



Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Puertos del Estado

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

Modelos de dispersión y depósito de
partículas atmosféricas
PORTPUFF y SEDPORT

Realizado por

Fernando Martín e Inmaculada Palomino

Unidad de Contaminación Atmosférica
Departamento de Medio Ambiente
CIEMAT

Diciembre de 2004

INDICE

INTRODUCCION	1
DISEÑO DEL SISTEMA INFORMÁTICO	2
DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DEL MODELO PORTPUFF	11
Modelo de dispersión PORTPUFF	12
Simulaciones con el modelo PORTPUFF para el Puerto de A Coruña	24
Adaptación del modelo CALMET	34
Preparación de datos de predicción meteorológica	42
Preparación de datos adicionales	43
DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DEL MÓDULO SEDPORT	52
RESUMEN Y CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	71
AGRADECIMIENTOS	75

INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene por objeto describir los distintos aspectos del sistema de modelos desarrollado para el control y predicción de la contaminación por partículas atmosféricas en entornos portuarios, así como, la descripción misma de los modelos desarrollados y adaptados al efecto. Estos trabajos han sido realizados por los investigadores del Grupo de Modelización de la Contaminación Atmosférica que actualmente depende de la Unidad de Contaminación atmosférica del Departamento de Medio Ambiente del Centro de Investigaciones, Energéticas, MedioAmbientales y Tecnológicas (CIEMAT) en el marco del proyecto HADA (Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental – LIFE2 ENV/E/000274) coordinado por el Ente Público Puertos de Estado (EPPE) y en el que participan diversas autoridades portuarias españolas (A Coruña, Barcelona, Cartagena, Huelva, Tarragona, Valencia, Bilbao y Santander) y al que contribuyen diversas empresas e instituciones entre ellas CIEMAT.

Los trabajos en este proyecto comenzaron en Octubre de 2002. No obstante, antes de la aprobación del proyecto HADA, se gestionó y firmó un acuerdo de colaboración entre EPPE, Autoridad Portuaria de A Coruña (APAC), Universidad de Santiago de Compostela (USC) y CIEMAT, estando, sin embargo, sus actividades integradas en el proyecto HADA.

Los antecedentes de la participación de nuestro grupo investigador en este proyecto remontan a los años 2000 y 2001, cuando se desarrolló un proyecto para la Autoridad Portuaria de Valencia en colaboración con la empresa Soltek y coordinado por el EPPE.

En la primera fase de dicho proyecto, se realizaron simulaciones de la dispersión de PM10 con el modelo MELPUFF (MEsoscale Lagrangian PUFF model) (Palomino et al, 2001) para un conjunto de 38 escenarios meteorológicos que cubren la práctica totalidad de condiciones atmosféricas esperadas a lo largo de las cuatros estaciones del año. Previo a las simulaciones con MELPUFF, se simularon las circulaciones atmosféricas asociadas a dichos escenarios mediante un modelo meteorológico a mesoscala llamado TVM (Topographic Vorticity-mode Model) (Thunis y Clappier, 2000 y Martín et al, 2001). Del análisis de las simulaciones con ambos modelos, se concluyó que los escenarios de mayor impacto en zonas urbanas están relacionados con flujos del Este y con circulaciones de brisas marinas diurnas.

En la segunda fase del proyecto, se desarrolló un sistema informático para predecir las concentraciones de PM10 con el modelo MELPUFF, que puede trabajar en tiempo real, pero también puede abordar casos pasados y casos hipotéticos. Tanto en tiempo real como en los casos de eventos pasados, el sistema utiliza la información meteorológica de estaciones instaladas en el mismo puerto. En el caso de eventos hipotéticos, el sistema utiliza una base de datos de campos meteorológicos estimados con TVM. Entre los otros resultados, el sistema produce mapas de concentración de PM10 y campos de vientos (Crespí et al., 2001).

DISEÑO DEL SISTEMA INFORMÁTICO

El diseño del sistema informático de seguimiento, control y predicción de la contaminación atmosférica por partículas en suspensión se ha realizado teniendo en cuenta las peculiaridades de cada puerto, aunque manteniéndose en un esquema general común. Se ha contado también con la experiencia adquirida en el desarrollo e implantación del sistema informático desarrollado en los años 2000 y 2001 para el Puerto de Valencia, sirviendo éste como prototipo de partida para el nuevo sistema.

El esquema conceptual del sistema informático para el control y predicción de la contaminación atmosférica por partículas a implantar en diferentes puertos españoles tendrá que cubrir todas las posibles situaciones en las que sea necesario disponer de información sobre calidad del aire asociada a las operaciones portuarias de graneles sólidos. Este sistema está apoyado en una batería de modelos meteorológicos, de dispersión, depósito y de emisiones de contaminantes (ver Figura 1) (Martín y Palomino, 2004a, Palomino y Martín, 2004, Martín et al., 2005a).

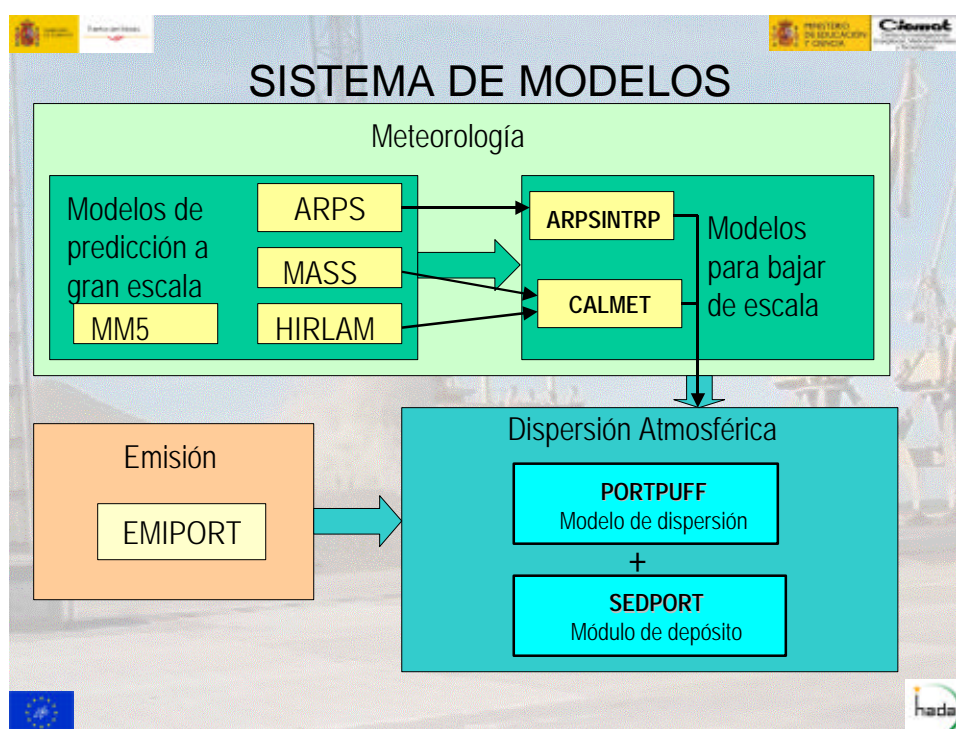


Figura 1. Esquema del sistema de modelos considerados para el desarrollo de la herramienta informática para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

En la Figura 2, se muestra el esquema conceptual diseñado. Se dispone de predicciones meteorológicas a 24 o 48 horas a escala sinóptica, constituidas por campos meteorológicos en una malla tridimensional de diversas variables meteorológicas (velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa) y en superficie (cobertura de nubes, altura de las nubes bajas, presión, tasa de precipitación). Está predicción está siendo proporcionada por la Universidad de Santiago de Compostela con el modelo ARPS (Souto et al., 2003) para el Puerto de A Coruña, por la Universidad de Barcelona mediante el modelo MASS (Zack and Kaplan, 1987) para los puertos de Barcelona y Tarragona, y por el Instituto Nacional de Meteorología mediante

el modelo HIRLAM (Undén et al., 2002) para los puertos de Valencia, Cartagena, Huelva y Santander. La predicción meteorológica para el puerto de Bilbao se hace mediante el modelo MM5 (Dudhia et al., 2001).

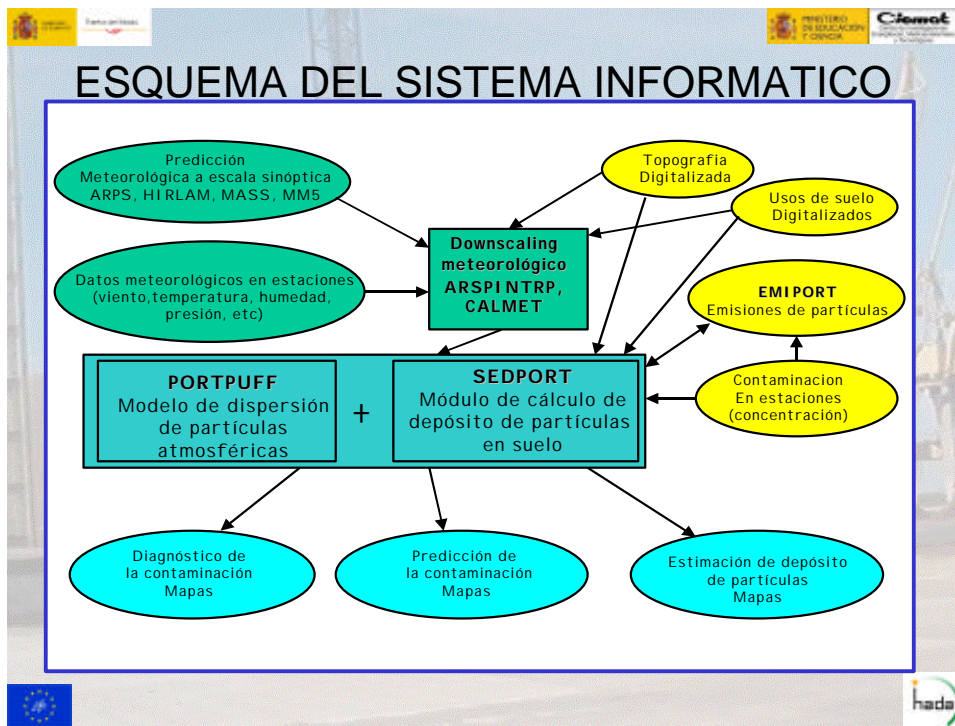
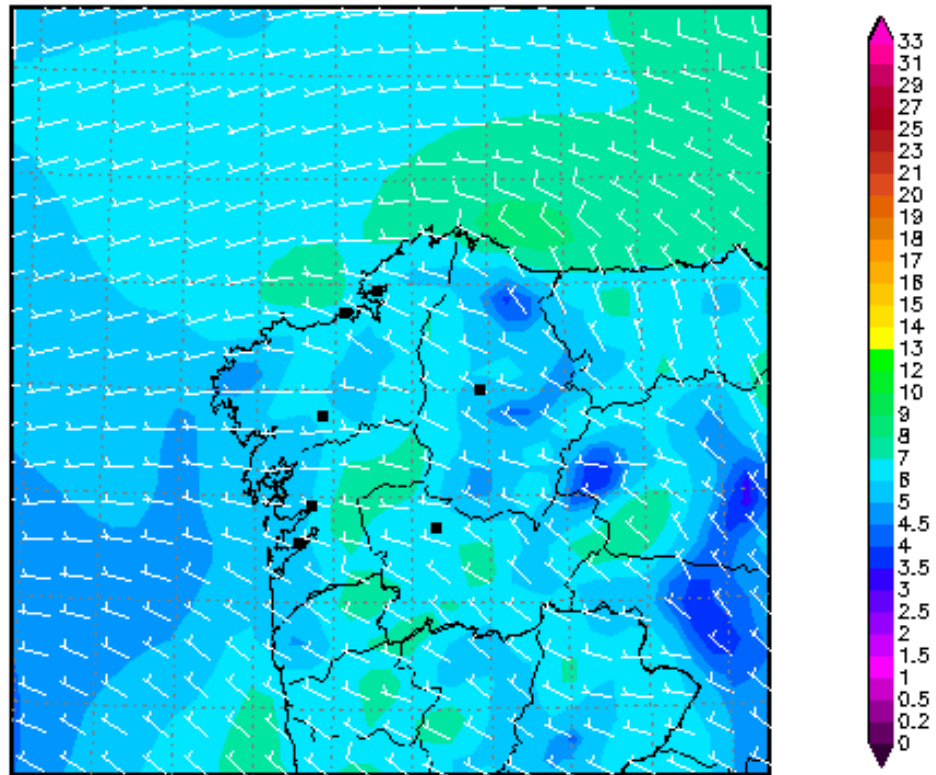


Figura 2. Esquema conceptual de los diversos elementos del Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

Las predicciones obtenidas con estos modelos corresponden a mallas de cálculo cuya resolución espacial oscila entre 100 y 200 Km² (ver Figura 3). Esta resolución resulta demasiado burda para poder ser utilizada de forma eficiente y fiable por el modelo de dispersión. Por este motivo, se hace necesario realizar una predicción de mayor resolución espacial a partir de las predicciones a escala sinóptica. Esto es lo que se conoce como downscaling meteorológico. Para este proceso de downscaling, se suelen utilizar modelos de diagnóstico meteorológico que alimentados con los campos meteorológicos predichos a escala sinóptica permiten realizar un zoom, obteniendo campos meteorológicos en área más restringida pero con más detalle teniendo en cuenta las características particulares del orografía y el tipo de uso del terreno.

Vento na Superficie (m/s) 16Z14AUG2003



GFNL - USC

Consellería de Medio Ambiente - Xunta de Galicia

Figura 3. Ejemplo de predicción de campos de viento generado por el modelo ARPS – Universidad de Santiago de Compostela para Galicia y resto del Noroeste de la Península Ibérica (430x430 Km² con resolución de 10x10 Km²).

La Universidad de Santiago de Compostela ha trabajado también en la puesta a punto de forma operativa de un módulo llamado ARPSINTPR, que entronca directamente con las predicciones meteorológicas del modelo ARPS. Con este procedimiento, se obtienen campos de diversas variables meteorológicas (ver siguientes secciones) en un área de 60x60 Km² en torno al Puerto de A Coruña (Figura 4).

Vento na Superficie (m/s) 16Z14AUG2003

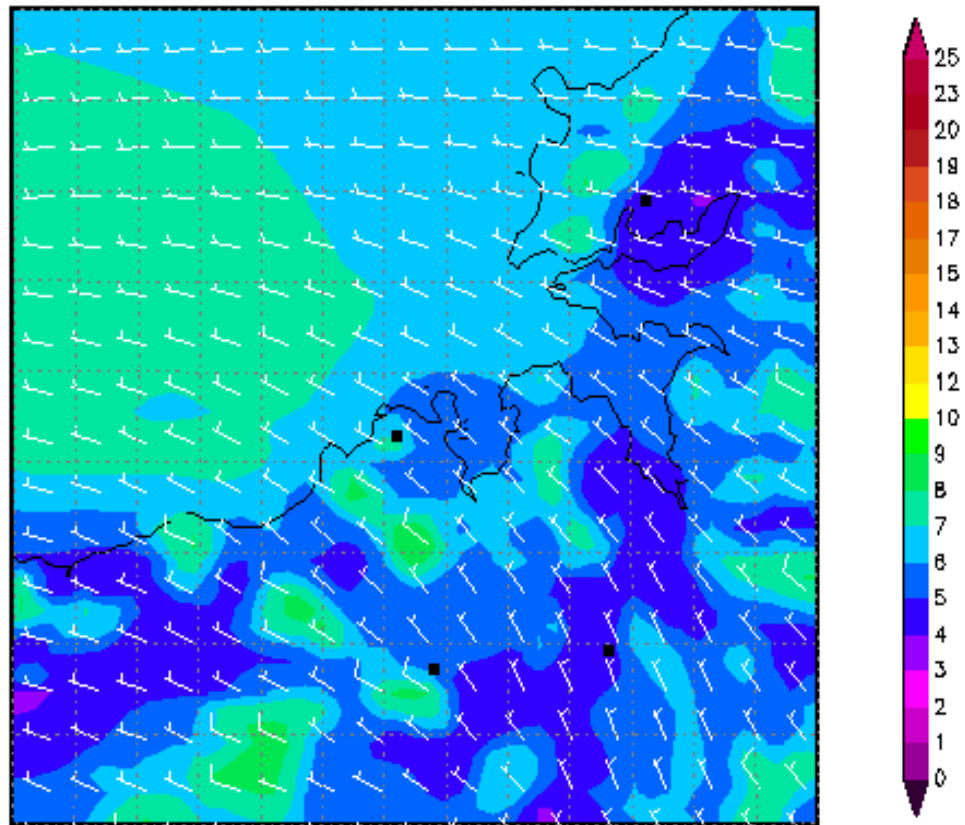


Figura 4. Ejemplo de downscaling realizado con ARSPINTRP (dominio de 60x60 Km² centrado en el Puerto de A Coruña) aplicado a la predicción de campos de viento generado por el modelo ARPS – Universidad de Santiago de Compostela para Galicia y resto del Noroeste de la Península Ibérica (ver Figura 2).

Para los demás puertos implicados, el proceso de downscaling se realiza con el modelo de diagnóstico meteorológico CALMET (Scire et al., 1990 y 1999). La aplicación de este modelo permite obtener campos de diversas variables meteorológicas en un área de 60x60 Km² alrededor de cada puerto. En secciones posteriores, se expone con cierto detalle las características de este modelo y la información que proporciona.

Estos modelos de diagnóstico precisan de información detallada de la topografía del terreno y de los tipos de uso de suelo en cada celda de la malla de cálculo.

Los modelos de diagnóstico meteorológico se están utilizando también para obtener campos meteorológicos a partir de los datos proporcionados en tiempo real por las estaciones meteorológicas instaladas en cada uno de los puertos implicados. Estos campos sirven de diagnóstico en tiempo real de las condiciones atmosféricas en cada puerto. Es decir, la aplicación del downscaling a las predicciones meteorológicas a 24-48 horas a escala sinóptica proporcionará predicciones más finas en esa misma base de tiempo y la aplicación de modelos de diagnóstico a las mediciones de las estaciones

dará lugar a estimaciones más precisas del estado presente en cada instante de tiempo. Las primeras servirán para obtener predicciones de la dispersión de contaminantes a uno o dos días y las segundas, para tener un diagnóstico del estado de la contaminación en tiempo real.

La estimación de la dispersión de contaminantes se realiza mediante el modelo PORTPUFF, que lleva incorporado un nuevo módulo de cálculo del depósito de partículas en suspensión (SEDPORT), aplicado a una malla de cálculo de 60x60 Km². El modelo de dispersión necesita de las emisiones debidas a las actividades portuarias estimadas mediante un modelo de emisiones EMIPORT desarrollado para este sistema (Martín y Palomino, 2004 y Martín et al., 2005b), la concentración de partículas en los monitores instalados en cada puerto, la topografía digitalizada y los usos de suelo. PORTPUFF está diseñado para ofrecer mapas de concentración y depósito de distintos rangos de tamaños de partículas con una resolución del orden de 200x200 m² en un dominio de unos 10x10 Km² cubriendo cada puerto (ver Figuras 1 y 2).

En cuanto al modo de funcionamiento, se han planteado cuatro posibles tipos de escenarios para ofrecer resultados en tiempo real, predicciones con un día de antelación (24-48 h), análisis a tiempo pasado y análisis de escenarios hipotéticos diseñados por el propio usuario del sistema informático. Cada uno de estos escenarios requiere la definición de una interfase entre el modelo de dispersión y el sistema informático que permita la preparación de los datos de entrada, la ejecución del modelo, el tratamiento de las tasas de emisión y la presentación de resultados gráficos que cada simulación requiera.

A continuación se exponen las características básicas y distintas posibilidades de aplicación de cada uno de ellos, tal como han sido consideradas.

A) Escenario en tiempo real

Este escenario tiene por objetivo el proporcionar los niveles de contaminación y depósito de partículas asociados a operaciones portuarias que se estén realizando en tiempo real utilizando únicamente como datos de entrada las medidas meteorológicas y de contaminación disponibles en tiempo real en las estaciones de los puertos (Figura 3).

Se ejecutan los modelos de diagnóstico meteorológico pertinentes (ARPSINTPR o CALMET) con datos meteorológicos de estaciones en un periodo que cubre las dos horas anteriores al instante de ejecución y no más de una o dos horas hacia delante. Posteriormente, se realiza la ejecución del modelo de dispersión PORTPUFF alimentado con información generada por los modelos meteorológicos, emisiones, topografía y usos de suelo, para obtener finalmente las concentraciones de partículas en aire y la cantidad depositada en suelo en los entornos portuarios, asociada a las operaciones de carga, descarga, almacenamiento y transporte de graneles sólidos (Figura 5).

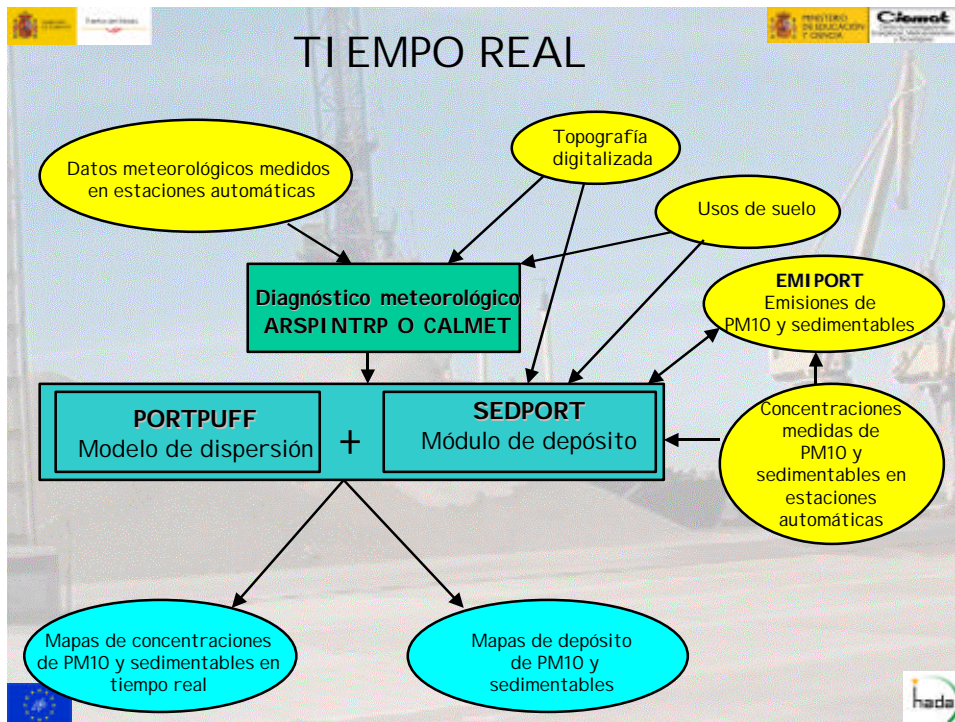


Figura 5. Esquema conceptual del Modo de Funcionamiento en Tiempo Real del Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

B) Escenario para predicción

El resultado de la aplicación de este escenario es la obtención de una predicción meteorológica, de inmisión y depósito de partículas, con al menos 24 h de antelación (resultante de aplicar el downscaling a las predicciones de los modelos meteorológicos a escala sinóptica), sobre el área de influencia de los puertos, basada en:

- La estimación de emisiones asociadas a las operaciones portuarias previstas para el día siguiente, mediante un modelo de emisiones.
- La predicción de los parámetros meteorológicos que condicionan la dispersión de dichas emisiones (y que también influyen en ellas), mediante un modelo predictivo y de asimilación de datos meteorológicos.

Con esta información el modelo de dispersión PORTPUFF permite estimar, a lo largo de todo el día siguiente, las concentraciones de partículas en aire y la cantidad depositada en suelo en los entornos portuarios.

Además, es posible evaluar la influencia de cada operación portuaria de forma individual, o combinada con cada una de las previstas, mediante ejecuciones sucesivas del modelo de dispersión con distintas estimaciones de emisiones, aplicando la misma predicción meteorológica. De esta forma, las autoridades portuarias podrán planificar con antelación las operaciones a realizar, que garanticen la no superación de los niveles de inmisión y depósito exigidos (Figura 6).

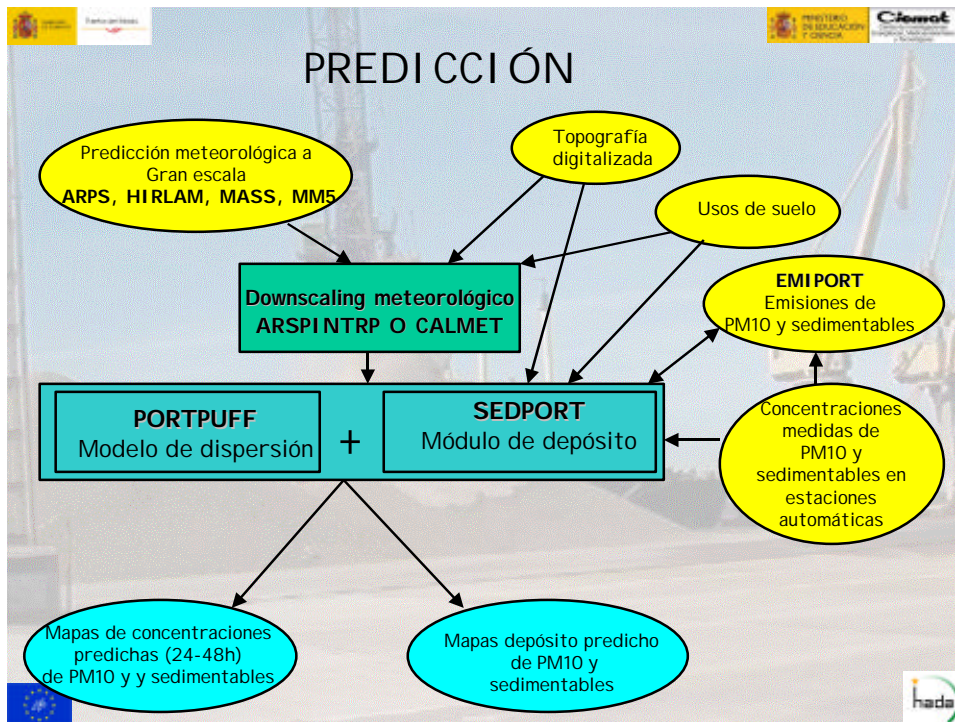


Figura 6. Esquema conceptual del Modo de Funcionamiento de Predicción del Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

C) Escenario en tiempo pasado

El objetivo de este escenario es proporcionar los niveles de concentración y depósito de partículas alcanzados como consecuencia de las operaciones portuarias realizadas en días anteriores (Figura 7). La ejecución de este escenario puede realizarse considerando también las mismas alternativas que en el escenario anterior, es decir:

- Utilizando como datos de entrada la información meteorológica y de contaminación recogida por las estaciones de los puertos y almacenada en una base de datos.
- Utilizando las predicciones de 24-48 h del modelo meteorológico ya elaboradas en ejecuciones previas, y los datos de las estaciones de contaminación de los puertos como datos de entrada que también hayan sido almacenados.



Figura 7. Esquema conceptual del Modo de Funcionamiento en Tiempo Pasado del Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

D) Escenario hipotético

El escenario hipotético pretende ofrecer una predicción de los niveles de concentración y depósito de partículas en escenarios diseñados por el usuario del sistema informático. En este caso, el modelo de dispersión PORTPUFF se alimenta con las predicciones realizadas por el modelo meteorológico para escenarios meteorológicos concretos.

De acuerdo con estos escenarios, el sistema informático está alimentado por predicciones meteorológicas, las cuales servirán para proporcionar una predicción de la distribución espacial de concentraciones de partículas y su evolución a lo largo del día partiendo del conocimiento de las operaciones portuarias previstas y existencia de focos emisores (Figura 8).

