

## Tendencias climáticas de las amplitudes y fases mareales de las observaciones de los mareógrafos en la costa española

Cobos, Manuel<sup>a</sup>; Serrano, María de los Ángeles<sup>a</sup>; Marcos, Marta<sup>b</sup>; Pérez-Gómez, Begoña<sup>c</sup>; Díez-Minguito, Manuel<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía. Universidad de Granada. Avda. Del Mediterráneo s/n, 18006, Granada, España ([mcobosb@ugr.es](mailto:mcobosb@ugr.es), [mserranog@ugr.es](mailto:mserranog@ugr.es), [mdiezm@ugr.es](mailto:mdiezm@ugr.es)). <sup>b</sup>Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados. Universidad de las Islas Baleares y Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Esporles, Mallorca, España ([marta.marcos@uib.es](mailto:marta.marcos@uib.es)). <sup>c</sup>Área de Medio Físico, Puertos del Estado, Avda. del Partenón 10, 28042. Madrid, España ([bego@puertos.es](mailto:bego@puertos.es)).

---

### Resumen

*Este estudio analiza la variabilidad temporal (interanual, anual y a largo plazo) de la amplitud y fase de la M2 a lo largo de la costa española. El análisis se constituye de tres partes: la selección de mareógrafos, el análisis armónico de corto periodo y el análisis espectral, estadístico simple y de tendencias. Los resultados reflejan la importancia de considerar la variabilidad intra-anual de la amplitud y fase de la M2. El orden de magnitud de esta variabilidad es superior al obtenido para el incremento del nivel medio del mar. Además, se ha observado una dependencia de la amplitud con la morfología local que concuerda con la observada en la literatura a lo largo del globo. Concretamente, en el litoral español se observa una tendencia negativa de la amplitud de la M2, más acusada en la desembocadura de los estuarios, y positiva dentro de ellos.*

**Palabras clave:** *constituyentes mareales, tendencias, densidad espectral de potencia*

### 1. Introducción

El nivel del mar asociado a la marea astronómica ha sido tratado como determinista puesto que se conoce con precisión el movimiento relativo de los astros y los esfuerzos que generan sobre la masa de agua en la Tierra. Sin embargo, varios estudios recientes apuntan a que las amplitudes y fases mareales presentan la influencia de otros procesos no relacionados con el potencial generador de mareas (Dronkers, 2005). En este sentido, son diversos los estudios que observan la influencia de los cambios relativos al nivel del mar, cambio en las condiciones de resonancia, cambios en la estratificación de la columna de agua o dependencia con la estructura de la columna de agua, entre otros (Devlin et al., 2017; Talke y Jay, 2019).

La relevancia de estudiar la variabilidad de las constituyentes armónicas de la marea ha sido manifestado por numerosos autores que inciden en la valoración del riesgo de inundación en el contexto actual de cambio climático (p.e., Barbosa et al. (2008); Hill (2016)). Sin embargo, a pesar de notables excepciones, ha recibido mucha menos atención un análisis sistemático de las tendencias de las constituyentes que el estudio de las tendencias del nivel medio del mar.

Por este motivo, en el presente estudio se analiza la variabilidad temporal de la amplitud de la M2 obtenida mediante el análisis armónico de las series de elevaciones en diferentes mareógrafos a lo largo de la costa española. Para ello, en la sección 2 se detalla la metodología utilizada y se muestra el área de estudio. En la sección 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la M2. La sección 4 presenta las conclusiones generales del estudio.

### 2. Metodología

La metodología consta de tres partes (figura 1). En la primera parte se seleccionan las series temporales de elevaciones que cumplen unos determinados criterios de adecuabilidad. En segundo lugar se realiza un análisis armónico de periodo corto a la serie de elevaciones obteniendo una nueva serie, en este caso, de amplitudes y fases de cada una de las constituyentes armónicas de la marea. Por último, se analiza la variabilidad temporal (semianual y anual, fundamentalmente) a partir de un análisis espectral de la series de amplitudes y un análisis estadístico simple.

