

## OCEANOGRAFÍA: DETERMINACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR A TRAVÉS DE DATOS DE ALTIMETRÍA.

Gómez-Enri J. (\*)-Camacho J.C. (\*)-Muñoz-Nieves S. (\*)-Catalán M. (\*)-Villares P. (\*)-Rojas J.L. (\*\*).  
(\*) Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz. Polígono Río San Pedro-Puerto Real CÁDIZ, España.

(\*\*) Departamento de Ingenierías de Sistemas y Automática Universidad de Cádiz. Cádiz, España.

*ABSTRACT: Monitoring mean sea level is a natural application for satellite altimetry, but the extreme quality it demands was beyond the capabilities of the system launched before the last generation of altimeter satellites composed for the ESA (ERS-1/2) and the NASA-CNES satellite TOPEX-POSEIDON. Such applications require practically absolute altimetry, with measurements accurate well below the decimeter, they must be, besides, fully reproducible and have no instrumental drift. Although last generation satellites observations are only in orbit for six years at most, and these periods are too short to show secular variations, the analysis of seasonal and inter-seasonal variations in mean sea level provides a mean of checking the consistency of the measurements and procedures. Present results already reveals the importance of altimetric teledetection methods to check the reality of some hypothesis about mean sea level changes. This work presents the description and first results of mean sea level determinations made, over the surroundings of the Atlantic coasts of north Africa and Iberia, using ERS-1 and ERS-2 ESA and TOPEX-POSEIDON satellite altimeter data. Results are compared with present Geoid showing clear differences in its high frequency spatial structure. A study of the secular sea level variation in the Gulf of Cadiz, made with the TOPEX-POSEIDON altimeter, and extended from October 1992 to October 1996, is presented showing a secular variation in the mean sea level for the zone of 1mm/year.*

**INTRODUCCIÓN:** El estudio de la variación secular del nivel medio de los mares requiere extraer una información, de magnitud estimada en el orden del milímetro por año, sobrepuesta a variaciones decimétricas de corto periodo de la topografía dinámica de los océanos. Esta variación secular significaría una comprobación objetiva del efecto combinado de la dilatación del agua oceánica y de la fusión parcial de los casquetes polares, probablemente relacionados con un posible calentamiento térmico a nivel planetario. Esta variación podía estudiarse, hasta ahora, con mareógrafos distribuidos frecuentemente de forma inadecuada y dudosamente referenciados a los sistemas de referencia geodésicos. El lanzamiento de satélites para la observación de la superficie del mar, junto al desarrollo paralelo de las técnicas de tratamiento y evaluación de los datos e imágenes, han puesto a disposición de los oceanógrafos, geodestas y geofísicos un medio excepcionalmente eficaz para abordar con nuevos medios y criterios el estudio del océano y ciencias asociadas, en tiempo quasi-real, incluyendo la variación temporal de su

comportamiento dinámico.

La realización reciente de Proyectos planetarios y regionales, para relacionar las medidas de mareógrafos con los sistemas de referencia globales, establecidos por las redes de seguimiento de satélites laser (SLR), observaciones del Sistema de Referencia Quasi-Inercial por Interferometría de Grandes Bases (VLBI) y puntos relacionados con el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS), han permitido referir las marcas de los mareógrafos a los sistemas de referencia globales con precisión centimétrica. Lo anterior ha requerido la observación periódica de las marcas de los mareógrafos con la misma precisión, utilizando observaciones frecuentes con receptores GPS y gravimetría, con la finalidad de poder diferenciar las variaciones reales del nivel del mar de las variaciones introducidas, en la medida, por la actividad tectónica y la deformación que esta introduce al deformar localmente la corteza submarina.

Por otra parte, la puesta en órbita de satélites con radares altímetros de precisión subdecimétrica (ERS-1, Topex-Poseidon, ERS-2) permite actualmente medir la variación del nivel del mar, con carácter global, con precisión subcentimétrica y la superficie topográfica instantánea de los océanos con precisión subdecimétrica, obteniendo, a partir de ella, por promedio estadístico e interpolación, el comportamiento temporal de la superficie de los mares en corto y largo período (estacional, anual)(Figura 1).

