REDMAR

RED de MAReógrafos de Puertos del Estado

Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria

Puerto de Barcelona

(Datos registrados hasta **2017**)

Área de Medio Físico

27 de marzo de 2019

Dirección Técnica - **Puertos del Estado**

Índice

Página

1. Introducción **5**
1.1. Antecedentes de la REDMAR 6
1.2. La REDMAR en la actualidad. Proceso de renovación de estaciones. . . . 7
1.3. Construcción de la serie histórica a partir del mareógrafo antiguo y el nuevo 8

2. Series de nivel del mar **9**
2.1. Serie histórica de nivel del mar observado 9
2.2. Serie de bajamares observadas 9
2.3. Serie de pleamares observadas 9
2.4. Serie de mínimos observados 10
2.5. Serie de máximos observados 10
2.6. Serie de nivel horario observado 10
2.7. Serie de nivel medio mensual 10
2.8. Serie de carreras de marea observadas 10
2.9. Series de pleamares/bajamares astronómicas 10
2.10. Serie de nivel horario astronómico 11
2.11. Serie de residuos meteorológicos horarios 11

3. Descripción de los parámetros y análisis incluidos en este informe **11**
3.1. Establecimiento de puerto 12
3.2. Referencias de nivel del mar 12
3.3. Estadística de pleamares y bajamares 15
3.4. Componentes de nivel del mar 15
3.5. Régimen medio y percentiles 16
3.6. Históricos de extremos observados 16
3.7. Medias mensuales y tendencia 17

4. Tendencias anuales para toda la red **17**

5. Resumen de parámetros del puerto **23**
Construcción de la serie histórica 23
Ceros de las medidas 24
Referencias de nivel del mar 26
Componentes de nivel del mar 27
Régimen medio y percentiles 28
Históricos de extremos observados 30
Medias mensuales y tendencia 32

Referencias **33**

1. Introducción

Este informe presenta como producto de la RED de MAReógrafos de Puertos del Estado (REDMAR), un compendio único y fácilmente actualizable de varios parámetros derivados de las medidas registradas por los mareógrafos de la red, relacionados con la marea y el nivel del mar en los puertos, y de gran interés y aplicación tanto en la fase de diseño como durante la ejecución de obras o la explotación y planificación portuaria. Este informe está disponible en dos versiones: informe global para toda la REDMAR o bien informes individuales por puerto.

Los parámetros presentados se revisan y calculan cada cierto número de años, de forma que serán cada vez más robustos conforme crezca la longitud de las series históricas de nivel del mar disponibles.

Debido al carácter de los parámetros publicados, que requieren la disponibilidad de series históricas de cierta longitud, este informe sólo incluye los puertos con series histórí-

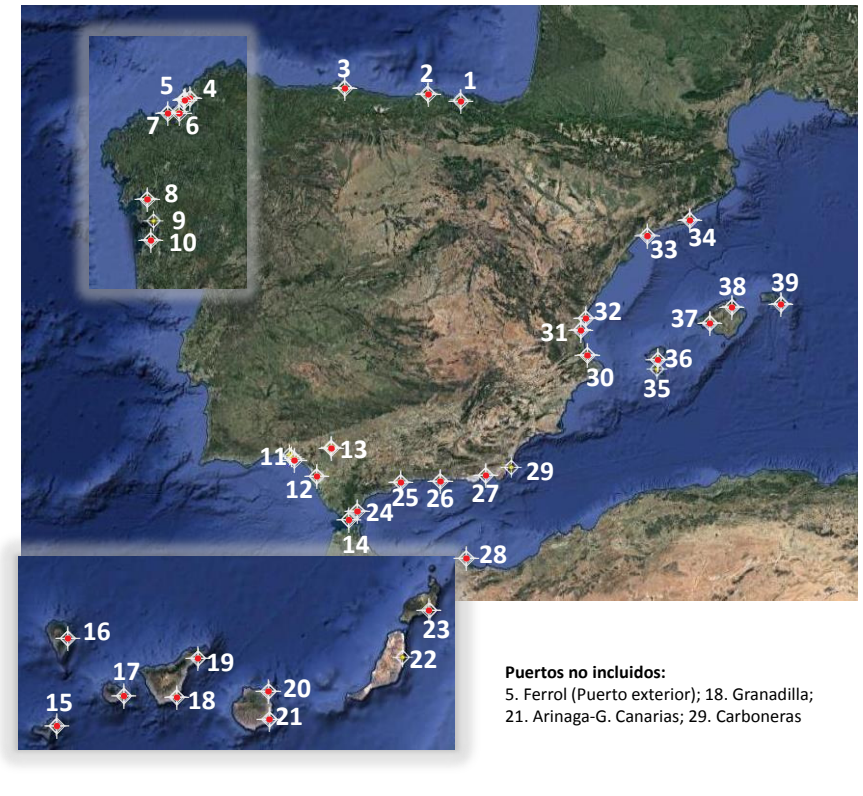


Figura a. Puertos con estaciones pertenecientes a la REDMAR. Los puertos con marca de posición roja están incluidos en este informe, por disponer de series históricas de, al menos, cinco años de datos, mientras que las marcas de posición amarillas corresponden a estaciones más recientes que se incluirán en próximas ediciones.

cas de nivel del mar de la REDMAR con un mínimo de 5 años de datos. En la **Figura a** se muestran los puertos incluidos en la presente edición. La información relevante de los datos de estaciones más recientes se publica en los informes anuales de la REDMAR.

1.1. Antecedentes de la REDMAR

La REDMAR surgió como respuesta a la necesidad de disponer de una red de medida de nivel del mar que permitiera la consulta del dato en tiempo real por parte de los usuarios del puerto y la generación de series largas de nivel del mar. Tras los estudios pertinentes para la selección de la tecnología más adecuada, la adquisición por parte de los puertos de los equipos correspondientes y la fase inicial de pruebas, en julio de 1992 comenzó el almacenamiento sistemático de los datos registrados por los primeros mareógrafos acústicos (SRD: *Sonar Research & Development*) instalados en 14 puertos del sistema portuario estatal. El Área de Medio Físico de Puertos del Estado gestiona el funcionamiento de la red y se encarga del control de calidad, proceso y almacenamiento de los datos en su Base de Datos, así como de la difusión de los datos e información derivada a través de la página web de Puertos del Estado (sistema Portus). Además, hoy en día los datos se difunden a través de dispositivos móviles también desde Puertos del Estado (aplicación IMAR) y se re-envían a centros internacionales de datos para variadas aplicaciones (alertas de nivel del mar y tsunamis, oceanografía operacional o estudios de cambio climático). Dentro de las aplicaciones de interés más inmediato para los puertos, se encuentra la utilización de los datos de nivel del mar en tiempo real para la realización de dragados o para la navegación en el interior de algunos puertos. Además, las series históricas que la red de mareógrafos proporciona, producto principal en el que se basa este informe, permiten afrontar los siguientes estudios:

- Realización de análisis extremales y regímenes medios que sirven de referencia a la hora de proyectar una obra en la costa.
- Seguimiento del cero del puerto o nivel de referencia.
- Obtención de constantes armónicas más precisas para la realización de las tablas de marea (o predicción de marea astronómica).
- Conocimiento de la componente meteorológica del nivel del mar en caso de tormenta.
- Estudio de la evolución del nivel medio del mar.
- Calibración de modelos numéricos de corrientes y mareas.
- Calibración de datos de altimetría espacial.

1.2. La REDMAR en la actualidad. Proceso de renovación de estaciones.

En 2001 surgió la necesidad de sustituir los equipos originalmente instalados, debido al anuncio del cese de su fabricación por parte del fabricante SRD. Además, fue necesario ampliar el número de estaciones entre 2001 y 2004, sin que todavía se hubiese decidido qué tipo de equipo sustituiría a los originales. Así, las estaciones incorporadas en esta etapa (Hierro, Granadilla, Arinaga, Fuerteventura, Ibiza, Huelva3 y Huelva4) se basaron en sensores de presión de Aanderaa, autocompensados de presión atmosférica. Estas estaciones se establecieron de manera provisional por su bajo coste, a pesar de las dificultades de mantenimiento y su baja precisión, mientras se buscaba el tipo de sensor definitivo.

Paralelamente, se emprendieron en 2002 los trabajos de intercomparación que permitirían decidir qué tipo de mareógrafo sustituiría a los SRD iniciales una vez llegaran el final de su vida útil. Esta intercomparación se realizó en Vilagarcía de Arousa y Almería y sus resultados estuvieron disponibles y publicados en 2005 [2]. Dos eventos determinaron los requerimientos de los futuros mareógrafos: el primero fue la aparición de mareógrafos de radar (en lugar de acústicos), más fiables y precisos que los sensores acústicos y de presión disponibles hasta la fecha, y que presentaban además la ventaja de que no necesitaban medir en el interior de un tubo (instalación y mantenimiento más fácil); el segundo, el tsunami de baja intensidad que afectó en 2003 a las Islas Baleares, cuya amplitud fue infraestimada por el intervalo de muestreo de 5 min de los mareógrafos de la REDMAR existentes en ese momento, y que planteó la necesidad de un intervalo de muestro inferior como un requisito fundamental para poder monitorizar fenómenos de alta frecuencia (tsunamis, "secas", resonancias o "rissagas"). Casualmente, el tsunami de 2004 en el Océano Índico, un año después, extendió este requisito a todas las redes de mareógrafos del mundo.

Como resultado de dichos experimentos se escogieron los mareógrafos MIROS basados en tecnología radar de barrido de frecuencias como los más indicados para los nuevos objetivos de la REDMAR. Este mareógrafo tiene alta precisión en las medidas individuales y permite seleccionar el intervalo de muestro (1 minuto o menor). Su intervalo de muestro original de 2Hz permite estimar además parámetros de oleaje y agitación. Aunque en la actualidad todos los mareógrafos de la REDMAR transmiten datos con intervalo de muestreo de 1 minuto, este informe, por estar centrado en las variaciones más lentas del nivel del mar, parte de los datos promediados cada 5 minutos.