Finalmente, se calcula la tendencia a lo largo de plazo y se verifica su significancia estadística con dos tests complementarios.

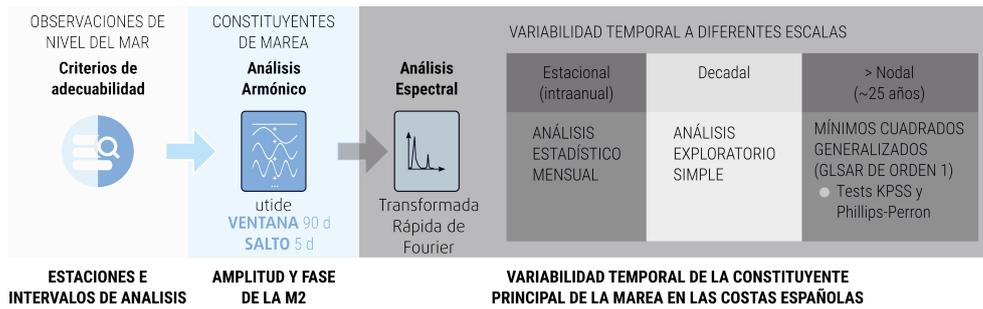


Fig. 1. Esquema de la metodología empleada.

## 2.1. Área de estudio y criterios de adecuación de las series temporales

Se han utilizado las series temporales del nivel del mar proporcionadas por Puertos del Estado, PdE, y el Instituto de Oceanografía Español, IEO (figura 2). Estas series tienen un periodo de muestreo que oscila de 1 a 5 minutos y cubren todo el litoral español (Pérez-Gómez, 2014).

En primer lugar, se han identificado aquellas series temporales cuyo registro excede 18,6 años (un ciclo nodal) y donde el porcentaje de huecos es inferior al 15%. Algunos de los mareógrafos más recientes de PdE no se han utilizado (puntos sólidos en negro, figura 1). Ningún mareógrafo presentó un porcentaje de huecos global superior al 15%, si bien fue preciso eliminar algunos periodos concretos, p.e. en la serie de Algericas del IEO.

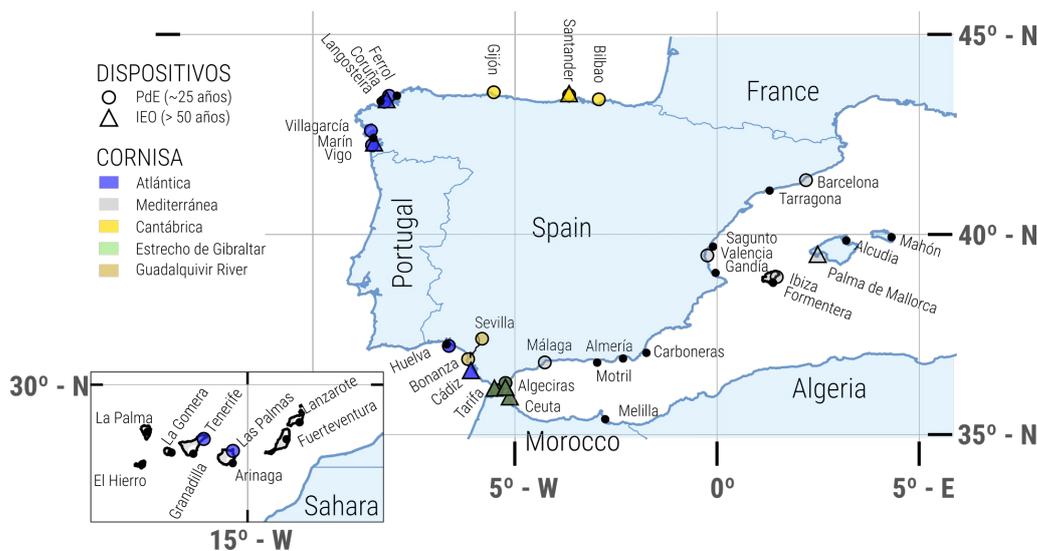


Fig. 2. Área de estudio y localización de los mareógrafos. Los círculos indican las posiciones de los mareógrafos de Puertos del Estado y los triángulos indican los mareógrafos del Instituto Español de Oceanografía. Las series temporales marcadas con puntos negros tiene una muestra inferior al ciclo nodal.