La altimetría por satélites permite, de esta forma, aportar información diferente a la de los mareógrafos, en el sentido que sus medidas se encuentran menos influidas por efectos locales, su referenciación se efectúa continuamente al Elipsoide de referencia, por medio de las estaciones de seguimiento, y el instrumento es único y calibrado por observaciones contrastadas continuamente a nivel planetario.

Podemos considerar, en términos generales, que la oceanografía espacial, como nueva herramienta científica, incorpora distintos sistemas de detección, entre los que se encuentran los sensores en la zona de microondas, capaces de operar en cualquier condición atmosférica, entre los que se destacan el Radar de Apertura Sintética (S.A.R.) y el utilizado en este estudio, el Radar Altimétrico (R.A.).

**ALTIMETRO:** El satélite europeo ERS-2 (European Remote Sensing) fue lanzado en abril de 1995 con el objetivo de asegurar la continuidad de los datos que el inicial ERS-1 había estado produciendo desde julio de 1991 (fecha de su lanzamiento). Ambos satélites tienen una órbita sincrónica con el sol, casi polar, cuasi-circular y con órbitas repetitivas a una altura media de unos 785 Kms y una inclinación aproximada de 98,5°. El satélite ERS-1 ha tenido a lo largo de su historia tres ciclos distintos: 3-días, 35-días y 168-días y a partir de marzo de 1995 coincidiendo con la puesta en órbita del ERS-2, se viene llevando a cabo una órbita repetitiva de 35 días en ambos satélites.

Entre los distintos sensores que lleva el satélite, está el Radar Altimétrico, sensor de microondas activo que trabaja en la banda K a 13,8 Ghz.; está preparado para medir los ecos desde los océanos y superficies heladas, aunque el modo de medida en ambos casos es distinto. En el caso de la medida oceánica, se utiliza para medir altura de olas, módulo de la velocidad del viento superficial y la elevación de la superficie del mar, lo cual es muy útil para el estudio de la topografía oceánica a nivel global (corrientes, mareas y geoide).

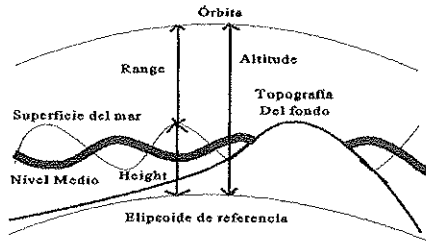


Figura 2 La Figura presenta en esquema los principios físicos de la altimetría utilizando la siguiente terminología:

-Altitud orbital (Altitude): Distancia del Centro de Gravedad del satélite al Elipsoide de referencia.

-Medida altimétrica (Range): Distancia a la superficie oceánica medida por el altímetro.

-Nivel del mar instantáneo (Height): Altitud de la superficie oceánica al Elipsoide de referencia.

Radiométrica - Corrección Ionosférica [2] - Corrección por Oleaje [3] - Corrección por Mareas (tanto oceánica como terrestre) [4] - Corrección debida al Efecto del Barómetro Invertido.

Una vez que se tienen los datos corregidos, se ha de establecer un marco geográfico y una determinada escala temporal. En cuanto al primero se ha elegido: Latitud: 25°N - 50°N; Longitud: 5°W - 20°W.

Y en cuanto a la escala temporal, se han tomado datos desde el 19-06-95 hasta el 08-07-96 abarcando así un año de registros para determinar el Nivel Medio marino en el mencionado marco geográfico. Con la información del TOPEX, recibida de la Agencia AVISO, se ha calculado la variación del nivel del mar en el Golfo de Cádiz entre Octubre de 1992 (ciclo 2) y Octubre de 1996 (Ciclo 148). A la variación temporal se le ha ajustado una recta de regresión que permite estimar la variación del nivel del mar en tres años en un valor de 2-3mm. (Figura 4).