El primer mareógrafo radar MIROS de la REDMAR se instaló en 2006 en el puerto de Almería. Desde entonces, de manera progresiva, se fueron reemplazando los equipos SRD y sensores de presión Aanderaa de la red original por estos nuevos equipos, que son los que componen la REDMAR en la actualidad. Desde 2007 se han incorporado además muchas nuevas estaciones basadas en el sensor MIROS, que han completado y mejorado enormemente la cobertura espacial de la red. Para garantizar la continuidad de

las series históricas, el proceso de renovación hizo necesario el funcionamiento simultáneo de la estación vieja y la nueva durante un periodo de al menos un año. Esto fue posible en casi todas las estaciones, salvo alguna excepción donde fue necesario desmantelar la vieja antes, debido a obras en el puerto, o donde el equipo viejo dejó de funcionar antes de completarse el año. Además, en varias ocasiones la renovación supuso en su día la reubicación de la nueva estación en otro muelle, lo que obligó a realizar una nivelación de alta precisión entre las dos ubicaciones (en colaboración con el Instituto Geográfico Nacional).

Actualmente la REDMAR está constituida por 37 estaciones dotadas de mareógrafos de radar MIROS (**Figura a**).

1.3. Construcción de la serie histórica a partir del mareógrafo antiguo y el nuevo

Uno de los retos más importantes de la renovación de la REDMAR entre 2006-2009 fue compatibilizar la mejora sustancial en la calidad del dato, la mejor monitorización de fenómenos de alta frecuencia y la inmediatez en la recepción del dato para sistemas de alerta, con el mantenimiento de una serie de nivel del mar histórica coherente y de calidad. Esto ha sido difícil porque el cambio de tecnología implica diferencias en la precisión de los datos y porque, además, el cambio de ubicación puede ocasionar diferencias adicionales entre estaciones dentro de un mismo puerto.

Por esta razón, se realizó un estudio de comparación exhaustivo para toda la red, a partir de los periodos de funcionamiento simultáneo entre las estaciones viejas y las nuevas [3]. Como resultado de ese estudio, se encontraron las fuentes de error o diferencias fundamentales y, según su impacto en los productos finales que se incluyen en este informe, se adoptaron decisiones a la hora de construir una única serie histórica de nivel del mar en cada puerto, combinando la información del equipo antiguo y el nuevo. En la presentación de los resultados para cada puerto, se describirá brevemente la composición de la serie histórica, así como los problemas de funcionamiento más relevantes detectados durante la inter-comparación. Algunos de los errores encontrados han sido corregidos gracias a este trabajo de inter-comparación.

Es importante destacar que las variaciones del nivel del mar de bajo periodo (especialmente la variación del nivel medio a lo largo de los años), son de muy pequeña magnitud (mm o cm por año) y, por tanto, muy sensibles a cualquier cambio, incidencia o problema temporal en la estación. Para garantizar mínimamente su fiabilidad es necesario disponer del mayor número de estaciones en una zona geográfica determinada e incluso utilizar información adicional como la proporcionada por los satélites o los modelos numéricos. Cada cierto número de años se puede realizar de esta forma un control de calidad exhaustivo que permita detectar los errores más sutiles, no detectados en los controles automáticos en tiempo real o en los controles anuales.

2. Series de nivel del mar

A continuación se describen las series a partir de las cuales se calculan los parámetros de nivel del mar presentados en este informe. Se diferencian principalmente dos grupos según el origen del dato: series construidas a partir de **niveles observados** o bien series construidas a partir de la **predicción de la marea astronómica**.

Las primeras, al ser observaciones del nivel del mar real, contienen información no sólo de la marea astronómica, sino también de otros efectos como la meteorología (acción de la presión atmosférica y el viento) o las variaciones en la densidad del agua. Las segundas son series teóricas y sólo incluyen la componente de variación de nivel del mar debida al efecto de la marea astronómica. De manera análoga, los parámetros extraídos de cada tipo de serie, reflejarán la información contenida en los datos de partida.

2.1. Serie histórica de nivel del mar observado

La serie histórica de nivel del mar observado contiene las medidas registradas por los mareógrafos de la REDMAR, una vez los datos brutos han pasado un control de calidad que principalmente depura errores, interpola datos erróneos y huecos de longitud menor a un intervalo prefijado [4]. La serie resultante es la serie de partida para todos los análisis posteriores y contiene datos cada 5 minutos exactamente. Este intervalo de muestreo es el más bajo de las series históricas de la REDMAR. Hoy en día, los nuevos mareógrafos proporcionan además, datos cada 2 Hz y cada minuto, incluyendo así información de fenómenos de alta frecuencia que no se contemplan en los análisis de este informe.

Si en el puerto se ha producido un cambio de mareógrafo, la serie histórica se construye a través de la consolidación de las series del mareógrafo original y el nuevo, como se explica en la sección *Construcción de la serie histórica* de cada puerto.

2.2. Serie de bajamares observadas

La serie de bajamares observadas contienen un registro del nivel del mar mínimo observado en una ventana temporal de 60 minutos en torno a la hora de cada una de las 2 bajamares diarias previstas. Consta por tanto de dos niveles por día y se obtiene a partir de la serie histórica de nivel del mar observado en los puertos con un rango mareal típico ampliamente superior a los 50 cm.

2.3. Serie de pleamares observadas

La serie de pleamares observadas contiene un registro del máximo nivel del mar observado en una ventana temporal de 60 minutos en torno a la hora de cada una de las 2 pleamares diarias previstas. Consta por tanto de dos niveles por día y se obtiene a partir de la serie histórica de nivel del mar observado en los puertos con un rango mareal típico ampliamente superior a los 50 cm.

2.4. Serie de mínimos observados

La serie de mínimos observados contiene un registro del mínimo nivel del mar registrado diariamente. Consta por tanto de un nivel por día y se obtiene a partir de la serie histórica de nivel del mar observado en los puertos con un rango mareal típico por debajo, aproximadamente, de los 50 cm.

2.5. Serie de máximos observados

La serie de máximos observados contiene un registro del nivel del mar máximo registrado diariamente. Consta por tanto de un nivel por día y se obtiene a partir de la serie histórica de nivel del mar observado en los puertos con un rango mareal típico por debajo, aproximadamente, de los 50 cm.

2.6. Serie de nivel horario observado

La serie de nivel horario observado se obtiene aplicando un filtro simétrico de 54 puntos a la serie histórica de nivel del mar observado [5]. Al eliminar la energía de frecuencias altas presente en los datos de 5 minutos, las constantes armónicas resultantes del análisis armónico de esta serie de datos horarios, no se ven perturbadas por esta energía.

2.7. Serie de nivel medio mensual

A partir de la serie de nivel horario observado, se calcula la serie de nivel medio diario eliminando las componentes diurna y semidiurna y aplicando a continuación un filtro de 119 puntos centrado en el mediodía [6]. Finalmente, la serie de niveles medios mensuales se calcula mediante la media aritmética de los niveles medios diarios del mes correspondiente, descartando el cálculo del nivel medio de un mes si hay más de 7 días sin datos.

2.8. Serie de carreras de marea observadas

La serie de carreras de marea observadas se construyen a partir de las diferencias entre pleamares y bajamares consecutivas. Esta serie contiene entonces 3 o 4 puntos por día y se obtiene a partir de la series de pleamares y bajamares observadas en los puertos con un rango mareal típico ampliamente superior a los 50 cm.

2.9. Series de pleamares/bajamares astronómicas

A partir de las constantes armónicas obtenidas del análisis armónico de, al menos, los últimos 5 años de la serie de nivel horario observado, se realiza una predicción de 19 años de la serie de pleamares y otra de la serie de bajamares. Con una serie de esta longitud, se incluyen los 18.6 años que dura el ciclo nodal de la Luna y por tanto se cubren en ella todas las amplitudes y fases de la marea astronómica. El período de predicción utilizado coincide con el definido por el Instituto Hidrográfico de la Marina: de 1990 a 2009.

2.10. Serie de nivel horario astronómico

A partir de las constantes armónicas obtenidas del análisis armónico de, al menos, los últimos 5 años de la serie de nivel horario observado, se realiza, para el mismo período de datos de la serie de nivel horario observado, una predicción de la serie de nivel horario.

2.11. Serie de residuos meteorológicos horarios

Series de variación del nivel del mar tras eliminar la marea astronómica. Se obtiene a partir de la diferencia entre la serie de nivel horario observado y la serie de nivel horario astronómico. Se suele llamar residuo o marea meteorológica porque está fundamentalmente asociada a la acción de la presión atmosférica y el viento. También contiene otros efectos como son las variaciones de densidad del agua (componente estérica) y, en definitiva, todos aquellos que no tienen una clara componente armónica asociada a un período determinado.

3. Descripción de los parámetros y análisis incluidos en este informe

En este informe se presenta un resumen de parámetros de nivel del mar referidos al cero REDMAR, que se consideran fundamentales para el diseño, ejecución de obras y la explotación portuaria. En los siguientes apartados, se describen los parámetros incluidos resultantes del análisis del nivel del mar registrado por los mareógrafos y del análisis de la predicción de la marea astronómica.

Antes de detallar la información presentada, conviene aclarar que el regimen de mareas a lo largo de la costa española es muy variado y, por tanto, no se puede realizar un tratamiento totalmente homogéneo de las series de la REDMAR. En puertos con un rango mareal del orden del metro o inferior (zona de Alborán y Mediterráneo), la contribución de la meteorología a la energía del nivel del mar observado es comparable a la de la marea astronómica, como podrá verse en la sección *Componentes de nivel del mar* de estos puertos. Bajo este tipo de regimen, es esperable que los máximos y mínimos niveles observados se desvíen ampliamente de los extremos de las predicciones astronómicas (máxima pleamar astronómica y mínima bajamar astronómica), pudiendo incluso producirse un máximo diario en el entorno temporal de una bajamar astronómica. En contraposición a esta situación, en puertos fuertemente dominados por la marea astronómica (zona Atlántica), la desviación de los extremos observados es un pequeño porcentaje de los extremos (pleamares y bajamares) previstos con una predicción de marea astronómica.

Por esta razón, se presenta en este informe una estadística del ciclo de mareas vivas y muertas únicamente para los puertos de la costa Atlántica, donde la carrera de la marea es significativamente superior a la variación meteorológica. En la zona de Alborán, el ciclo de mareas vivas y muertas está muy influenciado ya por la meteorología, por lo que

se presenta solo una estadística de las pleamares y bajamares (ciclos semidiurno/diurno) observadas. Finalmente, a medida que nos desplazamos hacia el Norte en la costa Mediterránea y la marea se hace cada vez más insignificante, la imposibilidad de distinguir claramente entre pleamares y bajamares nos obliga a presentar, alternativamente, tan solo una estadística de los máximos y mínimos observados diarios. Mención especial se debe hacer de la estación de Bonanza, en la desembocadura del Guadalquivir: aunque la marea es importante, las crecidas del río Guadalquivir en esta estación pueden también conducir a extremos no coincidentes con la pleamar/bajamar viva (luna llena o luna nueva); por esta razón se observa en este caso una pleamar máxima superior a la máxima pleamar viva.