## 2.2. Análisis armónico de corto periodo con Utide

A las series temporales de elevaciones se les ha realizado un análisis armónico de corto periodo cada 5 días con una ventana móvil de 90 días. Con el salto de 5 días garantizamos un tamaño de muestra suficiente para realizar un análisis intraanual (incluso mensual) (Gräwe et al, 2014). Con la ventana de 90 días se garantiza que se separan adecuadamente las componentes semidiurnas y diurnas del análisis armónico. Con el objeto de no tener que remuestrear o interpolar la serie de elevaciones y añadir bias o error al resultado, se ha utilizado el análisis armónico Utide (Códiga, 2011). Esta función permite el análisis de una serie temporal con huecos.

El resultado es una serie temporal para cada una de las constituyentes armónicas de la marea, por su relevancia en la costa española, se han elegido la M2, N2, S2, K1, O1 y M4. En este trabajo se muestran los resultados de la amplitud de la M2 (figura 3).

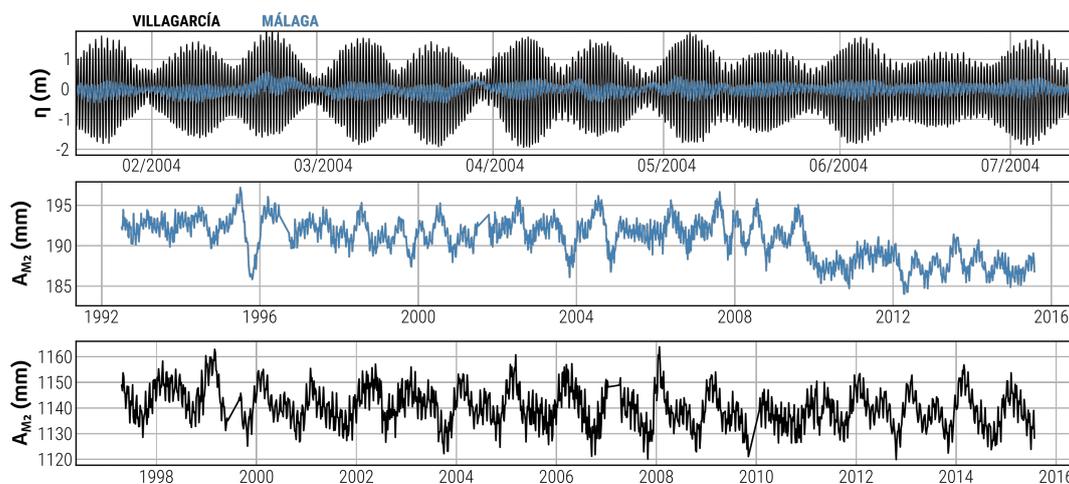


Fig. 3. Series temporales de nivel (panel superior) y de la amplitud de la componente M2 en Málaga (panel central) y Villagarcía (panel inferior).

### 2.3. Variabilidad temporal

El análisis de la variabilidad temporal consta de dos partes: (1) la detección de los patrones o ciclos de variabilidad principal y (2) el análisis de los cambios de amplitud en esos ciclos.

Para la primera parte, se ha realizado un análisis espectral de las series de amplitudes. Del análisis espectral se han determinado las frecuencias significativas. Estas se identifican porque superan la energía de una señal de ruido rojo en su misma banda espectral (el intervalo de confianza seleccionado es del 95%) (Torrence and Compo, 1998). Se han detectado oscilaciones de periodo quincenal, mensual, semianual y anual.

