

<i>Nereis. Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación</i>	5	53-69	Universidad Católica de Valencia "San Vicente Mártir"	Valencia (España)	ISSN 1888-8550
--	---	-------	---	-------------------	----------------

Tasas de transporte de Ekman y afloramiento costero al noroeste de África a partir de la simulación numérica de campos de viento superficiales

Fecha de recepción y aceptación: 7 de febrero de 2013, 14 de febrero de 2013

Alberto Corbí Bellot* y Javier Alcántara Carrió

* Correspondencia: Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad Católica de Valencia "San Vicente Mártir", C/ Guillem de Castro, 94. 46001 Valencia. España. E-mail: alberto_corbi@terra.es



RESUMEN

La simulación del campo de vientos superficial en el océano, al noroeste de África, ha sido obtenida usando el modelo mesoescala de código abierto *Weather Research and Forecasting* (WRF). El rango espacio-temporal elegido para la simulación abarca la región de la Macaronesia central/norte (40° N, 20° W - 25° N, 5° W) durante un mes (noviembre del 2007). Para la ejecución eficiente de esta simulación en un escenario de recursos computacionales limitados ha sido necesario emplear las últimas técnicas en cálculo distribuido poliarquitectónico. Una vez obtenido el campo de vientos, se han derivado las corrientes superficiales debidas al esfuerzo del viento, el transporte de Ekman y los índices de afloramiento para toda la zona, para cada día y en media global. La validación cualitativa y cuantitativa de los resultados obtenidos ha sido realizada comparándola con estudios previos de teledetección realizados por otros grupos de investigación, así como con las simulaciones generadas a partir del modelo atmosférico RAMS. Este modelo ha sido empleado para la mismas condiciones espacio-temporales descritas anteriormente por el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM).

PALABRAS CLAVE: Modelo de mesoescala, WRF, campo de viento promedio, bombeo de Ekman, afloramientos costeros.

ABSTRACT

We have run a computer simulation of the atmosphere processes and evolution in order to obtain the surface wind field over the ocean. To accomplish this task, we have made use of the mesoscalar open source atmospheric model *Weather Research and Forecasting* (WRF). The spatial and temporal ranges used for the simulation correspond to the month of November 2007 and the central/north Macaronesia (40N, 20W - 25N, 5W). For an efficient implementation of this simulation in a scenario of rather limited computational resources, it has been necessary to make use of the latest poly architecture distributed computing techniques. Once the wind field has been obtained, we have derived surface currents due to wind stress, Ekman transport and upwelling indices for the whole area, daily and global mean. We have qualitatively and quantitatively compared these results with experimental values derived by other research groups (using remote sensing tools). Finally we have also verified that the results are consistent with those obtained by the numerical model RAMS run for the same space-time conditions described above by the Centre for Mediterranean Environmental Studies (CEAM).

KEYWORDS: Mesoscalar model, WRF, surface wind field, Ekman pumping, coastal upwelling.

INTRODUCCIÓN

Principios de los modelos atmosféricos de mesoescala

Los modelos numéricos son usados con múltiples propósitos en oceanografía. Pueden dividirse en dos tipos principales: modelos *mecánicos* o *físicos* y de *simulación* o *matemáticos*. Los modelos orientados a la simulación (o matemáticos) son usados para



calcular dinámicas más realistas en la circulación y comportamiento del océano y la atmósfera. Estos modelos son normalmente mucho más complejos a causa del número de procesos incluidos y generan un *output* mucho más denso en información.

Para resolver las expresiones que definen un modelo matemático se recurre a la modelización numérica y a un entorno de cálculo computacional. Los modelos pueden clasificarse según la extensión de los eventos que pretenden reproducir en macro, micro y mesoescalares (Stull, 2000) y mantienen una proporcionalidad entre la escala temporal y la espacial. Los modelos que se han utilizado en este trabajo se encuadran dentro del rango de la *mesoescala* (eventos de 20 km de extensión y varias horas de duración). Las principales ecuaciones físicas que un modelo numérico de mesoescala ha de resolver o integrar son las siguientes:

- Conservación de la masa (1), conservación de la energía (2) y ecuación de estado (3):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

$$\delta c = \delta w_t + \delta u_e = \frac{S_c}{\rho} dt \quad (2)$$

$$p = \rho \cdot r_d \cdot T_V \quad (3)$$

- Conservación del vapor de agua, agua líquida y sólida (4):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot \chi + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \cdot u_j \cdot \chi = D_\chi \frac{\partial^2 \rho \cdot \chi}{\partial x_j^2} + S_\chi \quad (4)$$

- Conservación del momento (5):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \cdot u_j \cdot u_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \rho \cdot g_i - 2 \cdot \rho \cdot \varepsilon_{ijk} \cdot \Omega_j \cdot u_k \quad (5)$$

Estas ecuaciones se resuelven numéricamente para cada uno de los *subdominios* o *celdas* (figura 1, derecha) en las que queda dividido una zona o dominio. Para la integración de las ecuaciones diferenciales son también necesarias condiciones de contorno y condiciones iniciales tales como la temperatura superficial, albedo, orografía del terreno, etc.

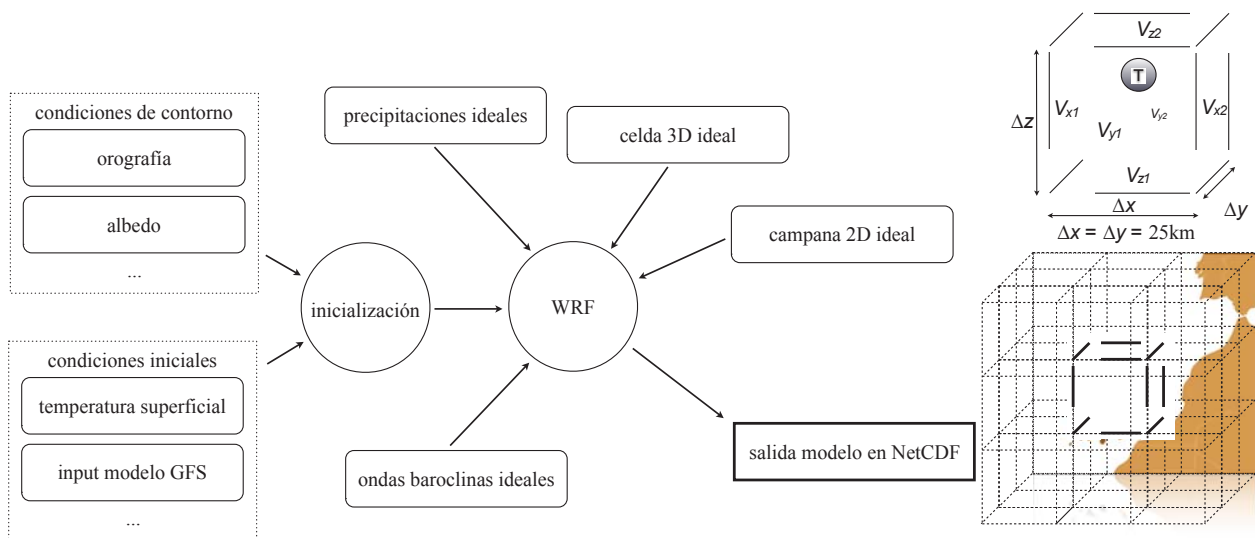


Figura 1. Esquema general de funcionamiento de un modelo atmosférico y subdivisión de la zona de estudio en celdas/subdominios

El proyecto *Weather Research Forecast*

El proyecto *Weather Research and Forecast Model* o WRF (Michalakes *et al.*, 2001) tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de pronóstico meteorológico y un sistema de asimilación de datos de nueva generación que permita profundizar y avanzar en el conocimiento y predicción de los sistemas mesoscalares. Pretende también promover puntos de conexión entre la comunidad científica y los centros de pronóstico operacionales en el ámbito de Estados Unidos. El WRF agrupa también todos los avances producidos en la aplicación de otros modelos más antiguos. Puede considerarse como un heredero directo del modelo MM5 (aunque este sigue siendo usado como tal hoy en día). Este *software* está siendo desarrollado por un gran número de centros e instituciones, como el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el National Center for Environment Prediction (NCEP) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Su código fuente es actualizado casi a diario y está disponible gratuitamente para la comunidad científica. Otras características importantes son:

- Escrito en Fortran 90 y Fortran 95 con formato de línea libre.
- Las subrutinas se adaptan al modelo de módulo introducido en la revisión 90 del lenguaje Fortran.
- Adaptado a computación y memoria distribuida mediante OpenMP, MPI, MPICH y un compilador C.
- Puede ser reconfigurado en tiempo de ejecución.
- Su salida es en el formato estándar NetCDF.
- Compilable y ejecutable en numerosas arquitecturas informáticas.

