

Manuales y guías 14

Comisión Oceanográfica Intergubernamental

Manual de medición e interpretación del nivel del mar Medidores de radar

Volumen **V**

**Manual de medición e
interpretación del nivel del mar
Medidores de radar**

Volumen **V**

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición de parte de los Secretariados de la UNESCO o de la COI en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.

Equipo editorial:

Philip L. Woodworth (Director del equipo editorial, NOC, Reino Unido)
Thorkild Aarup (COI, UNESCO)
Gaël André, Vincent Donato y Séverine Enet (SHOM, Francia)
Richard Edwing y Robert Heitsenrether (NOAA, Estados Unidos)
Ruth Farre (SANHO, Sudáfrica)
Juan Fierro y Jorge Gaete (SHOA, Chile)
Peter Foden y Jeff Pugh (NOC, Reino Unido)
Begoña Pérez (Puertos del Estado, España)
Lesley Rickards (BODC, Reino Unido)
Tilo Schöne (GFZ, Alemania)

Contribuidores al Suplemento: Experiencias Prácticas:

Daryl Metters y John Ryan (Coastal Impacts Unit, Queensland (Australia))
Christa von Hillebrandt-Andrade (NOAA, Estados Unidos), Rolf Vieten, Carolina Hincapié-Cárdenas y Sébastien Deroussi (IPGP, Francia)
Juan Fierro y Jorge Gaete (SHOA, Chile)
Gaël André, Noé Poffa, Guillaume Voineson, Vincent Donato, Séverine Enet (SHOM, Francia) y Laurent Testut (LEGOS, Francia)
Stephan Mai y Ulrich Barjenbruch (BAFG, Alemania)
Elke Kühmstedt y Gunter Liebsch (BKG, Alemania)
Prakash Mehra, R. G. Prabhudesai, Antony Joseph, Vijay Kumar, Yogesh Agarvadekar, Ryan Luis, M. Soumya, Bharat Harmalkar y Devika Ghatge (NIO, India)
Hironori Hayashibara (JMA, Japón)
Ruth Farre (SANHO, Sudáfrica)
Begoña Pérez (Puertos del Estado, España), Diana López y José María Cortés (SIDMAR, España), y Bernat Puyol (IGN, España)
Jeff Pugh, Peter Foden, Dave Jones, Philip Woodworth y Angela Hibbert (NOC, Reino Unido)
Travis Mason (Observatorio Costero del Canal, Reino Unido) y Robin Newman (Fugro EMU Ltd., Reino Unido)
Richard Edwing y Robert Heitsenrether (NOAA, Estados Unidos)
Janice M. Fulford (USGS, Estados Unidos)

También aportaron información Les Bradley (NOC, Reino Unido), Pat Caldwell y Mark Merrifield (UHSLC, Hawái (Estados Unidos)), Médéric Gravelle y Guy Wöppelmann (Universidad de La Rochelle, Francia), Lonny Hansen, Vibeke Huess y Klavs Allerslev (Instituto Meteorológico de Dinamarca), y Belén Míguez Martín (EMODnet, Ostende (Bélgica)). Además, cabe dar las gracias a Christoph Blasi (BAFG, Alemania), John Boon (Estados Unidos), John Broadbent (Maritime Safety, Queensland (Australia)), Peter Devine (Director Técnico, VEGA Controls Ltd., Reino Unido), Terry Edwards (Director Técnico, RS Aqua Ltd., Reino Unido) y Øistein Grønlie (Asesor Técnico Superior, Miros, Noruega).

El equipo editorial también expresa su agradecimiento a Christoph Blasi (BAFG, Alemania), John Boon (Estados Unidos), John Broadbent (Maritime Safety, Queensland, Australia), Peter Devine (Technical Director, VEGA Controls Ltd., Reino Unido), Terry Edwards (Technical Director, RS Aqua Ltd., Reino Unido) y Øistein Grønlie (Senior Technical Advisor, Miros, Noruega).

Diseño de la publicación: Ahmad Korhani, UNESCO. Diseño original: Eric Loddé.

Con fines bibliográficos este document debe ser citado como sigue:

Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, Volume V:
Radar Gauges. Paris, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. 104 pp.
(IOC Manuals and Guides No.14, vol. V; JCOMM Technical Report No. 89 (English)
Este document tiene un Suplemento denominado Experiencias Prácticas.

Impreso en 2016

Por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP
© UNESCO 2016

Impreso en Francia

Prefacio

El Manual de medición e interpretación del nivel del mar de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) se publicó por primera vez en 1985 y, tras el lanzamiento del segundo volumen un decenio más tarde, se reimprimió la primera edición con el título Volume 1: Basic Procedures.¹ A mediados de los años 80, la mayor parte de los mareógrafos aún consistían en dispositivos con cilindros de amortiguación y flotadores que representaban las curvas de las mareas mediante trazo de estilete en un registro de cartas. La primera parte del volumen 1 presentaba los fundamentos de las ciencias del nivel del mar y continuaba con los aspectos prácticos de la selección de una estación adecuada para el mareógrafo. Después explicaba con detalle cómo instalar y mantener un mareógrafo de flotador. Las secciones siguientes describían cómo digitalizar las cartas en papel e identificar diversos tipos de errores, con el fin de obtener una serie temporal del nivel del mar que se pudiese filtrar para proporcionar a los científicos y a otros usuarios interesados la información necesaria sobre el nivel medio del mar y la marea. Una sección posterior examinaba los mecanismos para el intercambio de datos. Además, se mencionaban brevemente otros tipos de mareógrafos (es decir, medidores de presión de burbuja) y métodos para el almacenamiento electrónico de datos del nivel del mar, en lugar de cartas en papel, para el “control remoto”.

Un decenio más tarde, en 1994, se publicó el segundo volumen del manual, titulado *Emerging Technologies*. Este volumen analizaba otra vez los mareógrafos de flotador y de presión, pero también introducía un método nuevo para medir el nivel del mar por medio de la reflexión de un pulso acústico emitido por un transductor instalado sobre el agua. Un tipo de mareógrafo acústico, basado en el transductor Aquatrak, se convirtió prácticamente en el sistema normalizado del programa del Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar (GLOSS) de la COI, después de haber sido adoptado y utilizado en diversas estaciones de Estados Unidos de América, Australia y otros países. Este volumen también examinaba cómo registrar los datos en formato electrónico para transmitirlos por líneas telefónicas

o satélites a un centro y describía varios métodos de procesamiento de datos, así como el papel de diferentes centros de medición del nivel del mar.

El volumen 3 se publicó en 2002 con el subtítulo *Reappraisals and Recommendations as of the Year 2000*. En él se revisaban los dispositivos de flotador, los de presión y los acústicos, y por primera vez se mencionaban los “mareógrafos de radar y otras nuevas tecnologías” en media página. Se analizaban de nuevo los métodos de transmisión e intercambio de datos. Los volúmenes 2 y 3 cubrían aspectos similares, aunque los firman autores distintos, y resulta útil leerlos de manera combinada.

El volumen 4 se publicó en 2006 bajo el título *An Update to 2006*. De nuevo, repasaba partes de la teoría de las ciencias del nivel del mar y algunas de las tecnologías de mareógrafos más antiguas, y dedicaba dos páginas a los medidores de radar. Contaba con una sección sobre los méritos de cada una de estas tecnologías para usos en determinadas estaciones. El tsunami de Sumatra había tenido lugar en diciembre de 2004. La comunidad de medición del nivel del mar sabía ahora que las estaciones de mareógrafos tenían que estar equipadas para medir no solo los niveles del mar convencionales utilizados para los estudios de los niveles medios del mar y la marea, sino también para proporcionar datos en tiempo real para alertas de tsunamis y oleajes de tormenta. Este aspecto de riesgos múltiples implicaba que las estaciones debían contar con más de un tipo de sensor (por ejemplo, de radar y de presión). El sensor principal (radar) registraría, por lo general, valores con una frecuencia promedio de 3 minutos o superior, mientras un transductor de presión diferencial (que mide la diferencia entre la presión del agua y la presión atmosférica) registraría los valores con una frecuencia de 1 minuto o superior. El medidor de presión sería el sensor principal de tsunamis y proporcionaría datos para completar cualquier pequeña laguna en el registro del radar. Todos los datos se transmitirían rápidamente. Todas las estaciones se diseñarían de forma que fuesen lo más resistentes posible frente a los daños producidos durante fenómenos extremos. Este volumen contenía secciones sobre telemetría de datos en tiempo real, control de la calidad de los datos y nuevas tecnologías, y era más específico que los volúmenes anteriores al exponer los

¹ Se pueden obtener copias de estos volúmenes en http://www.psmsl.org/train_and_info/training/manuals/.

requisitos del GLOSS. Además, contenía un anexo en el que se presentaban las experiencias de operadores de mareógrafos, y muchas de ellas recogían información útil para la operación de medidores de radar.

Un decenio después llegamos al presente volumen 5, dedicado específicamente a los mareógrafos de radar. Los telémetros de radar se han utilizado en la industria (para medir los niveles de líquidos en tanques) y en hidrología (para medir los niveles de ríos, lagos y depósitos) durante muchos años y, en el decenio transcurrido desde el volumen 4, se han aplicado a la medición del nivel del mar en diversas ubicaciones. Ya han sustituido a las tecnologías de mareógrafo anteriores en muchos países. Su bajo costo (en la mayoría de los casos) y su relativa facilidad de instalación y mantenimiento han hecho de ellos la tecnología preferida a la hora de instrumentar nuevas estaciones o reequipar las antiguas. Se pueden establecer interfaces con registradores de datos y plataformas de telemetría fácilmente, de forma que sus datos se muestren casi al instante en centros de todo el mundo. Sin embargo, quedan muchas preguntas sin respuesta sobre su idoneidad para la monitorización del nivel del mar dentro de redes nacionales e internacionales, como el GLOSS. En la 13ª reunión del Grupo de Expertos del GLOSS en Liverpool en noviembre de 2013, se propuso una nueva edición del manual que se centraría específicamente en esta tecnología y los problemas que presenta su uso.

Por lo tanto, la primera parte del presente volumen 5 examina temas como el montaje de medidores de radar sobre el agua para medir el nivel del mar. Analiza cómo se pueden calibrar los medidores, tanto en el laboratorio antes de instalarlos como sobre el terreno durante sesiones de mantenimiento rutinario. Describe el desempeño del radar en comparación con otras tecnologías y examina cómo los niveles medidos por el radar pueden verse sesgados en caso de olas y, en consecuencia, qué otras tecnologías deben utilizarse en paralelo.

La segunda parte de este volumen vuelve sobre algunos temas que ya estaban presentes en los volúmenes del manual anteriores, del 1 al 4. Se trata de aspectos especialmente importantes de las mediciones con mareógrafos, y por ello se repiten siempre, aunque de formas distintas. El volumen 1 introducía los procedimientos básicos que deben seguirse para el mantenimiento del dátum de las mediciones del nivel del mar (es decir, la estabilidad de las mediciones con

respecto a cotas situadas en las zonas cercanas). El volumen 2 describía cómo se debería llevar a cabo la nivelación en una red local de cotas e introducía el uso de receptores del sistema mundial de localización (GPS, por sus siglas en inglés) para vigilar los movimientos verticales de la tierra. El GPS en mareógrafos fue examinado más a fondo en los volúmenes 3 y 4. Estas secciones se basaban en parte en el conocimiento adquirido sobre el uso del GPS en los talleres que llevaron a la elaboración de los informes "Carter Reports" (1989 y 1994) y en un importante taller posterior celebrado en el Jet Propulsion Laboratory (1998).² En aquel momento, el GPS en mareógrafos se utilizaba con receptores de frecuencia continua (no episódica ni de campaña) y doble (en vez de única), y se habían puesto en marcha más investigaciones sobre su uso en el marco del proyecto TIGA, del Servicio Internacional de GNSS. El presente volumen 5 contiene una sección similar sobre métodos de medición y requisitos de cotas en mareógrafos, entre otros, el uso de equipo del GNSS (Sistema Mundial de Navegación por Satélite), así como actualizaciones de las recomendaciones sobre el uso del GNSS en las estaciones de mareógrafos.³

La segunda parte de este volumen también contiene secciones actualizadas para que los operadores de mareógrafos se aseguren de que sus datos llegan a los centros, donde podrán aprovecharse al máximo para fines prácticos y científicos. Por ejemplo, ahora mismo resulta inconcebible que los mareógrafos instalados en la red del GLOSS no tengan capacidad de informar en tiempo real sobre alertas de tsunamis y oleajes de tormenta. Por otra parte, los datos deben tener calidad suficiente para que los centros en modo diferido puedan convertirlos en valores de niveles medios del mar, con el objetivo de usarlos en estudios de cambios en el nivel del mar a largo plazo. Estos objetivos en tiempo real y en modo diferido no tienen por qué entrar en conflicto si se dedica mucha atención a comprender los datos que se registran, a compilar los metadatos fundamentales y a transmitir rápidamente los datos a los centros nacionales e internacionales pertinentes.

² Se pueden obtener copias de estos informes (en inglés) en el sitio http://www.psmsl.org/train_and_info/training/reading/.

³ El GNSS incluye GPS, el sistema militar estadounidense que lleva en funcionamiento desde la década de 1980, y también los sistemas ruso (GLONASS), europeo (Galileo), japonés (QZSS) y chino (BeiDou). Es de esperar que el resto de los sistemas del GNSS adquieran la misma importancia que el GPS para la monitorización de los niveles verticales de la tierra en el futuro. Para consultar el estado de cada sistema, véase <http://igs.org/mgex/status-GPS>.

Recomendamos que los lectores nuevos consulten primero los volúmenes 1 a 4, antes de leer el volumen 5. Aunque los primeros volúmenes datan de hace muchos años y la tecnología ha evolucionado notablemente desde entonces, gran parte de los exámenes anteriores poseen valor formativo con respecto a la obtención de datos históricos del nivel de mar. La sustitución de un sistema de medición por otro con frecuencia entraña riesgos, dado que en una serie temporal se puede recurrir a diferentes métodos sistemáticos y, por ello, es básico comprender cómo han cambiado estos métodos. Por supuesto, los mismos errores que se producen al cambiar de tecnología podrían estar ocurriendo ahora que los sistemas de radar están sustituyendo a otros sistemas, de modo que debemos tratar de comprenderlos todos lo mejor posible.

Por lo tanto, en resumen:

La primera parte (capítulos 1 a 5) revisa el uso de la tecnología de radar en mareógrafos.

La segunda parte (capítulos 6 a 9) actualiza algunos temas abordados en volúmenes anteriores de este manual.

Y en concreto:

Los capítulos 1 y 2 contienen la información general sobre la necesidad de los mareógrafos y la tecnología de mareógrafos de radar.

El capítulo 3 contiene análisis de las experiencias de grupos del GLOSS sobre el uso del radar para las mediciones del nivel del mar, entre otras, comparaciones con otras tecnologías. Las contribuciones individuales a este capítulo se pueden obtener en el Suplemento de este Manual.

El capítulo 4 continúa con una guía de prácticas recomendadas para instalar y operar un mareógrafo de radar, dado que los capítulos anteriores establecen que el uso del radar es aceptable (con algunas reservas) para medir el nivel del mar.

El capítulo 5 resume los requisitos para las estaciones del GLOSS con mareógrafos de radar.

Los capítulos 6 a 8 ofrecen actualizaciones relativas a aspectos importantes sobre el control del dátum y la medición de los movimientos verticales de la tierra, la adquisición de datos y la telemetría, el flujo de datos y los bancos de datos. (El control de calidad de los datos del nivel del mar se examinará en un manual de la COI aparte).

El capítulo 9 ofrece una guía sobre los materiales de formación disponibles sobre la medición del nivel del mar.

Table of Contents

Prefacio.....	3
parte 1: Mareógrafos de rada.....	9
1. Introducción	10
1.1 Necesidad de los mareógrafos de radar	10
1.2 Mareógrafos anteriores.....	10
2. Medidores de radar	12
2.1 Tipos de medidor de radar.....	12
2.2 Posibles fuentes de errores en la medición del radar.....	14
3. Experiencias con medidores de radar y comparaciones con otras tecnologías.....	20
4. Instalación de los medidores de radar	25
4.1 Elección de una estación de mareógrafo	25
4.2 Localizaciones adecuadas de medidores de radar	29
4.3 Montaje del medidor de radar	29
4.4 Antes de la instalación	36
4.5 Durante la instalación	39
4.6 Después de la instalación	40
4.7 Necesidad de otros sensores.....	42
5. Resumen de los requisitos de las estaciones del GLOSS con mareógrafos de radar	44
parte: Secciones actualizadas de manuales anteriores	47
6. Control y nivelación del dátum.....	48
6.1 Introducción.....	48
6.2 Nivelación y cotas locales	49
6.3 Monitorización de las alturas de las cotas mediante el CGNSS	53
6.4 Estudios de EGNSS sobre las alturas de las cotas.....	55
6.5 Otros métodos para medir los movimientos verticales de la tierra	56
6.6 Otras aplicaciones del GNSS en relación con el nivel del mar	58

7. Equipo necesario para la telemetría de datos registrados en medidores de radar y otros mareógrafos.....	59
7.1 Introducción.....	59
7.2 Elección de un sistema de telemetría.....	60
7.3 Sistemas de transmisión de datos.....	62
7.4 Telemetría de difusión (el SMT).....	72
7.5 Plataformas de recogida de datos y otros equipos de telemetría.....	73
7.6 Requisitos para la transmisión de datos del GNSS.....	77
8. Datos sobre el nivel del mar.....	78
8.1 Centros de datos sobre el nivel del mar.....	78
8.2 Control de calidad de datos.....	82
8.3 Obligaciones de los proveedores de datos.....	86
9. Materiales y contactos de formación.....	87
Références.....	90
Anexo 1:.....	96
medidores de radar de los principales fabricantes, a fecha de abril de 2016.....	96
Anexo 2:.....	99
Lista de acrónimos.....	99
Anexo 3:.....	102
Contenido de un boletín del SMT y ejemplo de un mensaje de plataforma de recogida de datos en código CREX.....	102

parte **1**

Mareógrafos de rada

1. Introducción

1.1 Necesidad de los mareógrafos de radar

Raro es el año que no se ve en las noticias algún fenómeno catastrófico relacionado con el nivel del mar. Los oleajes de tormenta recientes han sido, entre otros, los de los huracanes Katrina (2005) y Sandy (2012), el ciclón Nargis (2008) y el tifón Haiyan (2013), que devastaron zonas costeras y dejaron muchas víctimas. Se cree que solo el ciclón Nargis dejó un mínimo de 130.000 víctimas. Los tsunamis más recientes fueron los de Sumatra (2004), que causó más de 230.000 víctimas, y Tōhoku (o Sendai) (2011). Las repercusiones más graves de estos dos tsunamis se produjeron cerca de su origen, pero las olas llegaron a muchas otras zonas costeras, donde produjeron más inundaciones y daños.

Estos son algunos ejemplos de fenómenos importantes y extremos; Pugh y Woodworth (2014) examinan estos fenómenos en profundidad, así como otros oleajes de tormenta y tsunamis. Algunos fenómenos pasan casi desapercibidos, como la inundación costera en el remoto archipiélago de Haida Gwaii en 2012, causada por el mayor tsunami de la costa oeste del Canadá de los últimos 200 años. Por lo demás, la mayoría de los oleajes de tormenta, e incluso los tsunamis más pequeños, suelen considerarse fenómenos habituales en muchos lugares del mundo, donde las poblaciones costeras han aprendido a convivir con niveles de mar ocasionalmente altos, lugares que ya cuentan con sistemas de alerta adecuados.

Mientras tanto, se cree que el nivel medio del mar está subiendo cada vez a más velocidad, y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático nos dice que la línea de costa mundial debe prepararse para un aumento adicional de medio metro o de un metro aproximadamente en 2100 (Church et al., 2013). Este aumento puede provocar consecuencias por sí mismo (p. ej., debido al incremento de la salinización de las aguas subterráneas costeras) y no hará más que exacerbar las consecuencias de los fenómenos extremos.

Por tanto, es más que evidente que el mundo debe tener una red de observación del nivel del mar en zonas costeras a escala mundial, como el programa del GLOSS de la COI (COI, 2012). Solo a través de una red similar (de

especialistas en el nivel del mar y de infraestructura) se pueden transmitir las mejores prácticas de observación del nivel del mar por todo el mundo para que las adopten los organismos nacionales dentro de sus propias redes. Como resultado, se pretende que las contribuciones nacionales al programa internacional proporcionen una fuente casi global de datos sobre el nivel del mar necesarios para la investigación científica.

La necesidad de los datos sobre el nivel del mar en el marco de sistemas internacionales de alerta contra riesgos múltiples y los requisitos para la investigación científica no son los únicos motores de las mediciones del nivel del mar. Existen muchas razones prácticas locales para obtener estos datos. Por ejemplo, algunos puertos y ciudades costeras importantes no disponen de ningún sistema de observación del nivel del mar, o no tienen uno adecuado, a pesar de que el costo de los mareógrafos y del equipo asociado es ínfimo comparado con los gastos totales anuales de dichos puertos y ciudades. La marea (y el nivel del mar en general) siempre ha sido un factor importante en las operaciones portuarias, sobre todo conforme ha aumentado el calado de los buques. Cualquier ciudad o país con un frente marítimo necesita información estadística sobre la variabilidad del nivel del mar, le afecten o no las mareas, para poder diseñar unas defensas adecuadas. Cuando se propone una nueva instalación de nivel del mar en esos lugares, sería excelente que las autoridades portuarias o locales pudiesen colaborar con los científicos para dotar a las nuevas instalaciones del mejor equipo posible, capaz de proporcionar datos adecuados a todos los efectos.

1.2 Mareógrafos anteriores

Lo más parecido a un mareógrafo ideal es una regla de mareas (o barra de mareas) con la que, en condiciones de calma, el nivel del mar se pueda medir a simple vista. El cero de la regla de mareas se nivelaría con respecto a una cota de las zonas cercanas, de forma que, durante un período amplio, podría conseguirse una buena serie temporal de niveles del mar "relativos" (es decir, relativos a las zonas de tierra cercanas). Una variante histórica de este método utiliza un minicilindro de amortiguación con un flotador al que se ha fijado una vara vertical. La altura del extremo superior de la vara se medía a simple vista

utilizando una regla de mareas; este método se sugirió en un artículo de la primera edición de *Philosophical Transactions of the Royal Society* (Moray, 1665).⁴

Lamentablemente, los sistemas ideales como estos no son prácticos hoy en día para un programa como el GLOSS. Es poco probable que las agencias dispongan de personal dispuesto a sentarse junto a una regla de mareas para realizar mediciones visuales cada pocos minutos, día y noche, en verano y en invierno, un año tras otro. Se necesitan métodos más automatizados. No obstante, se puede ver que incluso el método de Moray ya introducía algunos problemas relativos a la instalación (p. ej., ¿cuál es la mejor manera de montar el cilindro de amortiguación en el muro de un muelle? ¿A qué distancia del lecho marino debería estar la entrada cónica?), y preguntas relativas a posibles sesgos en las mediciones (p. ej., ¿es el nivel del agua del pozo el mismo que el de fuera?).

Los primeros mareógrafos automáticos, que realizaban registros por sí mismos, se introdujeron en la década de 1830 (Matthäus, 1972), y desde entonces se han inventado muchos tipos de medidores. Sin embargo, todos presentan dificultades para la instalación y el mantenimiento. Por ejemplo, los grandes cilindros de amortiguación que se solían ver en muchos lugares solo podían instalarse con grúas y equipos de varias personas, lo que requería una organización y un gasto considerables. La instalación de los mareógrafos de presión requería la disponibilidad de buzos.

Además, los diferentes tipos de medidores presentaban diferentes tipos de errores sistemáticos. Los cilindros de amortiguación, sobre todo los que están situados en estuarios, son un buen ejemplo. Una diferencia entre la densidad del agua dentro del pozo y la de fuera, que además varía con las mareas y con las estaciones (porque la densidad del estuario varía a lo largo del año), daba como resultado una diferencia en el nivel del mar en el interior y en el exterior. Además, las fuertes corrientes de la marea que fluían a través de la entrada cónica provocaban un descenso del nivel de agua de Bernoulli en el interior del pozo. Los mareógrafos acústicos son conocidos por sus

potenciales errores sistemáticos, debidos a los gradientes térmicos verticales sin compensar (que generan, por tanto, una velocidad del sonido distinta) en el interior del tubo de sondeo en el tipo Aquatrak o, peor aún, al aire libre en los tipos sin tubos de sondeo. Además, a pesar de haber dedicado una intensa labor de investigación al diseño del extremo sumergido del tubo de sondeo acústico con la intención de reducir el descenso del nivel de agua, el problema nunca se eliminó por completo. Los mareógrafos de presión presentan sesgos debido a cambios (que varían con las mareas y con las estaciones) en la densidad del agua cuyo valor es necesario conocer para convertir la presión a nivel del mar. Casi todos los tipos de mareógrafo sufren en condiciones de olas altas, sobre todo debido a las grandes corrientes transitorias que inducen las olas (y sus consecuencias sobre el efecto “draw-down”). Con la mayoría de los tipos de mareógrafos que conocemos, en caso de olas grandes, las mediciones del nivel del mar resultan más bajas que las auténticas.

Los pros y los contras de utilizar los mareógrafos de flotador o de presión, así como los de realizar la medición de distancias por tiempo de recorrido acústico han sido examinados en volúmenes anteriores de este manual. Una omisión se refería al tiempo de vuelo óptico, que puede tener aplicación en determinadas circunstancias en las que un cilindro de amortiguación es una opción práctica, aunque con las mismas consideraciones sobre los cilindros que sobre los mareógrafos de flotador.⁵ Este volumen examina la medición de distancias mediante microondas, que, como se verá, constituyen una valiosa técnica de medición del nivel del mar adicional.

4 Más o menos al mismo tiempo, el erudito y excéntrico alemán Athanasius Kircher sugirió el uso de un mareógrafo de flotador.

5 La única publicación que nos consta sobre mareógrafos de láser es la de Forbes et al. (2009), que utilizan láseres en cilindros calentados en el Ártico canadiense, aunque tenemos entendido que los mareógrafos de láser también se han utilizado con cilindros estrechos en Corea del Sur. El láser que se utilizó en el Canadá tenía una longitud de onda de 620-690 nm (rojo) y las reflexiones son de planchas de espuma que flotan aproximadamente 8 mm por encima de la superficie del agua. En otro lugar, Washburn et al. (2011) utilizaron un LIDAR (acrónimo de Light Detection And Ranging) con una longitud de onda de 905 nm (cerca a los infrarrojos) durante varios años en la Harvest Platform, frente a la costa de California, con el objetivo principal de validar los datos del nivel del mar de un mareógrafo de burbuja de la NOAA. Las reflexiones se produjeron en la superficie del agua, no en un cilindro de amortiguación. Las mediciones de LIDAR de alta frecuencia en mar abierto se utilizan más comúnmente para registrar las olas del océano (p. ej., Irish et al., 2006).

2. Medidores de radar

2.1 Tipos de medidor de radar

Como es bien sabido, el radar (acrónimo de RAdio Detection And Ranging) se desarrolló antes de la Segunda Guerra Mundial y se aplicó en la detección de aeronaves, buques o submarinos emergidos. No obstante, en el último cuarto de siglo, el radar se ha utilizado en muchos ámbitos civiles, donde resulta familiar sobre todo en la detección de movimiento para el control del tráfico. El desarrollo de los mareógrafos que se examinan en este manual ha sido posible gracias a la utilización de dispositivos transistores semiconductores como amplificadores de microondas y a la necesidad de medir líquidos de tanques. Más tarde, la tecnología se empleó para aplicaciones hidrológicas, como la medición de los niveles de ríos, lagos y depósitos (OMM, 2010).

Nos constan pocas publicaciones que describan los medidores de radar con mucho detalle. Las obras más útiles son las de Devine (2000) y Brumbi (2003), aunque están escritas desde la perspectiva de las "aplicaciones de procesos" (p. ej., en tanques industriales)

en lugar de la perspectiva de los mareógrafos, y las publicaron fabricantes independientes (VEGA y Krohne, respectivamente). Devine (2000), sobre todo, ofrece una buena sinopsis de los conceptos básicos de la tecnología y su historia. Otros informes ofrecen explicaciones más breves (p. ej. Mai y Zimmermann, 2000 y Wikipedia, 2015a).

En resumen, existen dos tipos principales de medidor de radar: los radares de onda continua de frecuencia modulada (FMCW) y los radares de impulsos. (Véase Brumbi [2003] para consultar otras técnicas utilizadas en la industria, entre otros, los métodos interferométrico y reflectométrico.)

(i) Radares de onda continua de frecuencia modulada (FMCW)

En un radar de onda continua (CW) radar, se transmite un haz electromagnético con una frecuencia continua sin modular hacia un blanco, que refleja los ecos y los devuelve al transmisor. Si el blanco no se mueve, la frecuencia que devuelven los ecos será la misma que

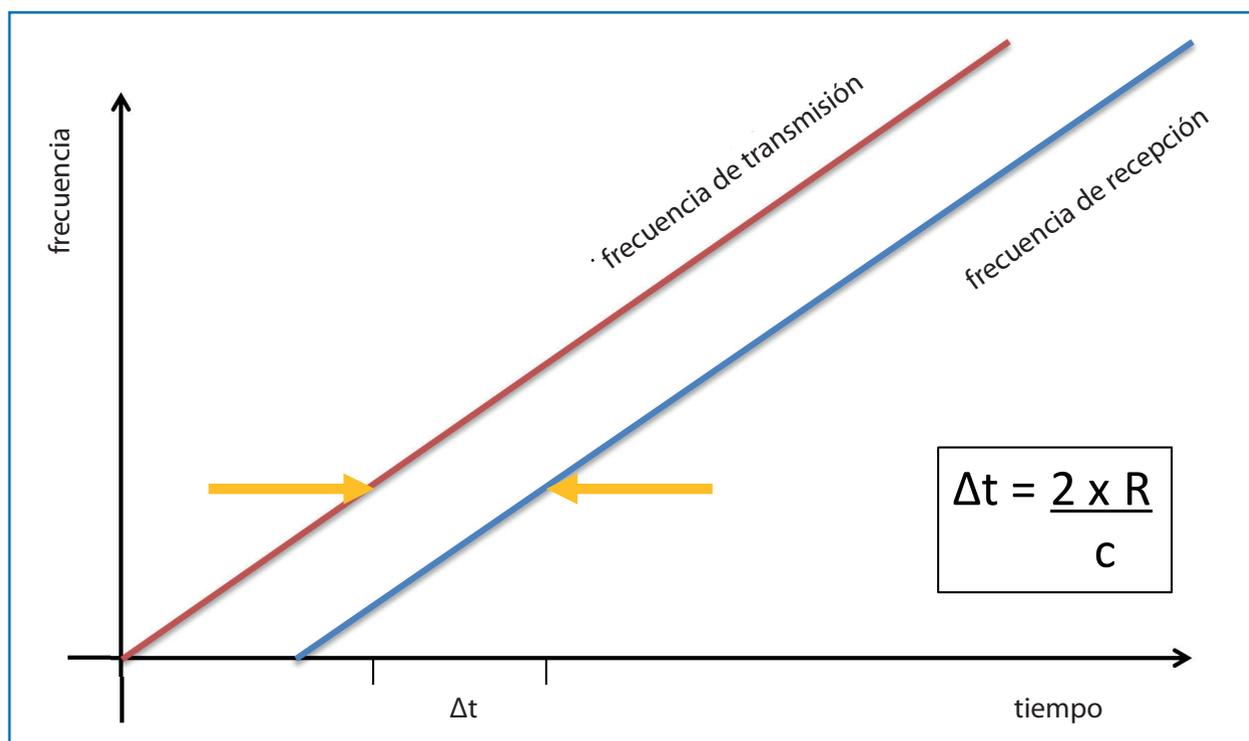


Figura 2.1. Principio de la medición mediante FMCW con aumento proporcional de la diferencia de tiempo Δt entre las frecuencias transmitida y recibida en función de la distancia al blanco R , donde c indica la velocidad de la luz en el aire.

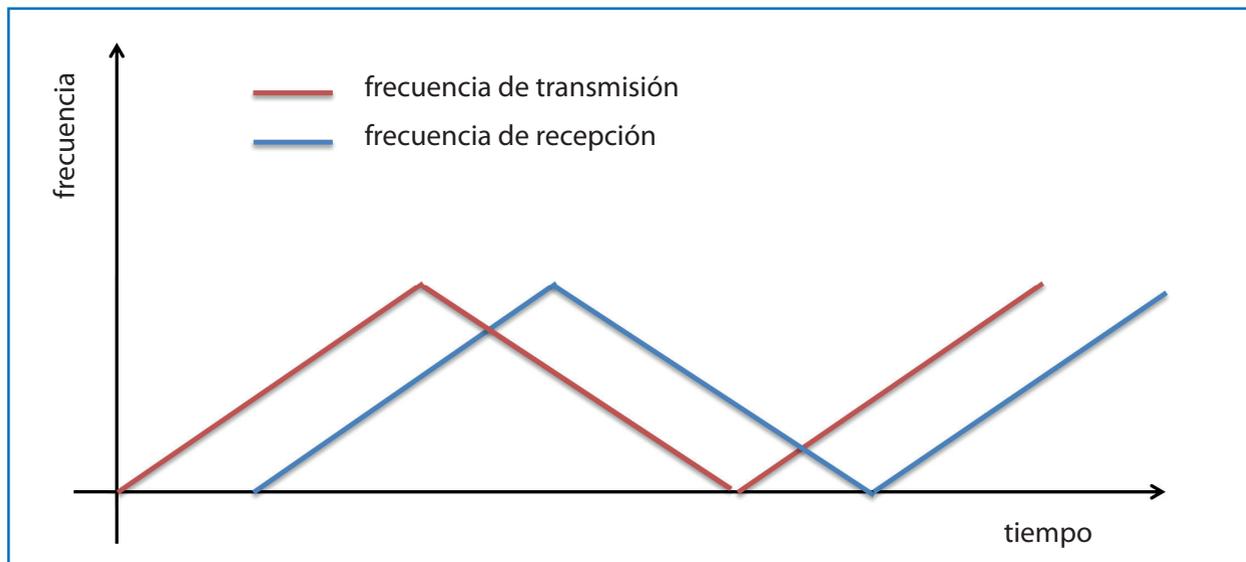


Figura 2.2. Modulación triangular de frecuencia utilizada en un medidor de radar FMCW.

la que se emitió. Sin embargo, si el blanco está en movimiento, la frecuencia de la señal de retorno depende de la velocidad al alejarse o acercarse al transmisor. Este es el conocido efecto Doppler. En este caso, aunque la velocidad del blanco puede calcularse fácilmente a partir del cambio de frecuencia, no puede determinarse la distancia entre el transmisor y el blanco.

Devine (2000) describe cómo un radar de onda continua con frecuencia única no puede medir la distancia porque no existe una referencia temporal a partir de la que se pueda determinar el retardo del eco de retorno desde el blanco. No obstante, se puede obtener una referencia temporal si se modula la frecuencia y esta se conoce. (Mai y Zimmermann, 2000 lo denominan “medición de fase óptica”.) En la **figura 2.1** se muestra un ejemplo sencillo, en el que la frecuencia de la señal transmitida aumenta de forma lineal. Si R es la distancia al blanco, y c la velocidad de la luz en el aire, el tiempo necesario para el retorno al radar es $\frac{2R}{c}$. A partir de la **figura 2.1** se puede ver que si se conoce la tasa de variación de la señal transmitida y se puede medir la diferencia temporal (Δt) entre las frecuencias transmitidas y recibidas, entonces R se puede obtener fácilmente a partir de Δt . En la práctica, la señal recibida que refleja el blanco se mezcla con la señal que se está transmitiendo en ese momento, y el resultado es una frecuencia de pulso proporcional a R ..

La transmisión por radares de FMCW debe ser cíclica entre dos frecuencias distintas (p. ej. 24 y 26 GHz), pero la modulación cíclica puede presentar diferentes formas, p. ej., sinusoidal, de diente de sierra o triangular (**figura 2.2**). La modulación de diente de sierra se usa para la mayoría de “aplicaciones de procesos” (Devine, 2000). La modulación

triangular, tal como se utiliza en los sensores de FMCW en el anexo 1, presenta un barrido de frecuencia con un incremento lineal, seguido por un barrido decreciente, lo que permite obtener un promedio del efecto Doppler causado por un blanco en movimiento.

(ii) Radares de impulsos

En los radares de impulsos se mide el tiempo de vuelo de impulsos breves (que se miden habitualmente en nanosegundos o microsegundos) entre el transmisor y el blanco, así como los del retorno. Al aplicar la corrección de la velocidad de la luz y dividir entre 2 se obtiene la distancia. Los impulsos toman la forma de pequeños paquetes de ondas. La cantidad de ondas y la longitud del impulso dependen de la longitud del impulso y de la frecuencia portadora que se use. Se impone un intervalo relativamente largo entre impulsos para poder recibir el eco de retorno antes de transmitir el siguiente impulso. Para nuestros objetivos, podemos considerar que el blanco es estacionario. En una variante de este método, también se mide el desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler del impulso de retorno, lo que permite calcular tanto la distancia como la velocidad del blanco. Esto se llama radar de efecto Doppler de frecuencia pulsada y es la técnica que se usa para la localización y el seguimiento de aeronaves.

Una duración de impulso más breve dará como resultado una mejor resolución del blanco y una precisión más elevada. No obstante, un impulso más breve necesita una potencia de pico más alta para funcionar adecuadamente en el rango. Si la energía disponible es limitada, un pulso corto dará como resultado una reducción de la máxima

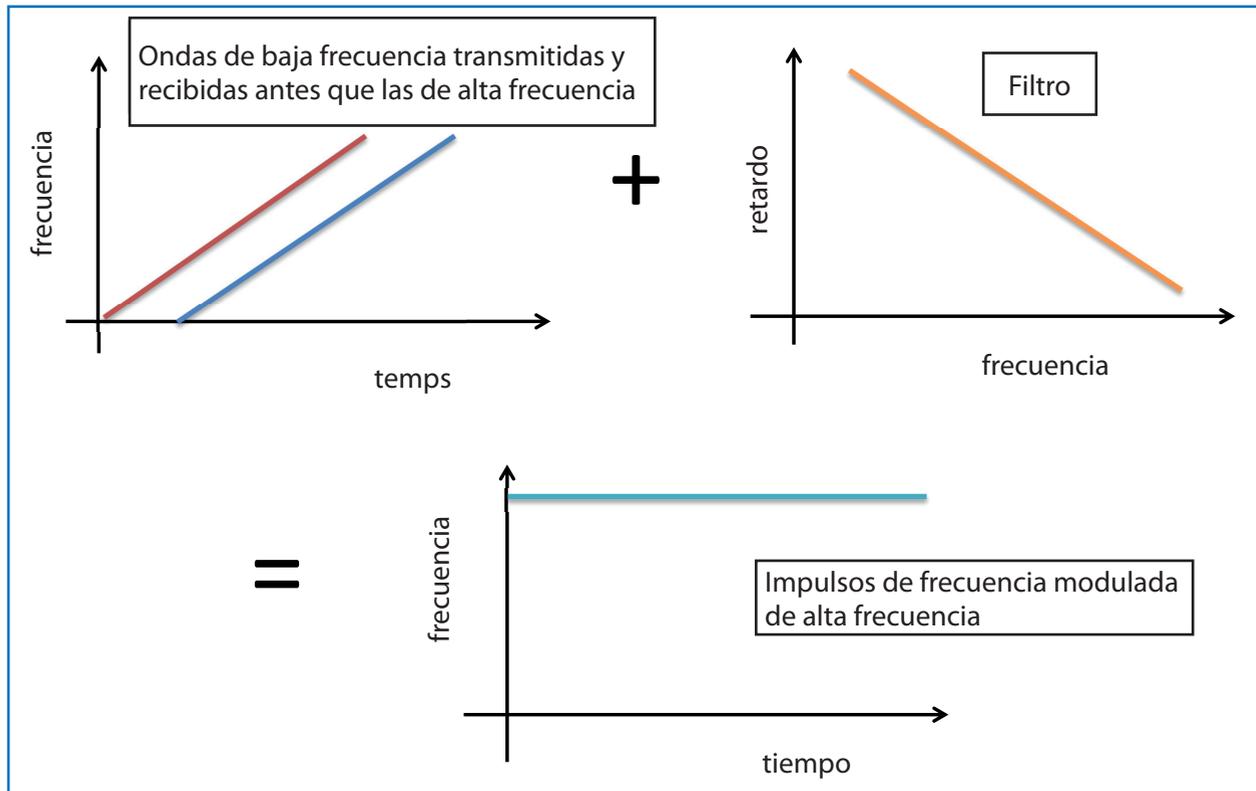


Figura 2.3. Descripción esquemática de la compresión de impulsos de frecuencia modulada. Las ondas de menor frecuencia se transmiten y reciben desde el blanco antes que las ondas de mayor frecuencia. Al aplicar un filtro a las señales recibidas, se retrasan las ondas de menor frecuencia iniciales en relación con las ondas de frecuencia superior posteriores. Como resultado, la energía se comprime en un paquete de impulsos de frecuencia modulada.

distancia medible. Con una potencia de pico limitada, un impulso de mayor duración radia más energía y ofrece, por tanto, una distancia de medición mayor, aunque en un radar de impulsos estándar será a costa de la resolución y la precisión. Un radar de impulso de frecuencia modulada es un híbrido entre las técnicas de radar de impulsos y de FMCW, y utiliza un método de compresión del impulso para lograr las ventajas de precisión de un radar de impulso breve a la vez que las ventajas de potencia de un impulso más largo.

En un radar de impulso de frecuencia modulada, la frecuencia del impulso emitido se modula de forma lineal en el tiempo (al igual que para el método de FMCW de la figura 2.1), pero a una amplitud constante. El pulso de retorno pasa a través de un filtro que comprime el eco, creando un retardo inversamente proporcional a la frecuencia. Por lo tanto, se reduce la velocidad de la energía de baja frecuencia que llega primero y convergen las frecuencias siguientes, más altas, produciendo una señal de eco más aguda y una resolución temporal más eficaz (figura 2.3). Devine (2000) ofrece detalles de variantes de los métodos de FMCW, de impulsos y de impulsos de frecuencia modulada.

2.2 Posibles fuentes de errores en la medición del radar

Antes de examinar las comparaciones entre los niveles del mar medidos con radar y con otras técnicas en el capítulo siguiente, es útil pararse a reflexionar sobre los factores conocidos que pueden afectar a la precisión del radar. Esta lista es muy breve: de hecho, es más breve que todas las listas que se podrían elaborar para tecnologías de mareógrafo más antiguas.

Cambios de temperatura

Una ventaja que presenta el radar frente a las mediciones de distancia acústicas es que la velocidad del sonido depende de la temperatura y, por tanto, para obtener una precisión óptima, los medidores acústicos deben compensar los cambios de temperatura en el aire entre el transductor y la superficie marina. Esto resulta problemático sobre todo cuando hay elevados gradientes de temperatura a lo largo del tubo de sondeo acústico. Los radares no presentan este tipo de problemas, dado que la velocidad de la luz en el aire se puede considerar, para nuestros objetivos, siempre la misma, para todas las temperaturas y presiones del aire. (La dependencia

de la velocidad de las ondas electromagnéticas bajo las temperaturas y presiones más extremas de las “aplicaciones de procesos” se examina en Devine, 2000).

Una cuestión aparte es que los propios sensores podrían ser sensibles a los cambios de temperatura. Las fichas técnicas de muchos fabricantes se limitan a indicar que no son sensibles a la temperatura. Otros citan unas sensibilidades muy bajas. Por ejemplo, el Waterlog H-3611 presenta supuestamente una sensibilidad de 0,2 mm/K, y un máximo de 5 mm en el rango de temperaturas entre -40 °C y +80 °C. Supuestamente, los VEGAPULS-61 y -62, así como el VEGAFLEX-81, también presentan 0,3 mm/K. Heitsenrether (2010) puso a prueba estas afirmaciones colocando sensores de cuatro fabricantes en una cámara ambiental, en la que los sensores apuntaban a un blanco situado a una distancia de 1,7 m aproximadamente. La temperatura se varió en incrementos de 10 °C, de -20 °C a 50 °C, y cada incremento se mantuvo durante una hora. Los resultados no mostraron cambios de comportamiento con la temperatura para los sensores Waterlog H-3611 y VEGAPULS-62; para los otros dos sensores no se obtuvieron resultados concluyentes.

Los cambios relacionados con la temperatura, la humedad y el envejecimiento podrían ser factores que afectasen a los sistemas electrónicos del equipo, más que al medidor. Por ejemplo, André et al. (anexo 3) señalan la importancia de utilizar la adquisición de datos digital en lugar de un bucle de corriente análogo que pueda verse afectado las condiciones ambientales.

Interferencia electromagnética

Existe una abundante literatura sobre la interferencia electromagnética en las mediciones de radar (p. ej., interferencias en los radares militares) pero ninguna se refiere específicamente a los mareógrafos de radar. Podría esperarse que los dispositivos de FMCW fuesen más propensos a la interferencia que los sistemas de impulsos (tabla 2.1), pero habría que modelar detalladamente el entorno electromagnético de una ubicación determinada para estudiar esos efectos.

