Efecto de los temporales en la costa Mediterránea española

Artículo preparado por el Area de Medio Físico de la Dirección de Infraestructuras y Servicios Portuarios de Puertos del Estado, con la colaboración de Marcos García Sotillo del Proyecto Europeo de Reanálisis de Viento y Oleaje (HIPOCAS). Los datos utilizados proceden del Instituto Nacional de Metorología y de las Redes de Medida y Sistemas de Predicción de Puertos del Estado.

Durante varios días del pasado mes de Noviembre las costas españolas del mar Mediterráneo se vieron azotadas por uno de los temporales más duros de los últimos tiempos. Entre los días 10 y 16 de noviembre se registraron fuertes vientos y oleaje acompañados de una importante subida del nivel del mar, que ocasionaron notables daños en la costa, tanto por las cotas alcanzadas como por su persistencia. Este artículo pretende ofrecer una descripción del fenómeno basada en los sistemas de medida y predicción de Puertos del Estado, desarrollados y gestionados por el Área de Medio Físico, perteneciente a la Dirección de Infraestructuras y Servicios Portuarios.

Estos sistemas de medida y predicción han sido desarrollados para dar soporte al sistema portuario de titularidad estatal, en relación con la influencia del medio físico en el diseño y explotación de infraestructuras portuarias.

Puertos del Estado, consciente de la utilidad de esta información para la sociedad en su conjunto, ha facilitado el acceso libre a la misma a través de su servidor en Internet (http://www.puertos.es). Actualmente, alrededor de 1.600 usuarios, tanto privados como públicos, entre los que destacan el Instituto Nacional de Meteorología (INM) y la Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR), visitan diariamente este servidor, que además de la predicción marina y los datos de las redes de medida, permite el acceso al banco de datos oceanográficos de Puerto del Estado.

De esta forma, la difusión, el impacto y la dependencia de esta información en las personas e instituciones españolas relacionadas con el medio marítimo es cada vez mayor, y es importante asegurar su correcto funcionamiento, especialmente en situaciones excepcionales como la ocurrida el pasado mes de noviembre de este año en la cuenca occidental del Mar Mediterráneo.

El funcionamiento correcto de las redes de medida y los sistemas de predicción en esta zona pudo suministrar a los usuarios en tiempo real los valores alcanzados por estos fenómenos y permitió anticiparse a ellos para minimizar, en lo posible, los daños producidos.

El Área de Medio Físico ha recopilado todos los datos necesarios para efectuar un estudio en detalle de esta situación excepcional y evaluar el comportamiento de los sistemas mencionados durante la misma. La naturaleza del fenómeno provoca también la necesidad de evaluar el impacto de una situación de este tipo en la determinación del régimen medio y extremal para la zona.

SISTEMAS DE INFORMACIÓN EN TIEMPO REAL DE PUERTOS DEL ESTADO

Puertos del Estado, a través del Área de Medio Físico, mantiene una serie de redes de medida y sistemas de predicción que aportaron información en tiempo real durante el temporal y que a continuación se describen brevemente. Los resultados aquí presentados no son sino un análisis preliminar de los datos obtenidos por estos sistemas.

La red de boyas de aguas profundas mide parámetros oceanográficos y meteorológicos en puntos con profundidades entre 200 y 800 metros. Los datos son transmitidos cada hora vía satélite. En la zona afectada por el temporal se encuentran dos de estos instrumentos: Cabo Begur, al norte de Cataluña y Mahón, al este de Menorca.

La red costera de boyas proporciona datos de oleaje en tiempo real en puntos de aguas poco profundas. En el área de interés existen 6 boyas, localizadas en Palamós, Tarragona, Valencia, Alicante, Cabo de Palos y Cap de Pera.

La red de mareógrafos (REDMAR) está constituida por estaciones de medida de nivel del mar en los Puertos, que transmiten dos veces al día los datos medidos con un intervalo de 5 minutos. El fenómeno estudiado se registró en los mareógrafos de Barcelona y Valencia.

El sistema de predicción de oleaje proporciona, mediante el empleo del modelo numérico WAM, una predicción de los parámetros integrados del campo de oleaje. El sistema Nivmar proporciona una predicción del nivel del mar en las costas españolas por medio del modelo numérico HAMSOM. A diferencia de las tablas de marea tradicionales, la predicción generada por Nivmar tiene en cuenta las variaciones producidas por la meteorología (denominadas residuos meteorológicos), que en general son superiores a la marea astronómica en los puertos del Mediterráneo.

Ambos sistemas realizan predicciones a 48 horas vista, dos veces al día y están alimentados por campos de viento y presión proporcionados por el INM (Instituto Nacional de Meteorología). Estas variables meteorológicas se generan por medio del modelo HIRLAM.

Estos sistemas, aparte de ser herramientas predictivas, constituyen un elemento fundamental para el estudio de la evolución del oleaje y el nivel del mar durante un temporal. Para este estudio se utilizan los campos analizados de los modelos. Se entiende como campos analizados, a los campos de oleaje y nivel del mar producidos por datos meteorológicos que han sido corregidos con mediciones, por tanto, datos meteorológicos producidos después de la fecha que representan.

DESCRIPCIÓN DEL TEMPORAL

Durante los días 10 al 16 de noviembre la cuenca Mediterránea occidental se vio afectada por un fuerte temporal caracterizado por vientos y oleaje de gran intensidad, así como importantes subidas del nivel de mar, acompañados en algunas áreas por situaciones de precipitación intensa. Este temporal azotó muy especialmente regiones costeras españolas, tanto de la Península como de las Islas Baleares y Melilla, así como la costa marroquí y argelina, dejando a su paso graves y costosas pérdidas tanto en vidas humanas como en daños materiales.

La situación meteorológica causante de dicho temporal se caracteriza por la existencia de un anticiclón que bloquea la circulación zonal, originándose tanto a barlovento como a sotavento del mismo dos intensas zonas de bajas presiones. Con relación a su duración cabe reseñar que esta situación suele mostrar una alta persistencia temporal, siempre ligada a la vida media del anticiclón.

La figura 1 muestra la situación en superficie para el día 10 de noviembre a las 12 h GMT (Información extraída del boletín meteorológico del INM). Se observa la existencia de un intenso anticiclón de bloqueo situado al noroeste de la Península Ibérica sobre el Océano Atlántico y una baja situada sobre el Norte de África, que es la causante de los fuertes vientos que soplaron sobre las áreas anteriormente citadas.

En análisis posteriores (11 de noviembre a las 6h GMT) se observa un desplazamiento de la baja hacia el Norte. Este movimiento se ve acompañado de una profundización e intensificación de la misma, favorecida por su paso de tierra a mar.

La nueva situación de la baja al sudeste de las Baleares produce fuertes gradientes de presión entre la costa africana y las Islas Baleares, así como entre estas ultimas y el Levante español. Siendo afectadas estas zonas por vientos de gran intensidad así como por eventos de precipitación torrencial.

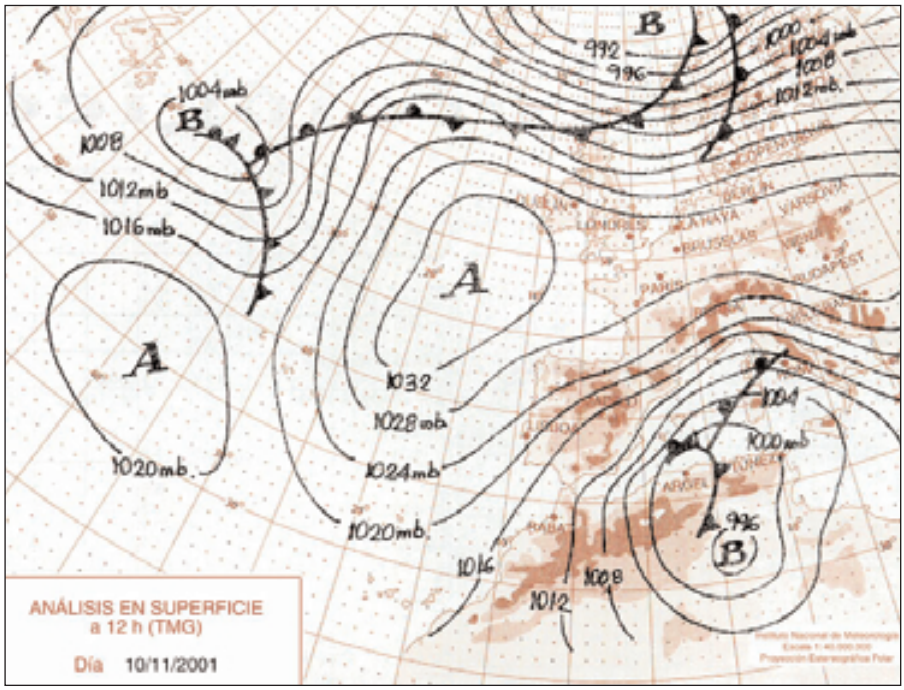


Figura. 1.–Análisis de la situación en superficie extraída del boletín meteorológico del INM correspondiente al día 10 de noviembre a las 12 h GMT.

En la figura 2 se muestra el análisis del campo de viento a 10 m para el día 11 a las 0 h GMT, producido por el modelo meteorológico HIRLAM procesado por el INM, en el que se observa la fuerte intensidad del mismo, más de 33 m/s en algunas zonas.

Conforme avanza el día 11, al igual que en días sucesivos la baja va desplazándose, forzada por el anticiclón situado sobre el Atlántico, hacia el nornordeste, produciéndose una desintensificación de la misma, acompañada de un descenso general del viento en las zonas anteriormente citadas.

A partir del día 15 la baja se ve forzada nuevamente por el anticiclón a desplazarse en dirección sudsudoeste, situándose su centro de acción sobre las Baleares, produciendo un nuevo temporal de viento que afecta esta vez a las zonas costeras de Cataluña, Levante así como a la zona norte de las Islas Baleares, como se pude ver en la figura 3.

