones por aplicación de medidas atenuadoras. Será igual a cero cuando las medidas atenuadoras son perfectas y 1 cuando no hay ninguna medida.

Las emisiones en cada celda  $E_{celda}$  (gr/min) en cada minuto dentro del período de movimiento de vehículos serán entonces:

$$E_{celda} = 1000 \cdot (N / NH) \cdot (REC / 60) \cdot E \cdot FACRED \cdot PORSUP / 100 \quad (2)$$

Fuera del periodo de movimiento de vehículos, las emisiones serán cero.

## 2. Carga, descarga y manipulación de parvas

Dentro de este apartado están incluidas todas las operaciones carga, descarga y manipulación de parvas, de cuyas emisiones no se tenga otra información más detallada y fiable (ver apartados 4 a 6). Según AP-42 (EPA), la cantidad de partículas emitidas por tonelada de material tratado por manipulaciones en parvas puede responder a la siguiente expresión::

$$E = 0.0016k \frac{(u/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \quad (3)$$

donde:

E = factor de emisión (kg/Tonelada)

u = velocidad media del viento (m/s).

M = contenido de humedad del material de la superficie (%)

Constante	PM2.5	PM10	PM30	PM100 (Sedimentables)
<b>k</b> (kg/Tonelada)	0.11	0.35	0.74	<b>1.93</b> <b>AJUSTE: Y=0.0558*X**0.77</b>
<b>Nivel de calidad</b>	Muy alto	Muy alto	Muy alto	

Tabla 8. Valores de las constantes de la expresión (3). y ajustados para sedimentables.

Para el cálculo de emisiones en cada punto y minuto de la forma que exige PORTPUFF (gr/puff o gr/min) hay que considerar entonces los siguientes factores:

- *U* = velocidad media del viento (m/s). Esta corresponderá a la medida por la torre meteorológica del puerto en cada instante en el caso de que PORTPUFF este en su modo de funcionamiento correspondiente a tiempo real, y el correspondiente a la predicción de CALMET en un punto de malla situado en el centro del puerto en cada hora.
- *M* = contenido de humedad del material de la superficie (%). Depende de la humedad ambiente, presencia de lluvia o sistemas de riego, forma de almacenamiento. El estado de humedad de una parva puede variar de la parte externa (en contacto con el aire ambiente) de la interna. En condiciones calurosas y secas, se recomienda usar valores bajos (0.02-2%). En condiciones de suelo mojado, se recomiendan valores del orden de 10-20%.
- Horario de operación con graneles en cada punto. *Fuera de los horarios de actividad las emisiones son cero*
- Cantidad de material manipulado por unidad de tiempo. *CG* = Masa de material manipulado en Toneladas / Día. Se puede estimar dependiendo del tipo de operación, cómo se realice y la densidad del material.

En el caso, de la carga o descarga de graneles con grúas equipadas de cucharón, debemos poder conocer la capacidad de carga o, al menos, el volumen del cucharón. Si sólo se conoce la capacidad del cucharón, puede estimarse el peso considerando la densidad del material. En la tabla siguiente, se muestra las densidades calculadas de los distintos materiales obtenidas por el grupo de Xavier Querol del Instituto de Ciencias de

la Tierra del CSIC. Estas medidas fueron obtenidas de muestras realizadas en el Puerto de Tarragona.

Muestra	Densidad real promedio (g/cm <sup>3</sup> )
Mineral de Mn	5,7662
Cenizas de Pirita	4,0872
Tapioca_2	2,0264
Alfalfa	1,6033
Carbón de coque	1,4938
Carbón de hulla	1,7227
Fino de silico-Mn	5,9938
Clinker	3,2630
Fosfato	3,0945

Tabla 9. Densidades de algunos de los graneles (Fuente: Instituto Jaume Almera).

El ritmo de operación, es decir, el tiempo que tardan en coger material con el cucharón, transportarlo y soltarlo, puede ser variable, pero puede situarse en aproximadamente 1 ciclo por minuto, pero difícilmente podrá ser mayor.

A modo de ejemplo, con cucharones de unos 15 m<sup>3</sup>, con un material de densidad 2 gr/m<sup>3</sup> (tapioca) y operando a un ritmo de un ciclo por minuto, el material cargado o descargado por una grúa será 30 toneladas/minuto.

En el caso, de una pala excavadora en actividad de carga de un camión, habría que considerar el tiempo que tarda en cargar un camión de unas 24 toneladas (habitualmente) o el tiempo que tarda en eliminar una parva. En este último caso, habría que conocer la cantidad de material existente en la parva. Si se asume una parva cónica, podemos conocer su volumen mediante la expresión:

$$V = \frac{p}{3} R^2 H$$

siendo  $R$  el radio de la base y  $H$  la altura de la parva. La masa de material puede calcularse entonces conociendo su densidad (tabla 9). En cualquier caso, es de esperar que el material manipulado por minuto sea inferior al que es capaz de hacer una grúa. Lo mismo puede decirse del caso en que sean camiones descargando en el material sobre el muelle.

La tasa de emisión por foco (grúa, pala, etc) ( $E_{foco}$ ) será en gramos/minuto:

$$E_{foco} = 1000 \cdot (CG / NH) \cdot (E / 60) \cdot FACRED \quad (4)$$

Las emisiones estimadas incluyen el efecto del factor de reducción  $FACRED$  de emisiones por aplicación de medidas atenuadoras de emisiones.

Fuera del periodo de actividad, las emisiones serán cero.

### 3. Resuspensión de polvo por el viento

El viento por encima de cierta intensidad puede resuspender material depositado al aire libre. Esta resuspensión será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad del viento y dependerá de la disponibilidad y del tipo del material resuspendible. La resuspensión no será un fenómeno continuado, sino que existirá mientras haya material a resuspender. La disponibilidad de material a resuspender será menor según aumenta el periodo de exposición a vientos fuertes.

La EPA en su documento AP-42 da unas expresiones para calcular la cantidad de material potencialmente resuspendible (en el caso de que haya material fino disponible suficiente) desde acopios o parvas al aire libre después de que éstas han sido manipuladas (se ha vertido material adicional sobre ellas, se ha removido el material, etc.) en función del viento máximo observado en cada día. Establece que el factor de emisión  $E$  (Kg/m<sup>2</sup>-día) dependerá del potencial de erosión  $P$  de cada evento diario individual de viento fuerte:

$$E = kP = k[58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*)] \quad (5)$$

siendo  $u_t^*$  y  $u^*$ , la velocidad de fricción umbral de resuspensión y la correspondiente al viento medio medido en las horas de viento fuerte capaz de resuspender material, respectivamente. Cuando estemos por debajo del umbral, no habrá emisión

Constant	PM2.5	PM10	PM30	PM100 (Sedimentables)
<b>k</b>	0.2	0.5	1.0	<b>2.17</b> <b>AJUSTE: Y=0.111*X**0.648</b>

Tabla 10. Valores de las constantes de la expresión (5).

La velocidad de fricción se obtiene de la siguiente expresión:

$$u_z = \frac{u^*}{0.4} \ln \left[ \frac{z}{z_0} \right] \quad (6)$$

donde  $u_z$  es la velocidad del viento en la altura  $z$  (10 m) y  $z_0$  es la rugosidad media del terreno. En este caso, considerando la configuración de terreno y la existencia de los edificios del puerto, se asume un valor entre 0.05 y 0.5 m. Entonces:

$$u^* = \frac{u}{10} \quad (7)$$

La velocidad del viento será la medida por la torre meteorológica del puerto en cada instante en el caso de que PORTPUFF esté en su modo de funcionamiento correspondiente a tiempo real, y el correspondiente a la predicción de CALMET en un punto de malla situado en el centro del puerto en cada hora.

No obstante, hay que considerar la existencia de barrera cortavientos que atenúan de forma muy notable el viento a sotavento. Una barrera cortaviento eficaz (porosidad media) puede llegar a reducir la velocidad de viento a sotavento en un 80% en

distancias de hasta 9 veces la altura de la barrera (A. Sanz, 2002 y Santiago et al., 2005) en el caso de vientos incidiendo perpendicularmente a la barrera. En este caso, la velocidad de fricción  $u^*$  debe ser corregida por un factor  $F$ , que tomará valores tanto más bajos cuanto mayor sea la efectividad de la barrera cortaviento (0.2-1.0), siendo igual a 1 cuando no haya barrera cortaviento o la dirección del viento deja sin efecto a la misma:

$$u_c^* = F \cdot u^* \quad (8)$$

La velocidad de fricción umbral,  $u_t^*$ , por encima de la cual puede haber resuspensión, depende del tipo de material apilado en las parvas o en suelo. Según la información mostrada en el documento AP-42 de la EPA, estos valores están entre 0.54 y 1.33 m/s. Con objeto de no complicar en demasía el establecimiento de una velocidad de fricción umbral, esta se fija en un valor medio de 1.0 m/s, que traducido a velocidades reales (según ec. 8) supone una **velocidad umbral de 10 m/s**. Si el viento medido o estimado por CALMET es inferior a 10 m/s, no habrá resuspensión.