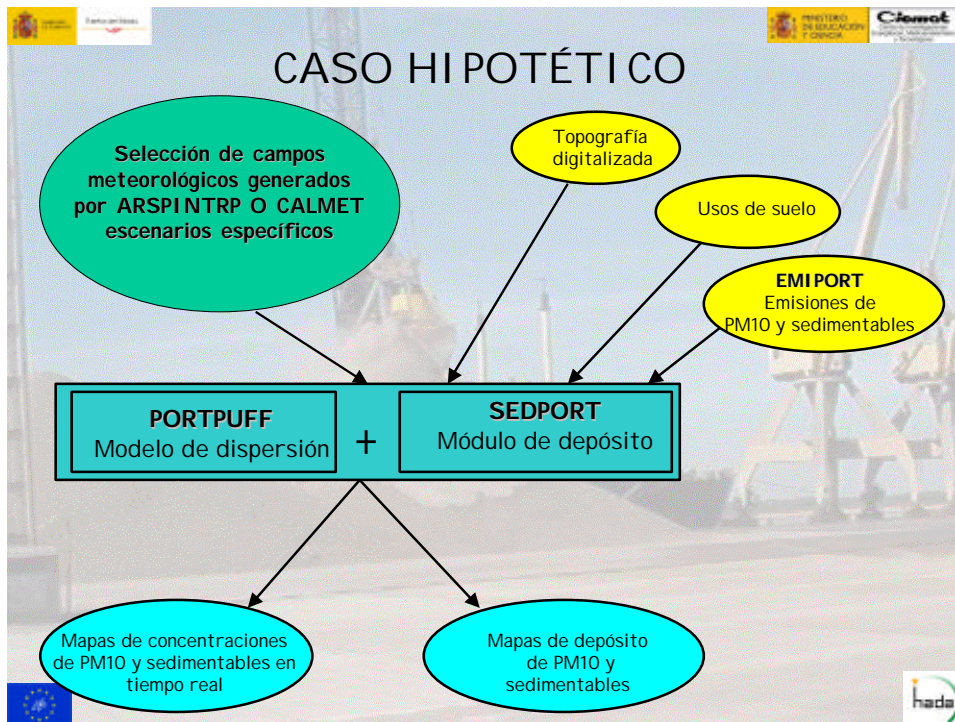


Figura 8. Esquema conceptual del Modo de Funcionamiento de Caso Hipotético del Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DEL MODELO PORTPUFF

El modelo de dispersión desarrollado para su implantación en el Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos ha sido bautizado como PORTPUFF. Este modelo está alimentado por los datos meteorológicos de alta resolución generados por el modelo de diagnóstico meteorológico ARPSINTPR (Universidad de Santiago de Compostela) en el caso del Puerto de A Coruña y por el modelo CALMET en los demás casos. Además, recibe información de las emisiones debidas a operaciones portuarias generadas por el modelo de emisiones EMIPORT, y además, procesa datos digitalizados de topografía y usos de suelo.

En el modelo PORTPUFF se ha integrado el módulo de estimación del depósito de partículas SEDPORT desarrollado en este estudio. Debido a que SEDPORT hace un tratamiento diferenciado del depósito de partículas según su tamaño, se ha optado por considerar 5 rangos de tamaños de partículas:

1. $0.3 < \text{diámetro aerodinámico} < 1.0$ micras
2. $1.0 < \text{diámetro aerodinámico} < 2.5$ micras
3. $2.5 < \text{diámetro aerodinámico} < 10.0$ micras
4. $10.0 < \text{diámetro aerodinámico} < 20.0$ micras
5. $20.0 < \text{diámetro aerodinámico}$

Teniendo en cuenta que la legislación vigente en materia de calidad del aire (Real Decreto 1073/2002, BOE nº 260, 30 Octubre de 2002) está referida a partículas de diámetro inferior a 10 micras (PM10) y al interés de las autoridades portuarias por el material sedimentable, los resultados de PORTPUFF consistirán en concentración y depósito de partículas PM10 y sedimentables (de diámetro superior a 10 micras).

A continuación, se explican los aspectos teóricos más relevantes de los modelos PORTPUFF y CALMET.

Modelo de dispersión PORTPUFF

El modelo PORTPUFF es una versión del modelo de dispersión MELPUFF (Martín et al., 1999, Palomino y Martín, 2001, Martín et al, 2002a y Martín et al. 2002b) adaptado a la problemática de la dispersión de partículas atmosféricas en entornos portuarios. MELPUFF (Mesoscale Lagrangian Puff dispersion model) surgió al realizar profundas modificaciones en el modelo MESOI V 2.0 (Ramsdell et al., 1983).

Los cambios realizados fueron muy diversos: desde modificaciones de su estructura para poder ser ejecutado en un PC de una manera automática hasta variaciones en los resultados pasando por la eliminación de algunas de sus limitaciones inherentes sobre resolución espacial de los resultados, amplitud del dominio de aplicación, número máximo de fuentes (hasta un número indefinido únicamente limitado por la memoria del ordenador sobre el cual se ejecuta) o eliminación de alguna de sus antiguas prestaciones tales como el cálculo de la desintegración radiactiva de los contaminantes y su posterior conversión en otros elementos secundarios. Por otra parte se han incorporado nuevas parametrizaciones del depósito de contaminantes (modelo de resistencias para gases o un modelo especial para depósito de partículas). Además, se puede usar fuentes emisoras de contaminantes variables en el tiempo (variando en escalas de tiempo que van desde segundos a varios minutos) y se ha mejorado la resolución espacial para el cálculo (que ha permitido un mejor tratamiento de la dispersión y transporte de contaminantes recién emitidos cuando la nube de contaminante es pequeña). Otras características nuevas del modelo PORTPUFF son que puede trabajar con campos meteorológicos tridimensionales generados por modelos de diagnóstico CALMET y ARPSINTPR (utilizados en este proyecto) y pronóstico (TVM) a mesoscala, que tiene en cuenta los efectos de escala de edificios en la dispersión de contaminantes y que trabaja con mallas anidadas: una grande para el cálculo de la dispersión de contaminantes y otra pequeña para proporcionar distribuciones espaciales de contaminantes con alta resolución.

PORTPUFF es un modelo lagrangiano de “puffs” gaussianos (Figura 9) que sirve para estimar el transporte, difusión y depósito seco y húmedo de contaminantes emitidos a la atmósfera. Utiliza coordenadas cartesianas definidas por las mallas de trabajo y en la vertical utiliza alturas en metros sobre el nivel del suelo.

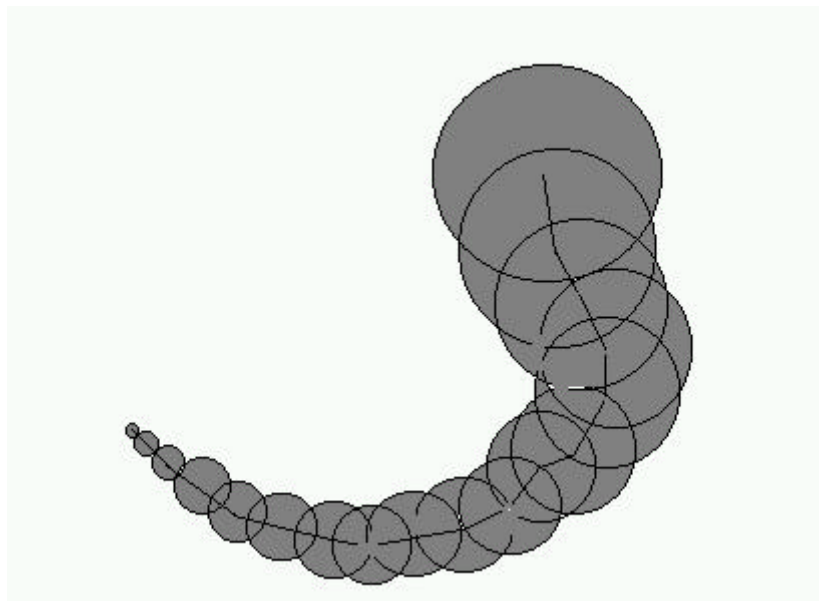


Figura 9. Aproximación de un penacho de contaminante mediante un conjunto de nubes o “puffs” de contaminante.

En la versión utilizada en este estudio, PORTPUFF asume que cada minuto se emite una nube de contaminante desde cada fuente emisora. En el caso de chimeneas, el tamaño inicial de la nube viene determinado por el caudal de gas y la concentración en boca de chimenea, es decir, por el volumen de contaminante que se emite en ese período. En el caso de fuentes difusas el tamaño inicial vendrá determinado por SEDPORT. Se asume que el contaminante se distribuye según una función gaussiana dentro de cada nube, las cuales tienen una forma circular en la horizontal y elipsoidal en la vertical. Cada nube se transporta sin deformarse según el viento en su centro siguiendo un camino marcado por el viento tridimensional en cada punto de su trayectoria, con limitaciones en las proximidades del suelo, crece de tamaño (difusión vertical y horizontal) en virtud de la clase estabilidad y elimina contaminante por depósito seco y húmedo (lavado por la lluvia, nieve o granizo).

Los datos meteorológicos de entrada a PORTPUFF pueden ser introducidos incluso cada minuto, aunque en esta versión se utilizarán el tiempo de promedio empleado por la estación o estaciones meteorológicas situadas en cada puerto que es de 10 minutos .

Para la difusión del contaminante se considera que la altura de la capa de mezcla es variable tanto en el espacio como en el tiempo. Para tener en cuenta que la distribución del contaminante se vea afectado por la presencia del terreno o el límite superior de la capa de mezcla y de esta forma considerar las posibles acumulaciones de contaminante por estas circunstancias, se utiliza una aproximación de superficies reflectoras y fuentes virtuales (Figura 10).

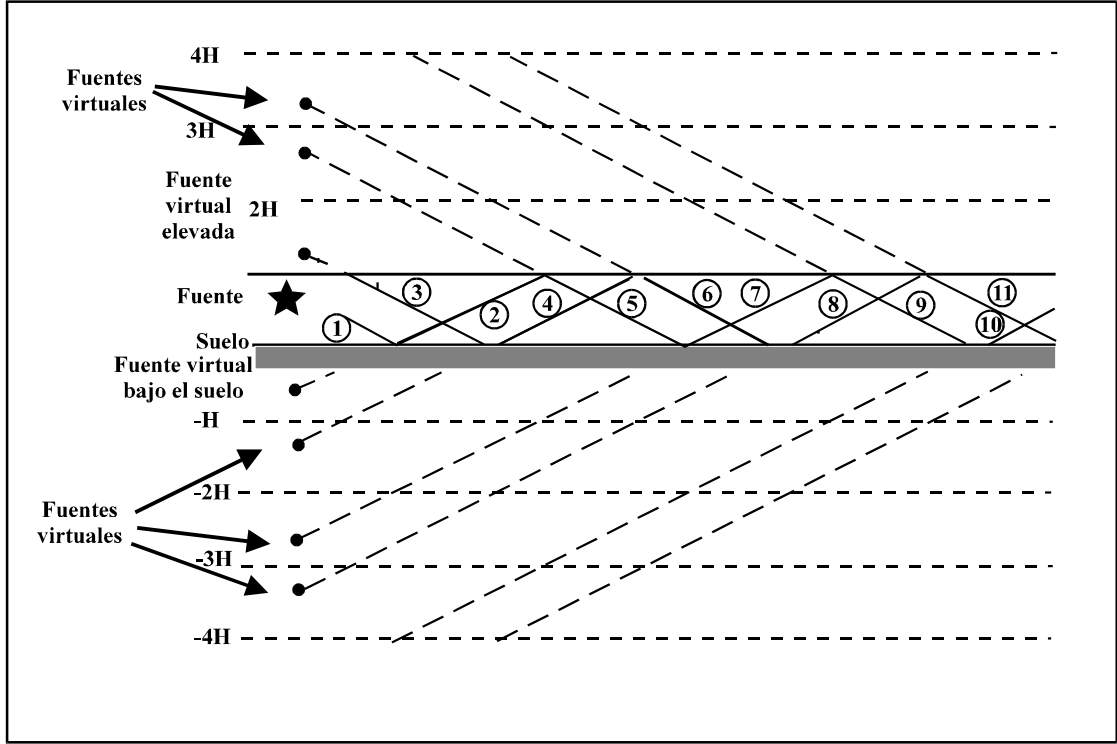


Figura 10. Representación gráfica del concepto de reflexiones y fuentes virtuales de contaminante.

PORTPUFF asume que el contaminante es reflejado por la superficie del suelo a menos que sea explícitamente depositado y por el límite superior de la capa de mezcla. Estas reflexiones vienen representadas por la emisión de fuentes virtuales. Considerando que:

$$C(x, y, z, t) = C_m(t) F(x, y, t) G(z, t) \quad (1)$$

donde C es la concentración de contaminante en el punto (x, y, z) en el instante t ,

$$C_m(t) = \frac{Q(t)}{(2p)^{3/2} \mathbf{s}_{xy}^2(t) \mathbf{s}_z(t)} \quad (2)$$

$Q(t)$ es la cantidad de contaminante en la nube y $\mathbf{s}_{xy(t)}$ y $\mathbf{s}_z(t)$ son los coeficientes de difusión turbulenta,

$$F(x, y, t) = \exp\left(-\frac{(x - x_0(t))^2 + (y - y_0(t))^2}{2\mathbf{s}_{xy}^2(t)}\right) \quad (3)$$

Matemáticamente, el concepto de reflexiones y fuentes virtuales se expresa de la siguiente manera:

$$G(z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(2nH(t) - h_e(t) - z)^2}{2\mathbf{s}_z^2(t)}\right) + \exp\left(-\frac{(2nH(t) + h_e(t) - z)^2}{2\mathbf{s}_z^2(t)}\right) \right] \quad (4)$$

donde $x_0(t)$, $y_0(t)$ y $h_e(t)$ son las coordenadas del centro de la nube. En $G(z,t)$ están incluidos los efectos de n reflexiones de la nube de contaminante con la superficie terrestre y la capa de inversión térmica situada a una altura $H(t)$ (entre ambas superficies queda comprendida la capa de mezcla). Considerando la concentración a nivel del suelo $z=0$, y considerando una sola reflexión en el suelo y en la inversión térmica ($n=-1,0,1$) tendremos,

$$G(0,t) = 2 \sum_{n=-1}^1 \left[\exp \left(- \frac{(2nH(t) - h_e(t))^2}{2s_z^2(t)} \right) \right] \quad (5)$$

En el caso que s_z sea muy grande ($\geq 0.8 H$) siendo H la altura de la capa de mezcla la distribución vertical se aproxima a la uniformidad. PORTPUFF en ese caso no calcula reflexiones y asume que el contaminante se distribuye según:

$$C(x,y,t) = \frac{Q}{2ps_{xy}^2 1.25s_z} \exp \left(- \frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2s_{xy}^2(t)} \right) \quad (6)$$

siendo el perfil vertical uniforme.

Los coeficientes de difusión turbulenta se calculan de dos formas distintas en función de que se dispongan o no de los datos meteorológicos tridimensionales de los modelos TVM y CALMET.

1) Cálculo de los coeficientes de difusión sin campos 3-D de turbulencia

Los coeficientes de difusión son estimados por PORTPUFF como función de la clase de estabilidad y de la distancia desde el punto en que fue emitida la nube de contaminante. Aunque PORTPUFF puede utilizar un gran número de parametrizaciones para el cálculo de los coeficientes de difusión tales como Briggs-Open Country, NRC, US-Army, etc. Considerando la parametrización Desert de Start y Wendell (1974), los coeficientes de difusión horizontal se estiman por:

$$\begin{aligned} s_{xy} &= A_y x^{0.85} & x \leq 20 \text{ Km} \\ &= A'_y x^{0.5} & x > 20 \text{ Km} \end{aligned} \quad (7)$$

donde x es la distancia desde el centro de la nube al punto de emisión y los coeficientes A_y y A'_y son función de la clase de estabilidad.

Los coeficientes de difusión vertical son evaluados mediante:

$$\begin{aligned} s_z &= A_z x^B & (s_z / H) \leq 0.465 \\ &= \left(0.465 + 0.335 \left(\frac{x-x_c}{x_c} \right) \right) H & 0.465 < (s_z / H) \leq 0.8 \\ &= 0.8H & (s_z / H) > 0.8 \end{aligned} \quad (8)$$

donde A_z y B son función de la clase de estabilidad, H es el espesor de la capa de mezcla y x_c es la distancia a la que $s_z = 0.465 H$. Los valores de esos parámetros se dan en la siguiente tabla:

CLASE DE ESTABILIDAD	A_y	A'_y	A_z	B
A	0.718	23.0	0.100	1.033
B	0.425	13.6	0.105	0.975
C	0.349	11.2	0.128	0.891
D	0.267	8.55	0.146	0.824
E	0.299	9.57	0.331	0.567
F	0.401	12.8	0.812	0.307
G	0.401	12.8	0.812	0.307

Tabla 1. Valores de los parámetros para los coeficientes de difusión Desert.

Los coeficientes de difusión son implícitamente función del tiempo, ya que la distancia está ligada al tiempo de viaje x de la nube de contaminante. Esto también es función de los cambios en la clase de estabilidad. En ese caso, si utilizamos directamente la parametrización nos encontraríamos con saltos bruscos en los coeficientes de difusión y, por tanto, en los tamaños de las nubes. Para evitar esa circunstancia lo que hace PORTPUFF en un cambio de clase de estabilidad es estimar que longitud de viaje x' le correspondería al tamaño actual de la nube de contaminante, es decir, calcula distancias virtuales a fuentes ficticias y considerar esa distancia x' en lugar de la anterior x al cambio de la clase de estabilidad. De esta forma se evitan saltos bruscos en los coeficientes de difusión.

2) Cálculo de los coeficientes de difusión con campos 3-D de turbulencia

A partir de la teoría de dispersión de una bocanada, cuyas ecuaciones principales utilizadas para el cálculo de los coeficientes σ_y y σ_z son (Hanna et al., 1982):

$$s_y = s_v t f_y \quad (9)$$

y

$$s_z = s_w t f_z \quad (10)$$

donde la escala de tiempo lagrangiana, t_l , se ha considerado del orden de la escala de tiempo utilizada ($t_l \gg t$).

$t = t_0 + \Delta t$,

t_0 = tiempo inicial

Δt = incremento),

f_y y f_z = son funciones a su vez del tiempo, recomendadas por Irwin (1983) a partir de las parametrizaciones de Draxler (1976):

$$f_y = 1.0 / (1.0 + 0.9 \text{sqrt}(T_y t)) \quad (11)$$

$$f_z = 1.0 / (1.0 + 0.9 \text{sqrt}(T_{z1} t)), \text{ para } L \leq 0 \quad (12)$$

$$f_z = 1.0 / (1.0 + 0.945 (T_{z2} t)^{0.806}), \text{ para } L > 0 \quad (13)$$

siendo T_y una constante de la escala de tiempo recíproca (1/s) para f_y ($T_y = 0.001$), y T_{z1} (para $L \leq 0$) y T_{z2} (para $L > 0$), lo mismo para f_z ($T_{z1} = 0.002$ y $T_{z2} = 0.01$).

Los valores de s_v y s_w se calculan según las parametrizaciones de Briggs (1985), en función de la capa atmosférica considerada: capa neutral-estable (para $L > 0$) y capa neutral-inestable (para $L = 0$), subdividida a su vez en 3 capas (según la relación de z/H): superficial ($z/H < 0.1$), de mezcla ($0.1 = z/H < 0.8$) y “entrainment” ($0.8 = z/H = 1.2$):

- Capa neutral-inestable:

$$s_v = [4 u^{*2} a_n^2 + 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (14)$$

$$a_n = \exp [-0.9 (z/H)] \quad (15)$$

- a) capa superficial:

$$s_w = [1.6 u^{*2} a_n^2 + 2.9 u^{*2} (-z/L)^{2/3}]^{1/2} \quad (16)$$

- b) capa de mezcla:

$$s_w = [1.15 u^{*2} a_n^2 + 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (17)$$

- c) capa “entrainment”:

en el caso de $0.8 = z/H < 1.0$:

$$s_w = [1.15 u^{*2} a_n^2 + a_{c1}^2 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (18)$$

$$a_{c1} = [1/2 + (H - z) / (0.4 H)] \quad (19)$$

y en el caso de $1.0 = z/H = 1.2$:

$$s_w = [1.15 u^{*2} a_n^2 + a_{c2}^2 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (20)$$

$$a_{c2} = [1/3 + (1.2 H - z) / (1.2 H)] \quad (21)$$

- Capa neutral-estable:

$$s_v = u^* [(1.6 C_s (z/L) + 1.8 a_n) / (1 + (z/L))] \quad (22)$$

$$s_w = 1.3 u^* [(C_s (z/L) + a_n) / (1 + (z/L))] \quad (23)$$

$$C_s = [1 - (z/H)]^{3/4} \quad (24)$$

En este modelo se tiene en cuenta la influencia de la estela de los edificios que interfieren en la trayectoria de los penachos mediante la modificación del tamaño de éstos. En concreto, los parámetros afectados por la influencia de los edificios en recorrido de los penachos son:

$$\mathbf{s}'_y = \mathbf{s}_y + \frac{L}{\sqrt{2p}} \quad (25)$$

$$\mathbf{s}'_z = \mathbf{s}_z + \frac{H}{\sqrt{2p}} \quad (26)$$

Donde L y H son las dimensiones horizontal (ancho) y vertical (altura) del edificio, σ_y y σ_z son las desviaciones estándar sin modificar y las mismas variables con prima representan las desviaciones estándar modificada por la influencia de los edificios (Cagneti and Ferrara, 1980).

El transporte de nubes de contaminante se hace a partir del viento estimado en la posición del centro de la nube, siguiendo un camino paralelo al terreno a una altura efectiva sobre el suelo determinada por la altura de la fuente y por la sobreelevación de la nube de contaminante recién emitida si no existe información sobre la componente vertical del viento, en caso contrario se utiliza dicha componente para determinar la posición del centro de la nube sobre el suelo con la restricción de que tiene que ser igual o superior a 1 metro sobre el terreno. El viento en el centro de la nube se calcula en dos pasos:

1. Interpolación bilineal horizontal de los vientos superficiales en los cuatro nodos (esquinas) de la celda afectada para obtener el viento en superficie en el punto que cae en la vertical del centro de la nube. Cuando el centro de la nube ha salido por los bordes del dominio pero parte de la nube sigue dentro, el vector viento que se toma es el del nodo más próximo.
2. Interpolación lineal vertical para estimar el viento en el centro de la nube a partir de los vientos en los niveles inmediatamente inferior y superior.

Una vez estimado el viento en el centro de la nube contaminante, se estima el movimiento mediante el siguiente proceso:

1. Estimación inicial del movimiento.

$$\begin{aligned} \Delta x &= u(x, y, z)\Delta t \\ \Delta y &= v(x, y, z)\Delta t \end{aligned} \quad (27)$$

2. Cálculo de las nuevas coordenadas horizontales para la nueva posición de la nube.

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \end{aligned} \quad (28)$$

3. Segunda estimación del movimiento utilizando el viento de la nueva posición.

$$\begin{aligned} \Delta x' &= u(x', y', z)\Delta t \\ \Delta y' &= v(x', y', z)\Delta t \end{aligned} \quad (29)$$

4. Cálculo de las coordenadas horizontales resultantes de promediar los transportes esperados en 1 y 2.

$$\begin{aligned}x'' &= x + (\Delta x + \Delta x') / 2 \\y'' &= y + (\Delta y + \Delta y') / 2\end{aligned}\tag{30}$$

donde Dt es 60 segundos, igual al intervalo en que las nubes de contaminante son emitidas.

El tamaño inicial de la nube puede determinarse a partir de la concentración de contaminante medida en la boca de cada chimenea emisora de contaminante y al caudal de gases emitidos por la misma. En el instante inicial, la concentración máxima puede considerarse aproximadamente igual a la concentración de contaminante en boca de chimenea, por lo que se tendría que:

$$C_{chim} = \frac{Q}{(2p)^{3/2} s_{xy}^2 s_z}\tag{31}$$

o bien

$$s_{xy}^2 s_z = \frac{1}{(2p)^{3/2}} \left(\frac{Q}{C_{chim}} \right)\tag{32}$$

Otro dato importante y del cual se dispone es el caudal o volumen de gas emitido por la boca de chimenea en un intervalo de tiempo y es igual a:

$$V = \frac{Q}{C_{chim}}$$

luego (34) puede expresarse como:

$$s_{xy}^2 s_z = \frac{V}{(2p)^{3/2}}\tag{33}$$

El análisis de los valores típicos de s_{xy} y s_z según las parametrizaciones típicas de Briggs (Gifford, 1976), Bander (1982) y Ramsdell et al. (1982) se observa que los valores de s_y suelen ser un orden de magnitud mayores que s_z . Podemos entonces suponer que

$$s_{xy} = 10 s_z$$

luego

$$s_{xy} = \frac{(10V)^{1/3}}{\sqrt{2p}}\tag{34}$$

Las expresiones (37) y (38) son las utilizadas para estimar s_{xy} y s_z iniciales de cada nube de contaminante emitidas desde focos emisores industriales.

PORTPUFF computa la sobreelevación de la emisión de contaminante e utiliza como altura de transporte lo que llamamos altura efectiva h_e , que es

$$h_e = h_s + h_r \quad (35)$$

donde h_s es la altura de la chimenea y h_r es la sobreelevación de la nube de contaminante.

La sobreelevación es calculada en PORTPUFF mediante el procedimiento desarrollado por (Hanna et al., 1982). Se calcula la sobreelevación final y se asume que el factor dominante es la flotabilidad.

En condiciones de atmósfera estable, la sobreelevación final de la nube se determina mediante tres parámetros: el flujo de flotabilidad, el parámetro de estabilidad y la velocidad del viento a la altura de la emisión. El flujo de flotabilidad F_0 se define como:

$$F_0 = \frac{gV(T_s - T_a)}{T_a} \quad (36)$$

donde g es la aceleración gravitacional, V es el flujo de material en la chimenea, T_s es la temperatura del efluente y T_a la temperatura ambiente. Ambas temperaturas deben estar en escala absoluta. El parámetro de estabilidad se define como:

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right) \cong \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial T_a}{\partial z} + 0.01 \right) \quad (37)$$

donde $\frac{\partial q}{\partial z}$ es el gradiente vertical de temperatura potencial en °K/Km.

Cuando el viento está en calma, la sobreelevación final viene dada por:

$$h_r = 5.3F_0^{1/4} S^{-3/8} - 6R_0 \quad (38)$$

donde R_0 es el radio de la boca de la chimenea.

En condiciones ventosas, la sobreelevación final viene dada por:

$$h_r = 2.6 \left[\frac{F_0}{US} \right]^{1/3} \quad (39)$$

La ecuación de viento en calma básicamente asume que la nube es emitida desde una altura ligeramente por debajo de la boca de la chimenea.

Para condiciones neutrales y estables, se asume que cerca de la chimenea la sobreelevación es proporcional a $x^{2/3}$ y es independiente de la estabilidad. Si se asume que la sobreelevación final se cumple a una distancia predeterminada, la ecuación de sobreelevación inicial puede utilizarse para estimar la sobreelevación final. La sobreelevación inicial en estas condiciones será:

$$h_r(x) = 1.6F_0^{1/3}U^{-1}x^{2/3} \quad (40)$$

$$x = 6.49F_0^{2/5}h_s^{3/5} \quad (41)$$

En todo el cálculo de la sobreelevación, la mínima velocidad de viento permitida es 0.5 m/s. Además, el tope máximo de sobreelevación de la nube se sitúa en la cima de la capa de mezcla. La altura efectiva de emisión puede ser mayor que el espesor de la capa de mezcla solamente si bien la altura de la chimenea es mayor que el mismo espesor de la capa de mezcla o bien, porque el espesor de la capa de mezcla ha decrecido con el tiempo posterior a la emisión.

PORTPUFF también estima la cantidad de partículas en suspensión que se depositan en el suelo debido al transporte, sedimentación gravitacional, impacto e intercepción por los obstáculos del terreno (depósito seco) y la debida al lavado por la lluvia (depósito húmedo). En el primer caso, se ha desarrollado e implantado un modelo de cálculo del depósito seco bautizado como SEDPORT y que hace un tratamiento diferenciado de las partículas según su diámetro aerodinámico. En general, la cantidad de contaminante depositado W_d se calcula según:

$$\Omega_d = V_d C(z_r) \quad (42)$$

siendo V_d la velocidad de depósito del contaminante y $C(z_r)$ la concentración de contaminantes a la altura z_r muy próxima a la superficie terrestre. SEDPORT está orientado a la estimación de la velocidad de depósito y será explicado en detalle en secciones posteriores.

Para el tratamiento del depósito húmedo, utilizaremos la misma metodología basada en el concepto de coeficiente de “washout” ya implementada en los modelos de dispersión MESOI 2.0 (Ramsdell et al, 1983) y MESOILT2 (Ramsdell y Burk, 1991). La cantidad de material depositado en la superficie y eliminado de cada nube de contaminante por procesos de captura por gotas de agua, lavado y arrastre depende de la concentración de material integrada verticalmente a través de cada nube y del tipo e intensidad de precipitación. La tasa de depósito húmedo se expresa en función del coeficiente de “washout” W_r , la cantidad y distribución de contaminante afectada por la precipitación y el coeficiente de difusión (Ramsdell y Burk, 1991).

El flujo de contaminantes W_w hacia el suelo debido a la precipitación se puede expresar según la ecuación:

$$\Omega_w = C_0 W_r P_0 \quad (43)$$

donde C_0 es la concentración en aire y P_0 la intensidad de precipitación (ver tabla 2). En PORTPUFF al igual que en MESOI se considera los siguientes tipos de precipitación:

	No Prec.	Liquida	Liquida	Liquida	Hielo	Hielo	Hielo
Tipo	0	1	2	3	4	5	6
Intensidad (mm/hr)	≤0.1	>0.1 ≤2.5	>2.5 ≤7.6	>7.6	>0.1 ≤2.5	>2.5 ≤7.6	>7.6
Coefficiente de Washout (1/hr)	0	1.0	5.0	10.0	0.5	2.5	5.0

Tabla 2. Tipos de precipitación y coeficientes de washout considerados por PORTPUFF.

