

LA SUPERFICIE DE REFERENCIA VERTICAL HIDROGRÁFICA ESPAÑOLA. UNA REVOLUCIÓN EN EL CERO HIDROGRÁFICO

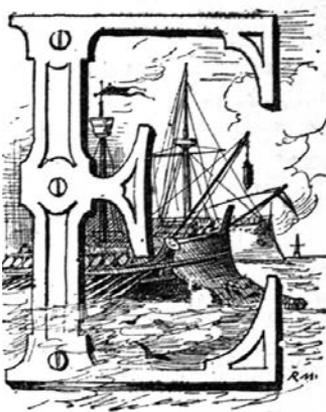
José Manuel QUIJANO DE BENITO



Silvia COSTA GONZÁLEZ
ITA (Ingeniero técnico de Arsenales)

Carlos José GONZÁLEZ MEJÍAS
Titulado superior

Antecedentes



N este artículo se pretende explicar cómo se hace la reducción de sondas de la carta a su referencia vertical, el cero hidrográfico (CH), y cómo ha evolucionado este proceso gracias a la mejora en la precisión en altura de los datos GNSS (*Global Navigation Satellite System*), y a la materialización de la superficie hidrográfica de referencia vertical, que ha permitido relacionar «sin costuras» los datos marítimos y terrestres. Esto, además, nos permite obtener unos beneficios claros en multitud de aplicaciones, como veremos.

Merece la pena empezar por conocer el amparo normativo. El Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, indica:

«Artículo 4. Sistema de Referencia Altimétrico.

1. Se tomarán como referencia de altitudes los registros del nivel medio del mar en Alicante para la Península y las referencias mareográficas locales para cada una de las islas. Los orígenes de las referencias altimétricas serán definidos y publicados por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

2. El sistema está materializado por las líneas de la Red de Nivelación de Alta Precisión.
3. El datum hidrográfico al que están referidas las sondas, cero hidrográfico, será definido y publicado por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y representará la referencia altimétrica para la cartografía náutica básica.»

La principal dificultad que nos encontramos al integrar información geográfica marítimo-costera es el uso de sistemas de referencia altimétricos distintos por parte de los servicios cartográficos (responsabilidad del IGN) e hidrográficos (responsabilidad del IHM). Dos son las principales causas de esta discrepancia:

1. El propósito primordial de la cartografía náutica es garantizar la seguridad en la navegación; esto aconseja que su datum sea un valor de naturaleza extrema para que el navegante siempre encuentre más agua que la que se indica en la carta. Debido a esto, se selecciona como referencia la mínima marea astronómica, calculada a partir de medidas locales de niveles del mar en los puntos en los que se despliegan los mareógrafos, por lo que es distinta en cada puerto.
2. El diferente orden de dificultad que ofrecen los medios donde se efectúan las medidas, la tierra y la mar. Además, no existe una continuidad en la evolución espacial ni tampoco una correlación continua con el nivel de referencia de la cartografía terrestre, que sí está representado por una superficie continua (en España para la altura ortométrica se utiliza el geoide EGM08-REDNAP).

Las mejoras que recientemente se han logrado en el cálculo de altura elipsoidal con técnicas GNSS han supuesto que muchos servicios hidrográficos, entre ellos de España, hayan desarrollado modelos de altura elipsoidal del cero hidrográfico (AECH) en las aguas de su jurisdicción. Esto posibilita también conocer también su altura ortométrica. El resultado ha sido la materialización de la Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica Española (SRVH), que permite, además de simplificar los trabajos hidrográficos, utilizar una referencia común para las alturas terrestres y las profundidades, y por tanto construir modelos continuos coherentes en las zonas de interfase tierra-mar, a parte de otras utilidades que veremos en este artículo.

Este modelo se ha publicado para su descarga, de forma provisional, en el cuarto trimestre de 2022 en el portal de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del IHM (<https://ideihm.covam.es/portal/>). Son dos superficies, una de altura elipsoidal referida al ETRS89 (usos hidrográficos) y otra de altura ortométrica referida al geoide EGM 08- REDNAP (usos costeros y terrestres, tales como determinación de línea de costa, modelos de inundación, Salvamento

Marítimo, estudios medioambientales, obra portuaria y similares). Una vez validados los resultados, se prevé la publicación de la SRVH oficial en 2024.

El cero hidrográfico y otras referencias en las cartas náuticas

El cero hidrográfico o datum de la carta náutica es el plano de referencia vertical sobre el que se miden las profundidades y las alturas de todo accidente geográfico que vele en bajamar. Representa «el lugar geométrico de los puntos de mínima altura predecible de la mar sobre la superficie terrestre en condiciones meteorológicas medias y bajo cualquier combinación de condiciones astronómicas». La Organización Hidrográfica Internacional (OHI) recomienda, en su Resolución 3/1919, el empleo de la mayor bajamar astronómica (*lowest astronomical tide*, LAT) como referencia vertical para la cartografía náutica. Para los obstáculos aéreos (gálibos de puentes, altura libre bajo cables...), se utiliza como referencia la mayor pleamar astronómica (*highest astronomical tide*, HAT). El IHM, como organismo nacional encargado de la obtención y compilación de datos hidrográficos y la publicación, difusión y mantenimiento de la cartografía náutica oficial del Estado, sigue esta recomendación. Para la determinación de las líneas de bajamar y pleamar y las alturas de objetos en tierra, se utilizan referencias de la cartografía terrestre.

Desde el punto de vista de la cartografía náutica, la línea de costa es una línea doble, compuesta por la línea de pleamar y la de bajamar, de forma que delimita, en sentido horizontal, la zona de transición entre la tierra y el mar. La línea de pleamar es la línea horizontal que queda determinada por el máximo

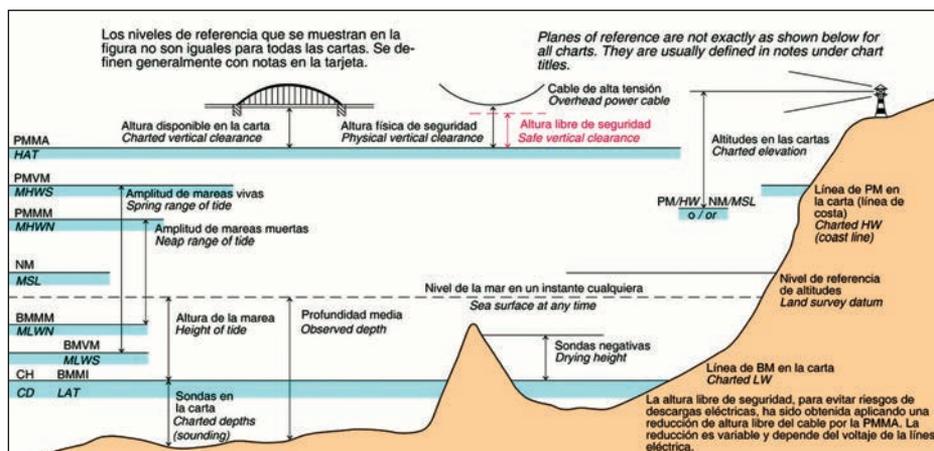


Figura 1. Referencias verticales en la cartografía náutica. (Fuente: *Publicación S-4. Reglamento para Cartas Internacionales (INT) y Especificaciones Cartográficas de la OHI*)

avance de la marea hacia tierra. La línea de bajamar viene determinada por el cero hidrográfico o bajamar escorada.

La zona marítimo-terrestre es el espacio comprendido entre la línea de bajamar escorada y el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos o, cuando lo supere, el de la línea de pleamar máxima (HAT). Esta zona se extiende también por las márgenes de los ríos hasta el sitio donde se haga sensible el efecto de las mareas. El IHM es responsable de las líneas de costa y de aquellos aspectos técnicos cartográficos necesarios para la representación de las líneas de base rectas y las delimitaciones marítimas, una vez aprobadas por el Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.

Las HAT/LAT se calculan mediante la realización de una predicción del comportamiento de la marea durante el ciclo nodal, que dura 18,6 años y abarca las posiciones relativas del sistema Luna-Tierra-Sol.