Objetos en el haz

Es posible que barcos, troncos o basura flotante atraviesen ocasionalmente el haz y den como resultado mediciones del nivel del mar erróneas. Es difícil evitar que ocurra, y un fenómeno así puede ser difícil de identificar únicamente a partir de los datos del radar. Controlar los datos del radar utilizando la información de un sensor de

presión complementario puede ayudar a verificar cuándo se producen estos fenómenos. Por lo que respecta a objetos permanentes en el haz del radar, en la sección 4.5 se describe cómo algunos fabricantes ofrecen programas informáticos que permiten configurar los parámetros de tal manera que regulen las reflexiones fuertes no deseadas a ciertas distancias.

Otros materiales en el haz

El radar no proporcionará la medición de la superficie real del agua cuando se forme hielo marino en los meses de invierno. En estos casos, los medidores de radar necesitarán técnicas complementarias, como las mediciones por presión. Los lugares con mucha espuma no son ideales para los medidores de radar, ya que la espuma absorbe los impulsos transmitidos. Es poco probable que factores como las turbulencias del aire, el polvo, la niebla, la lluvia y el agua pulverizada causen problemas a un radar de bajas frecuencias (10 GHz o 3 cm de longitud de onda), pero podrían ser más relevantes a frecuencias superiores. Por ejemplo, la atenuación del radar debido a lluvias fuertes aumenta de la banda X a Ku y K y afecta considerablemente a las mediciones del nivel del mar en la banda Ku por altimetría por satélite (p. ej., Quartly et al., 1996; Wikipedia, 2015b). Sin embargo, no será un factor de importancia en las pequeñas distancias que miden los mareógrafos de radar.

Olas

En principio, lo ideal sería tomar los datos del nivel del mar lo suficientemente rápido (a una frecuencia de 1 Hz o superior), de manera que una medición promediada sobre las escalas de tiempo que nos interesan (p. ej., 1 minuto) eliminase la variabilidad del nivel debida a las olas (las olas tienen períodos que van de varios segundos en el caso de las olas producidas por el viento a unos 20 segundos para el mar de fondo). Esto es un ejemplo del “filtrado temporal” de las olas, en lugar del “filtrado mecánico” que proporciona el cilindro de amortiguación de un mareógrafo de flotador, y sería semejante a la recogida de datos rápida que ofrecen los sensores de presión. Muchos de los dispositivos de radar del anexo 1 funcionan de este modo.

No obstante, un problema es que las olas podrían afectar a las mediciones del radar del nivel del mar de otras formas distintas al ruido de alta frecuencia que hay que filtrar, pero que también podrían dar como resultado un sesgo sistemático en las mediciones. Muchos científicos que trabajan con el nivel del mar tienen experiencia

Tabla 2.1

Ventajas y desventajas de los sistemas de impulsos y FMCW

Sistemas de impulsos

Ventajas

- Los sistemas de impulsos son una tecnología de eficacia probada con una larga historia.
- Las mediciones de largo alcance son posibles con dispositivos de gran potencia.
- Se pueden configurar para evitar con facilidad reflectores cercanos indeseados.
- Los impulsos requieren gran potencia, pero estos sistemas suelen necesitar menos potencia total que los dispositivos FMCW, porque las transmisiones tienen lugar en un porcentaje de tiempo reducido.

Desventajas

- Pueden experimentar dificultades en mediciones de corto alcance debido a la brevedad del tiempo de recorrido de la señal.

Sistemas FMCW

Ventajas

- Puesto que los dispositivos FMCW transmiten de forma continua (por lo general y en la práctica, aproximadamente un 50% del tiempo en comparación con el 1% de los sistemas de impulsos), se produce poco retraso en la actualización de las mediciones.
- Al contar con un ancho de banda mayor, pueden ser más precisos que los radares de impulsos y más idóneos como registradores de olas (aunque en principio no existe ningún motivo por el que los radares de impulsos no puedan tomar datos de las olas con la rapidez suficiente).

- La radiación máxima emitida es inferior a la de los sistemas de impulsos (con consecuencias para la seguridad).
- Una menor potencia máxima necesaria también implica un consumo máximo de energía menor de los sistemas electrónicos que utiliza.

Desventajas

- Por otro lado, los sistemas FMCW necesitan un procesamiento de transformada rápida de Fourier de alta calidad para alcanzar una elevada precisión, lo que exige equipos físicos y programas informáticos más complejos y, en general, una potencia superior.
- El hecho de que los dispositivos FMCW requieran mayor potencia que los sistemas de impulsos implica que los primeros pueden resultar menos adecuados para las operaciones en estaciones remotas.
- Puesto que por lo general cuentan con una salida de potencia máxima inferior, pueden tener un alcance reducido en comparación con los sistemas de impulsos (aunque este no suele ser un factor importante para los mareógrafos de radar).
- Al transmitir de forma continua a través de una banda de frecuencia, los sistemas FMCW son más susceptibles a sufrir interferencias (p. ej., en puertos muy transitados).
- Presentan aproximadamente un 30% más de componentes que los sistemas de impulsos, y la fabricación a gran escala de FMCW no representa un ahorro tan considerable como para los sistemas de impulsos, así que suelen ser más caros.

midiendo el nivel con radares altimétricos a bordo de satélites. Se sabe que la precisión de las mediciones del nivel del mar tomadas con altímetro está dominada por la precisión de la corrección del sesgo del estado del mar. Se puede expresar como la suma de dos términos: el "sesgo electromagnético", que surge a consecuencia de la mayor

energía retrodispersada por unidad de superficie desde los senos de las olas en lugar de las crestas, y el "sesgo por asimetría", que se produce por la diferencia entre la media y la mediana de las superficies de dispersión (véase el capítulo 9 de Pugh y Woodworth, 2014).

Por lo tanto, no debe sorprender que las mediciones del nivel del mar tomadas con mareógrafos de radar se vean afectadas por las olas hasta cierto punto. La mayor parte de la experiencia que existe hasta la fecha con estos sensores se ha limitado a puertos y a otras zonas costeras protegidas en las que el alcance del viento es reducido y existen condiciones de oleaje bajo (altura significativa de la ola promedio nominalmente inferior a 1 m). También existe alguna experiencia en zonas costeras donde hay olas más altas. Por ejemplo, Boon et al. (2012) calcularon que el error de las mediciones de los niveles del mar aumentaba al cuadrado con la altura de las olas en una localización expuesta de la costa este estadounidense. No obstante, Park et al. (2014) señalaron un problema con la identificación de los efectos de las olas en las mediciones de radar en entornos donde la energía del oleaje es alta, porque las olas también afectarán al sensor de referencia (acústico o de presión), con cuyos datos se comparan los datos del radar. Es de esperar que en el futuro se utilicen los medidores de radar en más localizaciones expuestas a olas altas, incluidas muchas islas oceánicas remotas, en parte porque puede ser difícil acceder a dichas localizaciones y los medidores de radar requieren relativamente poco mantenimiento. En consecuencia, comprender a fondo cómo afectan las olas a las mediciones del radar es una cuestión importante para este manual.

2.3 Medidores de radar en el GLOSS

El GLOSS requiere que un mareógrafo sea capaz de medir el nivel instantáneo del mar con una precisión superior a 1 cm en todo momento (es decir, ante cualquier condición de las mareas, las olas, las corrientes, la meteorología, etc., véase el capítulo 5 y COI, 2012). Una pregunta importante que aborda este manual es si los medidores de radar son capaces de cumplir este requisito al mismo nivel o mejor que otras tecnologías.

De hecho, varios grupos tienen más de un decenio de experiencia en la operación de medidores de radar, y algunos grupos han comparado distintos radares entre sí, o un medidor de radar con otras técnicas (p. ej. Woodworth y Smith, 2003; Martín Míguez et al. 2008b, 2012; Pérez et al., 2014). Sus publicaciones se incluyen en la sección de referencias (que se muestran en azul si no se mencionan explícitamente en el manual). Con todo, según la información de la que disponemos, nunca se han vuelto a comparar tan exhaustivamente diferentes

medidores de radar como en el estudio que se llevó a cabo hace unos años con 7 mareógrafos (3 de ellos radares y 4 tecnologías distintas) durante casi dos años en Vilagarcía de Arousa, al NO de España (Martín Míguez et al., 2005). Ese estudio concreto concluyó que para los objetivos del GLOSS (p. ej., al calcular el promedio obtenido cada hora a partir de datos tomados con mucha frecuencia en cada medidor, o incluso al calcular el promedio obtenido cada 5 minutos en la mayoría de los casos), todas las técnicas deberían considerarse igualmente adecuadas. En comparaciones de series temporales del nivel del mar registradas por pares de medidores, los tres medidores de radar demostraron una mayor coherencia entre sí.

Que los medidores de radar sean una tecnología relativamente nueva no ha impedido que muchos grupos hayan invertido en instalaciones de radares a gran escala para sus redes. Esto no resulta sorprendente, ya que desde un punto de vista administrativo, suponen muchas ventajas respecto a tecnologías anteriores, por su facilidad de instalación en comparación con las demás y porque, en general, los medidores de radar son muy fiables y se pueden utilizar sin necesidad de mantenimiento durante varios años. El radar es una técnica sin contacto físico directo, no hay nada en el propio mar que pueda corroerlo o dañarlo, y no tiene partes flotantes como un medidor de flotador. Además, con respecto a las mediciones, poseen ventajas que otras tecnologías no tienen. Por ejemplo, el radar no se ve afectado por la atmósfera entre el sensor y el mar, como sí ocurre en los medidores acústicos, ni tampoco presenta desviación instrumental, como los medidores de presión.⁶

Por eso, muchos grupos han adquirido medidores de radar comerciales, los han conectado directamente a registradores de datos y al equipo de telemetría, y han empezado a transmitir datos. Los radares operados por grupos que conocemos se enumeran en el anexo 1, acompañados por parte de los detalles de sus productos. Se puede obtener más información de cada producto en las especificaciones técnicas de los fabricantes, aunque a veces la información no es tan exhaustiva como sería deseable. Todos los dispositivos de radar que se

⁶ Las señales de microondas de baja potencia de los medidores por radar se generan utilizando componentes como los osciladores transistores de efecto de campo de arseniuro de galio (GaAs) y las técnicas de circuito integrado monolítico de microondas, que se cree que no presentan desviación, aunque al parecer no existen publicaciones formales que corroboren esto (Peter Devine, comunicación personal).

mencionan en el inventario de mareógrafos de Estados Miembros de la Organización Hidrográfica Internacional de octubre de 2015 figuran en el anexo. (No se pretende que el anexo sea exclusivo y ninguna de las entradas debe considerarse una recomendación del GLOSS. Del mismo modo, no debe darse por hecho que un medidor que no figura no es adecuado para el GLOSS. No se incluyen los costos aproximados de cada dispositivo, ya que pueden variar entre países y, si se desea información actualizada, es necesario ponerse en contacto con el fabricante.)

Las frecuencias empleadas ocupan un rango aproximado de entre 6 GHz y 26 GHz (entre 5 cm y 1 cm de longitud de onda). La mayoría son sistemas de impulsos con antenas de bocina en las que la anchura de la antena es más o menos proporcional a $1/\text{frecuencia}$ para una anchura de haz determinada. Por tanto, todos estos medidores usan el límite superior del rango de frecuencias. Algunos ejemplos de dispositivos con antenas diferentes para centrar el haz del radar son los de Miros (antena impresa planar), OTT RLS (antenas planas separadas para transmisión y recepción), VEGAPULS-61 (antena encapsulada) y Rosemount Waveradar Rex (antena parabólica). Las Krohne BM-100 y VEGAFLEX-81 no transmiten desde una antena al aire libre, sino que usan varas o cables verticales como guía de ondas (sección 4.3).

Las frecuencias más altas corresponden a las longitudes de ondas más bajas. Por ello, se espera que los dispositivos de 26 GHz sean más precisos. No obstante, una frecuencia más elevada también significa que presentarán más ruido y serán más propensos a reflexiones falsas. Los medidores de FMCW tienden a usar frecuencias del límite más bajo del rango.⁷ En el anexo 1 hay pruebas de que algunos productos son derivados de otros, ya que tienen frecuencias y características generales parecidas. (La similitud de las frecuencias está determinada en parte por las normas y licencias internacionales, véase Brumbi y Van Zyl, 2009).

⁷ La elección de frecuencia se debe en gran medida al desarrollo tecnológico a lo largo de la historia, a la disponibilidad de frecuencias comunes en distintos países y a las normas nacionales e internacionales. Parece que la mayoría de los dispositivos de FMCW evolucionaron a partir de un estándar SAAB original en la banda X, a unos 10 GHz. Los primeros radares de impulsos también estaban en frecuencias más bajas (p. ej., banda C a unos 6 GHz) mientras que la banda K, a unos 26 GHz, es un desarrollo relativamente reciente (Peter Devine, comunicación privada). En el momento de la redacción del presente documento, nos consta que ya está disponible un sensor de 80 GHz (el VEGAPULS-64), que supuestamente no es sensible ni a la espuma ni al vapor de agua, pero, según la información de la que disponemos, aún no se ha probado para mediciones del nivel del mar.

Los pros y los contras de los sistemas de impulsos y de onda continua de frecuencia modulada se resumen en la tabla 2.1.⁸ No parece haber ningún factor único y decisivo entre ellos para la monitorización del nivel del mar. En el anexo 1 se puede ver que los sistemas de impulsos presentan menos requisitos de potencia en general que los dispositivos de FMCW, ya que la potencia de pico solo se transmite durante un porcentaje de tiempo pequeño. Por ello, resultan más adecuados para funcionar en estaciones remotas, donde solo hay energía procedente de paneles solares. También suelen ser más económicos que los dispositivos de FMCW. Esto se debe, en parte, a que los dispositivos de FMCW son más complejos que los sistemas de impulsos (p. ej., requieren un sofisticado procesamiento de señal por transformada rápida de Fourier) y, por ello, poseen unos requisitos de potencia superiores, aunque dichos requisitos son mucho menores en la actualidad que para el mismo tipo de dispositivo de hace un decenio. Se podría pensar que los dispositivos de FMCW son más precisos que los sistemas de impulsos en general, gracias a la transmisión continua y a la capacidad de medir con precisión una diferencia entre frecuencias transmitidas y frecuencias recibidas (diferencia que suele estar en el rango de los kHz). Sin embargo, solo se puede estimar su grado de adecuación a un contexto del GLOSS por comparación entre los distintos dispositivos de radar y otras tecnologías. El presente manual pretende ofrecer una parte de esa información fundamental.

2.4 Mediciones de las olas en estaciones del GLOSS

La medición de las olas nunca ha sido uno de los objetivos del GLOSS, que se ha centrado en los cambios en el nivel del mar que ocurren en escalas temporales de minutos, horas o unidades superiores. Muchas estaciones de observación del nivel del mar del GLOSS están situadas en puertos, donde la altura de las olas es menor que la altura de las olas exteriores, por lo que cabe dudar del nivel de utilidad en la práctica de la información sobre las olas de esas ubicaciones. Incluso si un mareógrafo se sitúa fuera de un puerto, inevitablemente estará situado en aguas poco profundas con respecto al lugar donde rompen las olas.

⁸ Esta tabla se basa en información de <http://siversima.com/>, <http://www.endress.com/> y de Øistein Grønlie (comunicación privada).

Los extremos de los pilares largos de estructuras mar adentro, como las plataformas petrolíferas, ofrecen ubicaciones más adecuadas para la medición de las olas. Por ejemplo, Blasi et al. (2014) llevaron a cabo experimentos en dos plataformas mar adentro en la Bahía Alemana usando un conjunto de cuatro sensores de impulsos de 26 GHz, separados aproximadamente por 3,5 m y tomando muestras a 2 Hz. Pudieron determinar las alturas de las olas y obtener información direccional del oleaje mediante el análisis de la covarianza cruzada de las mediciones individuales de los sensores de radar.

A pesar de ello, algunos grupos también tienen interés en tratar de registrar las olas directamente en la costa a modo de complemento de las mediciones mar adentro. Hasta ahora, esto ha sido posible en una estación de mareógrafos utilizando sensores de presión (p. ej., Vassie et al., 2004). De forma alternativa, Park et al. (2014) midieron el espectro de las olas examinando el ruido de los datos de un medidor acústico y otro de radar de impulso de 1 Hz (este último con un sensor Waterlog H-3611); obtuvieron conclusiones similares para ambas técnicas, pero el radar presentaba una sensibilidad mayor a las olas y, por tanto, una fidelidad superior para el cálculo relevante de la altura de las olas.

La mayoría de los sensores que se comercializan explícitamente como registros tanto de marea como de oleaje (de Miros, Rosemount y Radac) son instrumentos de FMCW. La red española REDMAR usa medidores Miros de FMCW para realizar mediciones de olas locales dentro de los puertos (o en sus entradas) con el fin de validar modelos de olas y para las actividades en puertos. Se han obtenido buenas experiencias con estas mediciones (Pérez Gómez, 2014; Pérez et al. en el anexo 3). Ewans et al. ofrece un análisis de las mediciones de las olas por radar, centrado en el Rosemount Waveradar Rex y con simulaciones teóricas y comparaciones con datos procedentes de boyas. (2014).

2.5 Resumen de los medidores de radar para el GLOSS

En resumen, los medidores de radar parecen ofrecer una alternativa tecnológica asequible para estaciones de observación del nivel del mar del GLOSS nuevas o reequipadas. Brindan muchas ventajas en lo que respecta a la instalación y el mantenimiento. Además, el conjunto de posibles fuentes de error en la medición del radar parece bastante pequeño en comparación con otros

conjuntos que se podrían elaborar para otras tecnologías. En consecuencia, el Plan de Ejecución del GLOSS (COI, 2012), sus muchos informes (COI, 2006) y sus talleres han recomendado que las nuevas estaciones se equipen con un medidor robusto como los de radar, para que sirva como principal sensor del nivel del mar, complementado por un medidor de presión que funcione como sensor principal de tsunamis.

No obstante, existen ciertas reservas sobre los medidores de radar. Hasta ahora, la experiencia con ellos es limitada, y pueden presentarse nuevos problemas tras varios años más de operación. En concreto, existen consideraciones relativas a la calibración de los dispositivos (su dátum efectivo) y sobre los efectos de las olas en las mediciones. Estos aspectos deben investigarse a fondo mediante la comparación de medidores en diferentes períodos de toma de muestras, utilizando diversas técnicas en distintos entornos. Otras desventajas son la posible exposición a daños durante tormentas o tsunamis importantes, con la posibilidad de que el nivel de agua causado por estos fenómenos llegue a superar la altura del sensor del radar, así como la posibilidad añadida de que residuos flotantes o barcos pasen por debajo del haz, dando lugar a mediciones erróneas.

A pesar de estas limitaciones, parece que muchos organismos nacionales van a instalar medidores de radar, de modo que es importante comprender su funcionamiento tanto como sea posible. Sin embargo, no se recomienda reemplazar automáticamente otras tecnologías por la de radar, sobre todo allí donde las primeras hayan funcionado eficazmente durante muchos años.

3. Experiencias con medidores de radar y comparaciones con otras tecnologías

Este capítulo resume el conocimiento disponible sobre el uso de medidores de radar para la monitorización del nivel del mar basándose en la literatura publicada, así como en otras contribuciones que describen experiencias recientes con medidores de radar, que figuran en el anexo 3. Estos conjuntos de información se han utilizado para elaborar las recomendaciones sobre la adquisición y la instalación de medidores de radar nuevos que figuran en el capítulo 4.

Primeras publicaciones

La adecuación de los sensores de radar para monitorizar los niveles del mar se investigó exhaustivamente por primera vez a comienzos de la década de 2000. En aquel momento se trataba de una novedad, y la principal preocupación era que los radares pudiesen medir fluctuaciones en el nivel del mar comparables a las que se obtenían con los mareógrafos ya existentes. Por ello, Woodworth y Smith (2003), Shirman (2003), Eberlein y Liebsch (2003) y Martín Míguez et al. (2005) se centraron en la desviación típica de las diferencias entre el radar y otros medidores del nivel del mar (p. ej., de flotador o de presión). Apenas se examinaba, o no se examinaba en absoluto, la cuestión del cero efectivo de los medidores de radar (es decir, la cuestión del offset del sensor, que es analizada en el capítulo 4). Además, aunque se reconocía la posibilidad de un sesgo debido a las olas en las mediciones por radar, esta no se investigaba en profundidad, y en general las mediciones se llevaban a cabo en condiciones de oleaje bajo. A pesar de todo, estas primeras comparaciones tuvieron éxito al demostrar el potencial de los sensores de radar para las mediciones del nivel del mar, y sugirieron que tal vez los radares cumpliesen los requisitos de precisión del GLOSS. En algunos casos, los ejercicios de comparación resultaban particularmente interesantes, al utilizar los radares para identificar problemas que no se habían apreciado antes con las tecnologías previas.

Publicaciones entre 2008 y 2012

Durante este período, más grupos empezaron a emplear los medidores de radar en todo el mundo para la monitorización del nivel del mar a largo plazo. En concreto, en España se realizaron grandes inversiones en medidores de radar, en parte para cumplir los nuevos

requisitos de monitorización de los puertos tras el tsunami de Sumatra de 2004, e influidas en gran medida por las conclusiones de las comparaciones entre radares realizadas por Martín Míguez et al. (2005).

En Francia, Martín Míguez et al. (2008a) concluyeron que las antenas de bocina y los radares de onda guiada en cilindros de amortiguación ofrecían datos coherentes a nivel de cm con la información de los mareógrafos de flotador tradicionales, y en vista de ello, concluyeron que era una tecnología aceptable para el GLOSS. Martín Míguez et al. (2012) también comprobaron la estabilidad de un medidor de radar en una estación remota (islas Kerguelen), mediante la comparación con mediciones de la regla de mareas y por presión, y concluyeron que el radar presenta un error de medición de varios mm y que la desviación no resulta significativa. Desde entonces, los medidores de radar se han desplegado a gran escala en las redes de medición del nivel del mar francesas. En la India, Mehra et al. (2009, 2012) llevaron a cabo comparaciones entre el radar y otras tecnologías durante aproximadamente un año y obtuvieron una coherencia aceptable, aunque su objetivo principal era validar los datos obtenidos por presión y no los del radar (véanse también Mehra et al., anexo 3).

La comunidad hidrológica también realizó comparaciones entre varios tipos de medidor de radar, así como entre radares y tecnologías más antiguas. Por ejemplo, Fulford et al. (2007) compararon datos procedentes de tres tipos de sensor de radar con los de un medidor de flotador en un lago de Arizona y obtuvieron una precisión de medición similar para todos los dispositivos, aunque algunos sensores presentaban desviaciones sistemáticas. Apenas encontraron pruebas de que las olas afecten a los datos del radar.

Es posible resumir las experiencias de este período a modo de confirmación de que el radar permite monitorizar la variabilidad del nivel del mar en la mayoría de las ubicaciones con la misma eficacia que otras tecnologías. No obstante, se obtuvo poca información adicional sobre posibles errores sistemáticos en los datos del radar, en qué condiciones del entorno se reduciría la precisión del radar (p. ej., en presencia de olas) y, en los casos más extremos, en qué circunstancias los datos del radar serían inaceptables.

Parece que los medidores de radar se han instalado en muchas estaciones sin ninguna prueba comparativa, al dar por hecho que funcionarán a la perfección.

Estudios comparativos de la NOAA

Este período incluyó el inicio de un conjunto de estudios técnicos realizados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), que utilizaron medidores de radar de distintos fabricantes y datos de comparación procedentes de los medidores acústicos Aquatrak, que hasta ese momento habían sido la tecnología estándar en la red estadounidense. La sección de referencias de este manual enumera algunos de sus informes, que reflejan la experiencia adquirida con la nueva tecnología, acumulada gradualmente a lo largo de varios años. Este exhaustivo conjunto de estudios contrasta con otras investigaciones más superficiales o con la falta total de investigaciones de otros países, y las conclusiones de la NOAA han tenido una influencia importante en la elaboración de este manual.

Heitsenrether y Davis (2011) firman uno de sus informes principales. En él se resumen las razones para la selección de un sensor en particular (Waterlog H-3611) entre los cuatro sensores que se analizaron. Subraya la importancia de conocer el offset del sensor para cada instrumento individual, un tema que se analiza en profundidad en el capítulo 4. La coherencia entre la toma de datos del radar y la del medidor acústico con una frecuencia de 6 minutos, y entre los valores promedio de períodos más largos, coincidía hasta el nivel de cm o mejor, para estaciones costeras semicerradas en condiciones de oleaje bajo. Por consiguiente, el informe recomienda una aceptación limitada de los datos del radar en dichas estaciones. Deja abierta para investigaciones ulteriores la cuestión de la aceptabilidad de los datos del radar en ubicaciones más expuestas y sometidas a olas más altas, donde los efectos de las olas sobre el radar fueron difíciles de separar de las señales relativas a olas grandes en el conjunto de datos de comparación de los medidores acústicos (Park et al. 2014).

La elección de un sensor determinado llevó al diseño de un anillo de montaje estándar y un bastidor de soporte que se podían adaptar para utilizarse en más de 100 instalaciones con modificaciones mínimas en cada estación. Estos aspectos también se mencionan en el capítulo 4. Los estudios paralelos aportaban una selección de un filtro pasabaja óptimo para datos tomados con mucha frecuencia (1 Hz), que inevitablemente presentan ruido en caso de olas, para mejorar la precisión de los datos del nivel

del mar obtenidos cada 6 minutos (Boon, 2014). Aunque se concluyó que las olas causan mayor incertidumbre en la medición del nivel del mar, no hubo pruebas suficientes en este conjunto de estudios para demostrar un sesgo inducido por las olas en el nivel del mar.

Publicaciones recientes hasta 2016

Llegada esta época, algunos grupos habían acumulado muchos años de datos en estaciones equipadas tanto con radar como con medidores de tecnologías más antiguas. Por ejemplo, Pérez et al. (2014) (véase también Pérez Gómez [2014] y el documento de Pérez et al., anexo 3) informaron de la experiencia adquirida en España al reemplazar los medidores acústicos más antiguos con sensores de radar en 17 estaciones. Este estudio comparó conjuntos de datos en distintas bandas de frecuencia, teniendo en cuenta posibles errores de escala y desviaciones temporales en ambos conjuntos (pero sobre todo, de hecho, en los datos más antiguos), con énfasis en la calidad de la información a largo plazo en conjuntos de datos combinados cuando una tecnología reemplaza a otra. De especial interés fueron las consecuencias de los problemas de delaminación en las nuevas antenas de radar sobre la calidad de los datos.

Contribuciones al Suplemento

Estas contribuciones al Suplemento demuestran la importancia que muchos grupos asociados al GLOSS dan a esta nueva tecnología. Muestran, como ya se ha mencionado, que el radar presenta muchas ventajas sobre otras técnicas y que en muchos casos puede proporcionar datos de una calidad adecuada para el GLOSS. Sin embargo, las mejores prácticas dictan que se deben señalar las circunstancias en las que se obtienen datos de diferente calidad y los problemas específicos de usar el radar.

Es posible que algunos de estos problemas sean específicos de un sensor concreto o de las condiciones ambientales locales. Esto significa que puede ser difícil sacar conclusiones generales con respecto a las ventajas de unos sensores sobre otros. No obstante, la comunidad es lo suficientemente grande como para que más de un grupo haya adquirido experiencia con un sensor determinado, y es de esperar que compartir estas experiencias resuelva muchos problemas concretos.

Algunas de las conclusiones principales obtenidas a partir de las experiencias que se describen en el Suplemento son:

- ✓ **Australia** (Queensland): la Unidad de Efectos sobre la Costa (CIU) observó efectos de sesgo por olas en los datos del radar de banda S (VEGAPULS-61 o 62), aunque resulta difícil establecer si deberían considerarse reales o no sin compararlos con datos de otros sensores (que no sean de radar). Los picos en la serie temporal del radar de banda S se reducen mucho en la serie temporal correspondiente de un sensor de banda C (VEGAPULS-66). La banda C también se utiliza ampliamente en el Japón (Tokyo Keiki MRG-10) y en Omán (Sutron RLR-003).
 - ✓ **El Caribe:** La NOAA (EE. UU.), la Universidad de Puerto Rico y el Instituto Geofísico de París (Francia) describen cómo se usa ahora el radar en aproximadamente la mitad de las 68 estaciones del nivel del mar para la monitorización de tsunamis en el Caribe, gracias a los esfuerzos del Centro sobre el Nivel del Mar de la Universidad de Hawái (UHSLC) y otros contribuidores a la red. No se han observado diferencias importantes entre tipos de radar concretos (de onda guiada o al aire libre) desde la perspectiva de la monitorización de tsunamis, y los medidores de radar han demostrado ser resistentes y rentables. Sin embargo, ahora se han recopilado suficientes datos, que indican que conviene realizar un estudio mucho más en profundidad sobre su desempeño, entre otros, investigaciones sobre su adecuación para la monitorización del nivel del mar a largo plazo en la región.
 - ✓ **Chile:** el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) informa de un desempeño aceptable de sensores VEGAPULS-62 en su red de 40 estaciones. Subrayan la importancia de utilizar sensores de presión como copia de seguridad y como sensores complementarios al radar. Sus experiencias de comparaciones entre el radar y los medidores de presión muestran resultados variables dependiendo de la exposición a las olas. Estos resultados demuestran la fiabilidad del sensor de radar en estaciones protegidas, mientras que en estaciones expuestas a la acción del oleaje, los datos deben utilizarse con precaución si se van a usar con fines científicos, a pesar de que el sensor de radar esté tomando datos a 4 Hz.
 - ✓ **Francia:** el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina (SHOM) posee una amplia gama de experiencias con sistemas de antena de bocina al aire libre y con sistemas de radar de onda guiada (todos de Krohne), con un desempeño excelente en general.
- La mayoría de los mareógrafos están sometidos tanto al filtrado físico (cilindros de amortiguación) como temporal de los datos. Algunas estaciones son al aire libre sin filtrado mecánico. No se ha informado sobre efectos importantes debidos al sesgo por olas.
- ✓ **Alemania:** el Instituto Federal de Hidrología (BAFG) describe los estudios sobre medidores de radar para el nivel del mar, el estado del mar y la medición de la capa de hielo que se han llevado a cabo durante más de un decenio en estaciones de pruebas en el Mar del Norte, equipadas con medidores basados en otras tecnologías para comparar. El presente informe se centra en la precisión de las mediciones del nivel del mar. El análisis revela que la incertidumbre de las mediciones del nivel del mar por radar aumenta linealmente con la altura de las olas y no depende del período. Se ha planeado más trabajo que se centrará en técnicas de filtro avanzadas para las mediciones de radar similares a las que empleó Boon (2014).
 - ✓ **Alemania:** el Organismo Federal de Cartografía y Geodesia (BKG) informa del desempeño aceptable de los sensores VEGAPULS-61/62 como mareógrafos de verano en la Antártida. Señalan que los datos presentan más ruido durante fenómenos con olas altas, pero que el ruido no parece afectar a los valores medios y se puede eliminar mediante filtrado temporal.
 - ✓ **La India:** el Instituto Nacional de Oceanografía de la India (NIO) ofrece referencias sobre comparaciones publicadas con anterioridad entre radares (sobre todo, OTT Kalesto) y otros medidores y describe cómo, desde el tsunami del océano Índico de 2004, el NIO ha desarrollado una red de observación costera integrada de informes en tiempo cuasi real que proporciona información del nivel y del estado del mar, así como de las condiciones meteorológicas en superficie en estaciones situadas en costas y en islas.
 - ✓ **Japón:** la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) realizó comparaciones entre un medidor de radar Tokyo Keiki MRG-10 (5,8 GHz) y un medidor de flotador en el mismo cilindro de amortiguación en Tokio durante 21 meses, y llegó a la conclusión de que existía coherencia hasta los 5 mm, lo cual es coherente con sus requisitos. Posteriormente, se utilizó una modalidad similar en 44 estaciones de mareógrafo, con la polarización del haz del radar y la programación optimizados para ignorar las reflexiones de las obstrucciones en cada uno de los cilindros. El evidente éxito de este radar de baja

frecuencia (banda C), con un ángulo de apertura amplio (17°) en un cilindro de amortiguación es un resultado importante a la hora de adaptar el radar para utilizarlo en estaciones existentes.

- ✓ **Sudáfrica:** el Servicio Hidrográfico de la Marina (SANHO) informa de un desempeño aceptable de los sensores OTT Kalesto y RLS, sometidos a calibración del rango in situ.
- ✓ **España:** Puertos del Estado informa de que el Miroc SM-94 tomando datos a 2 Hz ofrece un sistema de medición más preciso y estable que los medidores de presión y acústicos que se usaban antes. Se han resuelto problemas de laminación que varias antenas presentaron al principio. Se han diseñado nuevos y rigurosos protocolos de laboratorio in situ para la calibración periódica del rango y para pruebas de los sensores. La actividad de las olas no afecta a los niveles del mar y de la marea obtenidos cada hora, ni a los promedios mensuales. No obstante, puede afectar a las mediciones del nivel del mar individuales (cada minuto o con frecuencia superior) y, por tanto, a los niveles del mar extremos en las estaciones de la red REDMAR en condiciones de oleaje alto. Los efectos de esas olas todavía no se comprenden por completo. Por una parte, no es fácil distinguir el ruido instrumental o el sesgo de otros efectos locales, como la subida debida al oleaje. Además, en los experimentos de comparación tampoco se conoce bien el efecto de las olas sobre los sensores utilizados para comparar en los mismos puertos, conclusión que coincide con la de la NOAA.
- ✓ **Reino Unido:** El Observatorio Costero del Canal describe el uso de medidores Saab (ahora Rosemount) WaveRadar REX desde 2006 en 5 estaciones en la costa sur de Inglaterra. Los instrumentos están programados para realizar registros a 4 Hz, a fin de obtener posteriormente el promedio de 2 minutos cada 10 minutos. Además, se calcula el promedio de 5 s de una señal de 1 Hz diezmada y se envía al Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI. Las olas también se miden, realizando una derivación espectral de una ráfaga de 30 minutos a 4 Hz, cada 30 minutos. Tres de las cinco estaciones están sometidas a la acción del oleaje y se necesita una reducción de picos considerable, etc., en el programa informático de procesamiento. Un promedio de 480 registros produce un valor robusto para las mediciones de la marea, pero para el procesamiento de las olas debe prestarse especial atención para eliminar los valores

atípicos sin reducir la energía del oleaje observada. No se ha observado desviación instrumental en las series temporales de 10 minutos. Además, parece que no existe un sesgo sistemático debido a niveles de agua más bajos o más altos producidos por las olas. Concluyen que el WaveRadar REX es un dispositivo robusto y fiable con bajos costos de mantenimiento.

- ✓ **Reino Unido:** el Centro Nacional de Oceanografía (NOC) describe métodos para la calibración de varios medidores de radar, tanto en el laboratorio como tras la instalación. Se enfatiza la necesidad de calibrar el rango (preferiblemente antes de la instalación) en casos prácticos en varias estaciones en el Atlántico Sur. Se han realizado comparaciones de datos de radar con datos de medidores de presión en las estaciones del Atlántico Sur. En ellas se han identificado sesgos relativos a las olas en los datos del Waterlog H-3611 y del OTT RLS, que no se comprenden a fondo. No obstante, en entornos de energía más baja, como Puerto Stanley (Puerto Argentino), el desempeño del Waterlog resulta aceptable, aunque de nuevo sujeto a calibración de rango antes de la instalación.
- ✓ **EE. UU.:** La NOAA informa de un desempeño adecuado del Waterlog H-3611 en condiciones de oleaje bajo y medio, sujeto a una rigurosa calibración de rango y a pruebas del sensor antes de desplegarlo y de realizar la medición de alta frecuencia (1 Hz). En condiciones de oleaje bajo y medio, se ha observado que los efectos de las olas sobre las mediciones del nivel del mar son menores que en los medidores acústicos de cilindro de amortiguación que está previsto que sean reemplazados en toda la red.
- ✓ **EE. UU.:** el Servicio Geológico de los Estados Unidos quedó satisfecho con la precisión de las tecnologías más antiguas (flotador y presión) para la medición del nivel de aguas interiores. Sin embargo, se reconoció que las ventajas de la tecnología sin contacto físico directo de los medidores de radar son factores importantes para la instalación y el mantenimiento. Las primeras pruebas utilizaron dispositivos de FMCW con lectura SDI-12 (p. ej., DAA H-360). En las mediciones se observó un sesgo que depende de la temperatura. Las comparaciones con mediciones de burbuja o de flotador no fueron concluyentes debido a que los datos de los medidores de referencia se corrigieron según la información del radar. A pesar de ello, es motivo de satisfacción que los datos del radar se correspondiesen más estrechamente con las mediciones del medidor de cable lastrado que con

los datos obtenidos por medidor de burbuja. En las pruebas siguientes se ensayaron radares de impulsos con SDI-12, y se constató su mayor precisión y menor consumo de energía en relación con los dispositivos de FMCW. Las mediciones de rango del DAA H-3611 no mostraron ninguna tendencia en el sesgo en función del propio rango, mientras que el VEGAPULS-62 sí que presentó una tendencia en el sesgo. No se percibieron efectos del oleaje ni de las temperaturas diurnas sobre ninguno de ellos. No obstante, las pruebas de laboratorio mostraron que los parámetros iniciales daban como resultado una submedición del nivel del agua para ciertas condiciones de oleaje. Debido al buen desempeño general del H-3611, se utiliza desde entonces en todo el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Se resolvieron la mayor parte de los problemas ocasionados por insectos y por condensación en las antenas. Además, se descubrió que los modelos de antena cerrada (OTT RLS y DAA H-3613) eliminan por completo la mayoría de los problemas de las antenas. Desde entonces, se han observado algunos problemas, como un sesgo de ciclo diurno en la medición debido posiblemente a los efectos de la temperatura, saltos de datos que se sospecha que son causados por las olas producidas por el viento, y otros efectos debidos al hielo y a objetos en el haz. Concluyen que es posible que el radar no sea adecuado para todas las estaciones. Sin embargo, la experiencia demuestra que los sensores de radar se pueden utilizar en muchas estaciones para proporcionar mediciones del nivel de agua con una precisión similar o mejor que la de tecnologías más antiguas, con las ventajas adicionales de la técnica sin contacto.

Podemos resumir estas conclusiones del siguiente modo:

- Se ha concluido que el radar es un medio aceptable para medir el nivel del mar, siempre que se tengan en cuenta las cuestiones relativas a la calibración del rango, la frecuencia de la toma de datos y el filtrado de datos. Algunos grupos tienen ya una experiencia considerable en el uso de medidores de radar en redes amplias durante períodos largos, y se considera que funcionan bien.
- De hecho, ningún grupo identifica el ruido como un problema en las mediciones del radar que se realizan a alta frecuencia, dado que el filtrado puede eliminar la mayor parte. Sin embargo, es fundamental tomar los datos a una frecuencia lo más cercana posible a 1 Hz, o, si se puede, a mayor frecuencia, con el sensor configurado para operar en modo de tiempo de respuesta rápida (p. ej., 1 segundo). El ruido se puede eliminar bien por “filtrado mecánico” en el diseño del sistema del mareógrafo, bien por “filtrado temporal” posterior fuera de línea.
- No hay criterios, como la precisión, que lleven a una preferencia por los radares de impulsos sobre los radares FMCW, o viceversa. Sin embargo, ambos tipos presentan pros y contras, que pueden ser consideraciones importantes en cada situación (tabla 2.1).
- Las olas siguen siendo un posible problema para algunos sensores en algunas estaciones, y es necesario entender mejor sus efectos. Hay situaciones en las que los medidores de radar no funcionan bien y los problemas en estos casos suelen estar relacionados con las olas. En estas situaciones, los usuarios deben investigar el uso de otras tecnologías de mareógrafo.
- Existen muy pocas obras teóricas sobre el efecto de las olas en las interacciones del radar con la superficie del mar y los cambios que provocan en los registros del nivel del mar.
- El uso de sensores de banda C (en lugar de los dispositivos de banda S, más comunes, que podrían suprimir los sesgos producidos por las olas) ha dado resultados satisfactorios en Australia y en Japón que deben investigarse más a fondo.
- La mayoría de los grupos están de acuerdo en que es deseable emplear sensores de presión auxiliar junto a los medidores de radar.
- No existen recomendaciones generales con preferencias sobre un fabricante determinado de medidores de radar. Es obvio que el costo será a menudo un problema a la hora de elegir un fabricante, pero son cuestiones todavía más importantes para programas como el GLOSS que los medidores seleccionados estén calibrados correctamente y que se entiendan los efectos de las olas. Los grupos que encuentren dificultades a la hora de elegir un fabricante deberían consultar una o más de las organizaciones que figuran en el Suplemento.
- Muchos grupos están interesados en llevar a cabo un conjunto de comparaciones detalladas del desempeño de diferentes medidores de radar que operen en la misma estación (o en varias estaciones con diferentes condiciones de oleaje). El GLOSS es un programa adecuado para organizar pruebas de esta índole.

4. Instalación de los medidores de radar

4.1 Elección de una estación de mareógrafo

Los factores asociados a la elección de una estación de mareógrafo que se mencionan a continuación se aplican a todos los tipos de medidores, no solo a los de radar. En ocasiones, se necesita un medidor para una aplicación concreta y está claro dónde debe situarse. Por ejemplo, un medidor que se necesita para la navegación en un puerto debe operarse desde el propio puerto; un medidor que se instale para investigar un proceso local como la erosión costera debe estar situado cerca del lugar donde se da ese proceso. En cambio, en otras ocasiones, puede haber varias posibilidades de emplazamiento de un medidor en una sección de costa concreta, que habrá que evaluar de acuerdo con varios criterios. Por ejemplo, para seleccionar una estación para la Red Básica del GLOSS, normalmente se elegiría un lugar lo más expuesto al océano posible para situar el medidor, y no el estuario de un río. Sea cual sea la aplicación, será importante tener en cuenta muchos de los factores que se detallan a continuación.

Los requisitos generales son:

- Debe seleccionarse una estación de mareógrafo adecuada que esté conectada por agua relativamente profunda a mar abierto, de modo que pueda proporcionar información representativa de esa parte del océano.
- La estación debe ser adyacente a agua sujeta a la plena amplitud de la marea y no secarse durante la marea baja.
- Por ejemplo, si se va a usar un cilindro de amortiguación, debe haber al menos dos metros de profundidad en el agua durante la marea astronómica más baja. El desagüe no debe estar en contacto con el lecho marino, pero sí estar situado a una profundidad suficiente, que permita que el flotador funcione aproximadamente un metro por debajo de la marea astronómica más baja. Si se utiliza un medidor de radar, el agua debe ser lo suficientemente profunda como para que las rocas no queden expuestas debido al oleaje durante la marea baja.
- Deben existir medios de acceso adecuados para la instalación y el mantenimiento.
- Debería existir un refugio o un contenedor de almacenamiento adecuado, tan cerca del medidor como sea posible, que pueda contener todos los aparatos electrónicos del medidor. Ningún refugio debe ser accesible para el público y todos deben estar asegurados contra el vandalismo y los robos.
- Debe existir alimentación de la red eléctrica ininterrumpida o acumuladores/paneles solares (o ambos en caso de estaciones para tsunamis), así como acceso telefónico o por satélite para la transmisión de datos en tiempo cuasi real.
- Las inmediaciones deben ser estables en la medida de lo posible e, idealmente, una instalación debe fijarse en roca sólida. La zona no debe ser susceptible al hundimiento por causa de trabajos subterráneos, por ser tierra ganada al mar, ni prestarse a deslizamientos en el caso de lluvia prolongada (es decir, la zona debe contar con el drenaje adecuado), ni estar situada donde la erosión marina sea probable. Como resultado, la zona local debe ser adecuada para establecer una red de cotas de control geodésico. Las marcas, en concreto la cota de referencia de mareógrafos (TGBM) y la cota del GNSS (GNSSBM), deben estar protegidas frente a daños accidentales.
- La estación debe estar equipada con una económica regla de mareas o mira a fin de evitar errores manifiestos en el dátum de la información del nivel del mar registrado por el medidor, incluso si el medidor emplea las tecnologías más modernas.
- La instalación debe ser capaz de resistir las peores condiciones ambientales previstas (hielo del invierno, tormentas, etc.). Esto puede influir en la elección de tecnología de medidor que se va a usar. Es evidente que deben evitarse las posiciones expuestas a condiciones ambientales extremas con el fin de que sea posible obtener una serie temporal de nivel del mar a largo plazo.
- Si se van a instalar medidores de cilindro de amortiguación o acústicos, el tubo del cilindro de amortiguación o acústico debe tener la altura suficiente para registrar los niveles del mar más altos. Puede ser necesario el permiso de las autoridades portuarias si, por ejemplo, la instalación está en un muelle concurrido.

Tabla 4.1

Ventajas y desventajas de diferentes montajes de radar

Radar sin contacto al aire libre (impulsos o FMCW)	Radar sin contacto en cilindro de amortiguación de acero inoxidable	Radar de onda guiada en cilindro de amortiguación
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instalación sencilla, rápida y barata con soporte sobre el agua. - No necesita un muelle vertical. - Puede instalarse debajo de un puente para medir el nivel del mar o la distancia al agua. - Algunos sensores permiten las mediciones de olas. - Al no tocar la superficie del agua, requieren mucho menos mantenimiento. 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puesto que el diámetro del nuevo tubo es mucho menor, se puede instalar en el interior de un cilindro de amortiguación existente para reemplazar un mareógrafo de flotador tradicional. - Puede instalarse en un muelle vertical. - El tubo de acero inoxidable se utiliza como cilindro de amortiguación y guía de onda, así que se limita la atenuación de la potencia de señal y se pueden ampliar las mediciones de rango a 15-20 m. 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se puede instalar en el interior de un cilindro de amortiguación existente para reemplazar un mareógrafo de flotador antiguo. - A la hora de equipar un cilindro de amortiguación existente, no son necesarios tubos adicionales. - Se puede instalar en un muelle vertical y en el interior de un tubo de PVC de 20 cm de diámetro, que es más barato que los tubos de acero inoxidable.