Estas diferencias significativas en la variabilidad del nivel del mar a lo largo de la costa española aparecen claramente reflejadas en los histogramas de pleamares/bajamares (máximos/mínimos), observándose un claro solapamiento entre las colas de unas y otras en los puertos del Mediterráneo, hasta el punto de quedar el nivel medio del mar encerrado en el rango de variabilidad de las mismas.

3.1. Establecimiento de puerto

Este parámetro, también denominado intervalo medio de pleamar (*high water lunitidal interval*), corresponde al tiempo medio transcurrido entre el tránsito de la Luna por el meridiano local y la siguiente pleamar. Se obtiene a partir de la fase del armónico M2 (período 12.432 horas) para aquellos puertos con marea semidiurna.

3.2. Referencias de nivel del mar

Los niveles del mar y alturas de marea de referencia obtenidas a partir de los datos históricos disponibles para cada puerto, se representan en un diagrama que permite visualizar la variabilidad del nivel del mar en cada uno, a través de su representación a escala.

Todos los niveles y alturas se muestran en centímetros y están referidas al cero del mareógrafo (cero REDMAR), que es, normalmente, el cero del puerto. La posición del cero o referencia de las medidas está en ocasiones por encima del nivel registrado, resultando en la aparición ocasional de registros negativos. Este hecho ha llevado en algunos casos a la redefinición por parte del puerto de su cero, para que no se quede en seco. Tal es el ejemplo del puerto de Las Palmas, que decidió adoptar una nueva referencia el 21 de mayo de 2004, 17 cm por debajo de su cero original.

La posición del clavo de referencia o señal geodésica más cercana al mareógrafo, que se denomina de manera genérica TGBM (*Tide Gauge Benchmark*) está referenciada en el diagrama con respecto al cero del mareógrafo. El nombre, la localización y relación del clavo de referencia del mareógrafo con otras referencias está esquematizada en la sección *Ceros de las medidas* de cada puerto. En [7] pueden consultarse la definición de los diferentes niveles de referencia de nivel del mar empleadas en este informe.

Se incluyen en este esquema:

- **Clavo de referencia más cercano (TGBM):** nombre del clavo del mareógrafo o señal más cercana y altura respecto al cero REDMAR o cero del mareógrafo.
- **Máximo nivel observado:** máximo nivel de la serie histórica de nivel observado.
- **Mínimo nivel observado:** mínimo nivel de la serie histórica de nivel observado.
- **Nivel medio del mar (NMM):** se obtiene como la media aritmética de los niveles medios anuales disponibles hasta la fecha obtenidos para la REDMAR y presentados en los informes anuales. La descripción del cálculo de estas medias anuales puede consultarse en dichos informes.
- **Pleamar viva media observada ($\mathbf{PMVM^O}$):** se obtiene como la media aritmética de todas las pleamares vivas de la serie de pleamares observadas (mareas de máxima amplitud coincidiendo con la luna llena o luna nueva). Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).
- **Pleamar muerta media observada ($\mathbf{PMMM^O}$):** se obtiene como la media aritmética de todas las pleamares muertas de la serie de pleamares observadas (mareas de mínima amplitud coincidiendo con la luna en cuarto menguante o cuarto creciente). Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).
- **Bajamar viva media observada ($\mathbf{BMVM^O}$):** se obtiene como la media aritmética de todas las bajamares vivas de la serie de bajamares observadas (mareas de máxima amplitud coincidiendo con la luna llena o luna nueva). Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).
- **Bajamar muerta media observada ($\mathbf{BMMM^O}$):** se obtiene como la media aritmética de todas las bajamares muertas de la serie de bajamares observadas (mareas de mínima amplitud coincidiendo con la luna en cuarto menguante o cuarto creciente). Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).
- **Máxima pleamar astronómica (PMMA):** máxima pleamar prevista en un período de 19 años. Es el máximo nivel de la serie de pleamares astronómicas .
- **Mínima bajamar astronómica (BMMI):** mínima bajamar prevista en un período de 19 años. Es el mínimo nivel de la serie de bajamares astronómicas.
- **Carrera máxima:** carrera máxima de la serie de carreras de marea observadas. Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).
- **Carrera media:** media aritmétrica de la serie de carreras de marea observadas. Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).
- **Carrera mínima:** carrera mínima de la serie de carreras de marea observadas. Aplicable únicamente a puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos).

	PdE	**IHM**	**otros**
Pleamar Viva Media	$PMVM^O$	$PMVM^A$	MHWS
Pleamar Muerta Media	$PMMM^O$	$PMMM^A$	MHWN
Bajamar Muerta Media	$BMMM^O$	$BMMM^A$	MLWN
Bajamar Viva Media	$BMVM^O$	$BMVM^A$	MLWS

Tabla a. Cálculo de alturas de pleamares y bajamares según diferentes organismos. El superíndice de cada sigla indica si la altura ha sido calculada a partir de niveles observados (O) o a partir de predicciones de marea astronómica (A). Las siglas indican las siguientes alturas: PMVM - Pleamar Viva Media; PMMM - Pleamar Muerta Media; BMMM - Bajamar Muerta Media; BMVM - Bajamar Viva Media; MHWS - *Mean High Water Springs*; MHWN - *Mean High Water Neaps*; MLWN - *Mean Low Water Neaps*; MLWS - *Mean Low Water Springs*.

En este punto es importante enfatizar que los niveles o carreras calculadas a partir de series basadas en observaciones encierran no sólo la componente de marea, sino también los demás forzamientos (como la meteorología o los cambios de densidad el agua). Por el contrario, la máxima pleamar astronómica y la mínima pleamar astronómica, obtenidas de la simulación de un ciclo nodal de alturas de marea astronómica, únicamente dan cuenta de la componente de marea astronómica en el nivel del mar.

Otras instituciones a nivel nacional e internacional utilizan estas definiciones de referencias verticales para diferentes aplicaciones. En algunos casos se emplean para su cálculo series de niveles observados, mientras que en otros, sobre todo debido a limitaciones en la longitud de las series observadas disponibles, se emplean las predicciones de marea astronómica para calcularlas. En ambos casos el concepto detrás de cada altura es el mismo.

Tanto la máxima pleamar como la mínima bajamar astronómica (en inglés HAT-*Highest Astronomical Tide* y LAT-*Lowest Astronomical Tide*) están por definición calculadas sobre predicciones de marea astronómica, por lo que escapan a esta ambigüedad.

En la **Tabla a** se pretende aclarar el origen de las distintas alturas de pleamares y bajamares según se definen en este informe (PdE) y en otras instituciones (IHM-Instituto Hidrógráfico de la Marina, otros: otros organismos internacionales). El superíndice de cada sigla indica si la altura ha sido definida a partir de un registro de nivel observado (O) o bien a partir de una serie teórica de marea astronómica (A). Es interesante resaltar que las alturas de marea que el Insituto Hidrogŕafico de la Marina publica en su Anuario de Mareas se calculan a partir de la marea astronómica, mientras que a nivel internacional, la naturaleza de los datos de origen es variable según la disponibilidad de datos o aplicación, por lo que no se especifica en esta tabla.

3.3. Estadística de pleamares y bajamares

Los descriptores estadísticos básicos (máximo, mínimo, media y desviación estándar) de las series de pleamares y bajamares observadas y astronómicas de aquellos puertos con un rango mareal muy amplio (puertos atlánticos), se presentan en esta sección en una tabla en centímetros respecto al cero REDMAR.

Estos estadísticos se han calculado tanto para las series completas como para las series derivadas de seleccionar las pleamares y bajamares conicidentes con las fases de la luna que generan las mareas vivas y muertas, como se indica a continuación:

- **Pleamar:** estadísticos de las series completas de pleamares (observadas y astronómicas).
- **Bajamar:** estadísticos de las series completas de bajamares (observadas y astronómicas).
- **Pleamar viva:** estadísticos de aquellas pleamares de las series de pleamares (observadas y astronómicas) coincidentes con luna llena o nueva.
- **Bajamar viva:** estadísticos de aquellas bajamares de las series de bajamares (observadas y astronómicas) coincidentes con luna llena o nueva.
- **Pleamar muerta:** estadísticos de aquellas pleamares de las series de pleamares (observadas y astronómicas) coincidentes con luna en cuarto creciente o menguante
- **Bajamar muerta:** estadísticos de aquellas bajamares de las series de bajamares (observadas y astronómicas) coincidentes con luna en cuarto creciente o menguante

3.4. Componentes de nivel del mar

Este apartado muestra, en puntos porcentuales, las **distribuciones de frecuencia relativa** del **nivel** del mar y de las dos componentes en las que se descompone: **marea astronómica** y **residuo**. Estas distribuciones se extraen, respectivamente, de la serie de nivel horario observado, de la serie de nivel horario astronómico y de la de residuos meteorológicos horarios. Únicamente contribuyen a este cálculo los datos de años cuya cobertura alcance el 75 % de datos. La unidad es, en todos los casos, el centímetro.

La comparación entre los gráficos de las distribuciones de las tres variables, permite obtener visualmente una idea de la contribución relativa de cada una de las dos componentes (marea y residuo) a la variabilidad total del nivel del mar en el puerto.

Tal y como se explica en *2.11*, el residuo incluye fundamentalmente efectos de la presión atmosférica o el viento, por lo que se le suele llamar marea meteorológica. Sin embargo, también contiene otros efectos como la componentes estérica, la variación (a largo plazo) del nivel medio del mar y, en definitiva, todos aquellos que no tienen una clara componente armónica asociada a un período determinado.