En la segunda parte hay que separar el análisis intranual del análisis de largo periodo. En el primer caso se ha realizado una análisis estadístico de la serie de amplitudes por meses, calculándose la media y la desviación típica. En el segundo caso, se ha calculado la tendencia lineal y la banda de confianza al 95% de la serie a través del método de mínimos cuadrados generalizados con carácter autoregresivo de orden 1 (Barbosa et al., 2008) y se ha verificado que la serie sigue una tendencia estacionaria a través de los tests de significancia estadística Augmented Dickey-Fuller (ADF) y KPSS (Dickey and Fuller, 1979; Kwiatkowski et al., 1992).

## 3. Resultados

En la figura 4 se observan los análisis armónicos de las amplitudes de la M2 en las diferentes cornisas del litoral español. En todos los paneles se observan unas líneas (o bandas) verticales que reflejan las frecuencias de oscilaciones anuales, semianuales, mensuales y quincenales (de izquierda a derecha en color gris oscuro, gris claro, azul y agua marina, respectivamente). Los puntos indican frecuencias significativas.

Como se observa en la figura 4, el régimen más irregular de amplitud de M2 lo presentan las estaciones del Mediterráneo. Esto era de esperar puesto que el régimen de mareas en esa región es diurno. Como se aprecia, la señal se asemeja a la señal de ruido rojo, por lo que no se espera que ninguna frecuencia sea significativa. El resto de paneles si muestra una marcada variabilidad quincenal y mensual. Se observan oscilaciones anuales en las regiones cantábricas y atlánticas, y no en el estrecho y el mar de Alborán donde el régimen de mareas es mixto (véase como las estaciones de Tarifa y Bonanza no muestran estas frecuencias significativas). Tan sólo la cornisa cantábrica muestra una componente semianual significativa.

Puesto que se observan oscilaciones intraanuales en algunas cornisas, se procede al análisis estadístico de la serie de amplitudes. En la figura 5 se muestra el valor medio mensual, la mediana, los cuantiles 1 y 3 y la banda de confianza al 95% de la series temporales de amplitudes de la M2 en estaciones de las cinco cornisas. Se observan las oscilaciones detectadas en el análisis espectral. En la vertiente atlántica (p.e. la estación de Tenerife) la oscilación anual de la M2 es

clara, con el máximo en enero y una amplitud aproximada de 16 mm. En el caso de Bilbao (vertiente cantábrica), la amplitud es de 15 mm, aproximadamente, encontrándose el máximo en enero y el mínimo en octubre. En el resto de las estaciones la oscilación no es tan clara, sin embargo se puede inferir una oscilación de amplitud aproximadamente igual a 10 mm.

