

OSCILACIONES DE NIVEL DEL MAR EN EL GOLFO DE CÁDIZ. COMPARACIÓN ENTRE MEDIDAS ALTIMÉTRICAS Y MEDIDAS IN-SITU

P. López-León, A. Aboitiz, J. Gómez-Enri, B. Tejedor, P. Villares y J.J. Muñoz.

*Departamento de Física Aplicada. CASEM. Universidad de Cádiz.
Av. República Saharaui s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz). pa.lopezleon@alum.uca.es*

RESUMEN

Se han analizado 12 meses de variaciones del nivel del mar en dos puntos del Golfo de Cádiz. Para la zona más somera, se ha utilizado un mareógrafo, mientras que en la zona de mayor profundidad, los datos altimétricos del satélite Envisat. Tras el procesamiento de ambas series, se ha comparado el nivel medio diario (respecto del nivel medio anual) de los datos in-situ, con el nivel instantáneo procedente del altímetro (respecto al nivel medio CLS01). Las oscilaciones provocadas por el efecto de las mareas se han eliminado en ambos casos, mientras que se han mantenido aquéllas oscilaciones provocadas por agentes meteorológicos (presión atmosférica y viento). A partir de los resultados obtenidos, se demuestra que el comportamiento de las oscilaciones del nivel del mar en puntos geográficos sometidos a dinámicas muy diferentes del Golfo de Cádiz es muy similar, de lo que se deduce que los procesos de interacción no lineal que se generan en las zonas más someras no son, en principio, responsables de las oscilaciones del nivel medio observadas en el periodo de estudio. La utilización conjunta de series de nivel obtenidas con técnicas clásicas y teledetección, permite la validación preliminar de éstas últimas.

ABSTRACT

We analyzed 12 months of sea level variations in two points inside Cadiz Bay. The shallowest point is located in Sancti Petri and we made use of a moored tide gauge. The deepest point was selected to be coincident with one track of the radar altimeter (RA-2) on board the Envisat satellite. The two datasets were processed in order to compare the daily mean sea level from the tide gauge and the instantaneous sea level from the radar altimeter. The contributions of the tides were removed from the two datasets and only the sea level oscillations due to meteorological forcing were compared against. From the results obtained, the sea level oscillations are quite similar in the two datasets. Thus the non-linear interactions generated in shallow waters are not the responsible for the sea level variations observed here. The jointly use of sea level from both in-situ and altimetry is of great interest for altimeter validation purposes.

Palabras clave: altimetría, mareógrafo, Golfo de Cádiz, validación.

INTRODUCCIÓN

Tras 15 años de desarrollo y utilización de los datos altimétricos, la altimetría por satélite se encuentra en un momento crucial. Su utilización en multitud de aplicaciones está muy cerca de convertirse en operacional. Uno de los grandes logros conseguidos, después de 15 años, ha sido el de aunar el trabajo de tres disciplinas científicas: Geodesia, Geofísica y Oceanografía. Más recientemente, ha sido posible utilizar la altimetría en aplicaciones en tierra (algo para lo que los instrumentos no estaban en principio diseñados), para estudiar niveles en lagos y ríos, abriendo significativamente el campo de aplicación de los datos altimétricos. Los dos retos a los que se enfrenta la altimetría, radican por un lado en la necesidad de mejorar aún más la precisión de sus medidas y, por otro, la búsqueda de nuevas aplicaciones científicas que den respuesta a muchas de las incógnitas suscitadas en los últimos años, relacionadas con los cambios bruscos en el Clima

del Planeta. Sirva de ejemplo, la contribución de la altimetría al estudio de niveles del mar, cuyas variaciones (subida promedio a nivel global de 3.2 mm/año en los últimos 15 años) están íntimamente relacionadas con el posible Cambio Climático. La precisión de las medidas requerida para este tipo de estudios ha de estar por debajo de 2-3 cm. Esta precisión ya ha sido alcanzada globalmente con los datos altimétricos. No obstante, existe la necesidad de seguir avanzando y mejorar las capacidades inherentes al uso de este tipo de información, mejorando aún más las precisiones ya alcanzadas, especialmente a escalas mesoescalares y locales (zonas costeras). Por este motivo, los estudios realizados con altimetría de tendencias del nivel del mar a escalas principalmente locales y la determinación de la altura de ola significativa en regiones costeras, necesitan aún mejores precisiones que las alcanzadas hasta ahora.