Viento superficial, transporte de Ekman y corrientes de afloramiento

La fuerza horizontal del viento sobre la superficie del océano es lo que se conoce como esfuerzo o *estrés del viento*. Se trata de una transferencia de momento horizontal y es el mecanismo que tiene la atmósfera para transmitir energía al océano. Puede considerarse como una *presión extra* que ejerce el viento sobre la superficie marina, lo que favorece la aparición de pendientes en el plano superficial del océano y desplazamientos de masas de agua marina.

La magnitud del esfuerzo del viento se corresponde con la expresión (6) enunciada por Bowden (1980):

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot U_{10}^2 \quad (6)$$

donde ρ es la densidad del agua y C_d es un factor adimensional llamado coeficiente de arrastre. Este coeficiente puede estimarse experimentalmente de diferentes maneras (Garrat, 1977), pero para este trabajo hemos elegido la de Yelland y Taylor (1996), que puede verse en la figura 2.

A partir de aquí, y asumiendo una viscosidad uniforme en el eje vertical, para un fluido sometido a la fuerza del viento las dos componentes de la velocidad (u , v) se definen según las siguientes expresiones matemáticas:

$$\begin{aligned} u &= V_0 e^{az} \cos\left(\frac{\pi}{4} - az\right) \\ v &= V_0 e^{az} \sin\left(\frac{\pi}{4} - az\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{donde } V_0 = \frac{\tau}{\sqrt{\rho_w^2 f A_z}}, \quad a = \sqrt{\frac{f}{2A_z}} \quad \text{para } z = 0 \text{ (superficie)} \quad \begin{aligned} v &= V_0 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \\ u &= V_0 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

y donde A_z es el coeficiente de difusión turbulenta vertical, que para el Atlántico tiene un valor aproximado de $1,2 \pm 0,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. f es el factor de Coriolis ($f = 2\Omega \sin\phi$).

Las expresiones de 7 nos indican que se genera una corriente superficial de velocidad V_0 , girada 45 grados a la derecha (*cum sole*) del viento en el hemisferio norte. Para una dirección del viento cualquiera se emplea una rotación de coordenadas cartesianas habitual:



$$\vec{V}_0 = M\vec{U}_{10} \quad \text{donde} \quad M = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & \sin \frac{\pi}{4} \\ -\sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{pmatrix}$$

Para el resto de la columna de agua se cumple la expresión 7, generándose la conocida espiral de Ekman (Ekman, 1905) representada en la figura 2 (centro). Esta espiral es lo que se denomina capa de Ekman (figura 2, derecha).

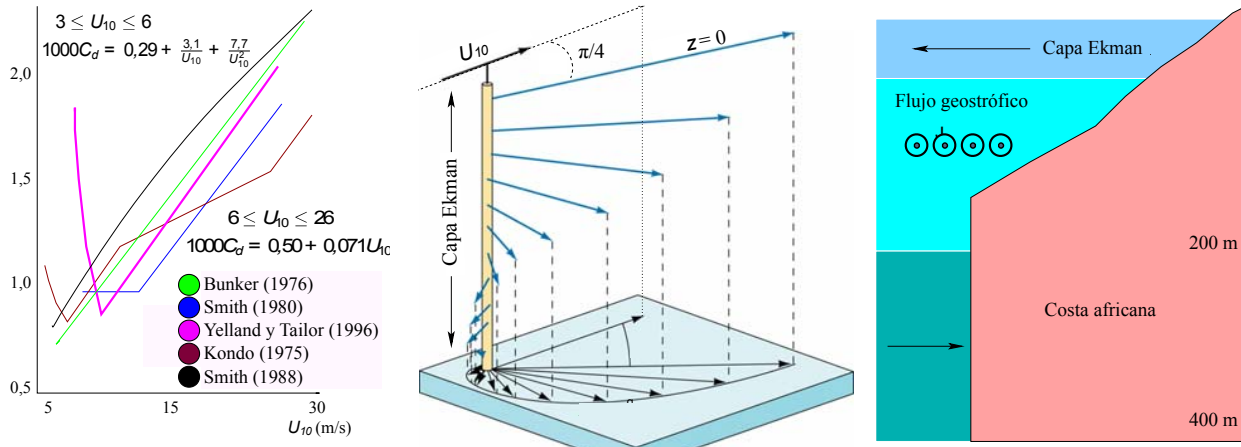


Figura 2. Formulación del C_d (izquierda), espiral del Ekman (centro) y estratificación vertical de la columna de agua (derecha)

Un flujo en la capa de Ekman ocupa un volumen y , y por lo tanto, transporta una masa por unidad de tiempo (Sverdrup, 1947). Este volumen transportado o desplazado es lo que se conoce como volumen de transporte o sencillamente transporte de Ekman. Es posible relacionar las componentes de la velocidad del viento superficial U_{10} con este transporte mediante las expresiones (Álvarez, 2006 y 2007):

$$\begin{aligned} Q_x &= \frac{\rho_a C_d}{\rho_w f} U_{10y} \sqrt{U_{10x}^2 + U_{10y}^2} \\ Q_y &= -\frac{\rho_a C_d}{\rho_w f} U_{10x} \sqrt{U_{10x}^2 + U_{10y}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

donde Q_x y Q_y son las componentes zonal y meridional de este transporte y tienen unidades de m^3/s o Sverdrups ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). El módulo del transporte (Q) suele expresarse por kilómetros.

La principal implicación de la expresión (9) es que el transporte de masa se debe exclusivamente al viento superficial ($z = 0$). Los vientos que soplan sobre la superficie del océano son los responsables de la aparición de la capa de Ekman, la cual desplaza agua en un ángulo recto a la derecha de la dirección del viento. Si además estos vientos soplan del norte a lo largo de la costa (en el hemisferio norte), puede producirse el proceso conocido como *afloramiento costero*: el agua es desplazada mar adentro y es reemplazada por agua situada por debajo de la capa de Ekman, de forma que se cumpla la conservación de la masa. Como el agua *aflorada* posee una temperatura menor (pues viene de profundidades del orden de varios cientos de metros), este proceso genera la aparición de una región de aguas frías y ricas en nutrientes en la superficie a lo largo de la costa.

Es posible expresar la velocidad de esta corriente vertical (corriente de afloramiento) w en la superficie ($z = 0$), en función del esfuerzo del viento τ y aplicando el tensor rotacional (Pedlosky, 1987; Coca, 2006):

$$\vec{w}_e = -\frac{1}{\rho} \cdot \vec{\nabla} \times \frac{\vec{\tau}}{f} \quad (10)$$



$$w_z = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(\tau_y/f)}{\partial x} - \frac{\partial(\tau_x/f)}{\partial y} \right) \tag{11}$$

donde w_e es un vector tridimensional con componentes x, y, z , aunque solo resulta interesante a efectos prácticos la componente vertical.

A partir de aquí, se define Q_{\perp} como la componente del transporte de Ekman en la *dirección perpendicular a la línea de costa*. Este índice constituye un indicador de la cantidad de agua aflorada o sumergida desde la base de la capa de Ekman. Valores positivos implican *afloramiento* y valores negativos, *hundimiento* o sumergencia. La expresión matemática de este índice es:

$$Q_{\perp} = -Q_x \cdot \sin \alpha + Q_y \cdot \cos \alpha \tag{12}$$

donde α es representa el ángulo normal a la costa en cada punto.

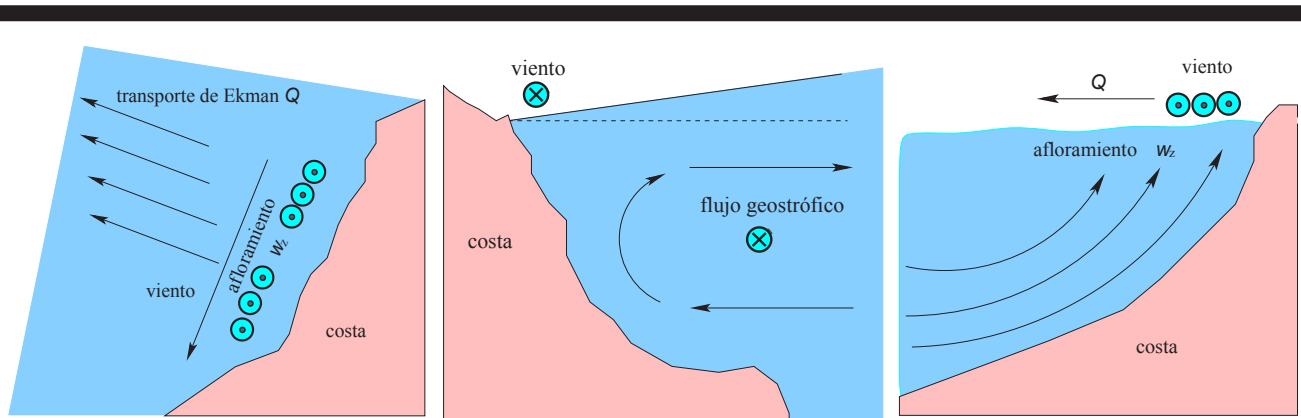


Figura 3. Elevación de la superficie del océano por el transporte de Ekman y conservación de la masa (vista en planta a la izquierda y vistas de la sección vertical en centro-derecha)

MÉTODOS

Fuentes y software para la obtención, procesado y explotación de bases de datos meteorológicas

Los datos utilizados para la inicialización del modelo y la correlación de los resultados, así como la salida de la propia simulación, suelen conllevar el uso de estándares específicos de empaquetado de información, procesado y visualización de esta. Realizamos aquí un resumen de estas herramientas. Incluimos también una breve descripción de las fuentes, instrumentos e instituciones empleados para la obtención de estas bases de datos.