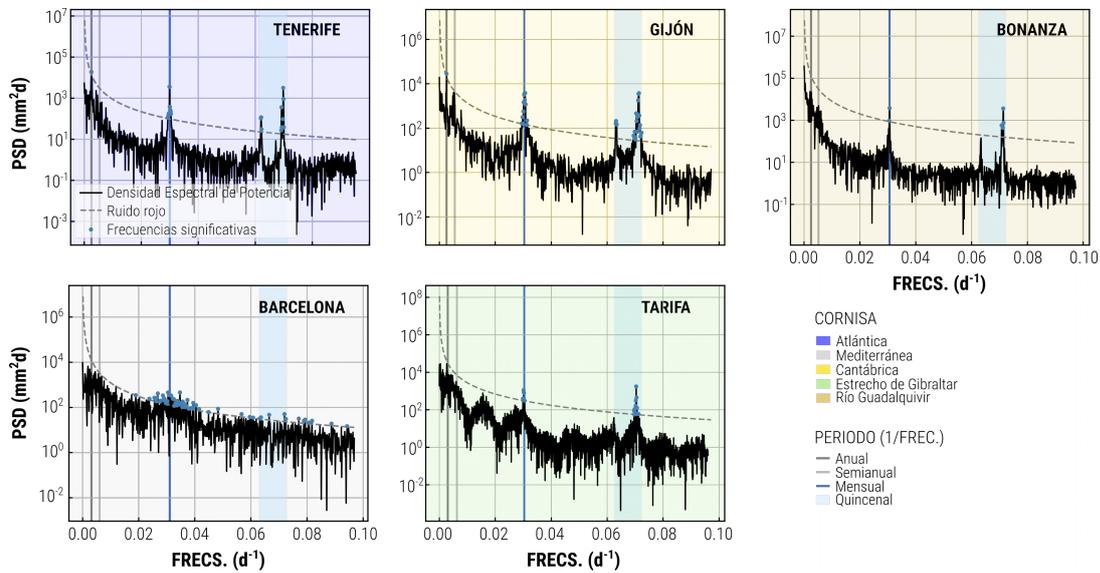


Fig. 4. Análisis espectral de las series temporales de amplitudes ( $M_2$ ) en las diferentes cornisas del litoral español. Las variaciones anuales, semianuales, mensuales y quincenales se han marcado con una línea o franja vertical para su mejor visualización.

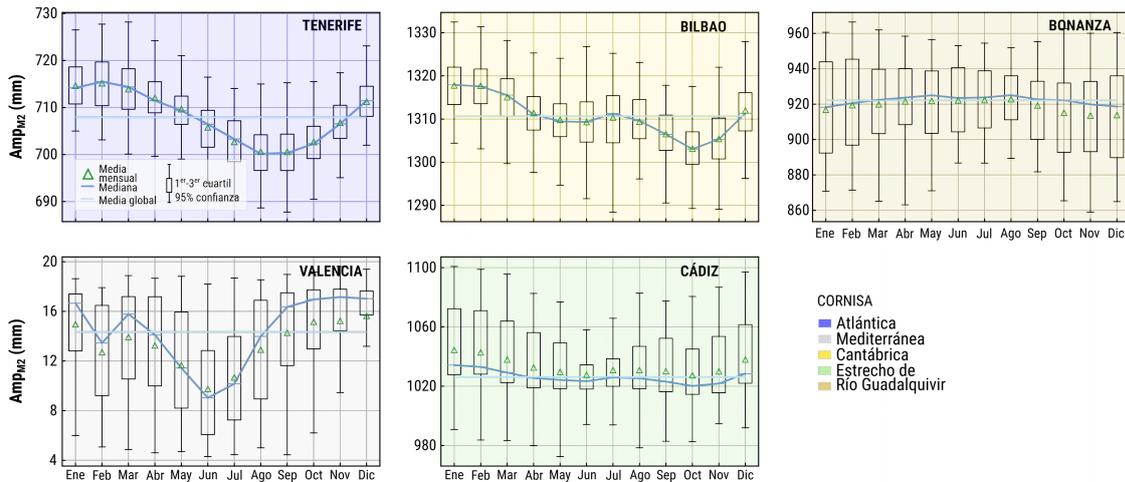


Fig. 5. Variabilidad anual y semianual de la amplitud ( $M_2$ ) en las diferentes cornisas del litoral español.

En la figura 6, se observan las tendencias de las amplitudes de tres estaciones de Puertos del Estado antes y después del cambio de instrumentación (línea punteada en negro: sensor acústico y línea punteada en azul: sensor radar). Como se observa la tendencia es coherente antes y después del cambio de tecnología. En esta figura se observa tanto la tendencia a largo plazo como las oscilaciones de periodo más corto identificadas previamente. Como ya apuntaban diversos estudios, se observa una clara tendencia (Woodworth, 2010). En las estaciones de Villagarcía y Vigo, las tendencias son negativas ( $-0,35 \pm 0,10$  mm/año y  $-1,28 \pm 0,07$  mm/año, respectivamente), mientras que en Huelva es positiva ( $0,32 \pm 0,09$  mm/año).