La humedad del material es otro factor determinante. Si el material está mojado ( $M > 10$ ) o se ha tratado con alguna sustancia atenuadora de emisiones, no habrá resuspensión.

En ese mismo documento, se hacen otras consideraciones relativas al comportamiento de distintas partes de las parvas y a la intensidad de viento según su forma y ángulo de incidencia del viento.

Por lo tanto, la emisión potencial de partículas,  $E$  ( $\text{Kg/m}^2\text{-día}$ ), debida a la resuspensión por viento seguirá la siguiente expresión:

$$E = k[5.8(u - 10)^2 + 2.5(u - 10)] \quad (9)$$

La resuspensión no será un fenómeno continuado, sino que existirá mientras haya material a resuspender. La disponibilidad de material a resuspender será menor según aumenta el periodo de exposición a vientos fuertes, aunque la manipulación de parvas puede dejar al descubierto material resuspendible nuevo. Todo esto debe ser tenido en cuenta a la hora de repartir esa emisión a lo largo del día. Por lo tanto, se va a considerar el período de tiempo afectado por vientos fuertes por encima del umbral y el tiempo transcurrido desde la última manipulación de la parva o acopio.

Con esta idea, se propone aplicar a cada hora afectada unos pesos relativos,  $w_i$ , a la disponibilidad de material a resuspender en las parvas. Se daría un peso máximo de 1 a las horas en las ha comenzado el episodio de viento fuerte y a las horas de manipulación de las parvas. A las horas posteriores al comienzo del evento de viento fuerte o a la finalización de la actividad diaria en las parvas en su horario de laboral, se les asigna un peso decreciente hasta hacerse cero pocas horas después (0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.0). En resumen, si el viento es mayor que 10 m/s y estamos en el período de actividad portuaria, se asigna un valor de  $w_i=1.0$ . Una vez que cese la actividad portuaria y si sigue el viento siendo mayor de 10 m/s, se asignan valores decrecientes de  $w_i$  (0.8 la primera hora, 0.6 la segunda, 0.4 la tercera, 0.2 la segunda y 0.0 en las siguientes). Si el viento baja de 10 m/s,  $w_i$ , será 0.0 en cualquiera de los casos. A continuación se muestran dos ejemplos.

<b>Hora</b>	<b><math>W_i</math></b>
<b>00:00</b>	1
<b>01:00</b>	0.8
<b>02:00</b>	0.6
<b>03:00</b>	0.4
<b>04:00</b>	0.2
<b>05:00</b>	0.0
<b>06:00</b>	1
<b>07:00</b>	1
<b>08:00</b>	1
<b>09:00</b>	1
<b>10:00</b>	1
<b>11:00</b>	1
<b>12:00</b>	1
<b>13:00</b>	1
<b>14:00</b>	1
<b>15:00</b>	0.8
<b>16:00</b>	0.6
<b>18:00</b>	0.2
<b>19:00</b>	0.0
<b>20:00</b>	0.0
<b>21:00</b>	0.0
<b>22:00</b>	0.0
<b>23:00</b>	0.0

*Tabla 11. Ejemplo de asignación de pesos  $w_i$  a cada hora suponiendo que sopló viento fuerte durante todo el día y el periodo de actividades portuarias con graneles fue de 06:00 a 14:00.*

Hora	W <sub>i</sub>
00:00	0
01:00	0
02:00	1
03:00	0.8
04:00	0.6
05:00	0.4
06:00	1
07:00	1
08:00	1
09:00	1
10:00	0.0
11:00	0.0
12:00	0.0
13:00	0.0
14:00	0.0
15:00	0.0
16:00	0.0
18:00	0.0
19:00	0.0
20:00	0.0
21:00	0.0
22:00	0.0
23:00	0.0

Tabla 12. Ejemplo de asignación de pesos  $w_i$  a cada hora suponiendo que sopló viento fuerte entre las 02:00 y las 09:00 y el periodo de actividades portuarias con graneles fue de 06:00 a 14:00.

Las emisiones horarias por unidad de superficie pueden estimarse entonces mediante una ponderación:

$$E_h = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} E \quad (10)$$

donde  $n$  es el número de horas a considerar.

Otro factor importante a considerar es la porción de superficie potencialmente afectada por la resuspensión de polvo dentro de cada celda de la malla de cálculo. Habrá que considerar la proporción acupada por parvas, pero también la porción de suelo con material resuspendible. En caso de duda, un valor entorno al 50% puede ser razonable.

$$E_{foco} = 1000 \cdot A_{celda} \cdot M \cdot (E_h / 60) \cdot FACRED \cdot PORSUP / 100 \quad (11)$$



Las emisiones estimadas incluyen el efecto del factor de reducción *FACRED* de emisiones por aplicación de medidas atenuadoras de emisiones y tienen en cuenta la porción de superficie cubierta por material resuspendible *PORSUP*.

## Factores HADA

Estos factores corresponden a los obtenidos dentro de las campañas experimentales y al procesado de datos obtenidos en los puertos implicados dentro del proyecto HADA. (Informes CIEMAT-CSIC, 2003, 2004). El procedimiento de cálculo de dichos factores se expone en la sección siguiente. Estas estimaciones corresponden a partículas PM10.

### *1. Carga Buque (Camión → Parva muelle → Grúa → Barco) (figura 2)*

Según los cálculos realizados, la tasa de emisión correspondiente a este tipo de operación es en media  $105 \pm 30$  gr/min de partículas PM10 (ver tabla 13). No obstante, el rango de valores posibles es bastante amplio con una tasa mínima de 16 gr/min y una máxima de 277 gr/min, correspondiendo esta última a un proceso de descarga simultánea de tres camiones sobre el muelle. Hay que indicar que durante el período de medición se han visto de forma continuada distintas fases del proceso de carga en el buque, existiendo fases con poca emisión y otras con mucha. Incluso en un misma actividad el modo de ejecutarla ha afectado a las emisiones. Debido a que PORTPUFF necesitará ser alimentado de unos datos de emisión fiables, pero no tan exhaustivos que no puedan ser provistos por el usuario, se debe tomar para este tipo de operación de Carga de Buque (con Camión, Parva en Muelle y Grúa) se debe utilizar como tasa de emisión de partículas PM10 la antes indicada de  **$105 \pm 30$  gr/min**, permitiendo un rango de variación medio entre 75 y 135 gr/min.

Estos datos se calcularon para pellets de alfalfa cuya densidad es  $1,6 \text{ gr/cm}^3$ . Para otros materiales habrá que tener en cuenta su densidad relativa a la alfalfa y, considerando un estado de agregación similar, multiplicar los factores de emisión aquí estimados por su valor correspondiente (ver tabla 14).

Por lo tanto, en este tipo de operación el usuario deberá indicar el material a tratar. En caso de no estar entre los indicados, se puede aconsejar al usuario utilizar el de alfalfa, o bien que el usuario introduzca un valor determinado o buscar el que más se asemeje a los existentes.

Las emisiones estimadas estarán modificadas en virtud del factor de reducción *FACRED* de emisiones por aplicación de medidas atenuadoras de emisiones, tal como se ha aplica a las operaciones antes expuestas.