**NIVEL MEDIO ANUAL Y SEÑAL DINÁMICA:** El nivel del mar es una magnitud que varía con el tiempo y puede ser descrito con la siguiente ecuación [5]:

$$X(t) = Z_0(t) + T(t) + S(t)$$

donde:  $Z_0(t)$  es el Nivel Medio del Mar.

$T(t)$  es la componente mareal.

$S(t)$  es la componente meteorológica (oleaje) el término que en este caso interesa es  $Z_0(t)$  y es lo que se ha estimado realizando una media de todos los registros obtenidos durante el año de observación, es decir:

$$\text{Nivel Medio} = \text{Nivel Instantáneo} / n^\circ \text{ registros}$$

Este Nivel Medio se ha obtenido

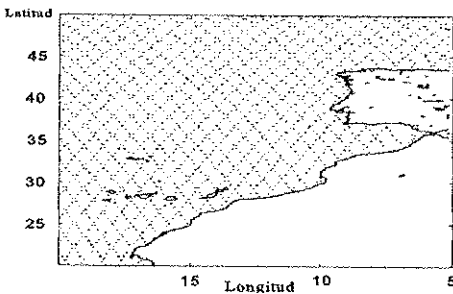


Figura 1.- La figura presenta las órbitas del satélite ERS-2, que atraviesan la zona de estudio.

**TRATAMIENTO DE LOS DATOS:** A partir de la información suministrada por la E.S.A (Agencia Europea Espacial) se generan los datos que se van a utilizar en este estudio; el cálculo fundamental que se realiza es la determinación del Nivel Instantáneo (Figura2), es decir, la altura de la superficie del mar tomando como referencia el Elipsoide WGS84. La ecuación seguida es la siguiente:

$$\text{Nivel Instantáneo} = \text{Altitude} - \text{Range} - \text{Correcciones}$$

La alta precisión de las medidas altimétricas del ERS-2 se debe entre otras causas, a su bajo nivel de ruido, exactitud en la determinación de su órbita y a las correcciones que se le aplican (tanto la atmósfera como la superficie del mar van a afectar a la señal emitida por el altímetro): Corrección Troposférica Seca [1] - Corrección Troposférica Húmeda

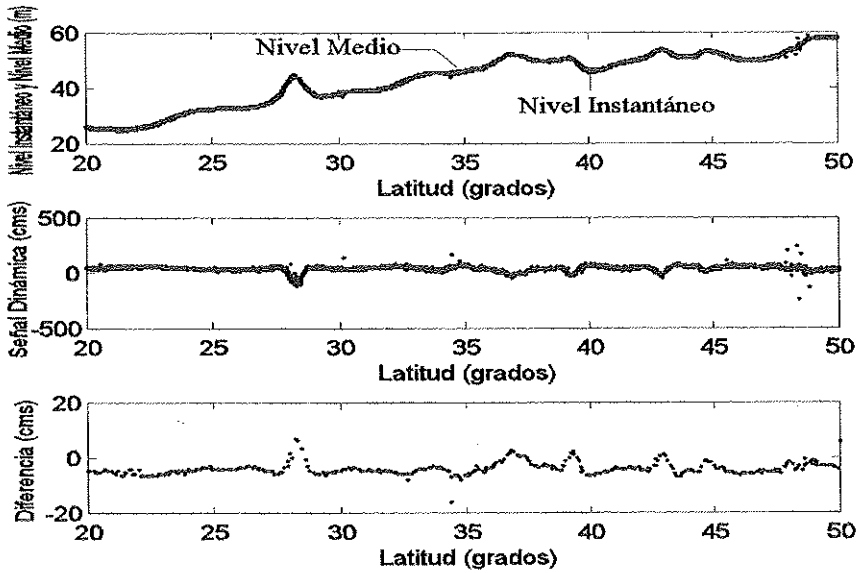


Figura 3.- En la figura 3-a se representa el Nivel Medio del mar bajo la órbita 209 del satélite ERS-2, extraído de la superficie del Nivel Medio MSS95A, y el Instantáneo calculado, aplicando todas las correcciones. Este perfil atraviesa las Islas Canarias hacia la proximidad de la costa Atlántica portuguesa. En la figura 3-b se presenta la Señal Dinámica bajo la misma órbita, calculada restando el Nivel Medio al Nivel Instantáneo

