

Incremento de la longitud de las series temporales de los satélites altimétricos mediante técnicas de extrapolación en la costa mediterránea peninsular.

Increasing the length of the time series from altimetry satellites by means of extrapolation. The case of the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula.

P. Fraile-Jurado¹, R. S. Ribeiro² y E. Ariza-Solé²

¹ Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla, Universidad de Sevilla 41004. pfraile@us.es

² Dpto. Geografía Universidad Autónoma de Barcelona Bellaterra Barcelona 08193. raphaoceano@gmail.com

Resumen: Las series temporales de los satélites altimétricos son, con las de los mareógrafos, una de las dos fuentes principales de información sobre la evolución del nivel del mar. Sus principales ventajas sobre las series de los mareógrafos estriban en que permiten acceder a información espacialmente continua, en registrar cambios absolutos, y en una contrastada precisión. Algunos problemas anteriormente existentes en áreas costeras, como el problema del píxel mixto o aparentes errores en la calibración, han sido superados, o filtrados por la principal fuente de información de este tipo de registros, el Sea Level Research Group de la Universidad de Colorado. Sin embargo, el problema de la escasa duración de las series temporales (empezaron a funcionar en julio de 1992) no ha sido aún resuelto. En este trabajo se propone una metodología que permite alargar la serie hacia el pasado basándose en un análisis de correlación múltiple con datos procedentes de los registros de los mareógrafos, existentes desde décadas antes del lanzamiento de los satélites. Los resultados obtenidos indican que con cierto margen de error es posible interpretar la evolución del nivel del mar en cada celdilla de los satélites altimétricos desde los años 40 en el caso del litoral mediterráneo peninsular.

Palabras clave: subida del nivel del mar, satélites altimétricos, Topex – Poseidon, mareógrafos, regresión lineal.

Abstract: *The time series of the altimetric satellites are of the two main sources of information on the evolution of the level of the sea. Its main advantages over the series of tide gauges are that they allow access to information spatially continuous, recording absolute changes. Some problems previously encountered in coastal areas, such as the mixed pixel problem or apparent calibration errors, have been overcome or filtered by the University of Colorado's Sea Level Research Group's main source of information. However, the problem of the short duration of the time series (which began to operate in July 1992) has not yet been solved. This paper proposes a methodology that allows extending the series to the past based on a multiple correlation analysis with data from the records of the gauges, which had existed for decades before the launch of the satellites. The obtained results indicate that it is possible to interpret the evolution of sea level in each cell of the altimetric satellites since the 1940s in the case of the peninsular Mediterranean littoral.*

Key words: *sea level rise, altimetry, Topex-Poseidon, tide gauges, lineal regression.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales elementos para la valoración de los riesgos costeros es la identificación de los cambios del nivel medio del mar. Los cuatro efectos principales de la subida del nivel del mar (inundación episódica, inundación permanente por pleamar, salinización de aguas dulces y erosión costera) dependen directamente de la posición del nivel medio del mar. La mayoría de los análisis de riesgos costeros dependen de la consideración de esta variable, junto con otras (oleaje, temporales...), como punto de partida para identificar los elementos afectados.

Existen dos fuentes esenciales de datos para el análisis de las tendencias y posiciones del nivel del mar en el pasado: los mareógrafos y los satélites altimétricos. Cada uno de los cuales presentan una grave carencia que a menudo dificulta análisis exhaustivos. Los registros procedentes de los mareógrafos pueden ser muy largos, pero su discontinuidad espacial a veces es extrema. Por

ejemplo, en el Mediterráneo peninsular español únicamente la serie temporal del mareógrafo de Málaga ha medido el nivel del mar ininterrumpidamente desde los años 60 del siglo XX hasta el presente (Iglesias-Campos et al., 2010). De este modo, es difícil tener información de cierta fiabilidad sobre la evolución del comportamiento del nivel del mar en la costa catalana, por ejemplo. Los registros procedentes de los satélites altimétricos presentan una gran continuidad espacial, permitiendo análisis con una resolución espacial aproximada de 1° en estas latitudes. Sin embargo, sus registros comienzan en diciembre de 1992, por lo que su utilidad para realizar análisis temporales es limitada. Si bien cada vez son más comunes los análisis de tendencias a partir de estos registros (que en 2017 llegarán a una duración de 25 años), seguirán sin poder ofrecer información sobre el comportamiento del nivel medio del mar con anterioridad a 1992.