*Figura 2. Proceso de manipulación de pellets de alfalfa para carga en Buque*

OPERACION	TIEMPO	EMISION (gramos)	EMISION (gramos/min)	ERROR (gramos)	COEF. CORR.	ERROR ESTANDAR	MAX. CONC. (microgr/m3)	VELOCIDAD VIENTO (m/s)	DIRECCION VIENTO (°)
<b>DESCARGA-CAMION</b>	<b>14:55:12 - 14:56:48</b>	<b>42.6</b>	<b>26.6</b>	<b>10.9</b>	<b>0.94</b>	<b>322,36</b>	<b>2603,7 (2)</b>	<b>3.4</b>	<b>228</b>
CARGA-GRUA-1	14:56:48 - 14:57:24	26.1	43.5	1.0	0.99	25,84	4158,7 (1)	3.0	211
CARGA-GRUA-2	14:57:24 - 14:58:24	21.4	21.4	1.8	0.99	39,30	1318,8 (1)	3.0	214
CARGA-GRUA-3	14:58:24 - 14:59:00	9.6	16.0	1.0	0.99	6,16	1280,5 (1)	3.1	212
CARGA-GRUA-4	14:59:00 - 14:59:30	26.2	52.4	6.6	0.93	211,73	1159,9 (2)	3.0	222
CARGA-GRUA-5	14:59:30 - 15:00:30	20.9	20.9	4.0	0.96	89,90	847,4 (1)	3.0	219
CARGA-GRUA-6	15:00:30 - 15:01:00	21.4	42.8	5.5	0.96	83,71	584,7 (2)	3.0	224
CARGA-GRUA-7	15:01:00 - 15:02:30	159.3	106.2	18.5	0.99	272,85	3962,4 (1)	3.2	218
CARGA-GRUA-8	15:02:30 - 15:03:42	34.4	28.7	4.0	0.98	140,63	2761,4 (1)	3.2	214
CARGA-GRUA-9	15:03:42 - 15:07:12	622.6	177.9	207.5	0.94	545,40	6507,3 (1)	3.2	219
CARGA-GRUA-10	15:07:12 - 15:08:12	159.4	159.4	28.5	0.96	583,48	6074,7 (1)	3.2	216
CARGA-GRUA-11	15:08:12 - 15:09:12	145.3	145.3	25.2	0.98	313,23	4511,1 (1)	3.2	218
CARGA-GRUA-12	15:09:12 - 15:10:30	96.7	80.5	31.2	0.92	280,42	1557,8 (2)	3.2	224
CARGA-GRUA-13	15:10:30 - 15:11:12	20.6	34.3	11.5	0.86	225,65	1013,0 (1)	3.2	216
CARGA-GRUA-14	15:11:12 - 15:12:00	87.8	109.6	13.0	0.98	220,17	3755,4 (2)	3.2	225
CARGA-GRUA-15	15:12:00 - 15:12:30	67.2	134.4	24.8	0.95	394,03	2561,0 (1)	3.2	219
<b>DESCARGA-3 CAMIONES</b>	<b>15:12:30 - 15:13:30</b>	<b>277.0</b>	<b>277.0</b>	<b>94.8</b>	<b>0.98</b>	<b>576,41</b>	<b>7668,6 (2)</b>	<b>3.4</b>	<b>228</b>
CARGA-GRUA-16	15:13:30 - 15:15:00	154.8	103.2	36.0	0.97	224,96	1750,9 (2)	3.2	223
<b>TOTAL</b>	<b>14:55:12 – 15:15:00</b>	<b>2068.0</b>		<b>587.0</b>					
		<b>2100</b>		<b>600</b>					
<b>EMISIONES HORARIAS</b>		<b>6300</b>		<b>1800</b>					
<b>EMISIONES cada minuto</b>		<b>105</b>	<b>16.0 – 277.0</b>	<b>30</b>					

Tabla 13. Experimento carga de buque de pellets de alfalfa (Camiones descargando en el muelle, pala amontonando y grúa con cucharón cargando el buque) 03-06-03 14:55-15:15. Puerto de Tarragona.

Material	Densidad relativa a pellets de alfalfa	Tasa de emisión partículas PM10 (gr/min)
Pellets de alfalfa	1.0	105±30
Mineral de Mn	3.6	380±110
Cenizas de Pirita	2.6	270±80
Tapioca_2	1.3	140±40
Carbón de coque	0.9	95±30
Carbón de hulla	1,1	115±30
Fino de silico-Mn	3.7	390±110
Clinker	2.0	210±60
Fosfato	1.9	200±60

Tabla 14. Densidades relativa a pellets de alfalfa y tasas de emisión medias estimadas partículas PM10 para algunos graneles

## 2. Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camión) (figura 3)

Según los cálculos realizados, la tasa de emisión correspondiente a este tipo de operación es en media 140±30 gr/min de partículas PM10 (ver tabla 15). No obstante, el rango de valores posibles es bastante amplio con una tasa mínima de 18.8 gr/min y una máxima de 288.5 gr/min,. Hay que indicar que durante el período de medición se han visto de forma continuada distintas fases del proceso de descarga en del buque, existiendo fases con poca emisión y otras con mucha. Incluso en una misma actividad el modo de ejecutarla ha afectado a las emisiones, como puede verse en los casos especiales donde una apertura descuidada de cucharón sobre la tolva ha producido una emisión pico de 464.2 gr/min (tabla 16). Debido a que PORTPUFF necesitará ser alimentado de unos datos de emisión fiables, pero no tan exhaustivos que no puedan ser provistos por el usuario, se debe tomar para este tipo de operación de Descarga de Buque (con Grúa, Tolva y Camión) se debe utilizar como tasa de emisión de partículas PM10 la antes indicada de **140±30 gr/min**, permitiendo un rango de variación medio entre 110 y 170 gr/min.

Estos datos se calcularon para tapioca cuya densidad es 2.0 gr/cm<sup>3</sup>. Para otros materiales habrá que tener en cuenta su densidad relativa a la tapioca y, considerando un estado de agregación similar, multiplicar los factores de emisión aquí estimados por su valor correspondiente (ver tabla 17).

Por lo tanto, en este tipo de operación el usuario deberá indicar el material a tratar. En caso de no estar entre los indicados, se puede aconsejar al usuario utilizar el de la tapioca, o bien que el usuario introduzca un valor determinado o buscar el que más se asemeje a los existentes.

Las emisiones estimadas estarán modificadas en virtud del factor de reducción *FACRED* de emisiones por aplicación de medidas atenuadoras de emisiones, tal como se ha aplica a las operaciones antes expuestas.

OPERACION	TIEMPO	EMISION (gramos)	EMISION (gramos/min)	ERROR (gramos)	COEF.CORR	ERROR ESTANDAR	MAX. CONC. (microgr/m3)	VELOCIDAD VIENTO (m/s)	DIRECCION VIENTO (°)
1	16:57:00 - 17:01:00	664	166.0	114	0.99	324	7773.7 (1)	2.4	229
2	17:01:00 - 17:01:50	36	45.0	7	0.78	383	1787.2 (1)	1.7	183
3	17:01:50 - 17:07:00	1500	288.5	284	0.98	689	9840.9 (1)	2.7	227
4	17:06:30 - 17:13:20	330	48.5	120	0.74	369	2937.5 (1)	2.7	185
5	17:13:20 - 17:17:00	817	220.8	161	0.98	526	7667.1 (1)	2.7	227
6	17:17:00 - 17:17:42	59	84.3	5	0.91	284	3448,2 (2)	2.7	170
7	17:17:42 - 17:18:42	62	62	14	0.97	110	1134.1 (1)	2.7	190
8	17:18:42 - 17:20:18	43	26.9	15	0.80	125	538.4 (1)	2.7	170
9	17:20:00 - 17:24:00	417	104.3	43	0.99	221	7012.6 (1)	2.5	226
10	17:24:00 - 17:24:42	39	177.9	5	0.93	152	1565.3 (2)	2.5	170
11	17:24:42 - 17:25:42	87	55.7	10	0.99	124	3395.2 (1)	2.5	226
12	17:25:42 - 17:27:42	102	51.0	25	0.87	200	1942.8 (2)	2.5	170
13	17:27:42 - 17:29:42	105	52.5	45	0.87	159	650.7 (2)	2.5	182
14	17:29:42 - 17:35:42	946	157.7	125	0.99	302	8244.4 (1)	2.5	226
15	17:36:30 - 17:42:30	630	105.0	120	0.98	276	6361.6 (1)	2.4	225
16	17:42:30 - 17:45:00	47	18.8	11	0.91	69	637.0 (2)	2.4	170
17	17:45:00 - 17:54:00	1252	139.1	237	0.98	522	9073.8 (1)	2.4	225
18	17:54:00 - 18:01:00	1435	205.0	253	0.97	569	9275.0 (1)	2.6	229
19	18:01:00 - 18:07:00	883	147.2	207	0.98	505	8273.5 (1)	2.6	220
<b>TOTAL</b>	<b>16:57:00 – 18:07:00 (dos min. quitados)</b>	<b>9454 9500</b>		<b>1801 1800</b>					
<b>EMISIONES HORARIAS</b>		<b>8400</b>		<b>1600</b>					
<b>EMISIONES cada minuto</b>		<b>140</b>	<b>18.8 - 288.5</b>	<b>30</b>					

Tabla 15. Experimento descarga de tapioca de barco a tolva con grúa y de tolva a camión. 04-06-03 16:57-18:07. Puerto de Tarragona

OPERACION	TIEMPO	EMISION (gramos)	EMISION (gramos/min)	ERROR (gramos)	COEF. CORR	ERROR ESTANDAR	MAX. CONC. (microgr/m3)	VELOCIDAD VIENTO (m/s)	DIRECCION VIENTO (°)
DESCARGA SIN CUIDADO 1	17:31:00 – 17:32:00 (78 SEG)	557	<b>464.2</b>	52	0.99		8244.4 (1)	2.5	226
DESCARGA SIN CUIDADO 2	17:34:00 - 17:35:00 (42 SEG)	122	174.3	30	0.99		3446.1 (1)	2.5	226

Tabla 16. Casos especiales del experimento descarga de tapioca de barco a tolva con grúa y de tolva a camión.