3.5. Régimen medio y percentiles

En esta sección se presenta el comportamiento medio del nivel del mar y el residuo en el puerto a través de la distribución de frecuencias de las bajamares y pleamares observadas (o bien mínimos y máximos diarios en el caso de rangos mareales inferiores, aproximadamente, a los 50 cm), los niveles horarios observados y el residuo. Se incluyen también los momentos muestrales de las bajamares (o mínimos) y pleamares (o máximos) observadas. Esta información se resume en las siguientes tablas y figuras:

- El gráfico de **histogramas de pleamares y bajamares (o mínimos y máximos)** presenta la distribución de frecuencia relativa de las series de bajamares (mínimos) observadas y de las series de pleamares (máximos) observadas en puntos porcentuales. La unidad de nivel de mar en este caso es el metro. Los histogramas se han calculado para cada serie por separado y se representan en el mismo gráfico para facilitar su intercomparación.

- Las tablas de **estadísticas de bajamares (mínimos) y estadísticas de pleamares (máximos)** recogen los extremos (mínimo, máximo) y momentos muestrales de las series de bajamares (mínimos) observadas y de la series de pleamares (máximos) observadas.

- Los gráficos de **percentiles de bajamares y pleamares observadas** presentan los percentiles de las series de bajamares observadas y de las series de pleamares observadas. Esta información sólo se presenta para puertos con rangos mareales muy amplios. Estos gráficos se acompañan con las tablas de percentiles correspondientes. La unidad de nivel del mar es el metro y representan el porcentaje de pleamares o bajamares por debajo de un nivel dado en cada serie.

- En el gráfico de **percentiles de la serie de nivel horario observado** se presenta, en puntos porcentuales, la distribución de frecuencias relativas acumuladas de la serie de nivel horario observado. Este gráfico se acompaña con la tabla de percentiles correspondiente. La unidad de nivel del mar es el metro y representan el porcentaje de niveles horarios de la serie por debajo de un nivel dado.

- En el gráfico de **percentiles de la serie de residuo meteorológico** se observa, en puntos porcentuales, la distribución de frecuencias relativas acumuladas de la serie de residuos meteorológicos horarios. Este gráfico se acompaña con la tabla de percentiles correspondiente. La unidad de residuo es el metro y representan el porcentaje de residuos de la serie por debajo de un residuo dado.

3.6. Históricos de extremos observados

Se muestra aquí el comportamiento histórico de los extremos y variabilidad del nivel del mar y residuo para series de más de 8 años de datos:

- Para el **nivel observado** se muestra, en el primer gráfico, la evolución de los extremos de nivel del mar a través del máximo, mínimo y percentiles 95 y 5 anuales, calculados a partir de la serie histórica de nivel del mar observado (datos cada 5 minutos). En el segundo, se observa la evolución temporal de la dispersión de esta serie, a través de la desviación estándar anual de la misma.

- De la misma forma, para el **residuo meteorológico** se muestra, en el primer gráfico, la evolución de sus extremos a través del máximo, mínimo y percentiles 95 y 5 anuales, calculados a partir de la serie de residuos meteorológicos horarios. En el segundo, se observa la evolución temporal de la dispersión de esta serie, a través de la desviación estándar anual de la misma.

En ambos casos se muestran únicamente los años cuya cobertura alcance el 75 % de datos.

3.7. Medias mensuales y tendencia

La serie de nivel medio mensual disponible para cada puerto se representa en una gráfica en esta sección. Las unidades de nivel medio son centímetros y está referido al cero REDMAR.

Se indica además sobre este gráfico el cambio de mareógrafo en el caso de estaciones cuya serie sea la consolidación de las series de dos equipos diferentes. En próximas ediciones, se indicarán además, los eventos que pueden afectar a la serie en términos de calidad. Si bien el impacto de estas incidencias es en todo caso estudiado y minimizado, se considera que esta información será de utilidad para el usuario de los datos. Ejemplos de estos eventos son cambios de localización del mareógrafo o accidentes que pueden afectar al cero del mareógrafo.

Cuando la serie histórica disponible es lo suficientemente larga (se ha establecido un mínimo de 9 años), se calcula además, sobre la serie de nivel medio mensual, la tendencia del nivel del mar. El error asociado al cálculo de la tendencia está directamente relacionado con la longitud de la serie disponible, por lo que es fundamental leer el valor de la tendencia anual junto con el error, proporcionados ambos sobre el gráfico de medias mensuales. El índice de completitud (C.I.) indica, además, el porcentaje de datos disponibles de todo el período analizado, es decir, da una idea del porcentaje de huecos en la serie de nivel medio mensual (100 - C.I.). En la sección *4* de este informe se dan más detalles sobre el cálculo de la tendencia y la incertidumbre en su cálculo.

4. Tendencias anuales para toda la red

En todos los puertos con series históricas REDMAR de un mínimo de nueve años de longitud, se ha calculado la tendencia del nivel del mar. El cálculo de la tendencia se realiza mediante ajuste por máxima verosimilitud de la serie de medias mensuales observadas a una recta. La incertidumbre asociada a la estimación de la tendencia está directamente relacionada con la longitud de la serie, por lo que cuanto mayor sea ésta, más robusta será la magnitud calculada. En la **Figura b** se representa la distribución geográfica de las tendencias obtenidas. En la **Figura c**, se representa gráficamente la magnitud de estas tendencias junto con la incertidumbre asociada. La **Tabla b** completa esta información con el período de datos utilizado.

Es muy importante tener en cuenta que estas tendencias son muy sensibles a cualquier incidencia en la estación. Antes de la realización de este informe se ha realizado un exhaustivo control de calidad de los niveles medios de la REDMAR, utilizando datos de altimetría espacial en el entorno de cada puerto, con el fin de detectar y, si es posible, corregir, problemas de unos pocos centímetros que pasan desapercibidos en los controles de calidad en tiempo real y en el proceso anual. De esta forma ha sido posible corregir diversos problemas como el efecto de la deslaminación de la antena en los sensores radar MIROS, que apareció en varias estaciones y se detectó por primera vez en Mayo de 2010, errores en la asignación del cero durante un servicio de mantenimiento (como es el caso del SRD de Valencia) y, sobre todo, determinar el impacto del cambio de instrumentación y/o localización del mareógrafo cuando se realizó la renovación. Los datos publicados por tanto en este informe son los mejores disponibles hasta la fecha y serán actualizados/revisados en años sucesivos.

Por último, y muy importante, las tendencias publicadas en este informe no tienen en cuenta el movimiento vertical de la estación, puerto o región ya que no se dispone de esta información ni se está monitorizando este movimiento. Podrían por tanto estar reflejando tanto una subida en el nivel medio del mar como un hundimiento del terreno. Solo la estación de Ibiza dispone de una estación geodésica permanente GNSS (Global Navigation Satellite System), asociada y nivelada con el mareógrafo, que permite conocer esta información y restarla, si interesa, de la tendencia relativa medida por el mareógrafo: los últimos datos obtenidos por el centro de proceso de datos GNSS del SONEL (`www.sonel.org`) en la Universidad de La Rochelle, indican un movimiento del terreno en la estación de Ibiza de $-2{,}36 \pm 0{,}18$ mm/año.

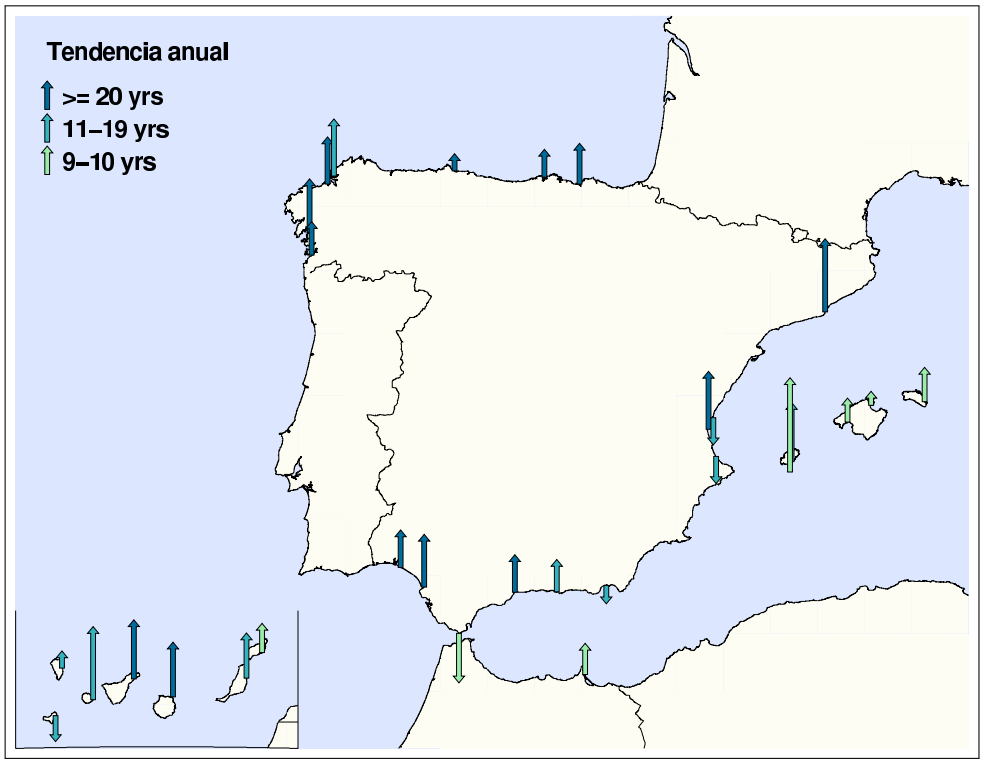


Figura b. Mapa de tendencias anuales en las estaciones de la REDMAR con más de 8 años de datos. El sentido de las flechas indica el signo de la tendencia; el color, la longitud de la serie histórica en cada estación. La longitud de las flechas indica la magnitud de las tendencias y está escalada a la máxima tendencia mostrada.