Son frecuentes las aportaciones realizadas con la intención de comparar el comportamiento de las series

de los mareógrafos y de los satélites. Durante los primeros años tras el lanzamiento de los satélites altimétricos Topex Poseidon y la serie de satélites Jason, estos trabajos trataban de dar validez a los alarmantes registros que identificaban, con cierta discusión en la comunidad científica (Cazenave et al. 1999; Pfeffer y Allemand, 2016). Una vez aceptada su validez como herramienta de medición de los cambios del nivel del mar, diferentes estudios han comparados los registros de ambas fuentes de información con la intención de validar las tendencias observadas en ambos. En este sentido, destaca el reciente trabajo de Bonaduce et al. (2016), en el que, a partir de un limitado número de mareógrafo (solo dos situados en las costas españolas), se ha identificado una tendencia de 2,45 mm / año en el conjunto del Mar Mediterráneo, así como se ha elaborado un mapa de tendencias para todo el mar.

El trabajo que se presenta en esta comunicación tiene como objetivo incrementar la longitud de las series temporales de satélites altimétricos que comenzaron a medir el nivel del mar en 1992 a partir del análisis de regresión lineal de los registros de los mareógrafos.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada es el litoral mediterráneo peninsular español. En esta zona, Fraile y Fernández (2016) han identificado mareógrafos con diferentes comportamientos del nivel medio del mar en cuanto a su tendencia. Los mareógrafos de Málaga (3,95 mm / año) (Fig. 1), Barcelona (6,6 mm / año, con series cortas) y Valencia (6,3 mm / año, con series cortas) mostraron fuertes tendencias de subida del nivel del mar. Sin embargo, los mareógrafos de Tarifa (Fig. 2), Algeciras, Alicante y Almería presentan tendencias nulas o no significativas estadísticamente.

DATOS

Los datos empleados para el análisis propuesto proceden de mareógrafos y de satélites altimétricos. Para los datos de estos últimos, se obtuvieron los registros del ámbito costero mediterráneo peninsular español de los satélites altimétricos Topex-Poseidon y la serie de satélites Jason. Los registros de estos satélites proporcionan entre dos y tres registros del nivel del mar para cada mes. Han sido obtenidos en el repositorio público de la Universidad de Colorado.

Los registros de los mareógrafos proceden del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), institución que recolecta, analiza y filtra series de datos procedentes de diferentes instituciones nacionales. Se obtuvieron todas las series mensuales de los mareógrafos de Tarifa, Algeciras, Málaga, Motril, Almería, Gandía, Sagunto, Valencia, Gandía y Barcelona. No obstante, de los mareógrafos analizados únicamente los de Tarifa, Algeciras, Málaga, Almería y

Valencia comenzaban mucho antes de 1992, presentando además cierta continuidad. Se descartó el uso de los registros del mareógrafo de Alicante por la observación de importantes discontinuidades en su serie temporal.

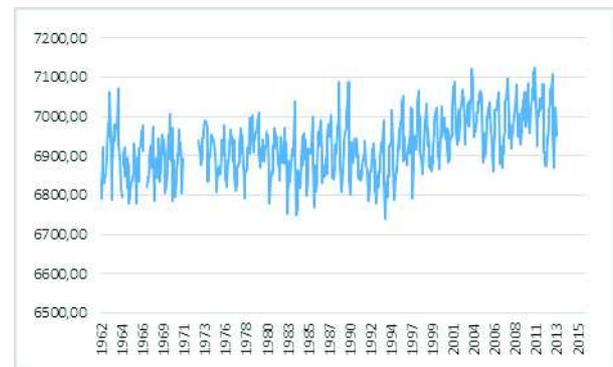


FIGURA 1. Niveles medios del mar mensuales en el mareógrafo de Málaga.

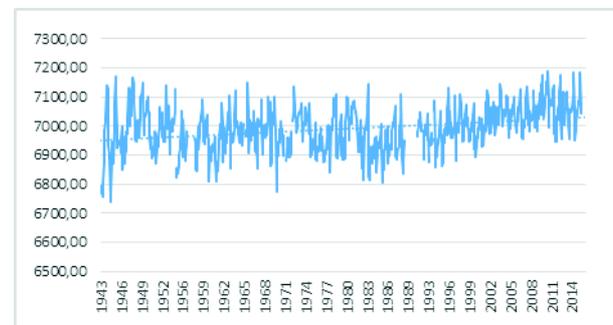


FIGURA 2. Niveles medios del mar mensuales en el mareógrafo de Tarifa.

