

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA FLEXPART EN AEMET

Víctor Vaz de Jesús⁽¹⁾, María Allué Camacho⁽¹⁾, Isabel Martínez Marco⁽¹⁾

⁽¹⁾Agencia Estatal de Meteorología, c/ Leonardo Prieto Castro, 8, Madrid. vvazd@aemet.es

1. Introducción

La Agencia Estatal de Meteorología tiene entre sus competencias realizar una vigilancia continua, eficaz y sostenible de las condiciones meteorológicas, climáticas y de la estructura física y química de la atmósfera sobre el territorio nacional. Además se suma la necesidad de estimar las consecuencias de emisiones accidentales producidas por una fuente puntual.

Este estudio se vuelve indispensable en distintos ámbitos ya sea con fines reguladores (para el control de la contaminación, para estudios de impacto ambiental en la calidad del aire) o para dar respuesta a los organismos e instituciones de la Administración del Estado o de las Comunidades Autónomas, por ejemplo, ante situaciones de emergencia por emisión de un material pasivo o radiactivo a la atmósfera y en las que es indispensable hacer un seguimiento de la nube de contaminante generada debido a sus efectos nocivos.

AEMET dispone del modelo de transporte químico MOCAGE, que es un modelo tridimensional que proporciona simulaciones numéricas de las interacciones entre los procesos dinámicos, físicos y químicos en la atmósfera (troposfera y baja estratosfera). En concreto simula la evolución de las especies químicas en la atmósfera debido a los fenómenos de transporte (advección, difusión turbulenta y convección), a las transformaciones químicas que puedan sufrir y a su eliminación por mecanismos de deposición seca y húmeda o por decaimiento radiactivo.

Además, en AEMET funciona una versión de MOCAGE en la que los módulos de química están desactivados para trabajar como un modelo de dispersión atmosférica (MOCAGE en modo accidente). Esta versión de MOCAGE trabaja teniendo en cuenta únicamente los mecanismos de transporte, las deposiciones y el decaimiento radiactivo. No se tiene en cuenta información sobre emisiones superficiales continuas de especies químicas a la atmósfera, ya sean naturales o antropogénicas, solamente la relativa a un número de fuentes puntuales.

Esta versión de MOCAGE sirve para dar respuesta a situaciones de emergencia debidas a emisiones prolongadas en el tiempo y que supongan transporte a medias y a largas distancias de material pasivo o radiactivo a la atmósfera (por ejemplo, el accidente nuclear de Fukushima en 2011 o la erupción del volcán de Islandia (Eyjafjallajökul) en 2010).

MOCAGE en modo accidente está implementado en AEMET en distintas áreas y resoluciones. Sin embargo, debido a las parametrizaciones físicas que involucra el modelo, no es posible alcanzar resoluciones propias de la escala local. Actualmente la máxima resolución implementada es de 5 km para la Península y las islas Canarias.

Por esta razón, ante la necesidad de obtener simulaciones de la dispersión atmosférica a mayor resolución, en especial para emisiones de corta duración en el tiempo y a escala local, AEMET ha puesto en marcha la implementación del modelo de código libre FLEXPART.

2. FLEXPART

FLEXPART (Flexible Particle Dispersion Model) es un modelo de dispersión de partículas lagrangiano que simula el transporte a distintas escalas así como la difusión, la deposición seca y húmeda y el decaimiento radiactivo de especies que pueden ser emitidas desde fuentes puntuales, lineales o de volumen. Es un modelo de código libre desarrollado principalmente por Andreas Stohl en el Instituto Noruego de Investigación de la Atmósfera (NILU) junto con un grupo de desarrolladores de distintas instituciones. Está codificado en Fortran 95 y se puede compilar con gfortran e ifort bajo distintos sistemas operativos (Linux, Solaris, etc.)

La principal ventaja de un modelo lagrangiano como FLEXPART frente a un modelo euleriano como MOCAGE es que no hay difusión numérica. Concretamente, una especie emitida desde una fuente puntual en un modelo euleriano es instantáneamente mezclada en toda la celda donde se encuentra, mientras que en los modelos lagrangianos esto no ocurre y, en principio, podrían tener una resolución infinitamente pequeña. Esta razón además de la amplia comunidad de usuarios y desarrolladores que tiene FLEXPART y que es un modelo muy testado, hace que en AEMET se haya decidido trabajar con este modelo de dispersión.