Conforme el anticiclón va abandonando su posición de bloqueo sobre el Atlántico para adentrarse tierra adentro en el continente, se observa un paulatino descenso de las condiciones ciclogenéticas sobre el Mediterráneo occidental. Desapareciendo estas de dicha área el día 16 de Noviembre, finalizando así uno de los mayores temporales de los últimos tiempos para muchas de las regiones costeras de la cuenca del Mediterráneo occidental.

Esta situación meteorológica produjo un fuerte oleaje durante los días 10 al 16 de noviembre en todo el Mediterráneo occidental, produciéndose dos picos que se corresponden con las dos intensificaciones de la baja los días 11 y 15 de noviembre.

En el primer pico, el oleaje tiene dirección de propagación predominantemente norte y afecta a la costa de Cataluña, Levante, Baleares y Norte de África y en el segundo la dirección de propagación es oeste y afecta muy especialmente a Cataluña y Levante.

En las figuras 4 y 5 se pueden ver los mapas de oleaje procedentes del modelo WAM de oleaje (PE) para los días 11 a las 0h GMT y 15 a las 12h GMT.

Este temporal produjo alturas de ola muy elevadas con una persistencia de varios días, alcanzándose periodos de pico de hasta 13 segundos, lo que es inusual en el Mediterráneo.

Los registros de oleaje obtenidos en la boya de Mahón ilustran esta situación, ya que independientemente de los picos alcanzados, el oleaje más bajo que se registró a lo largo de los seis días que dura el temporal es de casi 3 m de altura significante, lo que en una situación normal se considera una altura de ola elevada.

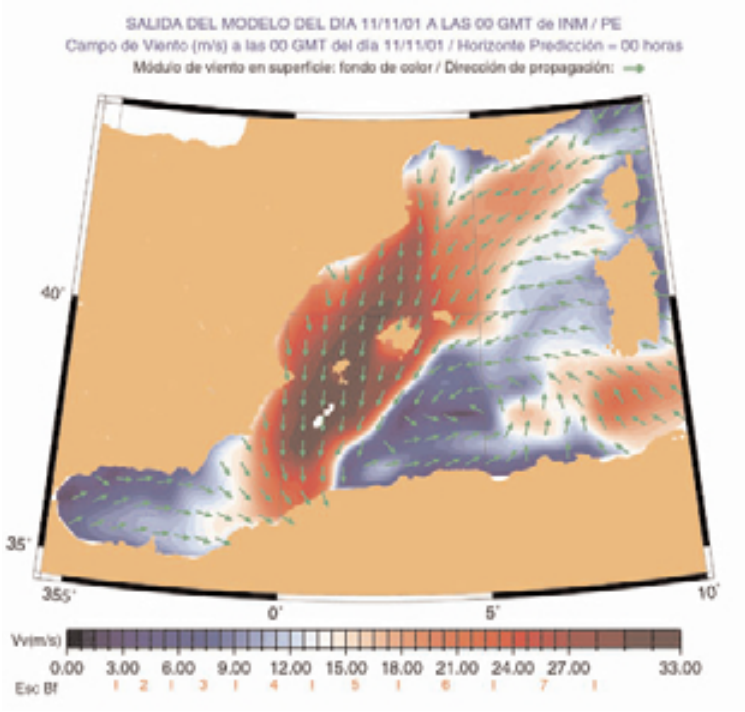


Figura. 2.–Análisis del campo de viento a 10 m para el día 11 a las 0 h GMT, producido por el modelo meteorológico HIRLAM (INM). Las isolíneas de color representan la velocidad del viento en metros por segundo y las flechas la dirección saliente del mismo.

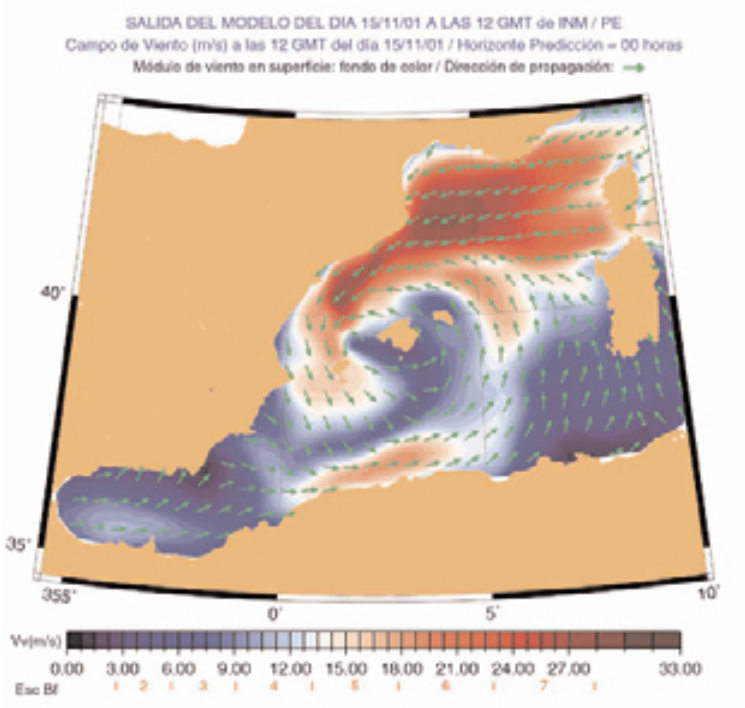


Figura. 3.–Análisis del campo de viento a 10 m para el día 11 a las 0 h GMT, producido por el modelo meteorológico HIRLAM (INM). Las isolíneas de color representan la velocidad del viento en metros por segundo y las flechas la dirección saliente del mismo.

Este temporal se vio agravado por fuertes subidas en el nivel de mar ya que este se ve alterado por la acción de los vientos y la presión atmosférica, aleján-

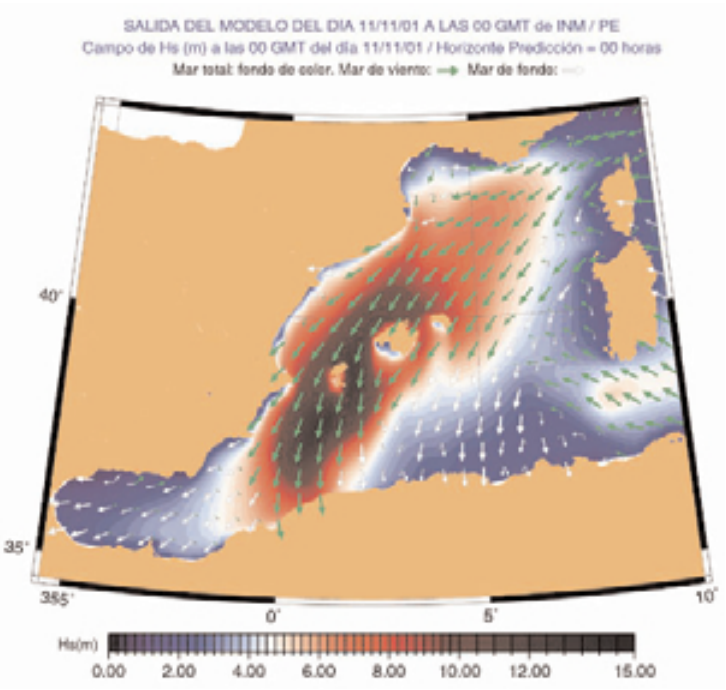


Figura. 4.–Campo de oleaje producido por el modelo WAM de oleaje (PE) el día 11 a las 0 h GMT. Las isolíneas de color representan la altura significativa del oleaje en metros y las flechas la dirección de propagación del mismo.

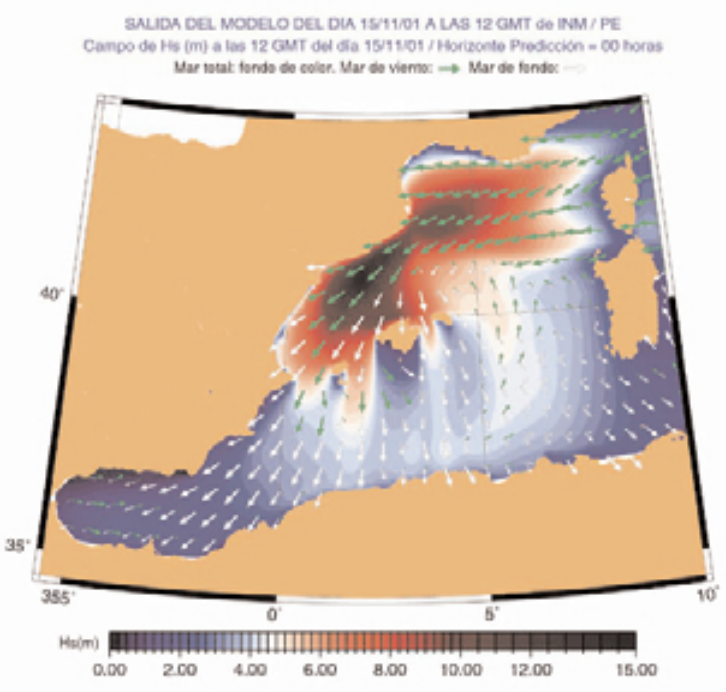


Figura. 5.–Campo de oleaje producido por el modelo WAM de oleaje (PE) el día 15 a las 12h GMT. Las isolíneas de color representan la altura significativa del oleaje en metros y las flechas la dirección de propagación del mismo.

dolo de la predicción de la marea astronómica. En las figuras 6 y 7 se pueden ver los registros en los mareógrafos de Barcelona y Valencia, que registran un fortísimo incremento del nivel del mar en estos días. Como es natural, debido a la pequeña amplitud de la marea en el Mediterráneo, tal como se aprecia en las figuras, el porcentaje de variación por efecto meteorológico es comparativamente superior en estos puertos. Las figuras muestran el nivel del mar medido, junto con la previsión de marea astronómica, que hubiera coincidido con el nivel del mar en caso de no existir variaciones de presión o vientos. En estas dos figuras se representan los niveles horarios del mar, es decir, las oscilaciones de frecuencia más alta presentes en las series originales de datos cada 5 minutos han sido filtradas.