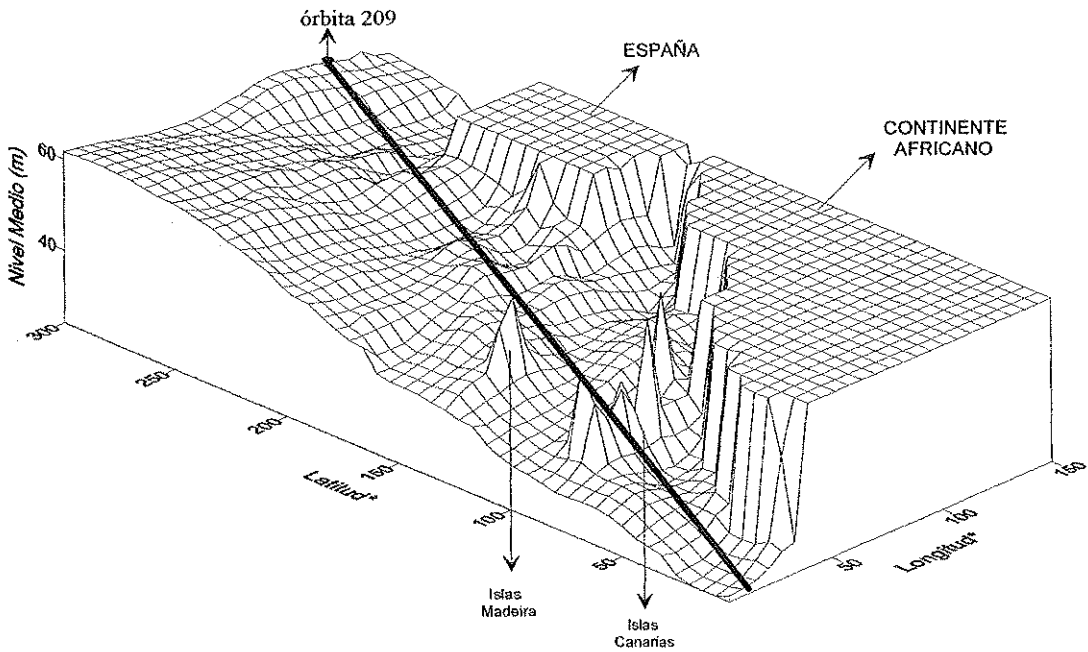


Figura 4.- Esta figura representa el Nivel Medio (en metros) para la zona en estudio. El asterisco en latitud y longitud se debe a que los valores, están referenciados a un número de filas (300) y un número de columnas (150), es decir, la latitud: 20°N-50°N en la figura aparece como número de filas: 1-300 y la longitud: 20°W-5°W al intervalo: 1-150. También puede observarse la órbita que ha sido estudiada en la figura anterior.

promediando durante un año de estudio, los valores de Nivel Instantáneo, estimando que este promedio actúa como filtro paso bajo, eliminando los valores de alta frecuencia en el comportamiento dinámico del océano.

La Señal Dinámica se conoce como la diferencia entre el Nivel Medio y el Nivel Instantáneo y da una idea de la topografía dinámica de la región, provocada por distintos fenómenos oceanográficos, tales como la variación en la densidad del agua, recorridos permanentes de circulación oceánica (corrientes geostroficadas) y efectos atmosféricos tales como las variaciones en el campo medio de presiones y de vientos.