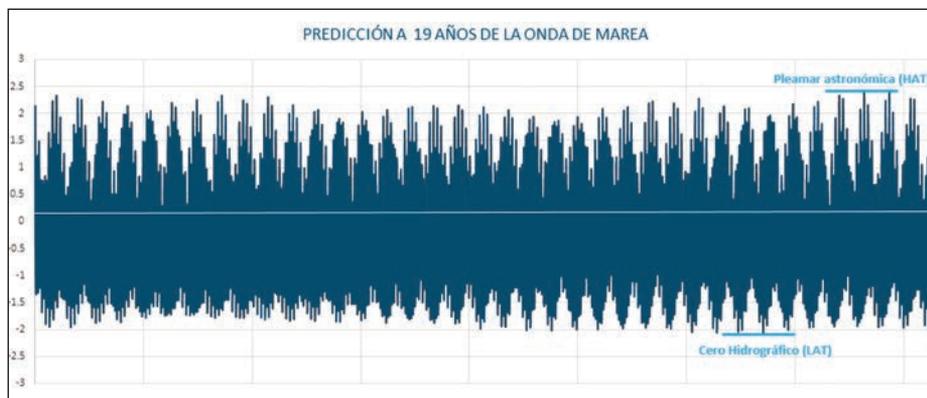


Figura 2. Predicción de mareas para 19 años con el mínimo y máximo nivel, LAT (L_0) y HAT (H_0). (Fuente: IHM)

En el IHM se realiza el cálculo mediante un proceso de análisis matemático y predicción a partir de los datos obtenidos de cada estación de mareas durante al menos un año. La elección de la serie temporal es motivo de controversia, puesto que se puede calcular un cero hidrográfico por cada serie de datos disponible. Si esto fuese así, la referencia vertical de la cartografía no sería una referencia estable. Para evitar esto, a pesar de que el cero hidrográfico está en constante revisión, sólo existe uno que es el que está en vigor, y por ello se le acompaña de una cifra, que se corresponde con el año de entrada en vigor de dicho cero, y se completa con la información de la serie de datos que originó la colección de armónicos usada para la predicción.

Para elaborar las predicciones se comienza ajustando la serie de datos de un mareógrafo emplazado en el puerto de interés a la expresión:

$$\eta(\tau) = a_0 + \sum_{n=1}^k a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n)$$

donde a_0 representa el nivel medio del mar respecto a la referencia establecida. Los valores a_n y α_n son las amplitudes y fases de las denominadas «componentes armónicas», que se calculan a partir de los datos de cada mareógrafo, y ω_n son las frecuencias angulares que se derivan de los efectos astronómicos, de la cuenca (batimetría, rozamiento...) y otras causas (velocidad de propagación de ondas, interferencias...).

Estaciones de marea

Una estación de marea consiste en un mareógrafo que se despliega en un emplazamiento (normalmente un puerto), debidamente nivelado con respecto a referencias terrestres, con la misión de adquirir datos de nivel del mar que, una vez tratados y analizados, permitan hacer predicciones de marea y determinar el cero hidrográfico en una zona específica.

En cada mareógrafo se toman datos durante más de un año, señalizándolos con marcas permanentes, llamadas hitos (clavos geodésicos o *benchmarks*, BM) en el terreno, con el fin de poder reconstruir el

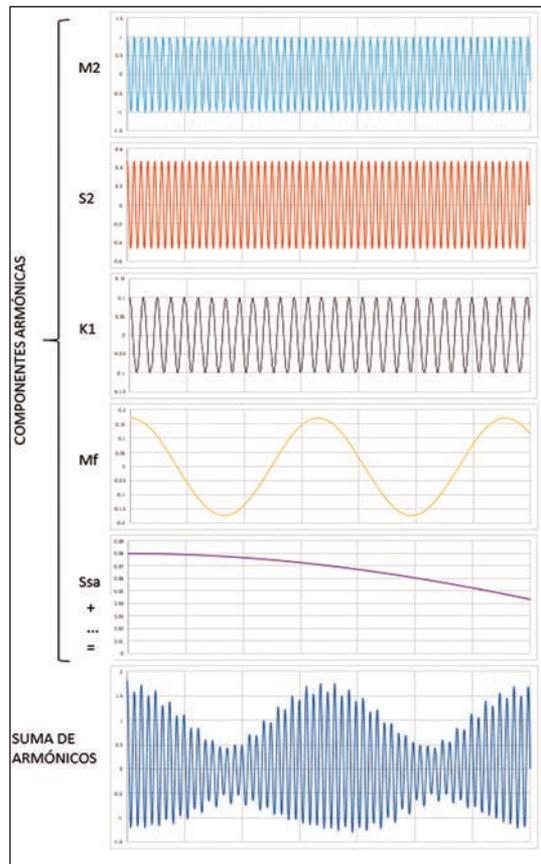


Figura 3. Esquema de la predicción de la serie temporal de marea astronómica mediante la suma de varias componentes armónicas (en el ejemplo son cinco, pero realmente se usan alrededor de 70 constituyentes).

(Fuente: IHM)

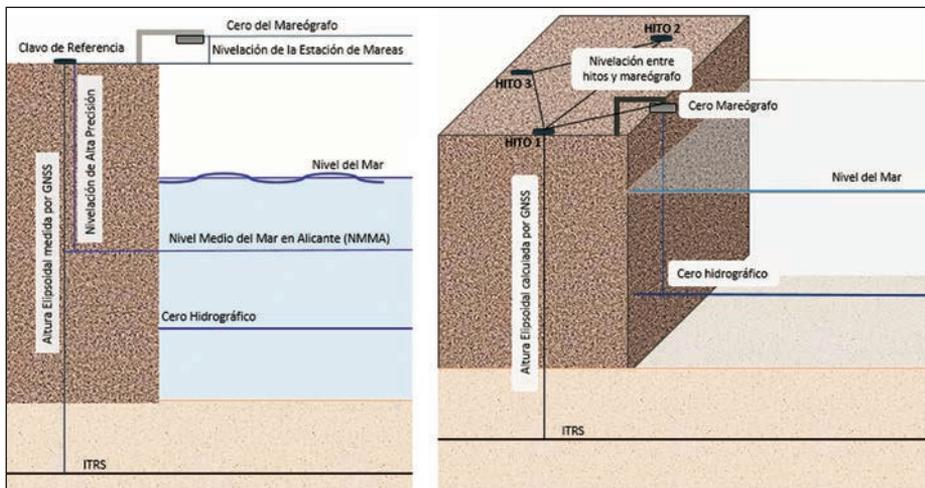


Figura 4. Niveles de referencia del mareógrafo: altura ortométrica (NMMA) y altura elipsoidal. (Fuente: IHM)

punto de toma de datos en un futuro. Por si se destruye, cada estación se monumenta con tres hitos, que se nivelan entre sí y con el cero del mareógrafo (el de los sensores del IHM, por ser de tecnología acústica o radar, está en la antena, que se halla fuera del agua, como se muestra en la figura 4).

A este mismo datum están referidas las predicciones del *Anuario de Mareas*, que es un complemento imprescindible a la carta náutica, y que publica

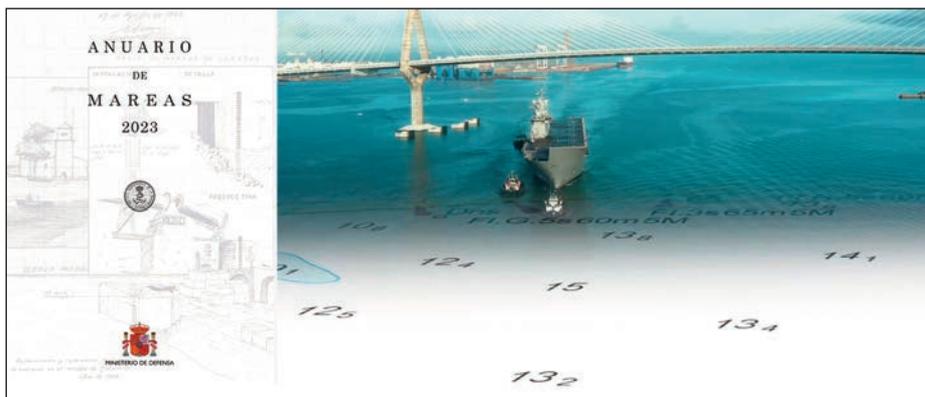


Figura 5. Para conocer el agua real que hay bajo la quilla en un instante cualquiera, se suma a la sonda de la carta la marea astronómica extraída del *Anuario* (más una estimación de la marea meteorológica). (Fuente: IHM)

todos los años el IHM para que el navegante pueda extraer el dato de altura de marea mediante las predicciones mencionadas y sumarlo a la sonda de la carta para calcular la profundidad en un instante cualquiera. El IHM es también responsable del dato de predicción de mareas oficial del Estado.