El primer intento para obtener información altimétrica en regiones oceánicas costeras mediante

la mejora en el procesamiento de los datos, fue el realizado por Manzella *et al.* (1997), redefiniendo la corrección troposférica húmeda del altímetro a bordo del ERS-1, en el Canal de Córcega. Crout (1998), realizó una revisión del potencial del Topex/Poseidon en regiones costeras, usando datos a 1Hz y 10Hz, pero sin mejorar las correcciones. Este autor destacó la posibilidad de recuperar datos en regiones oceánicas costeras con una topografía suave o plana. Anzenhofer *et al.* (1999) realizó un estudio extensivo de la altimetría costera, teniendo en cuenta todos los factores relacionados con el reprocesamiento. Estos autores fueron los primeros en analizar en detalle diversos algoritmos de reprocesamiento de señal y su posible implementación. Vignudelli *et al.* (2000) realizó un estudio en el Canal de Córcega con la idea de mejorar la corrección de marea, usando datos Topex/Poseidon a 1Hz, correntímetros y mareógrafos. Sus resultados fueron prometedores, demostrando que con una simple mejora en el procesamiento de los datos, la señal obtenida a escalas temporales estacionales se asemejaba bastante a los datos *in-situ*.

El objetivo de este trabajo es doble. Por un lado, la comparación entre los datos altimétricos y las medidas *in-situ* en el Golfo de Cádiz, lo que permitirá una primera validación de los datos altimétricos en esta zona y, por otro, el análisis de las oscilaciones del nivel del mar en dos puntos con características dinámicas distintas.

DATOS UTILIZADOS

Para llevar a cabo este trabajo, se han utilizado medidas *in situ* tomadas por un mareógrafo en un punto costero del Golfo de Cádiz (figura 1) (Tejedor *et al.* 2008) y medidas altimétricas procedentes del Envisat. Para la comparación de las variaciones del nivel del mar medidas *in situ* con respecto a las medidas altimétricas, se debe tener en cuenta que en cada uno de los casos se utilizarán niveles de referencia diferentes. Así, en el primer caso, las alturas del nivel del mar están referidas al cero del instrumento mientras que en el segundo están referidas, al nivel medio CLS01 (Hernández 2000). Con el fin de poder realizar la comparación de unas medidas y otras, se han calculado, por un lado, las variaciones del nivel del mar medidas *in situ* respecto al nivel medio (obtenido a partir de una serie anual de datos *in situ*) y, por otro, las alturas altimétricas del nivel del mar respecto al nivel medio CLS01. El procedimiento seguido para obtener dichas variables se muestra con detalle a continuación.

Medidas altimétricas

Los datos altimétricos utilizados en este trabajo, proceden del sensor RA-2 (Dual Frequency Radar Altimeter), a bordo de la misión Envisat (Environmental Satellite), gestionada por la Agencia Espacial Europea (ESA). La información procede del nivel 2 de procesamiento (producto *off-line*), en ciclos repetitivos de 35 días en formato GDR (Geophysical Data Records). Se han utilizado un total de 11 ciclos, correspondientes al periodo de tiempo en el que se obtuvieron medidas *in-situ*.

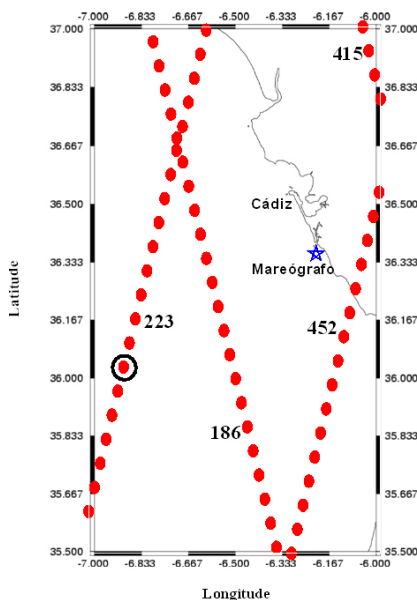


Figura 1.- Zona de estudio. Los puntos rojos representan la localización de las trazas del radar altimétrico a bordo del satélite Envisat, destacándose el punto (círculo negro) seleccionado para el estudio. La estrella azul indica la ubicación del mareógrafo utilizado.