Las recomendaciones para obras marítimas contemplarán de un modo global todos los agentes que influyen en aspectos como la operatividad o la seguridad de las instalaciones portuarias

En las series se aprecian dos picos en el nivel del mar, uno correspondiente al día 11 y otro al 15.

La figura 8, muestra un mapa de los residuos calculados en el Mediterráneo por el sistema de previsión de nivel del mar, NIVMAR (PE) correspondientes al día 15 a las 18 horas GMT, durante el segundo pico. Resulta evidente que la subida de nivel está confinada a las costas Mediterráneas españolas ubicadas al norte del Cabo de Palos. Otros mapas correspondientes a distintos instantes del mismo pico o al pico anterior (día 11) muestran un patrón de elevaciones similar, con el valor máximo desplazado hacia el norte o el sur de la zona de litoral mencionada. En ningún otro punto del Mediterráneo se presentan residuos tan altos en estas fechas. El análisis de estas figuras, junto con los mapas de viento provenientes del modelo HIRLAM (INM), muestran que la causa fundamental del fenómeno es el apilamiento de agua contra la costa inducido por la acción del viento. Durante los dos picos (ver figuras 2 y 3) el viento soplaba con fuerza paralelo a la costa y en dirección suroeste. En estas condiciones y debido al efecto de la rotación de la tierra, la masa de agua superficial se desplaza hacia la costa, apilándose contra ella y produciendo el efecto de subida local del nivel del mar.

FUNCIONAMIENTO DE LAS REDES DE MEDIDA Y LOS SISTEMAS DE PREDICCIÓN DE PUERTOS DEL ESTADO DURANTE EL TEMPORAL

Como ya se ha comentado en la introducción, Puertos del Estado, a través del Área de Medio Físico

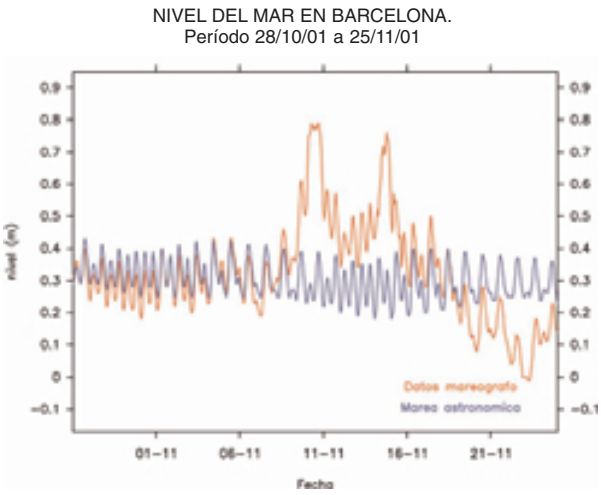


Figura. 6.–Niveles horarios del mar obtenidos del mareógrafo de Barcelona desde el 28 de Octubre al 25 de Noviembre (en rojo). En azul se representa la marea astronómica para el mismo período. Datos referidos al cero del mareógrafo, 0.214 m por encima del cero del puerto.

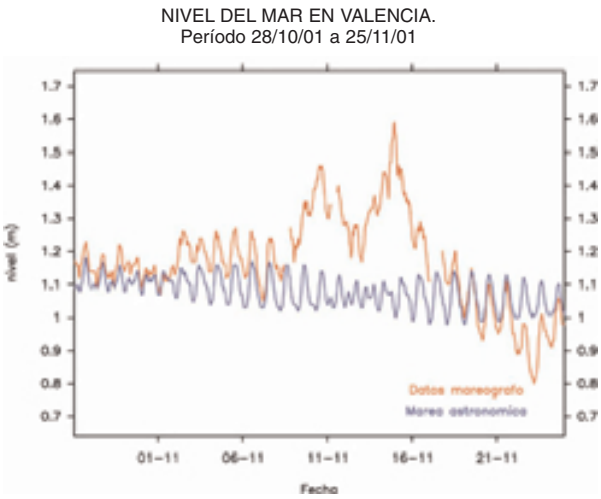


Figura. 7.–Niveles horarios del mar obtenidos del mareógrafo de Valencia desde el 28 de Octubre al 25 de Noviembre (en rojo). En azul se representa la marea astronómica para el mismo período. Datos referidos al cero del mareógrafo, 1 metro por debajo del cero del puerto.

perteneciente a la Dirección de Infraestructuras y Servicios Portuarios, mantiene y desarrolla los sistemas de predicción de oleaje y nivel de mar y las redes de medida de boyas y mareógrafos y almacena la información generada en su base de datos.

La información que producen los sistemas de predicción y las redes de medida se ofrecen en el servidor de internet de Puertos del Estado (http://www.puertos.es) en tiempo real y en abierto, por lo que durante los días en los que se produjo este temporal, del 10 al 16 de noviembre, pudo consultarse en este servidor los registros de viento, oleaje y nivel del mar que se estaban produciendo, así como las predicciones a 48 h de los mismos parámetros.

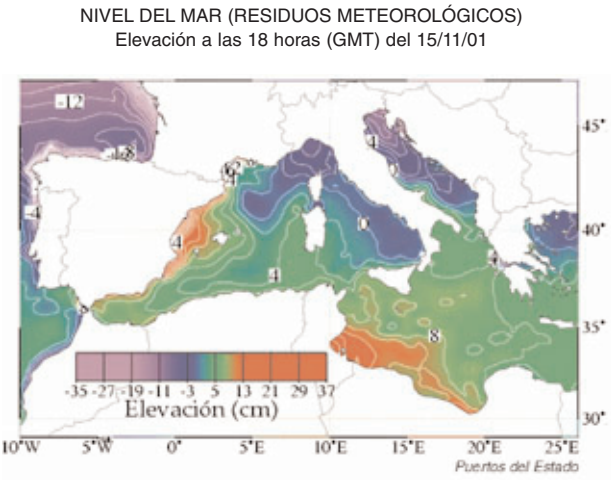


Figura. 8.–Residuos del nivel del mar calculados por Nivmar en la cuenca mediterránea correspondientes al día 15 de noviembre a las 18 h GMT.

En cuanto a los registros de oleaje, las boyas del Mediterráneo funcionaron durante estos días transmitiendo sus datos en tiempo real salvo las boyas de Cabo Begur y Palamós. La primera dejó de transmitir el 29 de octubre y la segunda derivó el 11 de noviembre. Todas las demás boyas tanto de la red interior como de la red exterior (ver figura 9), registraron el temporal apreciándose en los registros los dos picos ya mencionados los días 11 y 15 de noviembre y registrándose periodos de pico de 12 y 13 segundos en estos dos días. Las alturas significativas de oleaje varían en función de la ubicación de la boya pero cabe resaltar que la boya de Mahón midió un pico de altura significativa de 7.34 m el día 11 de noviembre a las 0h, la boya de Valencia de 4.35 m el 11 a las 4h , la de Alicante 3.6 m el 11 a las 3h y la de Cabo de Palos 4.94 el 10 a las 9h.

En la zona afectada por los temporales existen dos mareógrafos o registradores de nivel del mar de la red REDMAR de Puertos del Estado, en funcionamiento desde la segunda mitad de 1992 en los puertos de Barcelona y Valencia. Ambos equipos funcionaron con total normalidad, transmitiendo los datos para su visualización en tiempo real a través de la página web y su incorporación al sistema de previsión del nivel del mar NIVMAR.

En Barcelona (ver figura 6) el nivel del mar presenta dos claros picos (días 11 y 15), alcanzando niveles de alrededor de 0.80 metros por encima del cero del mareógrafo; el nivel durante la tormenta del día 11 superó los 0.70 m durante unas 20 horas. El máximo residuo meteorológico medido es de unos 0.54 metros, el mayor medido por este mareógrafo en sus 10 años de funcionamiento. Como referencia, en el

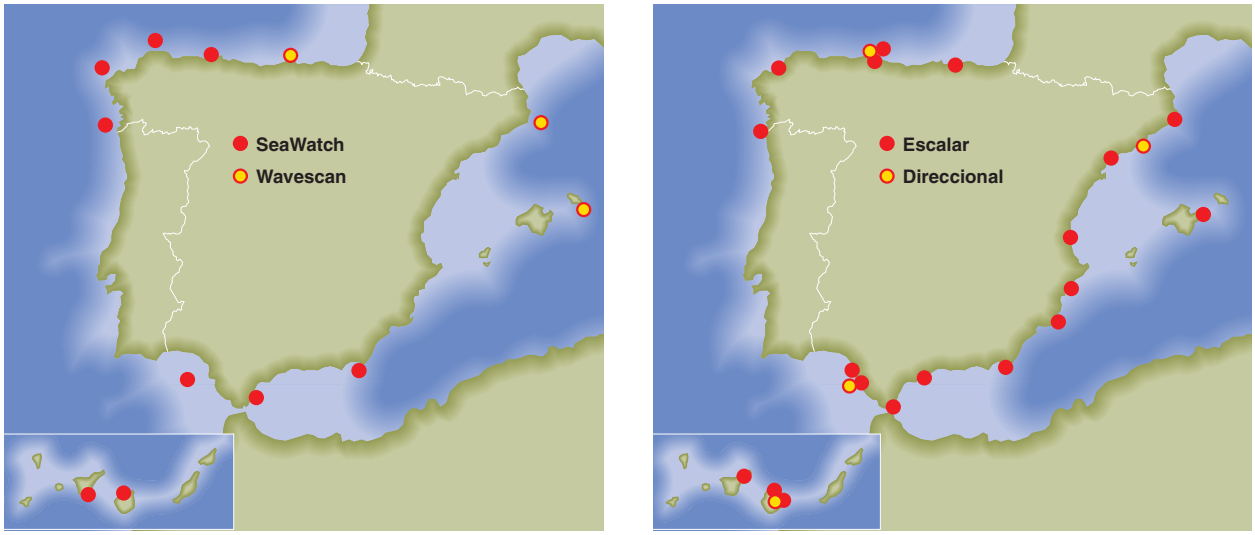


Figura. 9.–Posiciones de las boyas de las redes exterior e interior. Descripción de estaciones (Mapa sensible).

período de datos de 1992 a 1999 el máximo nivel registrado en Barcelona había sido 0.72 metros.