- **GRIB:** *GRIB* es un formato matemáticamente conciso usado comúnmente en meteorología para registrar datos históricos o de predicción sobre el tiempo y el clima. Fue estandarizado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2003). En este trabajo se ha usado este formato para inicializar el modelo numérico.
- **NetCDF:** Formato estándar de intercambio de datos científicos binario, autodescritivo e independiente de plataforma. Su principal impulsor es la sección Unidata de la Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica (UCAR, en sus siglas en inglés). En este trabajo se ha usado, entre otras cosas, para salvaguardar el resultado de la simulación del WRF en disco.
- **HDF:** Muy parecido al NetCDF y considerado por muchos una evolución de este.
- **CDL:** Representación de formato texto plano jerarquizado de un fichero NetCDF. En este trabajo se ha utilizado como formato *punte*, entre la salida del modelo RAMS y la del WRF y con el objetivo fundamental de correlacionar ambos modelos.



- **NCL:** *NCAR Command Language* es una serie de herramientas y lenguaje interpretado para operar y posprocesar ficheros NetCDF y HDF. Es un producto del National Center for Atmospheric Research (NCAR). En este trabajo se ha utilizado para traducir datos de producción de clorofila estimados por la NASA en formato HDF a NetCDF.
- **Operadores NCO:** Consiste en una serie de pequeños programas escritos en lenguaje C y Fortran de libre disposición, cuyo principal cometido es facilitar las tareas más comunes relacionadas con ficheros NetCDF. El proyecto está dirigido por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de California. En este trabajo se han usado varios de estos operadores para extraer rangos de datos y aplicar operaciones a grandes volúmenes de información.
- **IDV:** *Integrated Data Viewer*. Software de visualización y procesado general de los formatos de empaquetado de datos expuestos anteriormente. Incluye un intérprete de lenguaje Python con el que se ha programado la gran mayoría de rutinas de correlación y procesado de este trabajo. Realizado por la UCAR.
- **Mercator-Ocean:** Esta institución tiene la misión de crear y mantener un sistema que describa en todo momento el estado del mar. En este trabajo se han usado sus bases de datos para obtener el estrés del viento medido a su vez por el sensor SeaWinds y correlacionarlo con el obtenido a partir del WRF.
- **SeaWinds:** Es un dispersómetro diseñado para determinar la sección eficaz (σ_0) de la superficie (marina en este caso). Los dispersómetros funcionan mediante la emisión de dos pulsos de microondas hacia la Tierra (en ángulos de 46° y 54°) por parte de una antena giratoria y midiendo la energía reflejada por ambos. Este sensor se encuentra a bordo del satélite QuickSCAT (figura 9, derecha).
- **NCEP:** El National Center for Environmental Prediction es el responsable de ejecutar el modelo atmosférico global GFS, a partir del cual se ha utilizado el campo de presiones para inicializar el modelo mesoescalar WRF.
- **CERSAT:** El Centro ERS de Archivado y Tratamiento forma parte del Instituto de Investigación para la Explotación del Mar (IFREMER). Fue creado en 1991 como una extensión de la Agencia Europea del Espacio (ESA) para dar cobertura al seguimiento y procesado de información de los satélites ERS-1 y ERS-2. Desde entonces, ha evolucionado hacia un centro de archivado, tratamiento y validado de datos de diferentes misiones y sensores (altímetros, dispersómetros, radiómetros, etc.). El CERSAT distribuye también datos del dispersómetro SeaWinds. En este trabajo se han utilizados las bases de datos de viento superficial estimado por dispersometría para correlacionarlo con la salida del modelo numérico.
- **MODIS:** El *MODerate Resolution Imaging Spectrometer* es un espectroradiómetro que vuela a bordo de varios satélites del programa norteamericano EOS (*Earth Observing System*) pertenecientes a la NASA. En este trabajo se han utilizado los datos obtenidos por este sensor para inicializar el modelo con la temperatura superficial del océano (SST).
- **SeaWiFS:** Se trata de un espectroradiómetro a bordo del OrbView2 que mide la radiancia que abandona el agua en seis bandas del espectro y dos del infrarrojo cercano. Las bandas 443 y 510 son las usadas para determinar la concentración de clorofila. En este trabajo se ha utilizado el índice de clorofila disuelta medido por este sensor para correlacionarlo con la variación del transporte de Ekman e índice de afloramiento obtenido a partir de la simulación.

Establecimiento de las condiciones iniciales y de contorno para la simulación

Las condiciones de contorno habituales del WRF son: datos topográficos con 10' de resolución espacial, uso del suelo cada 30', fracción de cobertura vegetal cada 10', temperatura del suelo cada 1° y albedo. El propio sitio web del WRF ofrece gratuitamente la descarga de estos bancos de datos suficientemente actualizados en formato GRIB. Los datos de altura del terreno se procesan en coordenadas σ (que *siguen la altura del terreno*).

El marco geográfico de la simulación se corresponde con la parte septentrional y central de la región de la Macaronesia. Los márgenes de la zona de estudio están definidos entre los 25° y 40° de latitud norte, así como los 5° y 20° de longitud oeste, y engloba a los archipiélagos de Azores, Madeira, Islas Salvajes y Canarias (Fontán, 2007). Esta región resulta interesante por la importante repercusión que tiene la interacción atmósfera-océano en el afloramiento costero de nutrientes a través del régimen de vientos.

Como condiciones iniciales, se utilizan datos globales de presión del National Center for Environmental Prediction (NCEP), con seis horas de intervalo temporal, desde el 30 de octubre del 2007 hasta el 30 de noviembre del mismo año.

El NCEP ofrece públicamente los resultados de su sistema de adquisición y procesado llamado Análisis Final Global (FNL, en sus siglas en inglés). El FNL tiene como objetivo recolectar y procesar las observaciones experimentales a nivel mundial cada seis horas, cuatro veces al día, generando una malla continua global de resolución 1° × 1° en 26 niveles verticales que van desde los 1.000 hasta los 10 milibares. Este procesado se realiza mediante el modelo global GFS. El GFS, desarrollado por la NOAA, es ejecutado cuatro veces al día y genera predicciones a 16 días, pero con resolución espaciotemporal cada vez menor. El modelo se ejecuta en dos partes. Una primera parte, de resolución más fina, para los primeros siete días de predicción y una segunda, hasta



el día decimosexto, con resolución más baja. Espacialmente, la superficie de la Tierra se divide en mallas de 35 y 70 km en la dimensión horizontal. En la vertical, se subdivide la atmósfera en 64 capas.

El NCEP pone a disposición pública, en tiempo real, los datos en formato GRIB. Su base de datos llega a los 600 Gb de espacio lógico y contiene un histórico que va desde el 30 de julio de 1999 hasta el presente. Las variables contenidas en estos ficheros (y con las que se inicializa el modelo) son: presión, altura geopotencial, ozono total, temperatura, temperatura potencial, componente zonal del viento, componente meridional del viento, velocidad de la presión vertical, vorticidad absoluta, humedad específica, humedad relativa, agua precipitable, agua equivalente a la profundidad en nieve acumulada, superficie cubierta por nubes, fracción de tierra, concentración de hielo, índice de estabilidad, contenido de humedad en el suelo, ratio de mezcla del ozono, inhibición convectiva, energía potencial convectiva, altura límite planetaria y temperatura en la tropopausa.