Sistema clásico de reducción de sondas

Tradicionalmente, en los trabajos hidrográficos se utilizan los datos de los mareógrafos para calcular el CH, conocer la altura del nivel del mar para reducir la profundidad instantánea obtenida y determinar las ondas de marea que se utilizarán para las predicciones publicadas en el *Anuario*. En el primer y tercer caso es necesario el despliegue del mareógrafo un año; para el segundo, la instalación se limita al tiempo en el que el levantamiento batimétrico tiene lugar.

La reducción de sondas al datum de la carta, utilizando el sistema clásico, consiste en restar a la sonda obtenida en tiempo real la marea en el mismo instante temporal registrada por el mareógrafo de referencia y reducida al cero hidrográfico (figura 6).

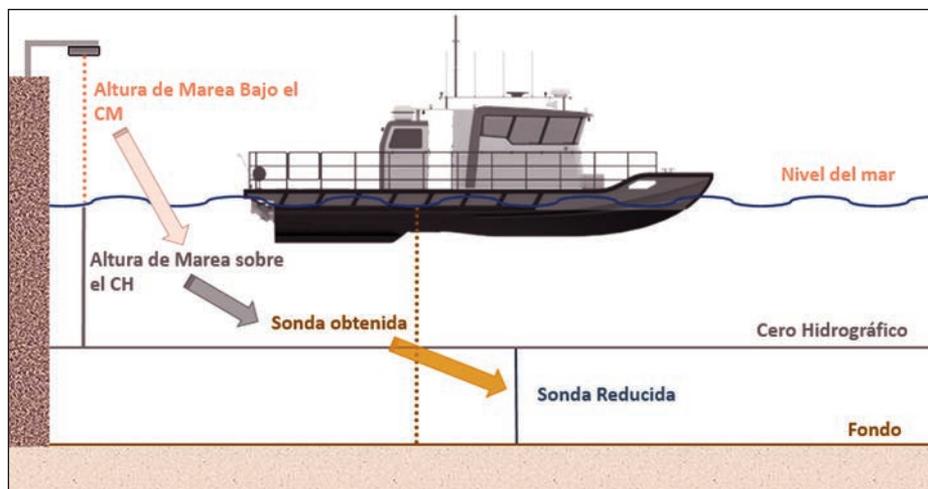


Figura 6. Esquema de reducción de sondas por el sistema clásico. Sonda de la carta obtenida al restar a la sonda obtenida la altura de marea de sobre el cero hidrográfico. (Fuente: IHM)

Cada CH es local y calculado como un valor independiente del resto de ceros hidrográficos, y queda únicamente ligado a su hito de referencia sin —por así decirlo— «mirar a los demás» (figura 7); como se ve, cuando se

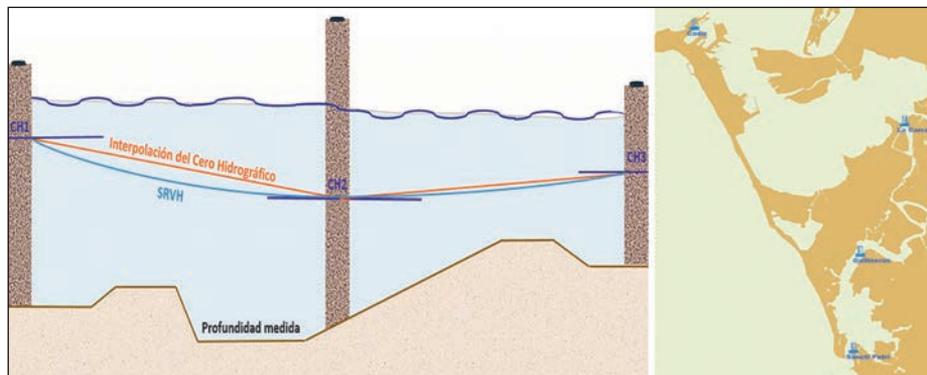


Figura 7. Ejemplo de la variación de las referencias CH en mareógrafos adyacentes. Como se ve, la ponderación no es aplicable en todas las zonas (bahía de Cádiz y zona exterior).
(Fuente: IHM)

están adquiriendo datos de sondas en áreas donde la marea va cambiando, se tienen que instalar varios mareógrafos. Para reducir sondas hay que hacer una aproximación, una media ponderada, dando más peso (inversamente proporcional a la distancia) a los datos del mareógrafo más cercano. Como se observa en el gráfico, a medida que nos alejamos de la estación aumentan los errores, cosa que se minimiza con la SRVH, como veremos en el punto siguiente.

Sistema de referencia vertical

El objetivo es materializar y unificar sistemas de referencia vertical de alturas en tierra y profundidades en la mar. Esto permite integrar en el mismo datum los datos de las sondas, de niveles del mar y de tierra, aumentar la eficiencia en el levantamiento hidrográfico y la comparación más sencilla de información procedente de diferentes bases de datos, como sondas, mareas en tiempo real, residuo meteorológico y alturas en tierra, lo que facilita, por ejemplo, los cálculos de cotas de inundación, evaluar los resultados de los dragados, etcétera.

Las alturas en tierra y las profundidades en el mar se han expresado tradicionalmente en relación con superficies de referencia verticales diferentes. En tierra, la referencia vertical es una «superficie equipotencial» o «geoide» y, en el caso de España, se utiliza el EGM08_RED NAP.

En el mar, como hemos visto, la adoptada por muchos países como datum de la carta es la marea astronómica más baja (LAT) como superficie de referencia de profundidad. Ambas tienen sentido. Para construir, por ejemplo, un dique, es conveniente utilizar un sistema de alturas en el que dos puntos de

igual altura se encuentren aproximadamente en la misma superficie plana. De hecho, esto implica que no hay flujo de agua entre estos puntos. El navegante, sin embargo, está interesado en la profundidad mínima del agua que puede esperar a lo largo de su ruta de navegación.

Pero muchas aplicaciones requieren la combinación de datos de altura (tierra) y profundidad (mar), como la evolución del nivel del mar, la evaluación del impacto de inundaciones y la gestión de zonas costeras. La combinación de datos de diferentes procedencias requiere establecer la relación de variación espacial entre ambos tipos de superficies de referencia verticales. Esta relación sólo se conocía en las ubicaciones de los mareógrafos. La metodología desarrollada permite establecer la separación entre las tres referencias verticales: el elipsoide materializado por el ETRS 89, el geode y la SRVH en todas las áreas de responsabilidad española.

Esto se ha conseguido con la utilización de un modelo hidrodinámico disponible en la plataforma Copernicus (EU), que reproduce niveles de agua relativos con respecto a un nivel arbitrario; la metodología de ajuste la vere-



Figura 8. Mareógrafos de referencia. (Fuente: IHM)

mos en el siguiente punto. Podemos definir la SRVH como una superficie continua de todas las aguas de jurisdicción española, que asigna a cada punto del espacio acuático un valor de altura elipsoidal que constituye la referencia cero para las profundidades.

Metodología para el cálculo de la SRVH

La metodología utilizada ha ahorrado largas y costosas observaciones en la mar. El cálculo de la SRVH se ha basado en la determinación del CH (LAT) en cada nodo, a partir de datos de modelos hidrodinámicos y de reanálisis disponibles en la plataforma Copernicus (EU), ajustados con información geodésica del IGN y con las alturas elipsoidales u ortométricas (dependiendo de si la referencia es el ETRS 89 o el EGM08-REDNAP) de los CH disponibles en la base de datos de mareas del IHM. Los detalles de la metodología y el análisis de los resultados se muestran en los estudios de González, *et al.* (2021 y 2022). Los resultados se muestran en la figura 9.