Material	Densidad relativa a tapioca	Tasa de emisión partículas PM10 (gr/min)
Tapioca_2	1.0	140±30
Mineral de Mn	2.9	410±90
Cenizas de Pirita	2.0	280±60
Pellets de alfalfa	0.8	110±20
Carbón de coque	0.7	100±20
Carbón de hulla	0.9	130±30
Fino de silico-Mn	3.0	420±90
Clinker	1.6	220±50
Fosfato	1.5	210±50

Tabla 17. Densidades relativas a la harina de tapioca y tasas de emisión medias estimadas partículas PM10 para algunos graneles



Figura 3. Proceso de descarga de tapioca con grúa y tolva.

3. Carga a camión o tren (Parva → Pala → Camión o tren) (figura 4)

En este caso, los datos válidos para la estimación de emisiones fueron menores debido a la gran variabilidad de las condiciones atmosféricas.

Según los cálculos realizados, la tasa de emisión correspondiente a este tipo de operación es en media  $96 \pm 25$  gr/min de partículas PM10 (tabla 18). El rango de valores posibles es mucho menos amplio que en los casos anteriores con una tasa mínima de 91 gr/min y una máxima de 97 gr/min, Esto es debido a la escasez de datos en este experimento. Por tanto, para esta actividad de Carga de graneles a Camión o Tren desde Parva con Pala, se deben utilizar como tasa de emisión de partículas PM10 la antes indicada de  **$96 \pm 25$  gr/min**, permitiendo un rango de variación medio entre 91 y 97 gr/min.

Estos datos se calcularon para finos de Si-Mn cuya densidad es  $6.0 \text{ gr/cm}^3$ . Para otros materiales habrá que tener en cuenta su densidad relativa a finos de Si-Mn y, considerando un estado de agregación similar, multiplicar los factores de emisión aquí estimados por su valor correspondiente (ver tabla 19).

Por lo tanto, en este tipo de operación el usuario deberá indicar el material a tratar. En caso de no estar entre los indicados, se puede aconsejar al usuario utilizar el de la tapioca, o bien que el usuario introduzca un valor determinado o buscar el que más se asemeje a los existentes.

Las emisiones estimadas estarán modificadas en virtud del factor de reducción *FACRED* de emisiones por aplicación de medidas atenuadoras de emisiones, tal como se ha aplica a las operaciones antes expuestas.



Figura 4. Proceso de carga de camión con pala.

OPERACION	TIEMPO	EMISION (gramos)	EMISION (gramos/min)	ERROR (gramos)	COEF.CORR	ERROR ESTANDAR	MAX. CONC. (microgr/m3)	VELOCIDAD VIENTO (m/s)	DIRECCION VIENTO (°)
1	10:26:30 – 10:29:00	228.3	91.3	53.7	0.99	924.71	18320 (1)	1.6	51
2	10:29:00 – 10:31:00	193.8	96.9	48.6	0.92	1428	8782 (1)	1.4	8
<b>TOTAL</b>	<b>10:26:30 - 10:31:00</b>	<b>432.1</b> <b>430</b>		<b>114</b> <b>110</b>					
<b>EMISIONES HORARIAS</b>		<b>5761</b>		<b>1520</b>					
<b>EMISIONES cada minuto</b>		<b>96</b>	<b>91-97</b>	<b>25</b>					

Tabla 18. Experimento carga de finos Si-Mn en camiones y tren con pala Puerto de Tarragona. 05-06-03 10:26:30-10:31:00

Material	Densidad relativa a Fino Si-Mn	Tasa de emisión partículas PM10 (gr/min)
Tapioca_2	0.3	30±10
Mineral de Mn	0.9	86±22
Cenizas de Pirita	0.7	67±18
Pellets de alfalfa	0.3	28±8
Carbón de coque	0.2	20±5
Carbón de hulla	0.3	29±8
Fino de silico-Mn	1.0	96±25
Clinker	0.5	48±13
Fosfato	0.5	48±13

Tabla 19. Densidades relativas a Fino Si-Mn y tasas de emisión medias estimadas partículas PM10 para algunos graneles



#### 4. Circulación de vehículos (Furgoneta de 2,5 Toneladas)

También se realizaron experimentos para medir la resuspensión por circulación de vehículos. Fueron varios los experimentos realizados en un terreno cubierto por polvo de hulla (camiones de gran tonelaje – figura 5-, furgonetas grandes y furgonetas pequeñas). Algunos de los experimentos no han podido ser aprovechados para proceder con fiabilidad a utilizar el procedimiento planteado de estimación de emisiones. De todos ellos, tres experimentos realizados con paso de una furgoneta de 2.5 toneladas a 20 mts de un monitor Grimm con un viento perpendicular (de 2.5 a 2.7 m/s) a su marcha han sido los adecuados para estimar emisiones debidas a resuspensión por circulación de vehículos. Las velocidades de paso eran de unos 20-30 Km/hora (ver figura 6).

Las emisiones calculadas son representativas de un tramo de circulación de 10 mts, luego las emisiones estimadas en la tabla 20, están en gr/10 mts en cada experimento y luego se estimaron las medias y las emisiones en gr/Km. Están en aproximadamente un 1 Kg/Km para polvo de hulla con alto valor de  $s$  y  $M$  muy bajo (suelo seco), lo cual concuerda bastante con lo que se podría obtener aplicando la expresión (1) de la AP-42 para un vehículo de este tonelaje.

No obstante, las furgonetas de este tipo no son vehículos muy habituales en los puertos. Es mucho más frecuente el movimiento de grandes camiones o palas excavadoras, por lo que no se hace muy recomendable utilizar los factores de emisión expuestos en este apartado. Es aconsejable utilizar mejor la expresión (1) de la AP-42 para circulación de vehículos.

Los experimentos realizados sobre terreno mojado han demostrado que las emisiones son un o dos ordenes de magnitud inferior a las de un suelo seco.



*Figura 5. Resuspensión por polvo de hulla al paso de un camión.*



*Figura 6. Resuspensión por polvo de hulla al paso de una furgoneta de 2.5 Tons.*

OPERACION	TIEMPO	EMISION (gramos/ 10 mts)	ERROR (gramos/ 10 mts)	COEF. CORR.	ERROR ESTANDAR	MAX. CONC. (microgr/m3)	VELOCIDAD VIENTO (m/s)	DIRECCION VIENTO (°)
1	12:13	12.7	1.7	0.99	291.59	2919,4	2.8	---
2	12:15	3.1	0.5	0.93	145.8	1001.3	2.5	---
3	12:17	14.7	6.8	0.89	910.4	4427.2	2.5	---
<b>MEDIA</b>		<b>10.2</b>	<b>3.0</b>					
<b>EMISIONES (Gr/km)</b>		<b>1020</b>	<b>300</b>					

Tabla 20. Experimento paso de vehiculos sobre zona con polvo de hulla. Puerto de Tarragona. 04-06-03 12:13, 12:15, 12:17. Furgoneta Mercedes Sprinter de 2.5 Tons

Material	Densidad relativa a Polvo de Hulla	Factor de emisión partículas PM10 (Kg/Km)
Tapioca_2	1.1	1.1±0.3
Mineral de Mn	3.2	3.2±1.0
Cenizas de Pirita	2.2	2.2±0.6
Pellets de alfalfa	0.9	0.9±0.3
Carbón de coque	0.8	0.8±0.2
Carbón de hulla	1.0	1.0±0.3
Fino de silico-Mn	3.3	3.3±1.0
Clinker	1.8	1.8±0.5
Fosfato	1.5	1.5±0.5

Tabla 21. Densidades relativa a Polvo de Hulla y factores de emisión medias estimadas partículas PM10 para algunos graneles en el caso de resuspensión por circulación de un vehículo de 2.5 toneladas a velocidades de 20 a 30 Km/hora.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente informe explica el desarrollo del modelo de emisiones EMIPORT, el cual ha sido ideado para estimar las emisiones al aire ambiente de partículas PM10 y sedimentables producidas por actividades portuarias con graneles sólidos. Este modelo es una parte muy importante del sistema de modelos que se ha desarrollado dentro del proyecto HADA para su implantación en ocho puertos españoles: A Coruña, Barcelona, Cartagena, Huelva, Tarragona, Valencia, Bilbao y Santander.