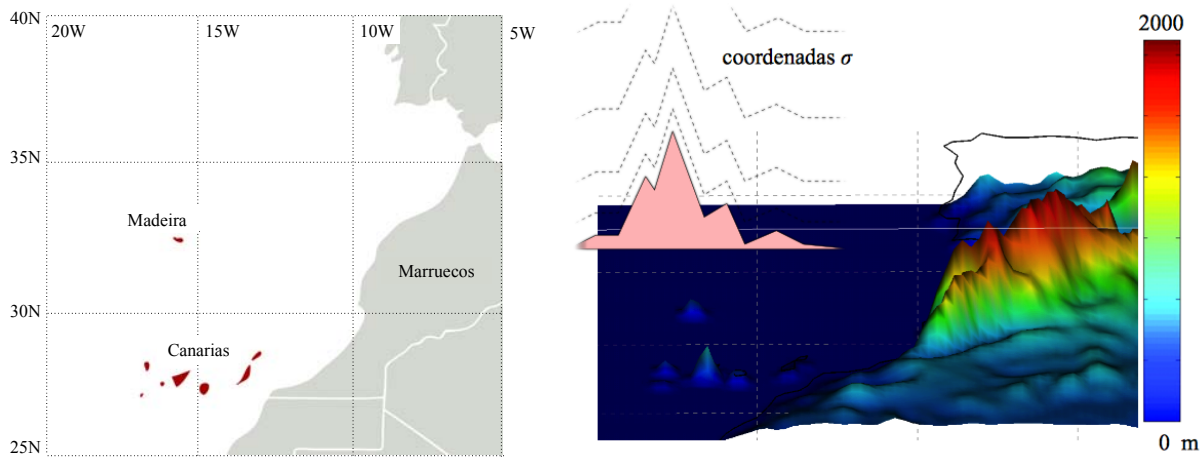


Figura 4. Condiciones de contorno geográficas y topográficas para la ejecución del modelo atmosférico WRF

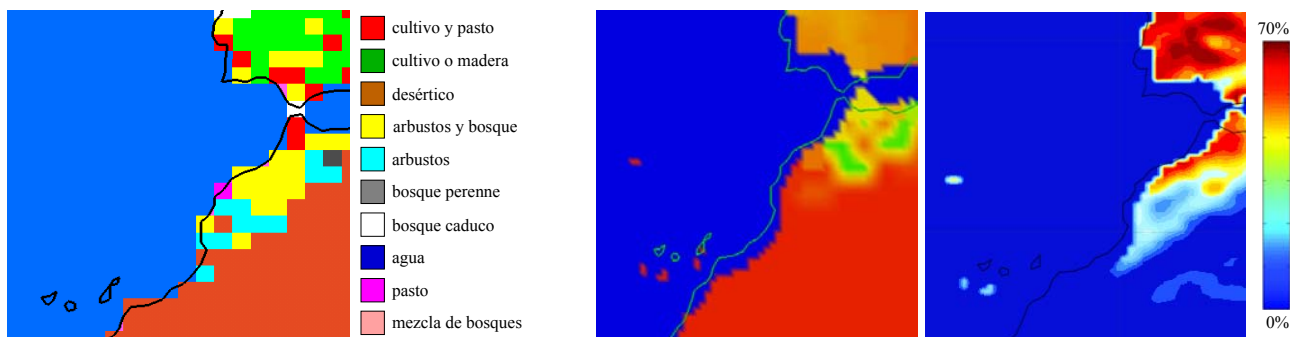


Figura 5. Condiciones de contorno adicionales (uso del suelo, albedo y cobertura vegetal) para la ejecución del modelo WRF

Al margen de la serie de datos del NCEP, también se inicializa al modelo con datos de resolución 1/12° de temperatura superficial oceánica (SST) provistos por la NOAA. La figura 6 muestra estos niveles de SST para varios días de noviembre del 2007 en la zona.



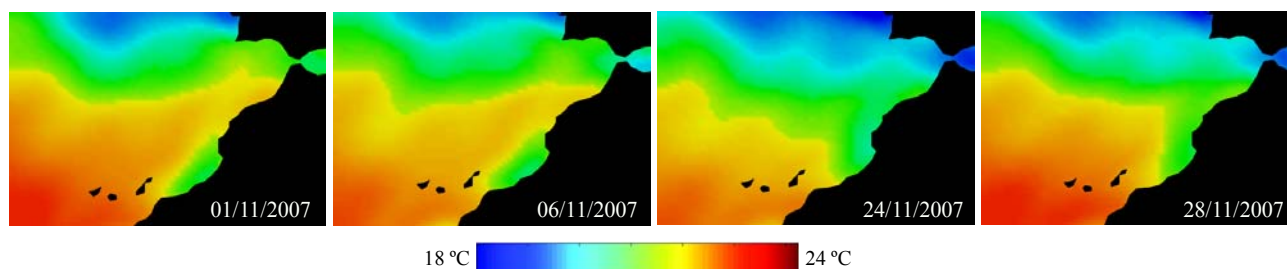


Figura 6. Temperatura superficial del mar (SST) como condición inicial

Ejecución de la simulación en un entorno computacional distribuido

La simulación es ejecutada empleando las técnicas más novedosas de computación distribuida, lo que permite reducir el tiempo de cálculo a unas pocas horas. Esto es posible gracias al hecho de que en el WRF han sido implementadas las últimas utilidades y *toolkits* de procesamiento en paralelo, tales como MPI, MPICH y OpenMPI.

El WRF está, en su mayoría, escrito en lenguaje Fortran 77 y 95 y se encuentra disponible como programario libre (Licencia Pública General) desde su página web en el National Center for Atmospheric Research (NCAR). Para la creación de los ejecutables elegimos el compilador de Fortran G95 (Vaught, 2008), por su gran disponibilidad en numerosas arquitecturas. Los binarios generados por el G95 aún no soportan la capacidad de trabajar con anidamientos y subdominios (Sadjadi *et al.*, 2008), hecho que condiciona el tamaño del dominio y la resolución de la malla espacial sobre los que se realizará la simulación. En nuestro caso, el tamaño de la celda escalonada (*staggered grid*) es de 25×25 km (nivel mesoescalar). Verticalmente, el WRF divide la atmósfera en un número fijo de niveles según coordenadas σ .

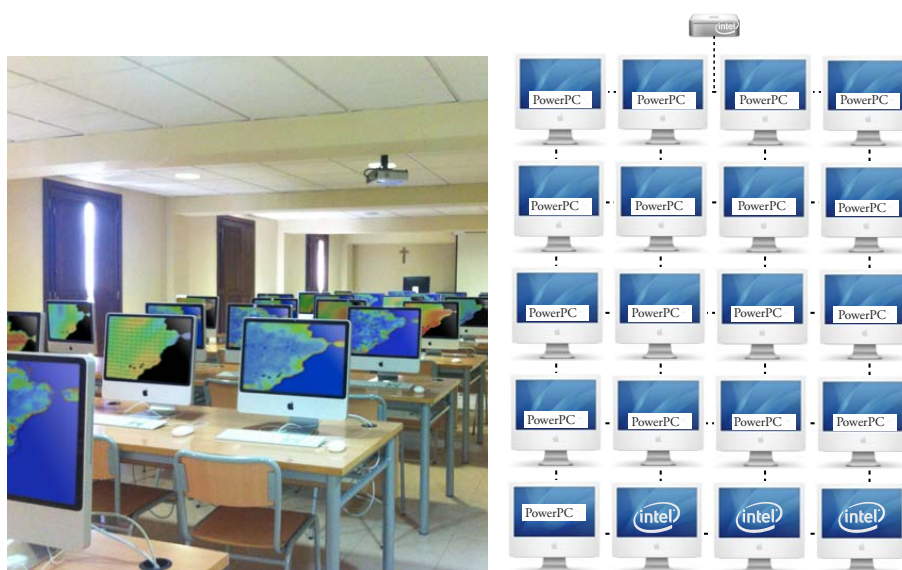


Figura 7. Despliegue informático para la ejecución de la simulación empleando técnicas de computación en paralelo

Para una ejecución óptima y eficiente del modelo se emplea un proceso de computación distribuida MPI basada en nodos de cálculo. El modelo WRF es capaz de ejecutarse en paralelo en una red de ordenadores, con lo que es posible disminuir el tiempo de las simulaciones en varios órdenes de magnitud. En concreto, la simulación fue llevada a cabo en una red interconectada de 21 ordenadores de arquitectura mixta: la mayoría basados en microprocesadores RISC PowerPC de IBM®, y cuatro de ellos basados en tecnología CISC x86 de Intel®. Una de estas computadoras realiza el papel de *nodo central* que sirve al resto los ficheros de entrada de configuración, condiciones iniciales y de contorno y mantiene un *buffer* para recuperar los resultados de la simulación.

El modelo produce como salida o resultado un fichero NetCDF de 2 Gb de volumen con multitud de datos sobre diversas variables atmosféricas. La figura 8 muestra, a modo de ejemplo, dos secciones de la temperatura potencial θ obtenida y una vista tridimensional de una sección vertical de la intensidad del campo medio de vientos para noviembre del 2007.

