

ESTUDIO DE LA CORRECCIÓN BARÓMETRO INVERTIDO, APLICADA AL MAR MEDITERRÁNEO

Pilar Villares (*), Jesús Gómez-Enri (*) y Manuel Catalán Pérez-Urquiola (*)

pilar.villares@uca.es

(*) *Departamento de Física Aplicada (CASEM). Universidad de Cádiz. Polígono Río S. Pedro, s/n. 11510. Puerto Real (Cádiz). España.*

RESUMEN: Se ha cuantificado la respuesta real de la superficie oceánica a las variaciones de presión atmosférica, comparándola con la que se deduce de la hipótesis isostática, la cual se emplea para corregir el efecto de la presión atmosférica en el Océano (corrección Barómetro Invertido). Se han analizado los primeros tres años de registros altimétricos del satélite ERS-2, en el Mar Mediterráneo, obteniéndose los coeficientes de regresión en cada punto de las trazas, así como en los puntos de cruce, estimándose la relación entre la presión atmosférica y la topografía dinámica. La distribución geográfica de los coeficientes de regresión así obtenidos, demuestra que existen desviaciones respecto del valor teórico (-0.998 cm/mbar), observándose una subestimación de la respuesta real del océano a las variaciones de presión atmosférica. Se ha obtenido la desviación estándar asociada a la corrección Barómetro Invertido, y la asociada a la que se deduce de los coeficientes de regresión individuales, estimados en cada posición geográfica. Con la técnica de órbitas colineales, se observa que al utilizar como factor barométrico los coeficientes de regresión obtenidos, existe una reducción de aproximadamente un 7% en la desviación estándar, mientras que con la técnica de cruce de órbitas, esta reducción aumenta al 11%.

ABSTRACT: The real sea level response to atmospheric pressure variations is quantified and compared with the one deduced from the isostatic assumption, which is normally used to correct the effect of the atmospheric pressure in the ocean, the so-called Inverse Barometer Correction (IBC). We have analyzed the first three years of ERS-2 altimetric records in the Mediterranean Sea. We obtained the regression coefficients at each geographical point of the ERS tracks and in the crossover points, estimating the relation between the surface atmospheric pressure and the sea level anomalies. The geographical distribution of the regression coefficients obtained, demonstrate that there are deviations from the hypothetical value (-0.998 cm/mbar), observing a general underestimation of the real response of the ocean to atmospheric pressure variations. We have obtained the standard deviation associated to the inverse barometer correction and the one obtained by using the individual regression coefficients obtained at each geographical position. Applying the collinear track method, we observe a reduction of approximately 7 % in the standard deviation, whereas in the case of the crossover track method, this reduction is around 11%.

Palabras clave: altimetría por satélite, presión atmosférica, corrección barómetro invertido, ERS-2.

INTRODUCCIÓN

El satélite europeo ERS-2 (European Remote-sensing Satellite) de la Agencia Espacial Europea, se puso en órbita en abril de 1995. Con algunas mejoras importantes respecto al anterior (ERS-1), este satélite ha continuado con la filosofía fundamental del proyecto iniciado en 1991, que era su carácter netamente multidisciplinar, en su sentido más amplio, gracias a los distintos sensores de medida de las propiedades físicas y químicas de la atmósfera, los Océanos y la tierra (básicamente el radar de apertura sintética, radar altimétrico, y el radiómetro).

Cuando se realizan estudios de variabilidad oceánica con información altimétrica, la respuesta oceánica a las variaciones de presión atmosférica representa una de las señales que deben ser eliminadas de dichos registros, debido a su carácter no dinámico. Se acepta como regla general, que en los Océanos se cumple la denominada *hipótesis isostática*. La corrección Barómetro Invertido (como se la conoce normalmente) se basa en dicha hipótesis, asumiendo que la magnitud de la respuesta de la superficie oceánica a los cambios en la presión atmosférica, está directamente relacionada con la magnitud de la fuerza generadora en una cantidad próxima a -1.00 cm/mbar (para el caso de los ERS, se utiliza -0.995 cm/mbar).