El contaminante puede ser eliminado por depósito en suelo por vía seca y por vía húmeda. El flujo de contaminante en la superficie por vía seca depende de la velocidad de depósito V_d y de la concentración de contaminante junto al suelo, es decir,

$$\begin{aligned} \Omega_d(x, y, t) &= V_d C(x, y, 0, t) = \\ &= \frac{2V_d Q}{(2p)^{3/2} \mathbf{s}_{xy} \mathbf{s}_z} \exp\left(-\frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2\mathbf{s}_{xy}^2(t)}\right) \sum_{i=1}^1 \left[\exp\left(-\frac{(2nH(t) - h_e(t))^2}{2\mathbf{s}_z^2(t)}\right) \right] \end{aligned} \quad (44)$$

La masa de contaminante decrecerá a un ritmo representado por:

$$\frac{dQ}{dt} = - \int_0^{2p} \int_0^{\infty} r \Omega_d dr dq \quad (45)$$

donde $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$. La integral no tiene solución directa ya que la concentración a nivel del suelo varía de forma compleja por los términos de reflexión. Una solución muy aproximada puede conseguirse si se asume que el terreno es llano (sólo para el cálculo del depósito), es decir, que $h_e = h'e$. De esta forma se tendría que:

$$\frac{dQ}{dt} = -2p \mathbf{s}_{xy}^2 V_d C(x_0, y_0, 0) \quad (46)$$

En el caso del depósito por vía húmeda, el material afectado es el de la capa sometida a precipitación (lluvia, nieve, etc). Básicamente, PORTPUFF asume que la precipitación elimina contaminante proporcionalmente a su intensidad y a la concentración de contaminante en cada zona de la nube afectada. El flujo de depósito húmedo es:

$$\Omega_w(x, y, t) = -I_w \int_0^{\infty} C(x, y, z, t) dz = \frac{I_w Q}{2p \mathbf{s}_{xy}^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\mathbf{s}_{xy}}\right)^2\right] \quad (47)$$

siendo I_w el coeficiente de "washout", el cual depende del tipo de precipitación. Integrando la anterior ecuación sobre la horizontal se llega a:

$$\frac{dQ}{dt} = - \int_0^{2p} \int_0^{\infty} r \Omega_w dr dq = -I_w Q \quad (48)$$

Los principales resultados de PORTPUFF son las concentraciones en promedio temporal (10 minutos). Estas se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{C}(x, y, 0) = \frac{\sum_i \sum_j C_{i,j}(x, y, 0) \Delta T_i}{\sum_i \Delta T_i} \quad (49)$$

donde $C_{i,j}(x, y, 0)$ es la concentración de contaminante a nivel del suelo procedente de la nube j (después de haberse descontado el contaminante eliminado por depósito) a lo largo del intervalo de tiempo (intervalo de advección) ΔT_i . Además se cumple que el intervalo de muestreo es:

$$\Delta T = \sum_i \Delta T_i \quad (50)$$

PORTPUFF genera entonces distribuciones espaciales de concentraciones medias de 10 minutos sobre una malla de alta resolución (200x200 m²) cubriendo un área variable de un puerto a otro pero del orden de 10x10 Km². Además, estima las concentraciones de contaminante en las estaciones de medida de contaminación y la contribución de cada foco emisor de partículas. Esta información es muy útil para los efectos de comparación de predicciones y mediciones y su evolución en el tiempo, así como para los procesos de recálculo de emisiones tal como se explicará en la sección dedicada al modelo de emisiones EMIPORT.

Ejemplos de simulaciones con el modelo PORTPUFF (Puerto de A Coruña)

Con objeto de verificar el funcionamiento de PORTPUFF, se han realizado simulaciones de la dispersión de partículas de diversos rangos de tamaño para un conjunto de días (2, 7, 10, 16 y 28 de Abril de 2003) en el entorno del Puerto de A Coruña. Se han utilizado los resultados de las simulaciones de las condiciones meteorológicas realizadas por la Universidad de Santiago de Compostela mediante el modelo ARPS y el módulo de downscaling ARPSINTRP con una resolución espacial de $1 \times 1 \text{ Km}^2$. Los resultados de estos modelos meteorológicos ocupan unos 50 Mb por día en formato ASCII, lo que quizá sea un tamaño excesivo que puede plantear algunos problemas de almacenamiento de resultados. Estos días cubren situaciones generalmente de tipo anticiclónico excepto los días 16, en el que la zona está afectada por una débil borrasca, y 28 con una profunda borrasca al NW que produce vientos de SW fuertes.

Para la realización de las simulaciones, se ha supuesto que existen dos focos de emisión de partículas situados uno en el Muelle Centenario y otro en el San Diego. Ambos son los muelles de operaciones habituales con graneles sólidos en el Puerto de A Coruña. Se ha asumido que cada minuto se emite una nube de contaminante desde cada punto de forma continuada durante el periodo de simulación. Las simulaciones cubren 24 horas empezando a las 00 horas de día, lo que significa que en ese tiempo se han emitido 2880 nubes de contaminante (una cada minuto). En los ejemplos que se exponen a continuación, se han simulado la dispersión de partículas de tamaño entre 1 y 2.5 micras (2 de Abril de 2003) y entre 2.5 y 10 micras (16 de Abril de 2003). Los resultados de PORTPUFF corresponden a una malla de $10 \times 10 \text{ Km}^2$ centrada en el puerto y con una resolución de $200 \times 200 \text{ m}^2$.

Las simulaciones realizadas han tardado unos 15 minutos en un ordenador personal Pentium 4. Las primeras pruebas se hicieron suponiendo una malla de salida de resultados de una mayor resolución ($100 \times 100 \text{ m}^2$), pero se pudo comprobar que los tiempos de simulación eran demasiado largos lo que podría perjudicar a la operatividad de PORTPUFF. Por ello, optó por utilizar una malla de salida de resolución algo peor, pero que no fuera costosa en el aspecto computacional.

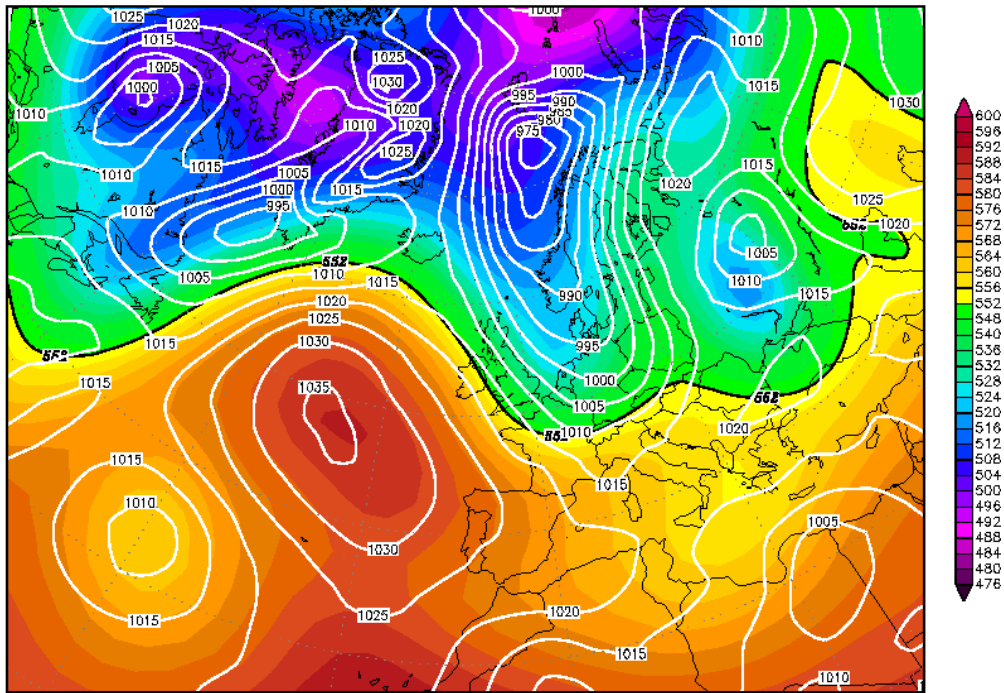
- 02-04-2003

Este día presentó unas condiciones atmosféricas de tipo anticiclónico con cielos parcialmente nubosos y vientos moderados del Noroeste o del Norte. En la Figura 11, puede apreciarse el mapa isobárico de superficie y la altura de geopotencial a 500 HPa en ese día.

En las figuras 12 a 18, se muestra la secuencia de la evolución de las concentraciones en superficie para partículas entre 1 y 2.5 micras a lo largo de este día. Durante la noche predominó en viento flojo del Noroeste, que se intensificó durante el día virando a componente Norte - Noreste. Las concentraciones más bajas (unos $25 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) se aprecian durante la tarde cuando el viento era más intenso (unos 8 m/s). Puede apreciarse como en gran parte del día el penacho de contaminante penetraría tierra adentro. Las mayores concentraciones siempre se aprecian en las proximidades de los muelles Centenario y San Diego. Estos resultados son completamente consistentes con las tasas de emisión supuestas y las condiciones atmosféricas observadas.

Wed,02APR2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figura 11. Mapa isobárico de superficie y altura de geopotencial a 500 HPa el día 2 de Abril de 2003 a las 00 horas.

PUERTO LA CORUÑA 1-04-2003 00:20 2 focos partículas 1<diámetro<2.5 micras
DOMINIO PEQUEÑO

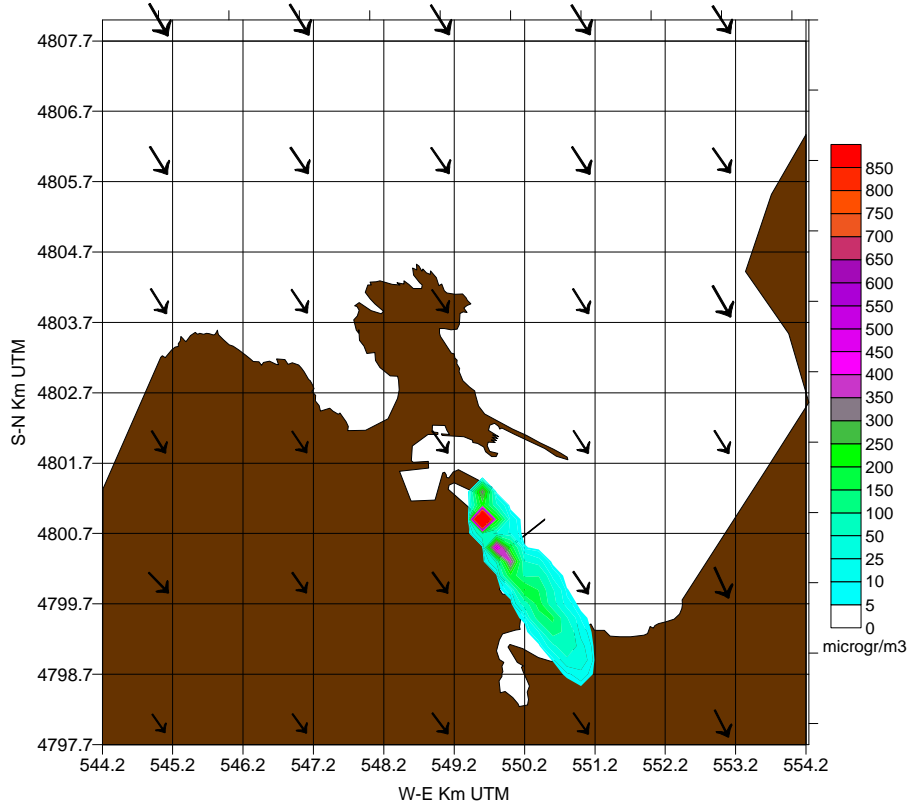


Figura 12. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 00:20 del 2 de Abril de 2003

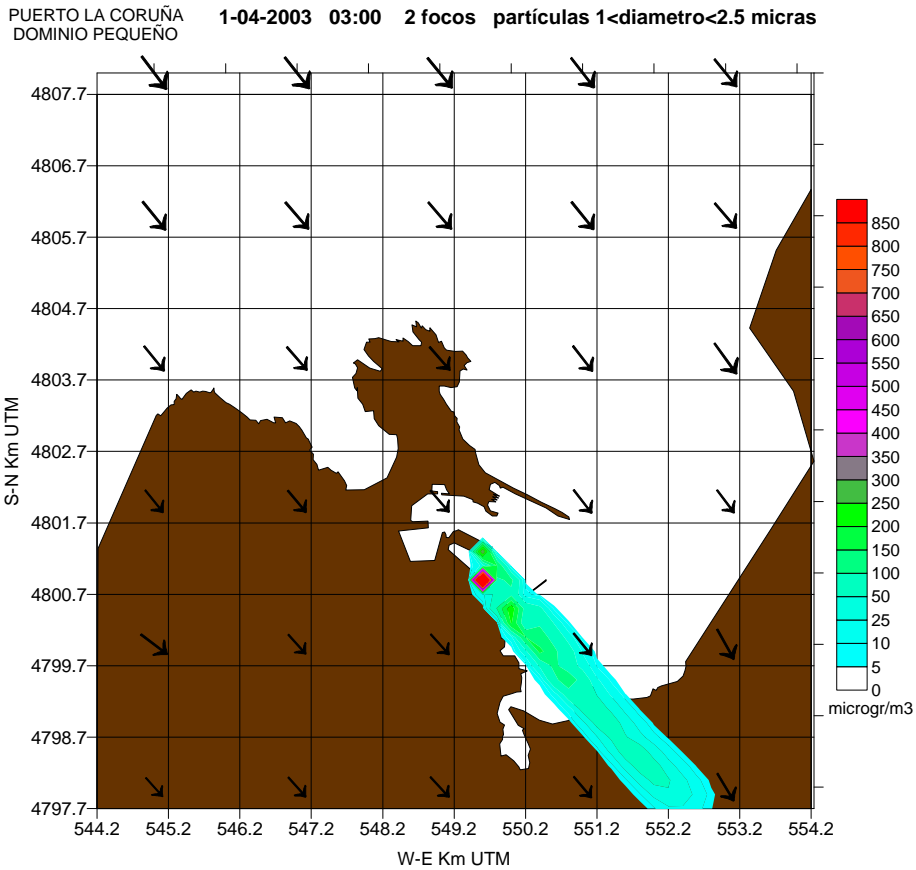


Figura 13. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 03:00 del 2 de Abril de 2003

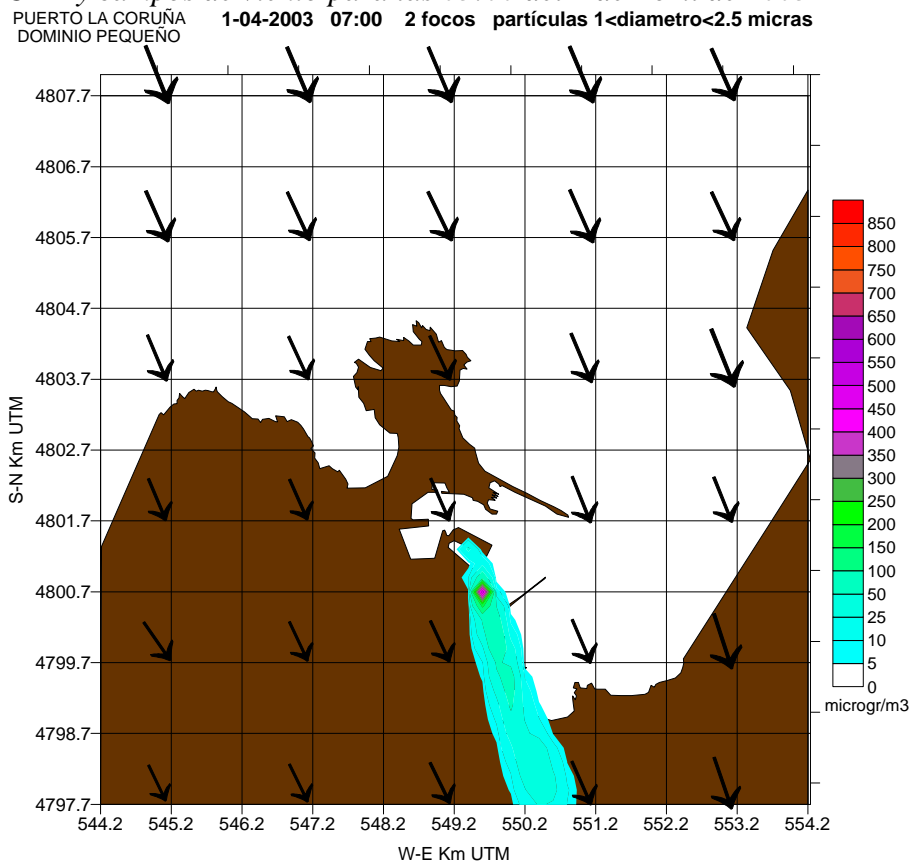


Figura 14. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 07:00 del 2 de Abril de 2003

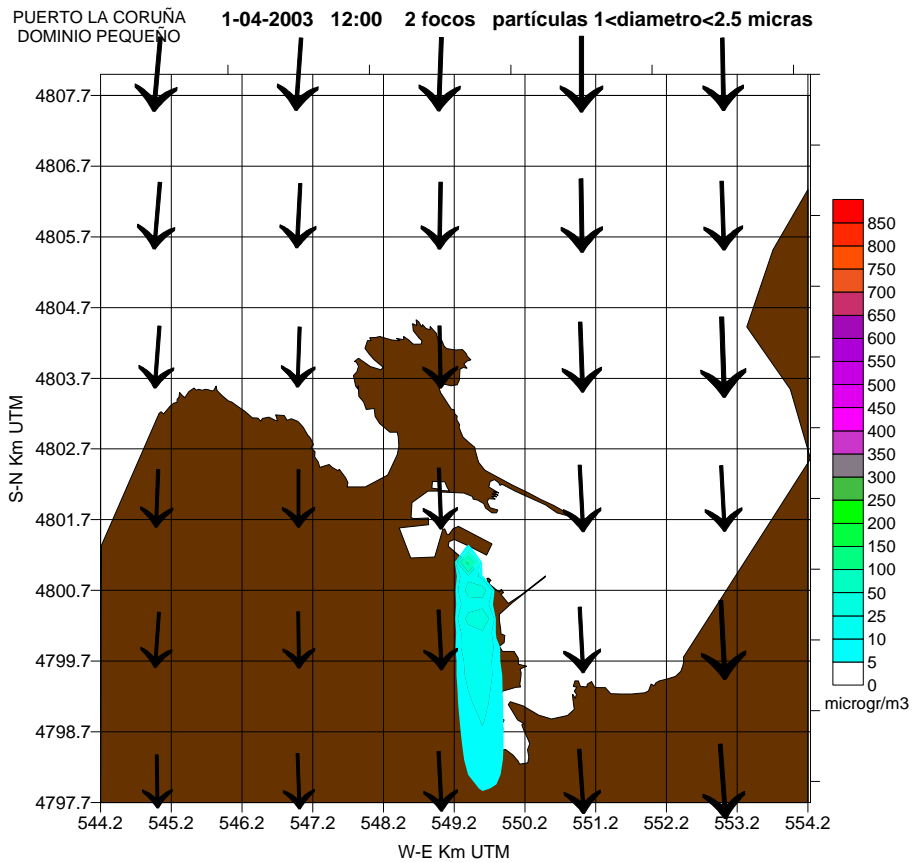


Figura 15. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 12:00 del 2 de Abril de 2003

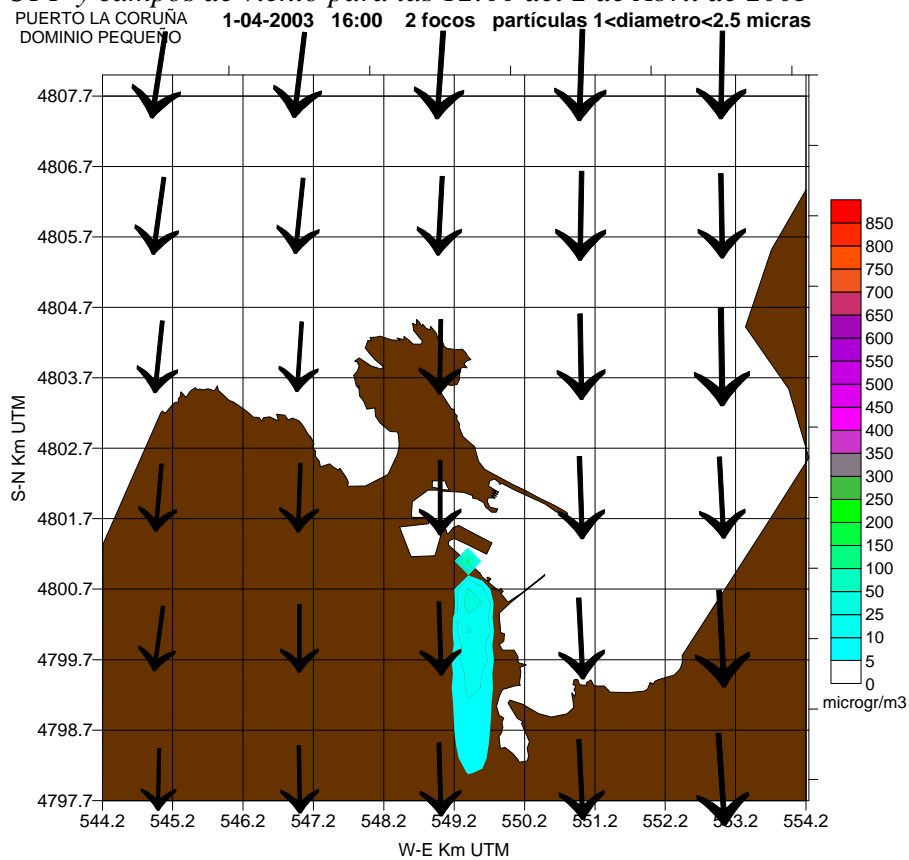


Figura 17. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 16:00 del 2 de Abril de 2003

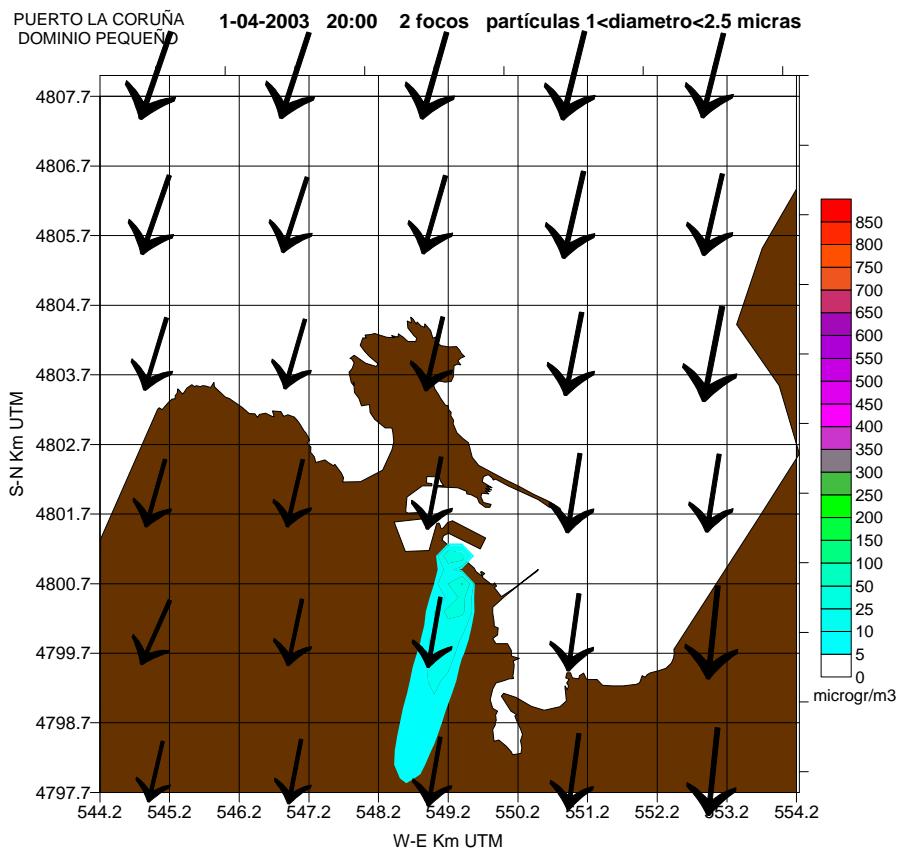


Figura 16. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 20:00 del 2 de Abril de 2003

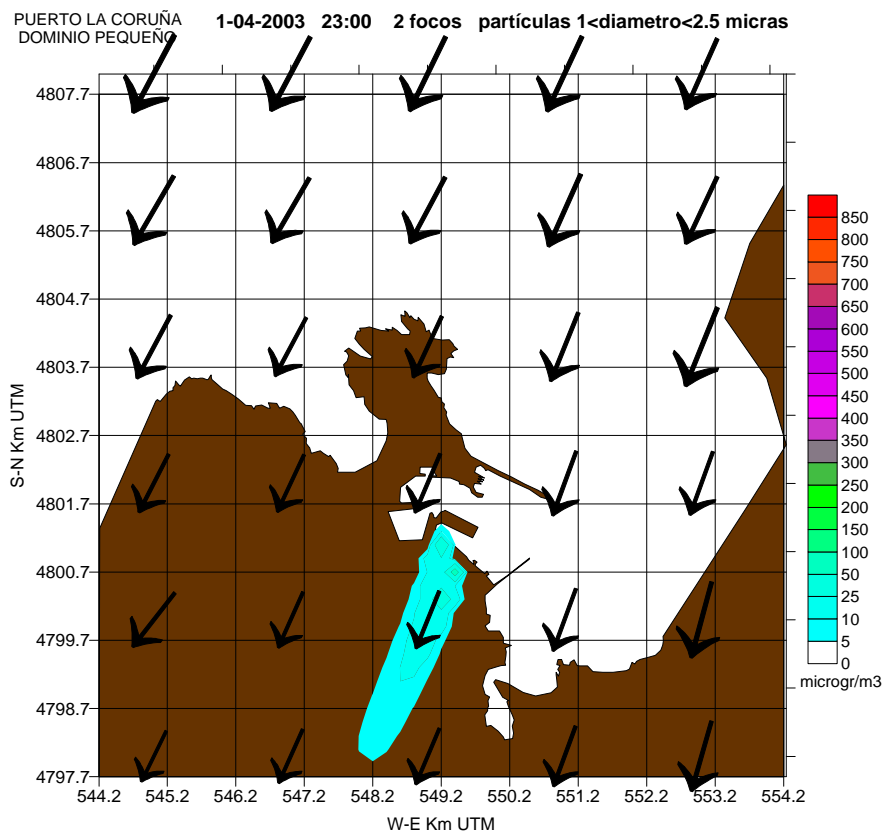


Figura 18. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF para las 23:00 del 2 de Abril de 2003

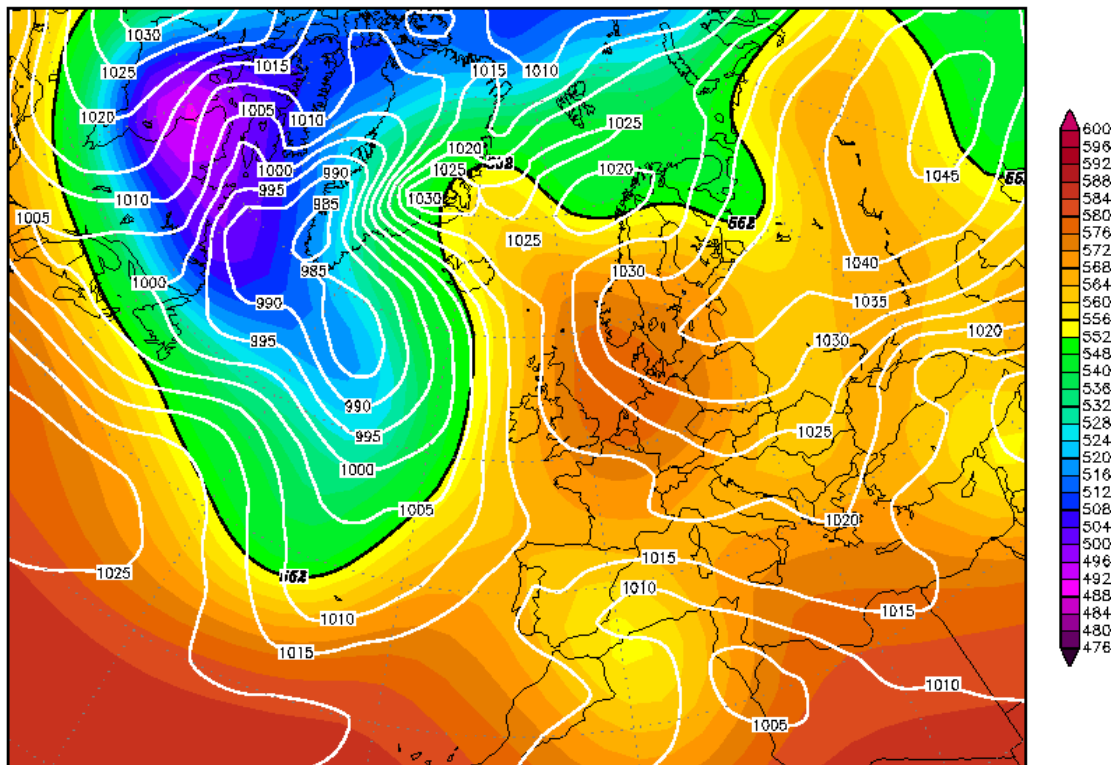
- 16-04-2003

Durante este día, Galicia estaba a caballo entre una borrasca debil en el sureste de la península y una gran borrasca atlántica acercándose. Las condiciones atmosféricas fueron de nubosidad variable con viento más bien débiles de dirección variable. En la Figura 19, puede apreciarse el mapa isobárico de superficie y la altura de geopotencial a 500 HPa en ese día.