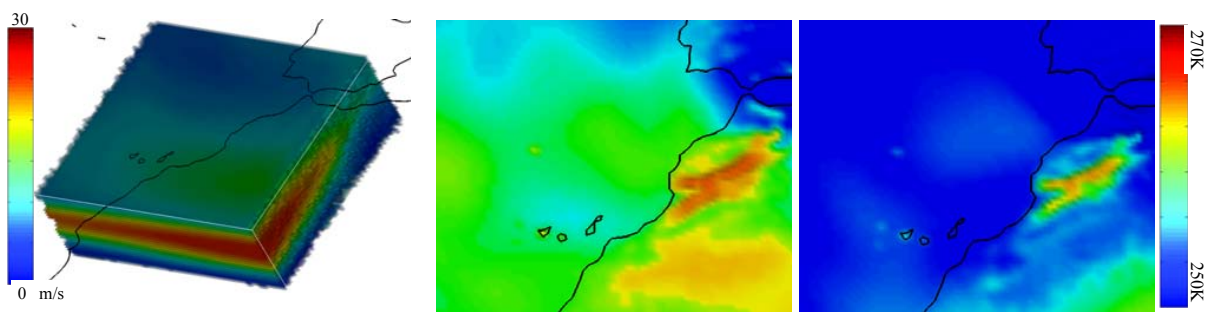


Figura 8. Sección 3D de la intensidad media del campo de vientos (noviembre del 2007) y dos divisiones verticales de θ (1 de noviembre del 2007)

Entre estas variables se encuentra el vector de componentes U_{10} y V_{10} , cuyo módulo representa la intensidad del viento sobre la superficie del océano. Este vector es el responsable directo del transporte de Ekman y del afloramiento costero. La información de este fichero se trata con el operador *ncks* (*NetCDF Kitchen Sink*) de la serie de operadores NCO para extraer el campo de vientos (U_{10} , V_{10}). La resolución espacial de este campo es de 25 km de celda escalonada (74×74 puntos en total) y el intervalo temporal, trihorario.

Metodología seguida para la validación de resultados

Para poder ejecutar métricas de comprobación son necesarias medidas experimentales contra las que verificar la salida del modelo WRF en la zona de estudio. Afortunadamente, se dispone de una amplia fuente de datos sobre el viento en el océano: el satélite QuikSCAT y su sensor dispersómetro SeaWinds. Son varias las instituciones que ofrecen la descarga gratuita de los datos registrados con fines científicos. Se ha elegido el servicio de procesado de imágenes de satélite CERSAT del IFREMER. Este aplica una interpolación estadística, haciendo uso conjunto de estimaciones del European Centre for Mean-Range Weather Forecasting (ECMWF) y de las lecturas del SeaWinds (Bentamy, 2002). La resolución final es de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (66×78 puntos) y de 6 h de intervalo temporal (4 datos/día).

La correlación entre ambas series de datos es fácilmente implementable en instrucciones *Python* integrado como intérprete en el software de visualización *Integrated Data Viewer* (IDV). Las variables M_i y O_i hacen referencia a todos los datos de la malla en un momento en el tiempo (en nuestro caso, a todos los puntos de un día). Tan solo es necesario implementar un bucle que recorra los días del periodo de análisis (noviembre del 2007). El IDV también tiene en cuenta que las resoluciones espaciales entre ambas series de datos son distintas (66×78 y 74×74), y las adapta a una retícula común continua sobre la que realiza las operaciones (figura 9, izquierda).



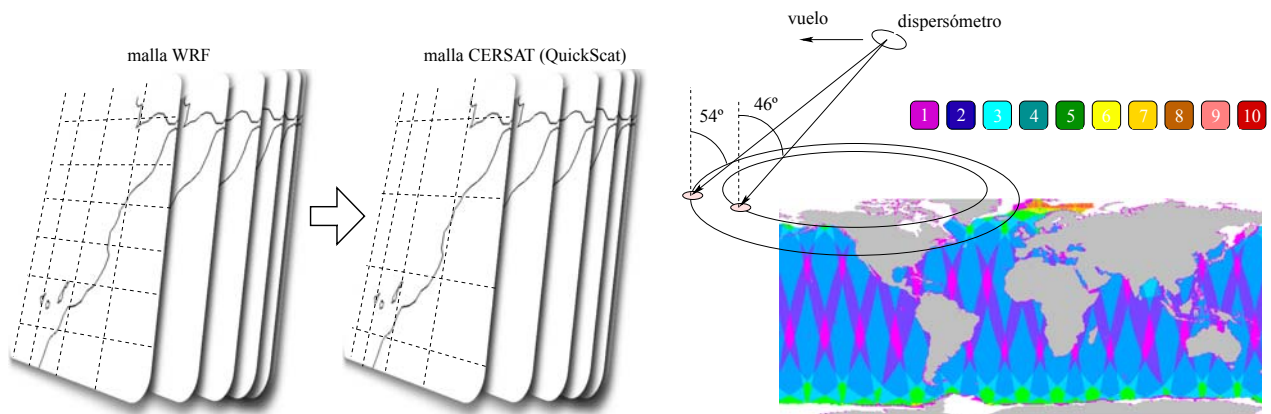


Figura 9. Mallado espacial utilizado para la correlación entre los vientos predichos por el WRF y los obtenidos a partir de los datos generados por el satélite QuickScat (izquierda). Funcionamiento general y número de pasadas del dispersómetro SeaWinds (derecha)

Derivación de corrientes, transporte de Ekman y tasas de afloramiento costero

Para el cálculo del transporte de Ekman (expresión 12) es necesario obtener el ángulo α perpendicular a la costa en cada punto. Para ello, interpolamos el trazo de la costa a una *curva de Bezier* con 5 puntos de control, lo que permite obtener una serie de vectores perpendiculares representativa de la forma del terreno. También se realiza un cálculo basado en una reducción completa de la costa a una recta con una inclinación de 45° , obteniéndose resultados no muy dispares.

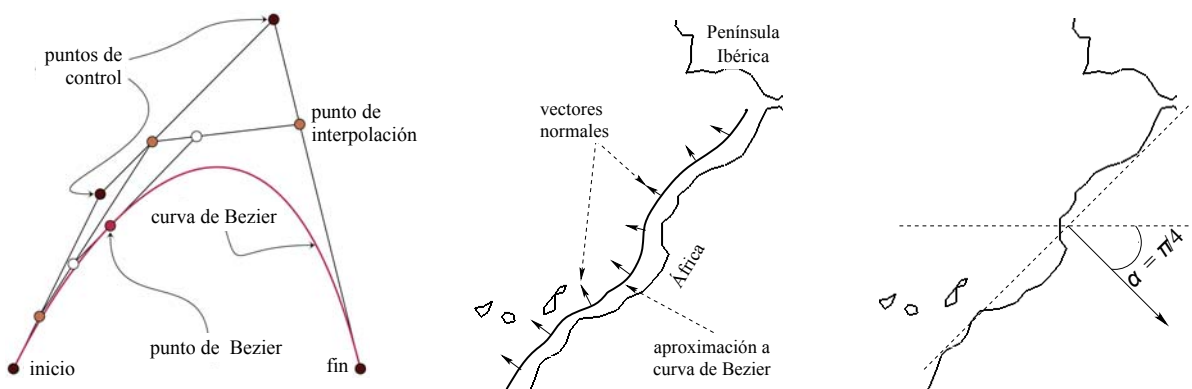


Figura 10. Interpolación de la costa a una curva de Bezier y a una simple recta (derecha) para obtener los vectores normales

RESULTADOS

Campo de vientos simulado

En la figura 12 se muestra la media para cada día del campo de vientos a 10 metros sobre la superficie simulado con el modelo atmosférico WRF. Las flechas marcan la dirección y son proporcionales a la intensidad, la cual viene indicada mediante escala de color.

Se constata que en la componente zonal (U_{10}) predominan fundamentalmente valores de intensidad moderada negativa (de 0 a -5 m/s), mientras que la componente meridional (V_{10}) presenta más diversidad en módulo y sentido. Se observa también un pico de intensidad el día 24 de noviembre (hasta 10 m/s del noreste) y un periodo de dos días (19-20) en el que ambas componentes tienen valores positivos (vientos del suroeste con sentido contraaliso). La figura 13a muestra cómo, en promedio, en las proximidades del continente africano, el viento sopla en mayor medida del noreste (favorable a procesos de afloramiento) y del sureste lejos de esta.

En resumen, el campo de vientos superficial simulado responde, en promedio, a una situación típica de Alisios y es en este contexto donde presenta mayor intensidad media. Lejos de la costa, el viento también presenta giros ciclónicos (día 17) y anticiclónicos (día 14).