Varios han sido los trabajos que han analizado la respuesta global del Océano a las variaciones de presión atmosférica, principalmente utilizando los registros altimétricos procedentes del satélite TOPEX/POSEIDON (NASA-CNES), puesto en órbita en 1992. La coincidencia general en todos estos trabajos, ha sido la de constatar la existencia de importantes desviaciones respecto del valor teórico ya señalado de -0.995 cm/mbar, especialmente en latitudes bajas cercanas al ecuador (Gaspar y Ponte 1997), (Gaspar y Ponte 1998), (Ponte y Gaspar 1999) y (Mather y Woodworth 2001). El Mediterráneo es un mar semicerrado que presenta una respuesta un tanto más complicada a las variaciones de presión atmosférica. Usando datos TOPEX/POSEIDON, (Le Traon y Gauzelin 1997) encuentran que la correlación entre el nivel medio del Mediterráneo y la presión atmosférica, presenta importantes desviaciones respecto del que se desprendería de una hipotética respuesta isostática, especialmente a frecuencias mayores que 30 días¹.

El objetivo fundamental del trabajo que se presenta a continuación, es estimar la respuesta del Mar Mediterráneo a las variaciones de presión atmosférica, utilizando los tres primeros años de información altimétrica del satélite ERS-2 (mayo de 1995-junio de 1998) y compararlas con el valor que se deduce de una teórica respuesta isostática. Además, se ha estimado el impacto que tiene la aplicación de la corrección barómetro invertido en los datos altimétricos utilizados para los estudios de variabilidad oceánica (topografía dinámica), así como la que se deduce de utilizar los factores barométricos estimados. La presente comunicación se estructura de la siguiente forma: un primer apartado en el que se describe el tratamiento realizado a los datos altimétricos; continuaremos con los resultados obtenidos al estimar la respuesta oceánica mencionada en el Mar Mediterráneo (cuenca este y oeste). Finalizaremos con las conclusiones y comentarios finales.

PROCESADO DE DATOS ALTIMÉTRICOS

Tradicionalmente, los estudios altimétricos que han tenido como objetivo el análisis de la respuesta oceánica a las variaciones de presión atmosférica, no han utilizado directamente los valores de la Altura de la Superficie Oceánica (distancia entre dicha superficie y un elipsoide de referencia: WGS84 en el caso de los ERS), ya que contiene señales muy energéticas que impiden aislar dicha respuesta (principalmente el geode). Por esta razón, es preferible optar por trabajar con la Señal Dinámica (SD), la cual se puede obtener

de dos formas diferentes: SD obtenida tras hallar la diferencia entre ASO y el nivel medio oceánico (en ambos la principal señal es la constante en el tiempo del geode); en segundo lugar utilizar directamente las diferencias obtenidas entre dos señales ASO separadas un determinado intervalo de tiempo, lo cual denominaremos Diferencias de Anomalías del Nivel del Mar (DANM). Igualmente podemos decir para el caso de la obtención de las Diferencias de Presión atmosférica (DP). En el presente trabajo se va a optar por la segunda opción. Los valores de Presión han sido obtenidos a partir de la corrección troposférica seca, según los sugerido por (CERSAT 1996)

Con el objetivo de generar las secuencias de diferencias DANM y DP se han utilizado dos técnicas, que de forma genérica se expresan como:

$$\Delta Z(\text{lat}, \text{lon}, T) = z_1(\text{lat}, \text{lon}, t_1) - z_2(\text{lat}, \text{lon}, t_2) \quad (1)$$

Donde z_i es la variable a la que le vamos a calcular la diferencia (ASO y Presión atmosférica). "lat" hace referencia a la latitud, "lon" a la longitud y "T" es el tiempo al que se le asigna el valor de la diferencia ($[t_1+t_2]/2$). El intervalo de tiempo transcurrido entre dos medidas realizadas en la misma posición geográfica lo denominaremos intervalo de muestreo ($\Delta t = |t_1-t_2|$). Las dos técnicas en las que se basan la ecuación (1) son la técnica de órbitas colineales y la de cruce de órbitas (TOC y XOC respectivamente). En la primera, el intervalo de muestreo es de 35 días (diferencia de tiempo existente entre dos ciclos repetitivos), mientras que en XOC es de 11 días; sin embargo, si prescindimos de todos aquellos puntos de cruce en los que existe una diferencia de tiempo superior a 10 días, obtenemos un Δt medio de 4 días. Esto nos va a permitir analizar la respuesta del Mediterráneo en un rango de frecuencias que va entre 4 y 35 días¹. La ecuación (1), aplicada a las series de DANM, puede ser re-escrita en forma de una ecuación de regresión lineal:

$$\text{DANM}(\text{lat}, \text{lon}, T) = \text{CR}[\text{DP}(\text{lat}, \text{lon}, T)] + e \quad (2)$$