EMIPORT abarca un abanico amplio de materiales:

- Tapioca\_2
- Mineral de Mn
- Cenizas de Piritita
- Pellets de alfalfa
- Carbón de coque
- Carbón de hulla
- Fino de silico-Mn
- Clinker
- Fosfato

permitiendo añadir materiales nuevos por el usuario, y operaciones, tales como, carga, escarga, manipulación, resuspensión por paso de vehículos, resuspensión por el viento, incluyendo varias operaciones específicas, como:

- Carga Buque (Camión → Parva muelle → Grúa → Barco)
- Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camión)
- Carga a camión o tren (Parva → Pala → Camión o tren)

La información necesaria para desarrollar EMIPORT ha venido de diversas fuentes:

- Documentos AP-42 de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos.
- Campañas experimentales llevadas a cabo en el Puerto de Tarragona en los veranos de 2003 y 2004.
- Datos adicionales de operaciones portuarias y concentraciones de partículas ofrecidos por diversos puertos, especialmente el Puerto de Valencia.

Todo ello, ha permitido poder tratar el mayor número de fuentes difusas, especialmente aquellas que dan lugar a mayores emisiones de partículas PM10 y mayores (sedimentables) en los puertos españoles. Este modelo puede ser extrapolado a otros puertos españoles y de otros países.

En la estimación de las emisiones, el modelo EMIPORT tienen cuenta, además del tipo de material y operación, otras variables como son el contenido en polvo, humedad del material, condiciones atmosféricas (velocidad del viento), cantidad de material objeto de operación, nº de camiones, porcentaje de superficie afectada o cubierta por material polvurulento, etc.

Lo más novedoso de EMIPORT radica en que incorpora nuevos factores de emisión desarrollados específicamente por los autores para las operaciones específicas antes indicadas y alguna de circulación de vehículos (paso de furgonetas grandes – 2.5 toneladas). Esto ha exigido definir una metodología nueva basada en la modelización inversa de la dispersión de contaminantes con objeto de, a partir de mediciones de alta resolución de la evolución de contaminantes en las proximidades de los focos seleccionados y conociendo de una manera precisa las condiciones meteorológicas, estimar las emisiones y su evolución temporal. Se llama modelización inversa, porque es justo la inversa del procesos normal de modelización de la dispersión de contaminantes, donde conocemos las emisiones y la meteorología y estimamos las concentraciones en el aire ambiente en la zona afectada por esas emisiones. En el modelado inverso, conocemos las concentraciones y la meteorología para poder estimar las emisiones. Siguiendo la analogía de un filtrado de señales, considerando la atmósfera como un filtro de la señal input (emisión) para dar lugar a la señal output (concentración en aire ambiente o inmisión), se realiza un deconvolución de la señal output para obtener o estimar la señal input.

Esto ha permitido obtener los siguientes nuevos factores de emisión y sus errores o incertidumbre asociada para PM10:

OPERACION	EMISION (gr/min)	EMISION (gr/Km)
Carga Buque (Camión → Parva muelle → Grúa → Barco) – Pellets de alfalfa	105±30	-----
Descarga buque (Barco → Grúa → Tolva → Camión) – Tapioca	140±30	-----
Carga a camión o tren (Parva → Pala → Camión o tren) – Finos de Si-Mn	96±25	-----
Paso de furgoneta de 2.5 toneladas – Polvo de hulla	-----	1020±300

A partir de estas emisiones, se pueden estimar las de otros materiales considerando su densidad relativa al material empleado a cada una de ellas.

EMIPORT incorpora también la posibilidad de tener en cuenta la efectividad de medidas atenuadoras de emisiones, tales como el regado de parvas o viales, barreras cortavientos, etc.

EMIPORT provee de datos de emisiones al modelo de dispersión PORTPUFF desagregadas espacialmente (focos puntuales y de área) y temporalmente con una resolución adecuada y en correspondencia con los pasos de tiempo y tamaño de celda de PORTPUFF.

## REFERENCIAS

CIEMAT-CSIC (2003). Caracterización experimental de niveles de concentración en aire de material particulado en el Puerto de Tarragona en diversas actividades de carga descarga y transporte de graneles sólidos. Informe para el Proyecto HADA. LIFE2 ENV/E/000274. Septiembre, 2003.

CIEMAT-CSIC (2004). Caracterización experimental de niveles de concentración en aire de material particulado en el Puerto de Tarragona en actividades de carga/ descarga y transporte de graneles sólidos. Segundo informe para el Proyecto HADA. LIFE2 ENV/E/000274. Diciembre, 2004.

EPA. Informes AP-42 de la Environmental Protection Agency (EPA, <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>)

Martín F. y Palomino I. (2004). Implantación de un sistema de modelización atmosférica en áreas portuarias y determinación de factores de emisión PROYECTO HADA Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental LIFE2 ENV/E/000274

Palomino y Martín, (2004). Desarrollo de interfases entre modelos meteorológicos y adaptación del PORTPUFF a entornos portuarios. PROYECTO HADA Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental LIFE2 ENV/E/000274

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimientos a M. Pujadas, B. Artiñano, F. Gómez-Moreno del CIEMAT y N. Moreno, A. Alastuey, X. Querol por su importantísima labor en la realización de las campañas experimentales realizadas en el Puerto de Tarragona.

A J. Basora, J.A. Luaces por su dedicación y apoyo a la labor experimental en el Puerto de Tarragona.

A los demás responsables de las otras Autoridades Portuarias implicadas en HADA por su apoyo y provisión de datos, especialmente Federico Torres y José Sáez del Puerto de Valencia.

A Andrés Guerra por el apoyo y confianza recibidos y por su eficaz labor de coordinación del proyecto HADA.

## APENDICE

### **Procedimiento de cálculo de los factores de emisión con datos obtenidos en campañas dentro del Proyecto HADA.**

Con el desarrollo de EMIPORT, se ha pretendido ir más allá de estas formulaciones determinando otras nuevas más específicas a las operaciones portuarias. Por este motivo, una de las actividades de este proyecto ha sido la realización de campañas experimentales en el Puerto de Tarragona con el objeto de medir los niveles de contaminación de contaminantes en las proximidades de los puntos donde se están realizando operaciones específicas con graneles (CIEMAT-CSIC, 2003 y 2004). Entre los objetivos de estas campañas llevadas a cabo por el un grupo del Instituto Jaume Almera del CSIC y otro grupo del CIEMAT, está la de proporcionar mediciones de alta calidad de concentración de partículas en distintos rangos de tamaños acompañadas de medidas de las condiciones atmosféricas y de un control exhaustivo de los tipos de operación que se están realizando y cuando y dónde se están realizando. En estas campañas se han cubierto un abanico bastante amplio de operaciones de carga, descarga y transporte de graneles diversos, resuspensión por paso de vehículos, etc. Se han utilizado un total de tres monitores GRIMM colocados en arco alrededor del punto de operación y a unas pocas decenas de metros de las mismas. Estas mediciones se hacían en periodos de tiempo corto y con una frecuencia de muestreo alta (6 segundos). Esto permitía poder tener muy bien identificados los picos de contaminación asociados a operaciones concretas.

Nuestro grupo de investigación ha trabajado en la puesta a punto de una metodología que permitiera mediante el uso de una versión de MELPUFF para microescala estimar las emisiones que con mayor probabilidad se podían corresponder a los valores de concentración registrados por los monitores instalados en las proximidades de la fuente.