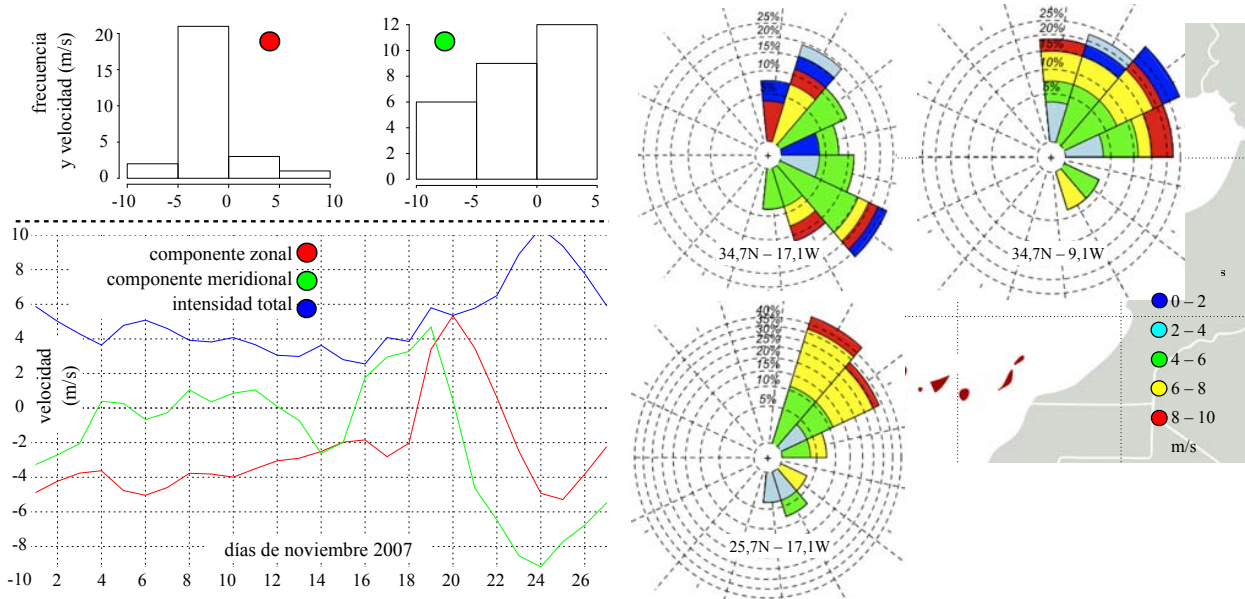


Figura 11. Media espacial de las componentes zonal y meridional e intensidad total (m/s) del viento sobre el mar para cada día de noviembre del 2007 más histograma de cada componente (izquierda). Rosa de los vientos en el mes de noviembre en varios puntos (derecha)



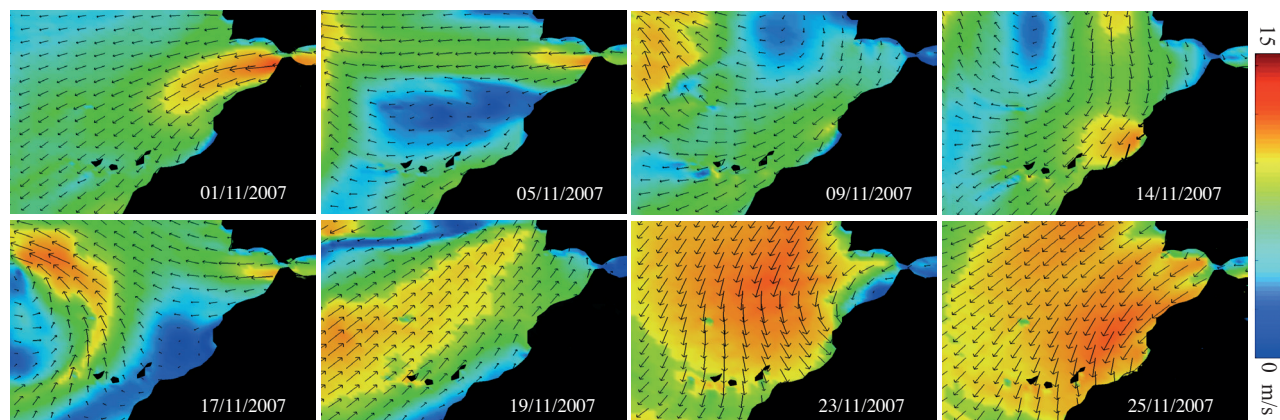


Figura 12. Intensidad (m/s) y dirección del campo de vientos sobre la superficie del océano para varios días del mes de noviembre del 2007

Validación del modelo

La figura 13 muestra, a partir de datos del dispersómetro SeaWinds (posprocesados por el CERSAT), las medias mensuales (WRF y CERSAT), con el objetivo de correlacionar el campo de vientos simulado con datos de origen experimental.

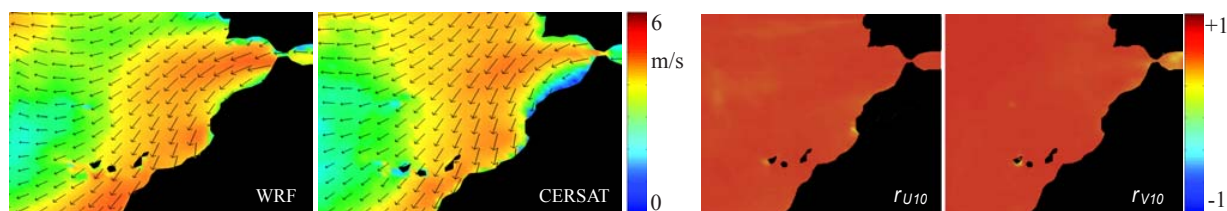


Figura 13. Campo de vientos medio predicho por el WRF y el observado por el dispersómetro SeaWinds (izquierda). Correlación entre datos de naturaleza experimental y los calculados por el WRF para cada componente (derecha)

Comparación con resultados del modelo RAMS del CEAM

El Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo ha realizado una simulación muy similar a la de este trabajo. Mediante el uso de otro modelo mesoescalar sin parentesco alguno, el *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS), se ha calculado el campo de vientos en la misma zona geográfica. El CEAM, al contar con una mayor potencia de cálculo, ha dotado al campo de vientos de mayor resolución: del orden de 10 km de tamaño de celda escalonada y con un intervalo temporal de 3 horas desde el 29 de octubre del 2007 al 20 noviembre del 2007.

La figura 14 muestra el resultado de la ejecución del RAMS para varios días de noviembre del 2007 y su correlación con los resultados predichos por el WRF.

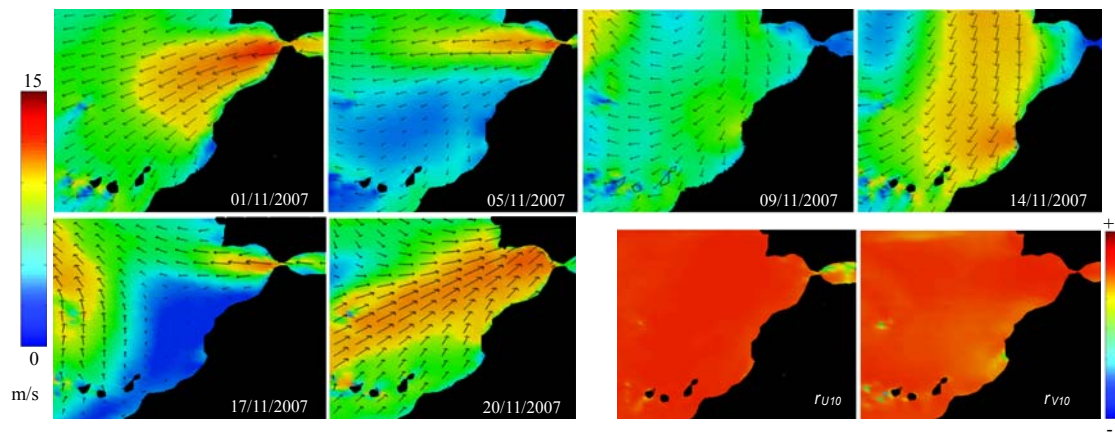


Figura 14. Campo de vientos obtenido con el modelo RAMS para varios días de noviembre del 2007 y coeficiente de correlación de las componentes zonales y meridionales entre RAMS y WRF

Transporte de Ekman y tasas de afloramiento

La figura 15 (izquierda) muestra valores de τ a partir del campo de vientos superficial generado por el WRF para varios días de noviembre del 2007 obtenidos a partir de la expresión 6. La figura 15 (centro) muestra el valor medio de las corrientes inducidas por viento. En la figura 15 (derecha) se compara el módulo del estrés del viento obtenido con el WRF y el obtenido por el grupo Mercator-Ocean.