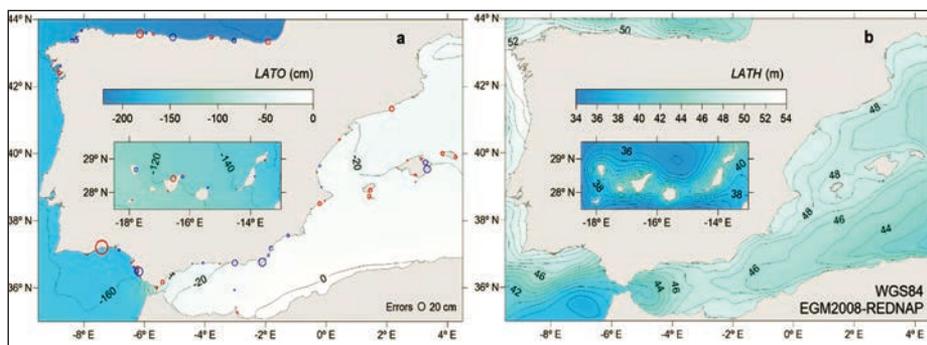


Figura 9. SRVH referida al geode (izquierda) y al elipsoide (derecha). (Fuente: IHM)

A partir de aquí, se efectuó un proceso de revisión, armonización y homogeneización de los datos de mareas en todas las estaciones disponibles para escoger una muestra lo más uniforme posible de los datos de mareas en época y período. Se realizaron medidas elipsoidales de los CH de los mareógrafos que faltaban y se hizo la validación costera del modelo mediante comparación con los datos aportados por los mareógrafos de control. Se materializa una SRVH que se utiliza en las campañas hidrográficas, como veremos en siguientes puntos, con unos resultados que mejoran mucho los del método clásico.

El referenciado de los niveles respecto al elipsoide se llevó a cabo a partir de las ondulaciones del geode (N) proporcionadas por el modelo de geode EGM08-REDNAP del IGN (www.ign.es), con una resolución espacial de 1' de

arco (figura 10). Finalmente, los resultados se validaron mediante la comparación de las diferencias entre niveles medios y mínimos con los valores proporcionados por el IHM para los puertos principales, así como los valores absolutos de altura elipsoidal del CH (AECH) a partir de medidas del IHM.

Desarrollo de la sensórica del proyecto

Para continuar el proyecto, fue necesario poner en marcha una nueva generación de equipos de monitorización del nivel del mar de alta precisión, que instalados en boyas

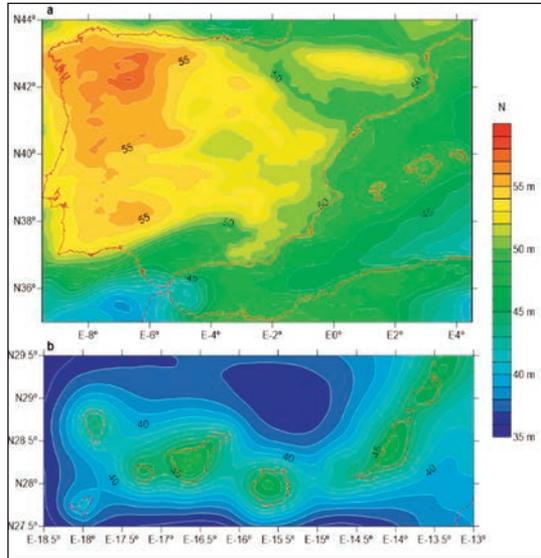


Figura 10. Campos de ondulación del geode (N) del modelo EGM08-REDNAP para la península ibérica (a) y las islas Canarias (b). (Fuente: IHM)

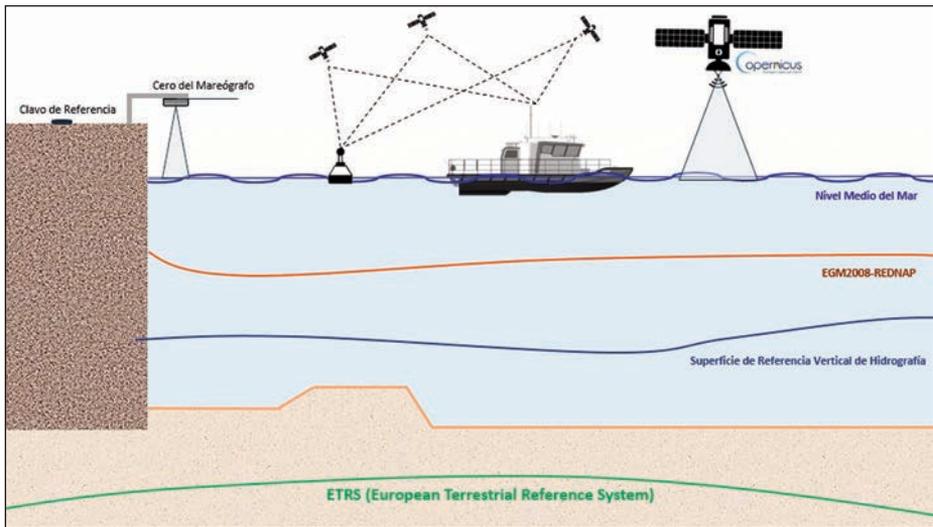


Figura 11. Representación de las distintas referencias verticales y la sensórica utilizada. (Fuente: IHM)

y utilizando técnicas GNSS con procesados automáticos RTK y PPK, efectúen mediciones del nivel del mar en aguas someras y profundas, que permitan, además de las medidas del nivel del mar, validar y ajustar el modelo hidrodinámico para la materialización de la SRVH en estas zonas mar adentro. Para la zona costera se ha densificado la red con mareógrafos acústicos con referenciación GNSS, como se describe a continuación.

A partir de 2020 el IHM, a través de una asistencia técnica la empresa Deep Insight SL, una *spin off* de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), ha desarrollado y probado equipos de bajo coste pero alta precisión de monitorización del nivel del mar, con técnicas GNSS para su instalación en boyas y mareógrafos referidos al elipsoide en tiempo real con GNSS.

Aquéllos que actúan como mareógrafos en una instalación fija se han llamado DeepWaves. Este instrumento está basado en la plataforma de adquisición y control DeepCore, de desarrollo propio. El equipo DeepWaves-RTK es un sistema de monitorización integrado de alta demanda, que permite la adquisición, gestión, almacenamiento y transmisión inalámbrica de variables oceanográficas, como la agitación local, la onda larga y el nivel del mar (mareas), mediante su instalación en líneas de atraque y amarre, muelles o diques. Para la medición de agitación local y nivel del mar, integra sensor de ultrasonidos con compensación de medida por temperatura, con el que se obtienen estos datos con precisión milimétrica, y un sistema de posicionamiento GNSS de alta precisión para una correcta referenciación del equipo a partir del módulo de geolocalización basado en un receptor GNSS multifrecuencia y multiconstelación (GPS-GLONASS-Galileo-BeiDou) que permite obtener un posicionamiento 3D con precisión centimétrica mediante procesamientos RTK/PPK. Con esta metodología se obtiene una referencia de alta precisión para la medida de la variables oceanográficas, que pueden configu-

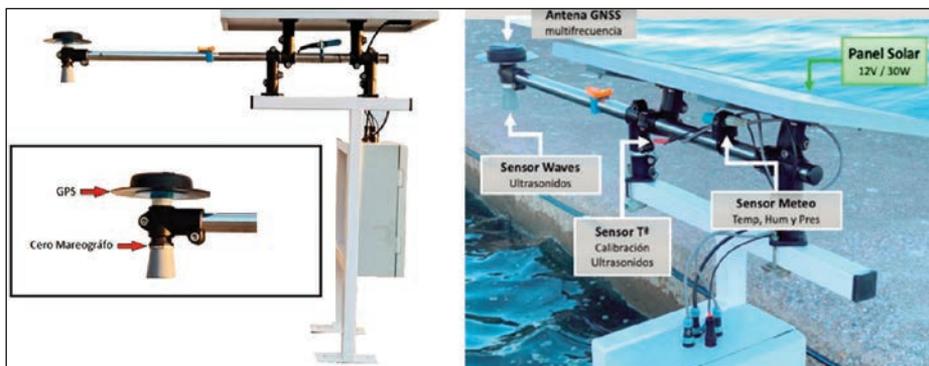


Figura 12. Esquema del mareógrafo DeepWaves-RTK, donde se puede ver que, al disponer de antena GNSS sobre la antena, los datos del mar no están influidos por los movimientos terrestres. (Fuente: Deep Insight-IHM, 2022)

rarse según la aplicación (mareas, oleaje, monitorización; detección de tsunamis...).

Por último, combina la adquisición de dichas variables oceanográficas con la integración de una pequeña estación meteorológica que permite la obtención de información mediambiental: temperatura, humedad y presión atmosférica.

El equipo ha sido validado por el Departamento de Geodesia y Oceanografía del IHM, mediante comparativas directas con equipos de medida de nivel del mar de tecnología radar en zonas de monitorización controladas.

El equipo DeepMotion-RTK es un sistema de monitorización integrado de alta demanda, que permite la adquisición, gestión, almacenamiento y transmisión inalámbrica de variables inerciales y posicionamiento GNSS, constituyendo un sistema de orientación absoluta de alta precisión en el espacio tridimensional. Al igual que DeepWaves, se basa en la plataforma de adquisición y control DeepCore, con capacidad de transmisión y gestión del dato en tiempo real.