En las figuras 20 a 27, puede verse la evolución estimada por PORTPUFF de las concentraciones de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y los campos de viento. Durante la noche, el viento débil transporta las nubes de contaminante hacia la bahía, cambiando la dirección durante las primeras horas del día impulsado la nube de contaminante hacia la zona de la Torre de Hércules. Después el viento vuelve a virar, pero en sentido de las agujas del reloj para hacerse del Noroeste-Norte durante a tarde y más intenso. En esos momentos es cuando apreciamos los niveles más bajos de concentración. Durante la noche, vuelve a soplar un viento débil del Suroeste, que impulsa las nubes de contaminante hacia el centro de la bahía con niveles de contaminación potencialmente altos. En este caso, también los resultados son consistentes.

Wed,16APR2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Figura 19. Mapa isobárico de superficie y altura de geopotencial a 500 HPa el día 16 de Abril de 2003 a las 00 horas.

PUERTO LA CORUÑA
DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 00:30 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

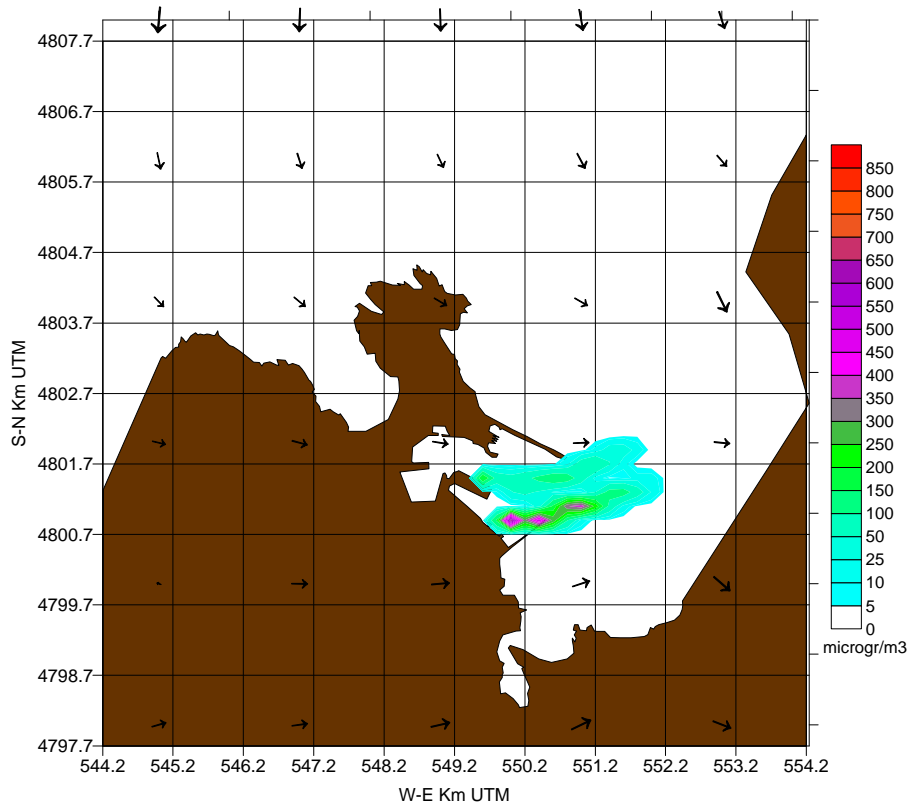


Figura 20. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 00:30 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA
DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 06:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

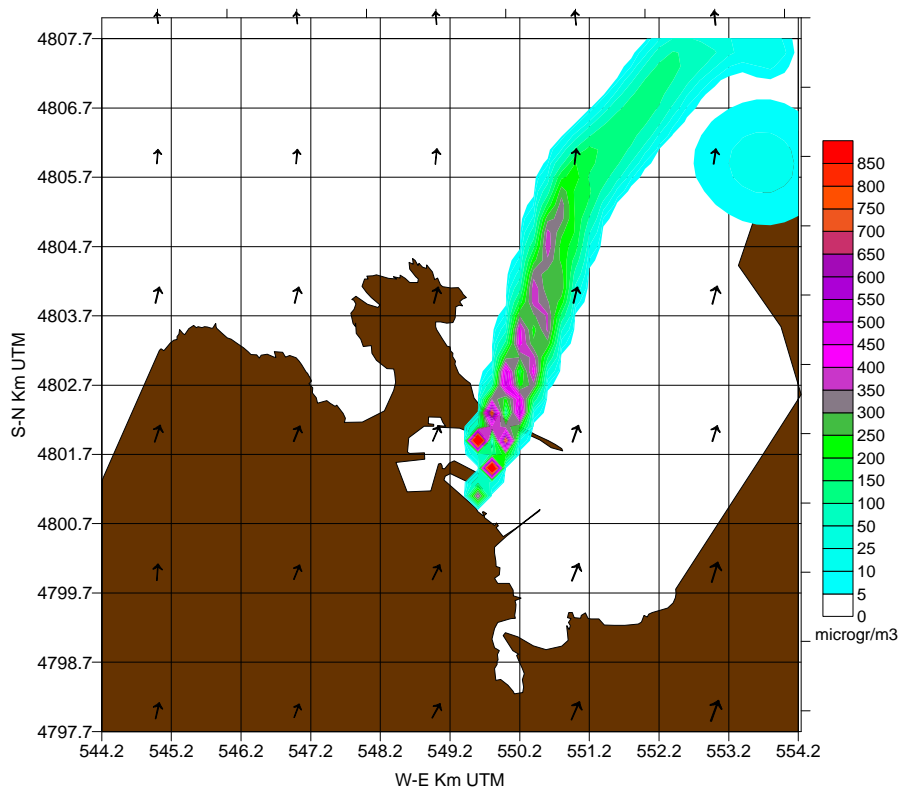


Figura 21. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 06:00 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA 15-04-2003 08:10 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras
DOMINIO PEQUEÑO

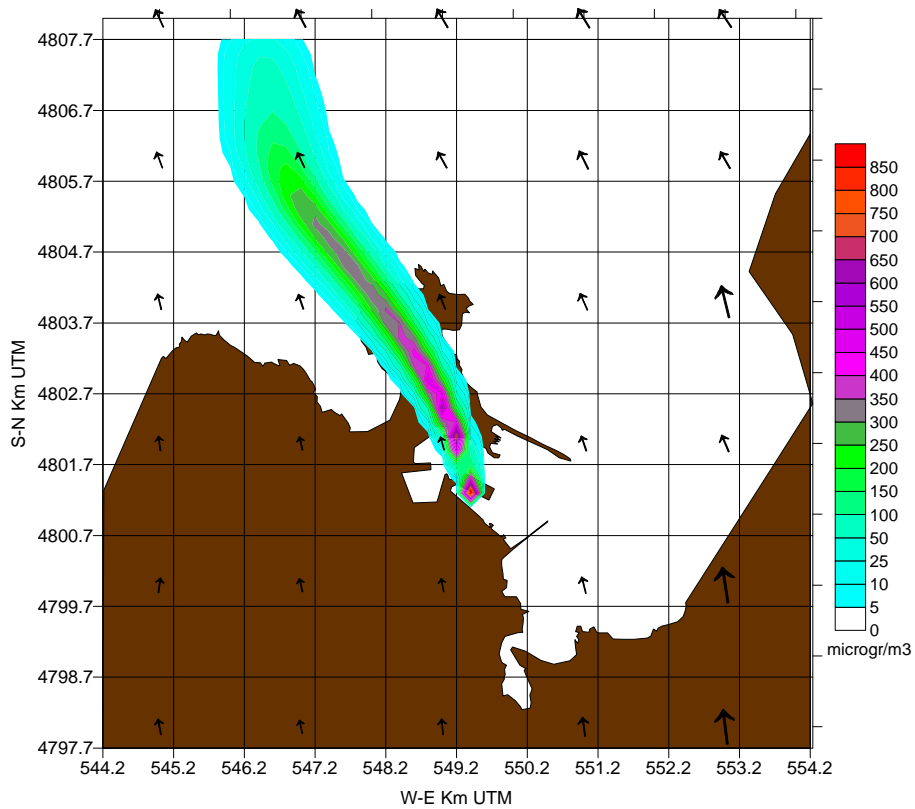


Figura 22. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 08:10 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA 15-04-2003 12:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras
DOMINIO PEQUEÑO

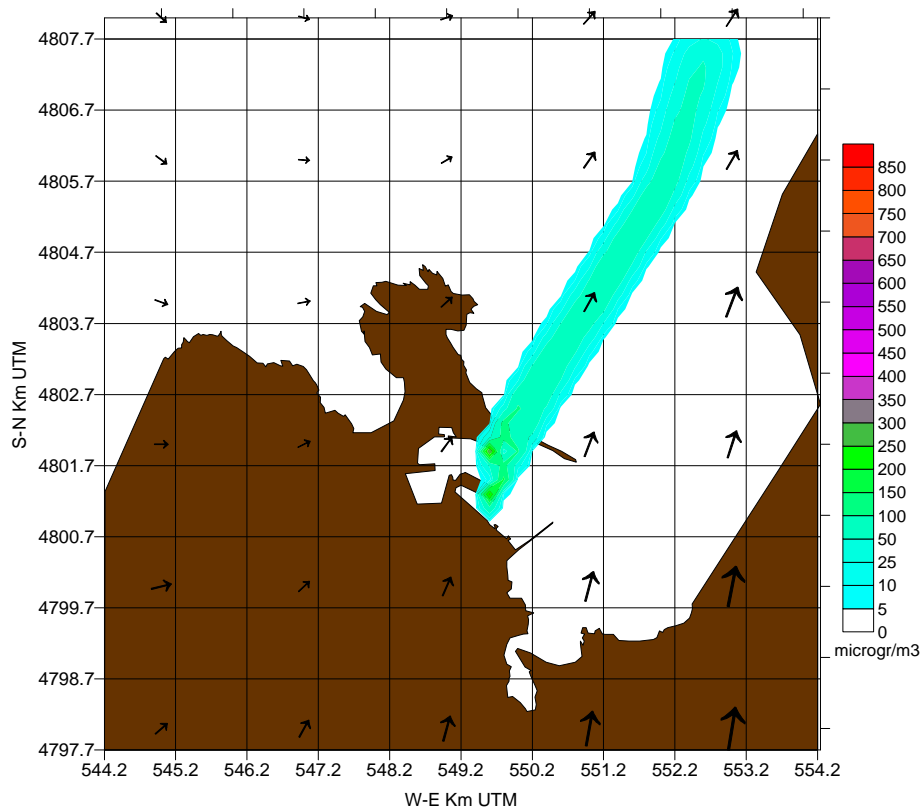


Figura 23. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 12:00 del 16 de Abril de 2003

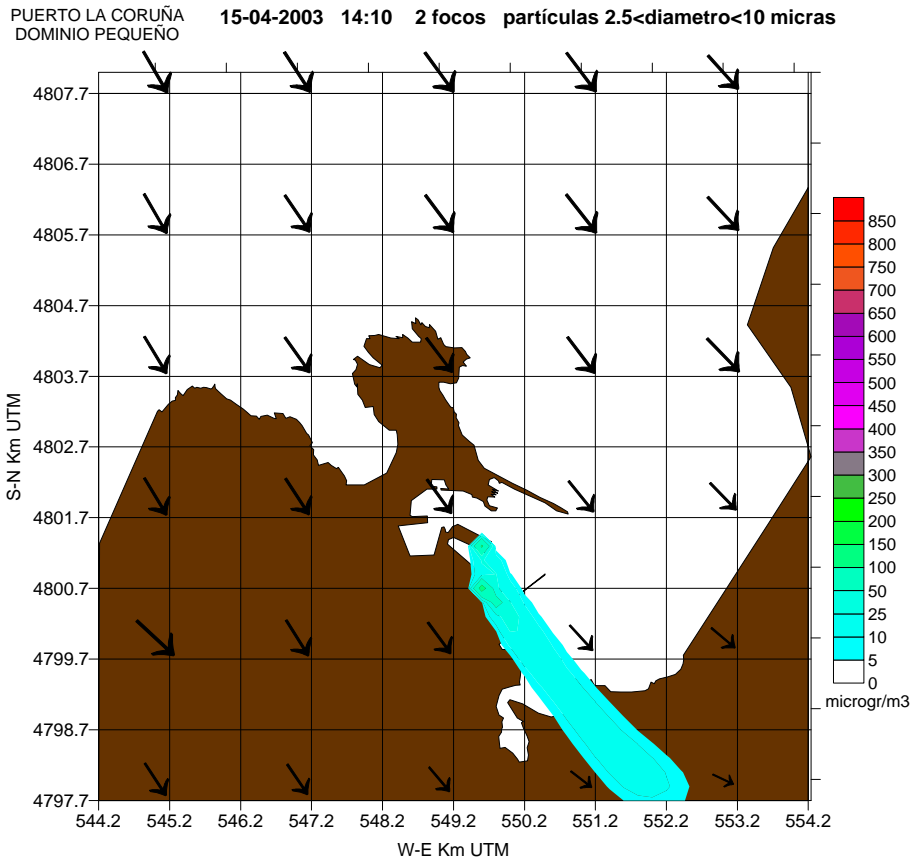


Figura 24. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 14:10 del 16 de Abril de 2003

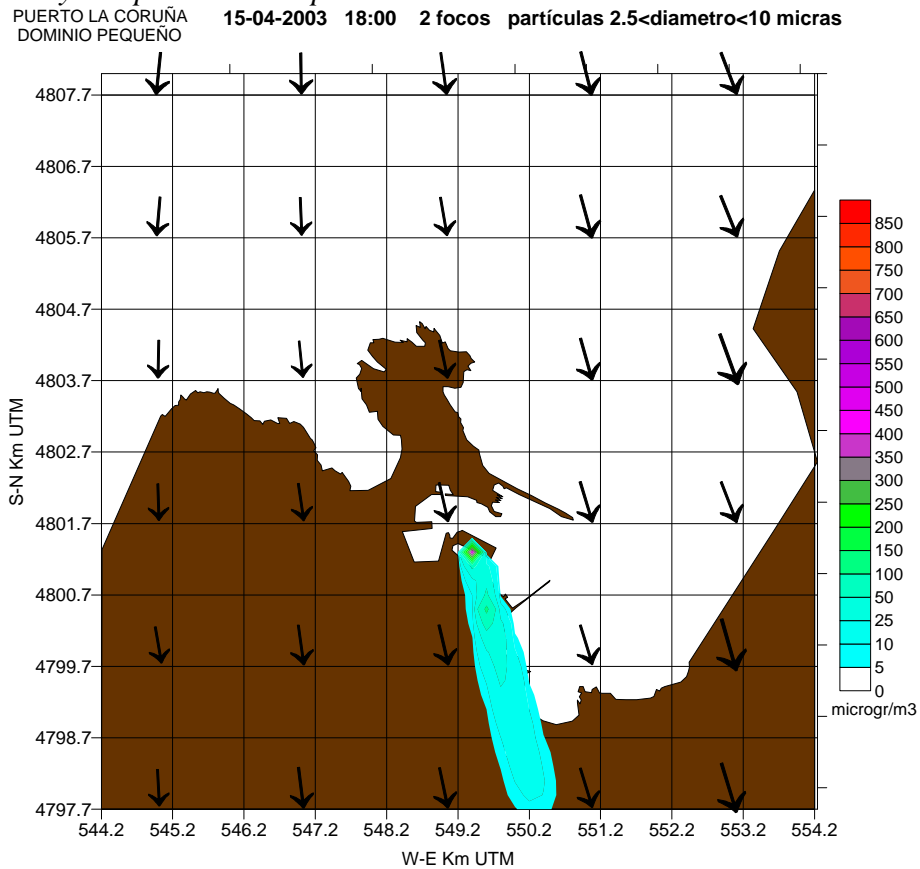


Figura 25. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 18:00 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 22:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

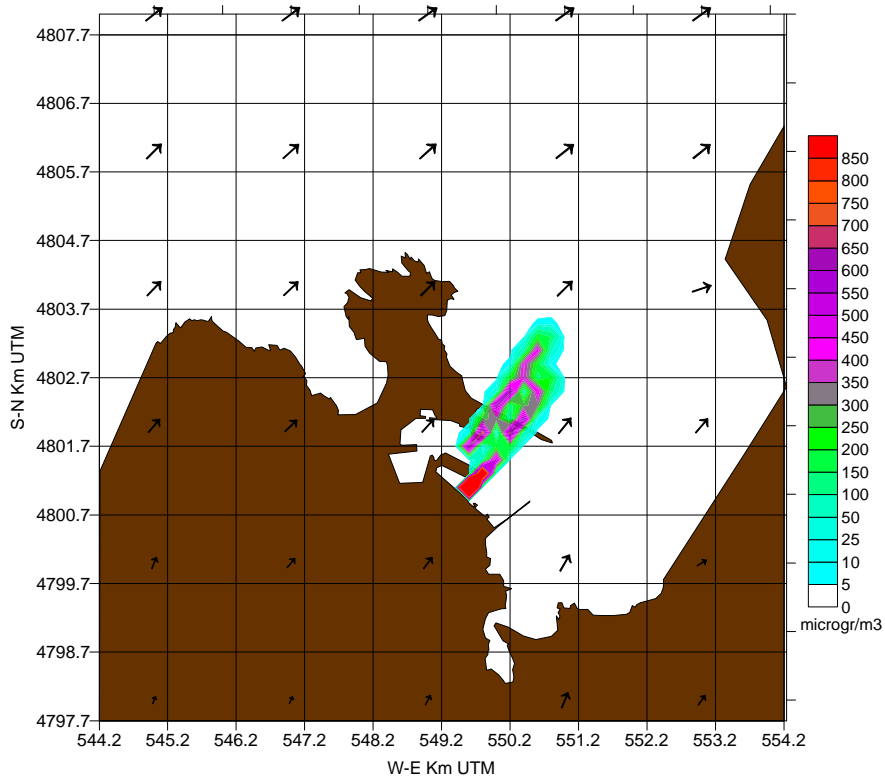


Figura 26. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 22:00 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 23:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

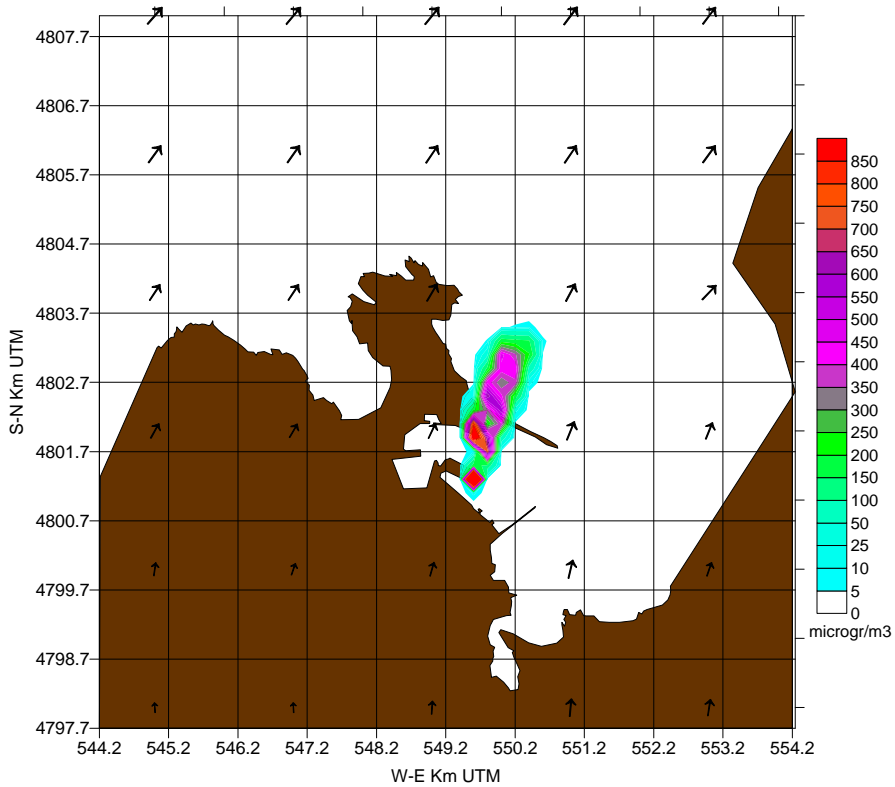


Figura 27. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 23:00 del 16 de Abril de 2003

Adaptación del modelo CALMET

El modelo CALMET es un modelo de diagnóstico meteorológico muy apropiado para las escalas espaciales (60x60 Km²) utilizadas en este proyecto. Tiene por objeto realizar un downscaling de las predicciones de los modelos meteorológicos HIRLAM y MASS que pueda proveer de campos de variables meteorológicas y de turbulencia atmosférica que puedan alimentar al modelo de dispersión. En el caso del Puerto de A Coruña este proceso lo hace el binomio de modelos ARPS+ARPSINTPR (Universidad de Santiago de Compostela). Por otro lado, CALMET puede procesar también datos medidos en estaciones meteorológicas y proporcionar campos meteorológicos de alta resolución en tiempo real. Además de información meteorológica, CALMET necesita datos digitalizados de topografía y usos de suelo.

Los resultados de CALMET incluyen campos de viento y temperatura en malla tridimensional de los niveles verticales indicados por el usuario. Es recomendable que sea unos cinco niveles próximos al suelo y cubriendo el espesor de la capa límite atmosférica (por ejemplo, 10, 100, 500, 1200 y 2000 m sobre el nivel del suelo), así como, precipitación, velocidad de fricción y longitud de Monin-Obukhov en superficie, además de la altura de la capa de mezcla.

En el momento actual, CALMET está preparado para que sus resultados sean utilizados directamente por PORTPUFF y para que funcione con datos de estaciones meteorológicas. También se ha discutido el tipo de información que precisamos de los modelos MASS (Universidad de Barcelona) para los puertos de Barcelona, Tarragona, Valencia y Cartagena y HIRLAM (Instituto Nacional de Meteorología) para los puertos de Huelva, Santander y Bilbao. Estos datos consisten en:

1. Posición de los puntos de observación
 - Torres meteorológicas de superficie (UTM o Longitud/Latitud y altura sobre nivel del mar)
 - Puntos de la malla del modelo usados para perfiles verticales (UTM o Longitud/Latitud)
 - Observaciones sobre el agua (UTM o Longitud/Latitud y altura sobre la superficie del agua de la medida)
2. Datos meteorológicos superficiales

Para cada una de las torres incluidas en su dominio (también pueden ser datos que proporcione MASS y HIRLAM) para localidades concretas de forma rutinaria):

Valores horarios de:

- Velocidad y Dirección de viento
- Temperatura
- Cobertura de nubes
- Altura de las nubes bajas
- Presión en superficie
- Humedad relativa
- Tasa de precipitación

3. Datos en altura

Para cada uno de los puntos de la malla del modelo de incluidos en el dominio de simulación o próximos a él. Al menos es deseable coger los cuatro puntos de malla de MASS o HIRLAM más próximos a cada puerto y otro punto situado en el centro de cada uno. La información debe cubrir varias alturas por debajo de los 500 HPa:

Perfiles verticales horarios de:

- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura
- Presión
- Altura sobre el nivel del mar

Las predicciones deberían ser hasta 48 horas y obtenidas dos veces al día.

Estamos a la espera de recibir muestras de datos de la Universidad de Barcelona y del INM para proceder a la adaptación de lectura de datos y a la realización de simulaciones de prueba.

A continuación, se explica con cierto detalle las características del modelo de diagnóstico CALMET.

Existen en la actualidad varios modelos meteorológicos, normalmente acoplados a modelos de dispersión, encargados de proporcionar los datos necesarios para los cálculos de transporte y las concentraciones finales de uno o varios contaminantes en un dominio determinado. Dentro de estos modelos, se encuentra CALMET, un modelo meteorológico de diagnóstico que pertenece a la Agencia de Protección Medioambiental de los EE.UU (EPA) y que se encuentra acoplado al modelo CALPUFF, diseñado para el estudio de la dispersión de contaminantes en terrenos de topografía compleja.

En 1998, la EPA encargó a tres especialistas científicos, la tarea de realizar un enjuiciamiento sobre la recomendación del sistema de modelos CALMET/CALPUFF para investigaciones en el campo del transporte a larga distancia y aplicaciones para estudios de dispersión cercanos a las fuentes. Los resultados de las investigaciones realizadas, concluyeron en la recomendación de este sistema de modelos y destacaron que representaban un significativo avance respecto de los que actualmente se utilizan como reguladores de calidad del aire (Allwine et al., 1998).

El modelo CALMET ha sido sometido a varios procesos de evaluación y validación en diferentes escenarios meteorológicos (Allwine et al., 1998; Battaglia C., 1999). Aunque los resultados de la validación son favorables a la recomendación de la utilización de este modelo, la EPA aconseja seguir realizando ejercicios de validación a partir de la comparación de sus resultados con datos experimentales en diferentes escenarios meteorológicos y topográficos.

El núcleo del modelo CALMET está formado por un módulo de diagnóstico del campo de viento capaz de simular efectos locales, como los flujos de ladera, efectos

cinemáticos y de bloqueo del terreno (incluyendo un procedimiento de minimización de la divergencia del viento), y un módulo de capa límite, que tiene un tratamiento separado en función de si su desarrollo tiene lugar sobre tierra o sobre el agua (Scire et al., 1990; 1999). Estos módulos serán descritos en detalle a continuación.

Por otra parte, el modelo CALMET utiliza un sistema de coordenadas (x, y, z) en donde el eje x corresponde con la dirección Oeste-Este y el eje y con la dirección Sur-Norte. De esta forma, el sistema de coordenadas es compatible con las componentes horizontales (u, v) del viento. El modelo sigue la topografía definiendo la coordenada vertical z , de la siguiente manera:

$$Z = z - h_t \quad (51)$$

donde Z es la coordenada vertical que sigue el terreno (m) , z es la coordenada cartesiana vertical (m) y h_t es la elevación del terreno (m).

La componente vertical de la velocidad del viento, W , en este sistema de coordenadas se define como:

$$W = w - u \frac{\partial h_t}{\partial x} - v \frac{\partial h_t}{\partial y} \quad (52)$$

donde w es la componente vertical de la velocidad del viento (m/s) en coordenadas cartesianas.

El módulo de diagnóstico del campo de viento del modelo CALMET utiliza, como ya comentamos, una aproximación en dos etapas basadas en las investigaciones de Douglas y Kessler (1988). En la primera, el viento en el dominio se ajusta teniendo en cuenta los efectos cinemáticos del terreno (flujos de ladera, efectos de bloqueo, etc.) La segunda etapa consiste en un procedimiento de análisis objetivo que introduce los valores observados dentro del campo de viento obtenido en el paso anterior, para producir un campo final de viento que tenga en cuenta los datos medidos por estaciones meteorológicas en el dominio. En esta segunda etapa, se utiliza un esquema de interpolación que depende de la inversa del cuadrado de la distancia, con objeto de ponderar la importancia de los valores observados. Dicha interpolación se realiza según la siguiente expresión:

$$(u, v)_2 = \frac{\frac{(u, v)_1}{R^2} + \sum_k \frac{(u_{obs}, v_{obs})_k}{R_k^2}}{\frac{1}{R^2} + \sum \frac{1}{R_k^2}} \quad (53)$$

donde:

$(u_{obs}, v_{obs})_k$ son las componentes del viento observado en la estación k .

$(u, v)_1$ son las componentes del viento de la primera etapa en un punto de la malla del dominio.

$(u, v)_2$ son las componentes del viento de la segunda etapa en un punto de la malla del dominio.

R_k es la distancia de la estación k al punto de la malla.

R es un parámetro de ponderación especificado por el usuario para el campo de vientos de la primera etapa.

El resultado final de este esquema de interpolación es el de darle mayor importancia a los valores observados del viento en las regiones del dominio cercanas a las estaciones de medida, mientras que los campos de viento obtenidos por la primera etapa prevalecen en las regiones en las que no existen valores observados.

El usuario introduce unos radios de influencia de las estaciones de medida, de forma que una observación será excluida del proceso de interpolación si la distancia desde la estación a un punto particular de la malla excede este radio de influencia.

Por último, el modelo realiza un proceso de suavizado de los campos de viento resultantes con objeto de reducir discontinuidades en los resultados finales.

La componente vertical del viento se obtiene mediante un procedimiento de minimización de la divergencia que consiste en un proceso iterativo que ajusta las componentes horizontales del viento (u, v) a un valor de la componente vertical w en cada punto de la malla, de forma que la divergencia sea menor que un cierto valor:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} < \epsilon \quad (54)$$

Este proceso de minimización de la divergencia asegura que los campos de viento finales sean consistentes con el principio de conservación de la masa.