En el modelo FLEXPART las fuentes emiten un chorro de partículas, con una cierta masa, que se transportan y dispersan en la atmósfera, pudiendo sufrir además procesos de eliminación como deposición seca y húmeda y decaimiento radiactivo. Las partículas se mueven en el viento resuelto por un modelo meteorológico pero también tienen una componente de movimiento aleatorio que representa los efectos de la turbulencia atmosférica. Además, se parametrizan los procesos de escala sub-grid no resueltos por el modelo meteorológico que afectan a la dispersión de las partículas, es decir, la turbulencia en la capa límite atmosférica, la turbulencia de mesoescala y la convección turbulenta. Estas partículas, además pueden representar varias especies químicas de forma que todas ellas son afectadas de igual manera por el transporte pero de distinta forma por los procesos de eliminación. El modelo proporciona promedios temporales de las concentraciones de las especies simuladas que se calculan como la suma de las masas correspondientes a un número de partículas presentes en un determinado volumen. Además, se pueden proporcionar concentraciones en receptores puntuales que no tienen por qué coincidir con los nodos del grid de salida.

FLEXPART es un modelo off-line y por tanto necesita campos meteorológicos procedentes de modelos de predicción del tiempo. En concreto la versión que se distribuye utiliza campos del ECMWF o del NCEP. Existe también una versión posterior de FLEXPART alimentada por campos meteorológicos del modelo mesoescalar WRF (Weather Research and Forecasting) con varias opciones y características especiales que difieren de las versiones anteriores. En el caso de AEMET para poder obtener resultados a escala local es indispensable alimentar el modelo FLEXPART con un modelo de predicción del

tiempo de mayor resolución que sea capaz de simular los fenómenos meteorológicos a estas escalas. Por esta razón, se ha implementado una versión que trabaja con las salidas del modelo meteorológico de área limitada de alta resolución Harmonie-Arome.

Centrándonos en el funcionamiento de FLEXPART, el modelo necesita datos de campos meteorológicos para ser interpolados a la posición de las partículas, por ejemplo, campos tridimensionales tales como las componentes horizontal y vertical de la velocidad del viento, la temperatura y humedad específica; campos bidimensionales, entre ellos, la presión en superficie, la cobertura de nubes, las componentes horizontales del viento a 10 m, la temperatura y el punto de rocío a 2 m, la precipitación de gran escala y convectiva, flujo de calor sensible. Además, se le proporciona al modelo el inventario de usos de suelo de BELWARD et al. (1999) en un fichero aparte.

Para realizar una simulación, el modelo necesita una serie de condiciones iniciales mínimas: las fechas de inicio y finalización de la simulación, las coordenadas de la fuente de emisión, los niveles inferior y superior verticales de emisión y la especie química que se libera en la misma.

Para ejecutar simulaciones que se ajusten al estudio que se esté realizando, el modelo nos permite configurar una serie de parámetros. En las siguientes líneas mostraremos los más destacables. Respecto a la simulación tenemos dos opciones de lanzar el modelo: *forward simulation* (hacia delante), para simular la dispersión de las especies desde sus fuentes de emisión o *backward simulation* (hacia atrás), para conocer la contribución de una determinada fuente a un determinado receptor. Se puede modificar el intervalo de sincronización (el paso de tiempo) del cual dependen todos los procesos (transporte de partículas, difusión turbulenta, mecanismos de eliminación, cálculo de concentraciones medias, etc...). Las salidas del modelo pueden venir dadas en concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), por razón de mezcla (*pptv*) o bien por ambas. El modelo permite escoger la posibilidad de continuar una simulación a partir de otra anterior mediante un fichero en el que figura la posición final de las partículas de la primera simulación. Por otra parte, se pueden distinguir partículas según clases de edad permitiendo escoger aquellas que no tienen más tiempo que, por ejemplo, 6 horas. Dependiendo del estudio que queramos realizar se puede obtener o bien una salida en la que se suma la contribución de cada una de las fuentes emisoras que se hayan considerado, o bien una salida para cada una de ellas si se desean estudiar por separado. Además, se puede configurar el modelo permitiendo anidar un grid de mayor resolución sobre el grid inicial.

Las salidas que se obtienen de FLEXPART son ficheros en formato binario para los distintos alcances temporales, donde cada uno de ellos contiene las concentraciones promediadas en las celdas de una rejilla, que se ha definido previamente. También se pueden obtener, por otro lado, salidas del modelo con información de concentraciones en un conjunto de puntos discretos, receptores, para los que el modelo generará otro fichero binario aparte de los anteriores.