<ul style="list-style-type: none"> - Ideal para largos períodos de observación (años). - Registra oscilaciones de alta frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las mediciones del nivel del mar presentan menos ruido gracias al filtrado mecánico de los cilindros de amortiguación y la protección ejercida por el cilindro contra la pulverización de agua marina. - Las mediciones de calibración por inmersión son más sencillas y precisas gracias a que la superficie del mar está en calma. - Al no tocar la superficie del agua, requiere mucho menos mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las mediciones del nivel del mar presentan menos ruido gracias al filtrado mecánico de los cilindros de amortiguación y la protección ejercida por el cilindro contra la pulverización de agua marina. - Las mediciones de calibración son más sencillas y precisas gracias a que la superficie del mar está en calma. - La medición del nivel del mar se ve menos afectada por las señales de reflejos de trayecto múltiple o lóbulos secundarios. - El cable de acero inoxidable se utiliza como guía de onda para limitar la atenuación de la potencia de señal y ampliar las mediciones de distancia a 15-20 m.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No es adecuado para una variación de marea amplia (> 10 m) debido a los resultados de anchura de haz en una zona variante de superficie de mar iluminada y una posible atenuación de señal elevada. - La detección de la superficie es sensible al entorno (detección de lóbulos laterales) y a las señales de trayecto múltiple. - La detección de la superficie puede verse afectada por ecos de pulverización de agua marina. - Embarcaciones u objetos flotantes pueden cruzar el haz. - Los controles de calibración que utilizan mediciones por inmersión o regla de mareas son complicados y menos precisos en caso de viento y mar picada. 	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es caro debido a la infraestructura necesaria, que incluye: <ul style="list-style-type: none"> • un tubo de acero inoxidable y 8 cm de diámetro como guía de onda, • un tubo adicional de PVC y 8 cm de diámetro para las mediciones por inmersión. - Requiere un muelle vertical o un cilindro de amortiguación ya existente. - Durante la instalación, es necesaria una grúa para colocar los tubos con bajamar en mareas vivas. - En caso de atarquinamiento, se deben limpiar de manera regular las partes inferiores de los tubos y cilindros de amortiguación. - Filtra las observaciones de alta frecuencia, que pueden ser útiles para determinadas aplicaciones científicas. 	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es también caro debido a la infraestructura necesaria, que incluye: <ul style="list-style-type: none"> • un tubo de PVC y 30 cm de diámetro para las mediciones por radar e inmersión. - Requiere un muelle vertical o un cilindro de amortiguación ya existente. - Durante la instalación, es necesaria una grúa para colocar los tubos con bajamar en mareas vivas. - En caso de atarquinamiento, se deben limpiar de manera regular las partes inferiores de los tubos y cilindros de amortiguación. - Es necesario inspeccionar y limpiar el cable de acero inoxidable en caso de aparición de concreción a lo largo del cable. Dicha concreción ralentiza la propagación de las olas y provoca una variación de varios centímetros de las mediciones difícil de detectar. - En determinadas ocasiones, el cable puede perder su contrapeso, por lo que es necesario realizar controles regulares.

Los lugares que se deben evitar son:

- Los estuarios de los ríos, donde el agua del estuario se mezcla con el agua marina en diverso grado durante un ciclo de la marea y en diferentes épocas del año, creando así fluctuaciones en la densidad del agua. Esto puede tener repercusiones importantes en las mediciones con medidores de flotador en los cilindros de amortiguación, porque debido a la formación de distintas capas en el agua que entra al cilindro en diferentes momentos, pueden producirse variaciones entre la densidad del agua de dentro y la de fuera del cilindro. También influirá en las mediciones por presión, dado que la densidad supuesta para la conversión de la presión al nivel del mar no será constante. Las corrientes asociadas al flujo fluvial pueden ocasionar desagües en el cilindro de amortiguación y en los tubos de amortiguación de los medidores acústicos. Después de fuertes tormentas lluviosas, los escombros que flotan río abajo podrían dañar un medidor.
- Los emplazamientos afectados por corrientes fuertes o que estén expuestos directamente a las olas, que pueden influir localmente en el nivel del mar.
- Los emplazamientos cerca de desembocaduras pueden acarrear turbulencia, corrientes, dilución y desplazamientos de sedimentos.
- Los emplazamientos en un puerto en el que pueden producirse oscilaciones locales o golpes de agua, p. ej., en una esquina en la que se juntan dos muelles.
- Los emplazamientos por los que pasen embarcaciones. En estos emplazamientos, las embarcaciones podrían inducir oscilaciones del nivel del mar de alta frecuencia, efímeras pero amplias; podrían producirse daños por colisión; la turbulencia de las hélices podría causar movimiento de fango (de importancia sobre todo para los cilindros de amortiguación); y las embarcaciones que pasen o que amarren bajo un medidor de radar ocasionarían una pérdida de datos.
- Los emplazamientos en los que existen probabilidades de que se lleven a cabo trabajos de construcción en el futuro próximo que puedan afectar al régimen de mareas (p. ej., nuevos muelles o malecones), o que requieran el traslado del medidor de mareas, interrumpiendo así la serie temporal del nivel del mar.
- Deben evitarse los emplazamientos en los que se formen bolsas de retención (aislamiento del mar

abierto) durante niveles de marea extremadamente bajos. También deben evitarse aquellos donde haya rocas justo bajo la superficie que pudiesen quedar expuestas durante períodos de alto oleaje. De igual manera, las franjas arenosas situadas por debajo de la superficie entre el emplazamiento y el mar abierto pueden dar lugar a medidas de niveles no característicos, que pueden variar al cambiar las posiciones de las franjas arenosas.

Otros factores dignos de consideración cuando los cambios en el emplazamiento del medidor son inevitables:

- Cuando un medidor se desplaza una distancia pequeña, quizás debido al desarrollo del puerto, la nivelación entre las cotas de ambos emplazamientos debería ser tal que la serie temporal del nivel del mar pudiese continuar como si de un único registro se tratase.
- No obstante, si un medidor se mueve una cierta distancia a lo largo de una línea de costa, es preciso tener en cuenta que podría existir una diferencia en el nivel medio del mar (relativo al geoide o "superficie del nivel") entre ambas ubicaciones debido a la dinámica de los océanos (los geodestas denominan "topografía dinámica media" a esta variación del nivel medio del mar). Los niveles medios del mar de una estación pueden presentar varios centímetros de diferencia en la altura, en comparación con los niveles correspondientes situados a algunos kilómetros a lo largo de la línea de costa, o en la zona exterior de un puerto en vez de la interior. Estas diferencias significan que las dos series temporales no se pueden combinar como si fuesen un registro único.
- Un buen ejemplo es el desplazamiento de un medidor a cierta distancia en el estuario de un río. Habrá una diferencia sistemática entre el nivel medio del nivel del mar a largo plazo observado en ambos emplazamientos debido a la variación espacial en la densidad. Esto será difícil de cuantificar (y, por tanto, será difícil ajustarse a ello) sin unas mediciones y un modelado oceanográficos detallados. Además, habrá cambios en el ciclo estacional del nivel del mar.
- Otro ejemplo es el de mover un medidor instalado cerca de un promontorio a otro emplazamiento situado a lo largo de una costa abierta cercana. Dado que los promontorios son lugares en los que suelen producirse altas corrientes de la marea, que pueden

dar como resultado un nivel medio del mar más bajo (relativo al geode) que en el segundo emplazamiento, habrá una diferencia sistemática entre los niveles del mar medidos en ambas ubicaciones. Esas mismas consideraciones se aplican a pares de medidores dentro y fuera de puertos con entradas restringidas.

En resumen, los principios generales deben consistir en realizar una selección inicial del mareógrafo que esté bien informada de modo que éste pueda ser utilizado en una estación que presente altas probabilidades de convertirse en estación permanente.

En relación con las perspectivas especiales relativas a situar estaciones de mareógrafos para la monitorización de tsunamis, la Oficina Australiana de Meteorología ha publicado un informe que presta más asesoramiento. Aparte del requisito de emplazar los medidores de forma que el tiempo de llegada sea lo más corto posible, de hecho la mayoría de los criterios son aplicables al emplazamiento de medidores en general (Warne y Brewster, 2014).

4.2 Localizaciones adecuadas de medidores de radar

Aspectos generales que se deben tener en cuenta al inspeccionar una posible localización para la instalación de un medidor de radar:

- Consultar los muchos requisitos generales para una estación de mareógrafo que han sido proporcionados anteriormente.
- Tomar tantas fotografías del sitio como sea posible desde diferentes direcciones (p. ej., dos conjuntos en direcciones opuestas a lo largo de la ribera, una dispuesta en dirección al mar y, si es posible, otra dispuesta mirando hacia tierra desde el mar). Siempre se necesitan buenas fotografías para los informes oficiales y los manuales, por lo que deben ser de la mayor calidad posible. En una localización con una amplia subida de la marea, debe apuntarse la hora a la que se tomaron las fotografías, dado que es muy probable que las impresiones sean diferentes durante mareas extremadamente bajas. Una grabación en vídeo también será muy útil.
- Dibujar un mapa para complementar las fotografías.
- Documentar toda la información local, como los nombres y los datos de contacto de los propietarios del muelle.

- Recordar que uno de los propósitos del ejercicio es calcular la mejor forma de montar el medidor en la estación, de forma que deben tenerse en cuenta los pros y los contras de las distintas posibilidades de montaje (véase sección siguiente).
- Si lo más probable es que un medidor se vaya a montar sobre el agua, debe comprobarse que el sensor tenga una vista ininterrumpida de la superficie del mar, con pocas posibilidades de falsos ecos. Comprobar también las actividades de navegación generales y de otro tipo que transcurran en las inmediaciones. Medir las distancias desde el mar abierto hasta el muelle y observar posibles obstrucciones. Calcular el rango máximo posible de una medición del radar y el tamaño máximo de la huella del radar, y establecer a partir de ellos si es probable que el haz se refleje en blancos que no sean la superficie marina. Comprobar qué longitud deben tener los brazos en voladizo.

4.3 Montaje del medidor de radar

Esta sección examina los diferentes tipos de montaje de medidores a fin de que tengan muchas probabilidades de proporcionar los mejores datos posibles del nivel del mar.

Montaje del medidor de radar sobre mar abierto

- Una elección común a la hora de montar un radar es posicionarlo sobre mar abierto, de forma que el haz del radar se transmita desde el sensor a la superficie marina y retorne sin guía de onda; a continuación se examinan otras posibilidades de montaje. Los aspectos que deben tenerse en cuenta en este caso son los siguientes:
- El medidor debe montarse sobre el agua en un lugar que nunca se seque, y que no tenga rocas ni otros elementos obstructores que queden expuestos con la marea baja.
- Debe proporcionarse una montura (p. ej., un brazo en voladizo) lo suficientemente fuerte para que no le afecten los máximos regímenes de viento previstos, y que no se expanda ni se contraiga con las temperaturas, de forma que el medidor mantenga una altura constante en relación con la cota.
- Debe alinearse el ángulo del haz de modo que quede perpendicular al agua en el límite de una tolerancia

especificada por el fabricante. No debe estar expuesto al peligro de recibir reflexiones falsas del muro de un puerto o de otras estructuras de soporte. La huella del haz tendrá un radio $R_{tan}(\alpha/2)$ donde R es el rango y α es el ancho total del haz. La **figura 4.1** ofrece un ejemplo de un medidor con un ancho total del haz de 12° (semiancho $0,1$ radianes) e indica una distancia de seguridad mínima.

- La altura del sensor situado sobre la superficie debe estar dentro del límite del rango especificado por el fabricante, lo suficientemente alto para que el agua nunca llegue hasta una "zona muerta" de la antena. (Puede que esto sea difícil de conseguir si el medidor está previsto para vigilar grandes oleajes de tormenta o tsunamis que podrían rebasar el medidor).
- No debe elegirse una localización en la que las embarcaciones puedan amarrar bajo el haz, o donde la vegetación o la basura flotante se puedan acumular (p. ej., en las esquinas de los puertos), dando lugar a lecturas erróneas.
- Los medidores de radar están diseñados para reflejarse en una superficie de agua y no de hielo. En las zonas

polares, puede ser preferible utilizar una tecnología de medición diferente, y un radar de onda guiada en un cilindro de amortiguación calentado podría ser una alternativa (véase más adelante y anexo 1). Otra alternativa es operar un medidor de radar durante los meses de verano sin hielo como complemento de un medidor de presión permanente (véase Liebsch y Kühmstedt, Suplemento)

- De la misma forma, deben evitarse los lugares en los que haya espuma, ya que la espuma absorbe los impulsos transmitidos.

Los aspectos de diseño del montaje deben incluir:

- El bastidor de montaje debe estar fabricado en un material que no se corroa en el entorno costero (opciones adecuadas son el aluminio pintado o perfiles estructurales de fibra de vidrio), y debe diseñarse de tal forma que cuando el medidor se fije al extremo del brazo, la altura de la marca de referencia del medidor (que se puede relacionar mediante calibración al punto de rango cero efectivo del sensor) se identifique con respecto a otra marca en el extremo del brazo que está en tierra. Esta relación

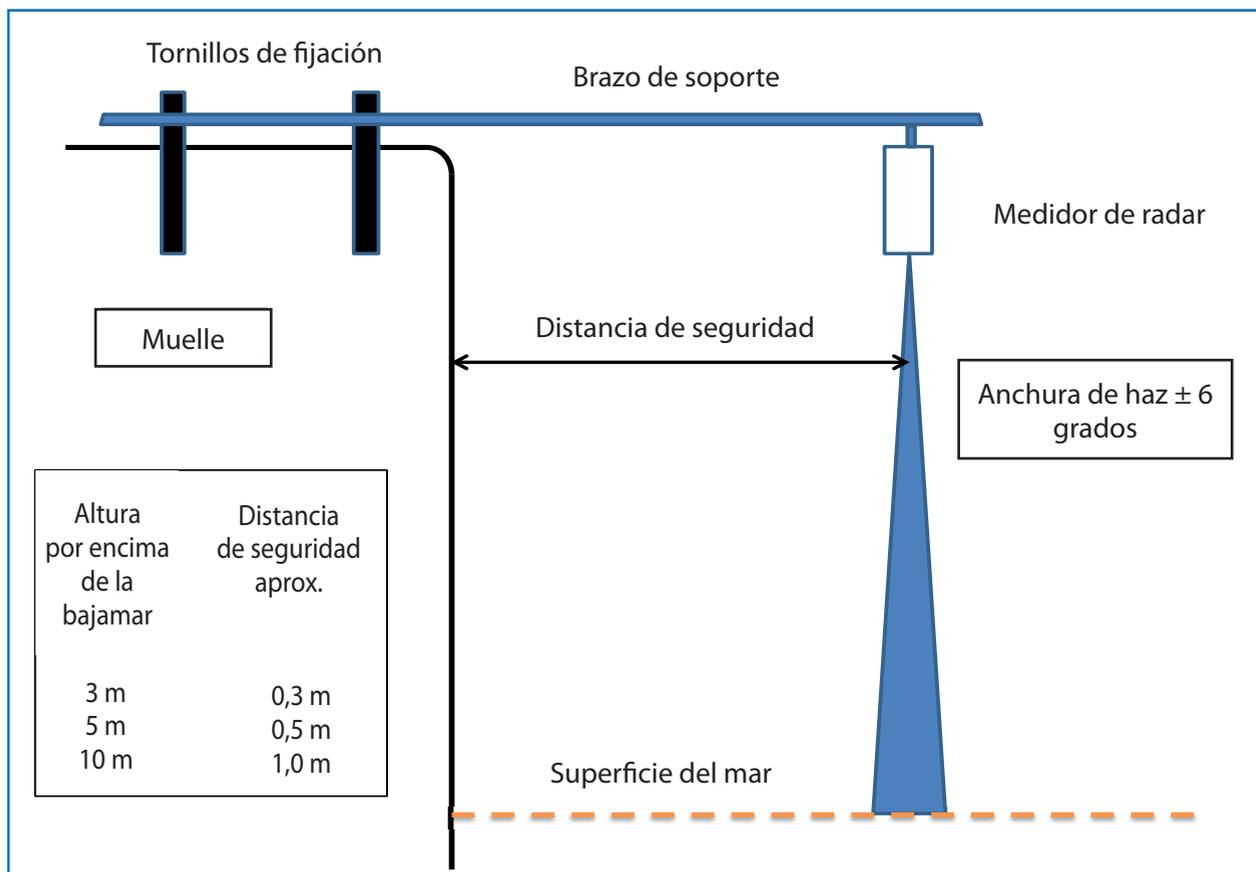


Figura 4.1 Esquema de medidor de radar con haz de $\pm 6^\circ$ instalado cerca de un muro de un puerto en el que se indica la distancia de seguridad aproximada.

debe confirmarse montando y midiendo todo el equipo en el laboratorio, antes de instalarlo. Después se podrá determinar fácilmente la altura de la marca de referencia con respecto a las cotas mediante la nivelación de la marca en tierra y la red local de cotas.

- El medidor puede situarse en su posición de funcionamiento fijando al extremo de un brazo en voladizo cuando ambos están en tierra y luego deslizándolo hasta situarlo sobre el agua. También se puede diseñar el brazo para que gire sobre un eje de tal manera que el extremo quede en tierra cuando el medidor está fijado, y se gire hasta situarlo sobre el océano para el funcionamiento. En cualquier caso, el brazo debe estar totalmente horizontal y firmemente empernado. Un aspecto crucial es que al trabajar con el brazo (mediante empuje o giro), con el fin de mover el medidor de su posición de funcionamiento a un punto desde el que sea accesible para tareas de mantenimiento (o viceversa), el medidor no quede reinstalado a una altura diferente de la anterior. Después de reinstalarlo, deben comprobarse las alturas relativas de las diferentes marcas. No obstante, lo ideal es que el propio diseño del bastidor evite los cambios de altura no previstos.

Ejemplos de un bastidor de montaje:

- (i) La **figura 4.2** muestra un sencillo bastidor con brazo utilizado en muchas instalaciones de África y del océano Índico. En este caso, el brazo está en una posición fija predeterminada cuando se emperna al bastidor.
- (ii) En la **figura 4.3** se muestra un ejemplo de un brazo que se empuja y se emperna en la posición deseada. Esta instalación está situada en Alejandría (Egipto) y el brazo que se muestra es el soporte de un medidor OTT Kalesto.
- (iii) Un brazo similar al de Alejandría, pero que se gira hasta la posición deseada, se muestra en la figura 3.6 de la COI (2006). La fotografía muestra una instalación de Liverpool (Reino Unido) en la que el brazo es el soporte de un OTT Kalesto.
- (iv) La NOAA utiliza un anillo redondo para montar un medidor de radar de bocina sobre el terreno (p. ej., un Waterlog H-3611). El anillo es un disco de aluminio de 1 pulgada de grosor con un orificio en el que se inserta la bocina, de forma que la parte inferior del reborde circular del sensor se alinee sobre la superficie del anillo (**figura 4.4**). Los orificios del borde exterior del anillo sirven para fijarlo a una

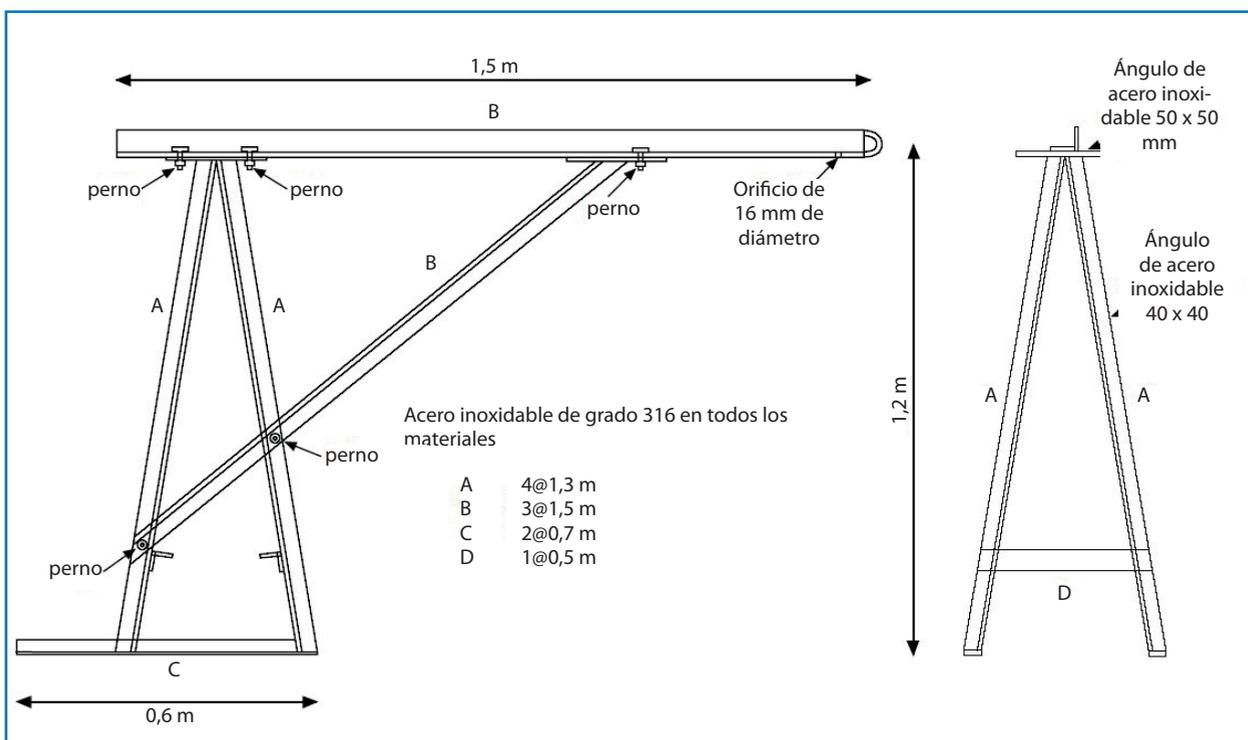


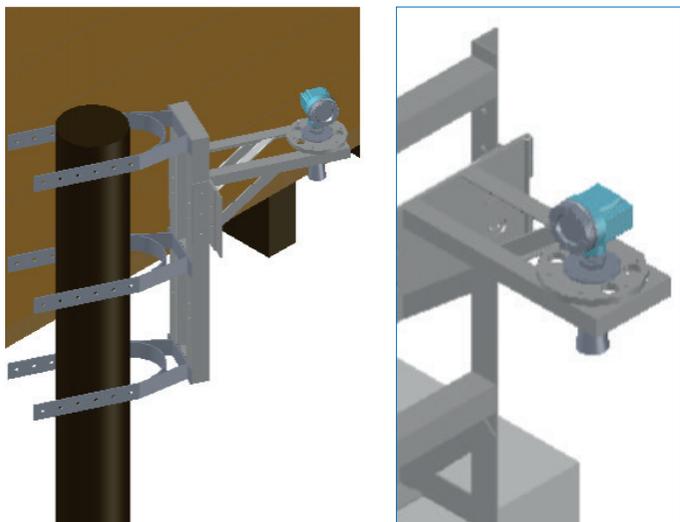
Figura 4.2 Soporte básico de medidor de radar como el utilizado en varias estaciones de África y el océano Índico.



Figura 4.3 Medidor OTT Kalesto en Alejandría al final de un brazo que se encaja y atornilla en la posición correcta. (Fotografía: T. Aarup, COI).



Figura 4.4 Anillo de montaje utilizado por la NOAA para medidores de radar con antena de bocina Waterlog H-3611. El anillo es un disco de aluminio con un espesor de 1 pulgada y agujeros para acoplar el sensor al anillo y el anillo al soporte. Se puede colocar una vara de nivelación en la zona superior del disco para posibilitar una conexión geodésica con cotas cercanas.



Concepto de pilote con soporte de riel de conimicut y abrazaderas de pilote rediseñadas

Instalación en muro con soporte en muro para mwwl

Figura 4.5. Placa de montaje metálica plana de la NOAA con brazos que permiten un acoplamiento apropiado para diferentes tipos de estructuras (en este caso, para sujeción en pilotes y muros).

placa de fijación plana metálica, mientras que los orificios de la parte interna sirven para fijar el sensor al anillo. La parte superior del anillo ofrece una superficie en la que situar una vara de levantamiento de datos geodésicos para la nivelación con respecto a las cotas cercanas. La NOAA (2013a) ofrece instrucciones de instalación, y los dibujos técnicos del anillo y equipo conexo (p. ej., una cubierta de PVC que se usa para proteger el sensor) se pueden obtener de robert.heitsenrether@noaa.gov. A su vez, la placa de fijación metálica cuenta con abrazaderas triangulares a cada lado que permiten que toda la montura y los sensores se fijen a diferentes estructuras, por ejemplo, sujeción en pilotes y muros, como se muestra en la [figura 4.5](#).

- (v) Algunos fabricantes montan el medidor de radar horizontalmente en un tubo que sobresale sobre el agua. El medidor se sitúa en el extremo del tubo que está en tierra y transmite a un reflector de 45° del otro extremo. De este modo, el haz del radar se refleja hacia el mar y retorna a través del reflector al sensor.

Montaje del medidor de radar en un cilindro de amortiguación

Otra posibilidad de montaje es usar un medidor de radar de antena de bocina instalado en la parte superior de un cilindro de amortiguación, en lugar de instalarlo sobre mar abierto. Esta opción puede ser especialmente conveniente donde ya exista un cilindro de amortiguación desde hace tiempo; de lo contrario, el

costo y la dificultad de construir un nuevo cilindro podrían suponer una desventaja. El cilindro de amortiguación garantiza que la superficie marina que se mide esté lo más tranquila posible para conseguir una reflexión óptima. Lo esencial es que el diámetro del cilindro sea lo suficientemente grande para que la reflexión de la mayor parte de la energía se produzca desde la superficie del agua en todos los estados de la marea (especialmente con marea baja) y no desde las paredes metálicas. Las reflexiones también son sensibles a las piezas metálicas del interior e, incluso en el exterior, el cilindro puede crear ecos falsos. En la práctica, la opción de usar un radar en un cilindro convencional dará los mejores resultados si la subida de la marea es pequeña y el cilindro no es demasiado largo. El cilindro de amortiguación debería limpiarse periódicamente para mantener la precisión (al contrario que las instalaciones al aire libre, que necesitan relativamente poco mantenimiento). Los medidores de antena de bocina montados en cilindros de amortiguación en Francia se describen en André et al. (Suplemento). En casos de señales de trayectos múltiples fuertes en un cilindro que ya existía, puede que lo mejor sea utilizarlos en un tubo de acero inoxidable o en un sensor de onda guiada, ambos descritos a continuación.

Otra posibilidad que requiere la amortiguación del agua es el montaje de un medidor de radar, sin la antena de bocina, en la parte superior de un tubo de acero inoxidable vertical (de un diámetro aproximado de 8 cm), que tiene un extremo cónico para filtrar el ruido, como si fuese un cilindro convencional con un medidor de flotador, y que también funciona como onda guiada para el radar. La onda guiada favorece la propagación con una pérdida de energía limitada y, además, reduce los ecos falsos. André et al. (Suplemento) ofrecen un ejemplo de esta técnica en Fos-sur-Mer (Francia), donde se utiliza un segundo tubo para calibrar el radar con mediciones de buzamiento. La [figura 4.6](#) muestra otra instalación en Dragør (Dinamarca), en este caso con un tubo de 17 cm de diámetro. El tubo ha de ser liso para no generar reflexiones falsas, y debe mantenerse lo más limpio posible. Otro aspecto importante es tener en cuenta si el mar (y el agua del tubo) se congela en invierno: de ser así, será necesario un sensor de presión a modo de sensor de seguridad.

Montaje de radar de onda guiada

Otra opción para el montaje de un cilindro de amortiguación es el montaje de onda guiada ([figura 4.7a](#)). El lóbulo principal de un impulso de radar se propaga a lo largo de



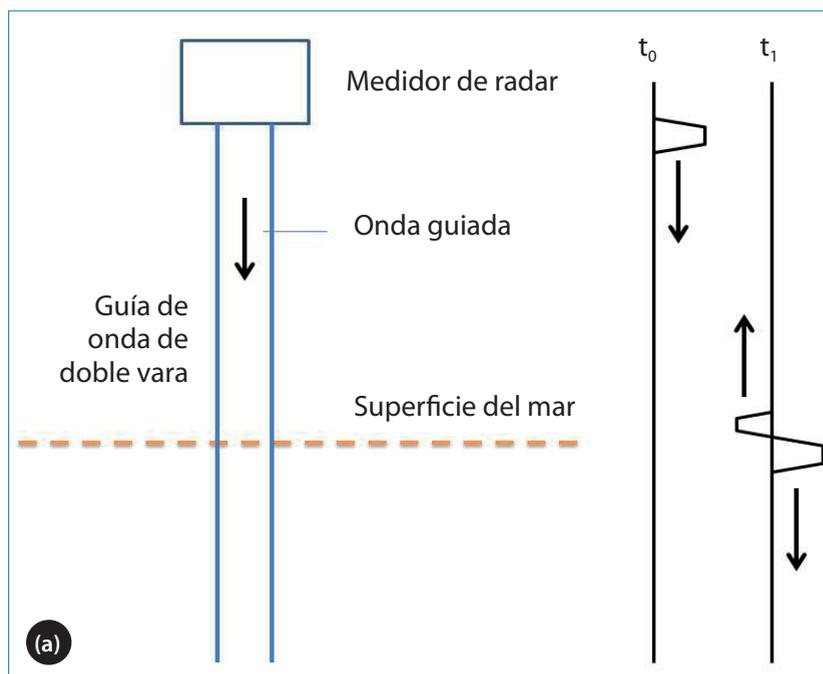
Figura 4.6 Instalación en Dragør, Dinamarca. A la izquierda, se puede ver un medidor de radar Endress+Hauser montado sobre un tubo de acero inoxidable (diámetro aproximado de 17 cm) que funciona como cilindro de amortiguación y guía de onda. Este tubo cuenta con un tapón terminal con un diámetro de entrada de 30 mm. El interior del tubo contiene un filtro para evitar intrusiones biológicas. En la parte superior del tubo, hay 4 agujeros con filtros para prevenir la condensación en la antena del radar. A la derecha, se observa un tubo de acero inoxidable que contiene cables del sensor de presión. (Fotografía: Instituto Meteorológico de Dinamarca).

un cable de guía de onda de acero inoxidable sumergido en el agua y refleja el lugar en el que cambia la constante dieléctrica del medio circundante (es decir, interfaz aire/agua). La mayor parte de la energía del radar se propaga cerca de la onda guiada (normalmente, un 80% en un radio de 8 pulgadas, según Riley y Jethra, 2012), de forma que más energía vuelve reflejada al transmisor que con el radar de espacio libre. Las funciones del cilindro en este caso son mantener el agua en calma y proteger el cable.

Esta técnica también se denomina onda guiada o reflectometría de dominio de tiempo y se desarrolló para la medición de los niveles de tanques industriales. La mayor parte de la experiencia con estos instrumentos como mareógrafos se ha adquirido en Francia, utilizando el sensor Krohne BM100. Martín Míguez et al. (2008a) describieron el funcionamiento en un cilindro de amortiguación grande (1 m²) en Brest, donde se obtuvo coherencia milimétrica entre el nivel del agua del cilindro

medido por el radar y por sonda manual a lo largo de muchos ciclos de mareas (esto se conoce como la prueba de Van de Castele, véase el volumen 1 de este manual), mientras que la coherencia obtenida en un cilindro de tamaño similar en Roscoff fue centimétrica. Se considera que la menor coherencia de este último se debió a que las mediciones por sonda manual fueron menos precisas.

La generación de sensores BM100, más antigua, ha sido sustituida por los Optiflex 1300C, que poseen características de radar mejoradas y mayor precisión, y requieren menos energía. El SHOM los pone en funcionamiento en cilindros de amortiguación con diámetros mínimos de 300 mm, en tipos de cilindros que van desde antiguas construcciones en piedra hasta tubos de polietileno (**figura 4.7b**, véase también refmar.shom.fr y André et al., Suplemento). Existen sistemas de onda de guía de cable o de vara, únicos o dobles. Las varas largas pueden ser difíciles de manejar si se van a



(b) Sensor de radar de onda guiada instalado en un cilindro de amortiguación ubicado en Sète, Francia

(c) Cable de acero de guía de onda (4 mm de diámetro) utilizado en instalaciones francesas de radar de onda guiada, con un peso cilíndrico (20 x 100 mm) que mantiene el cable en posición vertical. En muchos emplazamientos, será necesario limpiar el peso de vez en cuando para eliminar la biocorrosión.



Figura 4.7

a) Esquema de un radar de onda guiada, o reflectometría de dominio temporal, en un cilindro de amortiguación con reflejo de parte de la energía transmitida en la superficie del mar (Brumbi y Van Zyl, 2009). En este ejemplo, se muestra una guía de onda de doble vara. El tiempo de recorrido total de la onda guiada será $t_0 + t_1$, y la altura del medidor de radar sobre la superficie del mar será $\frac{c}{2} \frac{t_0 + t_1}{2}$, donde c es la velocidad de la luz. **b)** Sensor de radar de onda guiada instalado en un cilindro de amortiguación ubicado en Sète, Francia **c)** Cable de acero de guía de onda (4 mm de diámetro) utilizado en instalaciones francesas de radar de onda guiada, con un peso cilíndrico (20 x 100 mm) que mantiene el cable en posición vertical. En muchos emplazamientos, será necesario limpiar el peso de vez en cuando para eliminar la biocorrosión.

usar en cilindros de amortiguación, y es preferible una onda de guía de cable unida a un peso por un extremo para mantenerlo tenso y vertical (figura 4.7c).

Otros fabricantes también producen tipos similares de medidor de radar de onda guiada (p. ej., VEGAFLEX-81

o Endress+Hauser Levelflex). La documentación del VEGAFLEX-81 explica cómo instalar el radar de guía de onda en un tubo de metal (no de plástico), con un peso de centrado para mantener el cable en vertical.

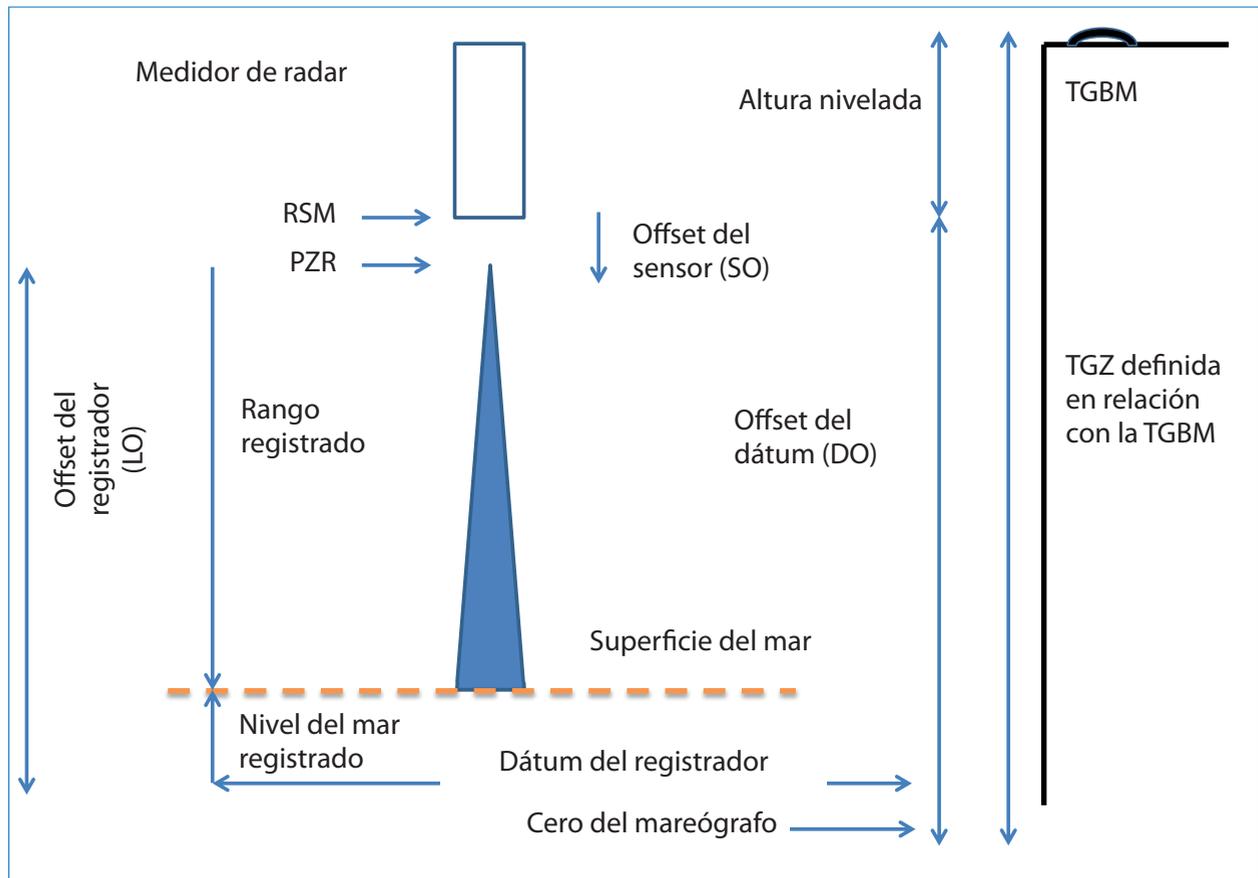


Figura 4.8 Esquema de medidor de radar, la marca de medición de referencia (RSM), el punto de rango cero (PZR), el dátum del registrador de datos, el cero del mareógrafo (TGZ) y la cota de referencia del mareógrafo (TGBM). Se deben conocer todos estos niveles en relación con el resto.

4.4 Antes de la instalación

Determinación del offset del sensor

Una de las cuestiones más importantes para cualquier mareógrafo, de radar o de otro tipo, es conocer el dátum de las mediciones del nivel del mar que ofrece. Para un radar montado en vertical y que mide hacia abajo, debe conocerse el punto en su interior que corresponde al rango de medición cero (que denominamos punto de rango cero, PZR) así como la relación entre el PZR y una marca de medición de referencia (RSM) claramente definida o fácil de localizar en la carcasa del medidor. La diferencia de altura entre la RSM y el PZR se llama offset del sensor (SO):

$$SO = RSM - PZR$$

donde el offset del sensor tiene un valor positivo si la RSM es superior al PZR.

El nivel del mar registrado por un medidor de radar se calculará a partir del rango registrado utilizando un offset del registrador LO (p. ej., 10 metros) de forma que:

Nivel del mar registrado = offset del registrador (LO) – rango registrado

Si la marca de referencia RSM coincide con el PZR, el dátum de los niveles del mar registrados (el dátum del registrador) se encontrará a un valor LO (p. ej., 10 metros) por debajo del RSM (**figura 4.8**).

La mayoría de los medidores de radar se habrán adquirido sin que la SO venga especificada, y no debe darse por hecho que el PZR está “obviamente” en la parte superior de una antena de bocina ni en la superficie de una antena planar. Algunos fabricantes pueden afirmar que sus medidores tienen el PZR en un punto concreto de su carcasa, pero no es una afirmación fiable. Por ejemplo, el sensor OTT RLS tiene una desviación especificada de -7 ± 6 mm desde su placa de masa de teflón (Illigner et al., 2015). Sin embargo, no se puede suponer que los sensores parecidos del mismo fabricante tendrán el mismo PZR. Por ejemplo, Heitsenrether et al. (2012) concluyeron que los sensores distintos al Waterlog H-3611 presentan una variación de aproximadamente $\pm 1,5$ cm.



Figura 4.9 Ejemplo de un blanco de laboratorio utilizado para determinar el offset del sensor usando una distancia de medición de aproximadamente un metro. La brida circular del sensor está alineada con la superficie exterior del montaje y la distancia a la superficie interior del extremo opuesto del montaje se mide con precisión con una cinta. A continuación, se compara la distancia registrada por el radar con el valor de medición con cinta y se obtiene el offset del sensor ($SO = \text{distancia cinta} - \text{distancia radar}$) (Fotografía: R. Heisenrether, NOAA).

Esta cuestión figura en las fichas técnicas de muchos medidores que se comercializan en la comunidad hidrológica, en virtud de las cuales un usuario debe determinar la SO mediante la comparación de los niveles de agua medidos por radar con los observados en una regla fluvial cercana (cuyo cero podría conocerse como la expresión de un dátum local). Este procedimiento se llama “preparar el terreno” (OMM, 2010). Este método es aceptable en aplicaciones hidrológicas porque los ríos, los lagos y los depósitos suelen tener olas más pequeñas que el océano, y la precisión de la preparación del terreno visual debería ser superior a 1 cm, que será aceptable para sus propósitos.

En principio, la SO de un mareógrafo de radar se podría estimar de forma similar después de haberlo instalado, comparando los niveles de medición del radar con los que se observen en una regla de mareas. No obstante, es posible que este método sea mucho menos preciso en el mar que en los ríos, sobre todo si hay olas grandes, y menos preciso que los métodos que se describen a continuación. Empero, este enfoque basado en el sentido común puede ofrecer un control útil del dátum del medidor durante las sesiones de mantenimiento; volveremos sobre esta opción más adelante.

El offset de un sensor concreto se puede determinar en el laboratorio, antes de la instalación, realizando una serie de mediciones de radar con blancos, midiendo la distancia real con cinta métrica. La primera tarea consiste en definir

la marca de medición de referencia en la carcasa, a fin de medir la distancia desde esta marca hasta el blanco con cinta métrica. La mayoría de los medidores no tienen una marca claramente indicada, pero ese problema se resuelve con facilidad: si no hay una marca clara que se pueda utilizar en la carcasa, puede grabarse o pintarse una. No obstante, debe elegirse con sensatez, de forma que cuando el medidor se instale en su montura, la marca quede accesible para compararla rápidamente con otras marcas de la montura y, de este modo, también a las cotas locales mediante la nivelación (capítulo 6).

Los blancos adecuados son placas metálicas planas y depósitos de agua, y el tamaño del blanco debe ser al menos el doble del que se calcula teniendo en cuenta el rango aproximado y el ancho total del ángulo del radar. En la **figura 4.9**, se muestra un ejemplo de blanco para una medición a corta distancia. Para distancias mayores, el medidor se puede montar sobre un bastidor de laboratorio a fin de que se refleje sobre los blancos de metal o de agua situados en el suelo, de forma que se pueda ajustar la altura del medidor entre uno y varios metros por encima del blanco, midiendo las distancias reales cada vez con cinta métrica. Si se requieren distancias mayores, el medidor podría montarse para transmitir horizontalmente a una placa de metal (de mayor tamaño) situada más lejos dentro del laboratorio.

Las diferencias entre las mediciones de radar y las de cintas métricas deberían investigarse para todos los

rangos de distancia. Si el offset del sensor cambia con la distancia, el error de escala podría deberse a factores de escala incorrectos en bucles de corriente de 4 mA a 20 mA para sensores que no disponen de lectura digital. Podrían producirse anomalías en distancias cortas, en las que algunos medidores tienen una “zona muerta” de medición. Las anomalías también podrían producirse si el haz se refleja en el equipo de laboratorio o en paredes cercanas. Por tanto, debería verificarse cualquier resultado extraño moviendo el medidor y el blanco para garantizar que las reflexiones son limpias. Heitsenrether y Davis (2011) y Pugh et al. han presentado ejemplos de determinación del offset del sensor utilizando los blancos de este modo. (Suplemento).

Con estos métodos se determinará el offset del sensor y se podrá confirmar que la medición de la distancia es precisa tanto en distancias cortas como en distancias largas. Debe recogerse claramente toda la información apropiada para cada sensor, a saber: número de modelo, número de serie, fecha y nombre del operador. Si es posible, también debe registrarse la información ambiental (especialmente la temperatura). Además de estas pruebas básicas que abarcan el offset del sensor y la linealidad del rango, la NOAA lleva a cabo pruebas de tiempo de respuesta en las que se comparan las respuestas del radar a los movimientos rápidos de un blanco con las mediciones por láser, determinando de este modo si cada uno de los sensores da una respuesta similar. Estas pruebas son especialmente importantes para garantizar que los sensores están configurados correctamente en modo de respuesta rápida (p. ej., 1 segundo o similar), tal como se describe en la siguiente sección.

La información referente al offset del sensor debe figurar en los metadatos de cada conjunto de datos en tiempo real que se envía a los centros de datos para el procesamiento en modo diferido (capítulo 8).

Otras cuestiones previas a la instalación

Algunos medidores de radar pueden funcionar con diferentes modos que ofrecen opciones distintas para la frecuencia de la toma de datos o la amortiguación (relativa a la sensibilidad y al ruido). Los diferentes modos deberían estar descritos en la documentación del fabricante, aunque en ocasiones la información no es tan completa como debería ser. Por tanto, hay que investigar todas las opciones tan a fondo como sea posible mediante análisis con otros usuarios y con los fabricantes. En ocasiones, el modo predefinido de fábrica no será el más apropiado para las mediciones del nivel del mar. A la

larga, la única forma de que el modo seleccionado resulte satisfactorio y se generen datos de calidad es comparar los datos del radar con la información del nivel del mar obtenida por otras tecnologías.