Este trabajo ha supuesto:

1. Modificar MELPUFF para realizar un tratamiento de la dispersión a microescala considerando pasos temporales de 1 segundo frente a los pasos temporales habituales de 1 a 15 minutos que se usan a mesoscala.
2. Tener los datos de los monitores GRIMM, de las estaciones meteorológicas y el cronometraje de las operaciones portuarias bien sincronizados.
3. Ubicar en planos de una forma precisa la localización de la fuente emisora y la posición de los monitores.
4. Revisar los datos registrados por los monitores GRIMM con objeto de aislar los picos correspondientes a emisiones de partículas desde operaciones portuarias concretas.
5. Determinar los niveles llamados de fondo como aquellos que se observan antes y después de cada pico de concentración.
6. Analizar y procesar los datos meteorológicos con objeto determinar la dirección y velocidad de viento y la clase de estabilidad representativas de cada evento de emisión de partículas
7. Realizar simulaciones de la dispersión de partículas (en rangos de tamaño coincidentes con los medidos por los monitores GRIMM) emitidas en cada uno de los eventos individuales suponiendo unas tasas de emisión tentativas cubriendo un periodo de tiempo consistente con la extensión del pico de

- contaminación, la velocidad del viento y la distancia entre fuente de emisión y monitores.
8. Comparar las estimaciones de concentración del modelo con los datos observados con objeto de poder estimar las tasas de emisión reales mediante un procedimiento de regresión multilínea.
  9. Realizar simulaciones de verificación con las tasas estimadas.

En la figura A1, se muestra esquemáticamente el proceso seguido para estimar factores de emisión para estos experimentos. Se basa en la idea en que la atmósfera actúa como un filtro de una señal input, léase evolución temporal de la emisión, dando lugar a una señal output o evolución de la concentración de contaminantes en puntos diversos (monitores GRIMM). La idea es conocida la señal output y conociendo como actu el filtro (dispersión de contaminante mediante modelo) podemos estimar las emisiones. Es decir, se plantea un proceso de deconvolución de los registros de concentración obtenidos con los GRIMM.

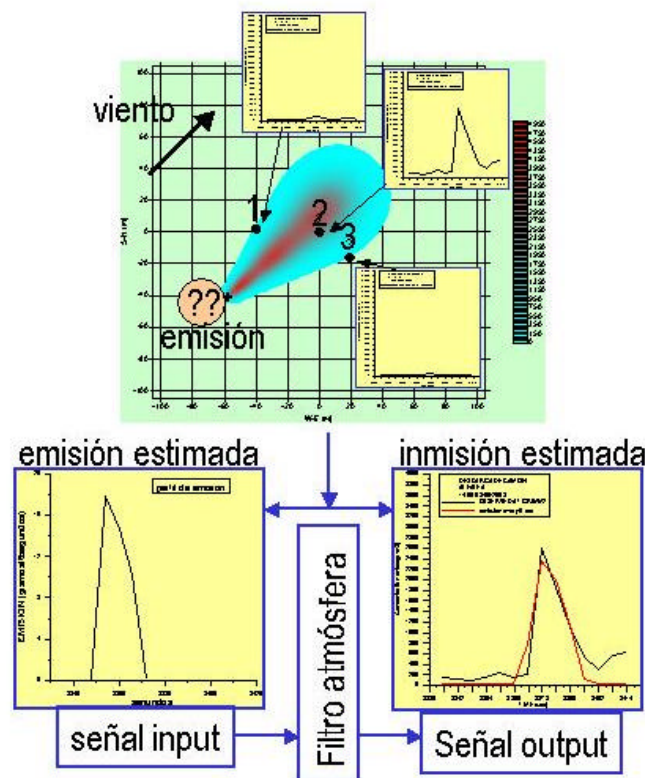


Figura A1. Esquema del proceso de estimación de emisiones a partir de datos de campañas específicas con monitores GRIMM.

Lo más novedoso de este procedimiento reside en el procedimiento de estimar las tasas de emisión. A continuación, se explica en detalle los puntos 7 a 9 tomando un caso ejemplo que se corresponde a la descarga de un camión de pellets de alfalfa en el muelle de Castilla del Puerto de Tarragona el día 3 de Junio.

En la figura A2, puede verse la evolución de concentración de partículas PM10 registrado por el GRIMM 2 situado a 65 metros del punto de descarga del camión, en el que impactó de forma más clara la nube de partículas. Se alcanzó una concentración superior a  $2600 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ . El ancho del pico cubrió 30 segundos. Por lo tanto, podemos



pensar que como mucho la emisión duró 30 segundos. Durante esos instantes el viento sopló con una velocidad de 3.4 m/s y de dirección 228°. Considerando la distancia entre el foco emisor y el GRIMM2 (65 m) y la velocidad del viento se estima que la emisión comenzó unos 19 segundos antes del comienzo de pico, es decir, en el segundo 3353.

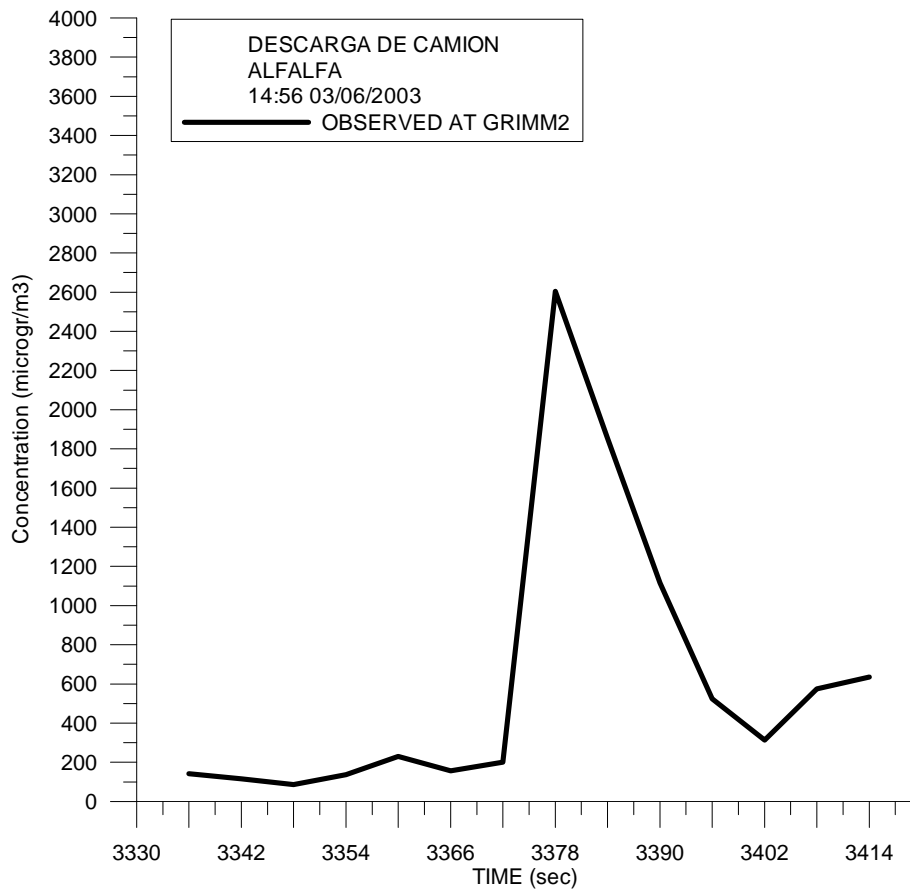
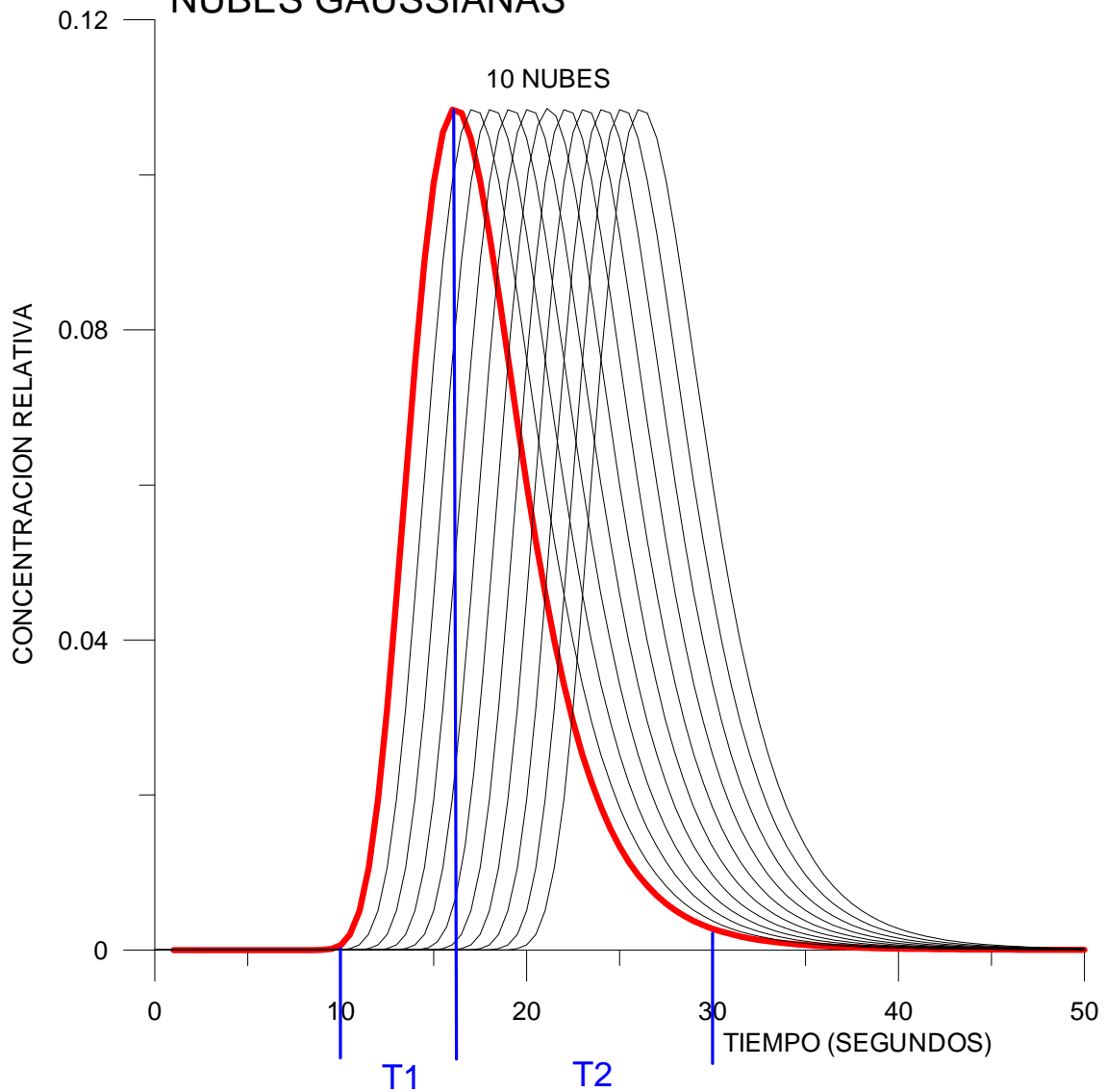