Respecto de la capa límite, el módulo utilizado por el modelo para simular el desarrollo de dicho estrato sobre tierra está basado en el método del balance de energía de Holtslag y Van Ulden (1983), lo que permite obtener valores horarios en los puntos de la malla de variables como flujo de calor sensible (Q_h), velocidad de fricción (u_*), longitud de Monin-Obukhov (L) y velocidad de escala convectiva (w_*). La altura de la capa de mezcla se obtiene a partir del flujo de calor sensible y los perfiles de temperatura utilizando el método de Carson (1973) con algunas modificaciones basadas en resultados de Maul (1980). Las clases de estabilidad y los valores horarios de precipitación son salidas opcionales del modelo. Para el caso de que el dominio incluya superficies marinas, la capa límite es evaluada por CALMET a partir del método de los perfiles, ya que dicho procedimiento se ajusta mejor a las particulares características aerodinámicas y térmicas que deben ser consideradas en entornos marinos.

El modelo CALMET utiliza una parametrización de la capa límite sobre tierra basada en el cálculo del flujo de calor sensible, a partir de la ecuación del balance de energía (Holtslag y Van Ulden, 1983). Dicha ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$Q_* + Q_f = Q_h + Q_e + Q_g \quad (55)$$

En la expresión anterior, Q_* representa la radiación neta, Q_f es el flujo de calor antropogénico o asociado a actividades humanas, Q_h es el flujo de calor sensible, Q_e es el flujo de calor latente y Q_g es el término asociado al flujo de calor acumulado en el suelo.

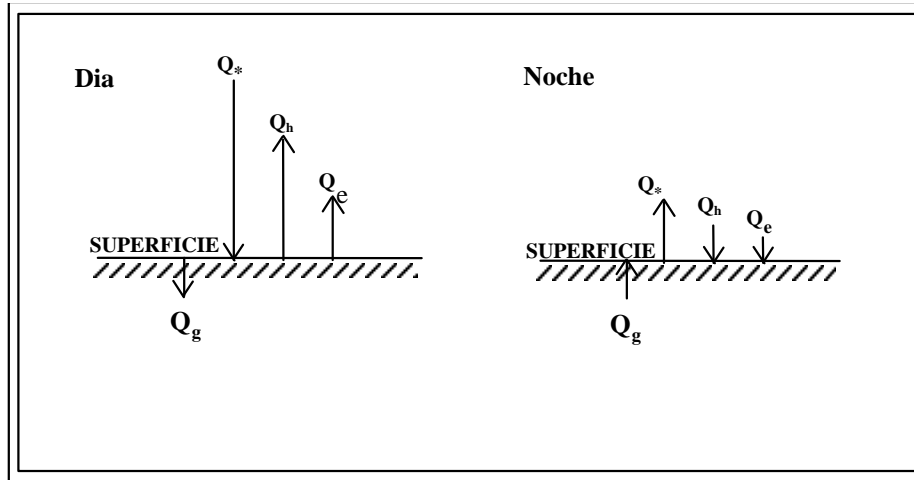


Figura 28.. Balance de energía tierra-atmósfera.

El proceso de reparto de energía es el siguiente: durante el día la superficie terrestre se calienta al recibir la aportación de radiación neta solar, Q_* . Esa energía recibida es transmitida a las capas bajas de la tierra calentándola, Q_g , de forma que a partir de un determinado momento, el exceso de calor recibido por la superficie es transmitido hacia la atmósfera en forma de calor sensible Q_h y latente Q_e . El flujo de calor sensible constituye la aportación calorífica a la atmósfera en la que no intervienen cambios de fase, mientras que el flujo de calor latente se manifiesta cuando se producen procesos de cambios de fase (evaporación o condensación, por ejemplo). Durante la noche, sin embargo, los flujos de calor se invierten, tal y como se observa en la Figura 28.

La relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente viene definida por la razón de Bowen:

$$B = \frac{Q_h}{Q_e} \quad (56)$$

El significado de la razón de Bowen es el de representar el grado de turbulencia convectiva en función de la relación entre la porción de energía repartida entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente. El valor que toma este parámetro depende de los usos de suelo, y es introducido en el modelo a partir de los datos por defecto que propone el modelo y que pueden ser modificados por el usuario. Los valores típicos de la razón de Bowen varían entre 0.1 sobre el agua hasta 10 en zonas desérticas. Durante el verano, en California y en algunas zonas de Australia, se pueden dar valores entre 5 y 10 (Scire et al., 1990; 1999).

Respecto del flujo de calor en el suelo o en los materiales de construcción, Q_g , la parametrización de este término se realiza en términos de la radiación neta (Oke, 1978; Holtslag y Van Ulden, 1983) a partir de la siguiente expresión:

$$Q_g = C_g Q_* \quad (57)$$

siendo C_g la constante del flujo terrestre que depende de las propiedades del terreno. Los valores recomendados para esta constante varían entre los 0.05-0.25 de zonas rurales y los 0.25-0.30 para las áreas urbanas (Oke, 1982), superiores a los rurales debido a la conductividad térmica y capacidad calorífica de los materiales urbanos. Holtstag y Van Ulden (1983) recomiendan un valor de 0.1 para superficies herbáceas.

El flujo de calor antropogénico, Q_f , es función de la densidad de población de cada área en concreto. Oke (1978) recoge unas estimaciones sobre los valores promedio anuales y estacionales de este parámetro en diferentes ciudades. Según este autor, un análisis de escala de los términos de la ecuación del balance de energía, conduce a considerar que el error que se cometería al despreciar este parámetro no sería excesivamente elevado en la mayoría de las aplicaciones de dicha ecuación.

Por otro lado, la radiación neta, Q_* , puede expresarse como la suma de la radiación de onda corta y larga (Holtstag y Van Ulden, 1983; Landsberg, 1981) de la siguiente manera:

$$Q_* = Q_{sw}(1 - A) + Q_{w-d} - Q_{w-u} \quad (58)$$

donde Q_{sw} es la radiación de onda corta incidente formada por la suma de la radiación solar directa, Q_{sw-s} , y la radiación difusa, Q_{sw-d} . El parámetro A representa el albedo de la superficie y los dos últimos términos, Q_{w-d} y Q_{w-u} , son la radiación de onda larga incidente de la atmósfera y la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre.

El resultado de la estimación de la radiación neta mediante el procedimiento de Holtstag y Van Ulden (1983), se resume en la siguiente expresión:

$$Q_* = \frac{(1 - A)Q_{sw} + c_1 T^6 - s T^4 + c_2 N}{1 + c_3} \quad (59)$$

donde el valor de la radiación de onda corta incidente se obtiene a partir de:

$$Q_{sw} = (a_1 \text{sen } f + a_2)(1 + b_1 N^{b_2}) \quad (60)$$

siendo, en estas expresiones, T la temperatura del aire, s la constante de Stefan-Boltzmann, N es la fracción de cielo cubierto y f es el ángulo de elevación solar.

La tabla siguiente recoge los valores de las constantes de estas expresiones que pueden ser modificadas en el modelo:

<i>Constante</i>	<i>Valor</i>
c_1	$5.31 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2/\text{K}^6$
c_2	60 W/m^2
c_3	0.12
a_1	990 W/m^2
a_2	-30 W/m^2
b_1	-0.75 W/m^2
b_2	3.4

Tabla 3. Valores de las constantes.

A partir de la expresión del balance de energía y teniendo en cuenta la definición de la razón de Bowen, se llega a la siguiente expresión:

$$Q_h \approx \frac{B(1 - C_g)}{1 + B} Q_* \quad (61)$$

Conocido el flujo de calor sensible, la altura de la capa de mezcla *convectiva* en el instante $t+dt$ se calcula en el modelo a partir de la siguiente expresión:

$$h_{t+dt} = \left[h_t^2 + \frac{2Q_h(1+E)dt}{\mathbf{j}_1 \mathbf{r} C_p} - \frac{2d\mathbf{q}_t h_t}{\mathbf{j}_1} \right]^{1/2} + \frac{d\mathbf{q}_{t+dt}}{\mathbf{j}_1} \quad (62)$$

donde \mathbf{j}_1 es el gradiente de temperatura potencial encima de la capa de mezcla h_t , E es una constante aproximadamente igual a 0.15 y $d\mathbf{q}$ es la diferencia de temperatura en la cima de la capa de mezcla en grados Kelvin. El valor de $d\mathbf{q}_{t+dt}$ se determina en el modelo a partir de la siguiente expresión:

$$d\mathbf{q}_{t+dt} = \left[\frac{2\mathbf{j}_1 E Q_h dt}{\mathbf{r} C_p} \right]^{1/2} \quad (63)$$

El modelo CALMET calcula también una altura de la capa límite *mecánica* mediante la siguiente fórmula:

$$h = \frac{B u_*}{[f N_B]^{1/2}} \quad (64)$$

siendo f el parámetro de Coriolis aproximadamente igual a 10^{-4} s^{-1} en nuestras latitudes, B es una constante aproximadamente igual a $2^{1/2}$ y N_B es la frecuencia de Brunt-Väisälä de la capa superior estable.

Una vez obtenidos los valores convectivo y mecánico, el modelo selecciona como valor final de capa límite, el máximo entre los dos.

Para las superficies acuosas del dominio, la determinación del espesor de capa límite se realiza a partir de un procedimiento diferente, como consecuencia de la ausencia de intensos flujos de calor sensible sobre dichas superficies, utilizando la expresión:

$$h_{agua} = \frac{Cu_*}{f} \quad (65)$$

donde el valor que se recomienda de la constante C es de 0.16, u_* es la velocidad de fricción y f es el parámetro de Coriolis.

Para obtener el campo de temperaturas, el modelo CALMET utiliza los datos de radiosondeos en altura y superficie así como la estimación de la altura de la capa de mezcla convectiva determinada en función de la ecuación del balance de energía. En primer lugar, el modelo realiza una interpolación espacial de las temperaturas recogidas en los radiosondeos en los niveles seleccionados por el usuario. Así mismo, realiza una interpolación temporal entre los sondeos consecutivos para disponer de los valores de temperatura horarios en cada nivel. El modelo realiza un promediado espacial de los campos de temperatura finales y recalcula los valores sobre la superficie y altura en un estrato de espesor igual a la capa de mezcla asumiendo un gradiente de temperatura adiabático.

Preparación de datos de predicción meteorológica

Se dispone de predicciones meteorológicas a 48 horas a escala sinóptica, constituidas por campos meteorológicos en una malla tridimensional de diversas variables meteorológicas (velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa) y en superficie (cobertura de nubes, altura de las nubes bajas, presión, tasa de precipitación). Esta predicción es suministrada por la Universidad de Santiago de Compostela - METEOGALICIA con el modelo ARPS para el Puerto de A Coruña, por METEOSIM - Universidad de Barcelona mediante el modelo MASS para los puertos de Barcelona y Tarragona, y por el Instituto Nacional de Meteorología mediante el modelo HIRLAM para los puertos de Huelva, Cartagena, Valencia y Santander. La predicción meteorológica para el puerto de Bilbao se hace mediante el modelo MM5.

En la Figura 29 pueden observarse la posición de los puntos suministrados por el modelo los modelos de predicción para cada puerto.

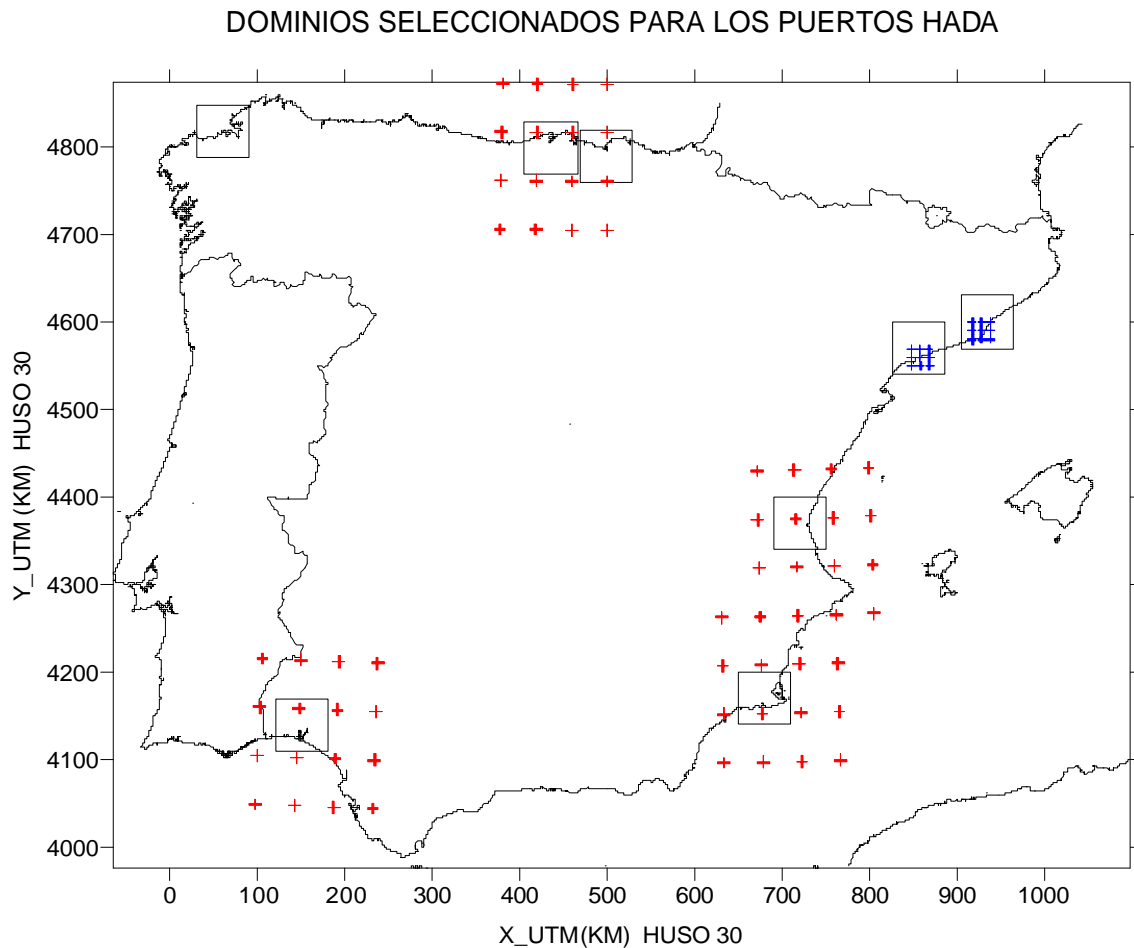


Figura 29. Posición de los dominios usados para cada puerto y puntos de información de HIRLAM (rojo) y de MASS (azul).

Las predicciones obtenidas con estos modelos corresponden a mallas de cálculo cuya resolución espacial oscila entre 50 Km (puntos HIRLAM) y 10 Km (puntos MASS) .

Estas predicciones son tratadas por el modelo de diagnóstico CALMET y el módulo ARPSINTPR, que entronca directamente con las predicciones meteorológicas del modelo ARPS para obtener campos meteorológicos en un área más restringida y con mayor resolución espacial (1x1 Km²). Este proceso es conocido como *downscaling*.

Preparación de datos adicionales

Los modelos implantados en el sistema informático de control y predicción de la contaminación en puertos precisan de información adicional del siguiente tipo:

- Coordenadas geográficas (UTM huso 30) de la ubicación de estaciones meteorológicas y de contaminación. Esta información puede consultarse en el informe de instalación de las mismas (Proyecto HADA, 2004)
- Planos digitalizados de los puertos incluyendo las dimensiones y ubicación de los edificios principales próximos a las áreas de operaciones con graneles sólidos.
- Datos digitales de topografía de alta resolución y usos de suelo en los alrededores de cada puerto

Se han usado datos de elevación del terreno para toda España en celdas de 1x1 Km². procedentes del Modelo Digital del Terreno MDT1000 del Centro Nacional de Información Geográfica para obtener información topográfica en los dominios de 60x60 Km² correspondientes a cada puerto.

Para afinar los cálculos con el modelo de dispersión en una malla más fina, se ha necesitado datos de mayor resolución hasta llegar a celdas de 250x250 m², especialmente, en aquellos puertos con una orografía abrupta, en un área de al menos 10x10 Km² centrada en cada puerto. Esta última información fue provista por la autoridades portuarias.

En cuanto a los usos de suelo, se necesita conocer en cada celda las características del terreno. Esta información fue provista por diversas autoridades portuarias y fue complementada con la base de datos NATLAN – CORINE LAND USE de la Agencia Europea de Medio Ambiente que da información muy detallada para toda Europa con una resolución de 250x250 m² con un número enorme de tipos de uso de suelo. Estos datos fueron transformados de una proyección Lambert Confome a la proyección geográfica UTM Huso 30 requerida, lo que exigió un tratamiento laborioso con ARCINFO o ARCGIS. Este número de tipos de usos de suelo fue simplificado hasta llegar a 15 tipos que habría que casar con los tipos utilizados (Figura 30)

Los edificios grandes próximos a las zonas de emisión de partículas pueden alterar de forma muy notable la dispersión atmosférica. Por eso, se ha hecho necesario utilizar información sobre la ubicación y dimensiones de aquellos edificios importantes. Esta información ha sido provista bien de forma digital o en planos o en ortofotos por la autoridades portuarias.



Figura 30. Tipos de usos de suelos asignados a las gráficas y utilizados en el depósito de partículas

En las siguientes figuras (31 a 44), se muestran los datos digitales de topografía y usos de suelo, los contornos de costa y puerto de las ventanas de visualización y la ubicación de los edificios más relevantes de cada puerto.

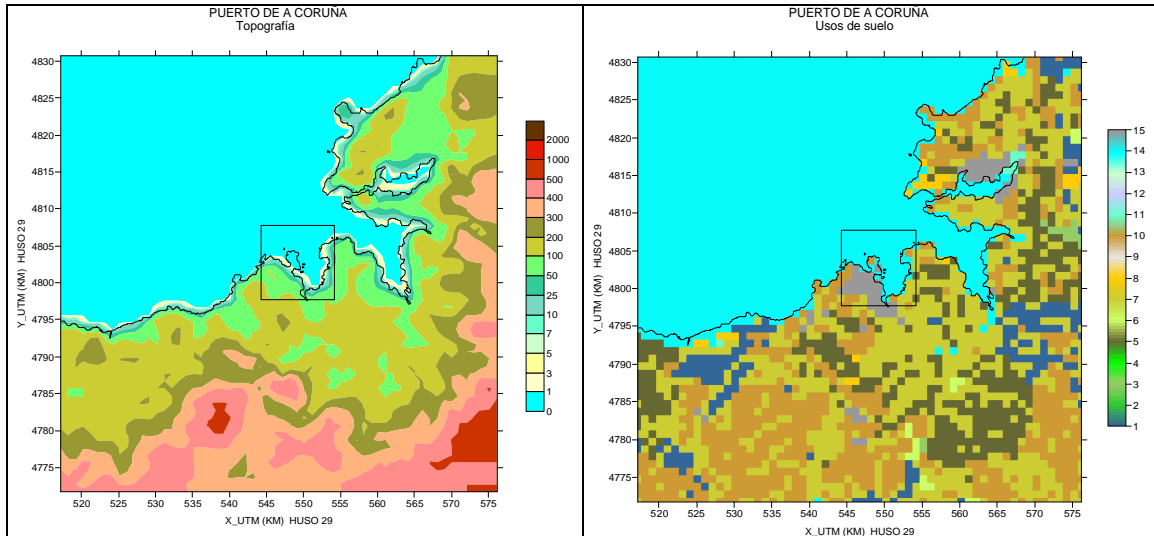


Figura 31. Topografía y usos de suelo del dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$ para el sistema informático de A Coruña. Las coordenadas son UTM_Km huso 29. Este es el único puerto cuyas coordenadas están en Huso 29.

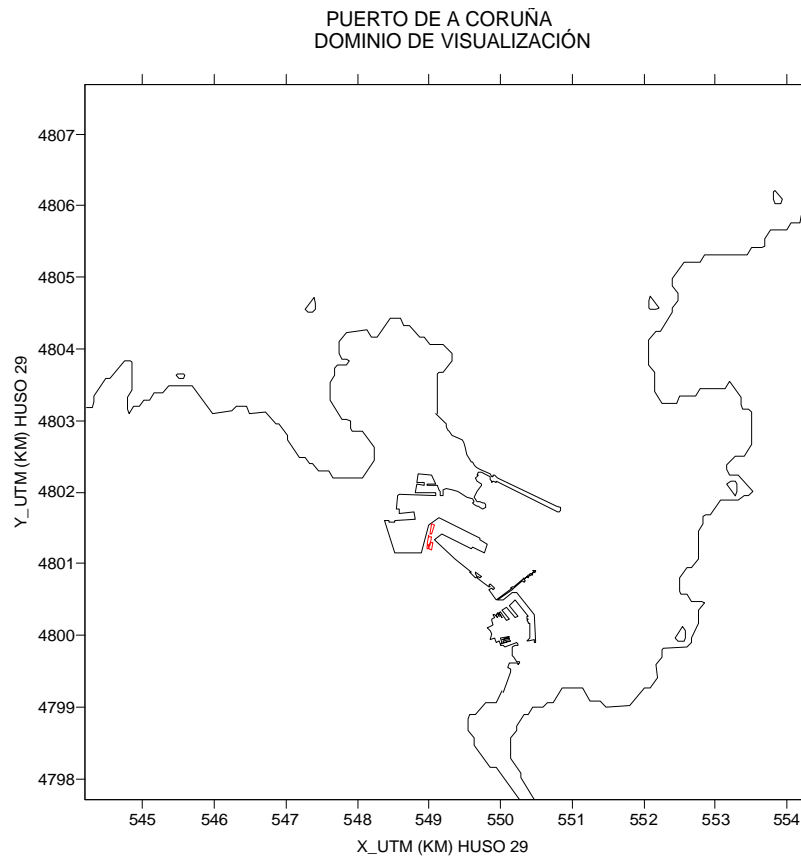


Figura 32. Dominio de visualización que incluye perfil del puerto y edificios de interés (en rojo) para el sistema informático de A Coruña. Las coordenadas son UTM_Km huso 29. Este es el único puerto cuyas coordenadas están en Huso 29.

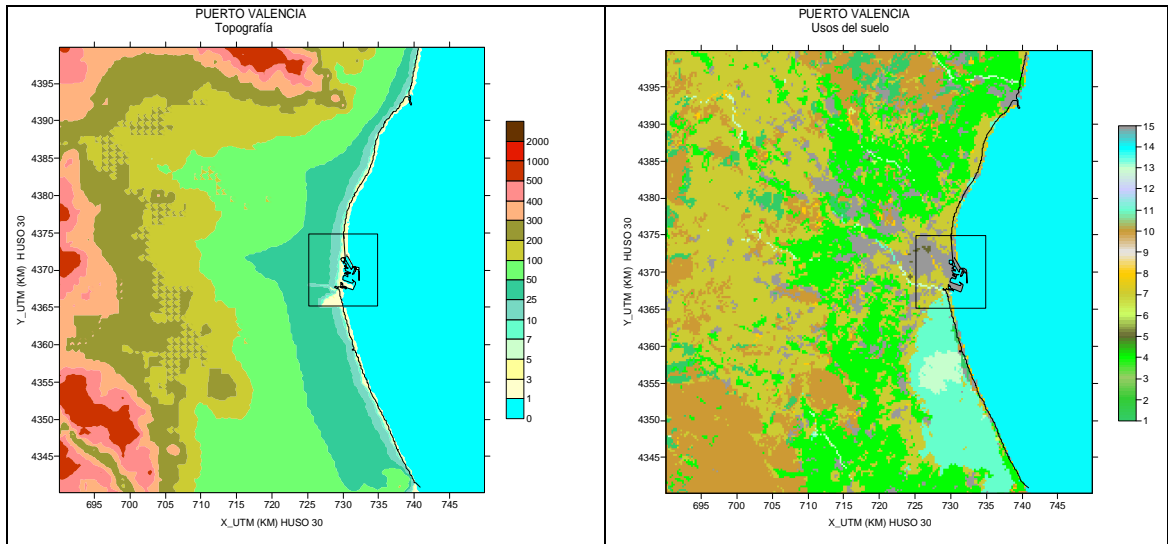


Figura 33. Topografía y usos de suelo del dominio de 60 x 60 km² para el sistema informático de Valencia.

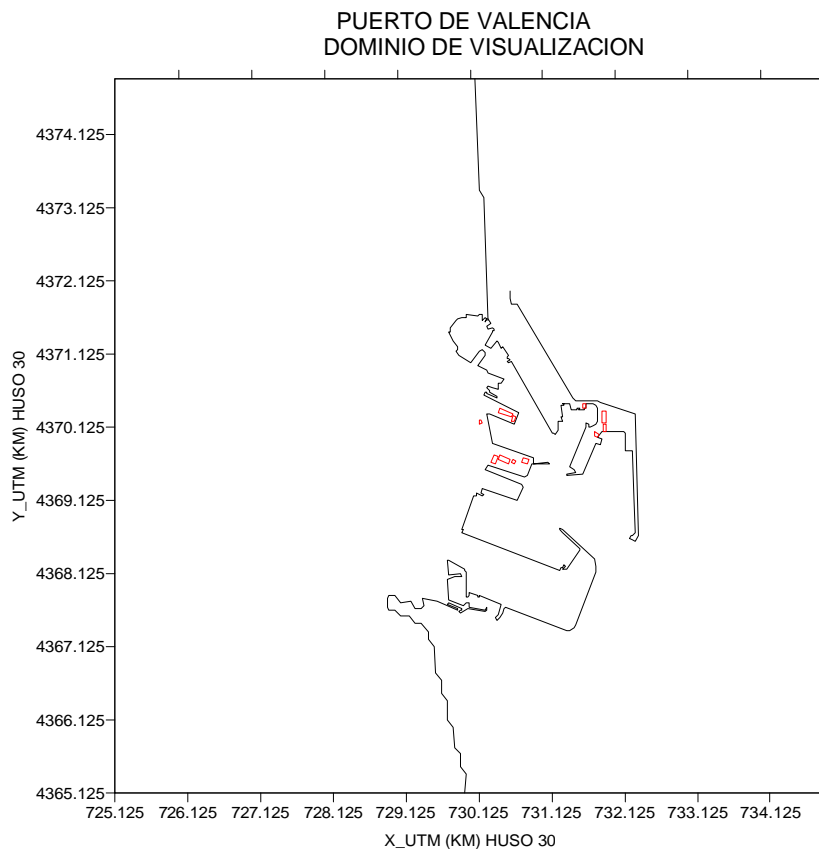


Figura 34. Dominio de visualización que incluye perfil del puerto y edificios de interés (en rojo) para el sistema informático de Valencia

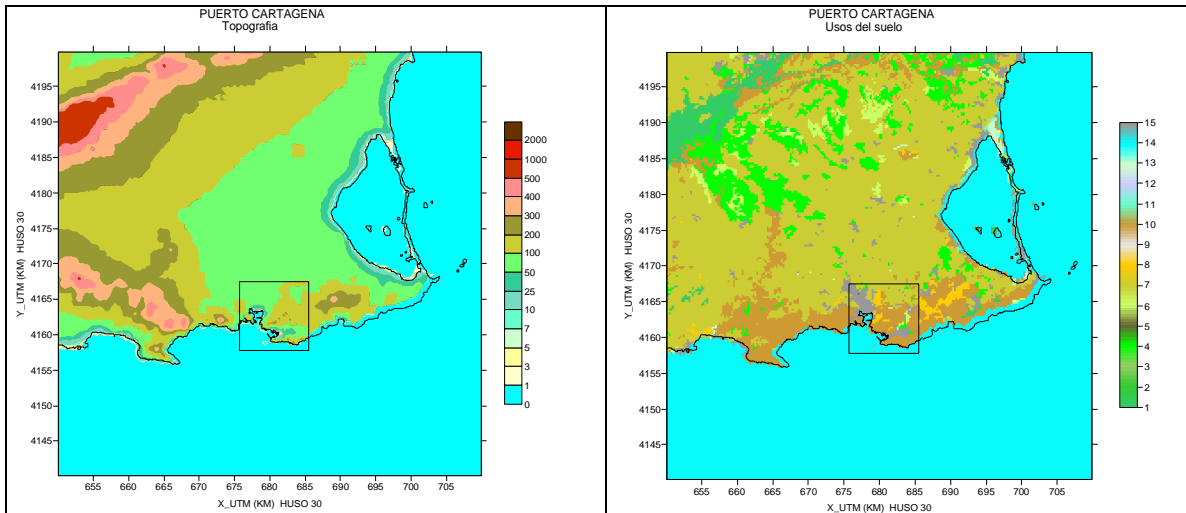


Figura 35. Topografía y usos de suelo del dominio de 60 x 60 km² para el sistema informático Cartagena.