En la figura 7 se observa la tendencia de las amplitudes de las estaciones de Puertos del Estado a excepción de Bonanza y Sevilla. Las amplitudes semidiurnas decrecen en el Golfo de Cádiz  $-0,07 \pm 0,03$  mm/año, (excepto en la estación de Huelva y Sevilla, las cuales se encuentra dentro de sus respectivos estuarios), el Estrecho de Gibraltar y el mar Mediterráneo. La mayor tendencia negativa se encuentra en la desembocadura del estuario del río Guadalquivir, en Bonanza, donde se alcanza el valor de  $-2,84 \pm 0,05$  mm/año. Las tendencias decrecen en las estaciones del golfo de

Vizcaya ( $-0.13 \pm 0.03$  mm/año). En Santander se observan valores positivos  $0.05 \pm 0.04$  mm/año, aunque la barra de error es de la misma magnitud. En las rías de Galicia el comportamiento es algo más irregular, lo que sugiere una dependencia fuerte con la morfología o particularidades de la hidrodinámica local. La estación de Vigo muestra una tendencia significativa de  $-1.28$  mm/año mientras que en la Coruña se observa un crecimiento consistente de  $0.38$  mm/año. Las tendencias obtenidas en este análisis concuerdan con las obtenidas por Pérez-Gómez (2014).

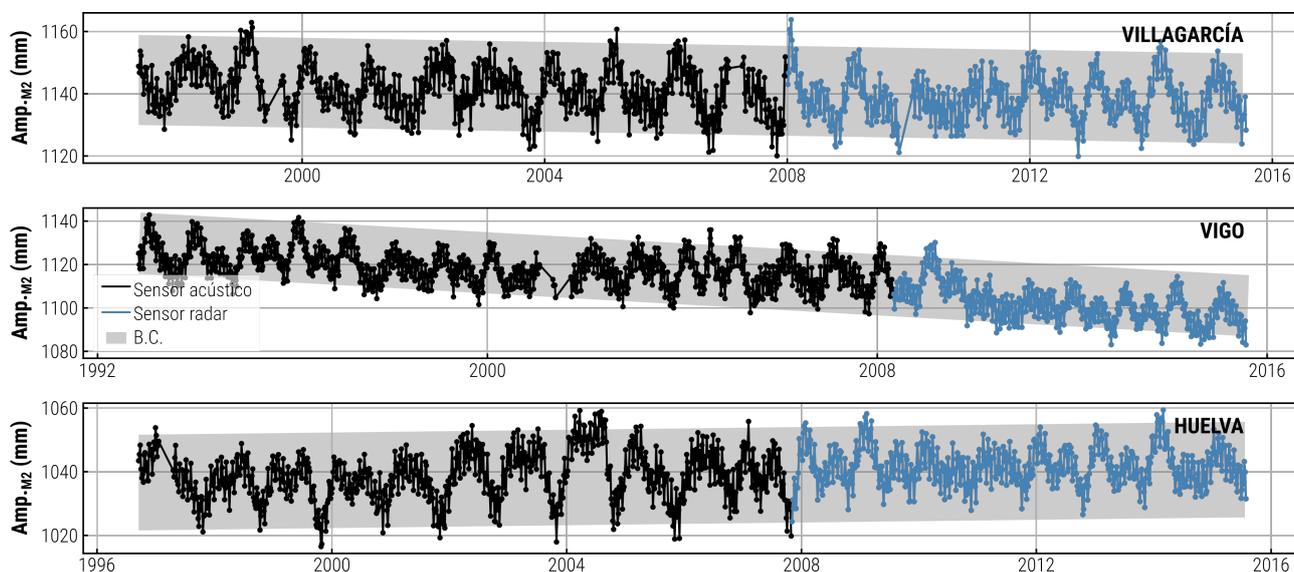


Fig. 6. Tendencia y bandas de confianza (95%) de algunas series temporales de amplitudes (M2). La tendencia se obtuvo tanto para el periodo en el que las mediciones se realizaban con un sensor acústico (línea punteada en negro) como tras el cambio a radar (azul).