Como ejemplo, el medidor de radar por impulsos Waterlog H-3611 puede funcionar en modo normal (o estándar), o rápido, que pueden ofrecer mediciones únicas, normalmente a 1 Hz, que se puedan filtrar con posterioridad procesando los datos fuera de línea para eliminar los efectos de las olas (Boon, 2013; 2014). El modo rápido funciona a mayor velocidad, ya que no realiza el filtrado interno que sí aplica el modo normal. Sin embargo, el modo rápido funciona a una velocidad demasiado alta para algunos registradores de datos, por lo que puede no ser una opción adecuada. También existe un modo especial NOAA, que implica 181 mediciones con un segundo de diferencia cada 6 minutos y da 10 promedios y las desviaciones típicas cada hora, tal y como hacían los medidores acústicos que utilizaba antes la NOAA.

Los medidores VEGAPULS ofrecen un ejemplo de elección de amortiguación de la señal de salida y son conocidos porque tardan varias decenas de segundos en responder a cambios rápidos (Heitsenrether y Davis, 2011). En algunas estaciones se ha visto que la amortiguación corrige eficazmente la influencia de alta frecuencia producida por las olas (ver estudio de Pugh et al., Suplemento).

Selección de la toma de datos del radar

Si los medidores de radar tienen que proporcionar los promedios fiables de 1 minuto (o de 3 minutos, etc.) del nivel del mar requeridos ahora para el GLOSS y para la monitorización de tsunamis (capítulo 5), resulta obvio que deben muestrear a una frecuencia mucho mayor para poder promediar la variabilidad debida a las olas. En este caso, la toma de datos a 1 Hz que ofrecen algunos de los sensores del anexo 1 sería ideal (p. ej. Pérez et al., 2014).

No obstante, algunos grupos nacionales no han tenido, ni tienen todavía, un requisito que les exija realizar mediciones a una frecuencia tan alta, porque su atención se centra en los cambios en el nivel del mar debidos a las mareas, los oleajes de tormenta y en el nivel medio del mar, y no en tsunamis o en otros fenómenos rápidos. Para sus propósitos, son adecuadas frecuencias promedio de 6 o 15 minutos (de hecho, los primeros planes de ejecución del GLOSS establecían solo el requisito de calcular valores cada hora). Así se explica en parte que algunos grupos se limiten a utilizar una toma de datos

menos precisa de una vez por minuto con un medidor de radar para calcular el promedio obtenido cada 15 minutos (p. ej. Pugh et al., Suplemento). Otros grupos tienen estrategias distintas (p. ej., el SHOM calcula el promedio de 15 valores consecutivos de 1 segundo en valores para "1 minuto") en las que la importancia que se le da al "filtrado temporal" depende de si también se emplea el "filtrado mecánico".

Creemos que todos los grupos deberían esforzarse por conseguir una estrategia de toma de datos común en la medida de lo posible, dado que los equipos de radar que se usan son distintos. Además, creemos que la mejor estrategia es registrar a 1 Hz o a una frecuencia superior (p. ej., los grupos de España utilizan 2 Hz y los de Chile, 4 Hz) y calcular el promedio cada minuto. Además, es importante configurar el sensor en modo de tiempo de respuesta rápida para aprovechar la toma de datos de alta frecuencia. En muchos casos, los sensores del radar o sus registradores no serán capaces de funcionar a una frecuencia tan alta. (Por ejemplo, los sensores OTT Kalesto, que ya no se fabrican pero siguen usándose en muchos países, ofrecen valores de un minuto realizando 40 mediciones en un marco temporal de 17 segundos. Han sido sustituidos por los OTT RLS, que toman datos a 16 Hz y calculan promedios cada 20 segundos.) No obstante, en estos casos recomendamos que se configuren para tomar datos lo más rápido que puedan (p. ej., una vez cada 3 segundos) para poder derivar los valores de cada minuto de una muestra de mediciones individuales lo más grande posible. Por supuesto, la

viabilidad de medir rápidamente, con los sensores y los registradores disponibles, debe comprobarse en un laboratorio antes de la instalación. En las localizaciones en las que las olas introduzcan un sesgo significativo en las mediciones del radar, limitarse a tomar mediciones con mayor frecuencia no resolverá necesariamente el problema; solo las comparaciones exhaustivas con datos obtenidos por otros métodos mostrarán si los datos del radar son aptos para fines científicos.

4.5 Durante la instalación

Programa informático para la instalación del radar

Algunos fabricantes ofrecen hardware de comunicación y el programa informático PACT (herramienta de configuración para el procesamiento automatizado) con objeto de configurar los parámetros del sistema y mostrar las curvas de respuesta del eco desde un sensor instalado. Estas curvas muestran la cantidad de energía devuelta al medidor en función de la distancia que lo separa de él. Si las reflexiones no deseadas (por ejemplo, de un bastidor de soporte) son más intensas que las de la superficie marina, podrían registrarse mediciones erróneas del nivel del mar. Este programa informático permite configurar los parámetros para enmascarar las reflexiones fuertes dentro de un cierto rango de distancias. De todos modos, si el programa informático muestra reflexiones no deseadas considerables, podría ser aconsejable recolocar el medidor. La figura 4.10 ofrece un ejemplo de una

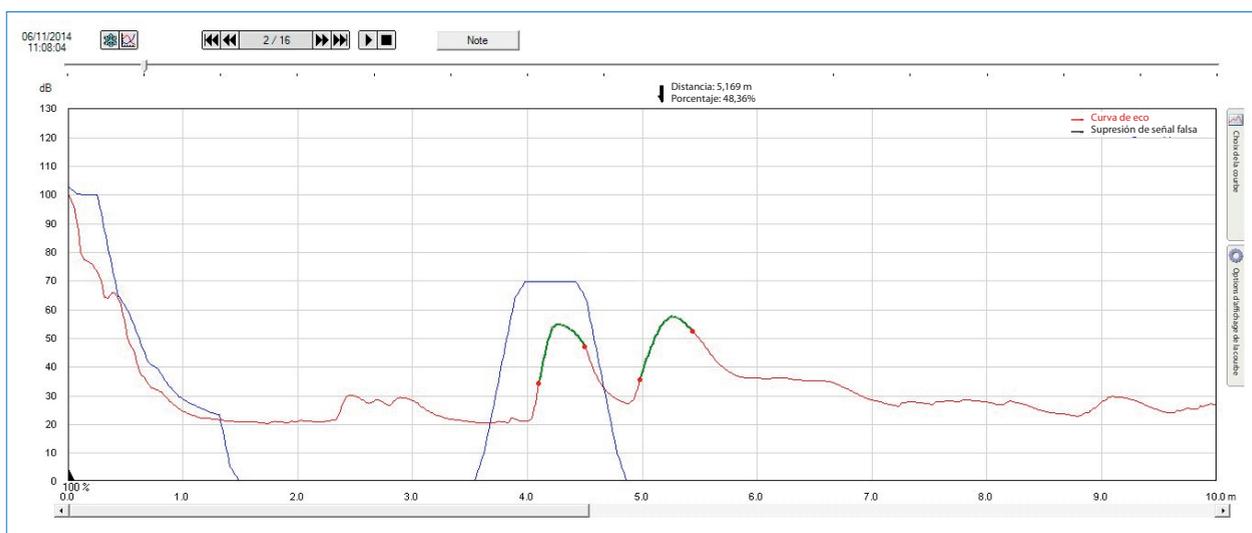


Figura 4.10. Ejemplo de una curva de respuesta de eco (en rojo) de una instalación VEGAPULS-61 en Bournemouth, en la costa sur de Inglaterra. El diagrama también muestra la energía que recibe de vuelta el sensor como una función de distancia (o tiempo). En este caso, el principal pico de energía (en verde) proviene de la superficie del mar, que se encuentra a 5,169 m por debajo del medidor. Sin embargo, se observa un segundo pico (también en verde) de una pasarela abierta ubicada a aproximadamente 1 metro por encima del nivel del agua. Se puede programar el medidor para que descarte los ecos de dichas secciones de la curva de respuesta en las líneas azules, salvo que el pico principal migre a la zona azul.

curva de respuesta de un sensor VEGA situado en la costa sur de Inglaterra. La NOAA (2013a) proporciona ejemplos de sensores Waterlog.

Determinación del dátum

Los elementos básicos de una instalación son la determinación y la documentación de las relaciones entre los distintos niveles implicados. El offset del sensor se obtendrá a partir de mediciones de laboratorio anteriores, como se ha descrito más arriba, o puede verificarse (con menos precisión) después de la instalación utilizando los métodos que se describen más adelante.

La medición principal que requiere la nivelación es la de la altura de la marca de medición de referencia en relación con la de la TGBM (o conjunto de marcas locales, ver capítulo 6). Esta medición permite expresar los niveles del mar en relación con los dátums que se emplean habitualmente en las mediciones de mareógrafos. En la figura 4.8, hemos representado este dátum como el cero del mareógrafo (TGZ), aunque podría ser también el dátum de la carta o el dátum de la estación. En cualquier caso, se definirá el TGZ u otro dátum en relación con la TGBM. (En ocasiones, estos dátum se someten a redefiniciones, y es fundamental documentar todos estos cambios.)

La altura de la RSM sobre el TGZ será obtenida a partir de la nivelación y se llama desviación del dátum (DO). Si se conocen el SO y el DO, podemos expresar el nivel del mar en relación con el TGZ así:

$$\begin{aligned} \text{Nivel del mar por encima del TGZ} &= \text{nivel del mar registrado} + \text{altura del PZR por encima del TGZ} - \text{LO} \\ &= \text{nivel del mar registrado} + (\text{DO} - \text{SO}) - \text{LO} \\ &= (\text{DO} - \text{SO}) - \text{rango registrado} \end{aligned}$$

Prueba de Van de Castele

André et al. (Suplemento) se pone de relieve lo útil que resulta la prueba de Van de Castele para controlar los errores de escala y de medición del tiempo de los radares, utilizando otro medidor (incluso una regla de mareas) como referencia. Esta prueba es muy sencilla, de modo que podría repetirse con facilidad durante las visitas ordinarias de mantenimiento. Para llevarla a cabo, es necesario realizar mediciones de ciclos completos de mareas. Sin embargo, si hay poco tiempo, las mediciones en pleamar y bajamar (sobre todo en las mareas vivas) resultarían prácticamente igual de útiles. Podría ser un control importante en el que se utilizan bucles de corriente de 4 a 20 mA en lugar de productos digitales, en los que

la escala es incorrecta. Las pruebas de Van de Castele han sido muy útiles para demostrar la dependencia de la temperatura en las mediciones acústicas realizadas en los cilindros de amortiguación, con la ausencia de errores similares en las mediciones por radar.

4.6 Después de la instalación

Verificación del offset del sensor

Una vez instalado el medidor de radar, puede confirmarse el offset del sensor (o determinarse si, por alguna razón, el medidor no se había calibrado antes en el laboratorio) a través de diversos métodos. En todos ellos, sacamos partido de una u otra forma al hecho de que, a diferencia de otras tecnologías de mareógrafos, los medidores de radar presentan una desviación instrumental a largo plazo pequeña o inexistente, por lo que no es necesario realizar recalibraciones con frecuencia.⁹

Un primer método consiste en llevar a cabo un conjunto de mediciones con reglas de mareas para “preparar el terreno” como se ha explicado con anterioridad, con el cero de la regla identificado con respecto a la TGBM (p. ej., como se muestra en la **figura 4.11a**; otra fotografía en la misma estación en la **figura 4.11b** pone de relieve el problema que supone que las embarcaciones pasen por debajo del haz antes mencionado). En el volumen 1 de este manual se ofrecen consejos para la realización de mediciones con reglas de mareas. Resulta difícil determinar cuántas mediciones serán necesarias, pero en condiciones de calma podrán llevarse a cabo observaciones visuales de la regla más claras y lograrse una determinación más precisa del offset del sensor. Es posible que baste con realizar mediciones durante unos cuantos días. Deben realizarse mediciones a lo largo de todo el ciclo de la marea, pero en aquellas ubicaciones con grandes mareas es necesario centrarse en mediciones en momentos clave, cuando el nivel de la marea no cambia con rapidez. La regresión lineal entre los niveles del radar y la regla de mareas debería

⁹ En la práctica, los medidores de radar sufren una cierta desviación a largo plazo, así como efectos de la temperatura, con independencia de lo bien diseñados que estén. Todos los sensores tendrán un elemento integrado de referencia temporal o de frecuencia, por lo general un oscilador de cristal con compensación de temperatura (TCXO), que estará sujeto a un envejecimiento a largo plazo. Además, las propiedades eléctricas de los elementos mecánicos, como la antena y los cables de conexión, así como de las líneas de transmisión de las placas de circuitos impresos, dependerán en cierto modo de la temperatura (Øistein Grønlie, mensaje privado). Sin embargo, puede esperarse que estas desviaciones sean significativamente menores que las de otros tipos de mareógrafos.

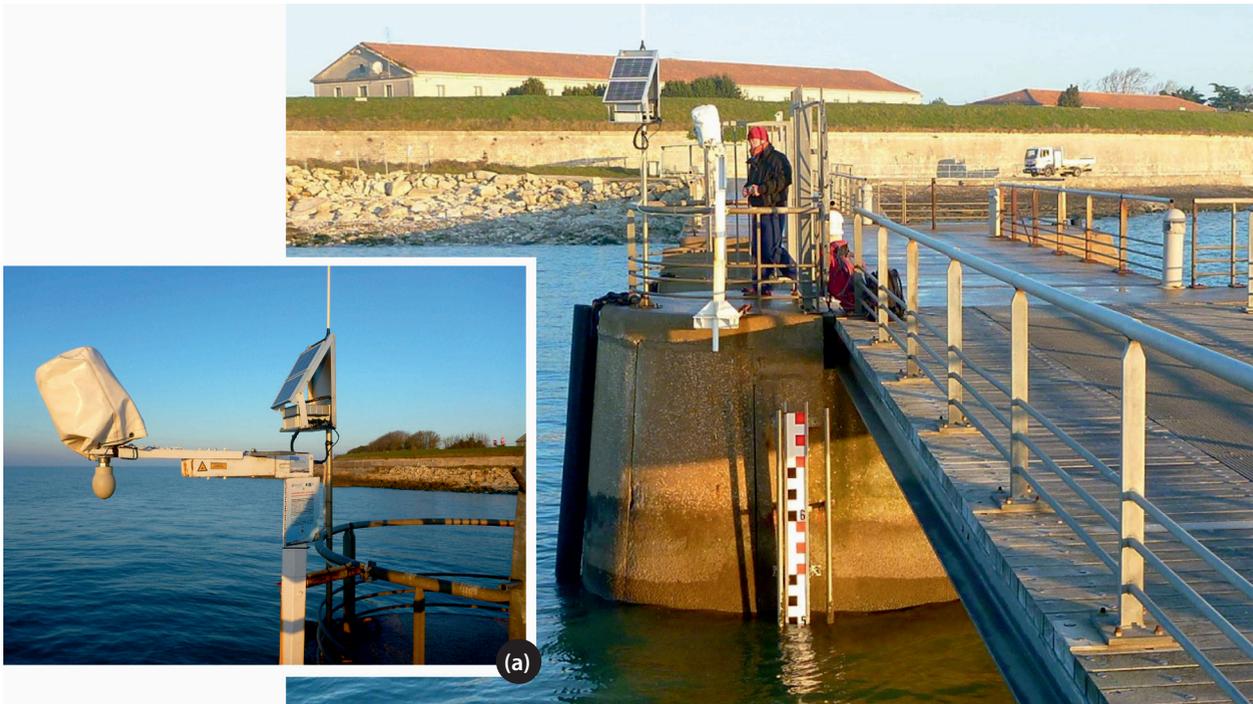


Figura 4.11

(a) Regla de mareas en una instalación de mareógrafo en Île d'Aix, en la costa oeste de Francia, bajo un medidor de radar Khrone (foto pequeña). (Fotografías: Laurent Testut, Littoral ENVironnement et Sociétés (LIENSs), Universidad de La Rochelle).

(b) Misma ubicación durante la agitada temporada de verano, con una embarcación bajo el radar.



dar lugar a una pendiente de 45° (a menos que los datos del radar tengan un error de escala), un offset que debería corresponder a la diferencia entre el dátum del registrador del medidor de radar y el cero de la regla de mareas, y un error estándar estimado del offset. Si la regla es centimétrica, probablemente sea conveniente repetir el procedimiento en unas condiciones más tranquilas. En Illigner et al. (2015) se han descrito algunas experiencias con el uso de mediciones por inmersión y con reglas de mareas para el control continuo de las desviaciones de los radares en estaciones de (2015).

Un segundo método es conceptualmente igual al ejercicio del blanco de placa metálica de laboratorio que se ha expuesto antes. En este caso, el blanco (que algunos grupos llaman "estribo") se coloca por debajo

del medidor de manera tal que la placa quede situada a una distancia determinada por debajo de la marca de nivel de referencia de la carcasa del medidor (que se conoce por el esquema de la estructura de soporte y se confirma a través de mediciones con cintas métricas de todo el conjunto realizadas en el laboratorio antes de la instalación). El reflejo de las ondas en el blanco metálico será muy preciso y debería obtenerse un conjunto de datos adecuado en una hora. Por tanto, la instalación ocasional del estribo (p. ej., durante las visitas anuales de mantenimiento) no debería interferir de forma significativa con las mediciones de rutina. En la **figura 4.12** pueden verse ejemplos de estribos en Luderitz (Namibia) y en Simon's Town (Sudáfrica). En Pugh et al. se muestra otro ejemplo en Holyhead (norte de Gales) (Suplemento). Los artículos de Farre y SANHO (Suplemento) ofrecen más información sobre el uso de estribos y la calibración de los medidores de radar.

Un tercer método que utiliza el denominado "medidor de goteo" se describe en Pugh et al. (Suplemento). Ha resultado ser una técnica muy precisa para determinar el dátum de un medidor de radar (o cualquier otro). En ese estudio se describe cómo se puede determinar el dátum del medidor principal con gran precisión utilizando un



Luderitz, Namibia



Simon's town, South Africa

Figura 4.12. Ejemplo de la utilización del blanco de “estribo” en Luderitz (Namibia) y Simon's Town (Sudáfrica). (Fotografías: Ruth Farre, Oficina Hidrográfica de la Marina de Sudáfrica).

tubo de purga de plástico temporal (similar a un cilindro de amortiguación, pero cerrado en su extremo inferior, con un orificio a una altura determinada con respecto a la TGBM, aproximadamente al nivel medio del mar) y un transductor de presión. Este método presenta una ventaja con respecto al estribo: no se interrumpen las mediciones de los medidores de radar.

Existen distintas variantes posibles de este método, que se inspiran en la técnica del “medidor B” para los medidores de presión (Woodworth et al., 1996). Por ejemplo, podríamos utilizar un segundo medidor de radar temporal cuyas ondas se reflejen en un blanco de placa metálica, instalado también a una altura determinada con respecto a la TGBM, aproximadamente al nivel medio del mar. La curva de la marea rectificadas del segundo radar permitiría determinar el dátum del medidor primario.

Por último, podríamos sugerir eliminar un medidor instalado de forma ocasional, para volver a calibrarlo en el laboratorio, y sustituirlo por otro medidor calibrado.

4.7 Necesidad de otros sensores

La experiencia adquirida hasta el momento con los medidores de radar ha puesto de relieve que estos instrumentos presentan un buen funcionamiento en

algunos emplazamientos, mientras que en otros se han visto claramente afectados, en mayor o menor medida, por las olas (capítulo 3). En aquellos casos en que un radar es el sensor principal, se necesita un método para cuantificar la precisión de las mediciones en función del tiempo (es decir, que depende de las olas). Para valorar cómo puede variar la precisión de un radar, pueden compararse los datos del radar con los de un sensor de presión a lo largo de un período de tiempo prolongado (p. ej., véase el artículo de Pugh et al. en el Suplemento). En una instalación permanente posterior de ambos tipos de medidores, incluso sería posible combinar los dos conjuntos de datos de nivel del mar en un único registro ideal (esta combinación óptima se realizó con datos de la red española REDMAR cuando se sustituyeron los antiguos medidores acústicos y de presión por medidores de radar Miros, Pérez et al., 2014).

Podría parecer extraño que un manual que trata sobre los medidores de radar recomiende instalar sensores de presión, sobre todo teniendo en cuenta que los medidores de presión no cuentan con todas las ventajas de los radares: para su instalación, es necesario contar con un buzo o con una estructura en la cual fijar el sensor para poder sumergirlo en el agua y empernarlo desde la superficie; sufren desviación instrumental, y se ha

descubierto que algunos sensores de presión se corroen con rapidez en determinados lugares, de modo que es necesario sustituirlos con regularidad.

Sin embargo, los sensores de presión son relativamente económicos y pueden ofrecer datos complementarios a los obtenidos con los radares: pueden tomar datos a altas velocidades para medir las olas y, además, son capaces de registrar datos de forma ininterrumpida durante los fenómenos más extremos, en los cuales el nivel del mar podría superar la altura del medidor de radar.

En el marco del presente manual, que parte de la suposición de que se cuenta con un medidor de radar como instrumento principal, los medidores de presión deberían considerarse prácticamente sensores desechables que ofrecen sus propias ventajas como complemento a la estabilidad y el período de funcionamiento probablemente largo de los medidores de radar. Hace algunos años, estas consideraciones condujeron a la decisión de instalar medidores de radar y de presión en determinadas estaciones de África y el océano Índico, en las que se adquirió una experiencia considerable en el uso de las dos tecnologías. Se observó corrosión en algunos sensores de presión, asociada a la elección del material de la carcasa, mientras que otros presentaron un funcionamiento adecuado. Por ejemplo, este tipo de instalación combinada dio unos resultados excelentes en Karachi durante muchos años. Por su parte, Fierro y Gaete (Suplemento), que gestionaron varias estaciones en Chile de esta manera, recomendaron el establecimiento de un ciclo de sustitución de 18 meses para los sensores de presión, así como la realización de tareas de mantenimiento cada 6 meses. De todas formas, en algunas estaciones, los sensores de presión resultan fundamentales y no son una simple opción más. Como ejemplo de ello, en la figura 4.6 se muestra una fotografía, tomada durante el verano, de un emplazamiento en el que se necesita un sensor de presión por si el mar se congela en invierno.

En el volumen 4 (págs. 52 y 75 de COI, 2006) se incluyó la recomendación de instalar medidores de radar y de presión en estaciones nuevas y reacondicionadas del GLOSS, con la capacidad adicional de registrar tsunamis. En ese volumen se explica que debe haber un sensor principal (un radar, en este caso) que podría registrar, por lo general, valores con una frecuencia promedio de 3 minutos o superior, mientras un transductor de presión diferencial (que mide la diferencia entre la presión del agua y la presión atmosférica) registraría los valores con una frecuencia de 1 minuto o superior. El medidor

de presión sería el sensor principal de tsunamis y proporcionaría datos para completar cualquier pequeña laguna en el registro del radar. Todos los datos se transmitirían rápidamente.

Podría considerarse la posibilidad de utilizar otras técnicas junto con los medidores de radar, como sensores acústicos asequibles de toma de datos rápida al aire libre. De esta manera, sería posible obtener datos complementarios a los del radar que podrían aportar información sobre los efectos de las olas. Sin embargo, estos sensores tendrían deficiencias propias, algunas de las cuales serían comunes a las de los radares (p. ej., la posibilidad de que el nivel del mar supere su altura en caso de fenómenos extremos). La decisión de instalar sensores adicionales puede ser específica de cada estación. No obstante, parece que un sistema de presión fiable es la mejor opción y la más práctica en algunos casos. En cualquier caso, el radar no debe instalarse ni utilizarse por separado para la transmisión de datos al GLOSS si no se cuenta con datos realistas acerca de su desempeño extraídos de una comparación con datos de otras técnicas, realizada a lo largo de un período lo más prolongado posible y con una documentación completa de los resultados obtenidos.

Por último, con respecto al uso de sensores de presión junto con medidores de radar, podemos señalar otras configuraciones diferentes que se han sugerido, a pesar de que no tenemos constancia de que todas ellas hayan sido probadas. Por ejemplo, una estación podría basarse en el uso de un sensor de presión convencional como componente principal con un medidor de radar cuyas ondas se reflejan en un blanco a aproximadamente media marea (es decir, similar a los medidores de presión de media marea que se debaten en anteriores volúmenes). De esta manera, se evitarían los problemas que parecen tener algunos medidores de radar con las olas y se aprovecharían todas las ventajas de toma de datos rápida que ofrece un medidor de presión.

Como se ha mencionado en volúmenes anteriores de este manual, recomendamos acompañar todas las mediciones del nivel del mar de observaciones sobre la presión atmosférica, los vientos y otros parámetros ambientales que afectan de forma directa al análisis de los datos de nivel del mar (véase también el capítulo 5). En la actualidad, hay varios grupos instalando cámaras web en estaciones de observación del nivel del mar a fin de vigilar las condiciones ambientales.

5. Resumen de los requisitos de las estaciones del GLOSS con mareógrafos de radar

En el Plan de Ejecución del GLOSS de 2012 (COI, 2012), se pedía la introducción de dos grandes mejoras en todas las estaciones de la red del GLOSS: 1) la transmisión de las mediciones en tiempo real al Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI por parte de las estaciones y 2) la realización de mediciones continuas de GNSS lo más cerca posible del mareógrafo. Además, se mencionaban de nuevo las obligaciones de los participantes en el programa del GLOSS. Por tanto, el siguiente resumen de los requisitos de los mareógrafos del GLOSS y de los medidores de radar en particular debería leerse junto con las secciones pertinentes de COI (2012). Este resumen actualiza los recogidos en el anexo 1 de los volúmenes 3 y 4 del presente manual.

Requisitos generales del GLOSS

- Un mareógrafo del GLOSS debe, como principal requisito, ser capaz de medir el nivel instantáneo del mar con una precisión objetivo superior a 1 cm en todo momento, es decir, ante cualquier condición de las mareas, las olas, las corrientes, la meteorología, etc. Para ello, es necesario prestar especial atención al mantenimiento del medidor y al control de calidad de los datos.
- Los medidores del GLOSS deben medir el nivel del mar a lo largo de períodos lo suficientemente prolongados para evitar el solapamiento debido a las olas (p. ej., las mediciones de un promedio de 3, 5, 6, 10 o 15 minutos han sido las habituales hasta ahora). Sin embargo, los medidores de radar deben poder ofrecer datos con una frecuencia promedio de un minuto o mayor, de ser posible, sobre todo en aquellos casos en que el medidor se utiliza para alertar de tsunamis.
- La precisión temporal de los datos debe ser compatible con la precisión del nivel necesaria, lo que hasta el momento ha significado una precisión temporal superior a un minuto. No obstante, los registradores de datos modernos deberían ser capaces de fijar la hora de las mediciones con una precisión de segundos con el uso del GNSS.
- Las mediciones deben realizarse con respecto a

una cota de referencia de mareógrafos (TGBM) local permanente y fija. Esta debe estar conectada a diversas marcas adicionales para evitar que se mueva o se deteriore. Las conexiones entre la TGBM, las marcas adicionales y el cero del medidor deben llevarse a cabo con una precisión de unos pocos milímetros y de forma regular (p. ej., anualmente). Véase el capítulo 6.

- Todas las estaciones del GLOSS deben estar equipadas con receptores GNSS de medición continua (normalmente GPS) situados lo más cerca posible del medidor. Estos se utilizarán en estudios de los movimientos verticales de la tierra y para la calibración de alímetros satelitales. Deben establecerse enlaces locales de nivelación entre la cota del GNSS (GNSSBM) y la TGBM con la misma frecuencia, acerca de los cuales deberá informarse al GLOSS como parte de la provisión global de datos. Véase el capítulo 6.

Requisitos de los mareógrafos

- La estación debe contar con un mareógrafo principal que registre el nivel del mar con una frecuencia de 6 a 15 minutos o similar, como se ha descrito con anterioridad (p. ej., un medidor de radar u otra tecnología establecida).
- Asimismo, la estación debería contar con un sensor de presión auxiliar que recoja datos con una frecuencia normal de un minuto o superior (p. ej., de 15 segundos o incluso de 1 segundo, si se necesita información sobre las olas), a fin de que sirva como principal fuente de información en caso de tsunami, así como para eliminar las deficiencias existentes en el registro principal del nivel del mar.
- A la hora de sustituir los mareógrafos, debe tenerse presente que los distintos tipos de medidores pueden presentar diferentes errores sistemáticos. Dichos errores pueden resultar irrelevantes en trabajos con series temporales si siempre se utiliza la misma técnica. Sin embargo, los cambios de tecnología pueden dar lugar a desviaciones entre los conjuntos de datos antiguos y los nuevos. Los medidores de

nueva tecnología (de radar u otras técnicas), son, por definición, más difíciles de entender que los anteriores y deben operarse con las técnicas anteriores durante un período prolongado hasta que se adquiere la experiencia suficiente. Véase el capítulo 3.

Requisitos de los medidores de radar

- Los usuarios deben comprender que, si bien los medidores de radar ofrecen diversas ventajas frente a las tecnologías anteriores, puede que no sean los mejores para todas las situaciones. Por tanto, los usuarios deben estar preparados para descartar el uso de radares en lugares donde no presentan un buen funcionamiento.
- Para ello, debe adquirirse la experiencia necesaria en cada emplazamiento antes de la entrega de los datos al GLOSS, probando los medidores radar junto con tecnologías anteriores o alternativas, a fin de evaluar la influencia de las olas en las mediciones de radar.
- Antes de proceder a su instalación y de forma periódica durante las operaciones, debe determinarse el sesgo del rango de los medidores radar tal y como se describe en el capítulo 4.
- El requisito de toma de datos con una frecuencia de 1 minuto (o de 3 minutos, etc.) implica que el medidor de radar debe estar configurado para realizar mediciones a 1 Hz o a una mayor velocidad, de ser posible, con lo cual pueden conseguirse frecuencias promedio de 1 minuto. La manera en que se realizará la toma de datos y el cálculo de promedios dependerá de los equipos que se utilicen (sección 4.4). El sensor debe configurarse con el modo de tiempo de respuesta rápida a fin de beneficiarse de la toma de datos rápida.
- En algunos emplazamientos en los que se utiliza la instalación de un cilindro de amortiguación para llevar a cabo filtrados mecánicos, deben realizarse tareas de limpieza con regularidad.
- Como ya se ha explicado, en aquellas estaciones a largo plazo en que los medidores de radar sustituyen a tecnologías anteriores, debe establecerse un período de solapamiento de al menos un año, a fin de controlar los efectos estacionales, y deben documentarse todas las diferencias en el nivel del mar entre las diferentes técnicas en distintas escalas temporales (horaria, diaria, mensual).

Requisitos de las estaciones

- A la hora de considerar la posibilidad de establecer emplazamientos alternativos, deben tenerse en cuenta los requisitos generales aplicables a las estaciones, así como los específicos para los medidores de radar, que se debaten en el capítulo 4.
- La estación debe contar con alimentación de la red eléctrica o acumuladores/paneles solares y fuentes de energía auxiliares, sobre todo en aquellos casos en que el medidor está concebido para la monitorización de tsunamis y oleajes de tormenta.
- Las mediciones del nivel del mar deberían ir acompañadas de observaciones de la presión atmosférica y, de ser posible, de información sobre los vientos y otros parámetros ambientales que afectan de forma directa al análisis de los datos de nivel del mar. Si no es posible instalar una estación meteorológica en el emplazamiento (p. ej., porque se encuentra en un puerto concurrido), deben establecerse mecanismos para obtener datos con regularidad de la estación más cercana.

Requisitos en materia de telemetría y registro de datos

En general, los datos de los radares deben transmitirse a través de dos formas de telemetría, a fin de evitar la pérdida de datos en caso de que se produzca algún fallo con alguna de ellas. Puede considerarse que las recomendaciones de la COI (2011) son aplicables en estos casos, no solo en relación con los tsunamis de principal, sino también con respecto a los peligros costeros en general e incluso a la adquisición de información para estudios relativos al nivel medio del mar. En estas recomendaciones se especifica que: "Siempre que sea posible deben aplicarse canales de transmisión de datos redundantes (p. ej., Internet o métodos alternativos (es decir, a través de la Red de Área Mundial de Banda Ancha (BGAN) de Inmarsat o similares), así como mediante acceso por módem telefónico). La transmisión redundante puede conectarse directamente a la plataforma de recogida de datos/registrador de datos de los sensores principales del nivel del agua, o puede ser una unidad de transmisión independiente conectada a un segundo sensor del nivel del agua. El control del tiempo en la plataforma de recogida de datos debería realizarse de forma constante a través de GPS o Internet, algo especialmente importante para la transmisión por satélite.

Puede consultarse el capítulo 7 de este manual, así como los grupos asociados con el programa del GLOSS, para analizar los pros y los contras de los distintos métodos de telemetría, sobre todo en aquellos casos en que se necesita un acceso puntual a los datos. Por ejemplo, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) ha acumulado una amplia experiencia en el uso de sensores de radar para la monitorización de los tsunamis, ya que ha sufrido tres grandes tsunamis en los últimos cinco años. El SHOA ha constatado que los datos de nivel del mar en tiempo cuasi real recibidos en el Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI a través del Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT) presentaban un retraso significativo, de varios minutos, en comparación con los datos recibidos en sus propias estaciones terrenas de lectura directa, lo cual podría suponer un problema importante para los casos de emergencia.

Con uno de los métodos de telemetría, los datos deberían estar disponibles para todos los usuarios interesados del SMT, como también recomienda la COI (2011) y de conformidad con la Política de Intercambio de Datos Oceanográficos de la UNESCO/COI, que se refiere al acceso fácil y libre a los datos en virtud de la Declaración de Mauricio de 2005. En cada sensor, pueden transmitirse observaciones con facilidad mediante el SMT en tiempo real utilizando los formatos CREX de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para los datos de nivel del mar (capítulo 7) y, si los usuarios del SMT se encuentran con dificultades, la OMM puede prestarles ayuda y asesoramiento.

Los operadores deben garantizar el envío en tiempo real de los datos de los radares a través de cualquier método adecuado (satélite, Internet u otra telemetría) al Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI en VLIZ (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>), que ofrece un medio eficaz para vigilar el estado de las mediciones del nivel del mar en todo el mundo.

En caso de que se produzcan deficiencias o errores de telemetría en los datos en tiempo real, la información también debe almacenarse en registradores locales y descargarse de forma regular para transmitirse a los centros del GLOSS de datos en modo diferido.

Requisitos operacionales

- Los datos en tiempo real proporcionan un medio de mantener un control continuo de la calidad de los datos. Por ejemplo, el Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI ofrece acceso a diagramas de series temporales que se actualizan de forma constante. Gracias a su inspección periódica (p. ej., diaria), se determinarán los fallos de los medidores lo antes posible y se obtendrán conjuntos de datos globales a largo plazo de mayor calidad.
- Resulta inevitable que los datos de algunos medidores de estaciones polares u otros lugares remotos se inspeccionen con menor frecuencia, a menos que se pueda instalar una transmisión de datos por satélite. De igual modo, los datos procedentes de medidores que solo registran información en cartas náuticas en papel, que son relativamente pocos, tardarán en llegar a los centros de control de calidad. Estos casos deben considerarse prioritarios a la hora de modernizarse a fin de cumplir las normas actuales.

parte *2*

**Secciones actualizadas de
manuales anteriores**

6. Control y nivelación del dátum

6.1 Introducción

En este capítulo se trata el control del dátum de los mareógrafos. El control del dátum resulta fundamental en todos los medidores que deban registrar datos de nivel del mar a largo plazo para investigaciones científicas que puedan incluirse en bancos de datos como el Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar (capítulo 8). Los únicos medidores a los que no se aplica el requisito del control del dátum son los instalados únicamente con el fin específico de determinar los cambios rápidos de nivel debidos a tsunamis, meteotsunamis o mareas de tormenta. Sin embargo, en la práctica, hay instalados muchos “medidores de tsunamis” con el objetivo de ofrecer datos para aplicaciones contra múltiples riesgos, dentro de los que se encuentra el cambio del nivel medio del mar, de modo que también necesitan un control del dátum.

En la sección 6.2 se presentan requisitos para el control del dátum local por medio de la nivelación del mareógrafo con respecto a una red de marcas de referencia en las zonas cercanas. Es similar a las secciones de volúmenes

anteriores de este manual. Volvemos a resumir estos requisitos en la presente sección porque revisten una importancia fundamental para el funcionamiento de cualquier mareógrafo. En la sección 6.2 se mencionan aspectos específicos relativos al control del dátum local de los medidores de radar.

Los mareógrafos miden el nivel relativo del mar, es decir, con respecto a la altura de la tierra representada por las cotas. Las técnicas geológicas y arqueológicas para medir el nivel del mar también ofrecen información sobre el nivel relativo del mar. En consecuencia, cualquier registro del nivel del mar a largo plazo contendrá una contribución de los movimientos verticales de la tierra, que podría ser de igual magnitud o mayor que la de las variaciones en el nivel del mar debidas a las fluctuaciones en las corrientes oceánicas o al cambio climático. Los movimientos verticales de la tierra pueden estar causados por diversos procesos geológicos naturales y antropogénicos en la Tierra sólida, como el ajuste isostático glacial, los eventos tectónicos (terremotos), la compactación del suelo o el bombeo de aguas subterráneas (véase Pugh y Woodworth (2014), que presenta una discusión sobre estos temas). Resulta fundamental vigilar los

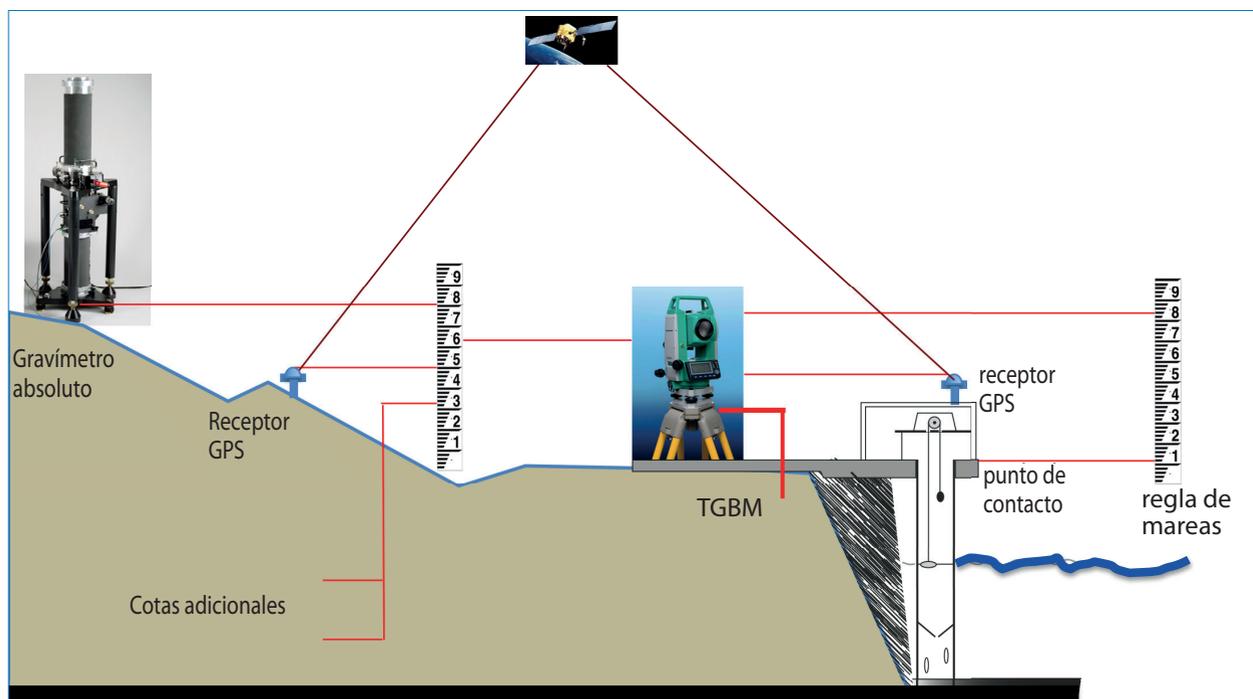


Figura 6.1 Descripción esquemática de una estación mareográfica con un receptor del GNSS para determinar la altura elipsoidal del nivel del mar con el medidor y monitorizar los movimientos verticales de la tierra. En esta figura, se aprecia cómo los movimientos de la tierra también se monitorizan con un medidor de gravedad absoluta.

movimientos verticales de la tierra en un mareógrafo, con independencia cuales sean los procesos geológicos implicados, a fin de entender la importancia relativa de dichos movimientos en el registro del mareógrafo.

El principal método para vigilar los movimientos verticales de la tierra conlleva el despliegue de receptores del Sistema Mundial de Navegación por Satélite de medición continua (CGNSS) cerca de los medidores. Este tema se debate en la sección 6.3 y se presenta de forma esquemática en la **figura 6.1**. Las mediciones del CGNSS son pertinentes para el análisis científico de los datos de los mareógrafos, así como para la información relativa a la calibración de los altímetros satelitales (Mitchum, 2000; Leuliette et al., 2004). En los últimos tres decenios, la altimetría por satélite se ha convertido en la principal técnica para vigilar el cambio global del nivel del mar (capítulo 9 de Pugh y Woodworth, 2014). Una medición realizada con un altímetro es geocéntrica, ya que mide el nivel del mar con respecto al centro de la Tierra o a un elipsoide de referencia centrado en la Tierra. Los datos del CGNSS pueden utilizarse para convertir la medición relativa del mareógrafo en una medición geocéntrica, de modo que ambos tipos de datos puedan combinarse usando el mismo marco de referencia¹⁰. El Plan de Ejecución de la red del GLOSS establece el requisito de que todos los mareógrafos de la red deben tener un receptor CGNSS instalado en las proximidades (COI, 2012).

Sin embargo, también existen requisitos del GNSS para aquellos mareógrafos que no forman parte del GLOSS o no cuentan con un CGNSS. Resulta muy conveniente para varios temas de investigación científica que conozcamos las alturas elipsoidales (las alturas con respecto al elipsoide de referencia) de sus cotas principales y, por tanto, de los datos del mareógrafo. Estos requisitos se debaten en la sección 6.4.

En la sección 6.5 se presentan otros métodos para medir los movimientos verticales de la tierra. Estos ya se han debatido en mayor profundidad en otros documentos (p. ej., Pugh y Woodworth, 2014), de modo que aquí únicamente los resumimos. En la sección 6.6

se mencionan las técnicas relacionadas con el GNSS que están en desarrollo y podrían resultar útiles para los estudios sobre el nivel del mar en el futuro.

6.2 Nivelación y cotas locales

Las cotas son puntos de referencia claramente señaladas que definen el nivel de la tierra cerca de un mareógrafo. Las cotas pueden marcarse en una superficie estable, como en un muelle o el muro de un puerto, o en una construcción sólida. Una cota en una superficie vertical puede adoptar la forma de una muesca horizontal o una estructura de metal incrustada en la superficie con un canto horizontal de referencia en el que puede colocarse la mira de medición. Sin embargo, la mayor parte de las cotas del mundo consisten en pernos de latón de cabeza plana, convexa o redonda que están hormigonados o fijados en roca sólida horizontal (**figura 6.2**). El GLOSS exige que haya al menos cinco cotas a pocos cientos de metros o, como mucho, a 1 km de distancia del mareógrafo. Las cotas deben identificarse de forma clara en los metadatos de la estación por nombre o número, con una descripción de la marca, fotografías, un mapa de referencia con coordenadas nacionales y un mapa local. Sus alturas relativas deben medirse, por lo general, todos los años mediante una nivelación de alta precisión y documentarse en los metadatos de la estación.

La frecuencia exacta de la nivelación requerida dependerá de la geología local. En terrenos estables, es posible que baste con llevar a cabo la nivelación cada varios años; no obstante, en superficies inestables, puede ser necesario realizarla con mayor frecuencia. Es posible que se determinen otros períodos de nivelación en virtud de requisitos nacionales adicionales. Las cotas que se presentan inestables a lo largo de un período prolongado de tiempo deben identificarse y sustituirse por otras. Si no se observan cambios a lo largo de períodos prolongados, la zona de tierra que rodea el medidor puede considerarse "estable" con certeza. Por supuesto, la zona local podría estar sometida a movimientos verticales de tierra con respecto a una zona mucho más amplia. Esto puede demostrarse a través de campañas del GNSS o de nivelación de zonas amplias, así como mediante técnicas relativamente nuevas como el radar interferométrico de apertura sintética o InSAR (véase más adelante). Las alturas de las cotas pueden expresarse en la red de nivelación nacional de un país determinado y comprobarse de forma periódica con respecto a dicha red, pero esto no es fundamental para la mayor parte

¹⁰ El marco de referencia que se utiliza casi siempre es el Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF), que se define por cuatro técnicas geodésicas: GNSS, DORIS, telemetría láser de satélite e interferometría de líneas de base muy largas. Cada pocos años se publican nuevas versiones del ITRF. Por ejemplo, la versión con fecha de 2008 se describe de forma detallada en Altamimi et al. (2011). En el momento de la redacción del presente documento, la versión más reciente es la de 2014 (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/).