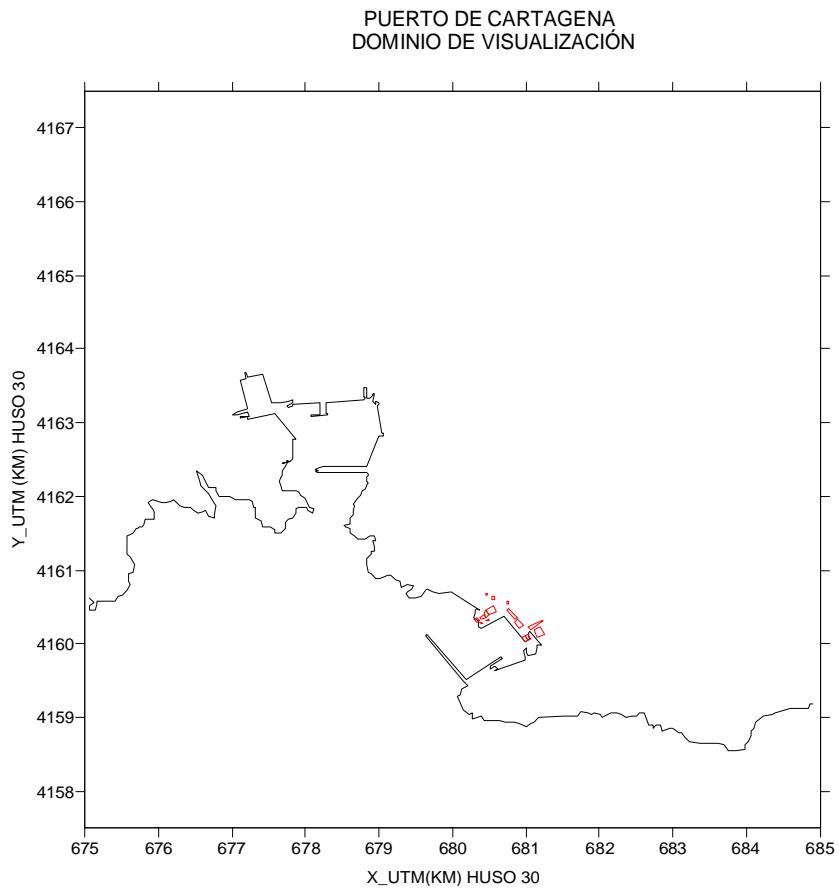


Figura 36. Dominio de visualización del puerto de Cartagena. Edificios, puerto y línea costera. Coordenadas UTM (km) huso 30

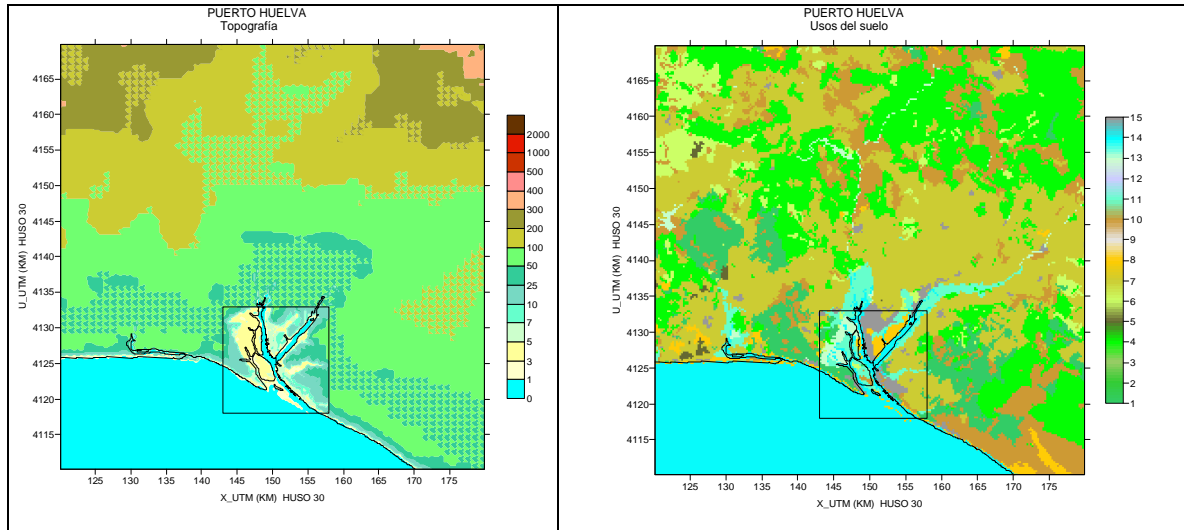


Figura 37. Topografía y usos de suelo del dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$ para el sistema informático de Huelva.

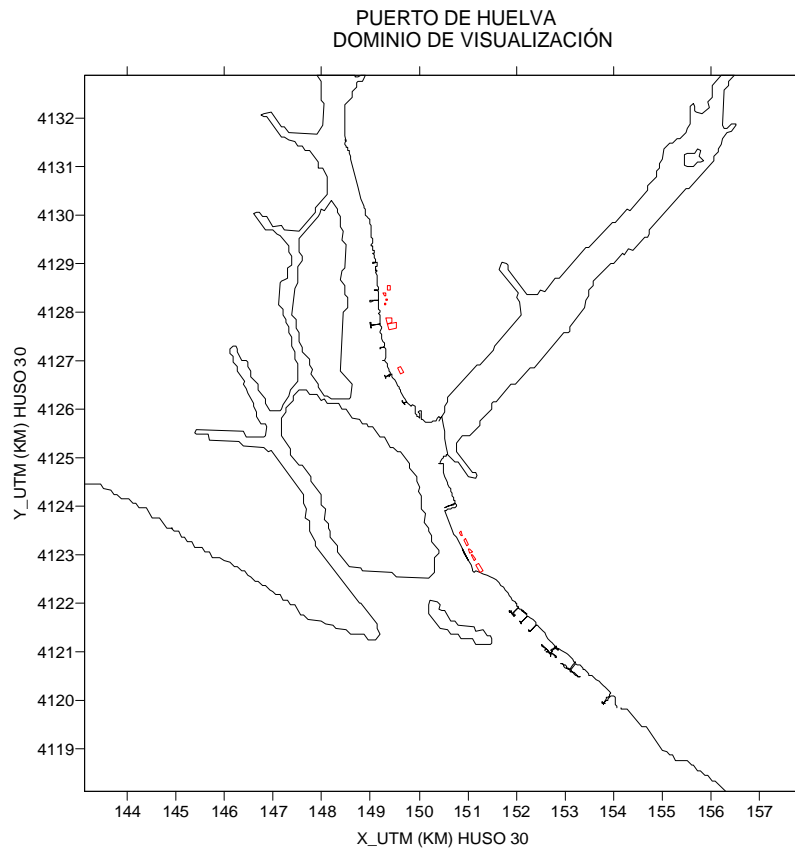


Figura 38. Dominio de visualización del puerto de Huelva. Edificios, puerto y línea costera.

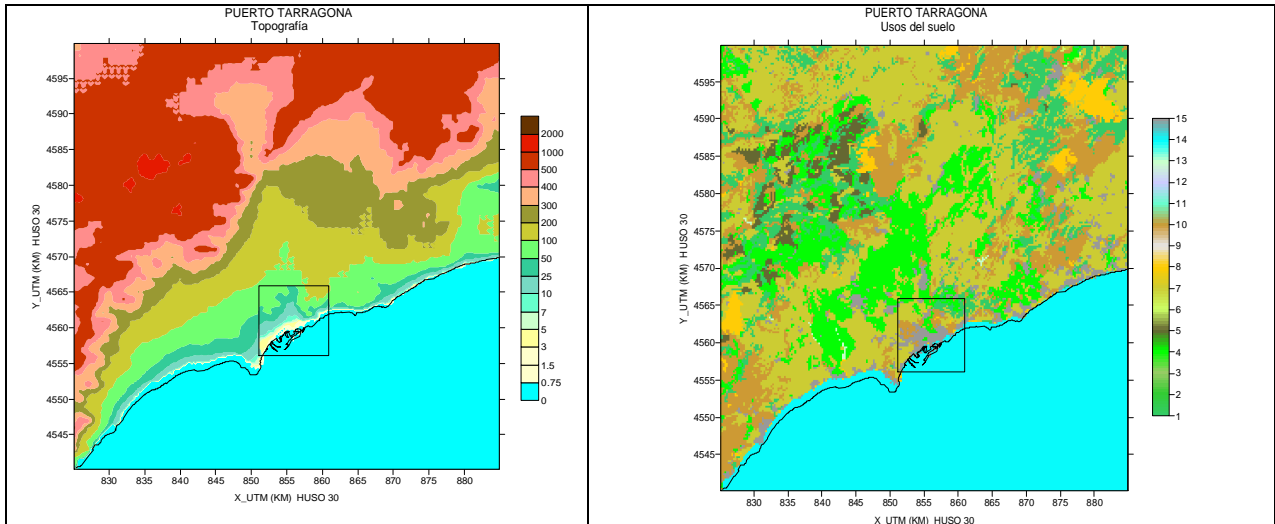


Figura 39. Topografía y usos de suelo del dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$ para el sistema informático de Tarragona.

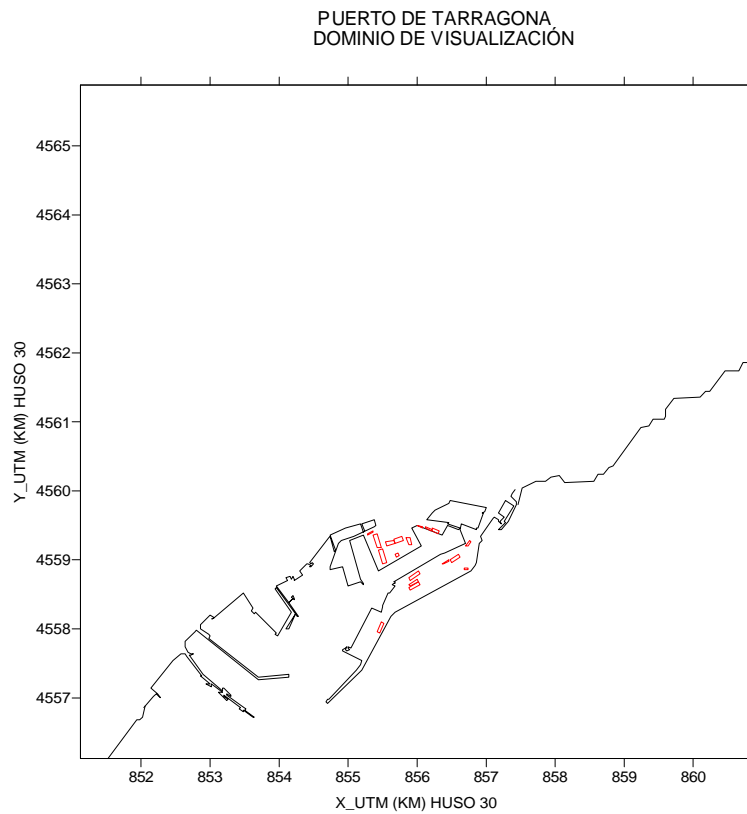


Figura 40. Dominio de visualización del puerto de Tarragona. Edificios, puerto y línea costera.

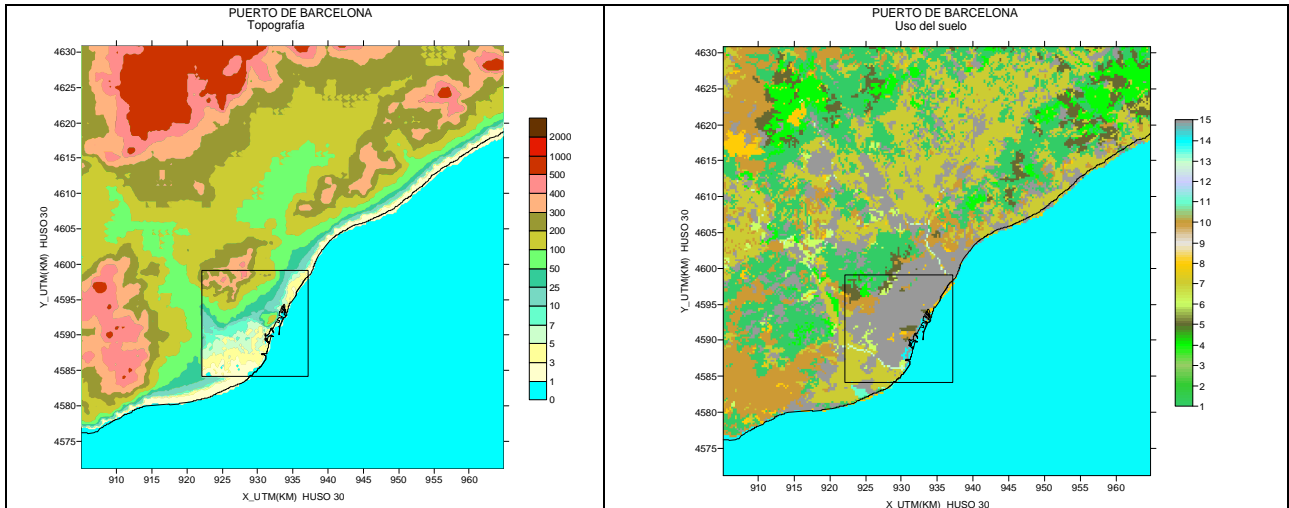


Figura 41. Topografía y usos de suelo del dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$ para el sistema informático de Barcelona.

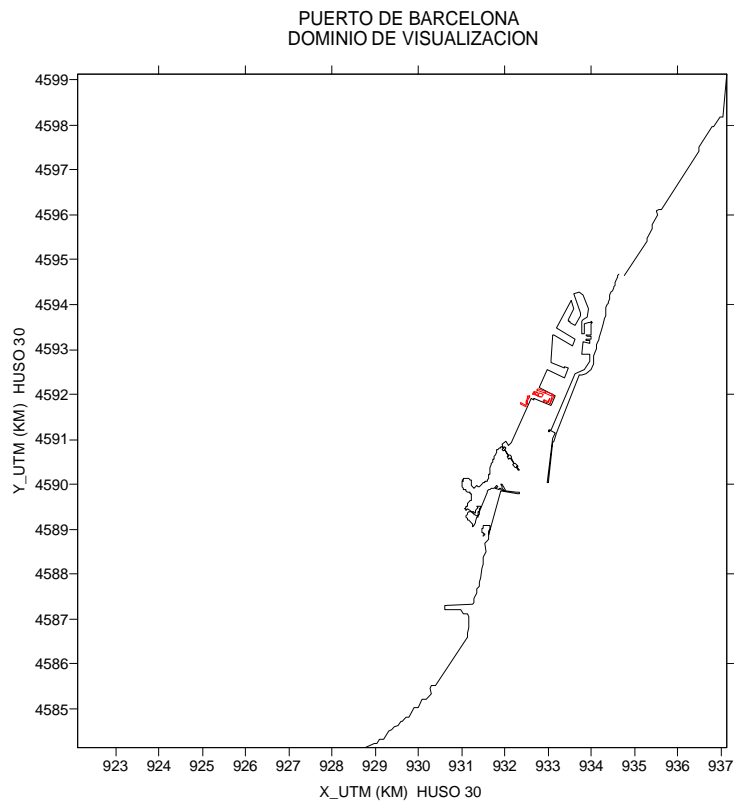


Figura 42. Dominio de visualización del puerto de Barcelona. Edificios (rojo), puerto y línea costera.

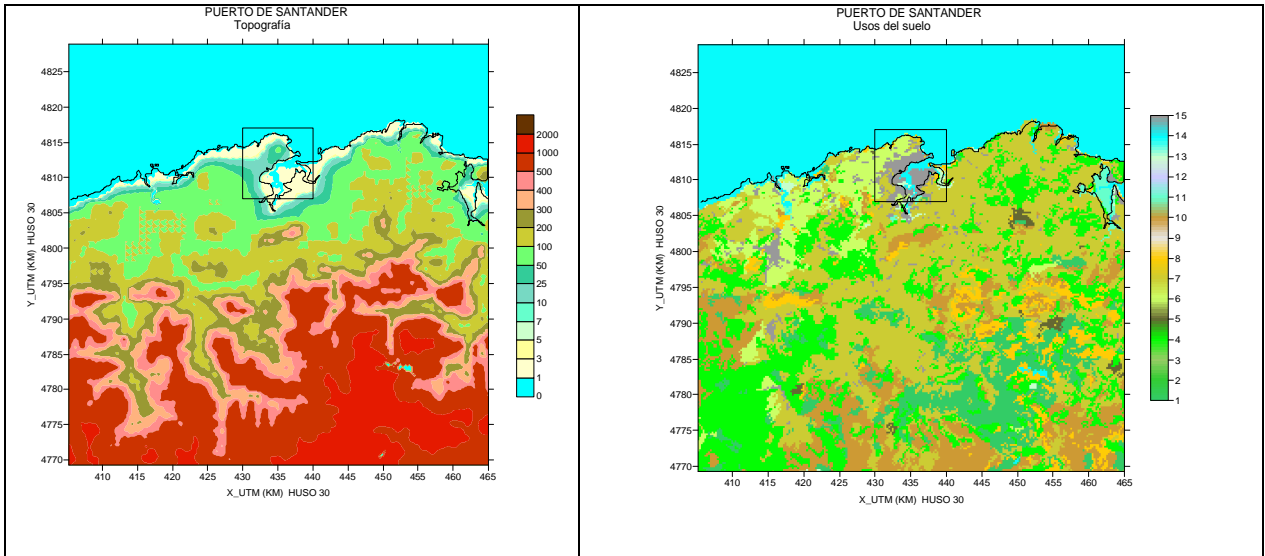


Figura 43. Topografía y usos de suelo del dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$ para el sistema informático de Santander.

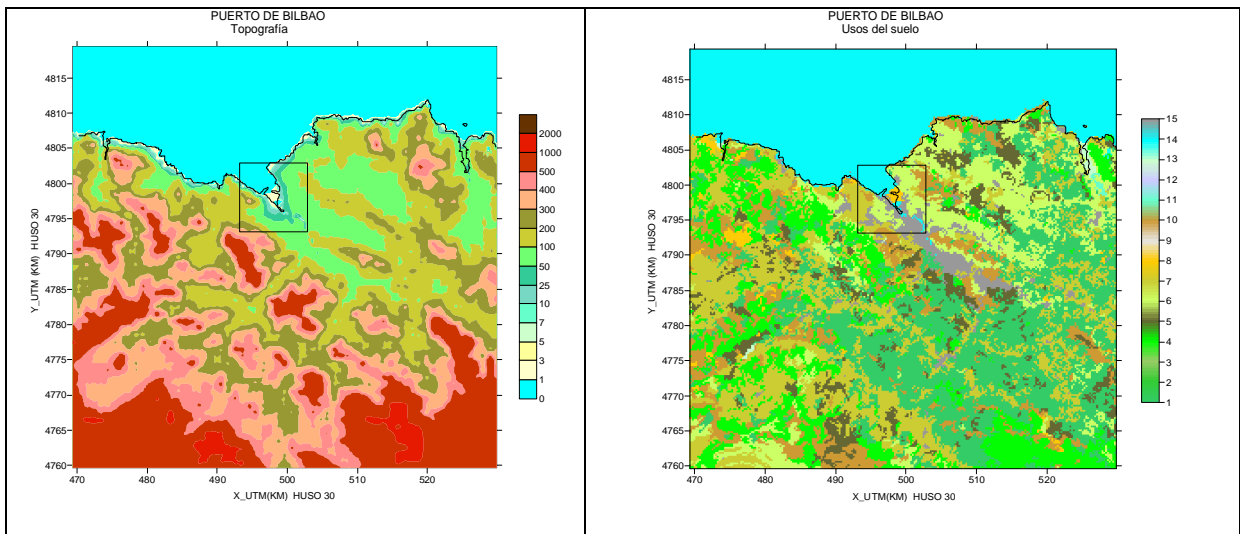


Figura 44.. Topografía y usos de suelo del dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$ para el sistema informático de Bilbao.

DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DEL MÓDULO SEDPORT

En un principio, se pensó en este módulo para el tratamiento exclusivo de partículas sedimentables, es decir, aquellas de tamaño superior a 10 micras de diámetro que pudieran estar afectadas significativamente por la sedimentación gravitacional. Sin embargo, en el desarrollo de los trabajos se comprobó que era mucho más conveniente desarrollar e implantar un nuevo módulo para el tratamiento del depósito de todo tipo de partículas en suspensión según su tamaño e teniendo en cuenta la mayor parte de los procesos implicados.

SEDPORT se ha diseñado entonces como un nuevo esquema de cálculo del depósito de partículas y ha sido implantado dentro del modelo PORTPUFF como un conjunto de subrutinas encargadas de estimar la cantidad de partículas depositadas en la superficie.

El depósito seco de gases y partículas atmosféricas sobre una superficie receptora responde a la ecuación (42) y está gobernado por la concentración en aire de contaminante, por el transporte turbulento en la capa límite atmosférica, por la naturaleza físico-química de las especies que se depositan y la capacidad de la superficie para capturar y/o absorber esos gases y partículas. El transporte de gases y partículas desde la atmósfera hasta las proximidades de la superficie receptora está gobernado por el nivel de turbulencia atmosférica la cual se genera por procesos mecánicos (cizalla del viento, rozamiento, efectos debidos a obstáculos sobre la superficie receptora tales como montañas, edificios, etc.) o por procesos térmicos (corrientes convectivas principalmente). Cuanto mayor sea la turbulencia, con mayor eficacia se transportará el contaminante hacia la superficie receptora y, por tanto, menor será el gradiente vertical de concentración de contaminante en la capa atmosférica sobre la superficie receptora. Es decir, en una capa límite inestable la generación de turbulencia es importante y, por tanto, el intercambio vertical de contaminante es también importante, lo que induce a una reducción de los gradientes verticales de concentración de contaminante. Por contra, una capa límite con estratificación estable actúa como inhibidora de los movimientos verticales y, por tanto, también de los intercambios verticales de contaminante con lo cual existe una tendencia a mantener al menos los gradientes verticales originales de contaminante. Estos gradientes pueden verse incrementados por la emisión de nuevos contaminantes, ya que los gradientes dependen también de la configuración y localización vertical de las fuentes emisoras de contaminante. Por todo esto, en general, los gradientes verticales de contaminante son más intensos en situaciones de estabilidad atmosférica que en las de inestabilidad.

Podemos distinguir dentro de la capa límite dos subcapas: una capa turbulenta propiamente dicha y otra capa cuasi-laminar. La segunda capa se sitúa entre la primera capa y la superficie receptora y su espesor es muy pequeño (del orden de mm). En la capa cuasi-laminar, el transporte está dominado por la difusión molecular, mientras que en la capa turbulenta es la turbulencia la encargada de ese transporte. De todos es conocido que la difusión molecular es mucho menos eficaz que la difusión turbulenta.

Una vez que el contaminante ha llegado a la superficie, su captura y absorción vienen determinadas por la naturaleza química, biológica y física de la superficie y del contaminante mismo. Por ejemplo, la captura de gases por la superficie receptora está controlada por la habilidad de la superficie para absorber especies químicas específicas; más concretamente, el SO_2 como gas soluble es fácilmente incorporado a través de los

estomas o a través de la cutícula de la hoja o a través de las películas de agua sobre la superficie de la hoja o del suelo.

El modelo de resistencias para el cálculo de la velocidad de depósito de un contaminante dado (recordar ecuación 42) se basa en el concepto de la resistencia que opone cada uno de los medios implicados al transporte del contaminante hasta la superficie receptora. Surge como una analogía a la circulación de corriente eléctrica a lo largo de un circuito. Son tres los tramos que recorre un contaminante hasta que es absorbido por la superficie receptora. Primero, a través de la capa turbulenta atmosférica; segundo, a través de la capa cuasi-laminar y por último, el contaminante debe ser capturado y absorbido por la superficie receptora. Cada uno de estos tramos ofrece una resistencia al transporte del contaminante. Por consiguiente, tenemos las resistencias aerodinámica (R_a), cuasi laminar (R_b) y la resistencia superficial (R_c) que se corresponden a cada uno de los tramos antes indicados. La velocidad de depósito (V_d) será entonces la inversa de la resistencia total considerando que las anteriores mantienen una configuración en serie.

$$V_d = \frac{I}{R_a + R_b + R_c} \quad (66)$$

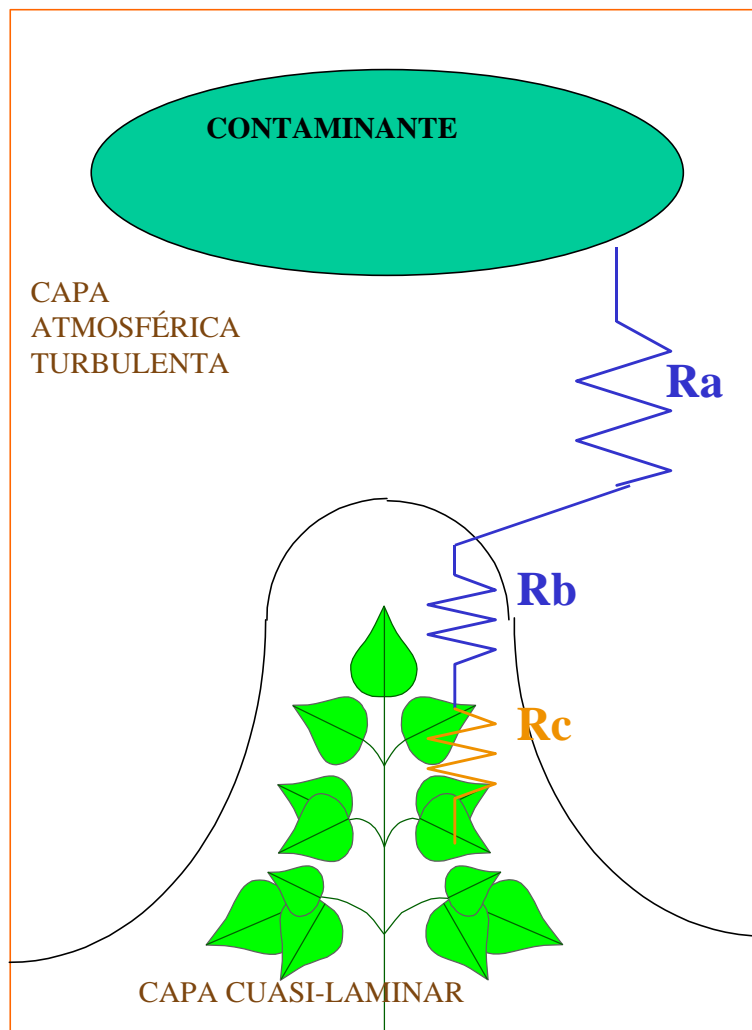


Figura 45. Esquema de resistencias al depósito de contaminantes.

La resistencia aerodinámica es básicamente función de la velocidad de fricción, de la altura de desplazamiento y de la rugosidad. Estos parámetros dependen de las características del suelo y también de la velocidad del viento. Además, la resistencia aerodinámica no es constante con la altura.

La resistencia cuasi-laminar depende de las características turbulentas y de la difusión molecular del contaminante considerado. El transporte del contaminante a través de la capa cuasi-laminar por difusión molecular depende del espesor de la capa, del gradiente de concentración sobre ésta y de la constante de difusión del contaminante.

La resistencia superficial solamente depende de la superficie receptora. A su vez, puede descomponerse en varias resistencias: del estoma, del mesófilo, de la cutícula, del dosel vegetal, exterior y del suelo. Estas dependen en gran medida de la humedad y temperatura de la superficie, del “leaf área index”, del PH y de la radiación global entre otras variables.

Más detalles sobre la metodología de resistencias para la estimación del depósito seco de contaminante puede encontrarse en (Hicks et al, 1987 y Fowler, 1986).

La incorporación del modelo de resistencias para el cálculo del depósito de contaminantes ha exigido la inclusión en PORTPUFF de nuevas subrutinas y funciones y la incorporación de datos de uso de suelo y parámetros asociados como rugosidad del terreno y resistencia superficial. La resistencia superficial toma distintos valores dependiendo de la estación del año y de si es día o noche. Por el momento este modelo de resistencias sólo es utilizado para el SO₂, pero se extenderá su uso a otros contaminantes.

El depósito de partículas atmosféricas presenta diferencias notables respecto a los gases. De hecho, $R_c = 0$, ya que se considera que al chocar con la superficie permanecen sobre ella. Además las partículas están afectadas por la sedimentación gravitacional V_g , lo que supone un camino adicional para depositar contaminante que no tiene aplicación en el caso de los gases. Por tanto, en el caso de las partículas, la velocidad de depósito implica también resistencias en paralelo:

$$V_d = \frac{I}{R_a + R_b + R_a R_b V_g} + V_g \quad (67)$$

La sedimentación gravitacional es función del tamaño de la partícula, forma y densidad. Resulta de considerar la acción de la fuerza de la gravedad y de la fuerza de arrastre (opuesta siempre al movimiento de la partícula) producida por la viscosidad del aire. Esto da lugar a la conocida ley de Stokes. Considerando partículas de forma prácticamente esférica, la ley de Stokes toma la siguiente forma:

$$V_g = \frac{[d_p^2 g (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_a) C]}{18\mathbf{m}} \quad (68)$$

donde d_p es el diámetro de la partícula (m), \mathbf{r}_p es la densidad de la partícula (g/m^3), \mathbf{r}_a es la densidad del aire (g/m^3) y C es factor de corrección de Cunningham para partículas pequeñas:

$$C = 1 + (2I / d_p) \left[a_1 + a_2 e^{(-a_3 d_p / I)} \right] \quad (69)$$

siendo I el recorrido libre medio de las moléculas de aire ($I=6.53 \cdot 10^{-6}$ cm) y a_1 , a_2 y a_3 son constantes (=1.257, 0.40 y 0.55 respectivamente).

La resistencia aerodinámica responde a:

$$R_a = \frac{\text{Ln}(z_R / z_0) - \Psi_H}{ku_*} \quad (70)$$

siendo z_R la altura de referencia sobre el suelo a que se calcula la velocidad de depósito, z_0 la altura de rugosidad del terreno, Ψ_H una función de la estabilidad atmosférica, k la constante de Von Karman y u_* la velocidad de fricción.