Implementa el modelo GEO IoT, que combina geolocalización multifrecuencia y multiconstelación (GPS-GLONASS-Galileo-BeiDou), proporcionando un posicionamiento 3D con precisión centimétrica, mediante técnicas de posprocesado cinemático (PPK) y de cinemática en tiempo real (RTK), y un sistema inercial (IMU) que integra acelerómetros, giróscopos y magnetómetro de alta precisión para dar una respuesta conjunta del movimiento del



Figura 13. Instalación del equipo DeepMotion en boyas de propiedad del IHM durante las pruebas de validación de los equipos. (Fuente: Deep Insight-IHM, 2022)

equipo. Permite configurar distintos modos de funcionamiento en función de los requerimientos de la aplicación.

También a través de esa misma empresa se ha efectuado la programación del sistema de oceanografía operacional GuAPETON (*Global Acquisition Platform for mETOcean Networks*) para la integración de los datos de esta nueva generación de equipos. Esta plataforma permite la gestión de los equipos y la visualización, publicación y explotación de datos brutos y procesados mediante sistemas automáticos de análisis y procesamiento. Constituye una herramienta global que facilita la labor del IHM en la materialización de la

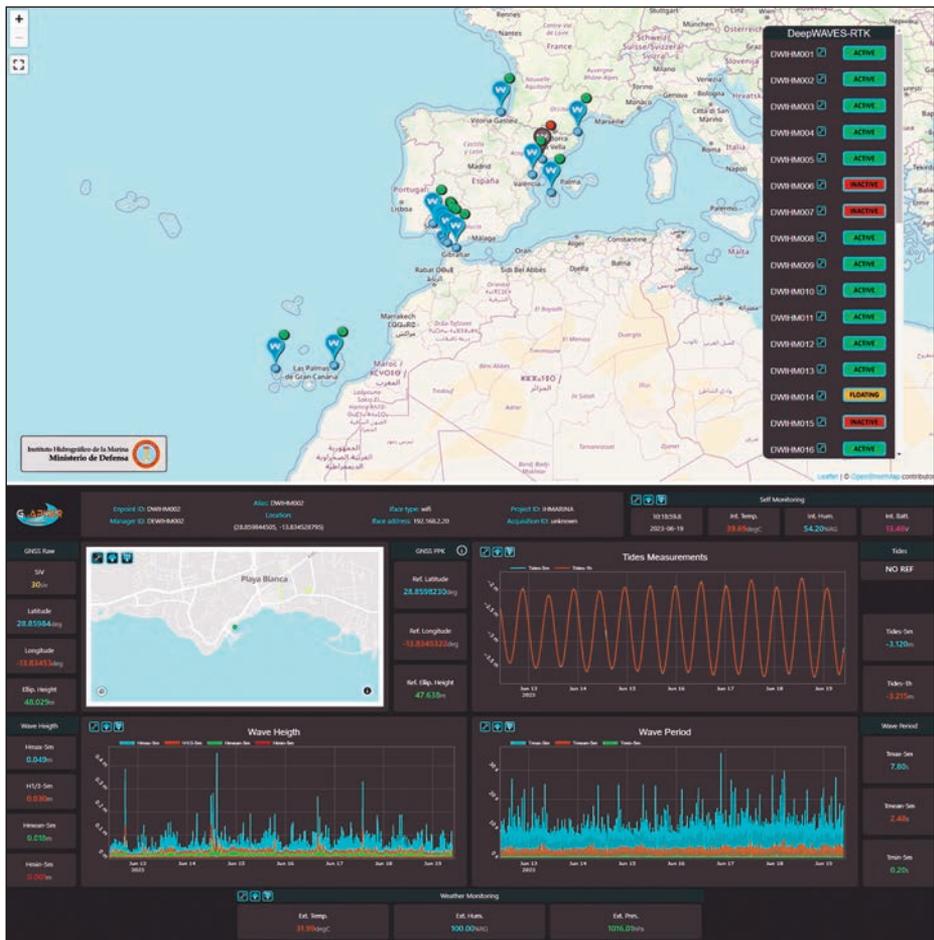


Figura 14. Sistema de oceanografía operacional GuAPETON.
(Fuente: Deep Insight-IHM, 2022)

SRVH y la utilización de los datos en tiempo real para las campañas hidrográficas.

En el año 2021 se comenzó un proceso de densificación costera de mareógrafos permanentes de control y despliegue de equipos en las zonas de trabajos de las unidades hidrográficas utilizando estas nuevas tecnologías, efectuando además la medición de alturas elipsoidales de los ceros hidrográficos en toda la península y las islas. En un futuro próximo, se espera su inclusión en la red europea de monitorización del nivel del mar de Copernicus. En la siguiente figura, se presenta la localización de la densificación de los mareógrafos del IHM en territorio español, que complementa las de otras instituciones.

Este programa no sólo proporciona la disposición de los mareógrafos, sino que facilita el acceso y descarga del registro de marea y de oleaje, así como su posición exacta, el histórico de los sensores acoplados de la estación meteorológica (temperatura, presión y humedad ambiental) y su monitorización interna para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, los movimientos verticales de la Tierra constituyen una contribución importante a la señal en los registros del nivel del mar, y como éste hasta ahora era relativo a una marca o clavo de referencia en Tierra y dado que ésta se mueve a su vez debido a procesos tectónicos, geológicos o como consecuencia de la actividad humana, para corregir este movimiento ha de ser cuantificado para poder separar la variación del nivel del mar absoluto del terrestre, para lo que se ha incluido un sensor GNSS sobre la antena acústica de medición de mareas. Esto es un gran avance para la monitorización del nivel del mar a largo plazo.

Durante 2022 se hicieron las pruebas de validación de los equipos GNSS de monitorización del nivel del mar mediante su instalación en boyas. Éstas fueron desplegadas durante 2021 en la Base Naval de Puntales y en 2022 en Rota, evaluando su comportamiento con condiciones de oleaje superiores.

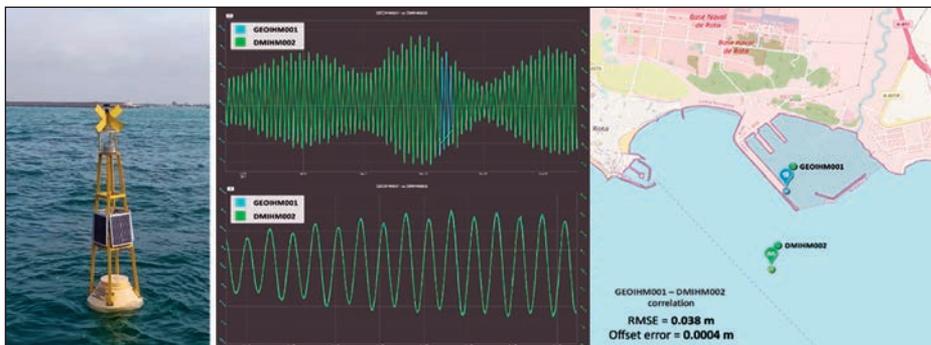


Figura 15. Boya GNSS en aguas abiertas de Rota. Comparativa con el mareógrafo de Rota ajustada a nivel medio. (Fuente: Deep Insight-IHM, 2022)

Un objetivo en el futuro es la validación del modelo SRVH en aguas profundas; para ello, es fundamental la instalación de equipos DeepMotion en el mayor número de boyas posibles. El procedimiento sería comparar la onda teórica del punto —calculada por el procedimiento descrito— con los datos registrados por la boya. Los equipos podrán desplegarse en boyas de Puertos del Estado y de otras instituciones, como el Sistema de Observación y Predicción Costero de las Islas Baleares (SOCIB), para estudiar la conveniencia de ampliar su uso para la monitorización del nivel del mar a largo plazo.