3. Aplicaciones de FLEXPART en Aemet

Como se ha expuesto anteriormente, con la intención de proporcionar información a escala local sobre dispersión atmosférica a algunos organismos e instituciones de la

Administración del Estado o Comunidades Autónomas se ha implementado en AEMET una versión de FLEXPART que trabaja con las salidas del modelo meteorológico de área limitada Harmonie-Arome. La necesidad de realizar esta implementación se crea por dos motivos:

- * La participación en el proyecto SAMOA (Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de la Autoridad Portuaria).
- * Situaciones de emergencia por emisión de un material pasivo o radiactivo a la atmósfera.

3.1. Proyecto SAMOA

El proyecto SAMOA nace de un convenio marco de colaboración entre Puertos del Estado y AEMET. Este proyecto pretende dotar a los puertos españoles de sistemas de consulta y explotación de la información meteorológica y de dispersión de contaminantes a alta resolución. En este proyecto están incluidos inicialmente veinte puertos, situados en la Península (Algeciras, Almería, Avilés, Barcelona, Carboneras, Gijón, Málaga y Tarragona), islas Baleares (Alcudia, Ibiza, La Sabina, Mahón y Palma de Mallorca), islas Canarias (Arrecife, Cristianos Gomera, Las Palmas, La Palma, Puerto del Rosario y Santa Cruz de Tenerife) y Melilla. Para facilitar este tipo de información a las autoridades portuarias debemos obtener simulaciones a mayor resolución que las que produce MOCAGE-Accidente.

Para ello, la versión de FLEXPART que se ha implementado en AEMET trabaja con las salidas del modelo meteorológico de área limitada Harmonie-Arome a 1 km de

resolución horizontal desarrollado también por AEMET para determinadas áreas.

Respecto a las salidas del modelo, se proporciona un grid centrado en el punto de emisión de tamaño 100 km x 100 km a una resolución de 500 m. En la Figura 1 se muestran las áreas que abarca el modelo de predicción Harmonie-Arome y los puertos incluidos en el convenio.



Fig. 1.- Dominios que engloba el modelo meteorológico Harmonie-Arome y ubicación de los puertos españoles del proyecto SAMOA.

Con la puesta en marcha del modelo FLEXPART, AEMET aportará información sobre las condiciones de dispersión atmosférica a cualquier hora del día en las zonas portuarias del Cantábrico, Mediterráneo, Albarán y Canarias utilizando campos meteorológicos horarios de Harmonie-Arome a 1 km. La aplicación desarrollada se ejecuta

para cada puerto una vez al día a las 04:00 UTC cuando están disponibles los campos meteorológicos procedentes de la pasada de las 00 UTC de Harmonie-Arome. Previamente deberán generarse forzamientos meteorológicos para cada uno de los 20 puertos y posteriormente se ejecutan 36 pasadas comenzando en horas consecutivas desde las 06 UTC a las 17 UTC del día siguiente, siendo la duración de cada una de ellas de 6 horas. En cada pasada se considera una fuente ubicada en el puerto que emite durante una hora, cuya emisión comienza a la misma hora de la pasada. Se proporcionan salidas de concentraciones medias en superficie cada media hora, promediada temporalmente también en intervalos de media hora. Por tanto, para cada pasada y cada puerto se obtienen 12 ficheros de salida (por ejemplo, para la pasada de las 06 UTC, cuya emisión comienza también a las 06 UTC y termina a las 07 UTC, los alcances obtenidos son de las 06:30, 07:00, 07:30, 08:00, 08:30, 09:00, 09:30, 10:00, 10:30, 11:00, 11:30, 12:00).

A continuación mostramos dos ejemplos de dos puertos, el puerto de Alcudia y el puerto de Algeciras.