En Valencia (ver figura 7) se observan también dos picos los mismos días, aunque en este caso fue más importante el segundo. El día 11 el máximo fue 1.46 metros (12 horas por encima de 1.40 m), y el día 15 el máximo llegó a 1.59 metros (8 horas por encima de 1.50). Como referencia, en el período 1992 a 1999 el máximo nivel registrado por el mareógrafo de Valencia fue 1.45 metros.

Estos valores suben ligeramente si consideramos las oscilaciones presentes en los datos originales cada 5 minutos. En este caso el máximo llega puntualmente a 0.94 metros el día 11 y 0.84 metros el día 15 en el caso del puerto de Barcelona. En Valencia, los máximos presentes en los datos cada 5 minutos son 1.75 metros alcanzados en un momento dado el día 11 y 1.71 metros el día 15.

El sistema de predicción de oleaje funcionó con total normalidad los días que duró el temporal ofreciendo dos predicciones al día con un horizonte de 48 horas cada una, generadas a las 0h GMT y a las 12h GMT respectivamente. Estas predicciones se realizan procesando el modelo WAM de oleaje alimentado por la predicción de viento procedente del modelo atmosférico HIRLAM, procesado por el Instituto Nacional de Meteorología. Debido al tiempo de proceso de ambos modelos y al tiempo de transmisión de los datos entre el INM y Puertos del Estado, la predicción no se actualiza en el servidor de internet hasta la 8 de la mañana en el caso de la pasada de las 0 h y hasta las 8 de la tarde en el caso de la de las 12.

Uno de los servicios que se ofrecen en el servidor de internet, junto con la predicción de oleaje, es la verificación de la misma en tiempo real, utilizando datos procedentes de las boyas de las redes de medida de Puertos del Estado. Esta verificación es muy útil, sobre todo en caso de temporal, ya que permite evaluar la calidad de la información que se está ofreciendo. Independientemente de esta verificación en tiempo real, para este caso, se han realizado comparaciones entre la salida del modelo y los datos registrados por las boyas.

Por un lado, para el informe definitivo que se está realizando sobre este temporal se están analizando las predicciones de oleaje emitidas durante los días del temporal para evaluar la sobreestimación o subestimación del oleaje para distintos horizontes de predicción (+12h, +24h, ...+48h). Ademas del horizonte, esta evaluación en detalle dependerá de la zona y del parámetro considerado. Como comentario preliminar, puede decirse que en la predicción a largo alcance se sobreestimó el oleaje y estos valores fueron posteriormente corrigiéndose a medida que decrecía el horizonte de predicción.

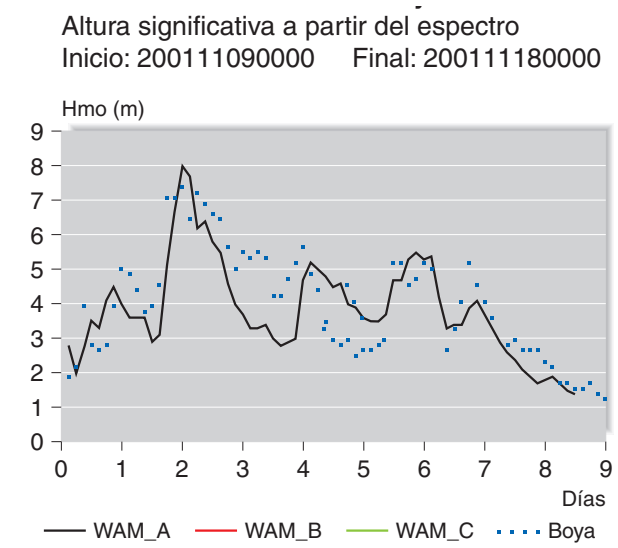
Por otro lado, se ha comparado el análisis del modelo WAM con los datos de las boyas de Mahón y Valencia, para la altura significativa y la dirección media en el caso de Mahón y la altura significativa y el período de pico en el de Valencia, durante los días 9 al 17 de noviembre. Ver figuras 10 y 11.

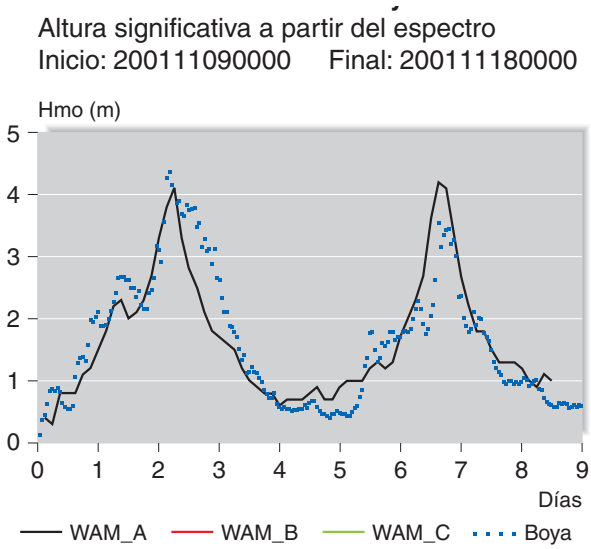
Se puede observar que en la serie de Mahón (figura 10) existen básicamente cuatro picos de altura significativa, los cuales están bastante bien recogidos por el modelo, salvo el último, que está algo subestimado. Como ya se comentó en la sección anterior, cabe resaltar que en los valles entre picos, el oleaje sigue manteniendo un umbral de altura significativa muy elevado. En cuanto a la dirección media, existe una concordancia muy buena entre el modelo y lo registrado por la boya, tratándose fundamentalmente de oleaje con una dirección de propagación hacia el sur en la primera mitad del temporal y hacia el

oeste en la segunda mitad, lo que coincide con los mapas de oleaje presentados en las figuras 4 y 5. En la serie de Valencia (figura 11) existen dos picos de oleaje, correspondientes a los días 11 y 15 de noviembre, que están muy bien recogidos por el modelo. El periodo de pico, también muestra una concordancia muy elevada entre el modelo y la boya y una vez más cabe resaltar que los periodos de pico registrados por la boya (de hasta 13 segundos) son atípicos en el Mediterráneo.

Desafortunadamente, las boyas de Palamós y Cabo Begur en la zona de Cataluña no funcionaron durante el temporal. Algunas comparaciones realizadas con boyas facilitadas por La Generalitat muestran que el modelo tuvo una tendencia a sobreestimar el oleaje en esta zona durante el segundo pico del día 15. Esta sobreestimación tiene que ser analizada con más detalle y posiblemente es debida a una sobreestimación del viento por parte del modelo HIRLAM. El sistema de predicción de nivel del mar funcionó correctamente, ofreciendo en tiempo real la evolución del nivel del mar y su predicción para las próximas 48 horas. Nivmar fue capaz de predecir la fuerte subida del nivel del mar, así como el instante en que se iba a producir. Sin embargo, la magnitud de la subida fue subestimada en unos 20 cm. La figura 12, directamente extraída de la pagina web de Puertos el día 16 de Noviembre, muestra el comportamiento del sistema en Barcelona durante los dos picos registrados. Ambos son reproducidos correctamente en el tiempo, aunque ligeramente subestimados

Dado el origen del fenómeno es posible que la subestimación en las predicciones se deba a una infraestimación en la magnitud del viento cercano a la costa (el sistema Nivmar emplea vientos provenientes del INM con una resolución de 0.5°). Un análisis futuro





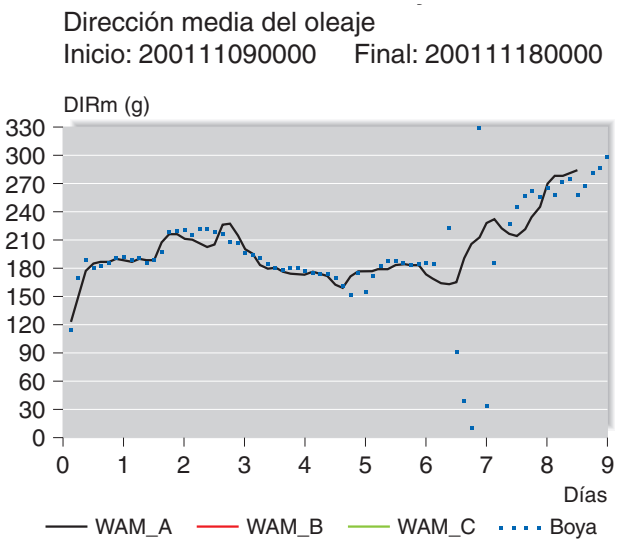


Figura. 10.–Series temporales de altura significativa y dirección media de oleaje en la boya de Mahón comparadas con los resultados del modelo WAM, durante los días 9 al 17 de noviembre.