Se aprecia que los valores de τ se correlacionan bien con los estimados por el grupo Mercator-Ocean exceptuando las zonas próximas al estrecho de Gibraltar. Cerca de la costa se aprecia en general un mayor estrés del viento en el día 14 y la última semana de noviembre. En promedio, entre las latitudes 25°N y 30°N (Canarias), se observan dos zonas que padecen con mayor intensidad el esfuerzo del viento. En mar abierto se dan también varios eventos de estrés relevantes durante la primera quincena del mismo mes.

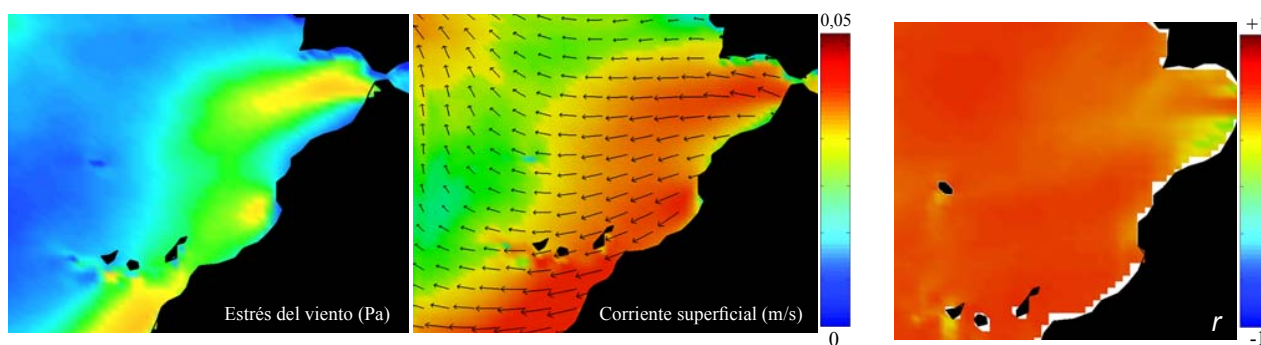


Figura 15. Estrés del viento (a) y corriente superficial media (b) para el mes de noviembre. Correlación del estrés del viento con datos de naturaleza experimental derivados por el grupo Mercator-Ocean (derecha)



La gráfica de la figura 16 muestra el nivel del transporte para cada día de noviembre, donde puede apreciarse que se da un aumento considerable del módulo del transporte (Q) en los últimos días de este mes.

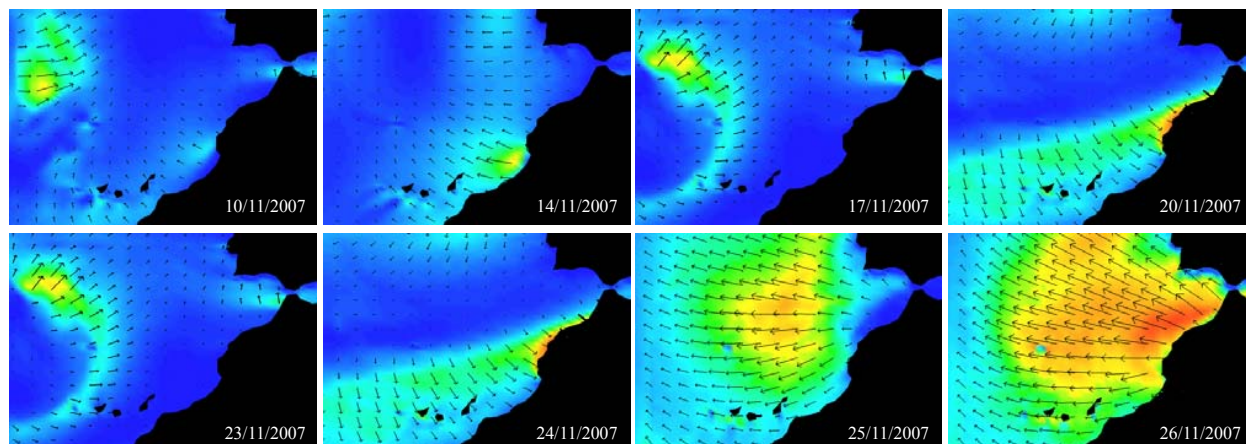


Figura 16. Módulo del transporte de Ekman (Q) para varios días de noviembre del 2007

En la figura 17 (centro) se representa la media mensual del transporte. En esta última se han indicado también dos puntos donde se cuenta con datos de naturaleza experimental del valor del transporte y con los que es posible realizar una comparación cuantitativa. Estos valores han sido estimados por la PFEG y se encuentran a libre disposición a través del Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC). El FNMOC mantiene un histórico de medias de niveles de presión atmosférica sobre el mar desde 1967 hasta la actualidad, a partir de las cuales el PFEG estima los índices de afloramiento (figura 18). Desafortunadamente, la resolución es muy pequeña y solo se cuenta con un dato al norte de Canarias ($32,5^\circ$ N; $14,5^\circ$ W) y otro al sur del archipiélago ($24,5^\circ$ N; $21,5^\circ$ W).

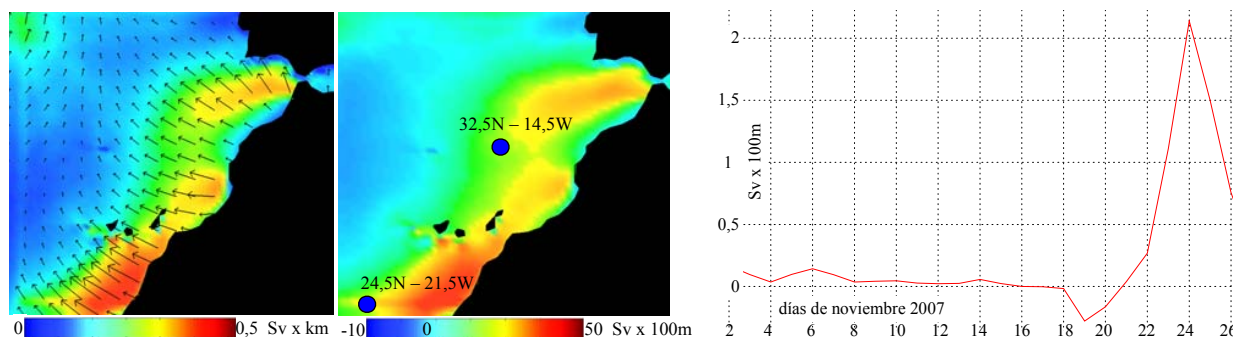


Figura 17. Media mensual del módulo del transporte de Ekman Q (izquierda), índice de afloramiento Q_{\perp} con puntos PFEG de afloramiento estimado (centro) y media para cada día en toda la zona de simulación de Q_{\perp} (derecha)



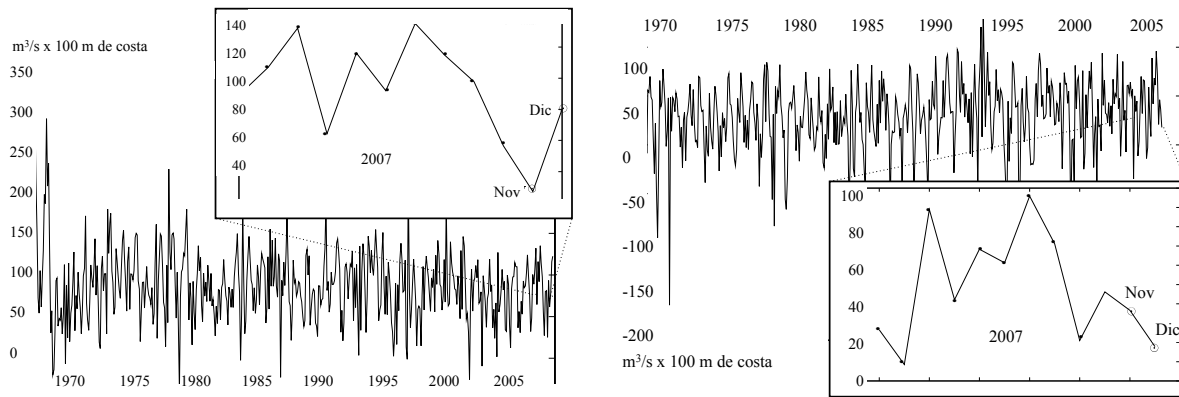


Figura 18. Índice de afloramiento (estimado por la PFEG) entre noviembre de 1967 y diciembre del 2007 (junto a detalle del año 2007) para el punto de coordenadas 24,5° N y 21,5° W (izquierda) y 32,5° N y 14,5° W (derecha)

DISCUSIÓN

Validez del uso del WRF para el cálculo del transporte

Como se ha podido comprobar, la correlación entre los vientos simulados y los obtenidos por dispersometría (naturaleza experimental) es bastante buena (figura 13, derecha). La tensión superficial o estrés del viento derivada a partir del WRF se correlaciona también aceptablemente con los valores estimados por el grupo Mercator-Ocean (figura 15 derecha).