Donde CR es el coeficiente de regresión y e se corresponde con la señal residual, la cual no es coherente con la fuerza de presión atmosférica. Si e no está correlacionado con DP, entonces suponiendo que la superficie oceánica responde isostáticamente, CR debería tener un valor cercano al que se deduce de la hipótesis isostática. El procedimiento que se va a seguir es el de estimar CR en cada punto de muestreo del satélite, en cada uno de los cuales tendremos dos series temporales: una con los valores de DANM y otra con los

valores de DP. El número de puntos total a los que se le aplicará el análisis de regresión, dependerá del método de obtención de diferencias utilizado. Así, en el caso de la técnica de órbitas colineales, obtendremos una estimación de CR cada 7 km aproximadamente (en dirección latitudinal). En el caso de la técnica de cruce de órbitas, el número de puntos de muestreo será menor, de tal manera que la separación (en la dirección latitudinal) entre dos puntos de cruce consecutivos será mayor. La alta resolución espacial con la que cuenta el satélite ERS-2, permite que exista un número lo suficientemente alto de puntos de cruce en la zona de estudio.

RESULTADOS

En primer lugar, estimamos los coeficientes de regresión según (2) entre las series temporales de DANM y DP, en las posiciones geográficas que conforman las trazas del satélite, utilizando las dos técnicas de obtención de diferencias descritas. En la (Tabla 1) se expresan los resultados obtenidos al calcular la media de todos los coeficientes del Mediterráneo, subdividiendo además lo obtenido en la cuenca este y la oeste. Se han estimado, además, los intervalos de confianza al 95%.

	35 días	11 días	4 días
Mediterr.	-0.676±0.5	-0.762±0.5	-0.733±0.6
Med. Este	-0.659±0.5	-0.768±0.6	-0.710±0.6
Med.Oeste	-0.727±0.5	-0.710±0.4	-0.744±0.5

Tabla 1.- Coeficientes de regresión medios (cm/mbar), junto con los intervalos de confianza, obtenidos en el Mar Mediterráneo, cuenca Este y cuenca Oeste, para los tres intervalos de tiempo utilizados.

A continuación, estimamos qué impacto tiene sobre la variabilidad oceánica, la aplicación de la corrección por presión atmosférica. Para ello, hemos estimado la desviación estándar (en cm), asociada a las series de DANM, aplicando la corrección barómetro invertido y la hemos comparado con la que se obtendría al utilizar como factor barométrico los coeficientes de regresión anteriormente calculados. Además, se presenta la desviación estándar media asociada a ambas correcciones. Dichos análisis los hemos repetido para la cuenca mediterránea este y la oeste. Todo lo anterior, queda resumido en la (Tabla 2) para un intervalo de muestreo de 35 días, (Tabla 3) para 11 días y (Tabla 4) para 4 días.

	Mediterr.	Med. Este	Med.Oeste
danm	17.989	17.562	17.692
danm-bi	19.157	18.398	18.671
danm-cr	16.777	16.249	16.281
bi	9.835	9.901	10.039
cr	6.269	6.387	6.643

Tabla 3.- Desviación estándar media (cm), asociada a las series de DANM (obtenidas a partir de la técnica TOC), una vez eliminada la corrección barómetro invertido y la que se deduce de utilizar los coeficientes de regresión estimados, así como la desviación estándar media, asociada a ambas correcciones.

	Mediterr.	Med. Este	Med.Oeste
danm	11.921	11.829	12.437
danm-bi	10.955	10.746	11.366
danm-cr	10.568	10.433	10.953
bi	6.537	6.733	7.051
cr	5.037	5.469	5.128

Tabla 4.- Ídem que la (Tabla 3) utilizando la técnica XOC con $\Delta t = 11$ días.