Figura 6.2

- (a) Cota con cabeza convexa del servicio NOS de los EE. UU. (predecesor del Servicio Nacional de Oceanografía) con un diámetro de aproximadamente 3,5 pulgadas, una de las muchas marcas ornamentadas utilizadas en ocasiones por las agencias geodésicas de los EE. UU. (Leigh, 2009).
- (b) Cota con cabeza convexa de menor tamaño como las utilizadas por el Centro Nacional de Oceanografía del Reino Unido.
- (c) La imagen muestra una cota instalada en una roca cercana a un mareógrafo de las Islas Malvinas (Falkland Islands) (fotografías: NOAA y NOC).

de los objetivos relacionados con el GLOSS (aparte de la Unificación Internacional de los Sistemas de Alturas, que se debate más adelante).

En las siguientes secciones se definen las principales cotas y marcas de referencia que deben nivelarse de forma regular y, a continuación, se presenta una breve guía sobre los procedimientos de nivelación. Para obtener información detallada sobre los dátum nacionales, de cartas y de trabajo, así como sobre sus relaciones con las cotas descritas en este documento, se remite al lector al volumen 4 y a libros de texto sobre el nivel del mar, como Pugh y Woodworth (2014).

6.2.1 Cota de referencia del mareógrafo (TGBM)

La cota de referencia del mareógrafo (TGBM) es la principal cota seleccionada del conjunto de al menos cinco marcas, sobre la base de su estabilidad y longevidad, o por su proximidad al medidor. La TGBM se utiliza de forma efectiva como el dátum con respecto al cual se miden los valores del nivel del mar. En ocasiones, es posible que haya que volver a definir la TGBM, si la original se deteriora debido al desarrollo local. Es aquí donde entra en juego el beneficio de contar con varias marcas locales interconectadas de forma regular mediante una nivelación de alta precisión, que permite definir la altura de la nueva TGBM en relación con la antigua.

6.2.2 Cota del GNSS (GNSSBM)

La cota del GNSS (GNSSBM) es la cota que normalmente se sitúa junto al monumento y la antena del GNSS, y con respecto a la cual se establecen los datos del GNSS. En algunos casos, el punto de referencia de la antena (ARP) del GNSS puede funcionar como la GNSSBM (si bien el ARP no siempre está directamente accesible para la nivelación). En algunos sitios, la GNSSBM podría estar a cientos de metros o más de la TGBM y el medidor. Su altura también debe medirse de forma periódica con respecto a las otras cotas a través de una nivelación de alta precisión. Si hay una gran distancia entre ellas, la diferencia de altura podría medirse por mediciones diferenciales de GNSS. En estos casos, es importante saber si se ha utilizado nivelación o GNSS para la conexión (véase más adelante).

6.2.3 Punto de contacto del medidor

El punto de contacto de un mareógrafo es un tipo de cota o marca de referencia vertical asociada al propio medidor. En el caso de los medidores de radar, es la misma que la marca de referencia que se debate en el capítulo 4 y se muestra en las **figuras 4.4 y 4.8**. Una vez realizada una conexión geodésica entre la TGBM y el punto de contacto, pueden expresarse los datos de nivel del mar obtenidos por el medidor con respecto al dátum de la TGBM (teniendo en cuenta el offset del sensor, en el caso de los medidores de radar, tal como se debate en el capítulo 4). Resulta fundamental señalar que el punto de contacto viene marcado en el medidor, de modo que, si se utiliza un tipo diferente de medidor en la estación, este tendrá un punto de contacto distinto, lo que requerirá repetir la nivelación con respecto a la TGBM. Véanse los volúmenes anteriores de este manual, en los cuales se debate sobre los puntos de contacto en distintos tipos de mareógrafos.

6.2.4 Cero del mareógrafo (TGZ)

El cero del mareógrafo (TGZ) es el nivel en el cual el medidor registraría un nivel cero del mar (teniendo en cuenta el offset del sensor, en el caso de los medidores de radar) y que puede expresarse con respecto a la TGBM. En la práctica, es poco probable que el nivel del mar descienda por debajo del TGZ si el medidor está bien instalado.

6.2.5 Dátum de referencia local revisado (RLR)

El dátum de referencia local revisado (RLR) en la estación de un medidor es un dátum que se define como una desviación simple de la TGBM, de manera tal que los valores del nivel del mar expresados con respecto al dátum de RLR tienen valores numéricos de aproximadamente 7.000 mm. El concepto del dátum de RLR fue introducido por el PSMSL para que pudiesen construirse series temporales largas del cambio del nivel del mar en una estación, aunque las diversas partes de la serie temporal se hubiesen reunido utilizando diferentes mareógrafos y TGBM distintas pero conectadas geodésicamente. Se eligió el valor aproximado de 7.000 mm para que los ordenadores de aquella época (finales de la década de 1960) no tuviesen que almacenar números negativos. El dátum de RLR se define en cada estación de medición por separado y el RLR que se establece en un lugar no puede relacionarse con el de ningún otro emplazamiento, si no se tienen conocimientos adicionales acerca de las conexiones entre las TGBM de las distintas estaciones. Cuando se envían datos de nivel del mar al PSMSL o a otro centro de observación del nivel del mar, resulta fundamental que vayan acompañados de toda la información relativa a las relaciones geodésicas entre las TGBM y otras cotas, así como de los distintos dátum nacionales.

6.2.6 Procedimientos de nivelación

La nivelación debe ser realizada por personal cualificado con un nivel digital de buena calidad y una mira de código de barras. Si las cotas están muy separadas, será necesario establecer "puntos de tramo" intermedios claramente señalados a unos 50 m de distancia en una superficie firme. Estos puntos pueden marcarse pintando un pequeño círculo alrededor del punto y, en superficies menos duras, introduciendo un perno de cabeza redonda. En las superficies irregulares, puede utilizarse como punto de tramo una "placa de nivelación". Entonces, puede colocarse el instrumento de nivelación entre una cota y el primer punto de tramo, y pueden realizarse lecturas de la mira en las dos posiciones. A continuación, se llevan a cabo las mediciones entre los puntos de toda la red, primero en un sentido y luego en el sentido contrario. Los instrumentos modernos de nivelación con registradores de datos integrados pueden



Figura 6.3

(a) Ejemplo típico de nivelación de un mareógrafo, en este caso en San Juan de Luz (Francia), que antes contaba con un medidor de flotador convencional y ahora, un Krohne Optiwave 7300C (fotografía: SHOM).



(b) Tipo poco frecuente de nivelación de un medidor de radar indonesio desde una embarcación en condiciones de calma (fotografía: T. Schöne, GFZ).

eliminar la mayor parte de la tediosa aritmética asociada al uso de un nivel simple, a pesar de que su utilización resulta, de hecho, muy educativa. En la **figura 6.3a** se muestra una escena habitual durante los trabajos de nivelación en un mareógrafo.

Como ocurre con muchos otros aspectos de los trabajos con los mareógrafos, el principio aplicable es el de que “la práctica hace al maestro”. Las páginas web de capacitación del PSMSL (capítulo 9) ofrecen una guía práctica sobre la nivelación, dirigida a aquellas personas que no estén familiarizadas con la técnica, elaborada por el Sr. Charles Merry de la Universidad de Ciudad del Cabo. El objetivo consiste en nivelar la red local con una precisión milimétrica. Las mediciones deben documentarse con diligencia y conservarse en los metadatos de la estación. La información relativa a la nivelación también debería ser accesible para el SONEL (véase más adelante).

Los puntos de contacto de los medidores de flotador y cilindro de amortiguación pueden suponer un problema para la nivelación, ya que podrían estar situados dentro de un refugio de acceso restringido, en lugar de al aire libre, como ocurre con las cotas. Ello implica que, en ocasiones, la nivelación tiene que llevarse a cabo poco a poco, ya

que deben negociarse los accesos, entre otros aspectos. Los medidores de radar tendrán un punto de contacto (o marca de referencia) al que también podría resultar difícil acceder, al estar el radar situado sobre el agua. Sin embargo, si el soporte del medidor cuenta con un buen diseño, este problema puede ser más fácil de abordar (sección 4.3). La utilización de un anillo de montaje, como el de NOAA, resulta una solución excelente. De igual modo, si se utilizan brazos en voladizo, es mejor si el brazo está diseñado de manera tal que, cuando se instala el medidor en un extremo, se sepa cuál debe ser la altura del punto de contacto (marca de referencia) en relación con otra marca en el extremo en tierra del brazo. Si existe la probabilidad de que el brazo se deforme a lo largo de su período de vida, es imprescindible comprobar con regularidad la relación entre el supuesto punto de contacto y la marca en tierra.

Una técnica para llevar a cabo la nivelación con respecto al punto de contacto en condiciones de calma en puertos donde se cuenta con apoyo local conlleva el uso de una embarcación o plataforma flotante, si bien, claro está, ello exige un esfuerzo físico mayor que la nivelación normal (**figura 6.3b**). La nivelación se lleva a cabo con un nivel

estándar con la parte de superior de la mira fija en el punto de contacto (otra alternativa consiste en colocar la mira al revés, con el cero en el punto de contacto; si se utiliza una mira de código de barras, puede utilizarse un nivel digital para reconocer que está en posición invertida). Llevará más tiempo realizar las lecturas que con la nivelación normal de cotas y los resultados serán menos precisos. Sin embargo, pueden repetirse las lecturas varias veces y comprobar su coherencia al milímetro.

6.3 Monitorización de las alturas de las cotas mediante el CGNSS

El CGNSS ha demostrado ser una técnica madura para controlar las alturas elipsoidales de las cotas, como la GNSSBM situada en la proximidad de un mareógrafo que ya se ha mencionado (p. ej. Teferle et al., 2009; Santamaría-Gómez et al., 2012; Wöppelmann y Marcos, 2016). En los trabajos con los mareógrafos, esta técnica suele designarse como CGNSS@TG (antes CGPS@TG). A través de esta técnica, el nivel medio del mar que se registra en el mareógrafo puede definirse en un marco de referencia geocéntrico mundial, como ocurre con los datos de los altímetros satelitales, para que de este modo las contribuciones con respecto al cambio en el nivel relativo del mar observadas en un mareógrafo puedan entenderse en términos de cambios en el nivel del mar y la tierra por separado.

En este sentido, el desarrollo del GNSS cuenta con una historia que se extiende a lo largo de los últimos tres decenios¹¹. En sus inicios, las mediciones cerca de los mareógrafos se realizaban en campañas de unos cuantos días separados por largos períodos de tiempo (denominadas “campañas” u “observaciones episódicas”, EGNSS), a menudo utilizando receptores monofrecuencia. Con el paso del tiempo, la técnica evolucionó en el CGNSS@TG y pasaron a utilizarse receptores de doble frecuencia, lo cual fue un paso fundamental, puesto que una serie temporal del GNSS de medición continua es superior, con diferencia, a una de EGNSS, en la medida en que permite una apreciación más completa del espectro de señales.

Un aspecto fundamental de este trabajo es la existencia del IGS, que coordina la recogida y el procesamiento

de datos desde una red mundial de estaciones de seguimiento GNSS. Gracias a este conjunto de datos, se obtiene una precisión significativamente mayor de la que suele estar disponible al calcular las órbitas de los satélites de la constelación GNSS y, por tanto, al determinar las coordenadas de las GNSSBM. Para los estudios sobre el nivel del mar, el grupo de trabajo TIGA del IGS (véase más adelante) se encarga de volver a procesar los datos del GNSS obtenidos a través de los receptores de la red del IGS y los mareógrafos a fin de ofrecer la serie temporal de movimientos verticales de la tierra más precisa posible para nuestros objetivos. Los resultados se distribuyen a través del SONEL (Système d’Observation du Niveau des Eaux Littorales), que es el archivo de datos y centro de análisis designado del GNSS para el GLOSS (véase el capítulo 8 y COI, 2012).

Como ya se ha mencionado, todos los mareógrafos del GLOSS deben estar equipados con receptores CGNSS (COI, 2012). Sin embargo, a medida que desciende el costo de los receptores, comienza a resultar práctico que puedan equiparse de este modo aún más medidores. Para los estudios sobre el nivel del mar, se recomienda que el equipo del CGNSS se instale en el propio mareógrafo a fin de que este pueda vigilar directamente cualquier movimiento del medidor. Si la antena se coloca al lado de la TGBM, la GNSSBM y la TGBM coincidirán, de modo que no será necesario llevar a cabo una nivelación entre ambas cotas (si bien es posible que deba medirse la diferencia de altura entre el ARP y la TGBM). Así, la TGBM constituye el punto fundamental, que está ubicado de forma geocéntrica por las mediciones del GNSS y con el cual se relacionan todas las mediciones del nivel del mar. En la práctica, las estaciones de mareógrafos situadas en puertos concurridos no siempre son idóneas para realizar mediciones del GNSS. Ello puede deberse a la reducción de la visibilidad del cielo, al exceso de recepción por trayectos múltiples o a las radiointerferencias, en cuyo caso debería seleccionarse una estación que no tenga estos problemas y que se encuentre lo más cerca posible del mareógrafo. En algunos emplazamientos, puede instalarse un segundo receptor CGNSS unos kilómetros hacia el interior, de modo que es posible realizar una comparación entre los movimientos verticales de la tierra en las zonas de interior y en los puertos. En algunas estaciones, si el receptor CGNSS funciona con una alta frecuencia de toma de datos y está conectado a un sistema de telemetría con un ancho de banda elevado, las series temporales del movimiento vertical de la corteza pueden facilitar información sísmica a centros de

¹¹ Véanse las referencias que se recogen en http://www.psmsl.org/train_and_info/geo_signals/gps.php.



Figura 6.4 Mareógrafo acústico en Burnie, en el norte de Tasmania (Australia) y, a su derecha, un pilar especial con una antena del GNSS en la parte superior. Fotografía cortesía de Geociencia Australia. (Pugh y Woodworth, 2014).

alerta regionales para la determinación de magnitudes de terremotos y el cálculo de alertas de tsunamis en tiempo cuasi real.

Monumentación

Una antena del GNSS debe instalarse lo más cerca posible del mareógrafo o incluso fijarse a él, si el montaje lo permite (**figura 6.4**). En ocasiones, las antenas se instalan sobre pilares geodésicos cercanos a la GNSSBM, de forma que la nivelación convencional puede utilizarse para proporcionar una conexión geodésica regular con la TGBM. En otras estaciones, las antenas se instalan en los tejados de construcciones cercanas a los medidores, si bien esta solución resulta menos idónea. La antena se conecta al receptor por medio de un cable, que podría funcionar a través de la alimentación de la red eléctrica o de fuentes alternativas de energía. En Bevis et al., 2002 y COI, 2006 ¹² se puede encontrar asesoramiento sobre

¹² Véase también <https://igs.cb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html>, donde se pueden encontrar guías sobre las estaciones para las "estaciones del TIGA" y la NOAA (2015), para obtener asesoramiento para los grupos estadounidenses. También se puede obtener asesoramiento de forma individual del SONEL o de miembros del grupo de trabajo TIGA.

cómo funciona el equipo del GNSS en los mareógrafos, así como sobre los requisitos para la monumentación de las antenas (tipo de pilar) y sobre los métodos de transmisión desde el receptor al centro de análisis.

La importancia de los enlaces

Aunque una estación de CGNSS se instale a una cierta distancia del mareógrafo y no se realicen conexiones geodésicas entre ellos, sus distintas series temporales pueden combinarse de manera provechosa en el marco de estudios como los relativos al cambio del nivel del mar y el movimiento vertical de la tierra en la zona, o la calibración de altímetros satelitales, si se parte de la hipótesis de trabajo de que las tasas de cambio de movimiento vertical de la tierra en los dos emplazamientos son iguales. Para estos estudios, la cantidad que importa es la tasa de movimiento vertical de la tierra, en lugar del promedio de la diferencia de altura elipsoidal entre la GNSSBM y la TGBM.

Sin embargo, las conexiones geodésicas son importantes por dos razones. En primer lugar, es posible que las tasas de movimiento vertical de la tierra no sean las mismas

en los dos emplazamientos, y resulta imprescindible conocer y vigilar cualquier diferencia que pueda existir. En segundo lugar, debe conocerse la diferencia de altura elipsoidal entre la GNSSBM y la TGBM para estudios geodésicos como el de la Unificación Internacional de los Sistemas de Altura (WHSU), que se debate a continuación. Resulta fundamental documentar si la conexión geodésica se realiza utilizando nivelación o una medición diferencial de GNSS.

El proyecto de monitorización de cotas de mareógrafos del IGS (TIGA)

En 2001, el IGS inició un proyecto piloto denominado TIGA (del inglés Tide Gauge, mareógrafo), cuya tarea era la de procesar y analizar los datos del CGNSS registrados por los mareógrafos de todo el mundo en un marco de referencia mundial y coherente (véase <http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/> para obtener más información). El principal objetivo de este proyecto era aprender más acerca de los problemas prácticos de utilizar el CGNSS en el entorno costero. Desde 2010, el TIGA ha pasado de ser un proyecto piloto a un grupo de trabajo, como reconocimiento de su importancia a largo plazo. Los centros de análisis del TIGA vuelven a procesar los datos del GNSS procedentes de archivos a largo plazo con los programas informáticos y los métodos más recientes a fin de proporcionar unas coordenadas geocéntricas y unas series temporales de movimiento vertical homogéneas y coherentes. En concreto, el TIGA trabaja en estrecha colaboración con el SONEL para archivar datos del CGNSS y obtener productos de análisis. El sitio web del SONEL está vinculado con el del PSMSL, de modo que puedan realizarse análisis combinados de información sobre el cambio en el nivel del mar y la tierra (capítulo 8).

6.4 Estudios de EGNSS sobre las alturas de las cotas

Hay una importante aplicación del GNSS, incluso en aquellos medidores que no cuentan con el CGNSS, que es la de medir la altura y la posición de la TGBM en una o más campañas de EGNSS. Esta información se necesita, en primer lugar, para poder saber dónde se encuentran exactamente la TGBM y el medidor, y las coordenadas que se obtienen de este modo pueden combinarse con mapas en los metadatos de la estación (capítulo 8). Es posible que resulte sorprendente para algunos lectores el hecho de que aún hoy en día no contemos con información detallada y precisa sobre la localización de

algunos mareógrafos para los cuales existe un conjunto de datos históricos.

Otro motivo por el cual esta información resulta importante es que permite utilizar los datos relativos al nivel medio del mar de estas estaciones, junto con los datos de los medidores equipados con el CGNSS, en el marco de estudios geodésicos como el WHSU que están investigando la viabilidad de adoptar nuevos modelos de geoide como dátum global (Woodworth et al., 2012). Para desarrollar estos estudios, es necesario disponer de datos relativos al nivel medio del mar expresados como alturas elipsoidales, así como en relación con la TGBM, lo cual conlleva la realización de una campaña de EGNSS en una GNSSBM y el establecimiento de un enlace geodésico preciso entre la GNSSBM y la TGBM. En este contexto, el método utilizado para establecer este enlace es quien determina si la cantidad importante en la WHSU es la altura elipsoidal del geoide en la GNSSBM o la TGBM. En consecuencia, si los dos puntos están separados por una cierta distancia y los dos valores geodésicos son significativamente diferentes, resulta fundamental saber qué método se utilizó para llevar a cabo el enlace.

Los datos obtenidos en las breves campañas de EGNSS pueden procesarse de dos maneras. La primera de ellas consiste en enviar los datos del GNSS al SONEL, que los procesará a través de métodos modernos y devolverá las coordenadas horizontales y verticales al proveedor de datos. La segunda manera consiste en que el proveedor procesa los datos utilizando herramientas basadas en la web, tales como la herramienta de Posicionamiento Preciso de Punto del Sistema de Referencia Espacial Canadiense, del Ministerio de Recursos Naturales del Canadá (NRC, 2015). Estas herramientas están disponibles de forma gratuita y pueden prestar a cualquier organismo un servicio de posicionamiento del GNSS de alta calidad en el marco de una estrategia de procesamiento de última generación. En consecuencia, si el organismo en cuestión así lo prefiere, es posible procesar los datos de forma local y, a continuación, transmitir las coordenadas al SONEL, en lugar de facilitar los datos directamente a este centro. Por lo general, los datos recogidos en una campaña de EGNSS de varios días de duración pueden procesarse en menos de un día, con una precisión resultante de alturas elipsoidales superior a los 5 cm, que resulta adecuada para la WHSU y otros estudios similares en curso. Hemos comprobado que las alturas calculadas utilizando estas herramientas web difieren tan solo de 2 a 3 cm de las obtenidas por medio de las últimas soluciones del SONEL (Santamaría-Gómez et al., 2012).

6.5 Otros métodos para medir los movimientos verticales de la tierra

Existen otros métodos para medir los movimientos verticales de la tierra, que se describen en libros de texto como Pugh y Woodworth (2014). Los dos primeros que se mencionan a continuación están descritos en el volumen 4, mientras que el tercero se ha convertido en una técnica importante durante el último decenio.

Sistema de Orbitografía de Precisión y Localización (DORIS)

El sistema DORIS fue diseñado por la Agencia Espacial Francesa como sistema para determinar con precisión las órbitas de satélites, entre ellos aquellos con altímetros de radar. Es un legado de los primeros sistemas Doppler utilizados para realizar un seguimiento de los satélites. Consiste en una red de balizas terrestres de cobertura casi mundial, en la que cada una de las balizas de doble frecuencia transmite señales a determinadas frecuencias (2036,25 y 401,25 MHz) a una antena, un receptor de radio y un oscilador ultraestable a bordo del satélite. Debido al efecto Doppler, las señales recibidas experimentan un desplazamiento de frecuencia cuyo análisis permite determinar la órbita del satélite con precisión. Los productos de los análisis son las coordenadas de estación promedio en función del tiempo de cada baliza, así como una serie temporal del movimiento tridimensional de cada baliza que puede examinarse junto con la correspondiente serie temporal proporcionada por el GNSS. Si bien los datos del DORIS se han aplicado a estudios sobre el nivel del mar (p. ej., Ray et al., 2010), la escasez de balizas cerca de los mareógrafos y su limitado número en la red mundial implica que el DORIS nunca haya sido tan idóneo para la determinación de los movimientos verticales de la tierra en los mareógrafos como el GNSS.

Gravedad absoluta

Un gravímetro absoluto mide la aceleración de un reflector de esquina de cubo en caída libre en vacío utilizando un interferómetro láser estabilizado con yodo con una precisión de, normalmente, entre 1 a 2 μgal (o de 1 a 2 $\times 10^{-9}$ de la aceleración debida a la gravedad, "g"). Ello equivale a una precisión de altura de 5 a 10 mm basada en una fórmula que depende de la densidad del manto superior. Suelen llevarse a cabo campañas de varios días en un emplazamiento cerca de cada mareógrafo. Por lo

general, no es aconsejable utilizar el instrumento en la propia costa, debido a los microsismos (ruidos de fondo de pequeñas señales sísmicas causados por las olas de océanos cercanos). Se prefieren construcciones antiguas (iglesias, escuelas, etc.) con un zócalo firme que es poco probable que vayan a modificarse de forma significativa en el futuro. La monumentación es importante, y el instrumento debe instalarse en una roca madre en la que el movimiento vertical de la tierra sea representativo de la zona circundante.

Un aspecto relevante de la gravedad absoluta es que se trata de una tecnología totalmente diferente de las técnicas geodésicas espaciales, sin las incertidumbres de escala presentes en la elaboración del ITRF. No obstante, existen varios factores que restringen el uso de la gravedad absoluta frente al GNSS. Uno de ellos es el elevado costo de los gravímetros. Otro es que solo pueden obtenerse datos durante campañas breves y no de forma continua, debido al período de vida limitado del láser y otros componentes. Un tercer factor es que es posible que la gravedad medida no esté relacionada por completo con un movimiento vertical de la tierra, sino con cambios en las aguas subterráneas, construcciones en las proximidades, etc. Por tanto, si bien la gravedad absoluta se ha utilizado en distintos estudios sobre el nivel del mar (p. ej., Teferle et al., 2009; Mazzotti et al., 2011), no se ha demostrado que sea tan idónea como el GNSS para aplicaciones mundiales.

En la actualidad, se están desarrollando nuevos medidores de gravedad absoluta que utilizan la caída libre de átomos enfriados por láser, en lugar de reflectores de esquina de cubo, y que pueden emplearse en un emplazamiento casi de forma continua (véase <http://muquans.com>). Sin embargo, estos también son instrumentos caros que, si bien resultan valiosos en investigación, no son los más indicados para realizar grandes despliegues en una red mundial.

Interferometría de radar de apertura sintética (InSAR)

En este capítulo hemos destacado la importancia de contar con una red local de cinco o más cotas, entre ellas la GNSSBM y la TGBM, que podría utilizarse para verificar la estabilidad de la zona circundante mediante campañas repetidas de nivelación. Algunos medidores están instalados en zonas costeras donde la tasa de movimiento vertical de la tierra puede variar de forma significativa en distancias cortas. Algunos se sitúan en puertos construidos en tierra ganada al mar o están cerca

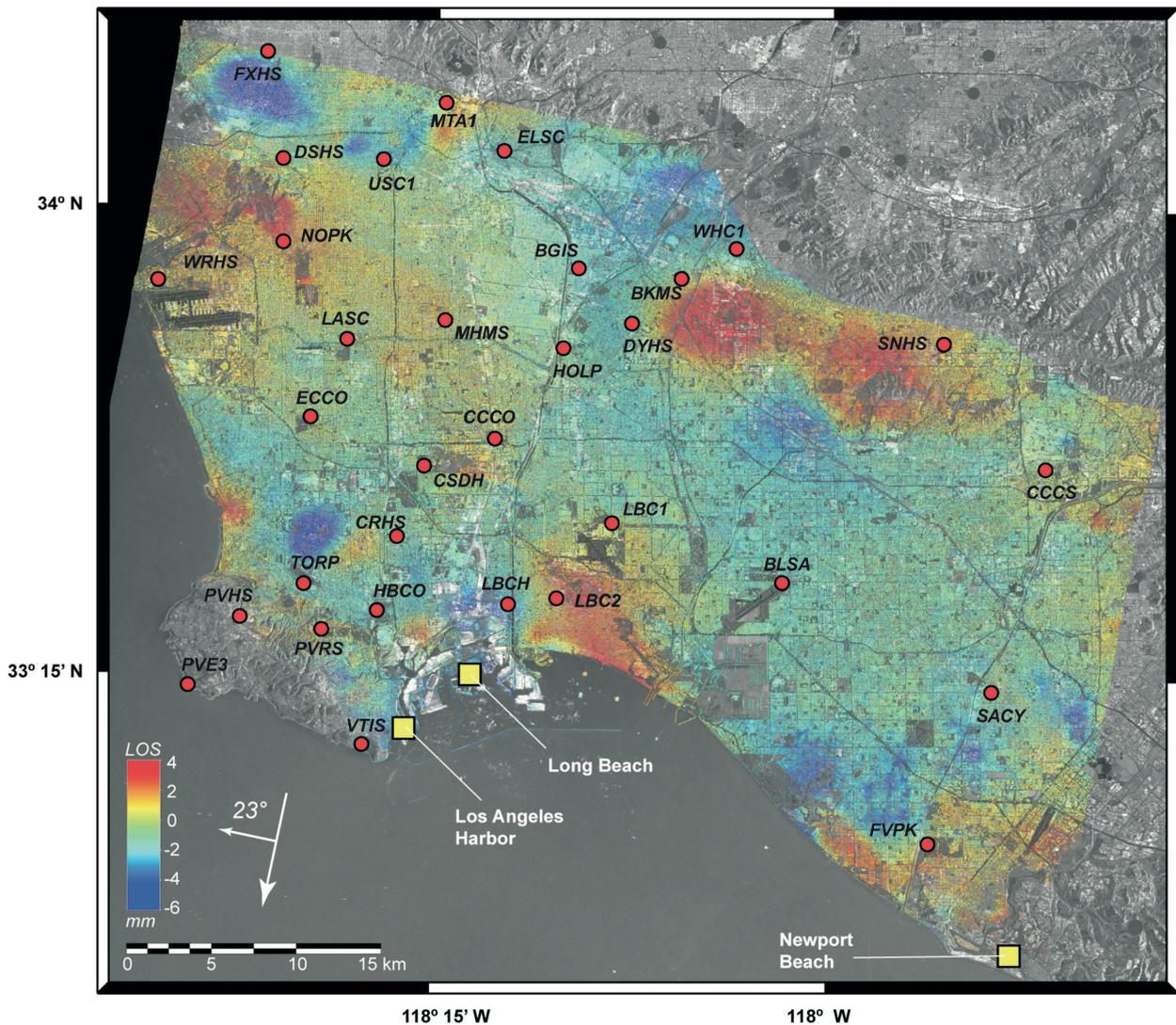


Figura 6.5 Velocidad lineal de la línea de mira, que para nuestros fines puede interpretarse como la tasa de movimiento vertical de la tierra, para el periodo 1992-2000, utilizando pasadas descendentes del ERS-1 en la cuenca de Los Ángeles. Se pueden apreciar las estaciones de medición continua del GNSS utilizadas en el análisis (círculos rojos) y estaciones mareográficas (cuadrados amarillos). La flecha muestra el acimut y la inclinación (23°) de la línea de mira del ERS. (Brooks et al., (2007).

de ciudades donde se está llevando a cabo el bombeo de agua subterránea. En consecuencia, es posible que con la monitorización del pequeño número de cotas no se obtenga un panorama adecuado de la variabilidad espacial del movimiento vertical de la tierra en la zona. En particular, si el equipo del CGNSS se encuentra a cierta distancia del medidor, podría obtener, en teoría, una medición de la tasa vertical diferente de la que se registraría en el propio medidor. Una forma de controlar esta posibilidad es utilizar la InSAR desde el espacio (Hannsen, 2001). Entre los satélites que cuentan con un equipo adecuado para ello se encuentran el ERS-1 y el ERS-2, el TerraSAR-X, el ALOS PALSAR y, ahora, el Sentinel-1.

A partir de las diferencias de fase entre las imágenes repetidas del radar de apertura sintética (SAR) de una

zona, la InSAR reconstruye los desplazamientos de la superficie de la Tierra medidos a lo largo de la línea de mira del radar que se sitúa a $\sim 23^\circ$ con respecto a la vertical en el caso de los satélites ERS-1 y ERS-2. Por ejemplo, en la **figura 6.5** se muestran los resultados obtenidos en la cuenca de Los Ángeles, que ponen de relieve una variabilidad espacial considerable (de $+3,4$ a $-4,3$ mm al año de 1992 a 2000), gran parte de la cual está causada por el agua subterránea y la extracción de petróleo (Brooks et al., 2007). En consecuencia, es casi seguro que la tendencia a largo plazo del nivel del mar prevista a partir de los registros del mareógrafo de Los Ángeles ($0,8$ mm al año) se ha visto afectada por estos movimientos locales de la tierra.

6.6 Otras aplicaciones del GNSS en relación con el nivel del mar

Pueden mencionarse varias aplicaciones del GNSS para la medición del nivel del mar que es posible que lleguen a ser aún más importantes en el futuro:

- GNSS en boyas para la calibración de altímetros satelitales y para la determinación del dátum de mareógrafos (véanse la sección 8 del volumen 4; Testut et al., 2010, y el capítulo 2 de Pugh y Woodworth, 2014).
- Reflectometría GNSS, que utiliza las reflexiones de las señales del GNSS desde la superficie del mar hasta los receptores situados en satélites de órbita cercana a la Tierra. Esta técnica ofrece un medio para detectar a distancia la atmósfera y los océanos de la Tierra con una densa cobertura espaciotemporal (véase la sección 8 del volumen 4).
- Reflectometría GNSS, que emplea las señales de trayectos múltiples que se producen en las mediciones del GNSS, tradicionalmente consideradas ruido. Las señales de trayectos múltiples pueden explotarse de modo que un receptor del GNSS convencional pueda utilizarse en efecto como mareógrafo y para monitorizar los movimientos verticales de la tierra (p. ej., Larson et al., 2013; Santamaría-Gómez et al., 2015; Santamaría-Gómez y Watson, 2016).
- Sismología GNSS, en cuyo marco las mediciones de alta frecuencia de las posiciones de las estaciones se emplean como sismógrafos para la determinación rápida de parámetros de terremotos (p. ej., Blewitt et al., 2006).
- Técnicas geodésicas que logran la tan deseada estabilidad a largo plazo del ITRF, con la precisión necesaria para aplicaciones tales como la monitorización del nivel del mar (ver ejemplos en Wöppelmann y Marcos, 2016).

7. Equipo necesario para la telemetría de datos registrados en medidores de radar y otros mareógrafos

7.1 Introducción

El acceso a tiempo a los datos sobre el nivel del mar puede ser un aspecto tan importante como su precisión, importancia relativa que está directamente vinculada a las aplicaciones previstas para los datos. La información obtenida con un mareógrafo puede necesitarse en “tiempo real” (TR), en “tiempo cuasi real” (TRC) o en “modo diferido”, en función de su aplicación. Por ejemplo, un sistema de alerta de tsunamis u oleajes de tormenta puede que necesite que los datos se transmitan a las autoridades competentes en un plazo de tiempo muy breve. Por otro lado, en algunas investigaciones científicas, a veces solo es necesario recuperar los datos anualmente, en cuyo caso pueden almacenarse de forma local y recogerse durante una visita a los emplazamientos, descargando los datos a un ordenador, o extrayendo y reemplazando una tarjeta de memoria (de todas formas, aunque haya un enlace de comunicación en tiempo real en funcionamiento, es conveniente adoptar este procedimiento local durante las visitas a los emplazamientos como copia de seguridad, a fin de evitar la pérdida de datos valiosos).

Los métodos de comunicación dependen en gran medida de las distancias a las que tienen que transmitirse los datos. En el caso de los enlaces cortos (p. ej., actividades en puertos), a menudo es conveniente utilizar un radioenlace. En el caso de los enlaces a nivel nacional, la selección automática interurbana de las líneas telefónicas especiales de la red pública de telefonía conmutada (PSTN) resulta un método eficaz. En aquellos casos en que no es práctico utilizar líneas fijas, el aumento del uso de teléfonos móviles que utilizan la tecnología de mensajería general conmutada (GSM) y protocolos de servicio general de paquetes de radio (GPRS) ha ampliado las posibilidades de establecer comunicaciones de larga distancia. Los sistemas de teléfonos, tanto fijos como móviles, permiten acceder a Internet a través de un proveedor de servicios de Internet (PSI).

En las zonas apartadas, el uso de enlaces móviles por satélite es una posible alternativa. En la actualidad, existen

más de 30 sistemas por satélite en funcionamiento dedicados a la transmisión de datos, algunos de ellos con carácter global. Los sistemas móviles de comunicaciones por satélite (MSS) pueden clasificarse según la altitud de su órbita, tal como se indica a continuación:

GEO – órbita geoestacionaria, altitud aproximada: 35.000 km

MEO – órbita terrestre media, altitud aproximada: 20.000 km

LEO – órbita cercana a la Tierra, altitud aproximada: <2.000 km

Además, los sistemas LEO pueden subdividirse en las categorías Gran LEO y Pequeño LEO. Los Gran LEO tienen la capacidad de transmitir mensajes de voz, fax, télex, radiobúsqueda y datos, mientras que los Pequeño LEO solo pueden transmitir datos, ya sea para una lectura directa en tiempo real (“guía de ondas acodado”) o como servicio de almacenamiento y envío. Dado que el espacio que ocupan los satélites es menor cuando tienen una órbita cercana a Tierra, los sistemas LEO y MEO necesitan unas constelaciones mayores que los satélites GEO para lograr una cobertura mundial y evitar retrasos en los datos. Sin embargo, por lo general, se necesita menos energía para las comunicaciones a través de satélites LEO y MEO, puesto que el transmisor y el satélite están separados por una distancia menor.

Algunos satélites utilizan antenas de alta ganancia para generar “haces puntuales” y así reducir la necesidad del dispositivo móvil en Tierra de disponer de una antena compleja o una elevada potencia de salida. Hoy en día, los MSS son totalmente flexibles y pueden aceptar los últimos servicios de IP, así como los métodos tradicionales de transmisión de voz y datos por conmutación de circuitos. Algunos sistemas ofrecen capacidades significativamente mejoradas en comparación con otros métodos de telemetría. Algunas de las ventajas que podrían ofrecer dichos sistemas son la posibilidad de establecer comunicaciones bidireccionales, obtener observaciones más oportunas y transmitir mayores volúmenes de datos a una mayor velocidad.

Con independencia del método satelital que se utilice, los datos de nivel del mar se enviarán a través de algún tipo de plataforma de recogida de datos al operador por satélite y, como se indica más adelante, se retransmitirán finalmente al propietario de los datos a través de una red de comunicaciones adecuada. Por tanto, el propietario de los datos necesitará contar con herramientas de almacenamiento y visualización de datos para poder llevar a cabo una monitorización integral de las mediciones.

Uno de los métodos más utilizados para la retransmisión de datos a usuarios de todo el mundo es el Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT) (<http://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/GTS/>). El SMT, desarrollado por la OMM, fue concebido principalmente para el intercambio de datos meteorológicos entre los servicios meteorológicos de todo el mundo. Los datos pueden transmitirse al SMT a través de satélites u otros métodos de comunicación, y todos los datos resultantes se ponen a disposición de las dependencias nacionales del servicio meteorológico de cada país. Fueron varios los operadores que empezaron a utilizar el SMT para la difusión de datos de nivel del mar después del tsunami del océano Índico de diciembre de 2004, momento en el cual los centros de alerta de tsunamis y otros organismos de redes sobre el nivel del mar descubrieron la alta fiabilidad del sistema.

La creación del Servicio de Observación del Nivel del Mar (SLMF) en el Instituto Marino de Flandes (VLIZ) (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>) (sección 8.1.1) por parte de la COI supuso nuevos avances. Este instituto ofrece un servicio de monitorización en tiempo real para cualquier estación de observación del nivel del mar que forme parte de los programas de la COI, como la Red Básica del GLOSS o los sistemas de alerta de tsunamis en el océano Índico (SATOI), en el Atlántico Nororiental y el Mediterráneo (NEAMTWS), en el Pacífico (PTWS) y en el Caribe (CARIBE-EWS). El principal objetivo de este servicio es permitir al propietario de la estación llevar a cabo una evaluación rápida de la disponibilidad y la calidad de los datos. Para aplicaciones como la monitorización y alerta de tsunamis, que no son responsabilidad del SLMF, es necesario un procesamiento de datos adicional, así como una adopción de decisiones por parte de los centros de alerta de tsunamis nacionales responsables.

En las siguientes secciones, se describen los principios generales con respecto a la elección de un sistema de telemetría (sección 7.2) y los sistemas específicos que

se utilizan con mayor frecuencia para la telemetría de datos de nivel del mar (sección 7.3), entre ellos los sistemas satelitales y terrestres (secciones 7.3.1 y 7.3.2). En la sección 7.4 se ofrece algo de contexto en relación con el SMT, mientras que en la sección 7.5 se presenta el hardware de telemetría que se utiliza en muchas estaciones de observación del nivel del mar. En la sección 7.6 se expone la necesidad de un mayor ancho de banda para el uso del GNSS en las estaciones de mareógrafos.

7.2 Elección de un sistema de telemetría

Para seleccionar un sistema de comunicaciones para la transmisión de los datos de nivel del mar en TR o TCR, es necesario poner sobre la balanza diversos factores que deben tenerse en cuenta en relación con la aplicación prevista de los datos. A continuación, se indican los principales factores que deben analizarse:

○ Frecuencia de transmisión y velocidad de transmisión de los datos

Si bien por lo general no se necesita una transmisión en tiempo real para el uso científico de los datos de nivel del mar, esta sí es imprescindible para la planificación y la respuesta en casos de emergencia. La cantidad de datos que se transmiten (el tamaño de los paquetes de datos) también es un factor que debe tenerse en cuenta y dependerá de los objetivos de los datos. Para las aplicaciones científicas, es posible que se necesiten (o no) grandes paquetes de datos, pero en situaciones de emergencia solo suelen utilizarse paquetes más reducidos. Si se necesitan grandes paquetes de datos, también será necesaria una mayor velocidad de transmisión de datos. Algunos sistemas permiten distintos modos de transmisión, de manera tal que cuando se produce una emergencia, las modalidades de transmisión pueden optimizarse para ofrecer una mayor velocidad de transmisión de datos.

○ Fiabilidad o redundancia del sistema

Otro factor importante es la fiabilidad de la recepción de datos, que también está directamente relacionada con los usos de los datos. Para las aplicaciones científicas, la fiabilidad de la transmisión de los datos puede complementarse con un almacenamiento in situ (es decir, registradores locales), pero en situaciones de emergencia la fiabilidad de la transmisión es el factor clave. A la hora de evaluar la fiabilidad del sistema también debe tenerse

en cuenta la posibilidad de que haya diversas influencias externas, dado que las situaciones de emergencia pueden cambiar las condiciones normales de funcionamiento. Entre los factores que podrían afectar a la fiabilidad del sistema se encuentran los siguientes:

(i) Fenómenos meteorológicos extremos u otras situaciones de emergencia

A la hora de adoptar un sistema de comunicaciones para la instalación de un mareógrafo, uno de los factores que debe analizarse es la fiabilidad del sistema en condiciones ambientales extremas. Por ejemplo, para la alerta de tsunamis, podría establecerse una estación en una región activa desde el punto de vista tectónico a fin de ofrecer un servicio de alerta temprana de calidad aceptable. En caso de que se produzca un terremoto, las primeras redes de comunicaciones que se pierden suelen ser las redes PSTN y los enlaces de telefonía móvil, así como la corriente eléctrica. En tales circunstancias, se recomienda encarecidamente el uso de enlaces por satélite como principal sistema de telemetría.

(ii) Disponibilidad y redundancia de alimentación de energía

Por lo general, se utiliza un sistema fotovoltaico, basado en la alimentación procedente de paneles solares durante el día y baterías por la noche, para cubrir la mayor parte de las necesidades en materia de energía para la telemetría. Disponer de un suministro de alimentación de corriente alterna (CA) puede contribuir a mejorar la fiabilidad del sistema, pero no puede confiarse en él para situaciones de emergencia.

La alimentación de CA suministrada por cable puede verse interrumpida en casos excepcionales. En aquellos lugares donde existe esta posibilidad, resulta fundamental disponer, a mayores, de algún tipo de suministro de energía ininterrumpido. A menudo, este adopta la forma de un sistema de copia de seguridad con batería con una capacidad de reserva adecuada de varias horas. Los aerogeneradores deben considerarse únicamente como una fuente de energía secundaria. Sin embargo, una estación de observación del nivel del mar situada en emplazamientos aislados con regímenes de vientos adecuados podría beneficiarse de la opción de los aerogeneradores para cubrir sus necesidades energéticas totales.

Deben examinarse con atención las necesidades en materia de energía de algunos tipos de telemetría. Por ejemplo, los transmisores de la BGAN (Red de Área

Mundial de Banda Ancha) a los satélites INMARSAT agotarán las baterías en un par de días si no reciben alimentación de CA. Sus necesidades energéticas podrían reducirse si se seleccionan intervalos de transmisión más prolongados, pero, como ya se ha mencionado, será el tipo de aplicación de los datos de nivel del mar la que determinará si se trata de una opción adecuada.

La ubicación de la estación no solo determinará la disponibilidad de infraestructuras de telecomunicaciones y su demanda energética, sino también la disponibilidad de energía para la propia estación de observación del nivel del mar. La demanda de energía de los sensores varía considerablemente, de modo que la selección de sensores adecuados puede ayudar a reducir las necesidades energéticas.

En resumen, si para las aplicaciones de un usuario determinado se necesita una transmisión de alta frecuencia o en tiempo real, con una velocidad de transmisión de datos elevada y fiable, deberán cubrirse las necesidades energéticas del hardware de telemetría mediante una combinación de una o más fuentes de alimentación. En las proximidades de zonas pobladas, está garantizada la disponibilidad de alimentación de CA, pero la estación deberá seguir funcionando en situaciones de emergencia durante cortes de energía. En situaciones de emergencia, las necesidades energéticas de las estaciones aisladas pueden cubrirse mediante una combinación de sistemas fotovoltaicos (conjuntos de paneles solares/baterías) y aerogeneradores.