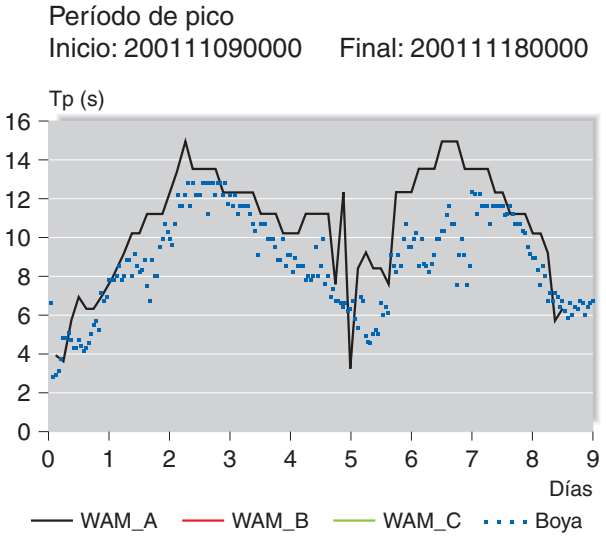


Figura. 11.–Series temporales de altura significativa y periodo de pico del oleaje en la boya de Valencia comparadas con los resultados del modelo WAM, durante los días 9 al 17 de noviembre.

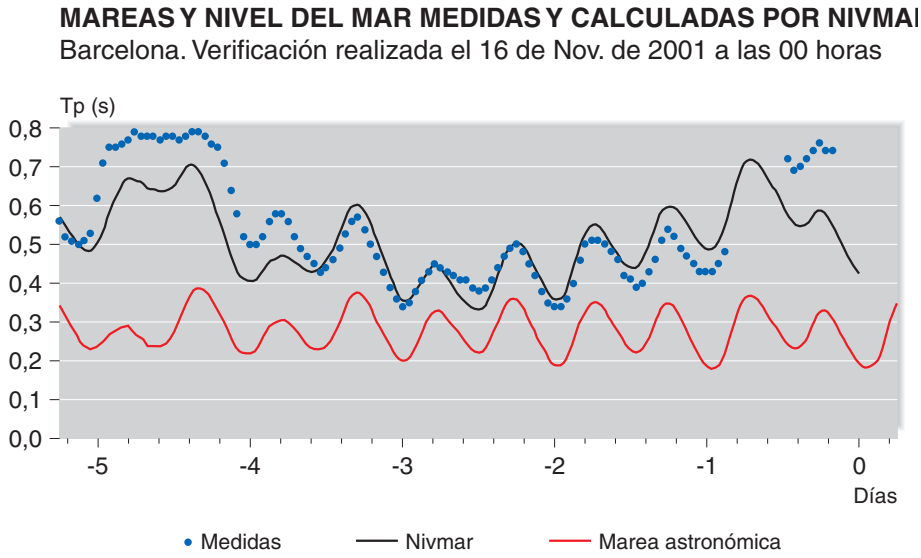


Figura. 12.–Verificación del sistema de predicción del nivel del mar en Barcelona durante los dos máximos. En el segundo pico se produce una pérdida inicial de datos debido a problemas de transmisión. Estos datos fueron recuperados posteriormente (figura 6).

y más detallado de los resultados ha de estudiar el impacto en el modelo de nivel del mar de utilizar los vientos de 0.2°. También es posible que la energía disipada por el fuerte oleaje en las cercanías de la línea de costa haya inducido un aumento del nivel del mar y que sea éste el responsable de la subestimación al no estar considerado este fenómeno por el modelo.

CONCLUSIONES

Como conclusión preliminar es importante subrayar que si bien la altura del oleaje en este temporal ha sido muy elevada, dicha magnitud por sí sola no explica los daños producidos por el temporal a lo largo de la costa mediterránea. Para comprender las consecuencias que los temporales han tenido sobre diversas instalaciones marítimas es necesario contemplar aspectos como la acción conjunta del nivel del mar y el oleaje, o parámetros como la persistencia o duración de las situaciones de riesgo.

Resulta, por tanto, evidente la necesidad de continuar en la línea marcada por Puertos de Estado dirigida, por un lado a profundizar en el conocimiento de los agentes océano-meteorológicos, y por otro, a actualizar las recomendaciones para obras marítimas (ROM) de modo que en estas ultimas se contemplen de un modo global todos los agentes que influyen en aspectos como la operatividad o la seguridad de las instalaciones portuarias.

En este sentido, cabe recordar que Puertos del Estado impulsa desde hace años diferentes proyectos orientados al mantenimiento de diversas redes de medida en el entorno marino complementadas por modelos de predicción de oleaje y nivel del mar. La información proporcionada por los modelos esta permitiendo un mejor conocimiento del entorno costero, proporcionando un conjunto completo y consistente de datos que barre por completo toda la costa española.

En cuanto a los sistemas de predicción, ha de señalarse que la predicción marina acumula al error introducido por los modelos marinos, el error inherente a la predicción meteorológica recibida, que aumenta lógicamente con el horizonte de predicción. Puertos del Estado puede tratar de minimizar el error sistemático introducido por los modelos marinos en el análisis y la predicción.

En el temporal aquí analizado, el peralte del oleaje provocado por las corrientes de retorno debidas a la subida del nivel del mar pueda haber provocado daños mucho mayores que los que provocaría el mismo oleaje sin la presencia de este fenómeno. Así mismo, en estos daños ha tenido mucha influencia la persistencia del fuerte oleaje, así como las inundaciones debidas a esta subida del nivel del mar. Una primera conclusión que puede extraerse de esto es la necesidad de no basar únicamente los mecanismos de alerta en una predicción de oleaje en la altura de la ola, sino teniendo en cuenta su combinación con el nivel del mar y con su persistencia. Ha de evaluarse también, después de un estudio en profundidad, la posibilidad de considerar el nivel del mar como una variable a tener en cuenta en la predicción de oleaje. ■

SCI. MAR., 65 (Suppl. 1): 145-154 SCIENTIA MARINA 2001

AN INTERDISCIPLINARY VIEW OF THE OCEAN. *J.L. PELEGRÍ, I. ALONSO and J. ARÍSTEGUI (eds.)*

Nivmar: A storm surge forecasting system for Spanish Waters*

ENRIQUE ÁLVAREZ FANJUL, BEGOÑA PÉREZ GÓMEZ and IGNACIO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ-ARÉVALO

Área de Conocimiento y Análisis del Medio Físico, Ente Público Puertos del Estado, Avda. del Partenón 10, 28042 Madrid, Spain.

SUMMARY: In this paper, a storm surge prediction system for the Spanish Waters is presented. The system, named Nivmar, is based on the ocean circulation Hamsom model and on the harmonical prediction of tides computed from data measured by the tide gauge network Redmar, managed by Puertos del Estado. Nivmar is executed twice a day, running Hamsom forced by meteorological fields derived from the INM (Instituto Nacional de Meteorología) operational application of Hirlam atmospheric model. Data from Redmar tide gauges is used to to forecast the tidal elevations, to validate the system and to perform data assimilation, correcting systematic errors in the mean sea level due to physicals processes that are not included in the ocean model (i. e. steric height). The forecast horizon is 48 hours. In order to validate the system with measured data from Redmar a very stormy 5 months period was selected. Results from this test (November 95 to March 96) are presented. Data from this experiment shown that Nivmar is able to correctly predict sea level in the region. A simple data assimilation scheme for sea level is described and results from its application are studied. Finally, special focus is made in future plans and potential developments and applications of the system.

Key words: Nivmar, sea level, storm surge, forecast, Redmar, tide gauge.

INTRODUCTION

The knowledge and prediction of sea level is important both for the scientific and economical point of view. To describe the circulation patterns in a region is convenient to characterize sea surface elevation. This variable is also a direct indicator of physical phenomena such a upwelling, very important for biological productivity. In the harbours daily work, the knowledge of sea level is critical (for example for dragging operations). When a storm surge is combined with severe waves, damage in the coastline structures can be important. All this reasons impulsed Puertos del Estado to develop a storm surge prediction system, called Nivmar (http://www.puertos.es/Nivmar), able to forecast and study the evolution of surface elevation.

The evolution of sea surface elevation during a storm surge event is strongly influenced by bathymetry. In seas with a wide continental shelf, like the North Sea, surge evolution is dominated by the wind. In those seas, extra-tropical surges can be very large (up to 4 m in the North Sea). Along the Spanish coast, in the Atlantic Ocean (including the Canary Islands) and in the Mediterranean Sea (including the Balearic Islands), a common characteristic feature is found: the continental shelf is very narrow (Fig. 1). Therefore, residuals (difference between measured sea level and tidal elevation) are mostly produced by pressure variations. In fact, a first rough estimate of the residuals in the Atlantic Spanish harbours can be obtained through the study of the time series of inverted atmospheric pressure records, although the effect of wind can be also of importance during severe storms. A special case is the Mediterranean Sea, where the inverse barometer effect can not be directly applied (Le Traon and Gauzelin, 1997) and the residuals are larger than the tides. Garret has developed a simple model of the Mediterranean (Candela et al., 1989; Le Traon and Gauzelin, 1997), which includes two basins and two straits (Gibraltar and Sicily). This model, driven by the mean atmospheric pressures on the two Mediterranean basins, produces better results than the simple inverse barometric correction and shows the important role of the Straits of Gibraltar when studying the barotropically induced sea surface elevation in the Mediterranean. Results from the numerical simulations presented in this work confirm this critical role. In narrow shelf seas, the limited effect of the wind over the shelf produces smaller surges (up to 1 m).

All the operational surge prediction systems deals with the problem of correcting systematic errors in the mean sea level due to physicals processes that are not included in the ocean model (i. e. steric height). Nivmar is solving this problem by simply correcting the solution by the difference of the means in the previous year, but an assimilation scheme has been developed (section 4) and will be implemented in the future. The major problem (currently under solution) to set up the assimilation scheme is the reception in real time of the Redmar tide gauge network data.

This paper is structured as follows: first the Nivmar system is described making special focus on the ocean model implementation and on the technical details of the operational system. The next section is devoted to the validation of the system during a stormy period and, finally, the window based assimilation scheme, that will be implemented operationally in the future, is described and results from its application are shown.