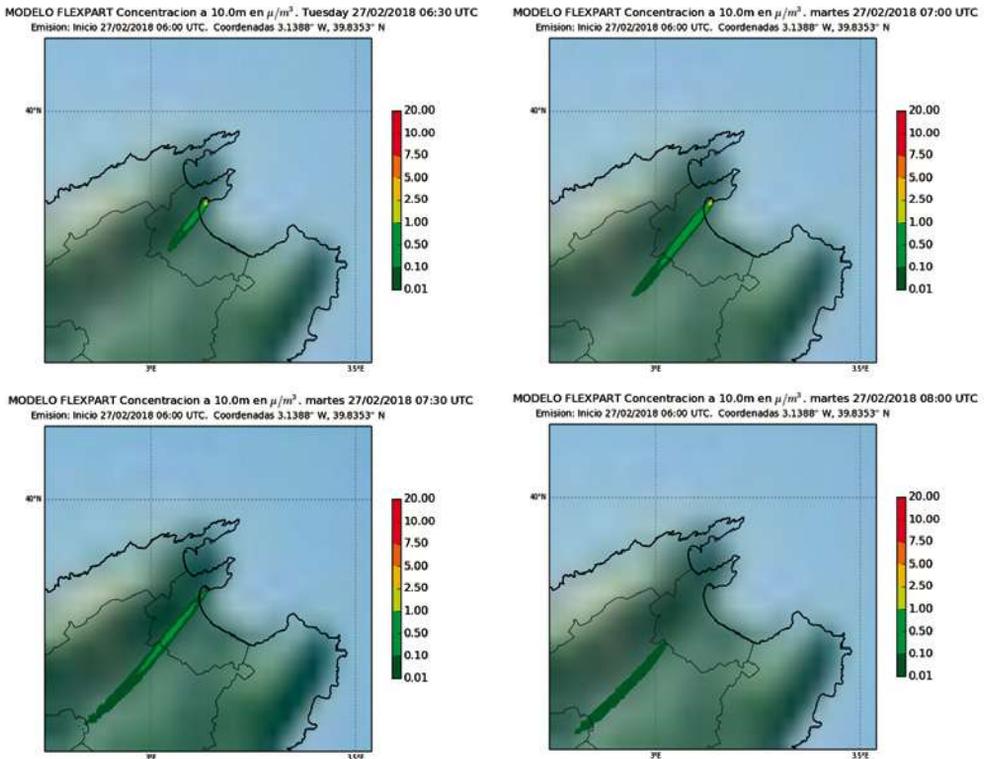


Fig. 2.- Concentración de material particulado de la pasada del día 27/02/2017 a las 06:00 UTC para el puerto de Alcudia. Salidas cada media hora desde las 06:00 UTC.

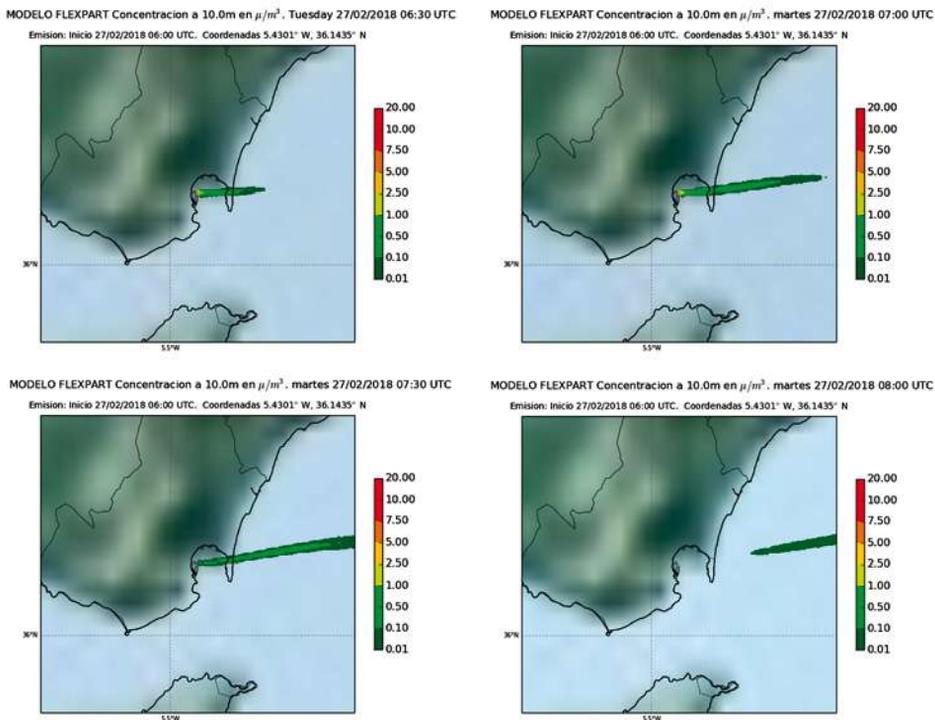


Fig. 3.- Concentración de material particulado de la pasada del día 27/02/2017 a las 06:00 UTC para el puerto de Algeciras. Salidas cada media hora desde las 06:00 UTC.