Figura A2. Concentración de PM10 observada en el GRIMM2 debida a la descarga de un camión con pellets de alfalfa en el Muelle de Castilla del Puerto de Tarragona el día 3 de Junio de 2003.

También hay que tener en cuenta que las nubes de contaminante durante el transporte aumentan su tamaño por difusión, lo que implica que se detectarían su llegada antes de lo previsto y tardarían en pasar por cada monitor un tiempo determinado (Figura A3). En las simulaciones preliminares realizadas, se apreció que la nube adquiere un diámetro de unos 70 u 80 metros y que tardaría en pasar sobre un monitor unos 20 segundos. Debido a que la nube continua creciendo, se observa una asimetría tardando aproximadamente 6 segundos (T1) hasta llegar a la zona de máximo y otros 14 (T2) después del máximo. Puede apreciarse que con, aproximadamente, 10 nubes emitidas una cada segundo cubriríamos el intervalo de 30 segundos correspondiente al máximo observado.

## EVOLUCION DE CONCENTRACION ESTIMADA EN UN PUNTO POR EL PASO DE UNA O VARIAS NUBES GAUSSIANAS



*Figura A3. Evolución de concentración estimada en un punto por el paso de una o varias nubes gaussianas*

Teniendo en cuenta este detalle, la duración de la emisión puede ser de alrededor de 10 segundos, notablemente más corta que los 30 segundos estimados inicialmente por inspección de pico medido en el GRIMM2. No obstante, es conveniente utilizar un intervalo intermedio.

Se realizó entonces una simulación con MELPUFF-microescala para un dominio de  $210 \times 210 \text{ m}^2$  con una malla de  $7 \times 7 \text{ m}^2$  de resolución, asumiendo que se emitían 18 nubes PM10 de 10 gr cada una entre los segundos 3355 y 3372. En la figura A4, se muestra el resultado de la simulación correspondiente al segundo 3384.

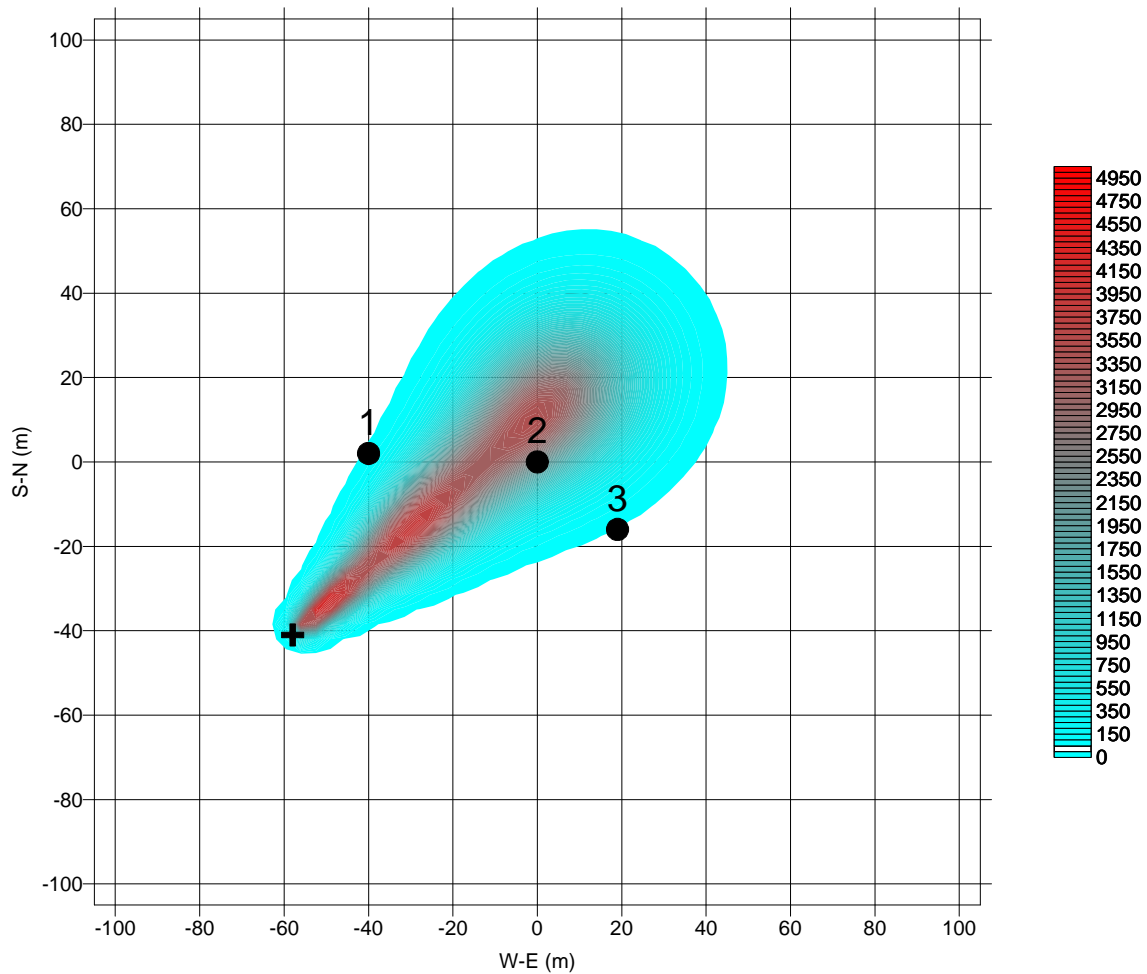


Figura A4. Resultado de la simulación de la dispersión de 30 nubes de 10 gr de PM10 cada una correspondiente al segundo 3384.

Uno de los resultados de MELPUFF-microescala es dar la estimación de la concentración de contaminante,  $C_{p,m}$ , en cada ubicación de los monitores GRIMM y la aportación de cada nube de contaminante en cada punto y en cada instante,  $R_{m,i}$ .