Una vez estudiados todos estos aspectos (aplicaciones, frecuencia de transmisión y redundancia del sistema), deberá realizarse una evaluación de la financiación disponible a fin de determinar la viabilidad de la estación. Los sistemas satelitales públicos podrían estar disponibles de forma gratuita siempre y cuando el usuario solicite una asignación de canales y obtenga la aprobación del propietario del sistema (véase más adelante). Sin embargo, si los fondos no suponen un obstáculo, los sistemas de transmisión privada permiten una mayor flexibilidad para satisfacer las necesidades de los usuarios. Si se cuenta con la financiación suficiente, resulta muy deseable establecer una comunicación bidireccional (o en ambos sentidos) con una estación de observación del nivel del mar, ya que de este modo es posible actualizar los programas informáticos o los valores de calibración de la estación, consultar los fallos del sistema, cambiar la frecuencia de toma de datos y llevar a cabo diversas funciones de mantenimiento que

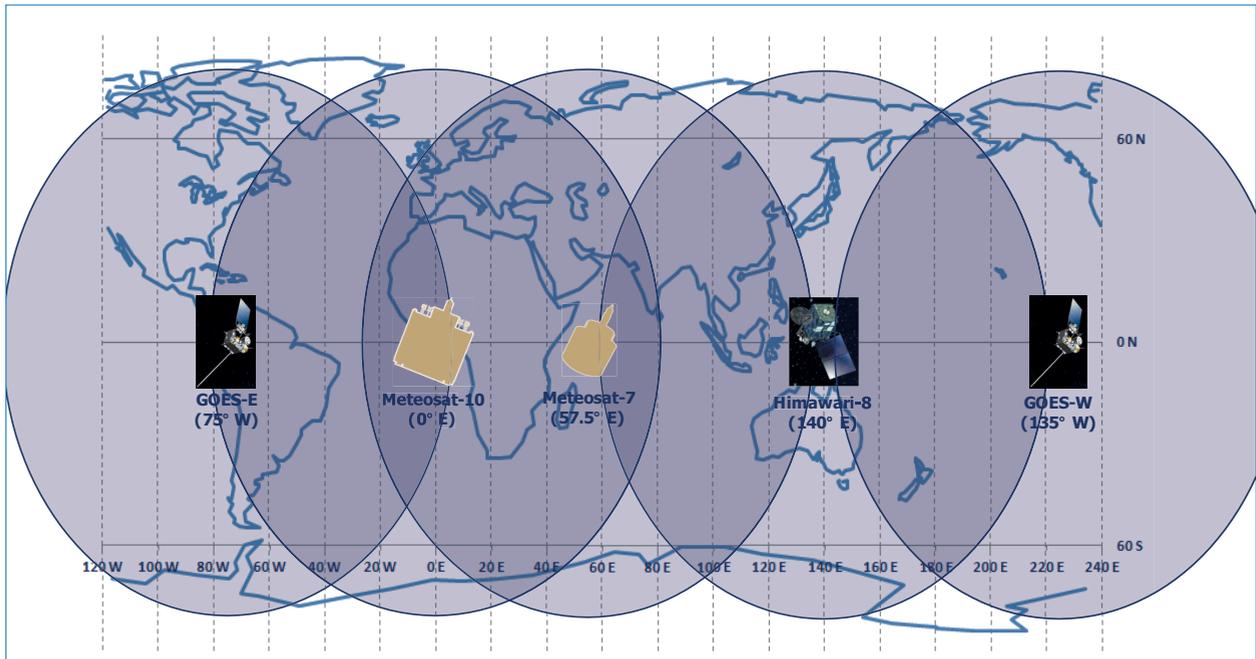


Figura 7.1 Cobertura de los dos satélites GOES de la NOAA sobre los océanos Pacífico y Atlántico, los dos satélites METEOSAT de la EUMETSAT sobre el Atlántico y el Índico, y el Himawari-8 del JMA sobre el Pacífico. Con respecto a los METEOSAT, esta figura muestra la situación a fecha de 2016, con el METEOSAT-7 a 57,5°E. Este satélite se sustituirá con el METEOSAT-8 en 2017. (Figura: Sean Burns, EUMETSAT).

de otra manera deberían posponerse hasta una visita al emplazamiento. Este tipo de comunicación permite al sistema ser plenamente flexible y mejorar su fiabilidad en general.

En conclusión, los datos de nivel del mar que se registran cerca de zonas pobladas contarán con una amplia variedad de opciones de telemetría, desde líneas telefónicas terrestres, sistemas de radio, GPRS, y redes satelitales públicas o privadas. En esta situación, para decidir cuál es el mejor método de telemetría, deben analizarse factores tales como la frecuencia de transmisión, la velocidad de transmisión de los datos, la fiabilidad del sistema y los costos asociados. En ubicaciones más remotas, la disponibilidad de sistemas satelitales y las dificultades que entrañan sus necesidades energéticas tendrán una importancia relativamente mayor.

7.3 Sistemas de transmisión de datos

Una vez analizados todos los factores antes descritos, el usuario puede tomar la decisión fundamental de elegir un sistema de transmisión. Como se ha mencionado, en la mayor parte de los casos puede adoptarse un solo sistema de telemetría, pero en otros, sobre todo los relacionados con la respuesta de emergencia, es deseable contar con una segunda solución redundante.

Se podrá adoptar un enfoque de sistema dual en función de los objetivos del usuario, así como de si el hardware del mareógrafo permite realizar transmisiones simultáneas. Podría considerarse la posibilidad de establecer distintos modos de transmisión, con un sistema primario para las condiciones normales de funcionamiento y uno secundario para las situaciones de emergencia, con una frecuencia de transmisión o una velocidad de transmisión de datos diferentes. En esta sección, se ofrece más información sobre estas distintas elecciones.

7.3.1 Sistemas satelitales

Para las aplicaciones científicas o para situaciones de emergencia, los sistemas de telemetría por satélite resultan los más adecuados para enviar datos desde una estación de observación del nivel del mar a un centro de procesamiento de datos. En algunos casos, el usuario gestiona su propia antena receptora y estación terrena de lectura directa, mientras que, en otros casos, la transmisión de los datos está gestionada por el sistema satelital.

Transmisión diferida

Los satélites que operan en un órbita baja pueden ofrecer transmisiones diferidas desde el mareógrafo al usuario cada vez que pasan sobre una estación de recepción. Solo pueden proporcionar una frecuencia de

transmisiones más baja que los otros sistemas satelitales que se describen a continuación, y el usuario recibe los datos con un cierto retraso. A pesar de ello, se utilizan sobre todo en el marco de tareas de monitorización e investigaciones científicas, aplicaciones en las cuales estas limitaciones son aceptables.

El sistema ARGOS (<http://www.argos-system.org>) funciona en todo el mundo utilizando satélites de órbita polar con períodos orbitales de unos 100 minutos. En el medidor se coloca una plataforma de transmisión terminal (PTT), con una capacidad de ancho de banda para la transmisión de datos de 256 bits por cada paso del satélite, y el retraso en la recepción de los datos por parte del usuario podría ser de varias horas, dependiendo de la ubicación. Los datos se ponen a disposición de los usuarios a través de los Centros Globales de Procesamiento de ARGOS en Toulouse (Francia) y en Largo (Florida). El número de pasos de satélites accesibles al día dependen de la latitud y varían desde 7 en el ecuador hasta 28 en los polos. Entre los usuarios de ARGOS para la adquisición de datos de los medidores se encuentra el Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale (GRGS), un consorcio de 12 grupos de investigación franceses que podrá ofrecer asesoramiento a posibles futuros usuarios.

Transmisión en tiempo real

Cuando la aplicación del usuario requiere una transmisión en tiempo real o cuasi real, los sistemas de satélites de órbita geoestacionaria son la mejor opción, puesto que los satélites están situados de forma permanente sobre las mismas partes de la superficie de la Tierra. El conjunto de satélites geoestacionarios ofrece una cobertura longitudinal con zonas que se solapan, pero la cobertura latitudinal se limita a unos 75° N/S debido a la órbita ecuatorial. A cada plataforma de recogida de datos situada en un medidor se le asigna una franja horaria de transmisión fija durante la cual puede transmitirse al satélite un determinado número de bytes de datos. El usuario debe garantizar que la configuración de la plataforma permite enviar el mensaje de datos completo sin superar el marco temporal asignado.

○ GOES

(<http://www.goes.noaa.gov>)

El sistema de satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) está disponible para usuarios gubernamentales y científicos, los cuales deben enviar un formulario de solicitud de una franja horaria de transmisión a la NOAA (como propietaria del sistema).

En función de cuál sea el objetivo del usuario, la NOAA asignará franjas horarias con intervalos de transmisión concretos, así como marcos temporales y canales de transmisión con registros de tiempo específicos. Dos satélites, el GOES oeste (GOES-15), a 135° O, y el GOES este (GOES-13), a 75° O, garantizan una amplia cobertura de los océanos Pacífico y Atlántico (**figura 7.1**).

Para las aplicaciones de emergencia, pueden asignarse franjas horarias de transmisión de alta frecuencia cada 5 minutos. Para usos que no sean de emergencia, puede haber disponibles intervalos de 10 a 15 minutos. Entre los usuarios de estos sistemas se encuentran el Centro Nacional de Oceanografía (NOC) en el Reino Unido, la NOAA y el Centro sobre el Nivel del Mar de la Universidad de Hawái (UHSLC) en los Estados Unidos de América, y algunos centros de alerta de tsunamis del Pacífico, como el SHOA en Chile. Una vez presentado el formulario de solicitud, al usuario se le asignará una franja horaria de transmisión con los siguientes parámetros:

- Identificador de la plataforma de recogida de datos: código de 8 dígitos hexadecimales.
- Número del canal: se asignan números impares para el GOES este y números pares para el GOES oeste.
- Inicio del tiempo: hora en la que se supone que la plataforma de recogida de datos transmitirá datos. La NOAA exige que la transmisión se configure al inicio del marco temporal y no en el medio, a fin de evitar que una transmisión se solape a otras realizadas durante el período de tiempo asignado a otro usuario.
- Marco temporal: período de tiempo disponible para la transmisión.

Los propietarios de la estación de observación del nivel del mar pueden recibir directamente los datos enviados a través de esta red si cuentan con su propia estación terrena de lectura directa. En caso contrario, la estación terrena de lectura directa de la NOAA recibirá los datos, que se enviarán al propietario a través de cualquier sistema disponible de transmisión de datos, normalmente el SMT.

La tasa de baudios del transmisor del GOES solía ser de 100, 300 o 1200, pero desde mayo de 2013 no se han asignado nuevas franjas horarias con tasas de baudios de 100 y, en la actualidad, los usuarios deberían haber migrado a sistemas de transmisión de datos de alta velocidad. Hoy en día, todos los transmisores de alta velocidad deben utilizar GPS para eliminar la deriva del

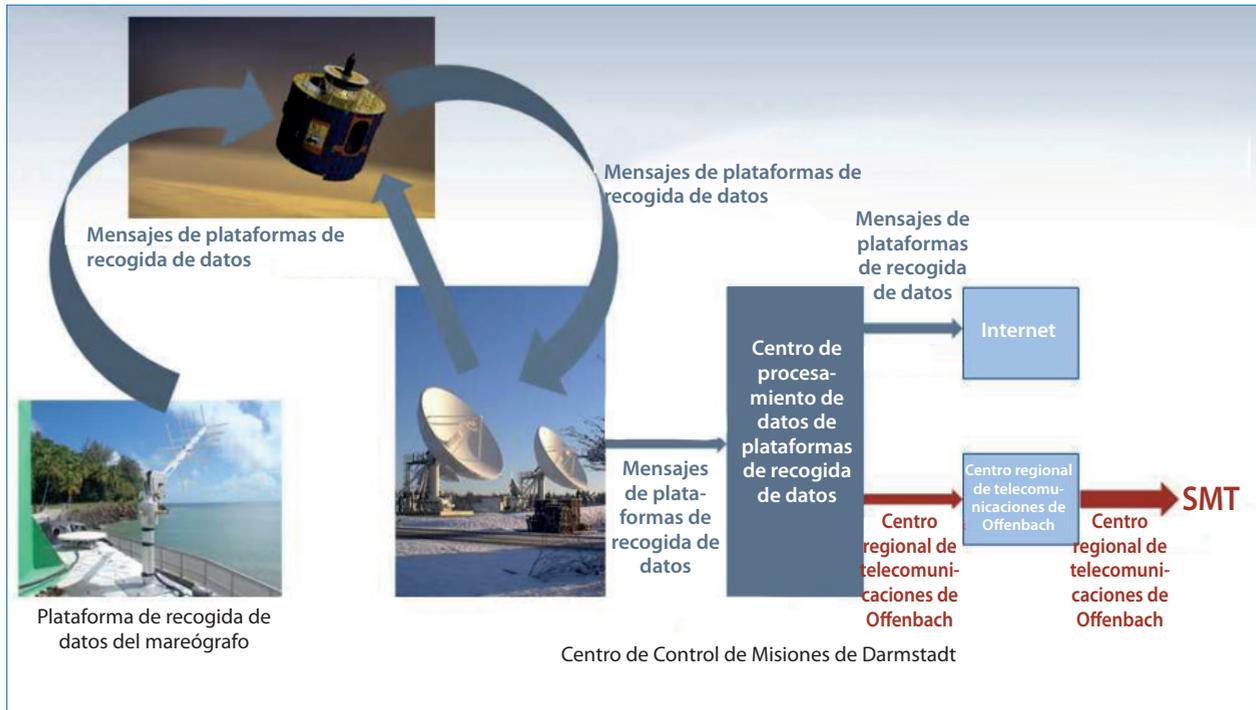


Figura 7.2 Esquema del flujo de datos del METEOSAT, desde el satélite hasta el SMT. (Figura: EUMETSAT).

reloj y realizar transmisiones únicamente con una tasa de baudios de 300 o 1200. Gracias a la mejora de la eficacia de la alta velocidad, podrán funcionar más plataformas de recogida de datos en cada canal. A la larga, los canales de alta velocidad tendrán una capacidad de transferencia de datos incluso mayor.

○ METEOSAT

(<http://www.eumetsat.int>)

La Organización Europea de Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) gestiona varios satélites con fines operativos científicos y meteorológicos, entre los cuales los satélites meteorológicos geoestacionarios (METEOSAT) son los más relevantes para este capítulo (Burns, 2009). Se ha puesto en funcionamiento una serie de satélites, un conjunto de ellos sobre el meridiano de Greenwich, que ofrece cobertura en el Atlántico para Europa, África y el Caribe, entre otras zonas, y otro a 57.5° E, que ofrece cobertura en el océano Índico. Estos pueden ofrecer a las estaciones de observación del nivel del mar una capacidad de transmisión de datos de alta frecuencia gracias al envío de datos a través de transmisores situados en diversos países al Centro de Control de Misiones de Alemania, que a su vez transfiere los datos a otros usuarios a través de EUMETCast, Direct Dissemination (para el satélite situado a 0°), Internet y el SMT. Entre los principales usuarios de esta red en el marco de la comunidad de observación del nivel del mar,

el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina (SHOM) de Francia cuenta con una amplia experiencia en relación con las estaciones de registro del nivel del mar situadas en Francia, el océano Índico y el Caribe.

Los satélites METEOSAT son compatibles con dos tipos de plataformas de recogida de datos. Una plataforma de recogida de datos estándar transfiere datos a 100 baudios, de modo que puede transmitir 649 bytes de datos de la plataforma en 60 segundos (incluida una portadora no modulada de 5 segundos, el preámbulo, el código de sincronización y la dirección) con una precisión temporal superior a +/- 15 segundos. Una plataforma de recogida de datos de alta velocidad transmite a 1200 baudios y puede transmitir 653 bytes de datos en 10 segundos. Aumenta la precisión temporal a +/- 0,5 segundos. La extensión mínima de transmisión para una plataforma de recogida de datos de alta velocidad es de franjas horarias de 15 segundos y, debido a limitaciones técnicas, la franja horaria máxima de transmisión es de 60 segundos. En la actualidad, ya existen plataformas de recogida de datos de alta velocidad en funcionamiento: un fabricante ha obtenido la certificación pertinente para un transmisor de este tipo de plataformas y se prevé que otros la consigan en un futuro próximo. En EUMETSAT (2013) puede encontrarse información técnica de estos dos tipos de plataformas de recogida de datos. En ambos casos, la arquitectura de la red puede generar un retraso entre la transmisión de datos de una plataforma y la

transferencia a través del SMT que puede alcanzar los 10 minutos (**figura 7.2**). Este retraso de 10 minutos es el máximo que puede producirse en el sistema, pero, en la práctica, los retrasos son mucho menores. No obstante, cualquier retraso que se experimente en la red del SMT escapan al control de la EUMETSAT.

La introducción de las plataformas de alta velocidad permiten unas mayores velocidades de transmisión y unos marcos temporales de transmisión más reducidos, de modo que aumenta la flexibilidad y la fiabilidad para los usuarios del Sistema de Recogida de Datos del EUMETSAT. Una plataforma de recogida de datos de alta velocidad utiliza una técnica de corrección de errores sin canal de retorno que ofrece una inmunidad al ruido mucho mayor y una presentación de datos más sólida, aumentando de este modo la eficacia general del Sistema de Recogida de Datos y sus aplicaciones. Ha aumentado el tamaño máximo de los mensajes, que pueden ser de hasta 7343 bytes (dentro de una asignación de franjas horarias de transmisión de 60 segundos). Gracias al gran tamaño de los bloques de códigos de las plataformas de alta velocidad, así como a la posibilidad de comprimir los mensajes, pueden enviarse dos o más mensajes del Sistema de Recogida de Datos “estándar” por transmisión (p. ej., actual y anterior), de forma que se reduce en gran medida la necesidad de volver a transferir los datos de forma específica a efectos de fiabilidad. Las plataformas de reunión de datos de alta velocidad también son compatibles con los datos binarios, una mejora del Sistema de Recogida de Datos estándar.

Los posibles futuros usuarios del sistema deberán cumplir con la política de datos de la EUMETSAT (<http://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/LegalInformation/BasicDocuments/index.html>). Los usuarios pueden solicitar la asignación de un canal para METEOSAT a través de un procedimiento similar al del sistema GOES, eligiendo entre tres clases de transmisión: autoprogramada en intervalos regulares, un modo de alerta basado en un valor predefinido para un parámetro que no debe superarse, o una combinación de ambos tipos.

En el caso de las plataformas de recogida de datos de alta velocidad, el intervalo estándar de presentación de datos es de una vez cada hora, pero se analizarán caso por caso las propuestas de solicitudes en las que se demande una mayor frecuencia, siempre y cuando se apoyen en una justificación válida. Por ejemplo, en la actualidad, Francia y Omán utilizan transmisiones cada 6 minutos para

aplicaciones con mareógrafos. Con esta presentación de datos de alta frecuencia, el Sistema de Recogida de Datos de METEOSAT constituye una alternativa a sistemas como la BGAN o IRIDIUM, si bien no se contaría con una presentación de datos bidireccional.

Una vez aceptada la solicitud por parte de la EUMETSAT, a los usuarios se les asignan los siguientes parámetros, que deben programarse en los transmisores:

- Dirección de la plataforma de recogida de datos: 8 caracteres hexadecimales para la identificación de la plataforma.
- Nombre de la plataforma de recogida de datos: a elección del usuario, por lo general es el nombre de la ubicación de la plataforma.
- Frecuencia del canal: a una plataforma de recogida de datos se le asigna uno de los canales operativos del rango de frecuencia de METEOSAT indicado en EUMETSAT (2013).
- Número del canal: número correspondiente a la frecuencia asignada. Dado que la numeración de EUMETSAT ha cambiado recientemente, debe prestarse atención a la hora de programar un radiotransmisor que suele utilizar el antiguo formato de numeración. Los fabricantes de plataformas de recogida de datos son plenamente conscientes del cambio de numeración de los canales.
- Franjas horarias asignadas a la plataforma de recogida de datos: hora a la que transmitirá datos la plataforma (todas las plataformas tienen un reloj interno de precisión combinado con sincronización de GPS).

○ MTSAT

(<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/>)

El sistema de satélites meteorológicos (MTSAT) presta servicios meteorológicos y de transmisión de datos similares a GOES y METEOSAT, pero está situado sobre el Pacífico, de modo que, junto a dichos sistemas, ofrece una cobertura mundial (menos en los polos). Desde 1978, la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) ha gestionado satélites meteorológicos geoestacionarios que generan datos que contribuyen a evitar y mitigar los desastres relacionados con fenómenos meteorológicos sobre la base de la monitorización de tifones y otras condiciones atmosféricas en la región de Asia-Oceanía.

Hasta hace poco, el satélite que estaba en funcionamiento era el MTSAT-2, a 145 °E. Sin embargo, en octubre de 2014,

Mapa de cobertura de la BGAN

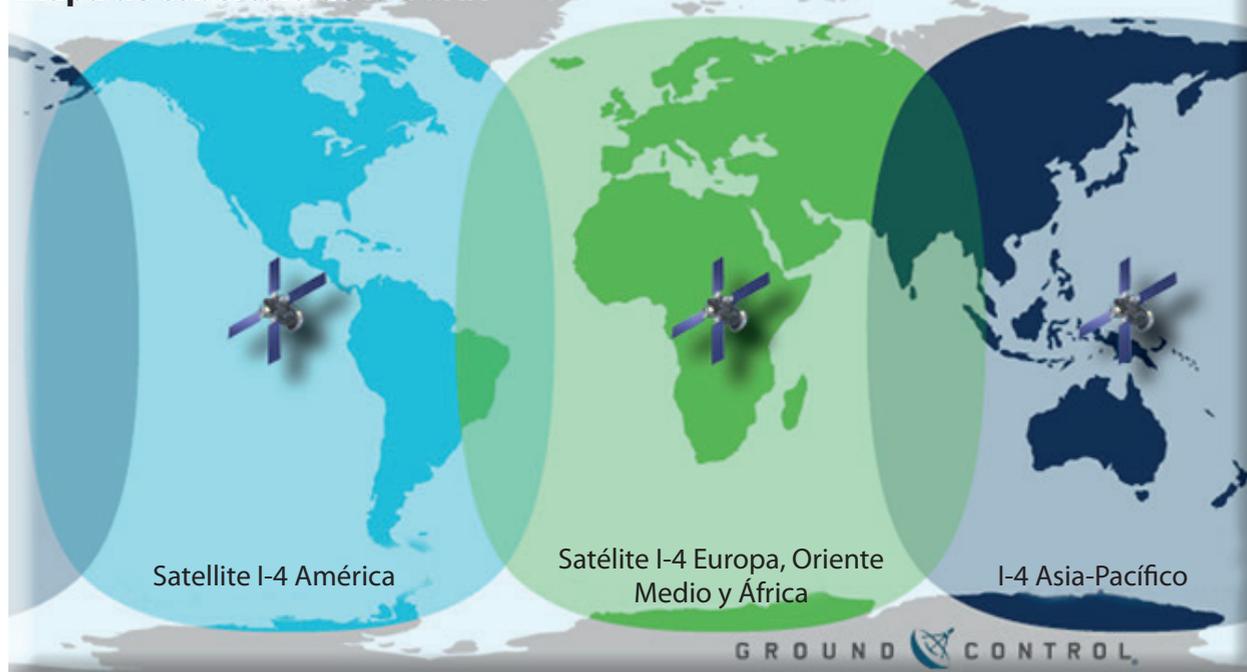


Figura 7.3 Esquema de la cobertura de la BGAN de INMARSAT.

la JMA lanzó el Himawari-8, su satélite meteorológico geostacionario de última generación, que comenzó a funcionar en julio de 2015 y sustituyó al MTSAT-2 (**figura 7.1**). En 2016 se lanzará el Himawari-9 como satélite de apoyo y sucesor. Ambos satélites se ubicarán aproximadamente a 140 °E y observarán las regiones de Asia Oriental y el Pacífico Occidental durante un período de 15 años. La página web de los Himawari-8/9 de la JMA es <http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/index.html>. Dentro de la comunidad de observación del nivel del mar, el UHSLC y el SHOM tienen experiencia en la gestión de plataformas de recogida de datos en el Pacífico utilizando MTSAT y/o GOES.

○ BGAN de INMARSAT

(<http://www.inmarsat.com>)

El sistema de la BGAN (Red de Área Mundial de Banda Ancha) de banda L de INMARSAT ofrece un equivalente basado en el uso de satélites a los módems terrestres de banda ancha. Comparte la mayor parte de las ventajas y desventajas del ancho de banda convencional, pero puede funcionar en zonas remotas y está optimizado para posibilitar una actividad de baja potencia. La mayor ventaja de la BGAN frente a la banda ancha de línea fija es su independencia de la infraestructura telefónica local, gracias a la cual hay muchas probabilidades de que siga funcionando en condiciones extremas.

A diferencia de los tres sistemas de satélites anteriores, gestionados por gobiernos u organismos públicos, INMARSAT está gestionado por una empresa privada que ofrece cobertura mundial, excepto para las latitudes de más de 75°, con el uso de tres satélites de órbita geostacionaria (**figura 7.3**).

El modo de funcionamiento normal de INMARSAT consiste en la transmisión de datos desde un emplazamiento a una estación terrestre remota que después envía los datos al usuario final. Para este sencillo esquema se necesita un enlace final con el usuario que puede estar basado en el SMT o en Internet, como se muestra en la **figura 7.4a**. Esta red resulta bastante adecuada para la mayor parte de las aplicaciones científicas. Sin embargo, en situaciones de emergencia, en las que es posible que el funcionamiento del elemento terrestre de la **figura 7.4a** se vea interrumpido, podría ponerse en peligro la disponibilidad de los datos.

Una sesión de comunicación con el terminal de la BGAN estándar suele iniciarse de forma manual desde el emplazamiento remoto. Los nuevos terminales M2M (máquina a máquina) de la BGAN permiten mantener de forma continua las comunicaciones de datos en ambos sentidos, gracias a lo cual puede llevarse a cabo un control 24 horas y una monitorización de la estación remota. En cualquier caso, los datos pueden enviarse utilizando la IP estándar de la BGAN a una tasa de hasta 448 kb/s, con

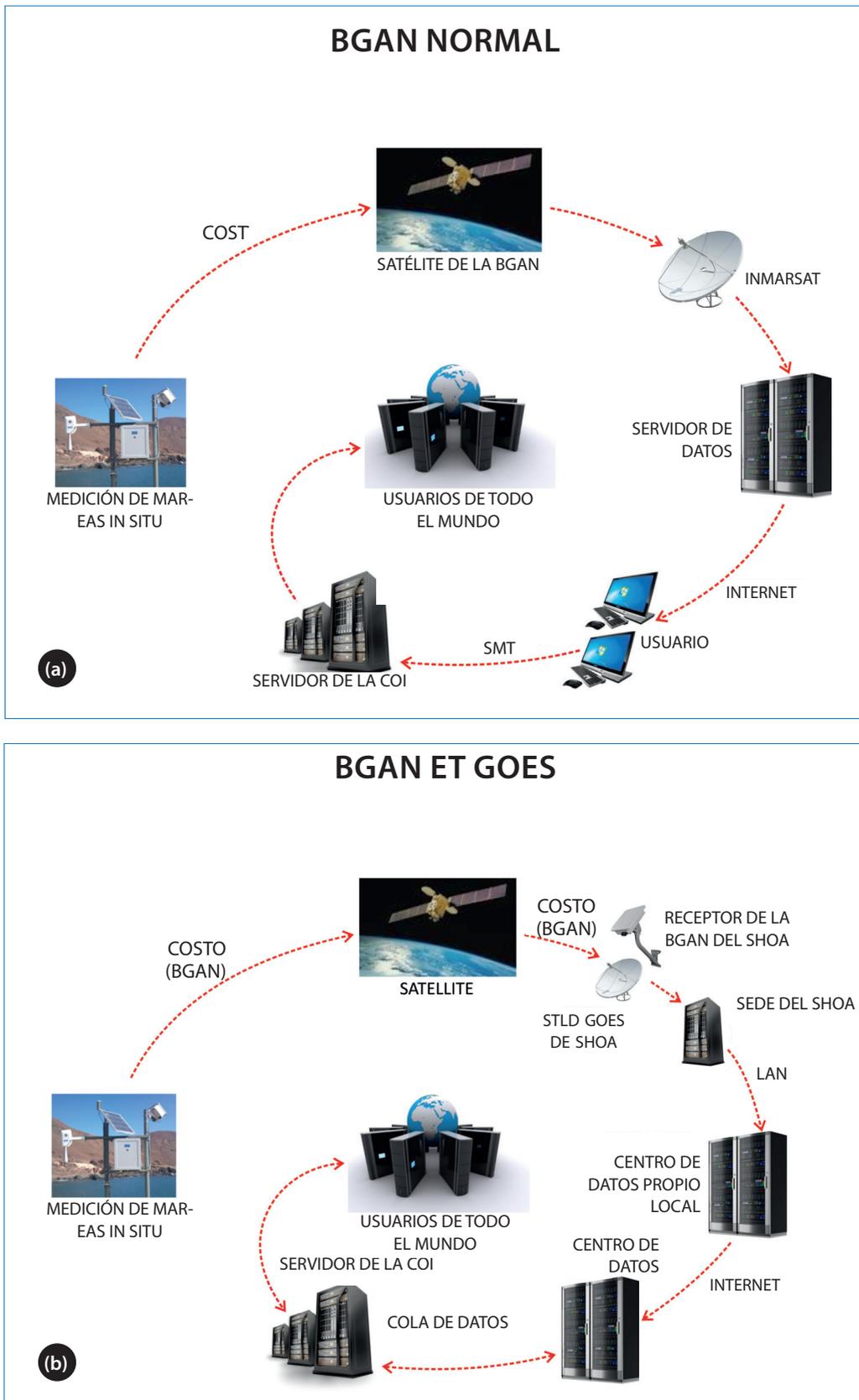


Figura 7.4

- (a) Ruta de datos del nivel del mar mediante la BGAN desde mareógrafos hasta centros de datos.
- (b) Recepción directa de datos de la BGAN de INMARSAT, implementada en el SHOA, junto con recepción de GOES (la recepción GPRS sigue una ruta similar). "COSTO" indica que puede existir un costo de transmisión.



Figura 7.5 Antena VSAT junto a un mareógrafo en Indonesia. Esta estación también está equipada con un medidor de radar OTT Kalesto y un receptor GPS. (Fotografía: Tilo Schöne, GFZ).

una baja latencia de 800 milisegundos, garantizando la recepción de datos fundamentales en tiempo real. INMARSAT ofrece varias alternativas, pero todas ellas se basan en el uso de comunicaciones terrestres para transferir datos al usuario final.

Por ejemplo, hoy en día el SHOA gestiona ocho estaciones de observación del nivel del mar que utilizan la BGAN como telemetría principal o secundaria. En estos casos, la antena receptora no está situada en la estación de recepción de INMARSAT, sino en la sede del SHOA. Este modo de funcionamiento, que se muestra en la **figura 7.4b**, garantiza que los datos de nivel del mar no se basan nunca únicamente en sistemas con enlaces de comunicaciones terrestres, de modo que se amplía la fiabilidad del sistema durante situaciones de emergencia. Los enlaces de transmisión dual implican duplicar los costos de transmisión. Sin embargo, el principio fundamental en que se basa el hecho de contar con una estación terrestre propia consiste en que el usuario debe recibir los datos lo más directamente posible, sin que exista la posibilidad de que se produzcan fallos en un enlace intermedio.

○ IRIDIUM

(<http://www.iridium.com>)

Se trata de un tipo de sistema similar al INMARSAT y que afirma proporcionar “cobertura en todo el mundo,

incluso en océanos, rutas aéreas y regiones polares”. Está compuesto por una “flota” de 66 satélites LEO que operan en una red completamente mallada. Se utiliza en una amplia gama de sectores comerciales, gubernamentales y sociales, y diseña y vende su propio equipo a través de una red mundial integrada por más de 100 socios. IRIDIUM ofrece de forma específica servicios de transmisión de datos mediante portátil y móvil en todo el mundo, incluso en áreas muy remotas. También está muy extendido el uso de servicios de datos mediante transmisores IRIDIUM específicos. Para la transmisión de datos mediante IRIDIUM suelen utilizarse los protocolos punto a punto (PPP) o de soluciones de conectividad digital ilimitada de interconexión de redes basada en routers (RUDICS).

La NOAA recurre a IRIDIUM en un número reducido de estaciones remotas, sobre todo en aquellas en que las transmisiones con GOES resultan imposibles o poco fiables, pero con más frecuencia para lograr una capacidad de comunicación bidireccional a fin de diagnosticar problemas. De este modo se evitan costosos traslados de mantenimiento y se reduce el tiempo de inactividad al mínimo. Sin embargo, a diferencia de GOES, el uso de IRIDIUM conlleva un costo, por lo que solo se utiliza en determinadas ocasiones. El UHSLC, entre otros usuarios, utiliza IRIDIUM para transmitir datos GNSS registrados en mareógrafos, pero no para transmitir los datos de los

propios mareógrafos. El Centro de Investigación Alemán de Geociencias (GFZ) ha utilizado IRIDIUM para transmitir datos de mareógrafos en Indonesia. Se ha informado de que las señales de IRIDIUM y GNSS pueden generar interferencias en determinadas circunstancias, por lo que debe comprobarse esta posibilidad en todas las instalaciones.

○ VSAT

VSAT (terminal de apertura muy pequeña) es una estación satelital terrestre bidireccional con una antena parabólica inferior a 3 m (1,6 m es lo habitual para trabajos con mareógrafos) que proporciona una comunicación bidireccional directa de alta velocidad entre una estación de observación y un centro de datos (véase https://es.wikipedia.org/wiki/Terminal_de_apertura_muy_peque%C3%B1a). La aplicación de VSAT en la red global de observación del nivel del mar ha sido limitada. Se instaló en dos estaciones de Indonesia (en cooperación con el GFZ de Potsdam), con el objetivo principal de transmitir datos de GPS, más que de mareógrafos (figura 7.5). Sin embargo, estas instalaciones de VSAT ya se han reemplazado por la BGAN. Survey of India ha creado una estación central con capacidades de VSAT en Dehradun con el fin de recibir datos de GPS y de mareógrafos en tiempo real desde sus estaciones de mareógrafos remotas.

○ ORBCOMM

(<http://www.orbcomm.com>)

La sección 5.3 del volumen 4 incluía un análisis de los sistemas de transmisión de datos por satélite que pudieron utilizarse para los datos de nivel del mar a partir de 2006. Según nuestra información, el único sistema, además de los antes mencionados, que se ha empleado para la transmisión de datos de nivel del mar desde entonces es el ORBCOMM, utilizado durante algunos años por el NOC (Reino Unido). El ORBCOMM consiste en un segmento espacial de satélites LEO con segmentos terrestres denominados estaciones terrestres de pasarelas o centros de control de pasarelas. Posibilitó las comunicaciones en TCR desde algunas zonas. Sin embargo, en otras áreas como África y el océano Índico, se produjo un retraso de varias horas mientras los datos se transferían a un PSI, por lo que fue preciso cambiar a otros métodos (p. ej., METEOSAT). Desconocemos la existencia de mediciones del nivel del mar que se transmitan con ORBCOMM, aunque esta sigue siendo una posibilidad.

○ INMARSAT Global Xpress

(<http://www.inmarsat.com/service/global-xpress>)

INMARSAT Global Xpress (GX) es una nueva red de satélites de banda ancha y alta velocidad similar en su funcionamiento a la BGAN, pero que opera en la banda Ka, lo que permite utilizar terminales de usuario más compactos. Ofrecerá velocidades de conexión de bajada y de subida de hasta 50 Mbit/s y de 5 Mbit/s respectivamente. La constelación GX se compone de tres satélites de comunicaciones móviles de banda ancha y alta velocidad que utilizan la banda Ka, cada uno de ellos con un período de funcionamiento previsto de 15 años. Tres satélites proporcionan la cobertura necesaria para los servicios GX en el ámbito mundial: el I-5 F1 para Europa, Oriente Medio, África y Asia; el I-5 F2 para América y la región del océano Atlántico, y el I-5 F3 para la región del océano Pacífico. Es posible que este nuevo servicio genere oportunidades futuras para llevar a cabo sesiones de diagnóstico e interacción “en tiempo real” con instrumentación de mareógrafos en ubicaciones remotas. Asimismo, debería permitir la recuperación de conjuntos de datos GNSS más grandes, así como de datos de sensores a largo plazo almacenados de forma remota.

La **tabla 7.1** resume la información sobre cada sistema satelital. Para obtener más información sobre los métodos de comunicación satelital en ciencias marinas, existen varios informes redactados para los grupos de trabajo de la COI y de la Comisión Técnica Mixta OMM/COI sobre Oceanografía y Meteorología Marina (CMOMM) que analizan y comparan los diversos sistemas disponibles (p. ej., Prior-Jones, 2011; Meldrum, 2013). Estos informes no publicados se pueden obtener dirigiéndose a la COI.

7.3.2 Sistemas terrestres

Los sistemas terrestres ofrecen la ventaja de proporcionar un intervalo de transmisión adaptado a las necesidades del usuario. Los costos de transmisión suelen ser fijos y más reducidos que los de las redes satelitales. Además, los componentes necesarios para aplicar esta tecnología son menos sofisticados y se pueden obtener con facilidad a través de proveedores locales de servicios.

No obstante, todos estos sistemas dependen en gran medida de la infraestructura terrestre para la transmisión al usuario, la cual puede verse interrumpida en situaciones de emergencia. Por tanto, esta clase de telemetría resulta inadecuada como sistema de telemetría principal para organismos de respuesta a situaciones de emergencia.

Tabla 7.1

Sistemas de transmisión de datos por satélite mencionados en la sección 7.3.1. Para obtener información sobre sistemas utilizados para otros datos marinos (p. ej., Inmarsat C y D+, Globalstar, etc.), véase Meldrum (2013). Los sistemas aparecen enumerados en el orden ascendente aproximado de ancho de banda. La latencia indica el retardo probable de los datos en llegar al centro de datos. "Unidireccional" hace saber que los datos solo fluyen desde el mareógrafo hasta el centro de datos y que el usuario no puede interactuar con el mareógrafo. "Bidireccional" manifiesta que el usuario también puede comunicarse con el registrador de datos del mareógrafo. Los costos son orientativos y se indican en dólares estadounidenses. El punto de extremo indica el mecanismo a través del cual se entregan los datos al usuario. El GPRS figura al final de la tabla para la comparación con los sistemas por satélite.

Sistema	Aplicación básica	Tipo de órbita	Ancho de banda	Latencia	Uni- o bidireccional	Costos de equipo	Costos de datos recurrentes	Punto de extremo
ARGOS	Mensajería	LEO	< 5 kbyte/día	Varias horas	1	1500 para baliza	200 de suscripción anual + 1000 de costo de transmisión anual	Usuario accede al servidor de ARGOS
GOES, METEOSAT, MTSAT	Mensajería	GEO	< 5 kbyte/día	Varios minutos	1	3700 para plataforma de recogida de datos, antena, montajes, etc.	Gratis para programas de la OMM	SMT
ORBCOMM	Mensajería	LEO	< 50 kbyte/día	Varias horas	2	200-300 para terminales de módem	60 al mes	Servidor de correo electrónico
IRIDIUM	Voz, pero los módems de datos solo son adecuados para acceder a datos sobre el nivel del mar	Gran LE ⁰¹	1 Mbyte/h	Casi cero	2	2000 para módem y antena	22 al mes + 1,2 cada minuto en modo de solo datos	Módem del usuario
BGAN DE INMARSAT	Ancho de banda	GEO	492 kbit/s	Casi cero	2	1000 para antena	En función del contrato	Internet
VSAT	Ancho de banda	GEO	De 4 kbit/s a 16 Mbit/s	Casi cero	2	3000 para enrutador, antena y cables	Tasas variables en función de volumen de datos	Internet
Global Xpress de INMARSAT	Ancho de banda	GEO	50 Mbit/s de descarga y 5 Mbit/s de carga	Casi cero	2	Por confirmar	Por confirmar	Internet
GPRS	Mensajería	-	56-114 kbit/s	Segundos	2	350 para equipo portátil y módem	Comparable con tarifas móviles de cada país	Internet

13 Los sistemas LEO pueden dividirse en Gran LEO y Pequeño LEO. Los sistemas Pequeño LEO utilizan satélites pequeños que ofrecen datos móviles y servicios de mensajería. Se utilizan para recopilación de datos, facsímil electrónico, radiobúsqueda bidireccional y correo electrónico. Los sistemas Gran LEO utilizan satélites de mayor tamaño que proporcionan algunos o todos estos servicios, junto con voz en tiempo real.



Figura 7.6 Una antena de radiotransmisión local compacta en Antofagasta, Chile. (Fotografía: SHOA).

Radio y wifi

La tecnología de radio de visibilidad directa constituye un enfoque económico de telemetría de datos de nivel del mar entre dos puntos con una clara línea de mira entre ambos, pero no es apto para ubicaciones más distantes debido a las necesidades energéticas. Estos sistemas funcionan en bandas no comerciales, de servicio y de aviación en el espectro HF/VHF/UHF, por lo general de 27 MHz a 915 MHz. Otros sistemas disponibles, como el wifi, Bluetooth y ZigBee, permiten conectar dispositivos electrónicos a una red local y funcionan en las bandas de 2,4 GHz y 5 GHz, aunque es posible que solo sean compatibles con registradores de datos más sofisticados. Estas técnicas pueden resultar útiles si el usuario final está ubicado cerca del mareógrafo. Sin embargo, si el usuario se encuentra lejos, se necesitará algún tipo de telemetría adicional, lo que anula la ventaja que supone en un principio utilizar la tecnología de radio de visibilidad directa o el wifi. En zonas pobladas, el uso de esta tecnología debe hacer frente a limitaciones adicionales debidas a la obstrucción de la línea de mira y a la sobreocupación del espectro de radiofrecuencia, lo que puede causar interferencias en la transmisión. La **figura 7.6** muestra una antena de radio compacta en Antofagasta (Chile).

Internet

Se ha producido un gran aumento en el uso de servicios de banda ancha en todo el mundo, incluso en islas remotas como las de la red del NOC en el Atlántico Sur. Todas estas islas, con la excepción de Tristán de Acuña, disponen de líneas arrendadas que ofrecen acceso a Internet continuo y de alta velocidad. El NOC ha desarrollado instrumentación capaz de captar las señales de salida de una serie de sensores, entre ellos los de radar y los de presión. Los datos se recogen mediante un pequeño procesador con Linux incrustado y se reenvían a la base por correo electrónico o mediante protocolo de copia segura (SCP). En diversos emplazamientos, se han utilizado estaciones de prueba con banda ancha que utilizan un sensor de radar conectado a un sistema con Linux incrustado (Holgate et al., 2008).

Los 39 mareógrafos de la red REDMAR, del ente público Puertos del Estado de España, utilizan un sistema similar que facilita valores cada minuto en forma de mensaje de correo electrónico. Esta red se basa en sensores de radar y sus datos se publican en la página web de Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>), en el SLMF de la COI y en otros portales de datos europeos.

Las ventajas de la tecnología de Internet de banda ancha son:

- Conexión bidireccional continua que permite una toma de datos de alta velocidad y una recuperación de datos en tiempo cuasi real. Hace posible el diagnóstico remoto de mareógrafos, ya que tiene la capacidad de reprogramar el sistema a distancia.
- Los errores de desviación temporal y de configuración del operador se eliminan al disponer de una hora precisa mediante los servidores de protocolo de hora en red (NTP) de Internet.
- Los costos de la transferencia de datos se conocen por adelantado, ya que las suscripciones se abonan mensual o anualmente.
- La recogida de datos en tiempo real permite identificar y subsanar disfunciones con mayor rapidez.
- Los sistemas de banda ancha de línea fija también permiten un acceso de seguridad a través de un módem telefónico.

Las desventajas de la tecnología de banda ancha son:

- Se precisa una conexión de red de área local (LAN), que suele ser difícil de incorporar a los sistemas de mareógrafos existentes. Se necesita una línea terrestre para sistemas de banda ancha no satelitales.
- Los registradores de datos menos sofisticados suelen carecer de un puerto de conexión LAN, por lo que resulta más complicado conectar los datos.
- Las necesidades energéticas de los módems de banda ancha son bastante elevadas (~1 A), lo que puede generar problemas en el caso de sistemas alimentados únicamente mediante energía solar.

GPRS

Una de las opciones de telemetría más extendidas en áreas pobladas consiste en los módems GPRS de baja potencia que emplean parte de la banda utilizada por los teléfonos móviles para conectarse a Internet. Los datos se pueden enviar a una IP o dominio específicos, y los costos de transmisión suelen ser fijos y no dependen del volumen de datos remitidos. Esta opción de telemetría depende del Internet terrestre para que los usuarios finales reciban los datos, a menos que la red de GPRS sea compatible con IP estáticas para que un módem GPRS pueda funcionar como antena receptora.

A modo de ejemplo, el SHOA gestiona en la actualidad 37 estaciones de observación del nivel del mar que utilizan GPRS como método secundario de telemetría y, durante terremotos que han provocado interrupciones en la comunicación de teléfonos móviles, dicha tecnología ha funcionado bien. Hay muchas más estaciones que funcionan con GPRS en otros países (p. ej., en Indonesia, para las alertas de tsunami). Una vez las empresas telefónicas han transmitido los datos a través de Internet, estos se pueden compartir con el resto de la comunidad mediante centros de datos ubicados en países extranjeros, lo que permite continuar las operaciones en el supuesto de que un centro de datos local sufra daños. Esta redundancia de datos sigue una ruta similar a la de los datos de la BGAN y GOES, tal como se aprecia en la **figura 7.4b**. La red española REDMAR también ha adoptado el uso de GPRS en la mayoría de sus estaciones.

7.4 Telemetría de difusión (el SMT)

Es preciso distinguir entre telemetría de transmisión de datos del mareógrafo al usuario, para la que se han descrito diversos métodos, y la telemetría de difusión empleada para compartir dichos datos con el resto de la comunidad. El Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT) es el método más habitual para compartir los datos. Se define como un sistema global coordinado de instalaciones y mecanismos de telecomunicaciones para recoger, intercambiar y distribuir con rapidez observaciones e información procesada en el marco de la Monitorización Meteorológica Mundial. Se puede considerar un "Internet especializado para aplicaciones meteorológicas" y es responsabilidad de la OMM (<http://public.wmo.int/en/programmes/global-telecommunication-system>).