	Mediterr.	Med. Este	Med.Oeste
danm	10.558	10.706	9.938
danm-bi	9.849	9.893	9.349
danm-cr	9.549	9.462	9.021
bi	5.428	5.827	5.178
cr	4.228	4.513	3.797

Tabla 5.- Ídem que la (Tabla 4) considerando $\Delta t = 4$ días.

CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en la (Tabla 1), denotan que en los tres intervalos de muestreo el valor medio de CR presenta un valor significativamente alejado del valor teórico, y en todos los casos, aparece una respuesta del Mediterráneo a las variaciones de presión atmosférica por debajo (en valor absoluto) de la teórica respuesta isostática. El análisis realizado en las dos cuencas, confirma lo dicho. Este resultado no confirma los obtenidos por los autores señalados anteriormente, así como (Gómez-Enri *et alii* 2002), éste último utilizando datos procedentes del satélite ERS-2, aunque, como se ha comentado, ninguno de los trabajos mencionados se ha centrado en el Mediterráneo. Sin embargo, un estudio más exhaustivo, podría determinar la existencia de desviaciones locales, su magnitud y dónde se localizan exactamente. Además, cabría la posibilidad de conocer la respuesta del Mediterráneo a las variaciones de presión atmosférica en las diferentes estaciones, lo cual queda para un trabajo posterior.

En cuanto a los resultados que aparecen en las (Tablas 3, 4 y 5), hay que decir que es significativo el aumento en la desviación estándar para el caso de $\Delta t = 35$ días al aplicar la corrección BI, hecho que se repite tanto en el Mediterráneo, como en las dos cuencas este y oeste. Decimos significativo, porque el hecho de eliminar el efecto de la presión atmosférica, debería de reducir la desviación estándar asociada a las series de DANM, como ocurre con los otros dos intervalos de muestreo. Esto es para el caso de utilizar como corrección la BI, pero en el caso de utilizar una corrección en la que los factores barométricos fuesen los CR calculados según (2) y no BI, observamos que la reducción de la desviación estándar es un hecho común en todos los intervalos de muestreo, tanto en el Mediterráneo como en las cuencas este y oeste, como queda resumido en la (Tabla 6)

	35 días	11 días	4 días
Mediterr.	6.3%	11.4%	9.6%
Med. Este	7.5%	11.9%	11.7%
Med. Oeste	8%	12%	11.2%

Tabla 6.-Porcentaje de reducción de la desviación estándar de las series DANM, al aplicar una corrección por presión atmosférica, en la que los factores barométricos son los CR calculados en cada posición geográfica correspondientes a las trazas realizadas por el satélite.

BIBLIOGRAFIA

Centre ERS d'Archivage et de Traitement (CERSAT), 1996. Altimeter and microwave radiometer ERS products, user manual, version 2.2, 136 pp., Plouzané, France.

Gaspar, P., and Ponte, R.M., 1997. Relation between sea level and barometric pressure determined from altimeter data and model simulations, *J. Geophys. Res.*, 102, 961-971.

Gaspar, P., and Ponte, R.M., 1998. Correction to - "Relation between sea level and barometric pressure determined from altimeter data and model simulations", *J. Geophys. Res.*, 103, 18,809.

Gómez-Enri, J., Villares, P., Bruno, M., Benveniste, J., 2001. Estimation of the Atlantic sea level response to atmospheric pressure using ERS-2 altimeter data and a Global Ocean Model. *In SPIE International Symposium on Remote Sensing*. I.S.B.N.: 0-8194-4269-0.

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

Mathers, E.L. and Woodworth, P.L., 2001. Departures from the local inverse barometer model observed in altimeter and tide gauge data and in a global barotropic numerical model. *J. Geophys. Res.*, 106, 6957-6972.

Ponte, R.M. and Gaspar P., 1999. Regional analysis of the inverted barometer effect over the global ocean using TOPEX/POSEIDON data and model results. *J. Geophys. Res.*, 104, 15587-15601.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Agencia Espacial Europea, la información altimétrica suministrada, gracias al Proyecto Cat-1.1096. Este trabajo, ha sido desarrollado con apoyo de la CICYT (Programa Nacional I+D), a través del Proyecto REN2000-0549-C02-01 MAR.