Si analizamos las ecuaciones 1 y 2, podemos comprobar que la concentración de un contaminante en un punto es proporcional a la cantidad de contaminante emitida o contenida en cada nube de contaminante. Es decir, podemos afirmar que la concentración observada en un punto y en un instante dado puede expresarse como una combinación lineal de las aportaciones de cada nube teórica emitida:

$$C_{o,m} = \sum_i a_i R_{m,i} \quad (81)$$

siendo  $a_i$  unos coeficientes representativos de la cantidad real de contaminante existente en cada nube  $i$ . Nuestro objetivo será determinar el valor de esos coeficientes  $a_i$  a partir de los valores de  $R_{m,i}$  estimados por el modelo en cada monitor  $m$  y de las concentraciones medidas en los monitores  $C_{o,m}$  en diferentes instantes correspondientes a la aparición del pico de concentración seleccionado para ambas variables. En el caso expuesto, corresponden a mediciones y contribuciones de las nubes de contaminante entre los segundos 3372 y 3402. De esta forma, disponemos de un número de datos

importante (18 medidas correspondientes a 6 medidas por monitor y 3 monitores) que permitirá mediante técnicas de regresión multilínea estimar los coeficientes  $a_i$  o lo que es lo mismo el contenido de contaminante de cada nube.

Este proceso llevó a que las concentraciones observadas en los monitores GRIMM puede corresponder a las emisiones por descarga de camión de 24 toneladas cargado con pellets de alfalfa expuestas en la tabla siguiente.

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>Emisión (gramos)</b>
3355	25.7
3356	0.0
3357	0.0
3358	0.0
3359	0.0
3360	0.0
3361	0.0
3362	0.0
3363	11.1
3364	0.0
3365	0.0
3366	0.0
3367	0.0
3368	0.0
3369	0.0
3370	0.0
3371	0.0
3372	4.5
TOTAL	41.3

*Tabla A1. Emisión estimada por la descarga de camión de 24 toneladas cargado con pellets de alfalfa suponiendo emisiones de cada segundo.*

Este mismo proceso se ha repetido pero asumiendo que se emite una nube de contaminante cada 6 segundos en sincronía con el intervalo de muestreo de los monitores GRIMM. En este caso, se supusieron 4 nubes emitidas entre los segundos 3354 y 3372. Los resultados obtenidos fueron los expuestos en la tabla A2.

Tiempo (segundos)	Emisión (gramos)
3354	17.8
3360	14.6
3366	10.2
3372	0
TOTAL	42.6

Tabla A2. Emisión estimada por la descarga de camión de 24 toneladas cargado con pellets de alfalfa suponiendo emisiones de cada 6 segundos.

Puede apreciarse que los resultados son muy parecidos a los mostrados en la tabla 9, especialmente en el total de emisión donde difieren en apenas un 2.5%. Aplicando la expresión 77, con la velocidad de viento existente (3.4 m/s) y suponiendo un material casi seco (2% de humedad), obtenemos para un camión de 24 toneladas una emisión de 23.7 gramos, que aunque es un valor bastante inferior, es del mismo orden de magnitud del estimado con nuestra metodología.

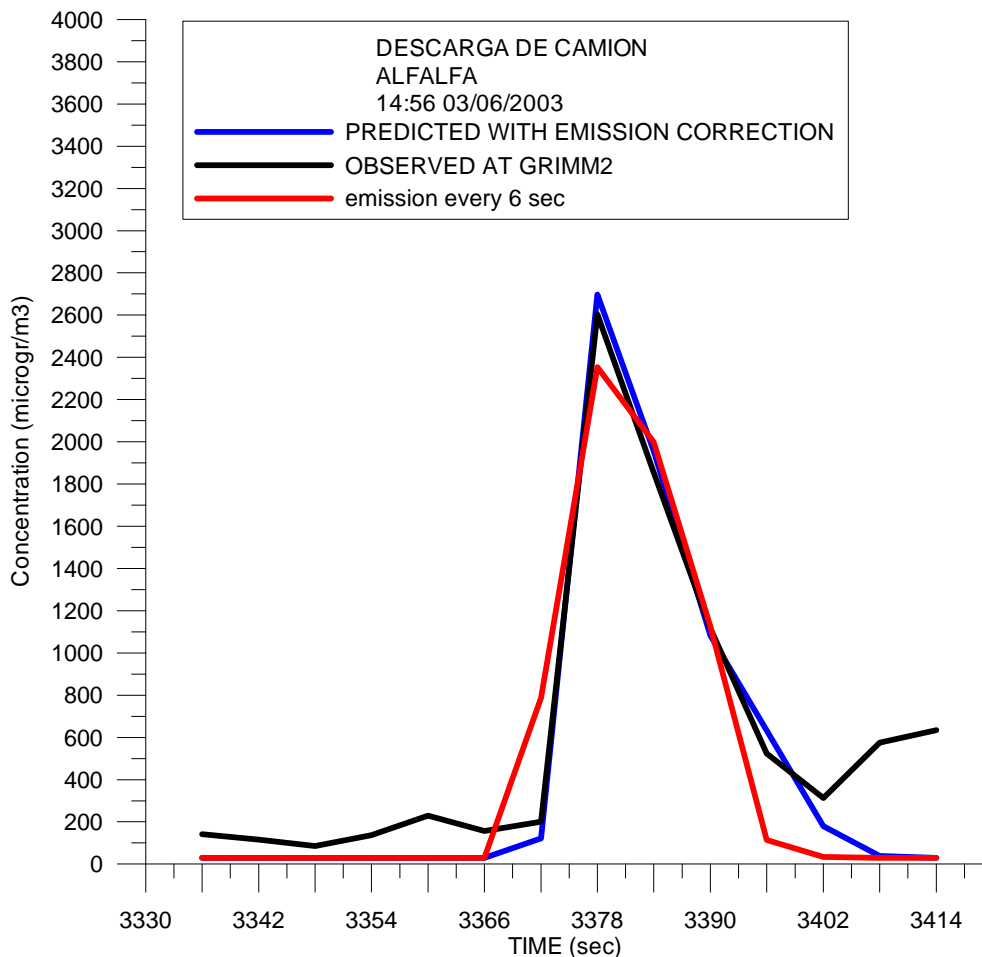


Figura A5. Concentraciones de PM10 observadas y predichas en el caso de emisiones estimadas cada segundo y cada 6 segundos para una descarga de un camión con pellets de alfalfa.

En la figura A5, se muestra la comparación de la concentración de PM10 observada con las estimadas utilizando las emisiones expuestas en las tablas 9 y 10. El ajuste es muy bueno en el caso de emisiones cada segundo y razonablemente bueno en el caso de emisiones cada 6 segundos. Esto muestra que la metodología puede ser muy adecuada para la estimación de tasas y factores de emisión.

Los resultados para emisiones cada segundo muestran períodos de emisión cero entre otros con emisión significativa. En un proceso de emisión como la descarga de un camión, es de esperar cierta continuidad durante el intervalo de operación. Este resultado puede ser debido a que la resolución temporal de los GRIMM es 6 segundos frente a la pretendida resolución temporal de las emisiones estimadas. Creemos, por tanto, que es más conveniente suponer emisiones con el mismo período que el de muestreo de los GRIMM.

Con esto queda expuesta la metodología que se ha aplicado para la estimación de tasas y factores de emisión asociadas a las operaciones portuarias que fueron objeto de las campañas experimentales realizadas en Junio de 2003 en el Puerto de Tarragona. Estas, como indican los informes (CIEMAT-CSIC, 2003 y 2004) cubren un número notable de operaciones y materiales pero todavía quedan bastante por tratar.

Un aspecto importante de la metodología expuesta es la estimación de la incertidumbre. Las fuentes de error que podemos esperar pueden derivarse de las incertidumbres en las mediciones de los monitores GRIMM y de las variables meteorológicas (especialmente velocidad y dirección de viento), de las simplificaciones utilizadas para el tratamiento de la dispersión de contaminantes, de ciertos parámetros relativos a altura efectiva y tamaño iniciales de cada nube de contaminante (aunque aquí han servido de notable apoyo las fotografías y videos realizados durante las campañas). Para estimar las incertidumbres asociadas a los datos de entrada meteorológicos y otros datos iniciales, se aplica el procedimiento expuesto suponiendo pequeñas variaciones en esos datos y analizar los resultados obtenidos. Por otro lado, la forma en que se realiza cada operación puede variar de un momento a otro y resultar que en operaciones similares con un mismo material tengas emisiones muy distintas. Es conveniente, por tanto, cubrir el mayor número de casos posibles para cada tipo de operación con objeto de obtener de la aplicación de esta metodología una estadística de valores promedio y márgenes de error.