MÉTODOS

Se elaboró una matriz de correlaciones entre las diferentes series de niveles del mar, obteniendo el valor del coeficiente de correlación de Pearson sobre las diferentes series de registros de los mareógrafos y satélites altimétricos. A partir de las relaciones en las que se identificaron valores estadísticamente significativos, se elaboraron diferentes modelos de regresión lineal simple y múltiple tomando como variable dependiente los registros de los satélites y como variables independientes los diferentes registros de los mareógrafos. Al observar que los valores obtenidos del coeficiente de determinación eran semejantes en los análisis simple y múltiple, se eligió el análisis de regresión lineal simple como método único para la reconstrucción del pasado de los registros de los satélites, puesto que se observó que los análisis múltiples no siempre permitían pronosticar nuevos valores extrapolados, al identificarse frecuentes lagunas aun en las series de mareógrafos de mayor calidad. Los mejores modelos coincidieron únicamente con los registros de los mareógrafos de Tarifa y de Cádiz (Tabla I).

Latitud / Longitud	Mareógrafo 1	Mareógrafo 2	Mareógrafo 3
36 / -5 r^2	Barcelona 0,482	Málaga 0,437	Tarifa 0,496
36 / -4 r^2	Málaga 0,467	Tarifa 0,510	
36 / -3 r^2	Málaga 0,504	Tarifa 0,521	
36 / -2 r^2	Tarifa 0,441	Málaga 0,434	Gandía 0,651
37 / -1 r^2	Barcelona 0,321	Tarifa 0,368	
38 / 0 r^2	Almería 0,364	Tarifa 2 0,371	
39 / 1 r^2	Tarifa 0,354	Almería 2 0,279	
40 / 1 r^2	Málaga 0,327	Tarifa 0,413	
41 / 2 r^2	Tarifa 0,393	Barcelona 0,323	Málaga 0,306
42 / 4 r^2	Barcelona 0,521	Málaga 0,394	Tarifa 0,485

TABLA I. Mejores coeficientes de determinación significativos obtenidos en el análisis de correlación entre cada celdilla de satélite y cada registro de mareógrafo.

A partir de cada uno de los modelos de regresión lineal simple realizados para cada celdilla de los registros de los satélites se procedió a extrapolar hacia el pasado los registros de dichas series, alargándolas hasta principios de la década de los 40 del siglo XX.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos consisten en nuevas series temporales que comienzan entre octubre de 1943 y enero de 1944. Aparecen en las figuras 3 y 4 (no obstante, se obtuvieron resultados para las 10 celdillas analizadas, que no se muestran por motivos de espacio). Se evidencia una mayor variabilidad en los registros directos de los satélites altimétricos que en los valores extrapolados. Asimismo, todos los valores extrapolados aparentan mostrar una ausencia de tendencia, que contrasta fuertemente con los valores registrados por los satélites.

Es evidente que es preciso analizar con suma cautela los resultados obtenidos. En primer lugar, la simple observación de los registros denota una evidente mayor variabilidad en los registros de los satélites que en los valores extrapolados. Este fenómeno se debe a las características de ambos tipos de sensores, al presentar los mareógrafos registros filtrados durante el período completo de un mes, mientras los datos de los satélites proceden de la media de dos o tres valores instantáneos a lo largo de un mes. Este fenómeno ha

sido identificado en la bibliografía existente (Fraile Jurado, 2011; Ablain et al., 2015).

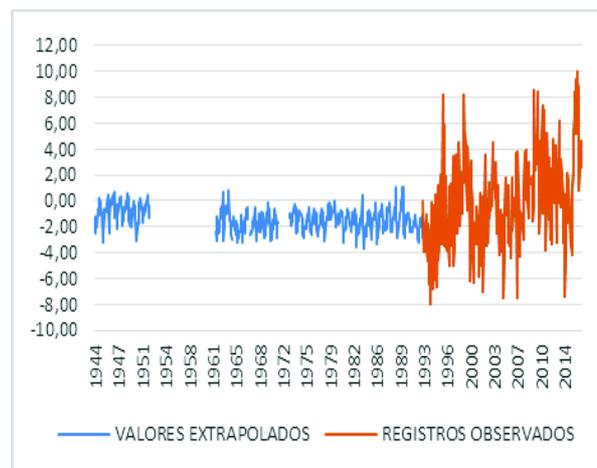


FIGURA 3. Resultados obtenidos para 40°N 1°E.