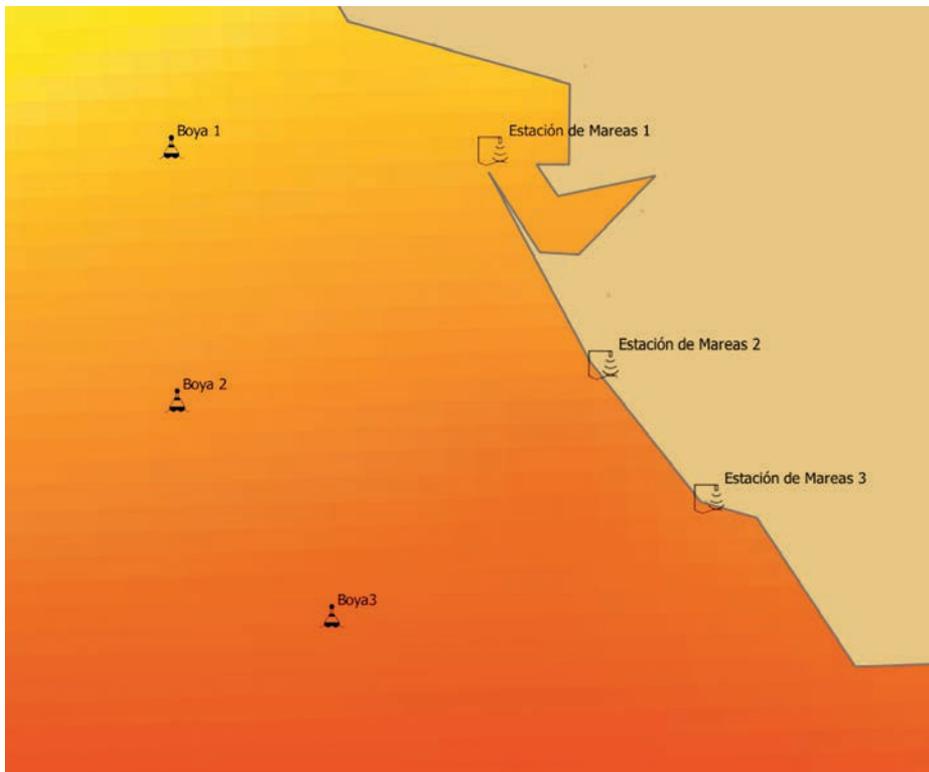


Figura 16. Validación del modelo en aguas costeras mediante mareógrafos y en aguas profundas con equipo DeepMotion en boyas. (Fuente: IHM)

En marzo de 2021 se crea el Subgrupo de Altimetría, liderado por el IHM, en el seno de la Comisión Especializada del Sistema Geodésico (CESG), dependiente de la Comisión Territorial del Consejo Superior Geográfico, cuya labor es establecer la relación entre el Sistema de Referencia Vertical para hidrografía (SRVH) con el Sistema de Referencia Geodésico Vertical (terrestre).

Este subgrupo —que cuenta con representantes del IGN, IHM, SOCIB, Puertos del Estado, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de Salamanca, Universidad de Castilla-La Mancha— se encarga de estudiar y analizar la definición final de los formatos y las herramientas para que los usuarios y organismos que usen referencias verticales náuticas y terrestres puedan relacionarlas a partir de la SRVH con la superficie de referencia de altitudes que proporciona el IGN (geoide EGM08-REDNAP).

Estos trabajos están contemplados en el programa de actuación de la Comisión Especializada del Sistema Geodésico (CESG) del Consejo Superior Geográfico y en el Plan Cartográfico Nacional 2021-2024.

Reducción de sondas con técnicas GNSS-SRVH

Cuando se han empezado a utilizar los sondadores de última generación, cuya resolución vertical en aguas muy someras es de apenas unos centímetros,

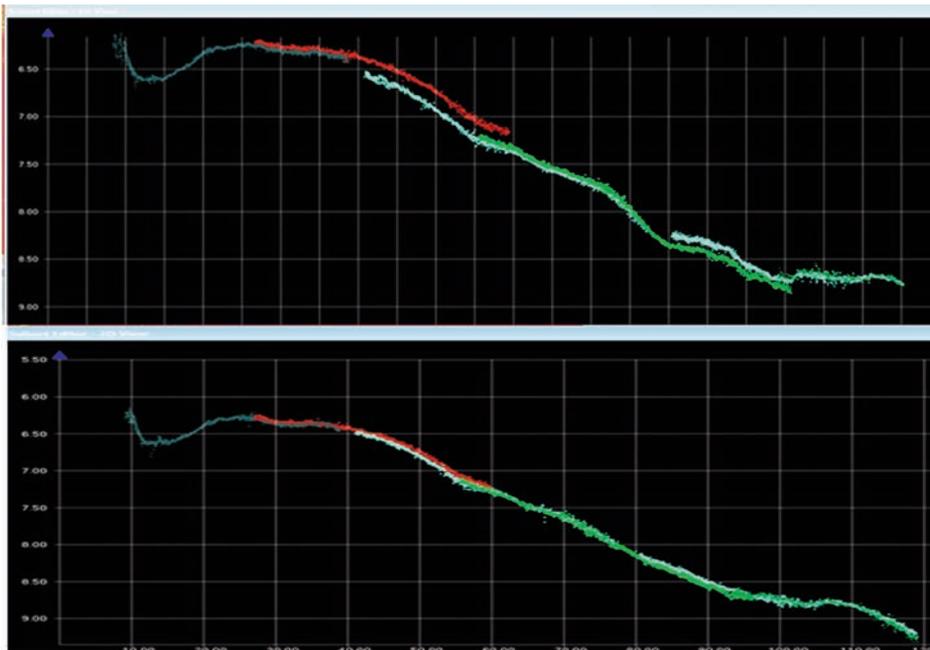


Figura 17. Arriba hay un ejemplo de la variación de las líneas adyacentes, donde se observa que no hay coherencia vertical en líneas adyacentes levantadas por sistema clásico. Abajo, ejemplo de continuidad de las líneas adyacentes, en el que se aprecia que hay mejor coherencia vertical al tener menor incertidumbre propagada por la suma de *heave*, marea y calado dinámico en los trabajos con GNS-SRVH. (Fuente. IHM)

la incertidumbre total propagada en la posición vertical de la sonda se aprecia en las líneas adyacentes (figura 17). Ninguna medida es exacta y cada medición contiene cierta incertidumbre, de manera que no es posible obtener empíricamente un valor verdadero de cada sonda. La mayor incertidumbre propagada viene dada por la suma de *heave*, marea y calado dinámico. Cuando utilizamos el sistema clásico se estiman estos errores. Las mareas van variando a medida que nos vamos alejando de los mareógrafos, y el calado dinámico depende de la velocidad, de la variación del peso (como gasto de combustible) y su distribución en la embarcación a lo largo del tiempo de sonda.

A continuación (figura 18) vemos un modelo estadístico de la incertidumbre vertical de la sonda (TVU) del sistema MBES Reson T20-P en profundidades de 10 m con posicionamiento vertical referido al elipsoide. Se observa que la incertidumbre (error aleatorio) total propagada (línea morado claro) es de aproximadamente cinco centímetros en el nadir y aumenta progresivamente

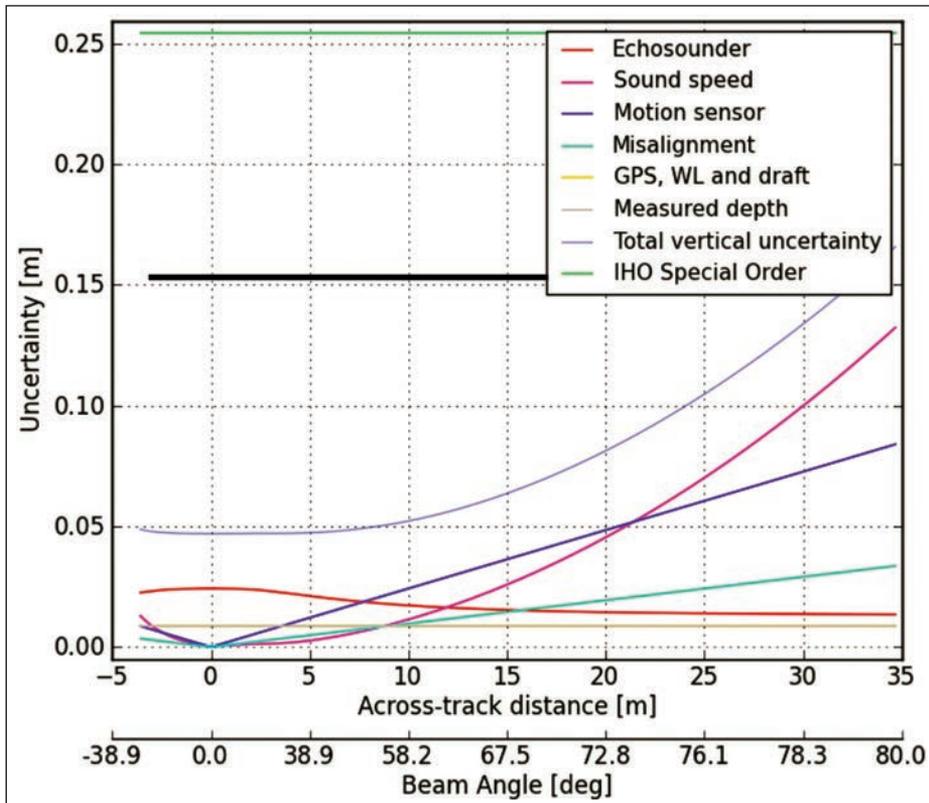


Figura 18. Incertidumbre vertical de la sonda (TVU) y sus límites. (Fuente: IHM)

hasta diez a 75 grados de elevación (correspondientes a 24 m de separación lateral). La línea verde horizontal superior indica el límite máximo asumible en un levantamiento de orden especial (algo más de 25 cm), y en orden exclusivo, representado por la línea negra, algo más de 15 centímetros.