*Received July 29, 1999. Accepted April 10, 2000.

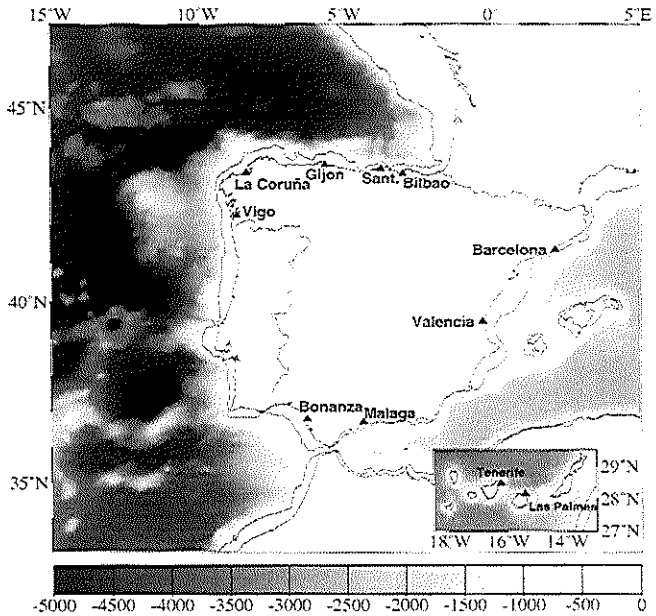


FIG. 1. – Position of the Redmar tide gauge stations. Note the very narrow shelf surrounding the Spanish waters (the 200 meters isobath is marked).

THE NIVMAR STORM SURGE PREDICTION SYSTEM

The Nivmar System, consisting of a set of different applications and programs, will be used to predict sea level using the Hamsom model forced by atmospheric data generated by the INM (Instituto Nacional de Meteorologia) with the Hirlam (HIgh Resolution Limited Area Model) atmospheric model (winds and pressures fields). The Hirlam forecasting system (Källen, 1996) is a limited area, primitive equation model developed by several European institutes and is based on hydrostatic approximation.

The Hamsom model

The Hamsom model (Backhaus, 1983, 1985; Backhaus and Hainbucher, 1987; Rodríguez and Álvarez, 1991; Rodríguez *et al.*, 1991; Stronach et al, 1993; Álvarez *et al.*, 1997), developed by the Institut für Meereskunde and by Clima Marítimo, is a three dimensional multi-level (z coordinate) finite difference model (Arakawa C grid) based on the barotropic set of Reynolds equations. Hamsom is used vertically integrated within Nivmar. When working in this mode, the model is solving the depth-integrated shallow water equations:

$$u_t + uu_x + vu_y - fv + g\eta_x = \\ = \tau_w^{(x)}/\rho H - \tau_b^{(x)}/\rho H - P_{Ax}/\rho + \nabla^2 u \qquad (1)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + fv + g\eta_y = \\ = \tau_w^{(y)}/\rho H - \tau_b^{(y)}/\rho H - P_{Ay}/\rho + \nabla^2 v \qquad (2)$$

$$\eta_t + (Hu)_x + (Hv)_y = 0 \qquad (3)$$

where $(u.v)$ are the components of depth-integrated mean velocity, $H = h + \eta$ is the total water depth, η is the surface elevation relative to the undisturbed water depth h, f is the Coriolis parameter, g is the gravitational acceleration, ρ is the water density, $\tau_w^{(x,y)}$ are the wind stress components, $\tau_b^{(x,y)}$ are the bottom stress components and P_A is the atmospheric pressure.

Hamsom is written in Cartesian coordinates. To account for the convergence of meridians, all distances in the horizontal axis are computed as a function of latitude and the cell volume so considered is distorted for mass conservation purposes. The code uses a two-time level numerical scheme (present and future). Some equation terms are treated semi-implicitly (like pressure gradient) and the remaining ones explicitly (momentum advection, horizontal diffusion).

Bottom stress is parameterised by a quadratic law in terms of current velocity:

$$\vec{\tau}_b = Cb\,\vec{u}\,|\,\vec{u}\,| \qquad (4)$$

where Cb is the dimensionless drag coefficient. A classical value of 0.0025 was selected for all the runs.

Description of Nivmar

The system is based on the ocean circulation Hamsom model and on the harmonical prediction of tides computed from data measured by the tide gauge network Redmar. The forecast horizon is 48 hours. The model domain covers an area extending from 20°N to 48°N in latitude and from 34°W to 30°E in longitude (see Fig. 2).

When designing a storm surge prediction system it is important to have in mind that the barotropic set of equations used in the ocean model contain non-linear terms. Those are the bottom friction (Eq. 4), the advection of momentum (second and third term in Eqs. 1 and 2) and the product of elevation and current speed in the continuity equation (Eq. 3). One of the effects of these terms is to transfer energy contained in one frequency to another (Bowden, 1983). For example, the M2 tidal constituent generates harmonics (M4, M6) with frequencies that are multiples of the original one. Also the residual elevation during a storm surge is modified by nonlinear interactions with the tide. In very shallow seas these nonlinear contributions cannot be neglected, becoming critical to predict the evolution of sea surface. In the North Sea and the English channel, for example, M4 becomes an important harmonic and residuals can't be properly predicted without the nonlinear contribution of energy from tides (Pugh, 1987). In those shelf seas, residuals are computed in the following way in order to take into account the nonlinear interactions between tidal and meteorological forcing: first, a complete simulation, including tidal and atmospheric forcing, is performed. Tides are introduced in the model by prescribing, in the open boundaries, the elevation induced by the harmonic constituents. For doing so, only a small subset of tidal components (typically 8) is usually available at the model boundaries. For computing nonlinear transfers of energy this is sufficient because those components contain most of the energy of the tide. Second, a tidal simulation of the same subset of harmonic components is carried out for the storm simulation days. Finally, residuals are obtained by subtracting sea surface elevations from both simulations. Final elevation in selected coastal points is computed by adding those residuals to the tide prediction, which include all the astronomical components derived from harmonical analysis of measurements, not only the most energetic ones included in the simulations.

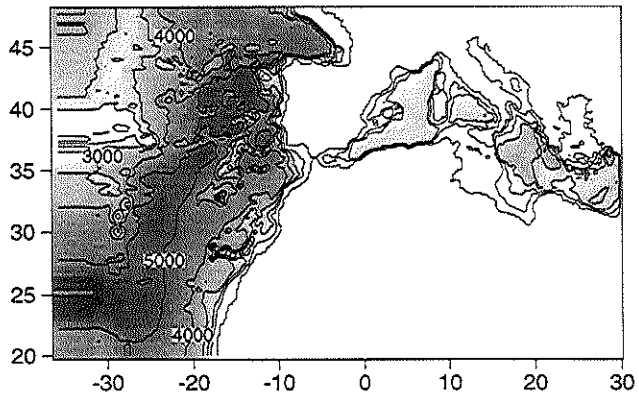


FIG. 2. – Bathymetry employed in the numerical simulations. Resolution in the west part of the domain is poor due to the variable grid size scheme employed and to the fact that the first two model columns are equal in order to implement a zero gradient boundary condition for the transports.

We have shown that, in narrow shelf seas (like the Spanish coast), where nonlinear transfers are not so critical, similar results to those computed by the previously explained method are obtained with the simpler method of computing residuals as the sea surface elevation derived from a simulation forced only by meteorological fields (Álvarez, 1998; Álvarez *et al.*, 1998). Therefore, Nivmar is making forecasts of the residuals using this second method, which is simpler since only one model run is performed. The total sea surface elevation is computed, as in the first method, by adding the astronomical prediction, which includes all the constituents. In the case of Nivmar, this tide forecast is provided by the harmonical analysis of Redmar data.

Figure 3 is a scheme of the normal operations performed by Nivmar during one day. Nivmar is executed twice a day in cycles named 00H and 12H. The model needs input data (results from previous simulations for a warm start, meteorological fields from the INM application of Hirlam and sea level measurements) that are pre-processed at an initial stage. The model domain of the Hirlam model (resolution 0.5° x 0.5°) covers completely the Hamsom model domain and the data (6 hourly fields of winds at 10 m and pressures) are interpolated to the Hamsom grid by means of a bilinear interpolation routine (Press *et al.*, 1992). The ocean model run covers a period spanning from 12 hours before the starting time (00 hours on the 00H cycle and 12 on the 12H cycle) to 48 hours later. Analysed meteorological fields (hindcasted fields computed using data assimilation) are employed on the first 12 hours of simulation. Results form Nivmar are placed on a massive storage system (Unitree) and distributed through the web.

Nivmar is under continuous development. The system started producing predictions in June 1998. Results from that year where used to create a first quality report (http://www.puertos.es/Nivmar/verif.html). During that period, the system showed a good behaviour in the Atlantic Ocean, but results in the Mediterranean Sea were not as good as expected due to a problem, already corrected, in the model domain (the eastern limit reached only 9°E). In June 1999 the operational phase started for the Atlantic ocean. Results from 1999 with the extended bathymetry will be validated during the present year to make the system operational in the Mediterranean Sea.

The system is running at an X-Class Exemplar parallel computer at Puertos del Estado (Hamsom is running parallel in 4 HP PA-8000 processors). Updated predictions can be found under http://www.puertos.es/Nivmar/nivmareng.html.