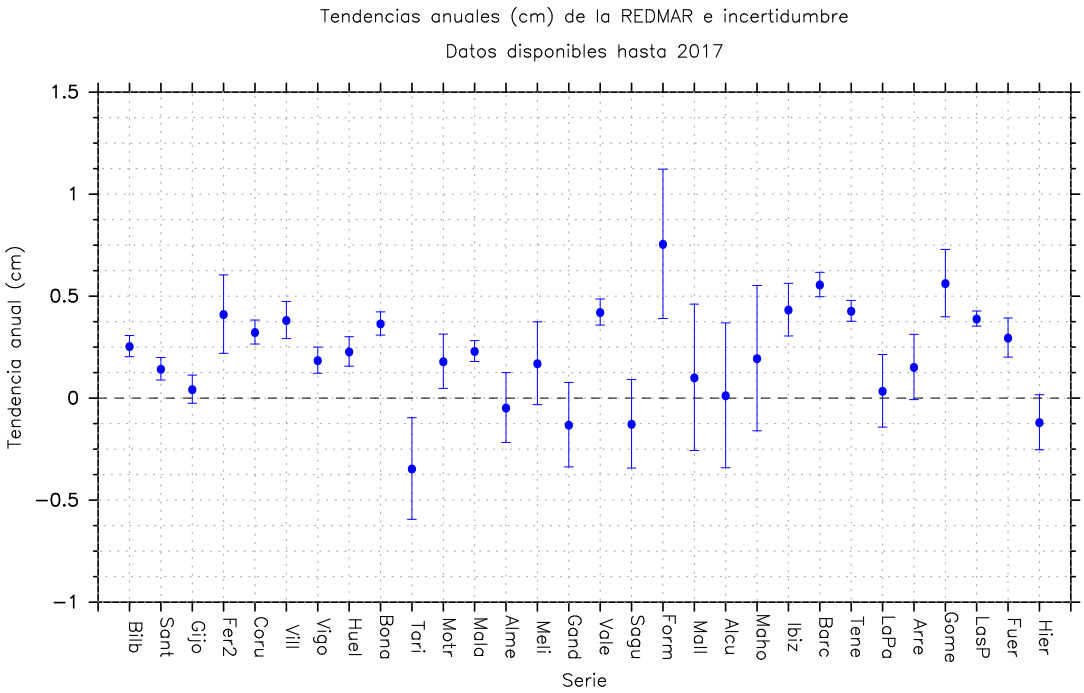


Figura c. Tendencias anuales de las estaciones de la REDMAR con más de 8 años de datos. Las barras indican el error en el cálculo de la tendencia. Las unidades de la tendencia y el error son cm/año.

Serie	**Tendencia** (cm/año)	**Error** (cm/año)	**Año inicial**	**Año final**
Bilbao	0.255	± 0.052	1992	2017
Santander	0.144	± 0.055	1992	2017
Gijón	0.044	± 0.069	1996	2017
Ferrol (Puerto interior)	0.412	± 0.192	2007	2017
A Coruña	0.324	± 0.059	1992	2017
Vilagarcía	0.383	± 0.091	1997	2017
Vigo	0.186	± 0.064	1993	2017
Huelva	0.229	± 0.072	1997	2017
Sevilla-Bonanza	0.366	± 0.057	1992	2015
Tarifa	-0.345	± 0.249	2009	2017
Motril	0.181	± 0.133	2005	2017
Málaga	0.231	± 0.051	1992	2017
Almería	-0.046	± 0.171	2006	2017
Melilla	0.171	± 0.203	2008	2017
Gandía	-0.130	± 0.207	2008	2017
Valencia	0.422	± 0.064	1993	2017
Sagunto	-0.126	± 0.217	2007	2015
La Savina (Formentera)	0.756	± 0.366	2009	2017
Palma	0.102	± 0.359	2009	2017
Alcúdia (Mallorca)	0.014	± 0.355	2009	2017
Maó (Menorca)	0.196	± 0.356	2009	2017
Eivissa	0.434	± 0.129	2003	2017
Barcelona	0.557	± 0.060	1993	2017
Santa Cruz de Tenerife	0.428	± 0.051	1992	2017
Santa Cruz de La Palma	0.036	± 0.178	2007	2017
Arrecife (Lanzarote)	0.153	± 0.160	2009	2017
San Sebastián de la Gomera	0.564	± 0.165	2007	2017
Las Palmas	0.390	± 0.037	1992	2017
Puerto del Rosario (Fuerteventura)	0.297	± 0.096	2004	2017
La Estaca (El Hierro)	-0.118	± 0.135	2004	2017

Tabla b. Tendencias anuales de las estaciones de la REDMAR con más de 8 años de datos. Se indica la incertidumbre en el cálculo y el año incial y final de la serie histórica empleada. Las unidades de la tendencia y el error son cm/año.

REDMAR

Puerto de Barcelona

Régimen mareal: mixto, con predominancia semidiurna

Serie histórica para el período **1993-2017**

Portada del puerto:

Localización del puerto de Barcelona sobre una imagen **Google Earth.**
Se detalla la ubicación en el puerto de los mareógrafos de la serie histórica.

5. Resumen de parámetros del puerto

Construcción de la serie histórica

La serie histórica del puerto de Barcelona para el período 1993-2017, se basa en los datos registrados por cada uno de los mareógrafos especificados en la siguiente tabla:

Estación	Sensor	Longitud	Latitud
Barc	Acústico (SRD)	002° 9' 36.83"E	41° 20' 57.70"N
Bar2	Rádar (Miros)	002° 9' 56.52"E	41° 20' 30.37"N

Tabla 1. Relación de mareógrafos con los que se ha registrado datos de nivel del mar para la serie histórica de Barcelona. Se indica la tecnología del sensor, el fabricante y las coordenadas geográficas de los mismos (referidas al elipsoide WGS-84.)

En el diagrama que se muestra a continuación, se indica el período de datos de cada mareógrafo que ha entrado en la serie histórica junto con el tiempo de operatividad de cada uno:

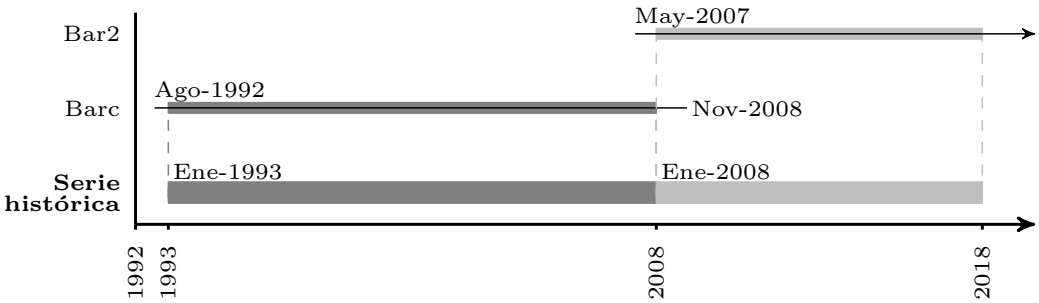


Figura 1. Esquema de construcción de la serie histórica. Las líneas contínuas indican los períodos de funcionamiento de cada uno de los mareógrafos implicados. La sombra sobre la línea del mareógrafo marca el período para el que sus datos son incluidos en la serie histórica.

Para la construcción de la serie histórica se han utilizado los datos del SRD hasta Diciembre de 2007 y los datos del MIROS desde Enero de 2008. Las dos estaciones están en diferente ubicación pero se habían ajustado al mismo cero a partir de los datos de 2008 debido a la falta de nivelación de alta precisión (lo que explica el bias casi nulo en la comparación). El error de escala observado (1.88 %) en la comparación parece estar asociado a la diferente respuesta de los equipos en la alta frecuencia y su corrección conduce a resultados descabellados en los niveles horarios y medios por lo que no se aplica en este puerto. En la **Figura 2** se representa el porcentaje de datos erróneos o huecos en la serie resultante.

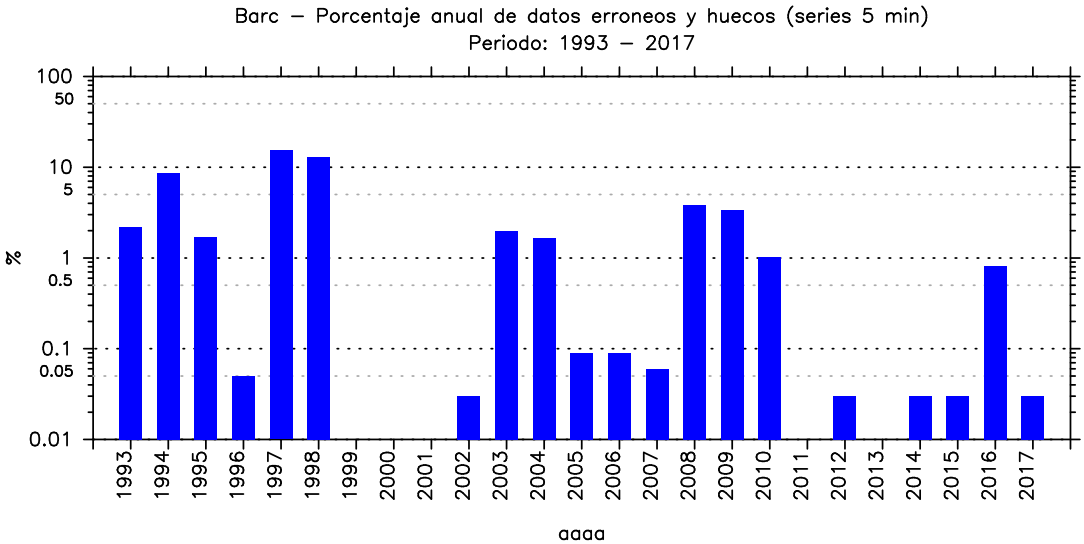


Figura 2. Porcentaje anual de datos erróneos o huecos en la serie histórica de nivel del mar observado (frecuencia muestreo 5 min). Nótese que el eje y muestra el porcentaje en escala logarítmica.

Ceros de las medidas

Radar MIROS que sustituye al sensor acústico SRD instalado en 1992 en el extremo este del Muelle Alvarez de la Campa, frente al Pantalán para Petroleros. El nuevo equipo se encuentra en otra ubicación, a unos 900 m, en el Muelle 140 de la Planta ENAGAS, colocado el sensor de radar sobre la superficie del agua en un mástil en forma de L que lo eleva unos metros sobre el cantil del muelle.

El clavo geodésico más cercano es el Clavo 146, situado sobre la esquina derecha de la base de hormigón del mareógrafo y nivelado por el Instituto Cartográfico de Cataluña en 2011. El cero del mareógrafo coincide con el cero del SRD tras ajuste de los datos durante 2008, previamente a la nivelación, y está situado 4,419 m bajo el Clavo "146", coincidente con el Nivel Medio del Mar en Alicante (salvo un par de cm) en 1995 y 0.214 m por encima del llamado "cero del puerto". Tras los datos de la última nivelación del Instituto Cartográfico de Cataluña, la relación de este clavo con el Nivel Medio del Mar en Alicante ha cambiado sustancialmente y pasa a estar 0.179 m por encima del cero del mareógrafo. El origen de esta diferencia se desconoce y no está relacionado con el funcionamiento del mareógrafo sino con el proceso de nivelación o movimientos verticales no conocidos en este momento. El cero hidrográfico está situado 4.469 m bajo dicho clavo.