Los avances en el campo de la altimetría y el posicionamiento satelital hacen ya posible el uso operativo de técnicas RTK y PPK en los trabajos hidrográficos para extraer con precisión la altura de marea instantánea, puesto que los equipos GNSS son capaces de medir en tiempo real la altura elipsoidal del nivel instantáneo del mar (AENM) con las precisiones exigidas por la OHI. La utilización de esta tecnología permite eliminar el uso de mareógrafos para calcular el dato de marea, con la ventaja adicional de ser más preciso por el hecho de calcular el nivel del mar sobre el CH en el punto donde realmente se está midiendo la profundidad y no en el lugar de instalación de la estación de mareas.

Por esta razón, la OHI recomienda a los Estados el desarrollo de modelos de SRVH en sus costas para aplicarlos a los trabajos de batimetría, como se explica de forma simplificada a continuación.

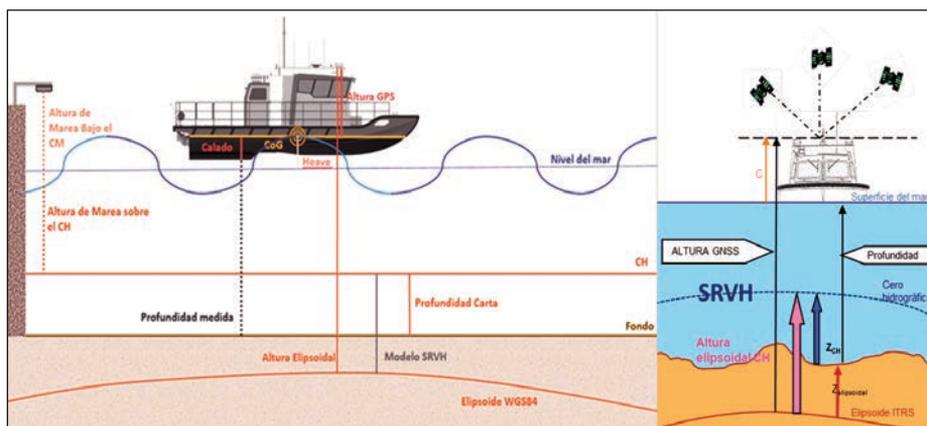


Figura 19. Esquema de la reducción de sondas con técnicas GNSS. (Fuente: IHM)

En la figura 19 (derecha) se observa que la sonda reducida al CH (Z_{CH}), que es la que aparece en la carta, se puede calcular a través de la fórmula:

$$Z_{CH} = AE_{CH} - Z_{\text{elipsoidal}},$$

donde la altura elipsoidal del CH (flecha rosa) se deriva del modelo SRVH y la $Z_{\text{elipsoidal}}$ es la altura elipsoidal del fondo (representada en rojo). Siendo C

la distancia desde la antena GNSS y la superficie del mar, la $Z_{\text{elipsoidal}}$ se calcula de la siguiente fórmula:

$$Z_{\text{elipsoidal}} = \text{Altura GNSS} - \text{C} - \text{Profundidad}$$

Beneficios y aplicaciones al medio ambiente marino y costero

Además de su evidente utilidad para la navegación y su aplicación directa en cuanto a las disciplinas de Hidrografía, Geografía y Geodesia, la SRVH desarrollada presenta un enorme potencial de cara a la investigación científica y a la gestión de ambientes marinos costeros. El procesado y análisis de datos llevado a cabo durante su desarrollo (González, *et al.*, 2021) ofrecen una valiosa información en cuanto a las variaciones de nivel del mar en las aguas de la península ibérica y las islas Canarias, cubriendo distintas escalas temporales desde el corto al largo plazo (González, *et al.*, 2022):

1. Corto plazo (horas-días): marea astronómica. El análisis de los campos de elevación del nivel del mar de cara a establecer la bajamar máxima para la SRVH, ajustados con los datos experimentales de la red de mareógrafos del IHM, ha proporcionado las cartas de marea que permiten su predicción fiable en cualquier punto de las zonas consideradas. A partir de ellas, el IHM está actualmente desarrollando un modelo de marea astronómica para la península y Canarias de cara a su inclusión en la cartografía náutica electrónica según los últimos requerimientos de la OHI. Dicho modelo también tiene aplicación en la reducción («eliminación») de la marea en datos de altimetría marina por satélite, presentando una mayor resolución espacial e incluyendo más efectos de marea que los modelos más frecuentemente utilizados para ello hasta la fecha. Esta reducción de la marea es necesaria para el estudio de los cambios de nivel relacionados con el clima y su evolución a medio y largo plazo.
2. Medio plazo (meses): «marea radiacional», o sea, los cambios periódicos de nivel del mar debidos no a la gravedad del Sol y de la Luna, sino a los efectos asociados a la radiación solar que repercuten en cambios de nivel del mar: presión atmosférica (las bajas presiones aumentan el nivel, y viceversa), calentamiento del agua (implica expansión y por tanto subida de nivel), vientos (de gran importancia local), etc. Durante la elaboración de la SRVH, se encontró una importante presencia de la marea radiacional de períodos semianual y anual, que en aguas mediterráneas puede sobrepasar el efecto de la marea astronómica, y cuyo origen parece estar relacionado con las oscilaciones en el balance hídrico (diferencia entre los aportes y las pérdidas de

agua) del mar Mediterráneo. Se han elaborado las cartas de marea radiacional (figura 20a) que permiten una predicción más exacta, también de gran utilidad para la reducción de la marea en estudios climáticos.

3. Medio-largo plazo (años): cambios interanuales del nivel medio. El establecimiento del nivel medio del mar (NMM) constituyó una etapa crucial en el desarrollo de la SRVH de cara a referenciarla verticalmente. Se detectó una acusada variación de nivel medio a lo largo de los años en todo el dominio de interés, que se ve también reflejada en los datos experimentales de mareógrafos (figura 21b). Las causas principales de estas oscilaciones del NMM resultan ser variaciones a gran escala de los sistemas ciclónicos y anticiclónicos en el Atlántico Norte, reflejados a través del índice NAO (*North-Atlantic Oscillation*: refleja las diferencias de presión atmosférica entre Lisboa y Reikiavik), de gran importancia en cuanto a estudios climáticos.
4. Largo plazo (décadas): tasas de aumento del nivel medio. En el mismo contexto que el punto anterior, los análisis de los campos de NMM