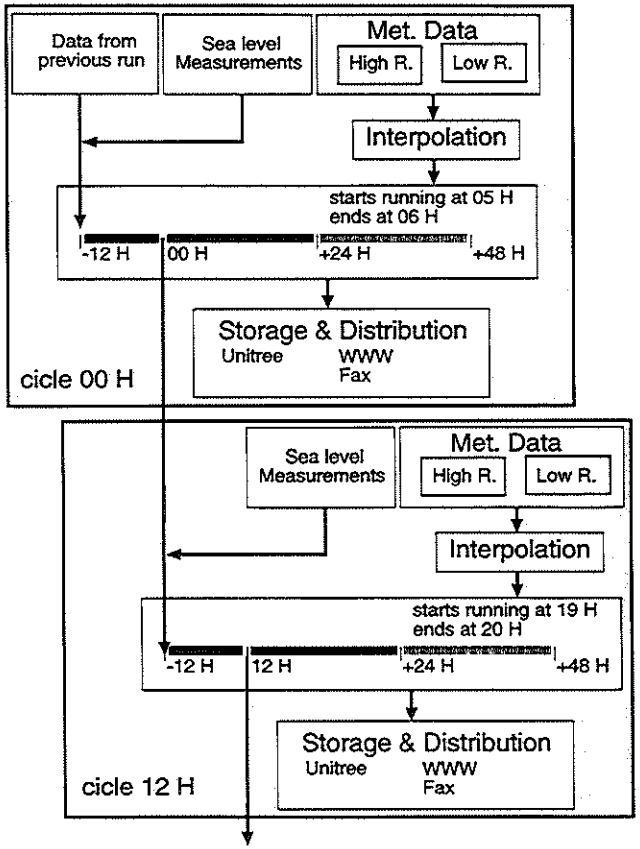


FIG. 3. – Nivmar system box diagram showing the normal operations performed during one day of predictions.

Model implementation

The bathymetry employed in the simulations (Fig. 2), is based on the DTM5 data set (GETECH, 1995). It was built using a variable grid size scheme in order to reduce the number of computational points and, consequently, the computation time. This scheme is based on a zooming technique. A region spanning from 25°N to 48°N and from 20°W to 30°E keeps a constant resolution of 10' x 15'. The grid size in the rest of the domain is increased progressively towards the boundaries, being the size of each cell incremented by a factor of roughly 1.1 with respect to its inner neighbour. Small deviations are present in this factor in order to place the boundaries on a non-fractional latitude (20°N) and longitude (34°W).

In the North coast of the Iberian Peninsula, the available bathymetry did not include the existing narrow shelf. As a consequence, the effect of the wind was initially underestimated in the simulations. In order to improve the results of the model, the depth of the grid points near the coast were modified in this region. After some tuning, it was found that changing the depth of the two rows (or columns) of grid points adjacent to the land to depths of 10 m and 50 m produces optimal results. These changes in the bathymetry greatly improve the results of the model in the region.

Both in the benchmark presented in this paper and in the Nivmar system the time step employed is 10 minutes and the horizontal eddy viscosity is kept constant at means of the so called Charnock constant (α). After some tuning (Álvarez Fanjul *et al.*, 1998), it was found convenient to use a high α value for the Charnock constant (α=0.032). The elevation at the Atlantic open boundaries is corrected by means of the inverse barometer effect. In the Mediterranean Sea the inverse barometer correction is not satisfactory (Le Traon and Gauzelin, 1997). Therefore, to model the whole basin would be desirable. Unfortunately, the atmospheric model only reaches 30°E, leaving a small portion of the boundary conditions, including inverse barometer, the best solution was provided by placing a solid wall at the Eastern boundary. This is equivalent to reducing the area of the eastern Mediterranean basin and could have some impact on this region, but results presented in this paper show that good results are obtained at the western basin.

VALIDATION OF NIVMAR

The Nivmar system was validated with data from the Redmar tide gauge network (Pérez and Rodriguez, 1994). A very stormy period was chosen for validation (November 1995 to March 1996). The largest surges ever recorded by Nivmar took place during this period. The atmospheric forcing

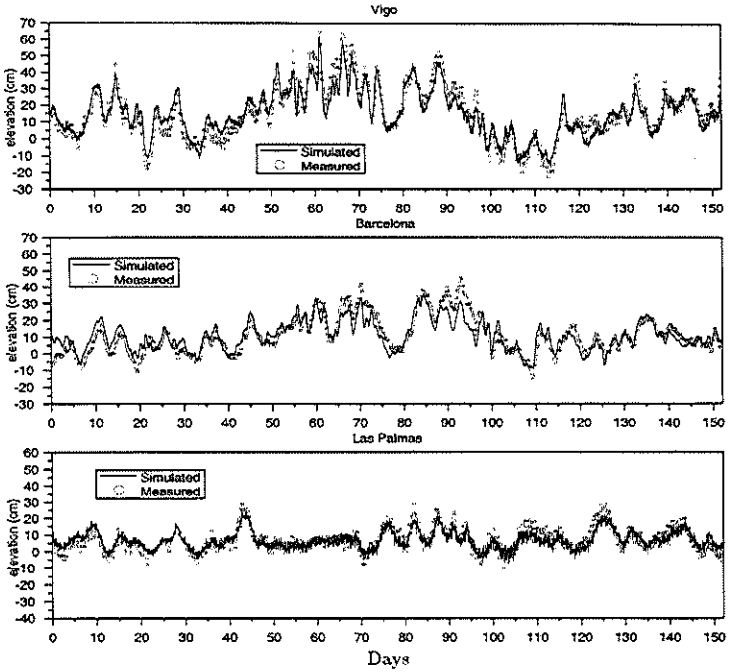


FIG. 4. – Measured and simulated residual at three stations: Vigo in the Atlantic coast, Barcelona in the Mediterranean coast and Las Palmas at the Canary Islands.

TABLE 1. – Statistical comparison of measured and simulated residuals. Nr is the number of records, $\overline{X}$ is the mean value of the measured residuals (mean value of simulated residual is corrected to this value), *rmse* is the Root Mean Square Error, *rmax* is the maximum error, *m* and *b* are the slope and the interception of the linear fit and CI is the Correlation Index.

Station	Nr	$\overline{X}$	*rmse*	*rmax*	*m*	*b*	CI
Bilbao	3648	7.89	5.66	21.03	0.82	1.44	0.90
Santander	3571	9.30	5.72	24.73	0.88	1.44	0.91
Gijón	3382	-0.68	6.13	19.70	0.88	-0.08	0.89
La Coruña	3648	17.58	5.89	20.69	0.81	3.30	0.92
Vigo	3614	15.23	5.04	20.86	0.81	2.82	0.95
Bonanza	3483	11.59	10.17	66.93	0.44	6.54	0.80
Málaga	3648	11.63	5.14	26.12	0.69	3.66	0.86
Valencia	3612	11.84	5.75	17.38	0.63	4.42	0.85
Barcelona	3630	10.88	5.14	20.04	0.71	3.15	0.89
Tenerife	3610	9.20	4.24	18.08	0.61	3.35	0.77
Las Palmas	3392	6.73	3.70	11.60	0.65	2.34	0.83

employed in these test simulations (6 hourly fields of winds at 10 m and pressures) was obtained from the same source (fields supplied by the Spanish National Meteorological Institute produced by their operational system based on the Hirlam model) than the data operationally employed to force Nivmar.

Figure 4 shows a comparison of the residuals obtained by numerical simulation with those measured by the Redmar during the PROMISE Spanish Coast Data Set Period (see Fig. 1 for location of the tide gauges). The three stations of Figure 4 are representative of different regions of the Spanish Coast (Canary Islands, Mediterranean coast and Iberian Peninsula Atlantic coast). In order to establish a comparison, the frequency of the simulated data was changed from 10 minutes (time step of the model) to one hour (period between two measurements). The mean value of the simulated series was modified to the value of the measured one. These techniques are usually employed in hindcast studies of surge simulations (Vested *et al.*, 1995). Table 1 shows a statistical comparison between simulated and measured series in the stations represented in Figure 1.

Model results in the Cantabric and Galician coast (stations from Bilbao to Vigo) are quite satisfactory, specially taking into account that this is a very stormy period. Maximum errors are around 20 cm, typical values for rmse are 5 cm and the correlation index is very high (0.95 for Vigo). Most of the largest peaks are correctly reproduced, including extreme storms (i.e. 66 cm at La Coruña on January the sixth, corresponding to the 67 day of the simulated period).

Inspite of the presence of a narrow shelf, the effect of the wind on the sea surface elevation during severe storms cannot be neglected. A prediction computed by means of the Inverse Barometer Correction strongly underestimates the surge height during those events. Differences up to 43 cm between measured and computed residuals can be found, for example, in the large storm surge recorded at Bilbao on the 8th of February (the largest peak in Fig. 4). For this same event, the difference with the data generated from Nivmar was only 11 cm. This example shows the importance of taking wind into account in the simulations, even in a narrow shelf sea like the Cantabric.

The residuals measured at Bonanza show larger differences (*rmax*=69 cm) with the simulated data. This gauge station is located at the Mouth at the Guadalquivir river, and residuals are strongly influenced by the river outflow. Since this variable is not included in the simulations, the observed discrepancies are expectable. In periods where no important outflow from the river was present the agreement between measurements and simulations improves considerably.

At the Mediterranean sea the *root mean square error* and the maximum error have the same order of magnitude as in the Atlantic coast, having the correlation index lower values (minimum of 0.85 for Valencia). These lower values of the CI can be related to the quality of the winds. At the resolution of the atmosphere model (0.5° x 0.5°) wind solutions are better at the Atlantic coast than in the Mediterranean coast, because the eastward travelling atmospheric structures are affected by the complex topography of the Iberian Peninsula and, therefore, atmospheric fields are more complex to solve at the East side of the Peninsula (J.A. García-Moya, *pers. comm.*, 1998). Future use of atmospheric fields of higher resolution (0.2° x 0.2°) will mean an improvement in the sea elevation solutions at this region.