Respecto al transporte de masas de agua, se han comparado los valores estimados por la PFEG para los dos puntos seleccionados con el valor medio del transporte, en esas mismas coordenadas, obtenido a partir del WRF. Los resultados son muy concordantes:

	A partir del WRF	Estimado por PFEG
32,5° N – 14,5° W	0,033	0,036
24,5° N – 21,5° W	0,027	0,027

Validez del uso del WRF para predecir fluctuaciones en los niveles de clorofila marina disuelta

La figura 19 muestra los valores de clorofila detectados por sensores MODIS (proyecto *Ocean Color* de la NASA) para noviembre y diciembre del 2007 en la zona de estudio. También se indica la diferencia relativa de esta magnitud entre estos dos meses, observándose un aumento de la producción primaria. Los altos niveles relativos del transporte de Ekman, calculados al final del mes de noviembre (figura 17, derecha, y figura 16) en la misma región (concretamente en las latitudes 25° N y 30° N), podrían justificar el hecho de que se observe un aumento de la producción primaria en el mes posterior (diciembre del 2007).



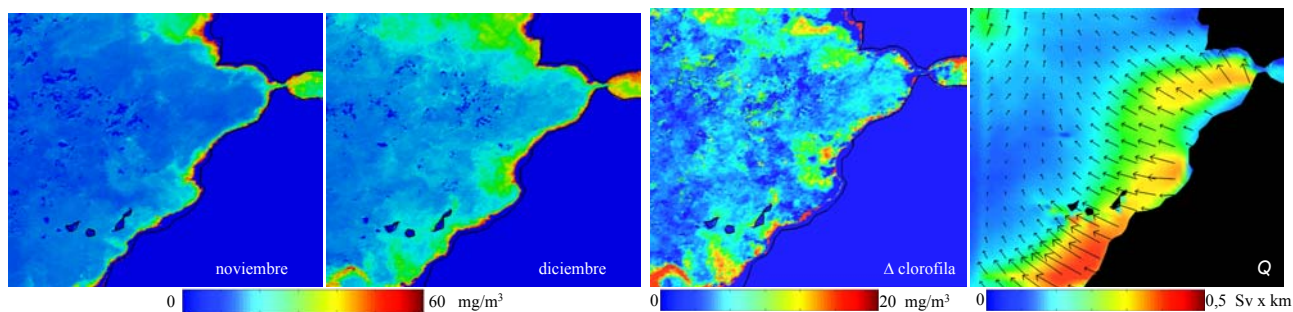


Figura 19. Aumento relativo de los niveles de clorofila disuelta y transporte de Ekman medio en el mes de noviembre del 2007

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra cómo el uso de un entorno de cálculo distribuido, compuesto por ordenadores de consumo y de bajo coste, representa una alternativa viable para la ejecución de modelos atmosféricos de última generación en tiempos de computación razonables. Se ha utilizado el modelo de última generación WRF sobre una red de computadoras de sobremesa y, una vez establecidas las condiciones iniciales y de contorno, se ha obtenido el campo de vientos sobre la superficie del océano. La zona elegida para la simulación se corresponde con la Macaronesia central/norte y resulta interesante por los efectos conocidos del régimen de vientos en el proceso de afloramiento costero.

El régimen de vientos simulado se ha correspondido muy aceptablemente con datos de módulo y sentido obtenidos a partir de técnicas de dispersometría por satélite (naturaleza experimental). El mismo campo de vientos también se ha correlacionado satisfactoriamente con otro modelo mesoescalar (RAMS), corrido por otra institución con mayores recursos informáticos y capacidad de cómputo.

Una vez validado el modelo, se ha calculado la interacción derivada entre campo de vientos simulado y el océano, lo que ha dado como resultado las corrientes superficiales y el transporte de Ekman en la zona. Esta fuerza de cizalla del viento sobre la superficie del mar (o estrés del viento) también se ha correlacionado muy adecuadamente con la estimada por otros grupos de investigación a partir de datos de telemetría.

Por último, se ha derivado el índice de afloramiento en toda la zona de estudio y se ha comparado la media mensual con la estimada a partir de datos experimentales en dos puntos al norte y al sur del archipiélago canario. En estos dos puntos, los índices de afloramiento calculados a partir del régimen de vientos del WRF y el experimental, son muy coincidentes. A partir de datos de clorofila disuelta, estimados por telemetría, se verifica que hay un aumento de las cantidades de nutrientes en el mes de diciembre del 2007. El índice de afloramiento obtenido a partir del WRF es especialmente alto a finales del mes de noviembre, lo cual explicaría el aumento relativo del nivel de estos nutrientes en el mes siguiente.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, I. 2006. Ekman transport along the Galician coast (northwest Spain) calculated from forecasted winds. *Journal of Geophysical Research*, 111(c10005), 12.
- ÁLVAREZ, I. 2007. Ekman transport along the Galician coast (NW, Spain) from Quikscat winds. *Journal of marine systems*, 101-115.
- BENTAMY, A. 2002. QuikSCAT scatterometer mean wind field products user manual. *Technical report, French Processing and Archiving Facility*.
- BOWDEN, K. F. 1980. Physical factors: salinity, temperature, circulation and mixing processes. *Biogeochemistry of Estuaries*, 37.
- BOWDEN, K. F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. *Ellis Horwood Marine Science*.
- COCA, J. 2006. Cálculo del bombeo de Ekman a partir de datos del dispersómetro de viento SeaWids a bordo del satélite QuikSCAT. *Revista de Teledetección*, 40-44.



- EKMANN, V. M. 1905. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents, *Arkiv for Matematik. Astronomi, och Fysik*, 2, 11.
- FONTÁN, A. 2007. Estudio geodinámico de las playas de Maspalomas y El Inglés. Trabajo de Diploma de Estudios Avanzados, Universidad Católica de Valencia "San Vicente Mártir". 120 pp.
- GARRAT, J. R. 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Monthly Weather Review*, 105, 915-929.
- MICHALAKES, J., CHEN S., DUDHIA J., HART L., KLEMP J., MIDDLECO J. & SKAMAROCK, W. 2001. Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. In *Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 868-1.001.
- PEDLOSKY, J. 1987. Geophysical Fluid Dynamics. *Springer-Verlag*.
- SADJADI, S., MUÑOZ, J., LOPEZ, D. & FIGUEROA, J. 2008. Transparent Grid Enablement of WRF Using a Profiling, Code Inspection, and Modeling Approach. *Technical report, Barcelona Supercomputing Center* (poster).
- STULL, R. B. 2000. Meteorology today for scientists and engineers. West Publishing.
- SVERDRUP, H. 1947. Wind-driven currents in a baroclinic ocean: with application to the Equatorial currents of the eastern Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 33, 318-326.
- VAUGHT, A. 2008. G95: It's Free Crunch Time. *Technical report, G95*.
- WMO, 2003. Guide to the WMO Table Driven Code Form Used for the Representation and Exchange of Regularly Spaced Data In Binary Form. *Technical report, World Meteorological Organization*.
- YELLAND, M. & TAYLOR, P. K. 1996. Wind stress measurements from open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 26, 541-558.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del Diploma de Estudios Avanzados de Alberto Corbí Bellot, dirigido por el Dr. Javier Alcántara Carrió y está enmarcado dentro del proyecto CANOA - Corrientes de afloramiento costero en el noroeste de África (ref. CTM2005-00444/MAR), financiado por el plan nacional de I+D+i del Ministerio de Educación y Ciencia.

Los autores quisieran agradecer al Instituto de Ciencias Marinas (ICM) y en especial al Dr. José Luis Pelegrí Llopart la oportunidad de formar parte del equipo del mencionado proyecto, el cual ha sido una fuente de indudable inspiración en el desarrollo de este trabajo.

Igualmente, los autores desean expresar también su gratitud hacia el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) por la aplicación del modelo mesoescalar RAMS y la cesión de los resultados de la simulación para ser comparada con la llevada a cabo en este trabajo.

Por último, se desea reconocer la colaboración del Máster de Creación Digital de la Universidad Católica de Valencia y a la Red Iberoamericana en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Geológicos del Litoral por prestar parte de su infraestructura informática para la ejecución favorable del modelo atmosférico WRF.