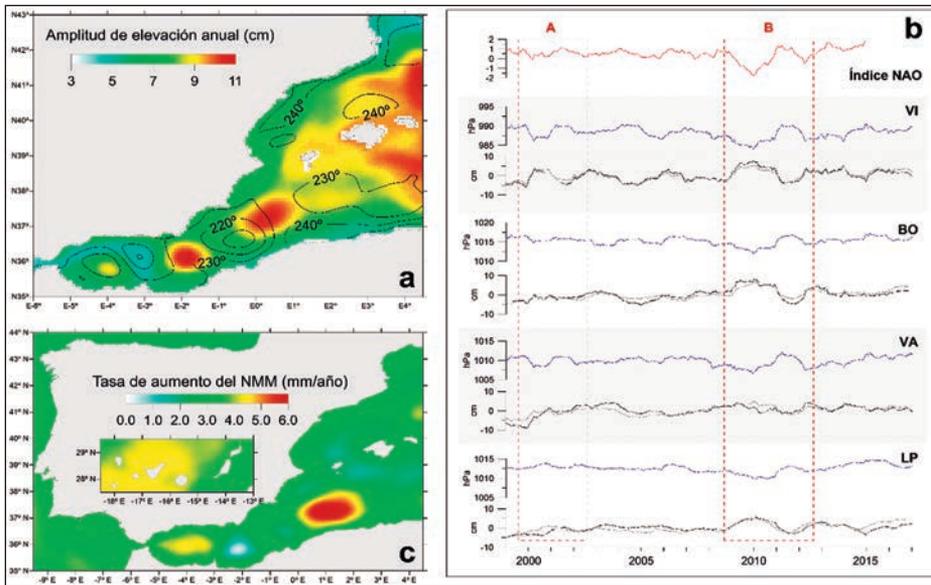


Figura 20. (a) Cartas de amplitud (color) y fase (isolíneas) de la marea radiacional anual en la zona mediterránea; (b) comparativa interanual entre el índice NAO (línea roja), la presión atmosférica (azul) y el NMM (negro: experimental; gris: modelo) en distintas estaciones (VI: Vigo; BO: Bonanza; VA: Valencia; LP: Las Palmas de Gran Canaria); se resaltan dos episodios de oscilación media (A) y alta (B); (c) tasas de aumento del NMM durante el período 1999-2018 en los dominios peninsular y canario. (Fuente: IHM)

también revelaron una tasa de aumento a lo largo de las dos décadas de la serie de estudio en todo el dominio de interés, de nuevo en consonancia con los datos experimentales (figura 21c). Este aumento del NMM es del orden de tres o cuatro centímetros por década en las costas españolas, y su origen parece ser el calentamiento global que se viene observando en el clima terrestre durante los últimos dos siglos. Tener disponible esta información de amplia cobertura y alta resolución espacial resulta de gran utilidad para la evaluación, estudio y gestión de los cambios de NMM y sus efectos en las costas españolas.

Toda esta información sobre las variaciones del nivel del mar proporcionadas por el desarrollo de la SRVH, cubriendo diversas escalas temporales y fenómenos (marea, meteorología, clima), constituye un recurso de muy alto valor de cara a enfrentar y gestionar episodios extremos y catastróficos en zonas litorales de la costa española: inundaciones, temporales, tsunamis, etc., así como efectos más sutiles por ser a más largo plazo, pero de gran impacto natural y humano, como aumentos sostenidos del nivel medio del mar y cambios en la geomorfología costera. Su utilidad en cuanto a la conservación y gestión de puertos, playas, marismas y otros ambientes costeros españoles resulta pues evidente.

Otras aplicaciones

Integrar en la misma referencia los datos de batimetría y de altimetría en tierra facilita la elaboración de perfiles de playa para apoyo a las operaciones anfibas y sirve también de soporte a los modelos meteorológicos y oceanográficos necesarios para predecir las condiciones medioambientales, al conocer la correspondencia entre los niveles verticales terrestres y marítimos en la zona. También se puede integrar en sistemas de mando y control de defensa, permitiendo aumentar su precisión al incorporar capacidades que ahora no podrían tener, como que todas las plataformas tengan la misma referencia.

Además, son útiles para las operaciones portuarias al permitir el establecimiento exacto de las alturas de marea real instantánea en cada punto con técnicas GNSS, mejorando la explotación de los puertos. El modelo ayuda a predecir la sonda bajo la quilla a la hora de paso por un área o en pronosticar la hora óptima para empezar labores de refluotación de buques encallados; en general, en aquéllos en los que sea útil contar con un sistema de referencia regional común para tierra, mar y aire gestionable en tiempo real y basado en técnicas GNSS; también para otros de ingeniería que requieran el establecimiento de una referencia estándar hidrográfica y relacionada con la referencia

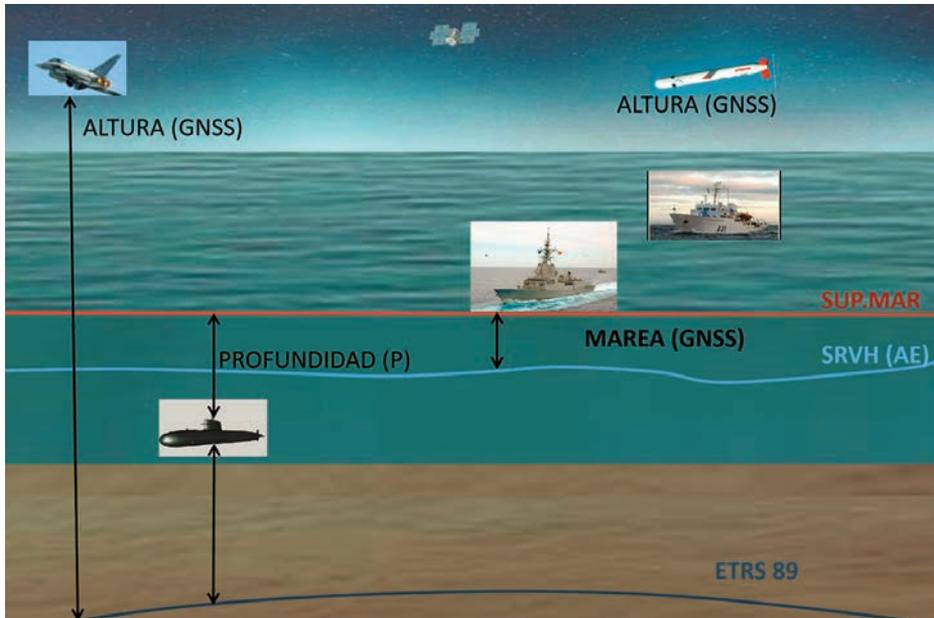


Figura 21. Integración de referencias para el desarrollo de sistemas de información geográfica de mando y control de defensa. (Fuente: IHM)

terrestre sin necesidad de cálculos previos, en particular en zonas costeras y en la interfase tierra-mar (dragados, batimetrías de apoyo en obras portuarias, gestión de las zonas costeras...).

Conclusiones

Las mejoras que recientemente se han logrado en el cálculo de altura del nivel del mar con técnicas GNSS en tiempo real han supuesto que muchos servicios hidrográficos hayan desarrollado modelos de referencia hidrográfica en las aguas de su jurisdicción, como es el caso de España. Esto permite, además de simplificar los trabajos hidrográficos, utilizar una referencia común para las alturas terrestres y las profundidades, lo que tiene múltiples aplicaciones, según se ha descrito en los puntos anteriores.

Además, la SRVH puede resultar de gran utilidad para desarrollos de aplicaciones de información geográfica integrables en sistemas de mando y control de defensa, o bien para cualquier otro propósito científico o técnico en el que una estandarización de los valores del nivel del mar o una relación de las profundidades con la altimetría terrestre y aérea sea importante.

En un futuro próximo, se espera la inclusión de todo este equipamiento en la red europea de monitorización del nivel del mar Copernicus, que complementa a las del resto de instituciones y da un gran valor añadido a la red de oceanografía operacional española.



BIBLIOGRAFÍA

- ESPINOSA GONZÁLEZ-LLANOS, S.; TORRES GARCÍA, J. R.; BERNÁRDEZ RODRÍGUEZ, P.; QUIJANO DE BENITO, J. M. (2018): «Elaboración de una superficie de referencia hidrográfica en las aguas españolas. Aplicaciones cartográficas y en sistemas de información geográfica». VI Congreso Nacional de I + D en Defensa y Seguridad.
- GONZÁLEZ, C. J.; TORRES GARCÍA, J. A.; BERNÁRDEZ RODRÍGUEZ, P.; RAMOS, R. J. (2021): «Validation and application of model/reanalysis sea-level data to the establishment of the reference hydrographic Surface in Spanish waters». *Journal of Operational Oceanography*, <https://doi.org/10.1080/1755876X.2021.1902681>
- GONZÁLEZ, C. J.; TORRES, J. R.; QUIJANO, J. M. (2022): «‘Collateral benefits’ from the development of the Spanish Vertical Reference Surface for Hydrography: deepening into the knowledge on sea-level changes». 7.^a Jornadas de Engenharia Hidrográfica; 2.^a Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia, pp. 29-32. Instituto Hidrográfico, Lisboa. ISBN: 978-989-705-164-7.
- QUIJANO, J. M.; GONZÁLEZ, C.; RODRÍGUEZ, A. (noviembre de 2022): «Estado del proyecto de desarrollo de un modelo para la materialización de una Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica». 10.^a Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Toledo.