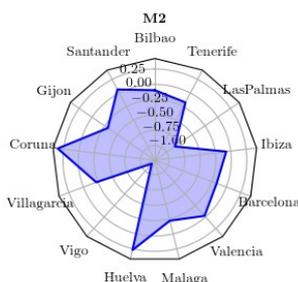


Fig. 7. Tendencias (en mm/año) de la amplitud de la M2 a lo largo del litoral español.

#### 4. Conclusiones

En cuanto a la variabilidad estacional/anual de la amplitud M2. El litoral español se puede dividir en tres sectores que se corresponden con las vertientes Atlántica/Cantábrica – Estrecho de Gibraltar – Mediterránea. En la cornisa Atlántica/Cantábrica se aprecia una variabilidad anual con un máximo en invierno y de amplitud aproximada de 10 mm/año. En el Estrecho de Gibraltar se observa una alta variabilidad mensual (80 mm) cuya media oscila en un ciclo anual de 8 mm/año amplitud y máximo en verano. En la vertiente Mediterránea la amplitud de la M2 es inferior a los 100 mm y no se observa una variabilidad anual o semianual clara.

En cuanto a la tendencia de la M2. En términos generales, las amplitudes de M2 muestran una tendencia negativa. Se observa una dependencia geográfica local. Los mareógrafos situados en la desembocadura de estuarios muestran un descenso más acusado que en general. Los mareógrafos situados dentro de estuarios muestran un ascenso.

La variabilidad estacional de la M2 es, en términos medios, un orden de magnitud superior al incremento del nivel medio del mar. Por lo tanto, se recomienda que se incluya la variabilidad temporal de la M2 en los modelos hidrodinámicos y de inundación, puesto que su concomitancia con eventos de tormenta podría dar lugar a eventos extremos de inundación costera.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido parcialmente financiado por el proyecto Multi-criteria analysis for Physical and biotic Risk Assessment in ESTUARIES (PIRATES) que forma parte del Programa Estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los RETOS de la sociedad (CTM2017-89531-R) y el proyecto SENSIBILIDAD Física y Biótica de los ESTUARIOS Peninsulares al Cambio Global (SENSES) del programa de Ayudas para la realización de proyectos en materia de adaptación al cambio climático de la Fundación Biodiversidad (PRCV00487). Los autores agradecen al Instituto Oceanográfico Español y a Puertos del Estado los registros de niveles del mar proporcionados sin los cuales no habría sido posible este estudio.

## Referencias

- CODIGA, D.L., 2011. Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions. *Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island Narragansett, RI*.
- DEVLIN, A. T., JAY, D. A., ZARON, E. D., TALKE, S. A., PAN, J., LIN, H. (2017). Tidal variability related to sea level variability in the pacific ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (122, 8445-8463).
- DICKEY, D.A., FULLER, W.A., 1979. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association* 74, 427–431.
- DRONKERS, J. (2005). Dynamics of coastal systems. *Advanced Series on Ocean Engineering*.
- KWIATKOWSKI, D., PHILLIPS, P.C., SCHMIDT, P., SHIN, Y., 1992. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of econometrics* 54, 159–178.
- PÉREZ-GÓMEZ, B. (2014). Design and implementation of an operational sea level monitoring and forecasting system for the Spanish coast. *Tesis doctoral. Universidad de Cantabria*. <<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5876>> [Consulta: 21 de enero 2019].
- TALKE, S.A., JAY, D.A., 2019. Changing tides: The role of natural and anthropogenic factors. *Annual review of marine science* 12.
- TORRENCE, C., & COMPO, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.