El radar altimétrico mide el tiempo que una señal emitida por el propio sensor, tarda en atravesar la atmósfera, interaccionar con la superficie oceánica y posteriormente ser recibida por el radar, atravesando nuevamente la atmósfera. Asumiendo que las señales altimétricas viajan a la velocidad de la luz, el radar estima la distancia que separa al centro de masas del satélite con la superficie observada. Dicha distancia se conoce como *Range*. Conociendo la distancia del centro de masas del satélite con una superficie de referencia (WGS84), conocida como *Altitude*, se obtiene la Altura de la Superficie Oceánica (*ASO*) como la diferencia entre

Altitude y Range. Los valores de *ASO*, deben ser corregidos por los efectos instrumentales (fundamentalmente la deriva temporal de los relojes internos del altímetro), los efectos atmosféricos (ionosfera y troposfera) y por la interacción de la señal con la superficie oceánica (corrección por el estado del mar). Los valores de *ASO*, son la suma del nivel medio, las anomalías del nivel del mar, los efectos de las mareas y los provocados por la presión atmosférica y el viento en superficie. Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, se ha procedido a eliminar de *ASO*, el nivel medio, utilizando el CLS01 (Hernández 2000) y los efectos provocados por las mareas, haciendo uso del modelo GOT00.2b (Ray 1999).

Medidas *in situ*

Para la comparación de las medidas altimétricas, se ha contado con datos de un sensor de presión (mareógrafo) instalado en el Puerto Deportivo de Sancti Petri, Cádiz (36°23'42.8''N; 6°12'32.7''W), tomados con un intervalo de muestreo de 10 minutos desde el 5 de octubre de 2006 al 21 de octubre de 2007. El punto de instalación del instrumento está situado en las cercanías de la desembocadura del Caño Sancti Petri, el cual se caracteriza por su carácter somero, con profundidades medias que oscilan entre 5 y 3 m en su canal central.

La serie original de datos corresponde a presiones totales, es decir, a la suma de la presión atmosférica (P_{atm}) y la presión ejercida por la columna de agua (P_{agua}) respecto al cero del instrumento. Para transformar los datos de presión total en alturas de la columna de agua (H) se ha contado con una serie de presión atmosférica simultánea a la anterior, tomada con un intervalo de muestreo de 1 hora por la estación meteorológica instalada por el Real Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando, Cádiz (36°25'51.5''N; 6°12'2.3''W). Como paso previo, ha sido necesario filtrar los datos originales de presión total mediante un filtro $A_6A_6A_7$ (Godin, 1972).

$$H = \frac{P_{total} - P_{atm}}{\rho g} \quad (Ec. 1)$$

Para el cálculo de las alturas del nivel del mar respecto al cero del instrumento (Ec. 1) se ha utilizado un valor constante de la densidad del agua (ρ) e igual a 1025 kg.m⁻³. Se ha asumido que, debido al carácter somero de la zona, las variaciones de densidad del agua introducen una variación del nivel del mar despreciable. El valor de la gravedad (g) utilizado ha sido 9,8 m.s⁻².

Posteriormente, se ha aplicado un filtro $A_{24}A_{24}A_{25}$ a la serie horaria de alturas del nivel del mar con el fin de eliminar todas las fluctuaciones de periodo inferior a 24 horas, eliminándose, de esta manera, la contribución de la marea. La serie resultante es interpretada en términos de niveles medios diarios. Finalmente, se ha eliminado de la serie resultante el valor del nivel medio anual con el fin de obtener las variaciones diarias del nivel del mar respecto al nivel medio anual. De esta serie resultante, se han seleccionado los datos coincidentes para las fechas disponibles de medidas altimétricas.

RESULTADOS

Los resultados que se presentan corresponden a la comparación entre los datos altimétricos obtenidos para el punto de coordenadas 36°00'28.3''N; 6°52'57.0''W y los datos registrados *in-situ* en Sancti-Petri. En la figura 2 se representa la variación temporal del nivel instantáneo del mar respecto al nivel medio CLS01, obtenida mediante el tratamiento de los datos altimétricos y las variaciones del nivel medio diario respecto al nivel medio anual que se han registrado *in-situ*, donde se observa que el patrón de variación de ambas series temporales es muy similar en el intervalo de tiempo analizado. Sin embargo, existe una pronunciada variación del nivel del mar entre los meses de octubre de 2006 y febrero de 2007, que en el caso de los datos *in-situ*, supone una variación superior a los 50 cm y en el de los datos altimétricos de unos 35 cm. Además, se observa un ligero aumento de nivel entre los meses de septiembre y octubre de 2007 en los datos *in-situ*, acompañado de un suave descenso en los datos altimétricos (inferiores a 5 cm).