It is interesting to note the important role of the Straits of Gibraltar in the evolution of sea surface

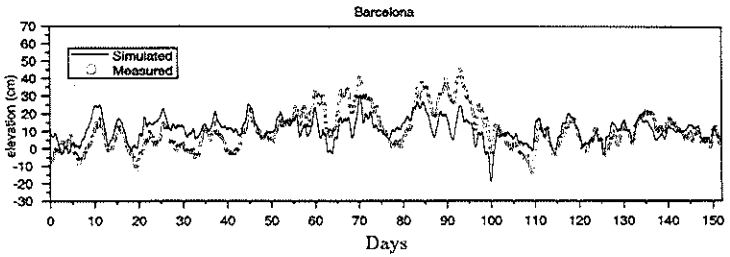


FIG. 5. – Measured and simulated residual at Barcelona. Simulation performed with the straits of Gibraltar closed.

elevation in the Mediterranean Sea. Figure 5 shows the results at Barcelona (compared again with measured residuals) of a similar simulation, but with the straits closed (the grid point corresponding to the straits was *artificially* converted to land). From the analysis of the figure it is clear that, if the Mediterranean sea is isolated from the Atlantic, the response of the model is worse. The statistical analysis confirms this idea: the correlation index goes down from 0.89 to 0.62, the *rmse* increases form 5.15 to 8.72 cm and the slope of the linear fit drops from 0.71 to 0.37. These results are coherent with the ideas behind the simple analytic model where subinertial flows through the straits and barotropically induced sea surface elevation in the two main Mediterranean basins are basically determined by the relations between the mean atmospheric pressures over the two basins and over the Atlantic (Candela *et al.*, 1989; Le Traon and Gauzelin, 1997).

The agreement at the Canary Islands is highly satisfactory, where the *rmse* values are as low as 3 or 4 cm.

IMPLEMENTATION OF A VERY SIMPLE DATA ASSIMILATION

The window based data assimilation technique improves the results of the predictions by simply correcting the mean value of the simulated residuals. The correction is done by adding a constant value which is the difference of the mean values of the simulated and predicted time series during a lapse of time (window) in the immediate past (see Fig. 6). This simple technique, applied during the post-processing stage, helps to avoid systematic differences between the mean levels of the simulated and measured time series and greatly improves the quality of the solutions by reducing the bias.

The window must be large enough to filter the noise of the measurements (minimum of 1 day) and short enough to include data representative of the conditions existing in a near past instead of mean conditions (maximum 5 days).

This technique was applied to the simulated elevations generated in the 5 months validation period (see section 3) making use of the residuals measured by Redmar. Different combinations of window lengths (1, 3 and 5 days) and forecast horizons (6, 24 and 48 hours) were explored. Table 2 shows the results at the Bilbao station. As expected, the better results are associated with smaller forecast horizons (6 hours). Comparison with the results obtained before applying the assimilation shows the improvement obtained with this method. At Bilbao (for a forecast horizon of 24 hours and making use of a window of three days) better results are obtained for *rmse* (5.51 cm with data assimilation against 5.66 cm without assimilation), *rmax* (18.70 cm compared to 21.03 cm), m (0.89 to 0.82), b (0.79 to 1.44) and CI (0.92 to 0.90). Similar improvements were found in other locations.

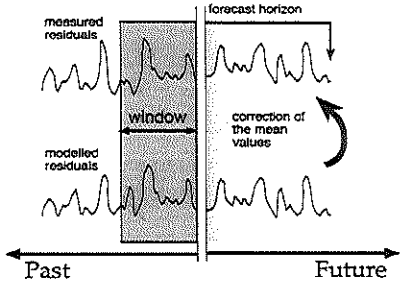


FIG. 6. – Data window based assimilation scheme.

TABLE 2. – Statistical comparison of measured and simulated residuals after applying the window_data assimilation scheme, where win is the length of the data window in days, hori is the forecast horizon, Nr is the number of records, $\overline{X}$ is the mean value of the measured time series, $\overline{Y}$ is the mean value of the simulated time series after the assimilation, BIAS is the difference $\overline{Y}$- $\overline{X}$, *rmse* is the Root Mean Square Error, *rmax* is the maximum error, *m* and *b* are the slope and the interception of the linear fit and CI is the Correlation Index.

Station (win,hori)	Nr	$\overline{X}$	$\overline{Y}$	Bias	*rmse*	*rmax*	*m*	*b*	CI
Bilbao (1,06)	3648	7.89	7.87	-0.02	4.36	18.25	0.89	0.85	0.94
Bilbao (3,06)	3648	7.89	7.84	-0.05	4.77	17.06	0.89	0.79	0.93
Bilbao (5,06)	3648	7.89	7.85	-0.03	4.96	18.13	0.90	0.77	0.93
Bilbao (1,24)	3648	7.89	7.84	-0.05	5.32	21.16	0.87	0.95	0.91
Bilbao (3,24)	3648	7.89	7.81	-0.07	5.31	18.70	0.89	0.79	0.92
Bilbao (5,24)	3648	7.89	7.84	-0.05	5.32	18.85	0.90	0.77	0.92
Bilbao (1,48)	3648	7.89	7.79	-0.10	5.94	20.42	0.81	0.91	0.89
Bilbao (3,48)	3648	7.89	7.79	-0.10	5.69	20.71	0.90	0.71	0.90
Bilbao (5,48)	3648	7.89	7.83	-0.06	5.60	20.54	0.89	0.79	0.91

It is also interesting to note that, for short forecast horizon predictions (6 hours), a small data window (1 day) is recommended, while for long forecast horizon (48 hours) a larger window (5 days) produces better results.

CONCLUSIONS AND FUTURE PLANS

A storm surge prediction system has been developed and validated for the Spanish coasts. Results of the system show a good behaviour and the dynamics of the Spanish coast, characterised by the presence of a narrow shelf (in contrast with other well studied regions like the North sea), are correctly reproduced.

Nivmar is a newly created system, but several applications and collaborations with other institutes derived from its data are already under way. At this moment, data from Nivmar are being used to study sea level evolution, together with altimeter data, both in the Mediterranean and the Atlantic, and the vertically integrated currents generated by the system were used in a project to monitor oil spills based on Synthetic Aperture Radar images (Envisys project). Results from the system are being also used, for example, by a shipyard (Naval Gijón) in order to forecast better time for shipping.

Several future plans, both for the short and long term, are already being developed:

Short and medium term plans

-Wind and tide induced surface current predictions. Hamsom will be used in tridimensional mode.

-Inclusion of the Nivmar results in the Puertos del Estado data base.

-Web based access to the Nivmar historical results (in graphical format).

-Application of a data assimilation scheme.

Long term plans

-Introduction of temperature and salinity gradients in the simulations. This will allow Nivmar to predict and study those variables.

-Nested high resolution applications.

Nivmar is already a useful system, both from the scientific and the economic point of view, but the potential of the system is much higher.

REFERENCES

Álvarez Fanjul, E., B. Pérez Gómez and I. Rodriguez. – 1997. A description of the tides in the Eastern North Atlantic. *Progr. Oceanog.*, 40: 217-244.

Álvarez Fanjul, E. – 1998. *Simulación numérica de procesos oceanográficos en las costas atlánticas españolas.* Ph.D. Thesis, University of Alcalá de Henares.

Álvarez Fanjul, E.; B. Pérez Gómez, J.C. Carretero and I. Rodriguez. – 1998. Tide and surge dynamics along the Iberian Atlantic Const. *Oceanol. Acta,*. 21(2): 131-143.

Backhaus, J.O. – 1983. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling. *Cont. Shelf Res.*, 2(4): 243-254.

Backhaus, J.O. – 1985. A Three-Dimensional model for simulation of shelf sea dynamics. *Dt. Hydrogr. Z.* 38, H.4: 164-187.

Backhaus, J.O. and D. Hainbucher. – 1987. A finite difference general circulation model for shelf sea and its applications to low frequency variability on the North European Shelf. In: J.C. Nihoul and B.M. Jamart (eds.), *Three dimensional model of marine and estuarine dynamics*. Elvesier Oceanographic Series, 45: 221-244. Amsterdam.

Bowden, K.F. – 1983. *Physical oceanography of coastal waters.* Ellis Horwood.

Candela, J., C.D. Winant and H. Briden. – 1989. Meteorological forced subinertial flows through the straits of Gibraltar. *J. Geophys. Res*, 94: 12667-12679.

Charnock H. – 1955. Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 81: 639-640.

GETECH. – 1995. Geophysical Exploration TECHnology internal report. Dept. Earth Sciences, University of Leeds, UK.

Källen. – 1996. HIRLAM documentation manual, system 2.5

Le Traon, P.-Y. and P. Gauzelin. – 1997. Response of the Mediterranean mean sea level to atmospheric pressure forcing. *J. Geophys. Res.*, 102(C1): 973-984.

Pérez B. and I. Rodriguez. – 1994. Redmar. Spanish harbours tidal gauges network. Processing of tidal data. *Clima Marítimo report* 57.

Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery. – 1992. *Numerical Recipes in Fortran.* Cambridge University Press. 963 pp.

Pugh. D.T. – 1987. *Tides, surges and mean sea level.* Wiley.

Rodriguez, I. and E. Alvarez. – 1991. Modelo Tridimensional de Corrientes. Condiciones de aplicación a las costas españolas y análisis de resultados para el caso de un esquema de mallas anidadas. *Clima Maritimo report* 42.

Rodriguez, I., E. Alvarez, J. Krohn and J. Backhaus. – 1991. A mid-scale tidal analysis of waters around the north-western corner of the Iberian Peninsula. *Proc. Computer Modelling Ocean Eng.* 91. Balkema.

Stronach, J.A., J.O. Backhaus and T.S. Murty. – 1993. An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: The GF8 model. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, 31: 1-86.

Vested H.J., J.W. Nielsen, H.R. Jensen and K.B. Kristensen. – 1995. Skill Assessment of an operational Hydrodynamic Forecast system for the North Sea and Danish Belts. Quantitative skill assessment for coastal ocean models, 373-398 AGU