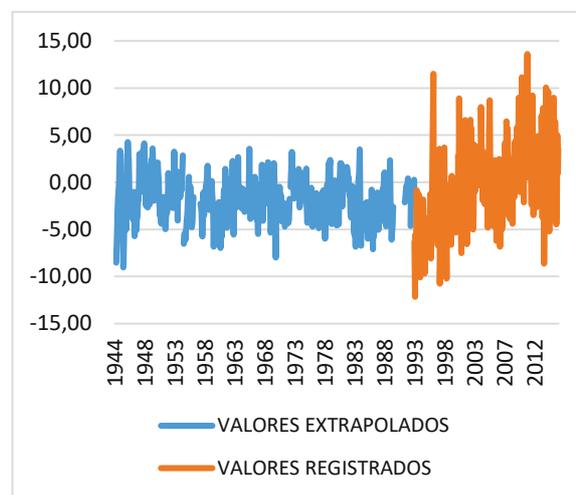


FIGURA 4. Resultados obtenidos para 36°N 1°W.

Resulta más llamativa la aparente ausencia de tendencia en los valores extrapolados. Este fenómeno no se debe interpretar como una consecuencia del método empleado. Las tendencias observadas en los mareógrafos analizados están incluidas en los modelos de regresión elaborados, por lo que cabría esperar que el modelo elaborado las incorporase. Observando las series temporales de los mareógrafos de Málaga o de Tarifa (Fig. 1 y Fig. 2), es posible identificar cómo la tendencia de la primera parte de la serie (anterior a 1992) es nula en ambos (-0,3 mm / año en Tarifa, -0,2 mm / año en Málaga), por lo que los resultados obtenidos no invalidan, en principio, el método propuesto.

Una cuestión a resolver es la de hasta qué punto se están tomando literalmente las tendencias observadas en los mareógrafos analizados. Puesto que los resultados se han obtenido precisamente a partir de registros con tendencia nula o negativa en el periodo de predicción, no es posible responder a esta cuestión con los datos empleados. Sin embargo, es esperable que en

el futuro, empleando series de datos más amplias o bien métodos de extrapolación múltiple en los que la ausencia de registros de una de las variables no penalice el resultado final, pueda solventarse esta cuestión.

CONCLUSIONES

El método propuesto permite extender hacia el pasado los registros de los niveles medios del mar registrados en las diferentes celdillas de los satélites altimétricos. Al poseer una mayor variabilidad los registros de los mareógrafos, análisis elaborados trasladan estas diferencias a los resultados obtenidos.

Es preciso profundizar en esta línea metodológica incorporando registros de otros territorios así como empleando propuestas metodológicas alternativas.

La utilidad de los resultados obtenidos reside en poder identificar posiciones altas y bajas del nivel del mar, encontrando potenciales eventos adversos en los picos más altos de nivel del mar. Será necesario correlacionar esta nueva base de datos con análisis de erosión, evolución de dunas, oleaje, etc para poder interpretar adecuadamente la evolución de la vulnerabilidad costera.

REFERENCIAS

- Ablain, M., Cazenave, A., Larnicol, G., Balmaseda, M., Cipollini, P., Faugère, Y y Andersen, O. (2015): Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Science*, 11(1), 67-82.
- Bonaduce, A., Pinardi, N., Oddo, P., Spada, G., y Larnicol, G. (2016): Sea-level variability in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauges. *Climate Dynamics*, 47(9-10), 2851-2866.
- Cazenave, A., Doinh, K., Ponchaut, F., Soudarin, L., Cretaux, J. F., y Le Provost, C. (1999): Sea level changes from Topex-Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS. *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2077-2080.
- Fraile Jurado, P. (2011); *Análisis de las problemáticas asociadas a la espacialización, evolución y representación de niveles del Mar presentes y Futuros en Andalucía*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Fraile Jurado, P. y Fernández Díaz, M. (2016): Escenarios de subida del nivel medio del mar en los mareógrafos de las costas peninsulares de España en el año 2100. *Estudios Geográficos*, 77(280), 57-79.
- Fraile Jurado, P., Sánchez Rodríguez, E., Fernández Díaz, M., López Torres J. M., y Pita López, M. F. (2014): Estimación del comportamiento futuro del nivel del mar en las Islas Canarias a partir del análisis de registros recientes. *Geographicalia*, (66), 79-98.
- Iglesias-Campos, A., Simon-Colina, A., Fraile-Jurado, P., y Hodgson, N. (2010): *Methods for assessing*

current and future coastal vulnerability to climate change. Copenhagen, Dinamarca, ETC/ACC Technical Paper, Bilthoven, the Netherlands: European Topic Centre on Air and Climate Change.

Pfeffer, J., y Allemand, P. (2016): The key role of vertical land motions in coastal sea level variations: a global synthesis of multisatellite altimetry, tide gauge data and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 439, 39-47.