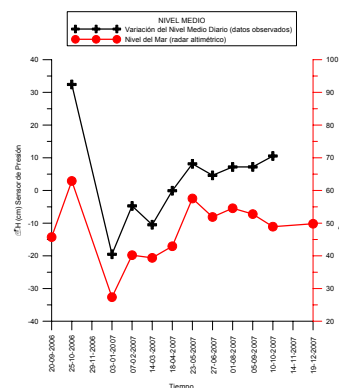


Figura 2.- Variación temporal del nivel del mar, obtenidos a partir de los datos *in-situ* (línea negra) y los datos altimétricos (línea roja).

En la figura 3 se ha determinado mediante un ajuste lineal la relación entre las variaciones del nivel del mar en las dos zonas de estudio. Se ha obtenido un ajuste $r^2 = 0.85$, lo cual demuestra el grado de similitud de ambas series temporales.

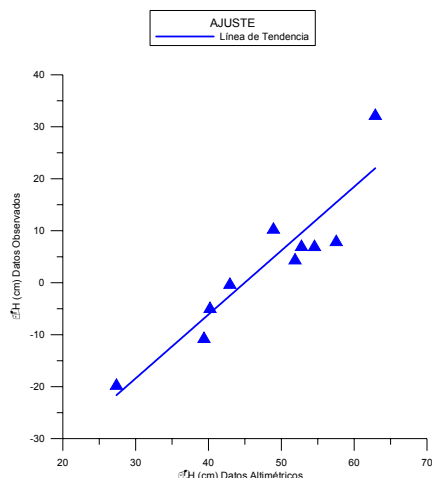


Figura 3.- Ajuste de regresión lineal entre la serie temporal de datos altimétricos y la de datos in-situ.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista altimétrico, el buen ajuste obtenido entre los datos altimétricos y los datos in-situ tomados en la desembocadura del Caño Sancti Petri, demuestra que puede ser utilizado como punto de referencia para futuras validaciones de los datos altimétricos. Asimismo, se demuestra la necesidad de un estudio más detallado, extendiendo el intervalo de tiempo de muestreo, con el fin de explicar las singularidades encontradas entre ambas series. Desde el punto de vista oceanográfico, los resultados obtenidos parecen indicar que, a pesar de la importancia que juegan los procesos de interacción no lineal en las zonas muy someras, éstos no son los responsables de las variaciones temporales tan significativas del nivel medio diario observadas.

BIBLIOGRAFÍA

Anzenhofer, M., C. K. Shum, M. Rentsh, 1999. Coastal altimetry and applications, Tech. Rep. n. 464, *Geodetic Science and Surveying*, The Ohio State University Columbus, USA.

Crout, R. L. 1998. Coastal currents from satellite altimetry, *Sea Technology*, 8, 33-37.

Godin G. 1972. *The analysis of tides*. University of Toronto Press. Toronto, Ontario, Canada. 264 pp.

Hernández F. and Schaeffer P., 2000. *Altimetric Mean Sea Surfaces and Gravity Anomaly maps inter-comparisons*. AVI-NT-011-5242-CLS, 48pp. CLS Ramonville St Agne.

Manzella, G. M. R., G. L. Borzelli, P. Cipollini, T. H. Guymet, H. M. Snaith and S. Vignudelli, 1997. Potential use of satellite data to infer the circulation dynamics in a marginal area of the Mediterranean Sea, ESA SP-414 *Proc. of 3rd ERS Symposium - Space at the Service of our Environment*, Florence (Italy), 17-21 March 1997, Vol. 3, pp. 1461-1466, European Space Agency.

Ray R., 1999. A Global Ocean Tide Model From TOPEX/Poseidon Altimetry. *GOT99.2-NASA/TM-1999-209478*, pp.58, Goddard Space Flight Center/NASA, Greenbelt, MD.

Tejedor B., Muñoz-Pérez, J.J., Aboitiz A., Megías B., 2008. Análisis de la dinámica mareal en el Caño de Sancti Petri y sus repercusiones en la calidad de las aguas de la marisma. *Informe técnico*. Convenio firmado entre la Dirección General de Costas y la Universidad de Cádiz.

Vignudelli, S., P. Cipollini, M. Astraldi, G. P. Gasparini, and G. M. R. Manzella, 2000. Integrated use of altimeter and in situ data for understanding the water exchanges between the Tyrrhenian and Ligurian Seas, *J. Geophys. Res.*, 105, 19,649-19,663.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Real Observatorio de la Armada, la cesión de los datos meteorológicos utilizados. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, a través del Proyecto Nacional Ref. CGL2008-04/CLI.