Los datos se transmiten por GPRS a Puertos del Estado por correo electrónico cada minuto (muestreo 1 minuto). Este sensor también mide agitación y transmite parámetros de oleaje cada 20 minutos.

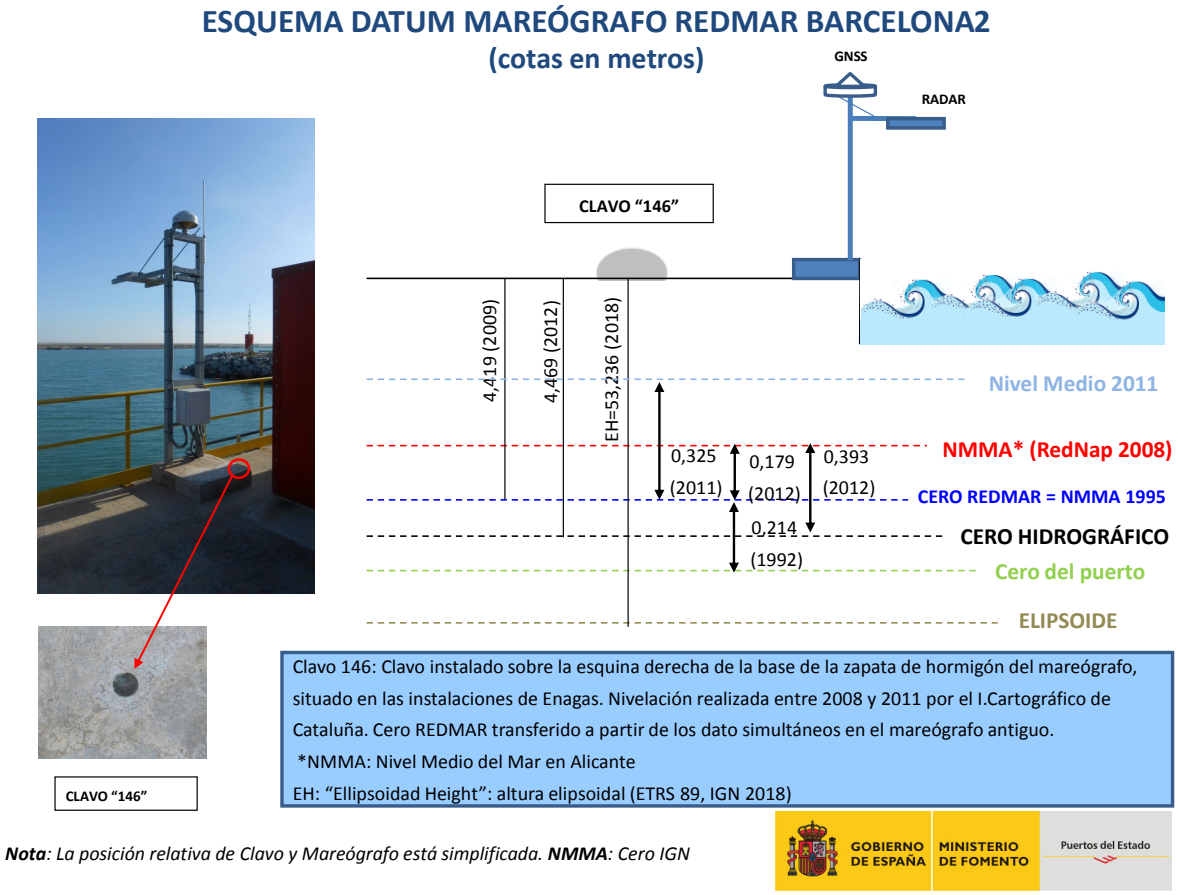


Figura 3. Cotas de los ceros de referencia respecto al clavo de referencia del mareógrafo Bar2. El clavo de referencia es el más cercano al mareógrafo al que ha llegado la línea de nivelación de alta precisión del Instituto Geográfico Nacional (IGN) o el colocado por Puertos del Estado para la calibración del mareógrafo, si la estación está pendiente de nivelar. El **NMMA** (Nivel Medio del Mar en Alicante) es el origen de altitudes en tierra establecido por el IGN y que en la península ibérica procede del nivel medio del mar en Alicante durante la década 1870-1880. El **cero hidrográfico**, establecido por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), coincide aproximadamente con el nivel de agua más bajo y varía con las características de la marea a lo largo de la costa. Es la mínima bajamar astronómica (BMMI) calculada para el puerto por el IHM. El **cero del puerto** está definido por el propio puerto y coincide normalmente con la mínima bajamar. El **cero REDMAR**, cero de las medidas de los mareógrafos, suele coincidir con el cero del puerto. En caso contrario, se indica en este esquema. Ver [7] para más información sobre ceros de referencias.

Referencias de nivel del mar

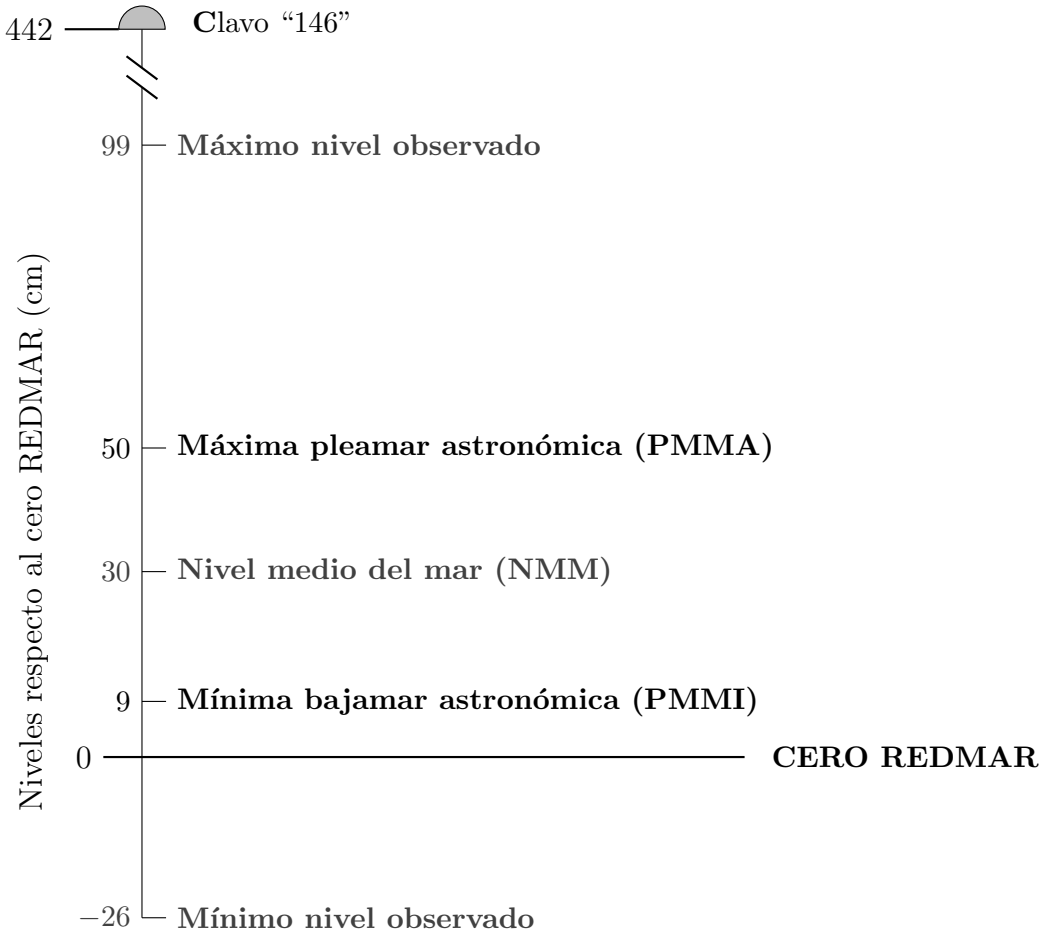


Figura 4. Principales referencias de nivel del mar calculadas sobre el todo período de datos disponible. La unidad de las alturas es el centímetro y están referidas al cero REDMAR. Se indica además, la altura del TGBM (*Tide Gauge Benchmark*) sobre el mismo cero.

Componentes de nivel del mar

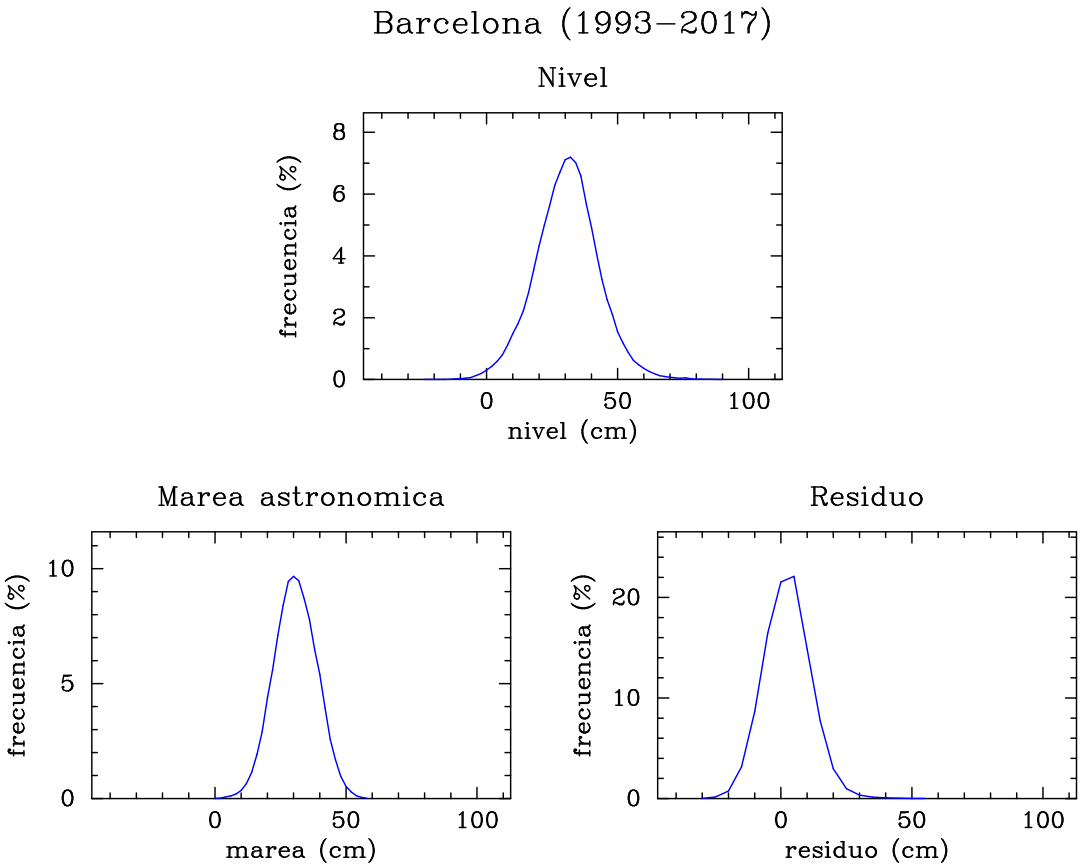


Figura 5. Distribución de frecuencia relativa de nivel del mar horario observado (gráfico superior), marea astronómica horaria (gráfico inferior-izquierda) y residuo meteorológico horario (gráfico inferior-derecha). La frecuencia se proporciona en puntos porcentuales y la unidad de nivel observado, marea y residuo es el centímetro.