A título de ejemplo, podemos analizar un mareógrafo equipado con una plataforma de recogida de datos que transmite datos a un satélite METEOSAT. Los mensajes de la plataforma de recogida de datos se retransmiten desde el satélite, se reciben en una estación terrestre y se transfieren de inmediato al Centro de Control de Misiones de la Organización Europea de Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) en Darmstadt (Alemania). En el Centro de Control de Misiones, los mensajes se procesan y se distribuyen a los usuarios, y se envían a la interfaz del Centro Regional de Telecomunicaciones (CRT) del SMT en Offenbach (Alemania). A continuación, los datos se difunden en el SMT a modo de boletines

que puede recibir cualquier organización registrada, como los centros de alerta de tsunamis y las oficinas meteorológicas nacionales.

Otros sistemas de recogida de datos similares a los de EUMETSAT son gestionados por la NOAA, el JMA, la Administración Meteorológica de China, la Organización de Investigación Espacial de la India y el Roshydromet (Rusia). De modo similar al de las transmisiones a través de METEOSAT antes descritas, los usuarios del sistema GOES que no gestionen su propia estación terrestre de lectura directa podrán recurrir al SMT para recibir los datos de la NOAA. En este caso, la Estación de Comando y Adquisición de Datos de Wallops (WCDAS) recibe, mantiene y distribuye un flujo continuo de datos de satélites meteorológicos mediante varias redes de comunicaciones. La WCDAS inserta datos directamente al SMT para su distribución a usuarios de todo el mundo.

Es importante señalar que los datos de mareógrafos no han de transmitirse necesariamente a través de un satélite para ponerse a disposición del SMT, sino que se pueden enviar empleando cualquier método (p. ej., telefonía estándar) a un servicio meteorológico nacional, el cual transferirá los datos al SMT. El SLMF de la COI ofrece en la actualidad datos a más de 785 estaciones de observación del nivel del mar en todo el mundo, muchas de las cuales utilizan el SMT como red principal para la difusión de datos. Un gran número de estaciones (en especial en ubicaciones del Japón, Australia y el Territorio Antártico Francés) utiliza un servicio meteorológico en lugar de un método de plataforma de recogida de datos satelital. Si se emplea un método de telemetría de datos del mareógrafo no estándar, se deberán acordar mecanismos de transmisión especiales con las organizaciones meteorológicas nacionales.

Para que se puedan enviar datos de plataformas de recogida de datos a través del SMT, los mensajes deberán respetar los formatos, las estructuras y los procedimientos establecidos por la OMM. En un boletín del SMT se presenta un conjunto de información que se describe en el anexo 3, tomado de Poffa (2014).

El CREX (clave de caracteres para la representación y el intercambio de datos meteorológicos) es un código determinado por tablas y aprobado por la OMM para representar e intercambiar datos de observación. El que sea un código determinado por tablas implica que la forma y el contenido de los datos incluidos en el mensaje se describen en el propio mensaje. Es posible consultar una descripción formal del código y un listado exhaustivo

de tablas asociadas en documentos accesibles desde la página web de la OMM. Se remite al lector también a BOM (2006) y NOAA (2013b), donde se describen con precisión los descriptores CREX para datos sobre mareas y se proporcionan ejemplos de mensajes. En el anexo 3 se incluye un ejemplo de mensaje CREX generado por una plataforma de recogida de datos.

7.5 Plataformas de recogida de datos y otros equipos de telemetría

Plataformas de recogida de datos

Para transmitir datos a través de la mayoría de sistemas satelitales antes descritos, se necesita una plataforma de recogida de datos. Las plataformas de recogida de datos consisten en un radiotransmisor y en una antena adecuada, y están conectadas con el registrador de datos del mareógrafo y los sensores ambientales, entre ellos los mareógrafos, mediante conectores seriales que utilizan un formato de datos binario, ASCII o pseudobinario. Un receptor de GPS aportará precisión temporal al registrador de datos y a la plataforma de recogida de datos, pero el sistema deberá permitir el funcionamiento durante hasta un mes sin sincronización de tiempo GPS. El transmisor de la plataforma de recogida de datos deberá ser un instrumento resistente con una salida de RF para la antena transmisora (**figura 7.7**).

Las plataformas de recogida de datos deberán realizar operaciones imprevistas con frecuencia en lugares remotos sin suministro de alimentación. En aquellos lugares en los que se emiten alertas de tsunami se pueden emplear sensores, tales como medidores de radar que transmitan datos a alta frecuencia. En dichos supuestos, según se ha explicado, será necesario emplear una plataforma de recogida de datos con bajo consumo de energía.

Una estación de mareógrafos se puede considerar una conexión con uno o más sensores del nivel del mar, sensores auxiliares, bitácoras de datos y dispositivos de telemetría, tales como una plataforma de recogida de datos. Precisaré un suministro energético fiable que pueda abastecer a todos los componentes. Es posible que haya otros dispositivos de telemetría además de la plataforma de recogida de datos, como antenas UHF/VHF o módems GSM/GPRS. Puede haber, asimismo, dispositivos GNSS. Según el fabricante seleccionado para cada uno de estos componentes, resultará más sencillo (o no) montarlos en conjunto.

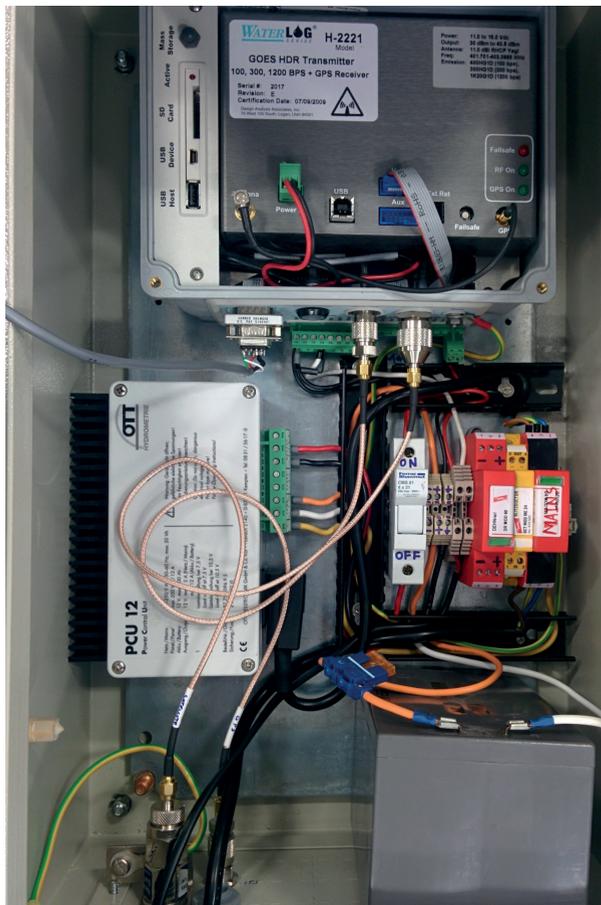


Figura 7.7 Interior del armario con los sistemas electrónicos de un mareógrafo. En la parte superior, se encuentra un transmisor de datos de alta velocidad de GOES de Waterlog, mientras que, en la parte inferior, se aprecian un suministro de energía y una batería auxiliar. El registrador de datos está ubicado detrás del transmisor. (Fotografía: NOC).

El registrador de datos y la plataforma de recogida de datos deben seleccionarse para que puedan conectarse de inmediato entre ellas y con los diversos sensores mediante cables y conectores adecuados que permitan una integración rápida y sin incidencias. Por lo general, los fabricantes suministran software para gestionar el sistema y establecer la configuración con la que se llevan a cabo las mediciones de los sensores, el procesamiento estadístico, y el registro y la transmisión de datos. Algunos registradores de datos solo pueden conectarse con determinadas plataformas, mientras que otras son compatibles con múltiples registradores y opciones de telemetría. Este aspecto reviste una gran importancia en aquellos casos en que es preciso incluir múltiples métodos de telemetría a fin de reforzar la resiliencia de la estación en situaciones de emergencia. Por tanto, lo ideal es que el registrador de datos y la plataforma de recogida de datos se puedan conectar con prácticamente todas las clases de telemetría y sensores. Los mejores registradores de datos disponen de suficientes puertos para permitir



Figura 7.8 Antena Yagi de GOES. El pequeño hemisferio ubicado en la parte superior del poste de soporte es una antena GPS para el control del tiempo. (Fotografía: NOC).

conexiones RS-232, RS-485 y SDI-12. Además, se pueden establecer conexiones con una red LAN utilizando dispositivos de Ethernet, mientras que otras opciones de telemetría incluyen dispositivos inalámbricos, de telefonía fija y satelitales.

Según las características del emplazamiento, la mayoría de los componentes de la estación, entre ellos la plataforma de recogida de datos, se puede montar sobre estructuras de soporte instaladas en el exterior, con los principales componentes electrónicos instalados en cabinas que cumplan determinadas normas de protección frente a las inclemencias y a otros agentes ambientales. Sin embargo, resulta más habitual encontrar estaciones de observación del nivel del mar en lugares donde los elementos del sistema de suministro de alimentación, del registrador de datos y de otros componentes electrónicos se monten en el interior de un centro de mareógrafos, con las antenas, paneles solares y sensores hidrológico-meteorológicos en el exterior.



Figura 7.9

(a) Terminal Thrane & Thrane Explorer 300 de la BGAN. (Fotografía: NOC).

Todo aquel que desee utilizar un sistema satelital para transmitir mensajes de la plataforma de recogida de datos deberá operar con un radiotransmisor de plataformas certificado. Algunos fabricantes suministran el transmisor satelital para un único sistema satelital. Sin embargo, también hay disponibles registradores de datos y transmisores satelitales que permiten al usuario emplear múltiples sistemas (GOES, METEOSAT, INSAT, SCD o ARGOS). Los transmisores con mayor tasa de baudios no solo ofrecen una transferencia de datos más rápida, sino que, además, permiten que un mayor número de usuarios transmitan datos a través de un mismo satélite.

Las antenas de las plataformas de recogida de datos pueden ser direccionales u omnidireccionales. Una de las más utilizadas en las estaciones de observación del nivel del mar es una antena direccional Yagi con una ganancia de 11,0 dB (figura 7.8). Esta clase de antena se debe alinear con el acimut y la inclinación adecuadas de modo que apunte hacia el satélite asignado. Por lo general, los fabricantes suministran la antena con un soporte

de mástil con perno en U y un cable para conectarla al transmisor. Según el modelo y la tasa de baudios empleada, la potencia de salida durante la transmisión variará entre los 5 W y los 12 W.

Terminales BGAN

El sistema de satélites de la BGAN de INMARSAT permite transmitir datos de mareógrafos a escala mundial. El sistema está en pleno funcionamiento y ofrece diversos servicios. Uno de ellos es la transmisión de datos y, si se trata de una plataforma de campo fijo, es necesario utilizar el terminal o la antena adecuada. Para ello, existen varios terminales de satélite pequeños y ligeros que ofrecen diversas opciones de funcionamiento para adaptarse a diferentes necesidades operacionales.

La mayor parte se compone de una única unidad con un transmisor-receptor y una antena integral de diseño compacto. El terminal es de fácil manejo, utiliza una interfaz Ethernet y sus botones de control y LCD permiten al usuario supervisar su funcionamiento. Como con



(b) Terminal similar de la BGAN ubicada en Taltal (Chile). La antena (otra T&T Explorer 300) se encuentra en la caja, en la esquina superior derecha de la imagen. (Fotografía: SHOA).

el resto de sistemas con satélites ubicados en la órbita geostacionaria, es necesario orientar la antena hacia el satélite INMARSAT adecuado.

El usuario accede al sistema mediante una tarjeta SIM compatible con 3G activada que se instala en el interior del terminal. Es necesario firmar un contrato con un proveedor de soluciones gestionadas de BGAN, que por lo general no solo presta el servicio, sino que también ofrece asistencia y optimiza la interfaz con la estación sobre el terreno.

Algunas antenas, como la Thrane & Thrane Explorer 300 (figura 7.9a y b), permiten al usuario enviar datos con una velocidad de hasta 384 kbps y recibirlos a 240 kbps, a través de un canal compartido y utilizando una IP estándar. Las pérdidas ocasionales de conexión con el satélite se pueden resolver mediante una intervención manual o reiniciando el sistema de forma periódica (p. ej., a diario).

El terminal Hughes 9502 M2M es otra solución integral para añadir comunicaciones IP en tiempo real a una estación remota. Incluye todo el equipo físico necesario

para comenzar a usarlo. Al igual que otros terminales, necesita un suministro de energía y un registrador o equipo periférico compatible con Ethernet. También requiere una antena direccional, un cable de antena, equipo físico de montaje y todos los cables necesarios para conectar el terminal con el registrador y el suministro de energía.

Las principales ventajas de utilizar el Hughes 9502 son una antena de mayor ganancia, con lo que se reduce la probabilidad de una pérdida de conexión con el satélite, y una comunicación bidireccional, que permite diagnósticos remotos y el reinicio por parte del usuario. Al utilizar este terminal, no se necesita ninguna intervención manual tras la pérdida de conexión con el satélite, ya que viene equipado con un dispositivo de monitorización de IP que garantiza que la red esté siempre conectada e incluye la activación automática/automática en función del contexto, que restablece de forma automática la energía y la conexión IP tras un fallo.

Por lo general, los datos transmitidos a través del sistema de satélites INMARSAT se reciben en una estación de

acceso terrestre y el proveedor del servicio los gestiona para transmitirlos posteriormente a los usuarios a través de Internet. No obstante, también es posible recibir los datos recogidos sobre el terreno directamente en las instalaciones del usuario, para lo que es necesario instalar un transmisor-receptor de antena BGAN local en el ordenador del usuario final (figura 7.4b). Esta última opción garantiza una comunicación estable con la estación de observación del nivel del mar, puesto que no depende de la recepción de datos en una estación terrestre BGAN/INMARSAT ni de la posterior transferencia de datos vía Internet al usuario final, que es la corriente de datos habitual adoptada por los usuarios de esta red. Sin embargo, esta estrategia duplica los costos de transmisión, ya que el usuario debe pagar por los datos que se envían al satélite, así como por los datos que se envían desde el satélite a la antena receptora final.

Módems celulares

Muchos registradores son compatibles con módems GSM/GPRS para proporcionar telemetría inalámbrica mediante una red móvil GSM/GPRS, y muchos otros cuentan con un módem GSM/GPRS/3G/4G incorporado. A menudo se pueden establecer interfaces con el sistema de mareógrafo de forma directa, puesto que se fabrican con interfaces industriales estándar y dispositivos de lectura de tarjeta SIM integrados. Es preferible elegir un terminal GSM con función GPRS (servicio general de paquetes de radio), para que al utilizarlo con el módem adecuado se puedan enviar los datos a través de Internet, mediante una conexión PCT/IP inalámbrica. Es recomendable optar por un módem homologado por los principales operadores para que se pueda utilizar en cualquier lugar. El equipo físico del mareógrafo requiere un bloque de terminales para posibilitar la conexión entre el módem y un suministro de energía y la antena. Como ejemplo, la Figura 7.10 muestra un Módem GPRS típico.

7.6 Requisitos para la transmisión de datos del GNSS

La utilización del GNSS en mareógrafos, tal y como se describe en el capítulo 6, exige para la transmisión de datos un ancho de banda mayor que el utilizado para los datos de los mareógrafos. La mayoría de los servicios del GNSS, como el IGS, el Grupo de Trabajo TIGA del IGS o los institutos cartográficos nacionales, procesan datos del GNSS obtenidos con un periodo de 30 s. Para las instalaciones muy remotas con comunicación a



Figura 7.10 Un módem GPRS típico utilizado en Chile.

baja velocidad de bits, se pueden recoger datos con un periodo de 120 s para obtener estimaciones de posición diarias, aunque no serán óptimas. Las instalaciones del GNSS más recientes con frecuencias de toma de datos de 1 Hz o superiores ofrecen una gama más amplia de aplicaciones, como es el caso de la reflectometría o la sismología del GNSS (sección 6.6).

En el caso de la aplicación estándar con periodo de 30 s, tras cierta reducción de parámetros innecesarios, el volumen de datos que se transmite es aproximadamente de 18 MB/mes, una cantidad que se puede ampliar a otros periodos de toma de datos (p. ej., 120 s) en caso necesario (esta afirmación es correcta para la utilización exclusiva de datos GPS, pero pueden necesitarse frecuencias más altas si se utiliza más de una técnica del GNSS). En dicho caso, es precisa una carga diaria o más frecuente de datos del GNSS, a ser posible como archivos RINEX, para dar soporte a la mayoría de aplicaciones. Para la toma de datos de 1 Hz, los volúmenes de datos se convierten en varios periodos de 10 s de MB/día.

En las zonas pobladas, el método más adecuado para la transmisión de datos es la conexión del receptor del GNSS a Internet. En determinadas ocasiones, se puede utilizar una conexión de radio de corto alcance o wifi como puente entre el mareógrafo y el punto de acceso a Internet más cercano. En ubicaciones sin soporte local, a menudo se utiliza GPRS para cargar datos y gestionar el receptor del GNSS. No obstante, también se pueden usar sistemas de comunicación por satélite, y las ubicaciones remotas pueden emplear BGAN, VSAT o IRIDIUM igual que para los datos de mareógrafos (aunque con tasas de transmisión de datos reducidas en el caso de estos últimos).

8. Datos sobre el nivel del mar

8.1 Centros de datos sobre el nivel del mar

Existen varios centros internacionales de datos sobre el nivel de mar. Desempeñan papeles diferentes a la hora de suministrar el conjunto global de datos sobre el nivel de mar (**tabla 8.1**). Sin embargo, cada centro trabaja en estrecha colaboración con el resto de centros, por lo que maximizan la cantidad y calidad de los datos que se pueden facilitar a científicos y otros usuarios interesados en el nivel del mar. El Plan de Ejecución del GLOSS de 2012 (COI, 2012) explica cómo cooperan los centros para la elaboración de un servicio web del GLOSS efectivo y centralizado que incluya todos los datos y metadatos sobre el nivel del mar.

No obstante, los centros no solo se dedican al programa del GLOSS. La mayor parte reciben, controlan la calidad, almacenan y redistribuyen los datos de mareógrafos que

pertenecen o no al GLOSS. En el contexto del presente manual, animamos a todos los operadores que han instalado estaciones mareográficas de radar fiables a que compartan sus datos con todos los centros de datos.

Podría decirse que existen tres tipos de datos ofrecidos por un mareógrafo y cada tipo se encuadra en uno de los centros que se describen a continuación:

- Datos en tiempo real o tiempo cuasi real (TR y TCR). Estos datos son necesarios para fines operacionales, como operaciones portuarias, alertas de inundación por oleajes de tormenta o identificación de tsunamis. No se exige un control de calidad (CC) riguroso, o es poco probable. En ocasiones, el personal experimentado supervisa dichos datos y es capaz de determinar si las anomalías existentes son reales o se deben a disfunciones de los instrumentos.
- Datos rápidos. Estos datos son necesarios en escalas temporales semanales, así que pueden

Tabla 8.1

Centros de datos sobre el nivel del mar

	Ubicación	Función	Datos Disponibilidad	Sitio web
Servicio de observación	SLMF COI	Diagramas y descargas de datos brutos	TCR	www.ioc-sealevelmonitoring.org
Modo rápido	UHSLC	CC preliminar de datos por productores	4-6 semanas	uhslc.soest.hawaii.edu
Modo diferido	BODC	Datos finales de alta frecuencia de productores	Anual	www.bodc.ac.uk
Productos de datos horarios	JASL/ UHSLC	Datos horarios finales con correcciones	Anual	uhslc.soest.hawaii.edu
Promedios mensuales	PSMSL	Promedios mensuales finales de productores	Anual	www.psmsl.org
Datos del GNSS	SONEL	Archivo de datos del GNSS cerca de mareógrafos	Diaria	www.sonel.org

Los sitios web anteriores contienen información de emplazamientos de todo el mundo. El sitio web del PSMSL también incluye una lista de un gran número de fuentes nacionales y regionales de datos sobre el nivel del mar en tiempo real y en modo diferido.

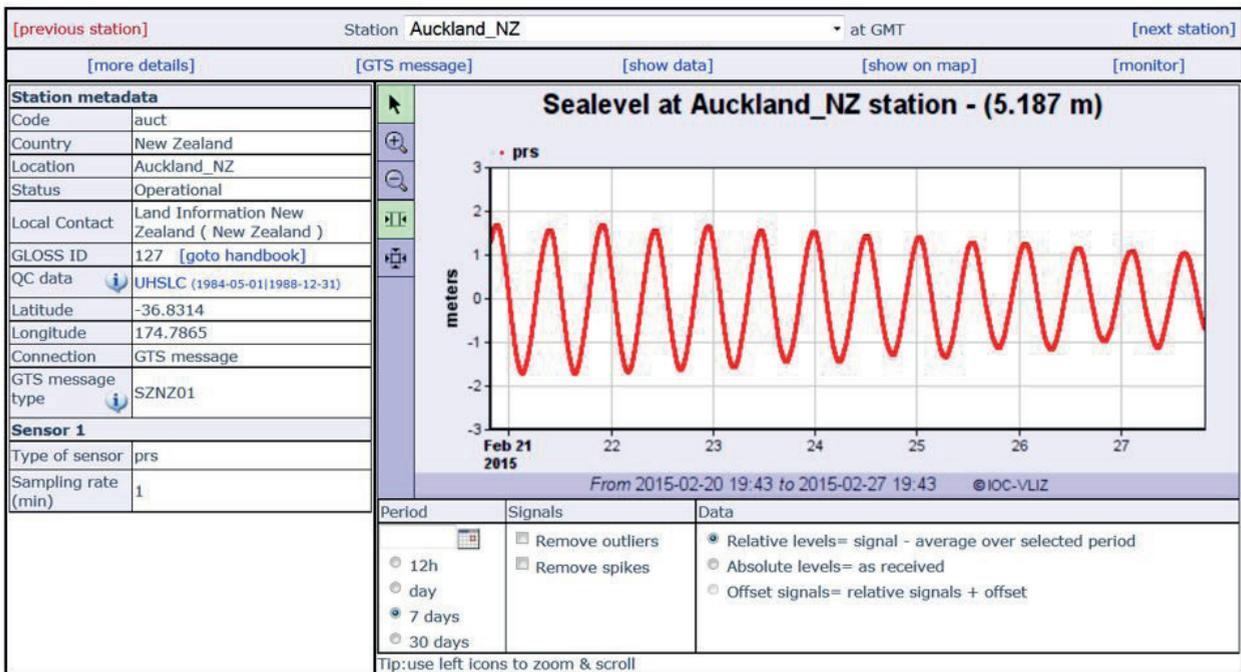


Figura 8.1 Ejemplo del estado operacional de una estación mareográfica facilitado por el Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI.

someterse a cierto CC. Los datos rápidos se utilizan para aplicaciones como la validación de datos de altímetros de satélites.

- Datos en modo diferido (datos MD). Estos datos se han revisado de manera minuciosa y se han marcado para mostrar al usuario si son fiables, sospechosos o no fiables. La aplicación principal de los datos MD es la investigación científica.

8.1.1 Servicio de Observación del Nivel del Mar de la COI (para datos TR y TCR)

El Instituto Marino de Flandes (VLIZ, Bélgica) da acogida al Servicio de Observación del Nivel del Mar basado en web (SMLF, <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>) de la COI, para la observación de datos sobre el nivel del mar recibidos en tiempo real procedentes de diversos operadores de estaciones mareográficas mediante el Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT) u otros canales de comunicación. Los operadores pueden evaluar con facilidad el estado operacional de cada estación mediante una inspección rápida del flujo de datos brutos (figura 8.1). Además, el SMLF comprueba cada semana el estado operacional de todas las

estaciones y se pone en contacto con los operadores de las estaciones si se detectan fallos. Se anima a todos los operadores de mareógrafos, asociados con el GLOSS o con otros programas de la COI, a que envíen sus datos al SMLF, incluso si llevan a cabo su propia monitorización en tiempo real (consulte la sección 8.2.1).

El SMLF también ofrece un servicio web para el acceso directo a datos. Sin embargo, los registros de datos brutos no se someten a ningún CC y por lo general no deberían utilizarse para fines científicos. El objetivo es que el Servicio trabaje con el Centro GLOSS de Datos de Alta Frecuencia correspondiente para garantizar que estos registros de alta frecuencia se incluyan en otra base de datos accesible que cuente con algún tipo de CC.

El Servicio también ha elaborado un sistema de catalogación que conecta con los diversos repositorios de metadatos de estaciones de observación del nivel del mar. Este es un paso importante hacia la creación del servicio web centralizado mencionado con anterioridad. Los sistemas de metadatos del PTWC, el UHSLC y el PSMSL/GLOSS Handbook ya están conectados, y el del TIGA lo estará próximamente (consulte más información sobre algunas de estas actividades a continuación).

8.1.2 Centro del GLOSS de Distribución Rápida de Datos (para datos rápidos)

El UHSLC (<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>) es el encargado de operar el Centro del GLOSS de Distribución Rápida de Datos y de recopilar y distribuir conjuntos de datos sobre el nivel del mar sometidos a CC preliminares por parte de los productores de datos. La “distribución rápida” supone suministrar los datos recibidos en un plazo de 4 a 6 semanas. El UHSLC ofrece servicios de CC de distribución rápida a aquellos Estados Miembros que no tienen capacidad para ello. Puede ver más información sobre los datos “rápidos” en la sección 8.2.1.

8.1.3 Centro del GLOSS de Datos en Modo Diferido (para datos MD)

El Centro Británico de Datos Oceanográficos (BOCD, <http://www.bodc.ac.uk>) opera el Centro del GLOSS de Datos en Modo Diferido en colaboración con el PSMSL. Tiene la responsabilidad de recopilar, controlar la calidad y distribuir las versiones “finales” de conjuntos de datos sobre el nivel del mar, así como incluir los metadatos, de estaciones del GLOSS. Está estructurado para ofrecer valores horarios (o subhorarios), junto con variables complementarias (p. ej., presión atmosférica), si están disponibles.

Cuando los datos subhorarios comprenden las mediciones brutas, es importante que el GLOSS los archive, en lugar de almacenar, por ejemplo, los valores horarios derivados. Los datos subhorarios también pueden ser valiosos para el análisis científico de procesos como tsunamis, meteotsunamis y seiches, que no se puede llevar a cabo con datos horarios. Aquellos operadores que proporcionan datos al Centro deben elaborar sus registros el año posterior al año de los datos y enviar metadatos completos (incluyendo información de cotas de referencia).

En colaboración con la COI y con ayuda del PSMSL, el BOCD desempeña un papel de coordinación esencial para el GLOSS, que incluye la producción del GLOSS Handbook, un conjunto de datos que contiene descripciones de cada estación mareográfica del GLOSS. El Handbook está disponible en el sitio web del GLOSS (<http://www.gloss->

sealevel.org), que mantiene el BODC, y proporciona una orientación para el programa del GLOSS.

8.1.4 Archivo Conjunto sobre el Nivel del Mar (para datos MD)

El Archivo Conjunto sobre el Nivel del Mar (JASL) se basa en una colaboración entre el UHSLC y el Centro Estadounidense de Datos Oceanográficos (NODC). El JASL adquiere conjuntos de datos horarios de mareógrafos de todo el mundo que pertenecen o no al GLOSS y que han sido sometidos a una evaluación de calidad por parte de sus productores. El JASL proporciona un análisis independiente de los datos, principalmente para identificar valores atípicos, problemas de tiempo o desplazamientos del dátum. Se informa a los productores de datos de cualquier problema de calidad relativo a los datos para poder ajustarlo. A continuación, el JASL reúne una única serie temporal horaria para cada estación, o una serie de subregistros si se producen cambios del dátum. Por lo tanto, el conjunto de datos del JASL representa un “producto de datos”, ya que no solo marca y registra los puntos de datos problemáticos, como es el caso del BODC para el Conjunto de Datos en Modo Diferido del GLOSS, sino que en efecto los cambia por los valores resultantes de la evaluación del JASL. Cualquier cambio se documenta en los metadatos.

8.1.5 Centro del GLOSS de Datos de Alta Frecuencia (para datos MD)

El Plan de Ejecución del GLOSS (2012) ha propuesto la creación de un Centro del GLOSS de Datos de Alta Frecuencia que esté estrechamente vinculado con los otros centros de datos del GLOSS. El Centro del GLOSS de Datos de Alta Frecuencia importará todos los conjuntos de datos de alta frecuencia que hayan sido sometidos a una evaluación de calidad por parte de su productor. Si bien su función estará centrada en las estaciones del GLOSS, se intentará que el centro incluya todos los conjuntos de datos de alta calidad que sean válidos para la investigación, en particular para los análisis de tsunamis y oleajes de tormenta.

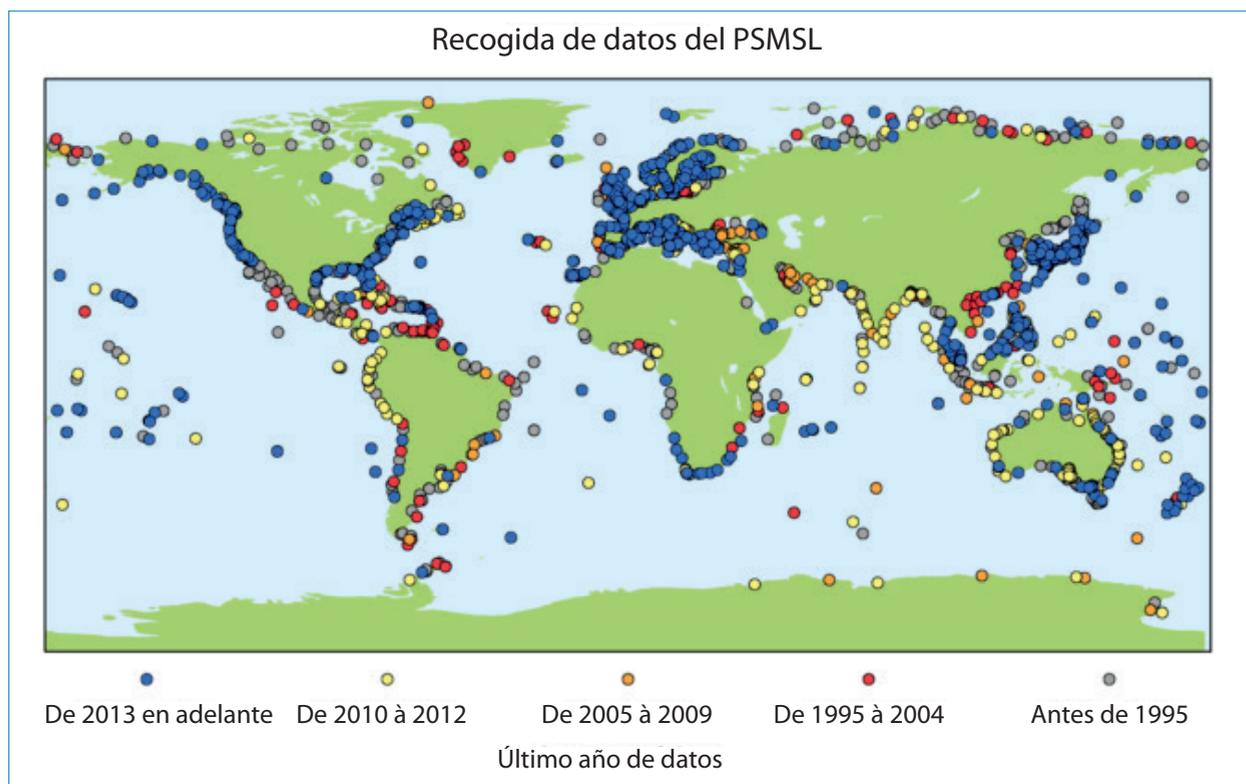


Figura 8.2 Estado de la recogida de datos del PSMSL (a fecha de 2015). Los puntos en color indican el último año de recepción de datos.

8.1.6 Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar (para datos MD)

Desde 1933, el Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar (PSMSL, <http://www.psmsl.org>, Holgate et al., 2013) ha sido responsable de recopilar, publicar, analizar e interpretar los datos sobre el nivel del mar procedentes de la red mundial de mareógrafos. Tiene su sede en el NOC de Liverpool, opera bajo los auspicios del Consejo Internacional de la Ciencia (ICSU) y forma parte del Sistema Mundial de Datos del ICSU. En el momento de la redacción del presente documento, la base de datos del PSMSL contiene 66.000 años de observación de valores medios mensuales y anuales del nivel del mar procedentes de aproximadamente 2.250 estaciones mareográficas de todo el mundo y enviados por más de 200 autoridades nacionales (**figura 8.2**). En un año promedio, se registran aproximadamente 1.500 años de observación en la base de datos. Muchos registros individuales del nivel del mar están vinculados con los de los movimientos verticales de la tierra recogidos en la misma estación mediante el GNSS y almacenados en el SONEL.

El conjunto de datos del PSMSL es la principal fuente de información sobre la variabilidad y cambio del nivel del mar (incluyendo la “elevación del nivel del mar”) y lo utilizan muchos científicos del nivel del mar que colaboran en investigaciones como las del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Históricamente, el PSMSL ha desempeñado un papel esencial en la organización de cursos de formación sobre el nivel del mar y en la provisión de materiales de formación.

8.1.7 GNSS en centros de datos de mareógrafos (para datos del GNSS)

El Grupo de Trabajo de Mareógrafos (TIGA) del IGS comprende centros de análisis, así como un centro específico para la recopilación de datos de mareógrafos del GNSS (Schöne et al., 2009). Este centro recibe el nombre de SONEL (Système d’Observation du Niveau des Eaux Littorales, <http://www.sonel.org>) y cuenta con el apoyo de la Universidad de La Rochelle y el Centro Nacional de Investigación Científica de Francia. El SONEL ofrece información sobre el estado de las estaciones del GNSS en o cerca de mareógrafos, mediante un servicio de

observación basado en web. Reúne, archiva y distribuye observaciones y metadatos del GNSS a los que se puede acceder a través del portalweb, así como mediante un servidor anónimo de protocolo de transferencia de archivos.

El TIGA y el SONEL trabajan con el PSMSL y otros centros para proporcionar productos de nivel del mar útiles y determinar las normas y formatos más apropiados para distribuirlos entre los expertos que estudian el nivel del mar. Una tarea importante es el mantenimiento de los registros de las campañas denivelación que vinculan la antena del GNSS con la cota de referencia del mareógrafo. Se anima a todos los operadores de mareógrafos, independientemente de si están o no asociados con el GLOSS, a que incluyan sus datos y metadatos del GNSS en el centro de datos SONEL.

8.2 Control de calidad de datos

Independientemente del flujo de datos, los datos de mareógrafos se registran por lo general de forma regular. Por ejemplo, las cartas náuticas en papel de mareógrafos de flotador y cilindro de amortiguación tradicionales solían digitalizarse en intervalos de una hora (o quizás 30 minutos, pero rara vez con más frecuencia). Habitualmente, un mareógrafo moderno proporciona datos con un periodo de muestreo de 1 o varios minutos. En determinadas ocasiones, es necesario corregir los tiempos de datos MD debido a la desviación del reloj del registrador, pero la recogida de datos sigue siendo regular. A veces, un registro presentará lagunas por causa de una disfunción del mareógrafo, fallos de telemetría, picos resultantes de lecturas falsas o desplazamientos del dátum debido a un cambio del cero de referencia efectivo del mareógrafo.

8.2.1 Control de calidad en tiempo real

En los últimos años, se ha hecho especial énfasis en conseguir que tantos mareógrafos como sea posible suministren datos TR y TCR, es decir, generalmente, en menos de una hora. Esto se debe a varios motivos. En primer lugar, si un mareógrafo dispone de datos TR, los problemas del dispositivo se pueden identificar y reparar antes. En segundo lugar, los datos se ponen a disposición de muchas otras aplicaciones de la "oceanografía

operacional". Por ejemplo, dichos datos pueden ser de utilidad para servicios de alerta de inundación por oleajes de tormenta (Pugh y Woodworth, 2014) o se pueden incorporar a modelos operacionales de circulación en océanos profundos. Los datos TR o TCR sobre el nivel del mar pueden resultar útiles para la navegación costera si se envían los niveles a las embarcaciones junto con información meteorológica y de otros tipos a través de sistemas de ayudas a la navegación del sistema de identificación automática. Tal y como han demostrado varios tsunamis de magnitud considerable en los últimos años, los datos sobre el nivel del mar pueden ser importantes fuentes de información para los sistemas de alerta de tsunamis (Pérez et al., 2013).

Estos avances llevaron a la creación del SLMF de la COI descrito con anterioridad. El SLMF no somete los datos recibidos a un CC ni utiliza los datos en ninguna aplicación, tan solo ofrece un servicio de observación. Sin embargo, existen muchas agencias nacionales con sistemas operacionales que necesitan acceder a datos TR y TCR. En dichos casos, el sistema operacional debe ser lo suficientemente robusto como para no sufrir perturbaciones cuando se registran datos no fiables (p. ej., picos). Una manera de evitar los datos no fiables es que haya una supervisión humana continua del flujo de datos (p. ej., como sucede con el Servicio de Previsión de Marea de Tormenta del Reino Unido para las alertas de inundación). Sin embargo, varios grupos han desarrollado procedimientos y programas informáticos de control de calidad en tiempo real (Pouliquen et al., 2011, entre otros). Por ejemplo, el organismo español Puertos del Estado ha creado un paquete de programas informáticos de CC automático para la detección de picos, lagunas, etc. utilizando datos con un muestreo de 1 minuto, antes de que los datos se muestren al público y se incorporen en un sistema de predicción de oleajes de tormenta (Pérez et al., 2013). El paquete permite la detección y transmisión de alertas de tsunamis y seiches a las agencias responsables, incluyendo el sistema de alerta nacional de tsunamis.

El Sistema Integrado de Observación Oceánica (IOOS) de la NOAA también ha definido una serie de criterios para el CC de "niveles de agua" (es decir, de mar o de lago) en tiempo real. Propone un conjunto de 11 pruebas que los operadores pueden incorporar a las prácticas y procedimientos de CC de sus mediciones en tiempo real. Las pruebas vienen agrupadas como necesarias,

recomendadas y muy recomendadas. El IOSS (2014) describe los algoritmos para cada prueba y también proporciona breves revisiones de dátum y nivelación, indicadores de nivel de agua y sus aplicaciones y procesamiento de datos.

Los datos sobre el nivel del mar obtenidos en tiempo real que no requieren un CC muy estricto y son de utilidad para determinadas aplicaciones con escalas temporales cortas (p. ej., semanales) se llaman “datos rápidos”. Por lo general, el CC completo del procedimiento MD no es posible en dichas escalas temporales. A veces, ciertos registros pueden ser considerados “rápidos” durante un tiempo hasta que se pueda realizar el control de calidad de modo diferido (CCMD) o se pueda responder a preguntas relativas a los datos o metadatos (p. ej., información sobre dátums o tiempos). Tal y como se ha mencionado con anterioridad, el UHSLC mantiene un centro de datos rápidos desde el que los datos migran hasta el conjunto de datos de calidad de investigación/JASL del UHSLC.

8.2.2 Control de calidad de modo diferido

Los datos obtenidos de mareógrafos, tanto en tiempo real como recuperados en intervalos de meses o años desde registradores locales, se pasan normalmente a los centros de recopilación de datos nacionales para someterlos a un CCMD y archivarlos. (Puede consultar una lista de centros nacionales en http://www.psmsl.org/links/sea_level_contacts/). A continuación, se ajustan los datos teniendo en cuenta el offset del sensor y utilizando los metadatos mencionados en el capítulo 4. A su vez, estos datos se entregan a menudo a los centros internacionales descritos en la sección anterior, que los someten a un CC independiente.

Los principios generales del CCMD que llevan a cabo los diferentes centros se han descrito en volúmenes anteriores de este manual, en informes y libros (Parker, 2007; Pugh y Woodworth, 2014; Woodworth et al., 2015, entre otros) y con más detalle en un Manual de control de calidad de las observaciones del nivel del mar de la COI no publicado (COI, 2014). Podemos destacar dos avances: el primero es especialmente importante para los medidores de radar de este manual, y el segundo, para el CC de mareógrafos en general.

8.2.2.1 Utilización de datos con una frecuencia de 1 minuto en el CC de datos de mareas

Los medidores de radar pueden medir el nivel del mar cada minuto, o incluso con más frecuencia si fuera necesario, lo que es ideal para la medición de tsunamis, meteotsunamis, seiches y otros procesos del océano que tienen lugar en escalas temporales inferiores a una hora. Por lo general, dichos datos con velocidad de transmisión superior no están incluidos en los CC realizados por la mayoría de centros de datos relacionados con el GLOSS. Dichos centros se centran en el estudio de las mareas, los oleajes de tormenta y los cambios del nivel medio del mar, para el que es adecuado recoger datos cada hora (o preferentemente con valores con una frecuencia de 6, 10 o 15 minutos)

La COI (2014) examina los pasos necesarios en un CC para garantizar datos fiables para dichos fines. Los pasos principales implican un “análisis de la marea” que proporciona una diferenciación de los componentes del registro que dependen o no de las mareas (una estimación de las “constantes de la marea”). La inspección del componente que no se ve afectado por las mareas (o “residuo ajeno a las mareas”) es especialmente útil a la hora de identificar problemas de datos, como picos o desplazamientos del dátum. El componente del registro que depende de las mareas no se distinguirá de forma más precisa con una frecuencia de toma de datos de 1 minuto que con una de 15 minutos o una hora.

Recomendamos lo siguiente a los centros de datos y otros analistas que deban llevar a cabo un CC de datos con una frecuencia de 1 minuto:

- (1) Asegúrese de que los datos con frecuencia de 1 minuto se copian en un archivo de forma segura para que puedan volver a consultarse en caso necesario. Por ejemplo, pueden ser necesarios para estudios posteriores de uno o varios de los procesos de mayor frecuencia, o si los métodos de CC cambian.
- (2) Los datos de radar con una frecuencia de 1 minuto pueden presentar ruido, en especial durante períodos con olas altas, por lo que se deben inspeccionar las series temporales (mediante

diagramas o programas informáticos adecuados) para descartar valores atípicos. Por ejemplo, se podría llevar a cabo mediante el descarte de mediciones de 1 minuto que son valores atípicos de 3 sigma en un marco temporal móvil de media hora. Sin embargo, el método utilizado para el descarte de datos ruidosos (o para determinar si se necesita dicho método) depende de la ubicación y debe basarse en experiencias con datos de radar, como los descritos en este manual.

- (3) Si el CC se realiza por lo general con valores horarios, se puede diseñar un filtro pasabaja para atenuar valores con un periodo de 1 minuto y permitir valores horarios. La COI (2014) describe dichos filtros.
- (4) Si el centro realiza normalmente CC de valores de un promedio de 6 o 15 minutos (por lo general, es necesario recoger datos con una frecuencia superior a una hora para describir la evolución de los oleajes de tormenta), sugerimos que se calcule el promedio de mediciones muestreadas a 1 minuto. El centro contará ya con filtros para la posterior conversión de este promedio a valores horarios, diarios, etc. (Cada centro utiliza filtros diferentes para la conversión de valores horarios a promedios diarios. El volumen 3 y la COI 2014 tratan este tema).

En determinadas ocasiones, puede ser necesario realizar un CC especial de un registro de datos muestreado a 1 minuto y de duración de varios días o semanas, que incluya señales interesantes de tsunamis u oleajes de tormenta. En dicho caso, recomendamos realizar con anterioridad el CC de un registro de mayor duración, por ejemplo de un año, abarcando el período más breve de interés, en el que se ha seguido el procedimiento ya mencionado y del que se han obtenido las constantes de la marea. A continuación, las constantes de la marea se pueden utilizar en un programa de predicción de mareas para extraer de las mediciones el componente que depende de las mareas con un periodo de 1 minuto e identificar con claridad los eventos de períodos breves. Si no, en nuestra opinión en el GLOSS no existe una verdadera necesidad, ni siquiera la posibilidad, de llevar a cabo un CC completo de todos los datos con una frecuencia de 1 minuto.

8.2.2.2 Utilización de datos de altímetro para la comprobación de la estabilidad del dátum de mareógrafos

En los últimos años, se ha abierto una nueva posibilidad referente al CC de los mareógrafos gracias al acceso a datos de altímetros satelitales. Se pueden apreciar diferencias reales entre la variabilidad del nivel del mar registrada por un mareógrafo junto a la costa y la que mide un altímetro satelital a varias decenas de kilómetros de la costa, debido a los procesos oceánicos que se producen entre los dos puntos. Además, existen diferencias entre los dos tipos de nivel del mar (uno "relativo" y el otro "geocéntrico") a lo que se añade el ajuste habitual de los datos de altímetros con el fin de lograr el efecto de barómetro invertido para períodos superiores a 20 días y la aplicación de una corrección dinámica en el caso de frecuencias más altas. Sin embargo, la utilización de datos de altímetros por parte de muchos científicos a lo largo de los dos últimos decenios ha demostrado que, para la mayor parte de las ubicaciones oceánicas abiertas (es decir, islas y zonas costeras abiertas), por lo general se da un alto grado de correlación entre la variabilidad de ambos tipos de nivel del mar (Vinogradov y Ponte, 2011, entre otros). Dicha correlación permite, por un lado, utilizar los datos de mareógrafos para comprobar la estabilidad de la información de altímetros (Leuliette et al., 2004) y, por otro lado, identificar errores graves en el dátum de mareógrafos.