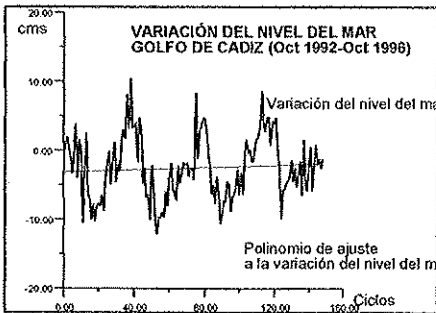


Figura 5.- variación del nivel del mar en el Golfo de Cádiz entre Octubre de 1992 y Octubre de 1996. Al Nivel del Mar Instantáneo se le ha ajustado una recta de regresión que se ajusta presentando una tendencia secular de subida del nivel del mar en el Golfo de Cádiz de 1.18 cms en cuatro años, es decir, de 2.3 mm/año.

**DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES:** Para la elaboración de la Figura 3-a y 3-b se ha elegido una órbita determinada de las que ha realizado el satélite a su paso por la zona de estudio (en este caso la órbita 209), pudiéndose comprobar en la figura 3-a cuál es la diferencia entre el Nivel Medio y el Nivel Instantáneo; también puede percibirse un pico bastante pronunciado en torno a la latitud 28°N el cual es ficticio porque coincide con el paso de la órbita por la zona de subducción de las Islas Canarias. En la Figura 3-b aparece la Señal Dinámica que oscila en torno a  $\pm 50$  cms; las variaciones detectadas en las zonas donde el Nivel Medio presenta mayores variaciones se deben, probablemente, no sólo a la dinámica oceánica sino también a ruido de alta frecuencia espacial en el valor medio aplicado, debido a que el satélite varía la zona de sobrevuelo en las diferentes órbitas hasta 1 Km. Y esto puede ocasionar variaciones en la diferencia con la Señal Instantánea calculada en las zonas geofísicamente más activas que presentan, por ello, un fuerte gradiente gravimétrico

superficial. También es un dato muy útil a la hora de calibrar o mejor dicho de comprobar hasta qué punto el cálculo realizado del Nivel Instantáneo es o se ajusta a la realidad, ya que la diferencia entre este valor y el Nivel Medio puede llegar a sobrepasar 1 m, pero generalmente debe ser mucho menor que esto [5].

En la Figura 4 puede observarse la existencia de un fuerte gradiente en el Nivel Medio que pasa de 25 m sobre el Elipsoide en latitud 25°, hasta los 65 m que se alcanzan en latitud 50°. En longitud no se detecta una variación del mismo orden. Lo anterior puede interpretarse relacionado con las estructuras geofísicas de la zona y los mecanismos de interacción de las placas euroasiática y africana a lo largo de la falla Azores - Gibraltar.

**AGRADECIMIENTOS:** Los autores agradecen al programa de acciones integradas su apoyo a través de la acción 182B, a la Agencia AVISO la información facilitada sobre las observaciones del satélite TOPEX, a la Agencia Espacial Europea la información sobre el satélite ERS-2 dentro del programa A02.E101.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1]- Saastamoinen, J., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, Geophys. Monogr., 15, American Geophysical Union, Washington D.C.
- [2]- Llewellyn, S.K. and R.B. Bent, 1973: Documentation and Description of the Bent ionospheric model, AFCRL-TR-73-0657.
- [3]- Gaspar, P., and F. Ogor, Estimation and analysis of the sea state bias of the ERS-1 altimeter. Report of task B1-B2 of IFREMER contract N° 94/2.426016/C, September, 1994.
- [4]- Le Provost, C., M.L. Genco, F. Lyard, P. Vincent and P. Canceil, 1994: Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamical model. J. Geophys. Res., vol. 99, pp. 24777-24797.
- [5]- David T. Pugh. Natural Environment Research Council, Swindon, UK. Tides, Surges and Mean Sea-Level.
- [6]- ESA. CERSAT. Altimeter & Microwave Radiometer ERS products. User Manual.