La resistencia cuasilaminar, en el caso de las partículas, engloba diversos procesos: movimiento browniano, el impacto e intercepción de las mismas con o por la superficie terrestre:

$$R_b = \frac{1}{e_0 u_* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_I} \quad (71)$$

donde E_B , E_{IM} , E_{IN} son las eficiencias de difusión Browniana, impacto e intercepción, respectivamente; R_I es un factor de corrección representando a la fracción de partículas que golpean y se pegan al terreno y e_0 es una constante empírica que toma el valor de 3 independientemente del tipo de terreno.

La eficiencia de la difusión Browniana puede ser estimada mediante:

$$E_B = Sc^{-g} \quad (72)$$

donde Sc es el número de Schmidt que es la razón entre la viscosidad cinemática y la difusividad Browniana. g toma valores entre 1/2 y 2/3 con valores mayores para superficies más rugosas.

La eficiencia del proceso de impacto de partículas con obstáculos del terreno viene dada por:

$$E_{IM} = \left(\frac{St}{a + St} \right)^b \quad (73)$$

donde a depende del tipo de suelo y β es igual a 2 y St es el número de Stokes.

La eficiencia del proceso de intercepción de partículas por obstáculos del terreno se estima mediante:

$$E_{IN} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{A} \right)^2 \quad (74)$$

donde d_p es el diámetro de la partícula y A es el radio característico de los elementos colectores del terreno. Este, por tanto, dependerá del tipo de terreno.

Las partículas mayores de 5 micras pueden rebotar una vez que golpean el terreno. La fracción de partículas que se quedan pegadas a él se calcula con:

$$R_1 = \exp(-St^{0.5}) \quad (75)$$

Se asume que las partículas que chocan con una superficie húmeda no rebotan.

Sobre esta formulación, se ha desarrollado el módulo SEDPORT, que a su vez ha sido incorporado a PORTPUFF. En las tablas 4 y 5, pueden verse los tipos de suelo considerados y los valores de los distintos parámetros. Para más detalles sobre el esquema propuesto, se recomienda consultar el trabajo de Zhang et al. (2001).

Table 2
Land use categories (LUC) and seasonal categories (SC) used in
Canadian Aerosol Module

Category	Description
<i>Land use categories (LUC)</i>	
1	Evergreen-needleleaf trees
2	Evergreen broadleaf trees
3	Deciduous needleleaf trees
4	Deciduous broadleaf trees
5	Mixed broadleaf and needleleaf trees
6	Grass
7	Crops, mixed farming
8	Desert
9	Tundra
10	Shrubs and interrupted woodlands
11	Wet land with plants
12	Ice cap and glacier
13	Inland water
14	Ocean
15	Urban
<i>Seasonal categories (SC)</i>	
1	Midsummer with lush vegetation.
2	Autumn with cropland that has not been harvested.
3	Late autumn after frost, no snow.
4	Winter, snow on ground and sub-freezing.
5	Transitional spring with partially green short annuals.

Tabla 4. Tipos de uso de suelo y categorías de estación del año utilizadas en SEDPORT (Zhang et al., 2001)

Table 3
Parameters for 12 land use categories (LUC) and five seasonal categories (SC)^a

LUC		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Z_0 (m)	SC 1	0.8	2.65	0.85	1.05	1.15	0.1	0.1	0.04	0.03	0.1	0.03	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 2	0.9	2.65	0.85	1.05	1.15	0.1	0.1	0.04	0.03	0.1	0.03	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 3	0.9	2.65	0.80	0.95	1.15	0.05	0.02	0.04	0.03	0.1	0.02	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 4	0.9	2.65	0.55	0.55	1.15	0.02	0.02	0.04	0.03	0.1	0.02	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 5	0.8	2.65	0.60	0.75	1.15	0.05	0.05	0.04	0.03	0.1	0.03	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
A (mm)	SC 1	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 2	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 3	2.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 4	2.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 5	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
α		1.0	0.6	1.1	0.8	0.8	1.2	1.2	50.0	50.0	1.3	2.0	50.0	100.0	100.0	1.5
γ		0.56	0.58	0.56	0.56	0.56	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.50	0.50	0.56

^aNote: $f(u)$ represents a function of wind speed (u) and na represents not applicable.

Tabla 5. Valores asignados a distintos parámetros de SEDPORT según los tipos de uso de suelo y categorías de estación del año (Zhang et al., 2001)

En la figura 46, se muestra como varía la velocidad de depósito de las partículas en función de su tamaño para unas condiciones atmosféricas y de la superficie dadas según el esquema de Zhang et al.(2001). Se puede apreciar como el movimiento Browniano es el responsable de que las velocidades de depósito en partículas muy pequeñas sean mayores de lo que se podría esperar; como se produce un mínimo en esa velocidad en torno a diámetros de 1 a 2 micras; como los procesos de impacto e intercepción tienen efecto notable en diámetros entre 2 y 20 micras y, por último, como la sedimentación gravitacional domina de forma clara a partir de 20 micras.

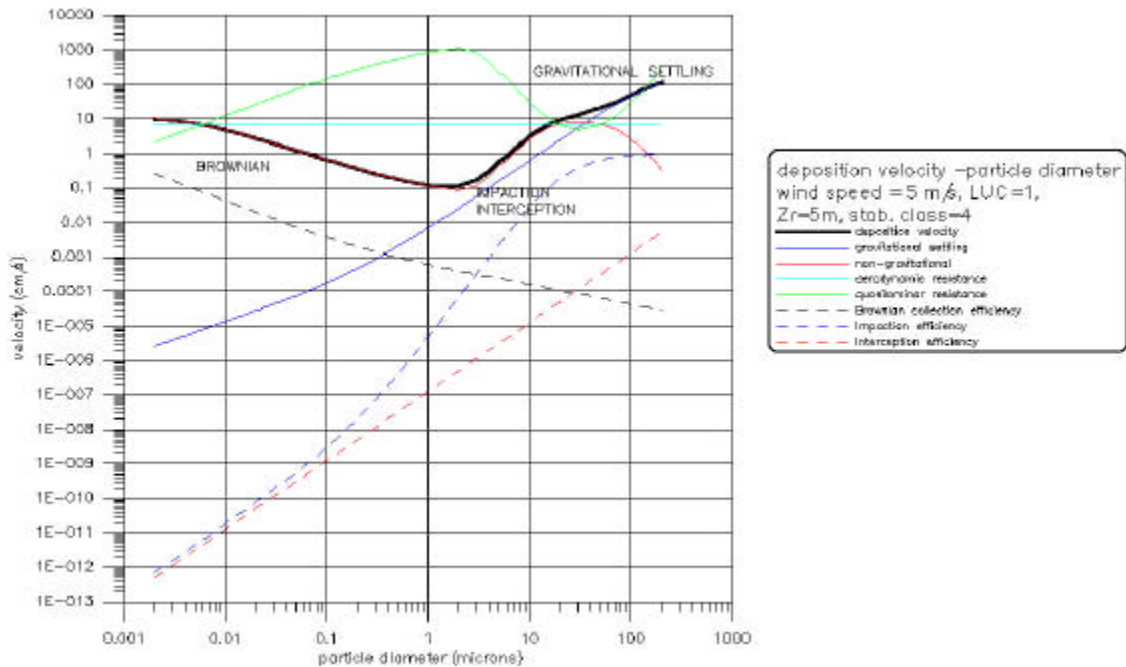


Figura 46. Velocidad de depósito frente al diámetro de las partículas y procesos más relevantes implicados.

Con objeto de verificar el funcionamiento de SEDPORT y su implantación en PORTPUFF se han realizado algunas pruebas que se detallan a continuación. Estas han consistido en simular la dispersión y depósito de partículas según su tamaño en función

de la densidad de la partícula, rugosidad del terreno, velocidad del viento y estabilidad atmosférica y considerando una única fuente de emisión de partículas emitiendo 100 Kgr/h de cada tipo de partícula.

En la figura 47, se muestra el depósito y la concentración de partículas en los cinco rangos de tamaños propuestos, en condiciones de viento, rugosidad, estabilidad y densidad indicados. En el caso de las partículas mayores (diámetro > 20 micras), la velocidad de depósito es lo suficientemente alta para que la inmensa mayoría de las mismas se depositen junto a la fuente emisora. La zona afectada por depósito de partículas y concentraciones significativas de contaminantes se va alargando según disminuye el tamaño de las partículas. En la tabla adjunta a la figura, se observan las concentraciones y depósitos máximos estimados. Puede verse claramente que ambas evolucionan de forma opuesta en función del tamaño de la partícula. Los máximos de concentración y los depósitos más bajos se observan en las partículas pequeñas, mientras que en las partículas grandes es al contrario.

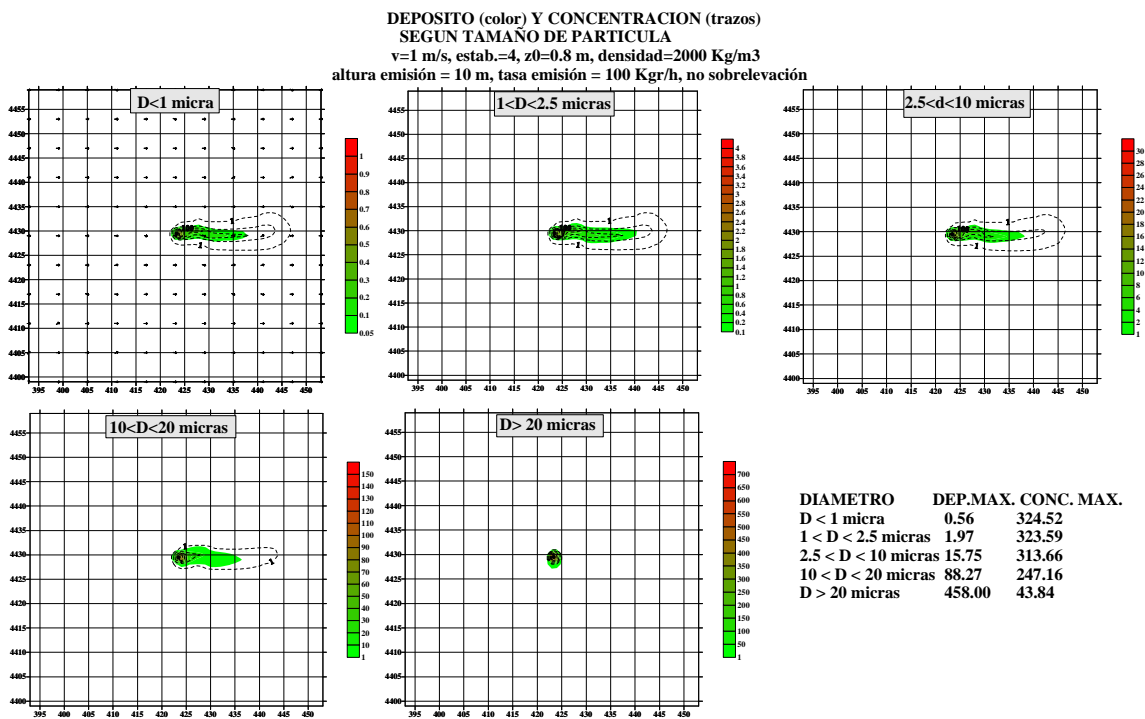


Figura 47. Depósito y concentración de partículas en los cinco rangos de tamaños propuestos, en condiciones de viento, rugosidad, estabilidad y densidad indicados.

Los efectos de la estabilidad atmosférica se exponen en las figuras 48 a 51. El resultado evidente es que el depósito de contaminantes es más rápido (mayores velocidades de depósito) cuanto mayor sea la inestabilidad (estabilidad 1) en todos los rangos de tamaños debido al aumento de las resistencias aerodinámicas y cuasilaminares con el grado de estabilidad (Figura 48). Por otro lado, la dispersión atmosférica es más efectiva con una atmósfera inestable debido a una mayor turbulencia. Esto da lugar a que el área afectada por depósito sea más pequeña y las concentraciones en aire también sean menores. Como el depósito de partículas resulta de

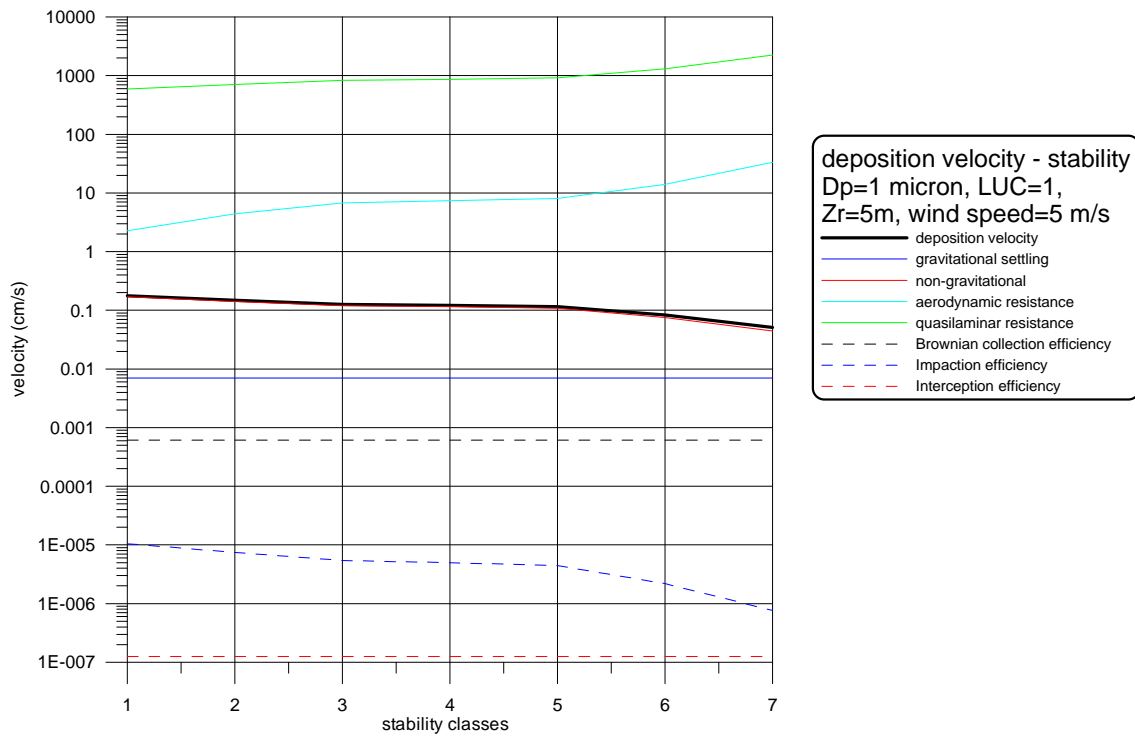


Figura 48. Velocidades de depósito y componentes de la misma en función del grado de estabilidad atmosférica (1=muy inestable, 4=neutra, 7=muy estable) en el caso de partículas de 1 micra de diámetro aerodinámico.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN ESTABILIDAD
 diametro <1 micra, v=1 m/s, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emision = 10 m, tasa emision = 100 Kgr/h, no sobrelevacion

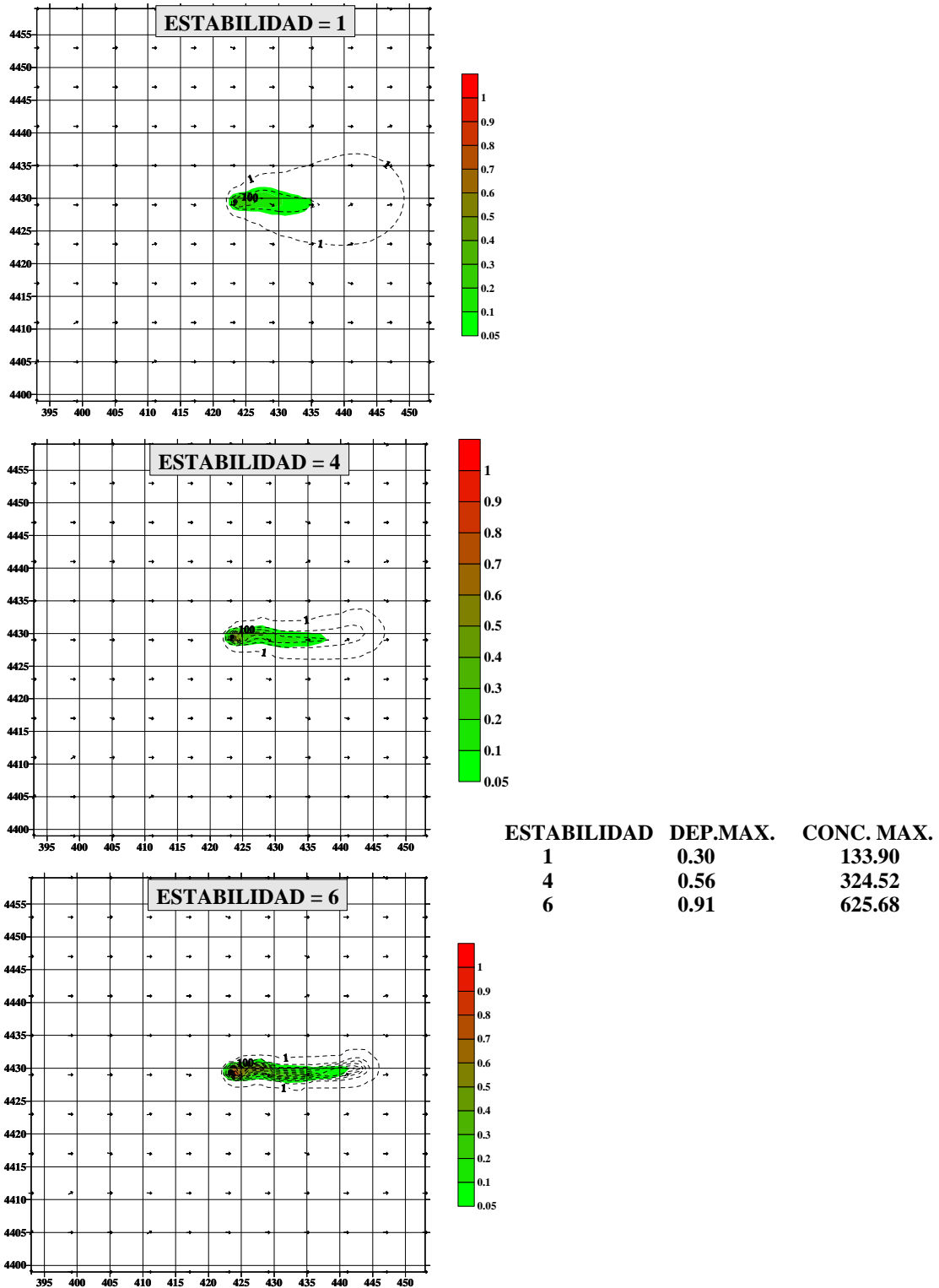


Figura 49. Depósito y concentración de partículas menores de 1 micra en tres tipos de clases de estabilidad (1, inestable; 4 neutra, 6 estable) en condiciones de viento, rugosidad y densidad indicados.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN ESTABILIDAD
 2.5 < diametro < 10 micras, v=1 m/s, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación

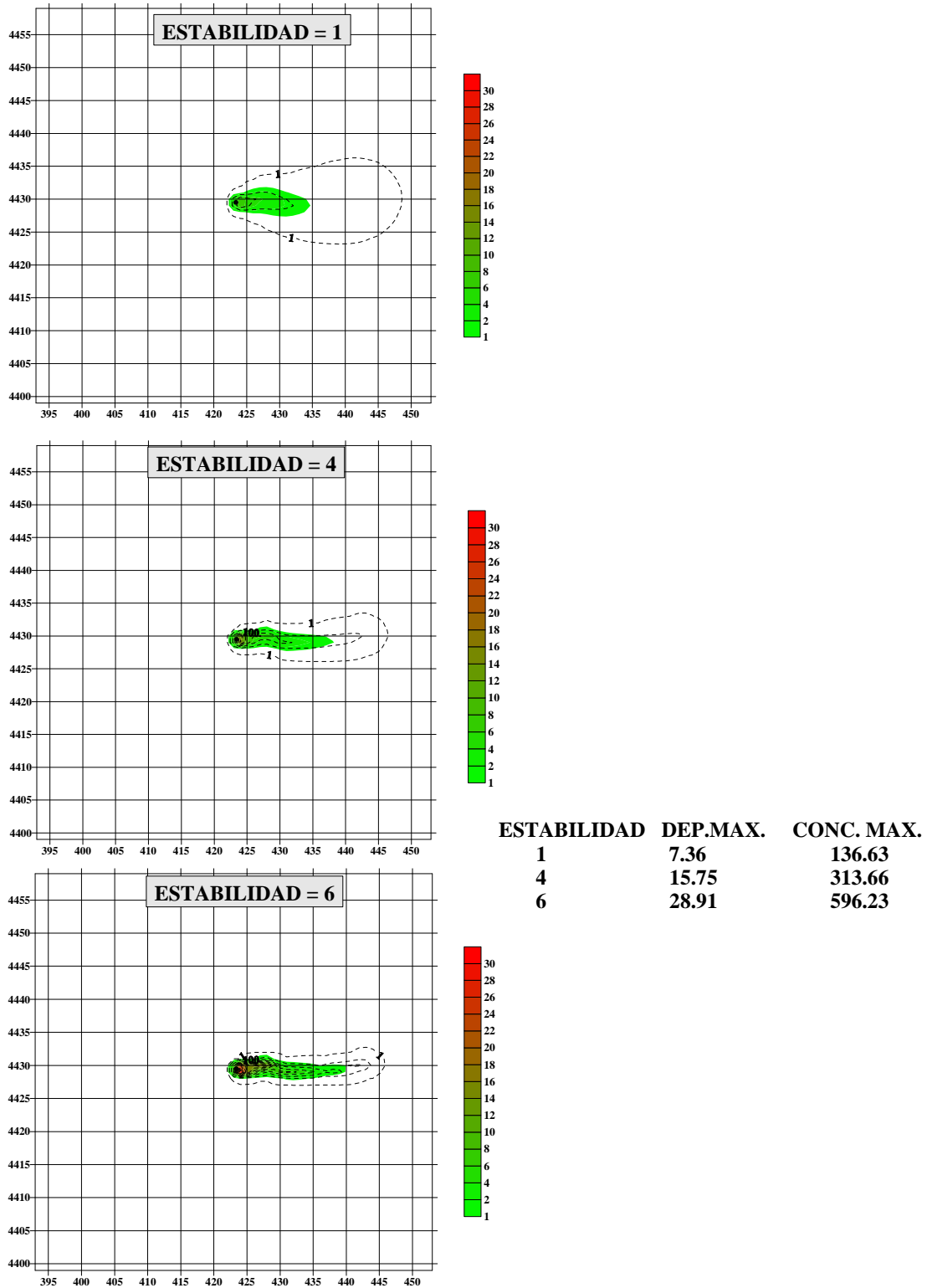
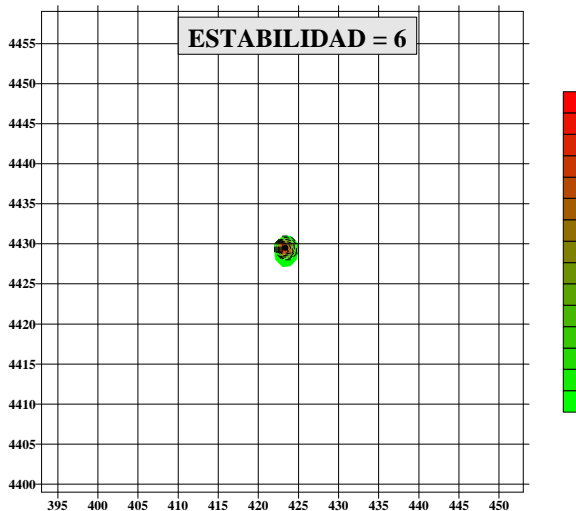
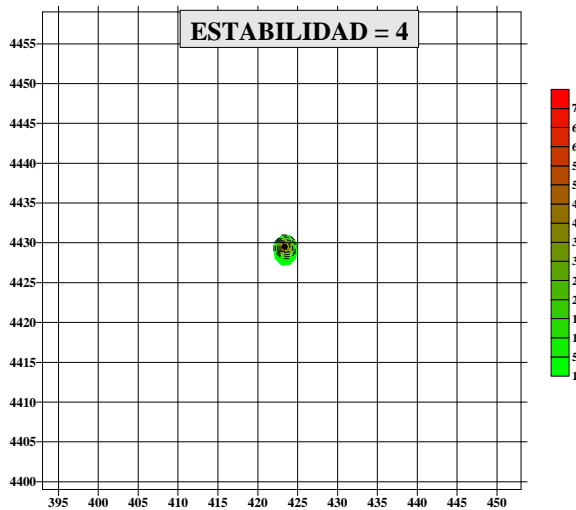
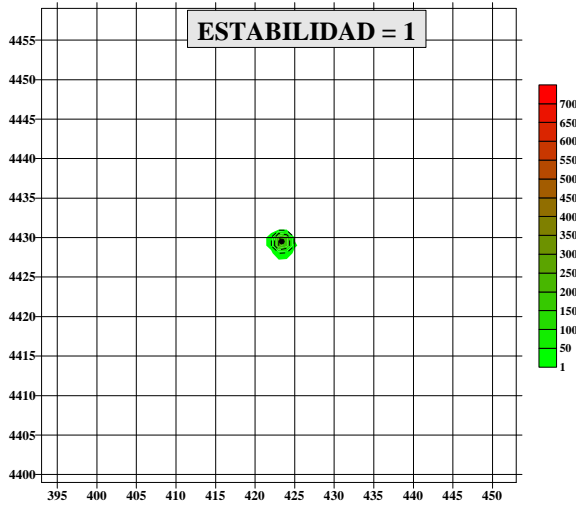


Figura 50. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras en tres tipos de clases de estabilidad (1, inestable; 4 neutra, 6 estable) en condiciones de viento, rugosidad y densidad indicados.

**DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN ESTABILIDAD**
 diametro > 20 micras, v=1 m/s, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación



ESTABILIDAD	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	222.68	20.73
4	458.00	43.84
6	631.97	61.22

Figura 51. Depósito y concentración de partículas mayores 20 micras en tres tipos de clases de estabilidad (1, inestable; 4 neutra, 6 estable) en condiciones de viento, rugosidad y densidad indicados.

El efecto de la velocidad del viento puede apreciarse en las figuras 52 a 55. Existe una marcada tendencia a que la velocidad de depósito aumente con la velocidad del viento debido a la disminución en las resistencias aerodinámicas y cuasilaminares. Además la dispersión atmosférica aumenta con la velocidad del viento al existir mayor turbulencia mecánica. El área afectada por depósito de partículas es mayor cuanto mayor es el viento debido a un transporte atmosférico más efectivo. No obstante, las concentraciones en aire son menores.