En ambos ejemplos se puede observar una simulación de 6 horas para el día 27 de febrero en la que se emite un material pasivo desde una fuente lineal en la zona portuaria durante una hora. Las concentraciones vienen expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los campos meteorológicos de Harmonie utilizados para las simulaciones son de la pasada de las 00. La extensión vertical de las emisiones es desde superficie hasta los 20 metros de altura. Para las simulaciones se ha considerado un valor estándar de 1 kg de masa emitida. El intervalo de sincronización tomado en estas simulaciones es de 120 s.

En las Figuras 2 y 3 se han mostrado solamente los cuatro primeros alcances debido a que la nube de contaminante se desvanece prácticamente al pasar dos horas de las seis que dura la simulación.

La aplicación se encuentra aún en desarrollo por lo que su diseño y la configuración del modelo no es definitiva y pueden sufrir modificaciones para ajustarse mejor a los fenómenos simulados y a las necesidades de cada puerto. En este sentido se pretende continuar con desarrollos en la segunda parte del proyecto, SAMOA 2.

3.2. FLEXPART: Herramienta para emergencias medioambientales

Por otra parte, se está poniendo en marcha la implementación de FLEXPART como apoyo a emergencias medioambientales en las que la escala a la que trabaja MOCAGE no es adecuada. En este caso, para dar respuesta en cualquier punto de la Península, islas Canarias y Baleares se utilizan las salidas operativas horarias de Harmonie-Arome a 2,5 km, ya que la versión de Harmonie-Arome a 1 km sólo está disponible en las áreas mencionadas. Respecto a las salidas del modelo se proporciona un grid centrado en el punto de emisión de tamaño 100 km x 100 km a una resolución de 500 m.

La aplicación para casos de emergencia funciona de la siguiente manera: En primer lugar se generan forzamientos meteorológicos para un área centrada en la fuente de tamaño 200 km x 200 km. La aplicación se ejecuta para el momento en el que ha ocurrido el accidente. El modelo utilizará los campos de Harmonie-Arome de la pasada anterior más reciente. Internamente se ejecuta FLEXPART con un alcance máximo de 48 horas con los datos de la emisión que nos faciliten. Posteriormente se proporcionan salidas de concentraciones medias cada hora promediadas temporalmente en intervalos de una hora.

Esta aplicación de FLEXPART como herramienta en casos de emergencia aún no se encuentra operativa, ya que todavía es necesario realizar más pruebas para ajustar ciertos parámetros que permitan obtener mejores resultados.

4. Futuros desarrollos

Como se ha comentado en líneas anteriores, las aplicaciones desarrolladas no son definitivas, es necesario realizar más pruebas y obtener más información para conseguir realizar simulaciones que se ajusten de una forma más precisa al fenómeno considerado.

Por esta razón, como futuros caminos y mejoras se pretende realizar estudios del comportamiento del modelo en diferentes localizaciones y situaciones meteorológicas, estudiar un aumento de la resolución en el grid de salida y realizar una revisión de parámetros relacionados con los mecanismos de eliminación de especies (base de datos de usos de suelo, valores de las resistencias utilizadas en la parametrización de la deposición seca, parámetros para la deposición húmeda, etc.). Además, implementar un listado de especies y sus correspondientes valores de los parámetros asociados a los procesos de eliminación permitiría caracterizar adecuadamente la fuente de emisión y en consecuencia obtener resultados más realistas y precisos. Igualmente, se pretende mejorar las salidas gráficas del modelo.

Referencias:

- Martínez, I., Cansado, A., Allúe, M., Moreta, J.R., López, E. y Arrizabalaga, J. 2012: EL MODELO MOCAGE: Predicción de la Calidad del Aire y Simulación de Nubes Tóxicas. *AME*, 35, 28-33.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P. and Wotawa, G. 2005: Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 2461-2474.
- Stohl, A., Hittenberger, M. and Wotawa, G. 1998: Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiments. *Atmos. Environ.* 32, 4245-4264.
- Stohl, A., and Thomson, D. J. 1999: A density correction for Lagrangian particle dispersion models. *Bound.-Layer Met.* 90, 155-167.