Régimen medio y percentiles

Régimen medio de máximos y mínimos

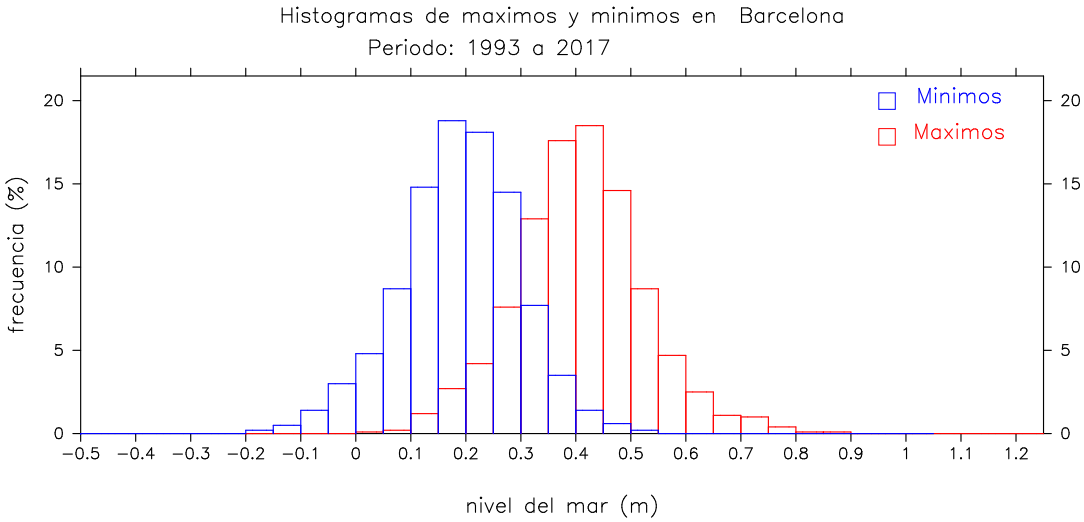


Figura 6. Distribución de frecuencia relativa de mínimos y máximos observados. La frecuencia se proporciona en puntos porcentuales y la unidad de nivel del mar es el metro. Aunque se representan conjuntamente, los histogramas se han calculado para la serie de mínimos y para la serie de máximos independientemente.

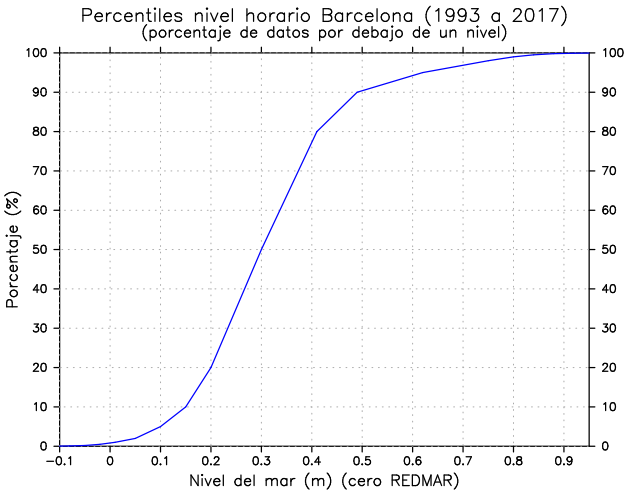
Estadística Mínimos	
Mínima (m):	-0.26
Máxima (m):	0.72
Media (m):	0.19
Desv.Est. (m):	0.11
Moda (m):	0.18
Mediana (m):	0.19
Sesgo:	-0.16
Curtosis:	0.51

Estadística Máximos	
Mínima (m):	0.01
Máxima (m):	0.99
Media (m):	0.41
Desv.Est. (m):	0.12
Moda (m):	0.42
Mediana (m):	0.41
Sesgo:	0.21
Curtosis:	0.70

Tablas 2 y 3. Estadísticas de mínimos y máximos observados. Extremos (máximos y mínimos) y momentos muestrales de las series de mínimos (Tabla 2) y máximos (Tabla 3) observados.

Percentiles de la serie de nivel horario

(% niveles horarios por debajo de un nivel dado)

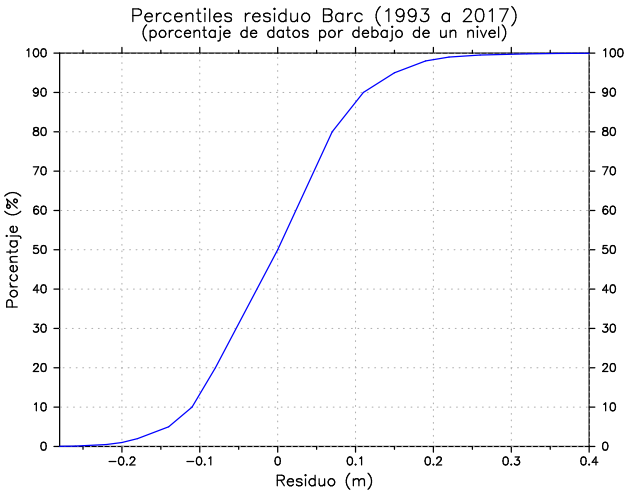


Nivel (m)	% acumulado
-0.10	0.05
-0.08	0.10
-0.05	0.20
-0.02	0.50
0.01	1.00
0.05	2.00
0.10	5.00
0.15	10.00
0.20	20.00
0.30	50.00
0.41	80.00
0.49	90.00
0.62	95.00
0.75	98.00
0.80	99.00
0.84	99.50
0.88	99.80
0.92	99.90
0.95	99.95

Figura 7/Tabla 4. Distribución de frecuencia relativa acumulada (izquierda) y tabla de percentiles (derecha) de nivel horario observado. La frecuencia se proporciona en puntos porcentuales y la unidad del nivel es el metro.

Percentiles de la serie de residuo meteorológico

(% residuo por debajo de un nivel dado)



Residuo (m)	% acumulado
-0.28	0.05
-0.26	0.10
-0.25	0.20
-0.22	0.50
-0.20	1.00
-0.18	2.00
-0.14	5.00
-0.11	10.00
-0.08	20.00
-0.00	50.00
0.07	80.00
0.11	90.00
0.15	95.00
0.19	98.00
0.22	99.00
0.26	99.50
0.32	99.80
0.36	99.90
0.40	99.95

Figura 8/Tabla 5. Distribución de frecuencia relativa acumulada (izquierda) y tabla de percentiles (derecha) del residuo meteorológico horario. La frecuencia se proporciona en puntos porcentuales y la unidad del residuo es el metro.