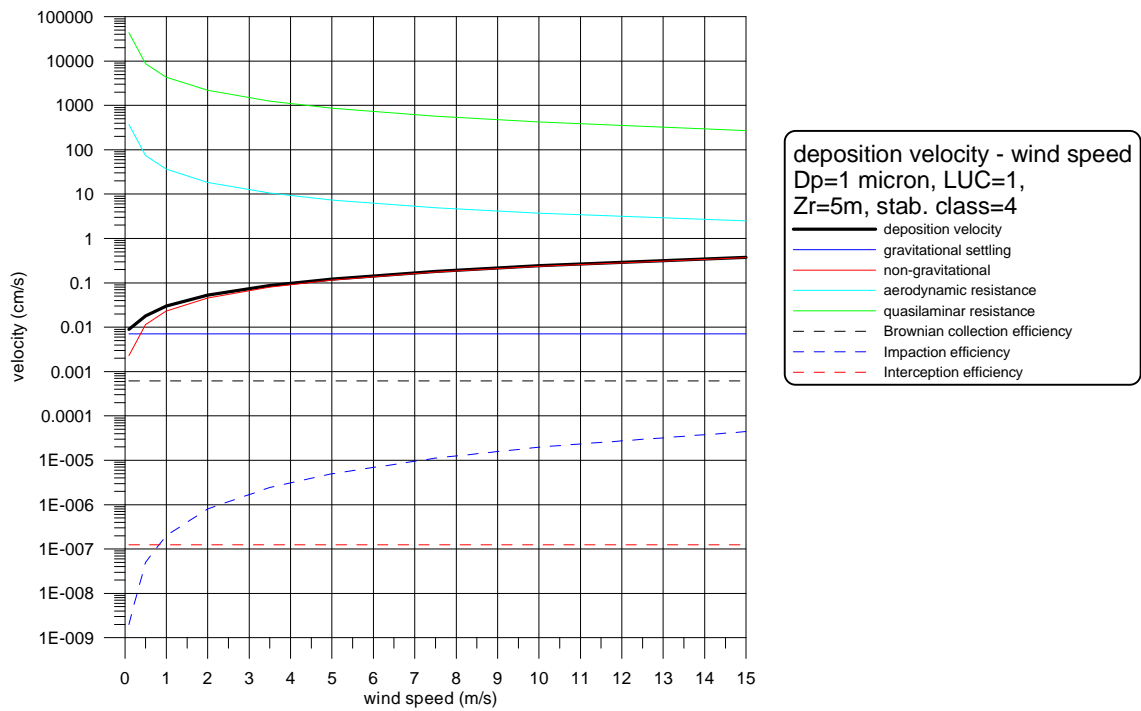
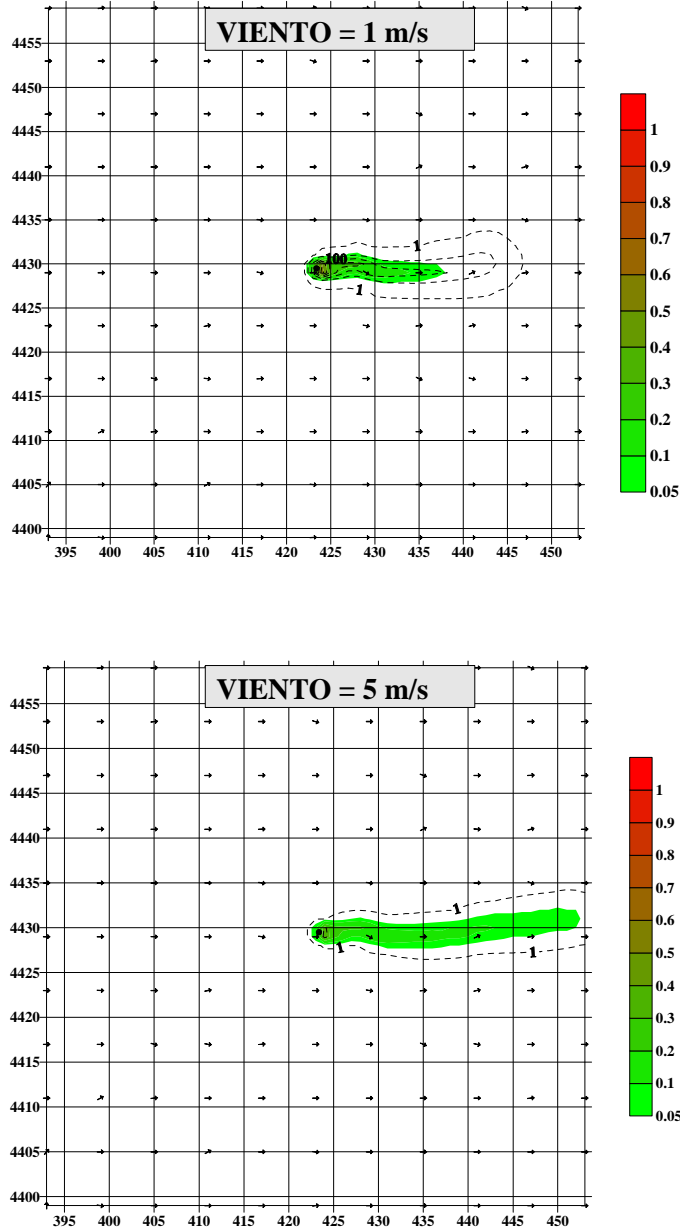


Figura 52. Velocidades de depósito y componentes de la misma en función de la velocidad del viento en el caso de partículas de 1 micra de diámetro aerodinámico.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN VIENTO
 diametro <1 micra, estabilidad = 4, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación

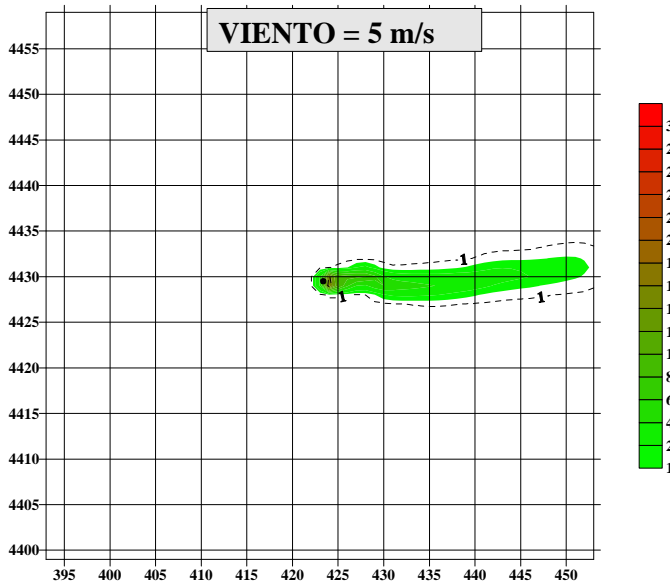
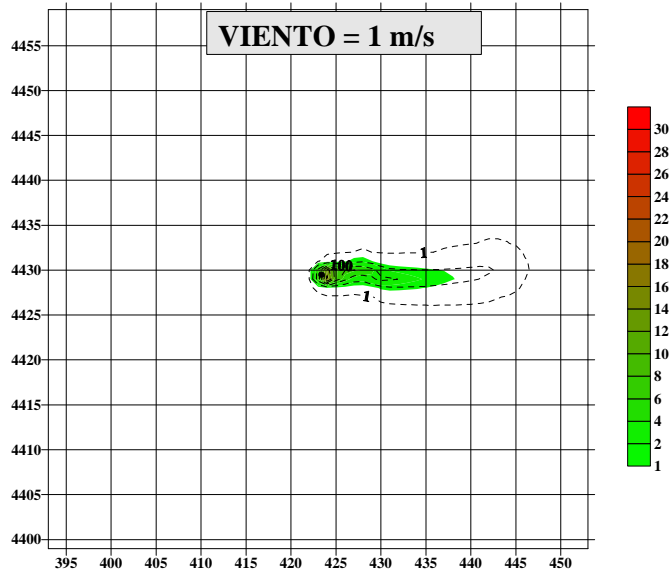


VIENTO	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	0.56	324.52
5	0.37	56.78

Figura 53. Depósito y concentración de partículas menores de 1 micra para dos velocidades de viento en condiciones de estabilidad, rugosidad y densidad indicados.

**DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN VIENTO**

**2.5 < diametro < 10 micras, estabilidad = 4, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación**

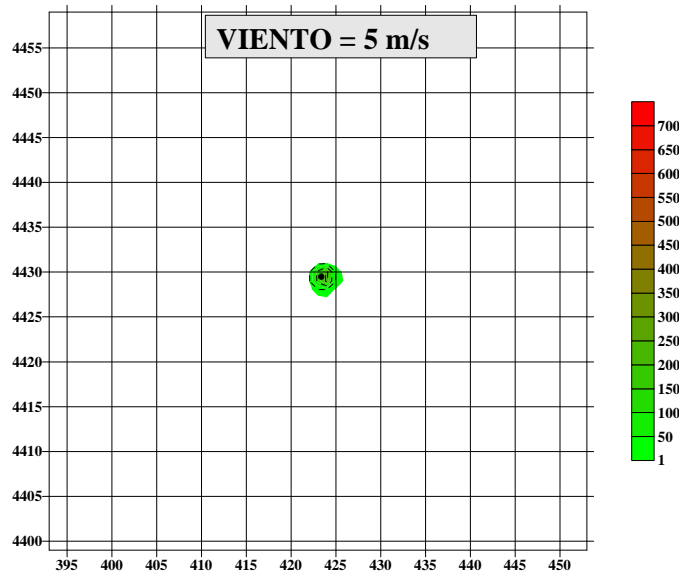
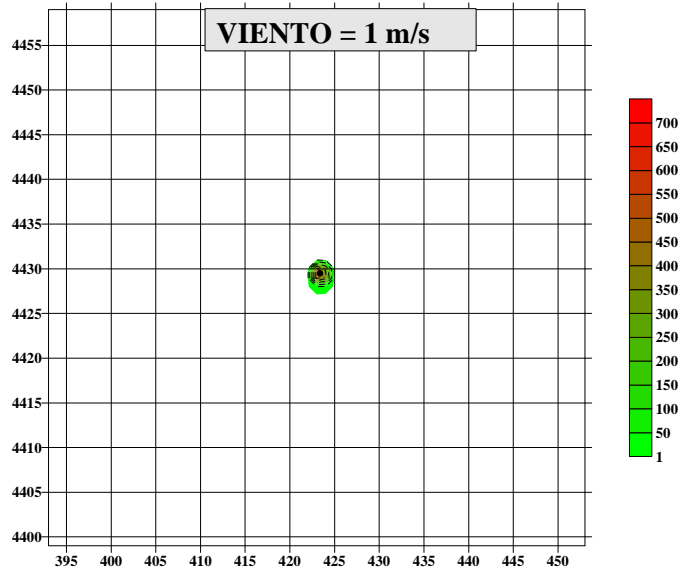


VIENTO	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	15.75	313.66
5	16.15	55.22

Figura 54. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras para dos velocidades de viento en condiciones de estabilidad, rugosidad y densidad indicados.

**DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN VIENTO**

**diametro > 20 micras, estabilidad = 4, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación**

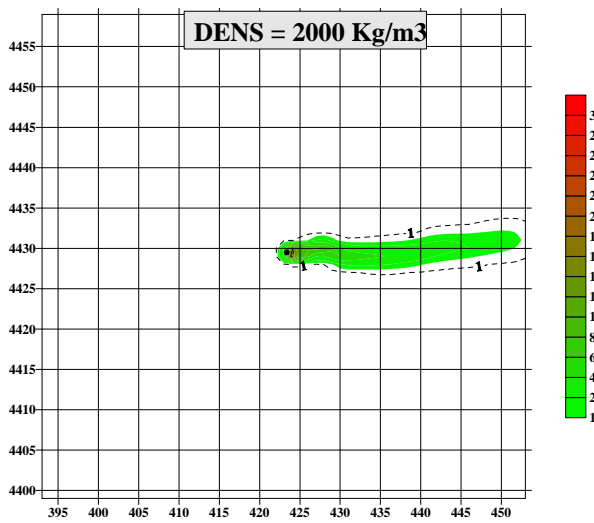
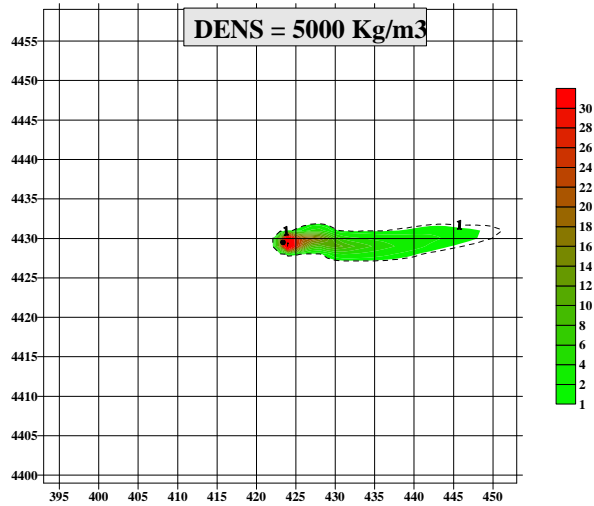


VIENTO	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	458.00	43.84
5	231.29	21.91

Figura 55. Depósito y concentración de partículas mayores de 20 micras para dos velocidades de viento en condiciones de estabilidad, rugosidad y densidad indicados.

El efecto de la densidad de las partículas es evidente, ya que a mayor densidad mayor movimiento de las partículas hacia la superficie y, por tanto, mayor depósito de las mismas (Figura 56).

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN DENSIDAD DE LA PARTICULA
 2.5 < diametro <10 micras, estabilidad = 4, v = 5 m/s, z0 = 0.8 m
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación



DENSIDAD	DEP.MAX.	CONC. MAX.
5000	49.51	51.66
2000	16.15	55.22

Figura 56. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras para dos densidades de partículas en condiciones de estabilidad, rugosida, y viento indicados.

Una mayor rugosidad del terreno favorece la agitación turbulenta (disminuye la resistencia aerodinámica) y facilita la captura de partículas por los obstáculos del terreno (disminuye la resistencia cuasilaminar) (ver figura 57).

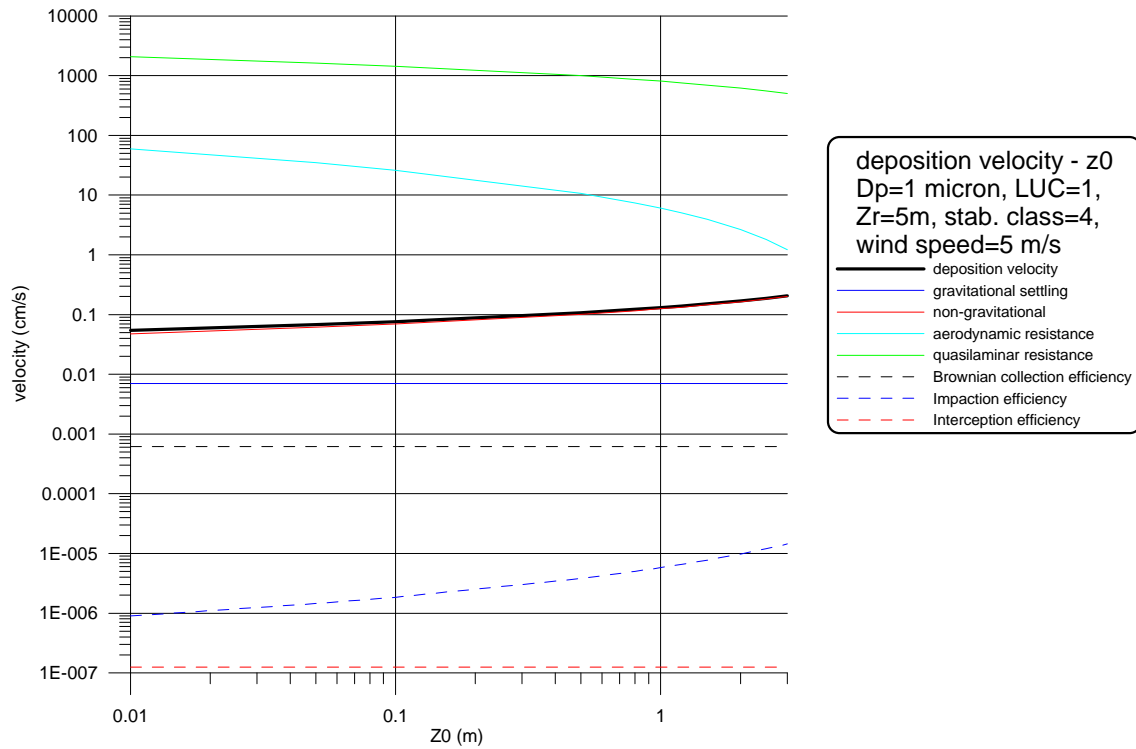
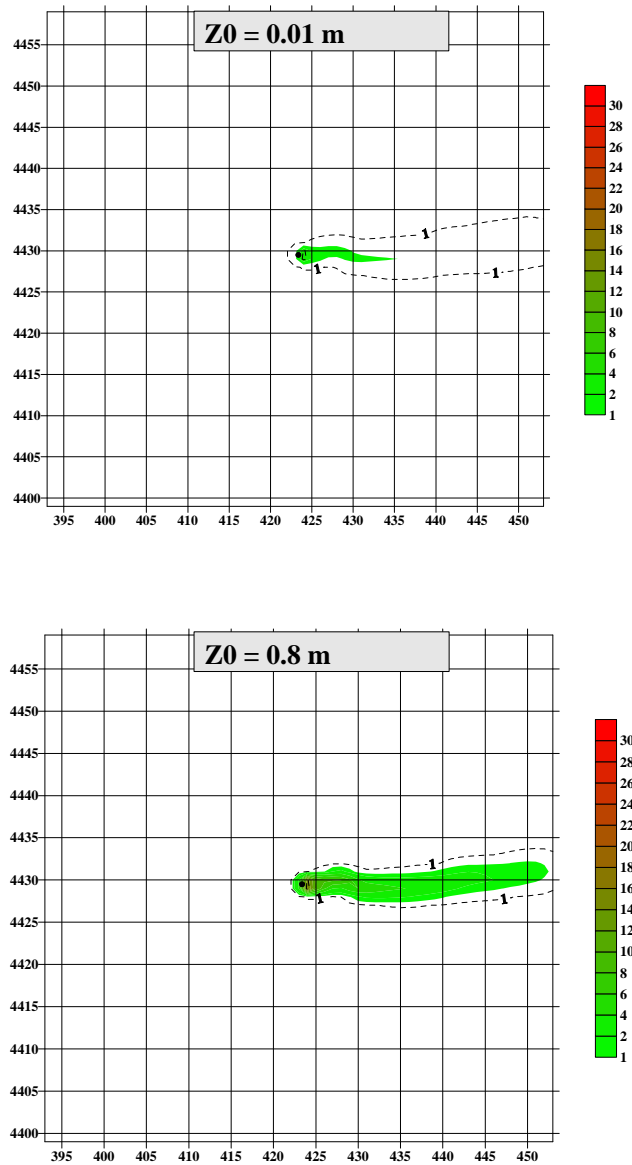


Figura 36. Velocidades de depósito y componentes de la misma en función de la rugosidad del terreno en el caso de partículas de 1 micra de diámetro aerodinámico.

El efecto resultante es que una mayor rugosidad del terreno aumenta el depósito de contaminantes de una forma importante (ver figura 58).

Con lo visto en esta sección, puede concluirse que SEDPORT está bien desarrollado e implantado en PORTPUFF.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN RUGOSIDAD
 2.5 < diametro < 10 micras, estabilidad = 4, v = 5 m/s, densidad=2000 Kg/m³
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación



Z0	DEP. MAX.	CONC. MAX.
0.01	2.95	56.60
0.8	16.15	55.22

Figura 58. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras para dos rugosidades del terreno en condiciones de estabilidad, densidad y viento indicados.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente documento se ha dedicado a la descripción del sistema de modelos elaborado como núcleo del Sistema Informático para el Control y la Predicción de la Contaminación Atmosférica en Puertos Españoles desarrollado dentro del proyecto HADA. No ha sido intención explicar todos los aspectos de los modelos implicados, que, en varios casos, incumben a varias instituciones (Universidad de Santiago de Compostela, Universidad de Barcelona, Instituto nacional de Meteorología, etc), sino describir el modelo de dispersión PORTPUFF, el procesador meteorológico para downscaling CALMET y el módulo de depósito de partículas SEDPORT. PORTPUFF y SEDPORT junto con las adaptaciones necesarias realizadas en CALMET son desarrollos realizados por personal del Grupo de Modelización de la Contaminación Atmosférica, que está integrado en la Unidad de Contaminación Atmosférica del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT.

Los modelos desarrollados se han mostrado estar en consonancia con el estado del arte. PORTPUFF es un modelo Lagrangiano de nubes Gaussianas, que enlazado con CALMET y usando sus estimaciones tridimensionales de parámetros turbulentos y variables meteorológicas, permite calcular la dispersión de los contaminantes de una forma rápida y realista. Este modelo incorpora el tratamiento de procesos diversos, algunos tan importantes, como el efecto de estela de los edificios o el depósito seco y húmedo de los contaminantes. También, se han presentado ejemplos prácticos de simulaciones realizadas con el modelo PORTPUFF para el Puerto de A Coruña.

Como el objetivo principal de los modelos desarrollados es estimar de una forma correcta la distribución espacial de la concentración y depósito de partículas atmosféricas, se ha dedicado un esfuerzo especial a la elaboración de un módulo específico para tratar el depósito de partículas atmosféricas, el cual depende de forma clara del diámetro de la partícula. Los procesos implicados tales como el movimiento Browniano (importante en partículas inferiores a una micra), impacto e intercepción por obstáculos en el suelo (partículas entre 1 y 10 micras), gravitación y rozamiento (partículas mayores de 10 micras), junto con la turbulencia, etc. son incluidos de forma explícita en el módulo SEDPORT. Se han mostrado los aspectos teóricos de dicho módulo, junto con unos tests de sensibilidad que han ayudado a comprobar el funcionamiento de SEDPORT y a identificar variables clave.

Se ha tratado también del diseño conceptual y de los modos de funcionamiento de del sistema informático mencionado. Este sistema está pensado para abordar la predicción de la contaminación a uno o días vista, el seguimiento en tiempo real de la misma, la investigación de episodios de contaminación ocurridos en el pasado y responder a cuestiones del tipo ‘¿Qué pasaría si...?’

REFERENCIAS

Allwine, K. J., W. F. Dabberdt, and L.L. Simmons, 1998: Peer review of the CALMET/CALPUFF modeling system. KEVIRC Company Inc. Durham, NC. EPA Contract No., 68-D-98-092. Work Assignment No. 1-03. 160 pp.

Bander (1982). *PAVAN: An Atmospheric Dispersion Program for Evaluating Design Basis Accidental Releases of Radiactive Materials from Nuclear Power Stations*. NUREG/ CR-2858 (PNL-4413), U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Battaglia, C., 1999: CALPUFF and SAFE_AIR: comparisons and testing against field experiments above hilly terrain. Sixth international conference on harmonization. Abstract Proceedings. Rouen. Francia.

Briggs G.A. (1985). *Analytical parameterizations of diffusion: the convective boundary layer*. J. Clim. and Appl. Meteor., 24, 1167-1186, 1985.

Cagnetti, P., and V. Ferrara, (1980) *A simple formula for estimating airborne concentrations downwind of buildings for discharges near ground level*. Proc. of seminar on radioactive releases and their dispersion in the atmosphere following a hypothetical reactor accident. Riso, Denmark, CEC, V/4111/80.

Carson, D.J., 1973: The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer. Quart. J. R. Meteor. Soc., 99, 450-467.

Crespí S.N., I. Palomino, B. Aceña, F. Martín, A. Guerra, D. Gomis, F. Torres y J. Sáez (2001). Development of a computer system for control and prevention of air pollution in the Valencia Port (Spain). Proceedings of the Seventh International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 365-369.

Douglas, S.G., and R.C. Kessler, 1988: User's guide to the diagnostic wind model (version 1.0). System Applications, Inc. San Rafael, California.

Draxler R.R. (1976). *Determination of atmospheric diffusion parameters*. Atmospheric Environ., 10, 99-105, 1976.

Dudhia J. et al. (2001). *PSU/NCAR Mesoscale Modelling System. Tutorial Class Notes and User's Guide*. Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research. USA.

Fowler D. (1986). *The transfer of air pollutants to the ground by wet and dry deposition*. En Regional and Long-range Transport of Air pollution, Ispra, Italia.

Gifford F.A. (1976). *Consequences of effluent release*. Nuclear Safety, Vol 17, No. 1, pags. 68-86.

Hanna S.R., Briggs G.A. and Hosker Jr. R.P. (1982). *Handbook on Atmospheric Diffusion*. Technical Information Center. U.S. Department of Energy. DOE/TIC-11223 (DE82002045).

Hicks B.B., Baldocchi D.D., Meyers T.P., Hosker Jr R.P. and Matt D.R. (1987). *A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities*. Water, soil and Air Pollution, 36, 311-330.

Holtzlag, A. A. M., and A. P. Van Ulden, 1983: A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. J. Clim. Appl. Meteor., 22, 517-529.

Irwin J.S. (1983) *Estimating plume dispersion - a comparison of several sigma schemes*. J. Clim. and Appl. Meteor., 22, 92-114, 1983.

Landsberg, H.E., 1981: The urban heat island. Academic Press. New York.

Martín F., C. González, A. Bailador, E. Sánchez, I. Palomino, M. Palacios, S.N. Crespí and C. Gorostiza. (1999). *SICAH: An Automatic System for Control and Prevention of Air Pollution in Huelva (Spain)*. Proceedings of the Sixth International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes.

Martín F., S. N. Crespí and M. Palacios (2001). Simulations of Mesoscale Circulations in the Center of the Iberian Peninsula for Thermal Low Conditions. Part I: Evaluation of the TVM model. Journal of Applied Meteorology, Vol 40, Nº 5, 880-904

Martín F., C. González, A. Bailador, E. Sánchez, I. Palomino, M. Palacios, S.N. Crespí and C. Gorostiza (2002a). *SICAH: An automatic system for control and prevention of air pollution in Huelva (Spain)*. International Journal of Environment and Pollution, 16, 1-6

Martín F., C. González, A. Bailador, E. Sánchez, I. Palomino, M. Palacios, S.N. Crespí and C. Gorostiza (2002b). *SICAH. Sistema Informático para el Control y Prevención de la Contaminación Atmosférica en Huelva. Manuales de Usuario y Teórico, Version 2.0*. Documentos CIEMAT. 323 pp.

Martín, F. e Palomino, I. (2004a). *Implantación de un sistema de modelización en áreas portuarias y determinación de factores de emisión*. Informe Proyecto HADA - LIFE2 ENV/E/000274

Martín, F. e Palomino, I. (2004b). *EMIPORT, Modelo de emisiones de partículas en entornos portuarios*. Informe Proyecto HADA - LIFE2 ENV/E/000274

Martín F., Palomino I., Guerra A., Souto M.J., Balseiro C.F., Penabad E., Pérez-Muñuzuri V., Redaño A. and Gomis D. (2005a) A modelling system to forecast atmospheric PM concentrations in Spanish ports Proceeding of 1st International Conference on Harbours & Air Quality. Genova (Italy). 15-17 June 2005.

- Martín F., Pujadas, M., Artñano B, Gómez-Moreno F., Palomino I., Moreno N., Alastuey A., Querol X., Basora J., Luaces J.A and Guerra A. (2005b). Estimates of atmospheric particle emissions from solid bulks handling in Spanish harbours. Proceeding of 1st International Conference on Harbours & Air Quality. Genova (Italy). 15-17 June 2005.
- Maul, P. R., 1980: Atmospheric transport of sulfur compound pollutants. Central Electricity Generating Bureau MID/SSD/80/0026/R. Nottingham, England.
- Oke, T. R., 1978: Boundary layer climates. John Wiley & Sons. New York. 372 pp.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 108, 1-24.
- Palomino I. y F. Martín (2001). Estudio de la dispersion de contaminantes emitidos desde una cementera en escenarios concretos. CIEMAT/DIAE/552/21310/03/01.
- 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
- Proyecto HADA (2004). *Informe de instalación de estaciones meteorológicas correspondientes a los puertos de Bilbao, Cartagena, A Coruña, Huelva, Santandery Tarragona*. Informe para Proyecto HADA.
- Ramsdell et al. (1982). *Turbulent Diffusion Coefficients Within and Above the Urban Domain*, final report to the U.S. Army Atmospheric Sciences Laboratory under Battelle, Pacific Northwest Laboratory contract 23111 05480, 95p.
- Ramsdell et al. (1983). MESOI Version 2.0: An Interactive Mesoscale Lagrangian Puff Dispersion Model with Deposition and Decay. NUREG/CR-3344. PNL-4753. Pacific Northwest Laboratory. Richland. USA.
- Ramsdell Jr. J.V. and K.W. Burk, (1991). *MESOILT2, A Lagrangian Trajectory Climatological Dispersion Model*. Hanford Environmental Dose Reconstruction Project. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington 99352.
- Scire, J. S., E. M. Insley, and R. J. Yamartino, 1990: Model formulation and user's guide for the CALMET meteorological model. Report No. A025-1. California Air Resources Board. California.
- Scire J., Robe F.R., Fernau M.E. and Yamartino R. (1999). A user's guide for the CALMET meteorological model (version 5.0). Earth Tech. Inc. MA.
- Souto, M.J., Balseiro, C.F., Pérez-Muñuzuri, V., Xue, M. and Brewster, K. (2003). Impact of Cloud Analysis on Numerical Weather Prediction in the Galician Region of Spain. *Journal of Applied Meteorology* **42**, 129-140.

Start G.E. y Wendell L.L. (1974). *Regional Effluent Dispersion Calculations Considering Spatial and Meteorological Variations*. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-44, 63 p.

Thunis, P., and A. Clappier, (2000) Formulation and evaluation of a nonhydrostatic mesoscale vorticity model (TVM), *Mon. Wea. Rev.*, 128, N°9, 3236-3251

Undén P. et al. (2002). *HIRLAM-5 Scientific Documentation*. SMHI Norrköping, Sweden.

Zack, J. W. and Kaplan, M. L. (1987): Numerical simulations of the subsynoptic features associated with the AVE-SESAME I Case, Part I: The preconvective environment, *M. Weath. Rev.*, 115, 2367–239, 1987.

Zhang L., Gong S., Padro J. and Barrie L. (2001). A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment* 35, 549-560.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha contado con la información suministrada por una gran cantidad de personas e instituciones, sin cuya participación no hubiera sido posible realizarlo.

A los responsables de Autoridades portuarias por la información que ha puesto a nuestra disposición sobre características geográficas y usos de suelo de los puertos y sus entornos más inmediatos

A Andrés Guerra por el apoyo y confianza, y en algunos casos paciencia, en sus funciones de coordinador del proyecto HADA.

A METEOSIN, el Instituto Nacional de Meteorología y la Universidad de Santiago de Compostela, METEOGALICIA por el suministro regular de toda la información requerida, y en especial a Estrella Gutiérrez del INM y a Miquel Picanyol de METEOSIN S.A y a María Jesús Souto de METEOGALICIA por su prontitud y disposición a solucionar los pequeños problemas que se fueron planteando a lo largo de este tiempo.

Finalmente, como en todos nuestros trabajos, a Blanca Casado por su inestimable trabajo para la armonización de gráficas que ha hecho posible entendimiento entre y su uso en diferentes programas informáticos.