Históricos de extremos observados

Nivel observado

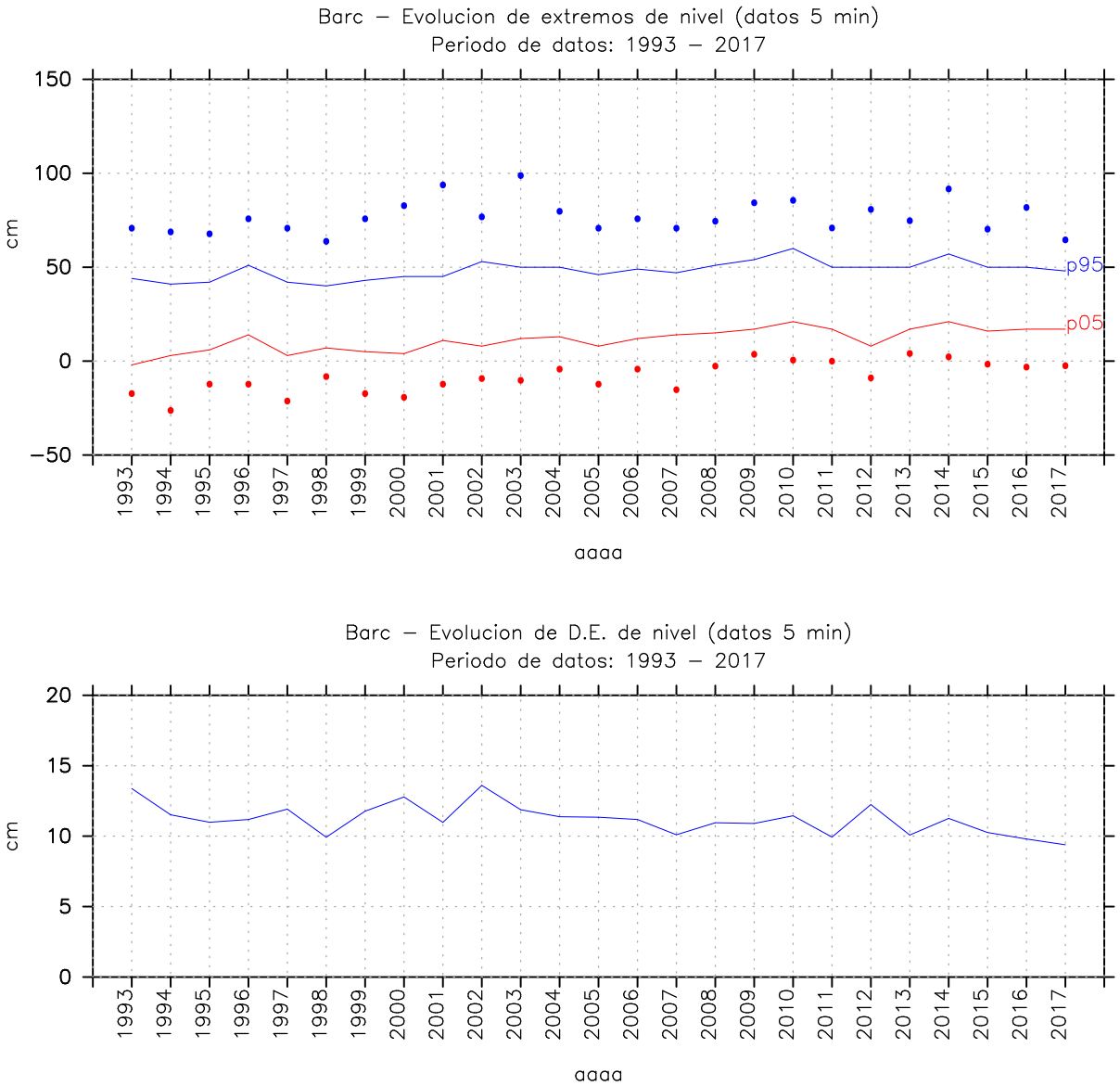


Figura 9. Gráfico superior. Histórico de los extremos anuales de la serie histórica de nivel observado. **Azul:** máximo (línea de puntos) y percentil 95 (p95, línea contínua); **rojo:** mínimo (línea de puntos) y percentil 5 (p05, línea contínua). **Gráfico inferior.** Histórico de la dispersión del nivel observado: desviación estándar anual. La unidad de todos los parámetros de nivel es el centímetro.

Residuo meteorológico

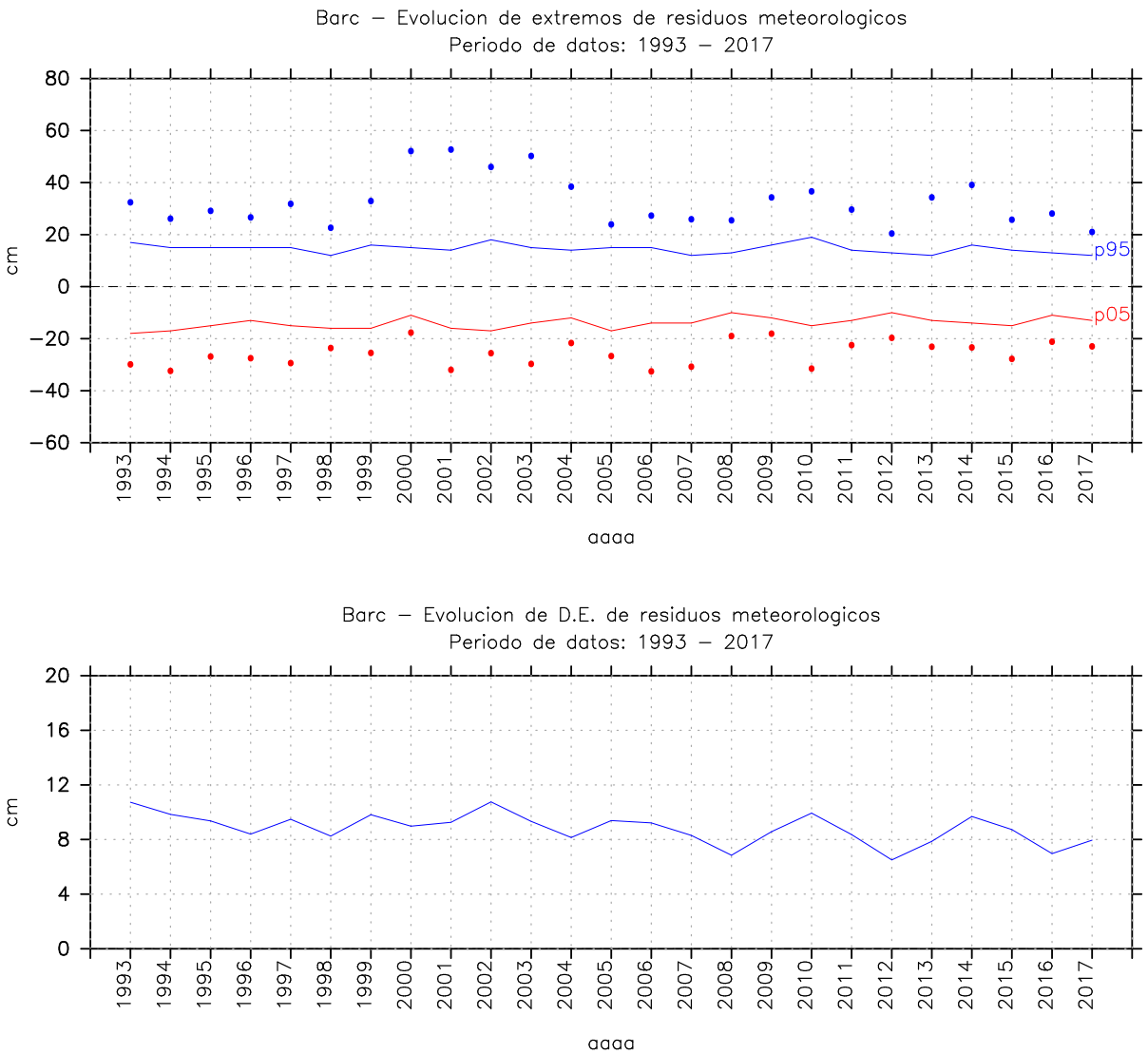


Figura 10. Gráfico superior. Histórico de los extremos anuales del residuo meteorológico. **Azul:** máximo (línea de puntos) y percentil 95 (p95, línea contínua); **rojo:** mínimo (línea de puntos) y percentil 5 (p05, línea contínua). **Gráfico inferior.** Histórico de la dispersión anual del residuo: desviación estándar anual. La unidad de todos los parámetros del residuo es el centímetro.

Medias mensuales y tendencia

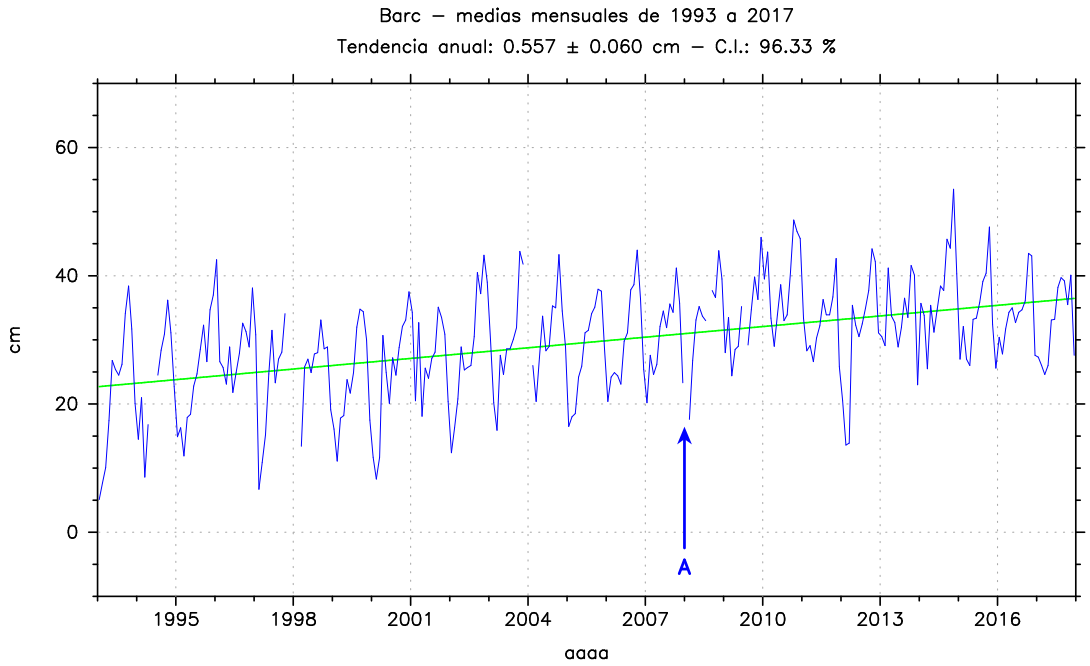


Figura 11. Serie de nivel medio mensual para el puerto. La unidad del nivel medio es el centímetro. La recta representa la tendencia de la serie calculada para el período. Sobre el gráfico puede leerse la magnitud de la tendencia anual y el error asociado, junto con el porcentaje de niveles medios mensuales disponibles en todo el período (C.I.). A continuación se listan los eventos marcados en la serie: A. Nueva estación en la serie: Bar2.

Referencias

[1] PdE, 2005: *REDMAR: Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria.*

[2] Martín Mínguez, B., Pérez Gómez, B. y Álvarez Fanjul, E, 2005: *The ESEAS-RI Sea Level Test Station: Reliability and Accuracy of Different Tide Gauges.* International Hydrographic Review, vol. 6, no. 1.

[3] B. Pérez Gómez, A. Payo, D. López, P.L. Woodworth y E. Álvarez Fanjul, 2012: *Overlapping sea level time series measured using different technologies: an example from the REDMAR Spanish network. in press*

[4] B Pérez Gómez, E Álvarez Fanjul, S Pérez, M de Alfonso y J Vela, 2013: *Use of tide gauge data in operational oceanography and sea level hazard warning systems.* Journal of Operational Oceanography, vol. 6, no. 2.

[5] Pugh DT. 1987: *Tides, surges and mean sea-level.* John Wiley and Sons, 472 pp.

[6] Caldwell, Patrick. 2000: *Sea Level Data Processing on IBM-PC Compatible Computers. Version 3.0.* http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhslc/jaslpr2/slman2.html

[7] PdE, 2011: *NIVELES DE REFERENCIA DE NIVEL DEL MAR.* http://portus.puertos.es/Portus/pdf/referencias/Descripcion_Referencia_NivelDelMar_es.pdf