El Archivo Conjunto sobre el Nivel del Mar (JASL) de la Universidad de Hawái compara de forma rutinaria datos diarios de mareógrafos con los datos sobre el nivel del mar "indirectos" ofrecidos por altímetros satelitales (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/data-access.html>). Un diagrama comparativo puede servir para evaluar la estabilidad del nivel de referencia de mareógrafos. A modo de ejemplo, el diagrama de los datos del mareógrafo ubicado en Kaohsiung (Taiwán) y los datos de altímetro correspondientes mostraron una clara función escalón en el diagrama diferencial de 2009 (**figura 8.3a**). Tras establecer contacto con los productores de datos de la Oficina Central de Meteorología, estos facilitaron una serie corregida (**figura 8.3b**). Varias comparaciones rutinarias similares de valores medios mensuales de datos de altímetros y mareógrafos realizadas por otros grupos han permitido identificar problemas en la antena de medidores de radar nuevos (Pérez et al., 2014).

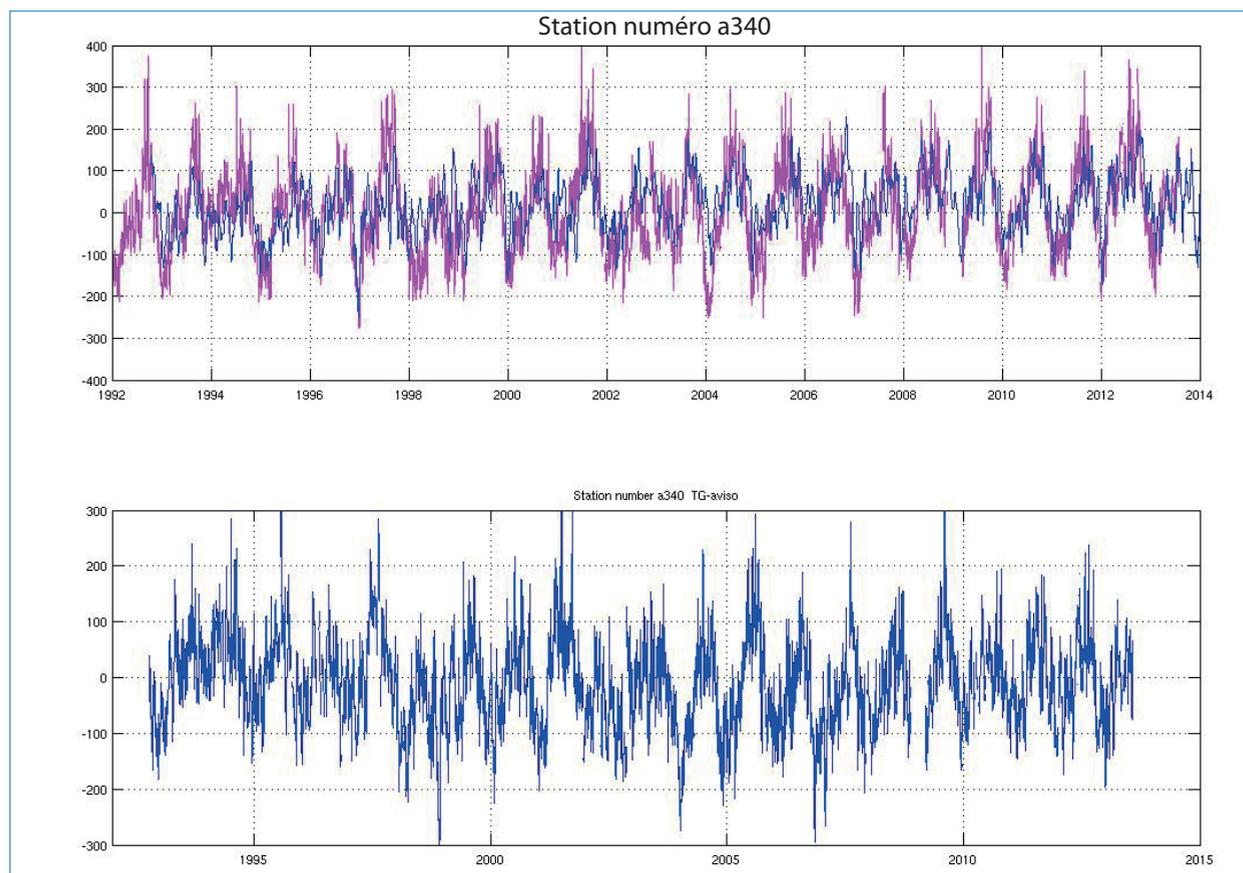


Figura 8.3

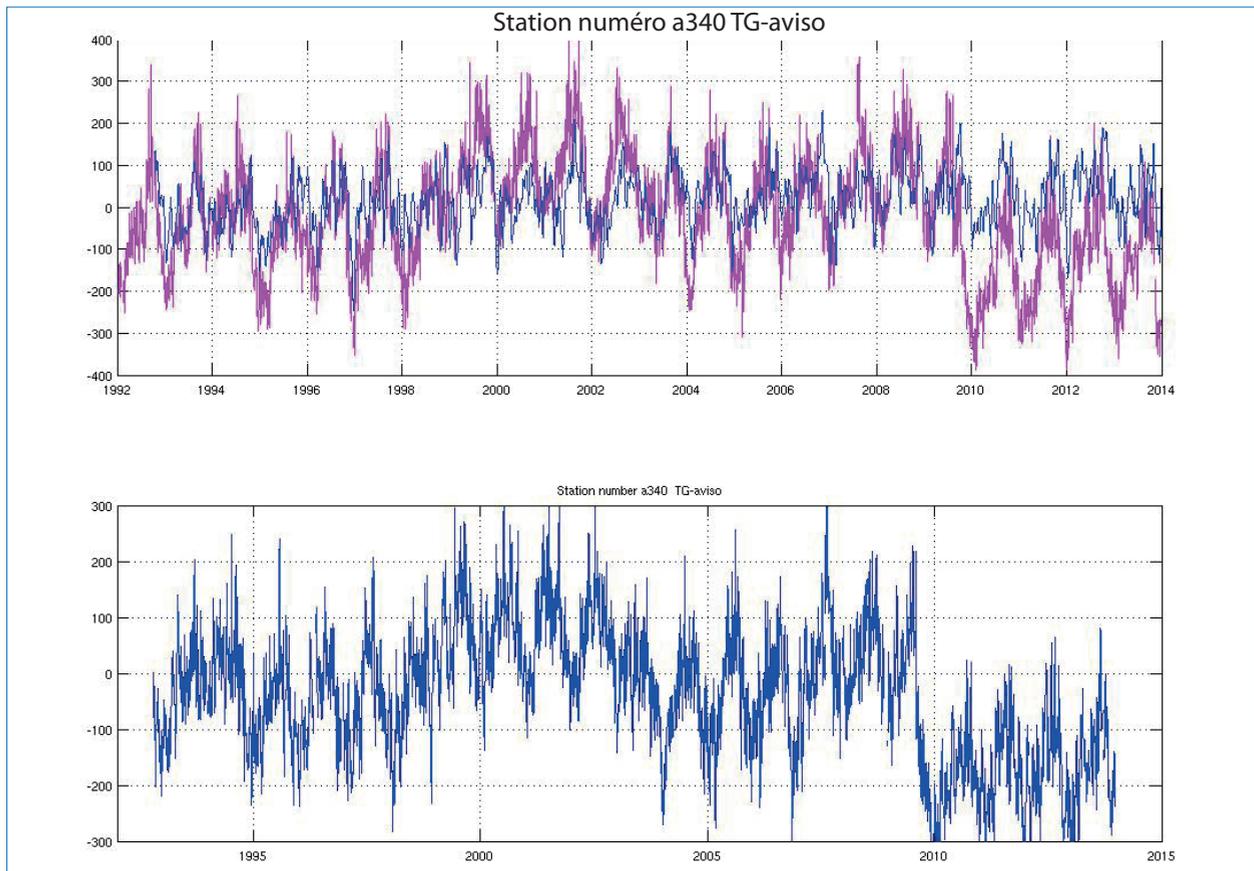
(a) El panel superior muestra los datos diarios del mareógrafo ubicado en Kaoshiung (rosa) y los datos indirectos de altímetro con un periodo de 10 días proporcionados por AVISO (azul). Se ha eliminado la media en ambas series. El panel inferior ilustra la diferencia entre ambos.

8.2.3 Análisis de mareas y paquetes de CC

Las agencias de mareógrafos nacionales que no cuenten con sus propios programas informáticos de CC, o aquellos analistas individuales que deseen llevar a cabo su propio CC, pueden utilizar los paquetes que se mencionan a continuación. (Existen otros paquetes, pero estos son los dos con los que tenemos más experiencia).

(1) El JASL recopiló y documentó el paquete del UHSLC de procesamiento y CC de datos horarios sobre el nivel del mar que utilizan muchos grupos de manera extensa. Ahora está actualizado y es compatible con los sistemas operativos de Linux y Windows de 64 bits. Su finalidad es producir conjuntos de datos sobre el nivel del mar de alta calidad y validez científica. Incluye también el paquete sobre mareas del Instituto de Ciencias del Océano del Canadá para el análisis y predicción de mareas. Puede obtener más información en caldwell@hawaii.edu o <http://ilikai.soest.hawaii.edu/UHSLC/jasl/jaslsoft.html>.

(2) Hasta el momento, el kit de programas informáticos para el análisis de mareas (TASK) del NOC solo estaba disponible como producto basado en DOS. El equipo de productos de datos marinos ha reescrito por completo el kit para crear la edición de Windows de TASK, un paquete de programas que combina un análisis armónico preciso con aplicaciones de Windows para la manipulación, procesamiento, CC y creación de gráficos a partir de datos. Las herramientas del TASK tienen el objetivo de facilitar todos los procesos (p. ej., marcación automática de datos, detección de lagunas y picos, conversión de unidades, desplazamiento de tiempos, elaboración de gráficos sofisticados con identificación sencilla y eliminación de datos incorrectos, etc.). El programa informático POLTIPS-3 de predicción de mareas viene incluido en el paquete y permite la creación de tablas de mareas anuales con formato completo. Puede obtener más información en dataproduts@noc.ac.uk o <http://noc.ac.uk/using-science/products/tidal-harmonic-analysis>.



(b) Se recibió un conjunto corregido de datos del mareógrafo y se confirmó que era acorde con la altimetría.

8.3 Obligaciones de los proveedores de datos

Se puede pensar que todos los datos sobre el nivel del mar pasan de manera automática a través de una cadena de procesamiento TR-rápidos-MD que proporciona datos de alta calidad a científicos y otros usuarios. Sin embargo, si bien algunos datos fluyen de esa manera, en la mayor parte de los casos no es así.

El principal motivo por el que la cadena no puede funcionar siempre de manera automática está relacionado con el CCMD. En dicho proceso se recopila toda la información disponible sobre la calibración de sensores, nivelación de cotas de dátums, etc. y se documenta para elaborar el producto final. Por lo tanto, los operadores de las estaciones, los centros de recopilación de datos nacionales y los centros internacionales sobre el nivel de mar deben colaborar de forma continua en todo momento. La COI (2012) define con claridad las obligaciones de los proveedores de datos:

- Garantizar que los datos TR se transmiten al SLMF de la COI, de manera automática en este caso.
- Facilitar los datos rápidos, que se han sometido a un CC parcial, al Centro del GLOSS de Distribución Rápida, que a su vez los pondrá a disposición de la comunidad por lo general en un plazo de 4 a 6 semanas. En determinados casos, el Centro podrá acceder y realizar un CC parcial de los datos TR del SLMF, tal y como se ha descrito con anterioridad.
- Facilitar los datos MD, que se han sometido a un CC completo, a uno de los centros de datos MD (BODC o UHSLC) antes del mes de septiembre posterior al año de recogida de los datos.
- Facilitar los valores sobre el nivel del mar, junto con información completa sobre dátums y metadatos, al PSMSL antes del mes de septiembre posterior al año de los datos.

9. Materiales y contactos de formación

El PSMSL mantiene páginas web (http://www.psmsl.org/train_and_info/) que ofrecen materiales de formación elaborados fundamentalmente para el GLOSS. Dichos materiales incluyen:

- listas de lectura con libros sobre mareas y niveles del mar; enlaces a informes del IPCC; información sobre geodesia, altimetría satelital y más información útil;
- volúmenes anteriores de este manual;
- enlaces a contactos relacionados con el nivel del mar en muchos países (dicha información de contacto deja de estar al día con rapidez, por lo que el PSMSL agradece que le envíen información actualizada a través de psmsl@noc.ac.uk);
- paquetes de programas informáticos para el análisis de mareas (consulte la sección 8.2.3).
- El portal también incluye varios productos como:
 - visores de tendencias y anomalías del nivel del mar,
 - programas informáticos sobre ondículas transversales y coherencia de ondículas,
 - información sobre reconstrucciones del nivel del mar,
 - archivo de autor con conjuntos de datos relacionados con publicaciones sobre el nivel del mar que se han archivado con el PSMSL,
 - información sobre la cobertura de datos del PSMSL y el estado del GLOSS.

A través del conjunto de páginas web del GLOSS (<http://www.gloss-sealevel.org>) se puede acceder a:

- el estado de la red,
- el GLOSS Handbook (descripciones de cada estación de la red central del GLOSS),
- informes nacionales y técnicos de las reuniones de expertos del GLOSS,
- información sobre los cursos de formación del GLOSS,
- una guía sobre dónde obtener datos sobre el nivel del mar.

Entre los recursos nacionales sobre el nivel del mar para información y formación se incluyen los elaborados por los siguientes países:

- Australia (Manual de Mareas de Australia, Comité permanente de mareas y nivel medio del mar, 2004),
- Francia (<http://refmar.shom.fr> y <http://www.sonel.org>),
- EE. UU., NOAA (<http://tidesandcurrents.noaa.gov/>),
- EE. UU., el programa COMET de la Universidad de Colorado (<https://www.meted.ucar.edu>) contiene una cantidad considerable de materiales de formación para la comunidad geocientífica, incluyendo información sobre la utilización del GNSS, geodesia, hidrografía, oleajes de tormenta y planificación ante una subida del nivel del mar.

También existen materiales de información y paquetes de programas informáticos relacionados con el nivel de mar elaborados por terceros que son interesantes para el GLOSS. Estos incluyen:

- una lista de publicaciones recientes sobre el nivel del mar que mantiene la Universidad de Colorado (<http://sealevel.colorado.edu/>);
- el paquete de análisis de mareas T_Tide (<http://www.eos.ubc.ca/~rich/>) que, al igual que el paquete de la Universidad de Hawái que se menciona en la sección 8.2.3, se basa en el paquete sobre mareas del Instituto de Ciencias del Océano del Canadá;
- los centros de altímetros de http://www.psmsl.org/train_and_info/training/reading/ ofrecen sus propios materiales de formación.

Los colaboradores del presente manual o que aparecen citados como autores de artículos en el Suplemento están dispuestos a compartir sus conocimientos sobre diferentes aspectos de la observación del nivel del mar. En la **tabla 9.1a**, se incluye una lista de personas de cada país con experiencia en la utilización de medidores de radar y datos de medidores de radar; para obtener más información de contacto, diríjase a la OHI (2015). En la **tabla 9.1b**, se incluyen los nombres de personas con experiencia en métodos de transmisión por satélite con mareógrafos, quienes también ofrecen asesoramiento. (Por supuesto, estas listas no son exhaustivas). La Secretaría Técnica del GLOSS proporciona asesoramiento general sobre el sistema (t.aarup@unesco.org).

Tabla 9.1

a) Contactos de medidores de radar de cada país

Esta tabla incluye los países y agencias que cuentan con medidores de radar según la OHI (2015) o aquellos a los que representan los que han colaborado en la elaboración este manual. En la mayor parte de los casos, se proporciona un nombre de contacto y un correo electrónico. La última columna hace referencia al fabricante del medidor que creemos que es el más utilizado por la agencia/país, a fecha de abril de 2016.

Australia	Bill Mitchell, Bureau of Meteorology	b.mitchell@bom.gov.au	V
	John Broadbent, Maritime Safety Queensland	tides@msq.qld.gov.au	V
Bahrain	Rashid Abdulla Al Suwaidi, Survey&Land Reg.	rasid.alsuwaidi@slrb.gov.bh	O
Brazil	Luiz Nonnato, Univ. São Paulo	luiz.nonnato@usp.br	O
Chile	Juan Fierro and Jorge Gaeta, SHOA	oceanografia@shoa.cl	V
Denmark	Lonny Hansen, DMI	lha@dmi.dk	EH
France	Gael André, SHOM	gael.andre@shom.fr	K
	Guy Wöppelmann, Univ. La Rochelle	guy.woppelmann@univ-lr.fr	
	Laurent Testut, LEGOS, Toulouse	laurent.testut@legos.obs-mip.fr	
Germany	Tilo Schöne, GFZ	tschoene@gfz-potsdam.de	O
	Stephan Mai, BAFG	mai@bafg.de	
	Gunter Liebsch, BKG	gunter.liebsch@bkg.bund.de	V
India	Prakash Mehra, NIO	pmehra@nio.org	
	Srinivas Kumar, INCOIS	srinivas@incois.gov.in	
Israel	Israel Oceanographic and Limnological Research		M
Italy	Giovanni Arena, ISPRA	giovanni.arena@isprambiente.it	O
Japan	Hironori Hayashibara, JMA	tide@climar.kishou.gov.jp	T
Netherlands	Koos Doekes, Rijkswaterstaat	koos.doekes@rws.nl	Ra
New Zealand	Glen Rowe, LINZ	growse@linz.govt.nz	
Norway	Tor Torresen	tor.torresen@statkart.no	M
Oman	Dr. Juma, Directorate General of Meteorology	j.almaskari@met.gov.om	S
Peru	Directorate of Hydrography and Navigation	dihidronav@dhn.mil.pe	G,V
Philippines	Hydrography, NMRIA		
South Africa	Ruth Farre, SANHO	hydrosan@iafrica.com	O
Spain	Begoña Pérez Gómez, Puertos del Estado	bego@puertos.es	M
	Elena Tel, Inst. Español de Oceanografía	elena.tel@md.ieo.es	V
	Bernat Puyol, Instituto Geográfico Nacional	bpuyol@fomento.es	V
United Kingdom	Jeff Pugh, National Oceanography Centre	jpugh@noc.ac.uk	O,V,W
	Travis Mason, Channel Coast Observatory	travis.mason@noc.soton.ac.uk	R
USA	Robert Heitsenrether, NOAA	robert.heitsenrether@noaa.gov	W
	Mark Merrifield, UHSLC	markm@soest.hawaii.edu	V,S

EH = Endress and Hauser,
Ra = Radac,

G = GEONICA,
S = Sutron,

K = Krohne, M = MIROS,
T = Tokyo Keikei,

O = OTT,
V = VEGAPULS,

R = Rosemount,
W = Waterlog.

(b) Especialistas en métodos de transmisión de datos por satélite con mareógrafos

ARGOS	Laurent Testut, France	laurent.testut@legos.obs-mip.fr
GOES/METEOSAT/MTSAT	Tilo Schöne, Germany	tschoene@gfz-potsdam.de
	Peter Foden, UK	prf@noc.ac.uk
	Jeff Pugh, UK	jpugh@noc.ac.uk
	Robert Heitsenrether, USA	robert.heitsenrether@noaa.gov
INMARSAT BGAN	Mark Merrifield, USA	markm@soest.hawaii.edu
	Juan Fierro and Jorge Gaeta, Chile	oceanografia@shoa.cl
IRIDIUM	Tilo Schöne, Germany	tschoene@gfz-potsdam.de
	Robert Heitsenrether, USA	robert.heitsenrether@noaa.gov
VSAT	Tilo Schöne, Germany	tschoene@gfz-potsdam.de
	Prakash Mehra, India	pmehra@nio.org

Références

Les références indiquées en italique ne sont pas mentionnées explicitement dans le texte et sont incluses pour fournir des informations sur les précédents travaux portant sur les marégraphes radar.

- Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L. 2011. ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, *Journal of Geodesy*, 85, 457–473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.
- Bevis, M., Scherer, W. and Merrifield, M. 2002. Technical issues and recommendations related to the installation of continuous GPS Stations at tide gauges. *Marine Geodesy*, 25, 87-99, doi:10.1080/014904102753516750.
- Blasi, C.J. 2009. A new technology for the measurement of the sea level and the sea state. *Environmental Geology*, 57, 331–336, doi:10.1007/s00254-008-1632-2.
- Blasi, C., Mai, S., Wilhelmi, J., Zenz, T. and Barjenbruch, U. 2014. A powerful method of measuring sea wave spectra and their direction. Pp.913-920 in, *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrosience and Engineering*, 28 September – 2 October 2014, Hamburg (eds. Lehfeldt, R. and Kopmanns, R.), ISBN 978-3-939230-32-8.
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W.C., Plag, H-P., Stein, S. and Okal, E. 2006. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophysical Research Letters*, 33, L11309, doi:10.1029/2006GL026145.
- BOM, 2006. A brief description of the CREX sea level bulletins to be issued by the Australian Bureau of Meteorology on GTS with effect from 18 December 2006. Report of the Australian Bureau of Meteorology. Available from https://www.wmo.int/pages/prog/www/ois/Operational_Information/Newsletters/2000_2009/2008/Jan08/CREXbulletinsBOM.pdf.
- Boon, J.D., Heitsenrether, R.M. and Bushnell, M. 2009. Microwave-acoustic water level sensor comparisons: sensor response to change in oceanographic and meteorological parameters. *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2009 Conference*, Biloxi, 26-29 October 2009, pp.1-10.
- Boon, J.D., Heitsenrether, R.M. and Hensley, W.M. 2012. Multi-sensor evaluation of microwave water level error. *Proceedings of Oceans '12*, Hampton Roads, Virginia, MTS/IEEE, 8pp., doi:10.1109/OCEANS.2012.6405079.
- Boon, J.D. 2013. Microwave water level measurement error. A reanalysis of 2011 multi-sensor data. U.S. Army Field Research Facility, Duck, North Carolina. Internal Report. 23pp.
- Boon, J.D. 2014. Reducing wave-induced microwave water-level measurement error with a least squares-designed digital filter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31, 481-502, doi:10.1175/JTECH-D-13-00160.1.
- Broadbent, G.J. 2005. Experience with radar sensor equipped tide gauges in Queensland. *Proceedings of the ATON (Aids TO Navigation) Conference*, Canberra, Australia, March 2005.
- Brooks, B.A., Merrifield, M.A., Foster, J., Werner, C.L., Gomez, F., Bevis, M. and Gill, S. 2007. Space geodetic determination of spatial variability in relative sea level change, Los Angeles basin. *Geophysical Research Letters*, 34, L01611, doi:10.1029/2006GL028171.
- Brumbi, D. 2003. *Fundamentals of radar technology for level gauging*. 4th Edition. Duisberg: KROHNE Messtechnik GmbH & Co.
- Brumbi, D. and Van Zyl, I. 2009. Modern technologies for level measurement. Paper A4.2 (pp.97-102) in *Proceedings of the SENSOR+TEST Conference*, Volume I, 26-28 May 2009, Nürnberg, Germany.
- Burns, S.D. 2009. The METEOSAT data collection system. *Proceedings of the 2009 EUMETSAT Meteorological Satellites Conference*, Bath, UK, 21-25 September 2009. Available from <http://www.eumetsat.int>.

- Church, J.A., Clark, P.U. Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D. and Unnikrishnan, A.S. 2013. Sea Level Change. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Devine, P. 2000. Radar level measurement – The users guide. Published by VEGA Controls Ltd., UK. ISBN 0-9538920-0-X. 154pp.
- Eberlein, L. and Liebsch, G. 2003. Experiences with the Vega radar gauge on a buoy. Proceedings of the GLOSS Experts Meeting No.8, Workshop on New Technical Developments in Sea and Land Level Observing Systems, Tuesday-Thursday October 14-16 2003, IOC, UNESCO, 1 Rue Miollis, Paris. Available from http://www.gloss-sealevel.org/technical_forum/documents/lutzeberlein.pdf.
- EUMETSAT. 2013. TD 16 - Meteosat data collection and distribution service. Darmstadt: Germany. 63pp. Available from <http://www.eumetsat.int/website/home/Data/MeteosatServices/MeteosatDataCollectionServices/index.html>.
- Ewans, K., Feld, G. and Jonathan, P. 2014. On wave radar measurement. *Ocean Dynamics*, 64, 1281–1303, doi:10.1007/s10236-014-0742-5.
- Forbes, S., MacAulay, P., Coolen, C. and Carmichael, F. 2009. A laser-based water level sensor and robust insulated and heated multi-well stilling well system for ice-prone temperate and sub-arctic environments. Presentation at U.S. Hydro 2009, 11-14 May 2009, Norfolk, Virginia. Available from <http://ushydro.thsoa.org/us09papers.htm>.
- Fulford, J.M., Ester, L.W. and Heaton, J.W. 2007. Accuracy of radar water level measurements. US Geological Survey report. United States Committee for Irrigation and Drainage (SCID), 4th International Conference on Irrigation and Drainage, Sacramento, California. Available from <http://www.waterlog.com/media/pdfs/usgs-study-small.pdf>.
- Hannsen, R.F. 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 308pp.
- Heitsenrether, R.M., Bushnell, M.H. and Boon, J.D. 2008. Understanding the impact of surface waves on microwave water level measurements. MTR/IEEE Oceans 2008 Conference and Exhibition, Québec City, Canada, 15-18 September 2008. 9pp.
- Heitsenrether, R.M. 2010. Using microwave radar for long term remote sensing of ocean surface dynamics. Proceedings of the 17th Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, 8-12 June 2009, Stowe, Vermont. American Meteorological Society. Available from <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/154150.pdf>.
- Heitsenrether, R. and Davis, E. 2011. Test and evaluation report. Limited acceptance of the Design Analysis WaterLog H-3611i microwave radar water level sensor. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 061. Available from http://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Technical_Report_NOS_CO-OPS_061.pdf.
- Heitsenrether, R.M., Hensley, W.M. and Boon, J.D. 2011. Results from NOAA's test and evaluation of microwave radar water level sensors and plans for a transition to operational applications. Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'11 Conference, 19-22 September 2011, Kona, Hawaii.
- Heitsenrether, R., Hensley, W. and Krug, W. 2012. Measurement requirements for radar water level sensor laboratory verification tests. NOAA Internal Report. 8pp.
- Holgate, S., Foden, P., Pugh, J. and Woodworth, P. 2008. Real time sea level data transmission from tide gauges for tsunami monitoring and long term sea level rise observations. *Journal of Operational Oceanography*, 1, 3-8, doi:10.1080/1755876X.2008.11081883.
- Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S. and Pugh, J. 2013. New data systems and products at the Permanent Service for Mean Sea Level. *Journal of Coastal Research*, 29, 493-504, doi:10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1.

- IHO, 2015. Inventory of Tide Gauges in Member States (October 2015). A compilation of tide gauges and their operators by the International Hydrographic Organization. Available from http://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/IHOTC_Misc/TideGaugeInventory.pdf.
- Illigner, J., Sofian, I., Abidin, H., Arief Syafi'i, M., Schöne, T. (2016): Coastal Sea Level Monitoring in Indonesia – Connecting the Tide Gauge Zero to Leveling Benchmarks. - In: Rizos, C., Willis, P. (Eds.), IAG 150 Years: Proceedings of the IAG Scientific Assembly in Postdam, Germany, 2013, (International Association of Geodesy Symposia; 143), Cham : Springer International Publishing, p. 451-457. http://doi.org/Doi:10.1007/1345_2015_23
- IOC, 2006. Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume 4: An Update to 2006. (eds. T. Aarup, M. Merrifield, B. Pérez, I. Vassie and P. Woodworth). Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides No. 14. Paris: UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission.
- IOC, 2011. Working group on tsunamis and other hazards related to sea-level warning and mitigation systems (TOWS-WG). Inter-ICG Task Team 1 on Sea Level Monitoring for Tsunami. Available from <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001939/193911e.pdf>.
- IOC, 2012. The Global Sea Level Observing System (GLOSS) Implementation Plan – 2012. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission. 37pp. (IOC Technical Series No. 100). Available from <http://ioc.unesco.org>.
- IOC, 2014. Manual on quality control of sea level observations (eds. M.J. Garcia et al.), in press. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission: Paris.
- IOOS, 2014. Manual for real-time quality control of water level data. A guide to quality control and quality assurance for water level observations (eds. Bushnell, M. et al.). Version 1.0. Integrated Ocean Observing System (IOOS) report. Available from <http://www.ioos.noaa.gov/qartod/>.
- Irish, J.L., Wozencraft, J.M., Cunningham, A.G. and Giroud, C. 2006. Nonintrusive measurement of ocean waves: Lidar wave gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 1559-1572, doi:10.1175/JTECH1936.1.
- Larson, K. M., Löfgren, J. and Haas, R. 2013. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in Space Research*, 51(8), 1301–1310, doi:10.1016/j.asr.2012.04.017.
- Leigh, G.E. 2009 (date uncertain). Bottles, pots and pans? – Marking the surveys of the U.S. Coast & Geodetic Survey and NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration report. Available from http://www.ngs.noaa.gov/web/about_ngo/history/indexhUSCGS.shtml [accessed November 2011].
- Leuliette, E.W., Nerem, R.S. and Mitchum, G.T. 2004. Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change. *Marine Geodesy*, 27, 79-94, doi:10.1080/01490410490465193.
- Mai, S. and Zimmermann, C. 2000. Applicability of radar level gauges in wave monitoring. Proceedings of the 2nd International Conference on Port Development and Coastal Environment, Varna, Bulgaria, 2000.
- Martín Míguez, B., Pérez Gómez, B. and Álvarez Fanjul, E. 2005. The ESEAS-RI sea level test station: Reliability and accuracy of different tide gauges. *International Hydrographic Review*, 6, 1. 2–11.
- Martín Míguez, B., Le Roy, R. and Wöppelmann, G. 2008a. The use of radar tide gauges to measure variations in sea level along the French coast. *Journal of Coastal Research*, 24, 61-68, doi:10.2112/06-0787.
- Martín Míguez, B., Testut, L. and Wöppelmann, G. 2008b. The Van de Castele test revisited: an efficient approach to tide gauge error characterization. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 1238-1244, doi:10.1175/2007JTECH0554.1
- Martín Míguez, B., Testut, L. and Wöppelmann, G. 2012. Performance of modern tide gauges: towards mm-level accuracy. *Advances in Spanish Physical Oceanography (Scientia Marina)*, 76 S1, 221-228, doi: 10.3989/scimar.03618.18A.

- Matthäus, W. 1972. On the history of recording tide gauges. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, B, 73, 26-34, doi:10.1017/S0080455X00002083.
- Mazzotti, S., Lambert, A., Henton, J., James, T.S. and Courtier, N. 2011. Absolute gravity calibration of GPS velocities and glacial isostatic adjustment in mid-continent North America. *Geophysical Research Letters*, 38, L24311, doi:10.1029/2011GL049846.
- Mehra, P., Prabhudesai, R.G., Joseph, A., Vijaykumar, Agarvadekar, Y., Luis, R., Damodaran, S. and Viegas, B. 2009. A one year comparison of radar and pressure tide gauge at Goa, West Coast of India. *Proceedings of the International Symposium on Ocean Electronics (SYMPOL)*, Cochin, 18-20 November 2009 (eds. Pillai, P.R.S. and Supriya, M.H.), 173-183.
- Mehra, P., Agarvadekar, Y., Vijaykumar, Luis, R. and Nadaf, L. 2012. Comparison of sea-level measurements using microwave radar and subsurface pressure gauge deployed in Mandovi estuary in Goa, Central West Coast of India. In, *Ocean Sensing and Monitoring* (eds. Hou, W.W. and Amone, R.). *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Vol.8372, 7pp. Available from <http://drs.nio.org/drs/handle/2264/4081>.
- Meldrum, D. 2013. A brief analysis of the evolution of the Satellite Communications market with regard to various classes of in situ low-power marine environmental observation platform. Report to the Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology, Observations Coordination Group. Washington, D.C., September 2013.
- Mitchum, G.T. 2000. An improved calibration of satellite altimetric heights using tide gauge sea levels with adjustment for land motion. *Marine Geodesy*, 23, 145-166, doi:10.1080/01490410050128591.
- Moray, R. 1665–66. Considerations and enquiries concerning tides, by Sir Robert Moray; Likewise for a further search into Dr. Wallis's newly publish't hypothesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1, 298–301, doi:10.1098/rstl.1665.0113.
- National Resources Canada (NRC), 2015. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>.
- NOAA, 2013a. Field installation guide. Field installation procedures for Design Analysis WaterLog® H3611i Microwave Radar Water Level Sensor using the Sutron Data Collection Platform. Version 1.0. January 2013. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, National Ocean Service Center for Operational Oceanographic Products and Services. 65pp.
- NOAA, 2013b. A guide to CO-OPS SHEF and CREX products. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 026. Revised 2013. Available from http://www.co-ops.nos.noaa.gov/publications/NOAA_Technical_Report_NOS_COOPS_026.pdf.
- NOAA, 2015. NOAA guidance document for determination of vertical land motion at water level stations using GPS technology. NOAA Technical Report NOS 139. 18pp. Available from https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOS_Tech_report_139.pdf.
- Park, J., Heitsenrether, R. and Sweet, W. 2014. Water level and wave height estimates at NOAA tide stations from acoustic and microwave sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31, 2294–2308, doi:10.1175/JTECH-D-14-00021.1.
- Parker, B.B. 2007. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3. Available from <http://tidesandcurrents.noaa.gov>.
- PCTMSL, 2004. Australian Tides Manual. Permanent Committee on Tides and Mean Sea Level (PCTMSL). Special Publication No. 9, Version 4.3. 69pp. Available from <http://www.icsm.gov.au/tides/>.
- Pérez, B., Alvarez-Fanjul, E., Pérez, S., de Alfonso, M. and Vela, J. 2013. Use of tide gauge data in operational oceanography and sea level hazard warning systems. *Journal of Operational Oceanography*, 6, 1–18.
- Pérez, B., Payo, A., López, D., Woodworth, P. and Alvarez-Fanjul, E. 2014. Overlapping sea level time series measured using different technologies: an example from the REDMAR Spanish Network. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 589-610, doi:10.5194/nhess-14-589-2014.
- Pérez Gómez, B. 2014. Design and implementation of an operational sea level monitoring and forecasting system for the Spanish coast. PhD Thesis, University of Cantabria.

- Poffa, N. (ed.) 2014. Guidelines for sea level data transmissions through GTS in the frame of coastal hazard warning systems. V 1.0, November 2014. Available from the Measuring and Instrumentation Department of SHOM, France. <http://refmar.shom.fr/documents/10227/106226/Guidelines-for-sea-level-data-transmissions-GTS-coastal-warning-systems.pdf>.
- Pouliquen, S. and others. 2011. Recommendations for in-situ data Real Time Quality Control. EuroGOOS Publication No. 27. EuroGOOS, Norrköping, Sweden. 23pp. Available from <http://eurogoos.eu/increasing-eurogoos-awareness/publications/>.
- Prior-Jones, M. 2011. Satellite communications systems buyers' guide. Internal Report. British Antarctic Survey, Cambridge.
- Pugh, D.T. and Woodworth, P.L. 2014. Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9781107028197. 408pp.
- Quartly, G.D., Guymer, T.H. and Srokosz, M.A. 1996. The effects of rain on Topex radar altimeter data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, 1209-1229, doi:10.1175/1520-0426(1996)013<1209:TEOROT>2.0.CO;2.
- Ray, R.D., Beckley, B.D and Lemoine, F.G. 2010. Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements. *Advances in Space Research*, 45, 1510–1522, doi:10.1016/j.asr.2010.02.020.
- Riley, K. and Jethra, R. 2012. Use guided-wave radar to measure water level in steam loops. *CEP Magazine*, American Institute of Chemical Engineers, December 2012, 22-26.
- Rütten, S., Mai, S., Wilhelmi, J., Zenz, T., Winkelbauer, J., Fröhle, P. and Barjenbruch, U. 2013. Comparison of directional spectra of sea waves estimated by an array of radar sensors and a directional waverider buoy. *Proceedings of 6th SCACR International Short Conference on Applied Coastal Research*, Lisbon, Portugal.
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Collilieux, X., Guichard, M., Míguez, B.M., Tiphaneau, P. and Wöppelmann, G. 2012. Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field. *Global and Planetary Change*, 98-99, 6-17, doi:10.1016/j.gloplacha.2012.07.007.
- Santamaría-Gómez, A., Watson, C., Gravelle, M., King, M. and Wöppelmann, G. 2015. Levelling co-located GNSS and tide gauge stations using GNSS reflectometry. *Journal of Geodesy*, 89, 241-258, doi:10.1007/s00190-014-0784-y.
- Santamaría-Gómez, A. and Watson, C. 2016. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at Spring Bay, Australia. *GPS Solutions*, doi:10.1007/s10291-016-0537-x.
- Schöne, T., Schön, N. and Thaller, D. 2009. IGS tide gauge benchmark monitoring pilot project (TIGA): Scientific benefits. *Journal of Geodesy*, 83, 249-261, doi:10.1007/s00190-008-0269-y.
- Shirman, B. 2003. Comparison of a radar and float gauge at Haifa. *Proceedings of the GLOSS Experts Meeting No.8, Workshop on New Technical Developments in Sea and Land Level Observing Systems*, Tuesday-Thursday October 14-16 2003, IOC, UNESCO, 1 Rue Miollis, Paris. Available from <http://www.gloss-sealevel.org/>.
- Teferle, F.N., Bingley, R.M., Orliac, E.J., Williams, S.D.P., Woodworth, P.L., McLaughlin, D., Baker, T.F., Shennan, I., Milne, G.A., Bradley, S.L. and Hansen, D. 2009. Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, Absolute Gravity and Holocene sea-level data. *Geophysical Journal International*, 178(1), 23-46, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04185.x.
- Testut, L., Martín Míguez, B., Wöppelmann, G., Tiphaneau, P., Pouvreau, N. and Karpytchev, M. 2010. Sea level at Saint Paul Island, southern Indian Ocean, from 1874 to the present. *Journal of Geophysical Research*, 115, C12028, doi:10.1029/2010JC006404.
- Vassie, J.M., Woodworth, P.L. and Holt, M.W. 2004. An example of North Atlantic deep ocean swell impacting Ascension and St. Helena islands in the central South Atlantic. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(7), 1095-1103, doi:10.1175/1520-0426(2004)021<1095:AEONAD>2.0.CO;2.
- Vinogradov, S. V. and Ponte, R. M. 2011. Low frequency variability in coastal sea level from tide gauges and altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 116, C07006, doi:10.1029/2011JC007034.

- Warne, J. and Brewster, A. 2014. Australian Tsunami Warning Sea Level Observation System: ASLOS Siting Specification. Bureau of Meteorology, Report ASLOS-NMD-004.
- Washburn, S.A., Haines, B.J., Born, G.H. and Fowler, C. 2011. The Harvest Experiment LIDAR system: water level measurement device comparison for Jason-1 and Jason-2/OSTM calibration. *Marine Geodesy*, 34, 277-290, doi:10.1080/01490419.2011.590114.
- Wikipedia, 2015a. <http://en.wikipedia.org/wiki/FMCW>.
- Wikipedia, 2015b. http://en.wikipedia.org/wiki/Extremely_high_frequency.
- WMO, 2010. Manual on Stream Gauging. Volume I – Fieldwork. World Meteorological Organization Report WMO-No. 1044. 254pp.
- Wöppelmann, G. and Marcos, M. 2016. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, doi:10.1002/2015RG000502.
- Woodworth, P.L., Vassie, J.M., Spencer, R. and Smith, D.E. 1996. Precise datum control for pressure tide gauges. *Marine Geodesy*, 19(1), 1-20.
- Woodworth, P.L. and Smith, D.E. 2003. A one year comparison of radar and bubbler tide gauges at Liverpool. *International Hydrographic Review*, 4(3), 42-49.
- Woodworth, P. L., Hughes, C. W., Bingham, R. J. and Gruber, T. 2012. Towards worldwide height system unification using ocean information. *Journal of Geodetic Science*, 2(4), 302–318, doi:10.2478/v10156-012-004-8.
- Woodworth, P.L., Pugh, D.T. and Plater, A.J. 2015. Sea-level measurements from tide gauges. Chapter 35 (pp.557-574) in, *Handbook of Sea-Level Research*, First Edition. Edited by Ian Shennan, Antony J. Long, and Benjamin P. Horton. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.

Anexo 1:

medidores de radar de los principales fabricantes, a fecha de abril de 2016

Mareógrafo	Tipo de radar	Frecuencia de radar	Anchura completa de ángulo de haz	Precisión habitual	Medición Tiempo	Consumo energético	Salida	Información en web	Notas
OTT Kalesto	FMCW	24,125 GHz	10 grados	1 cm	17 s para 40 mediciones de las que se calcula el promedio	500 mA a 12 Vcc en modo activo	RS-485	N/R	1
VEGAPULS 61	Impulsos	26 GHz	10 grados	2 mm	Ciclo de medición ~450 ms	Máximo 22 mA a 12 Vcc	Bucle de corriente 4-20 mA/HART	www.vega.com	2
Waterlog H-3611	Impulsos	~26 GHz	10 grados	3 mm	Ciclo de medición habitual ~420 ms	12 mA a 12 Vcc habitualmente en modo activo	SDI-12	www.waterlog.com	
OTT RLS	Impulsos	24 GHz	12 grados	3 mm	Tasa bruta de 16 Hz, promedio de 20 s	12 mA a 12 Vcc en modo activo	SDI-12 y RS-485	www.ott.com	
Campbell Scientific CS475-477	Impulsos	~26 GHz	10 grados (CS475 y 476) y 8 grados (CS477)	5 mm	N/M	14 mA a 12 Vcc habitualmente	SDI-12	www.campbellsci.com	3
Endress+Hauser FMR245 (sucesor FMR52)	Impulsos	26 GHz	10 grados (con antena de 3 pulgadas)	2 mm	N/M	N/M	Bucle de corriente 4-20 mA/HART	www.uk.endress.com	
GEONICA DATAMAR 2000C/3000C	Impulsos	26GHz	8 grados	1 mm	1 s	10 mA a 12 Vcc	SDI-12	www.geonica.com	
Valeport VRS-20	Impulsos	25GHz	12 grados	10 mm	Tasa bruta de 8 Hz, promedio de 10-360 s	35 mA a 12 Vcc	RS-232/485 y SDI-12	www.valeport.co.uk	
Sutron RLR-003	Impulsos	6,2 GHz	32 grados	3 mm	10 Hz	< 36 mA a 12 Vcc en modo activo	SDI-12	www.sutron.com	
Tokyo Keiki MRG-10	Impulsos	5,8 GHz	17 grados	10 mm	1 Hz	Funciona a 16-36 V	RS-422A o bucle de corriente 4-20 mA/HART	www.tokyo-keiki.co.jp	
Krohne BM70	FMCW	10 GHz	12 grados	5 mm	1 Hz	~10 W a 24 Vcc	Bucle de corriente 4-20 mA/HART (digital)	http://krohne.com/	4

Mareógrafo	Tipo de radar	Frecuencia de radar	Anchura completa de ángulo de haz	Precisión habitual	Medición Tiempo	Consumo energético	Salida	Información en web	Notas
Krohne Optiwave 7300C	FMCW	24-26 GHz	8 grados	3 mm	1 Hz	25 mA a 12 Vcc (menos para salida digital)	Bucle de corriente 4-20 mA/HART (digital)	http://krohne.com/	4
Miros Rangefinder SM-094/2	Frecuencia modulada	Modulación triangular de 9,4-9,8 GHz	5 grados (haz estrecho) o 10 grados (haz ancho)	Mediciones individuales de 1 cm, promedio de 1 mm	20-60.000 ms o "modo secuencial" para la medición de olas	< 500 mA a 24 Vcc (10 W)	RS-422	www.miros.no	5
Radar de onda guiada de Radac	FMCW	Modulación triangular de 9,8-10,3 GHz	10 grados	1 cm	1 s	24-64 Vcc/100-240 Vca/6 W	RS-232	http://radac.nl/	6
Medidor de oleaje/mareas WaveRadar Rex de Rosemount (anteriormente SAAB)	FMCW	Modulación triangular de 9,7-10,3 GHz	10 grados	6 mm	10 Hz	< 650 mA a 12 Vcc en funcionamiento	RS-232 o análogo	www.rsaqua.co.uk	
Krohne BM100	Impulsos	2 GHz	Radar de onda guiada (requiere cilindro de amortiguación de ~60 cm de diámetro)	3 mm si distancia < 6 m, 3 mm + 0,02% de distancia si distancia > 6 m	1 Hz	500 mA a 24 Vcc	RS485	http://krohne.com/	4 y 7
Krohne Optiflex 1300C	Impulsos	2 GHz	Radar de onda guiada (requiere cilindro de amortiguación de ~30 cm de diámetro)	3 mm si distancia < 10m, 0,03% de distancia si distancia > 10m	1 Hz	25 mA a 12 Vcc (menos para salida digital)	Bucle de corriente 4-20 mA/HART (digital)	http://krohne.com/	4 y 7
VEGAFLEX 81	Impulsos	2 GHz	Radar de onda guiada	2 mm	Ciclo de medición < 500 ms	Máximo 21,5 mA a 12 Vcc	Bucle de corriente 4-20 mA/HART	www.vega.com	7
Mareógrafo portátil CETIDE								www.ceehydrosystems.com	8

Anexo 1 Notes

1. El Kalesto ya no se fabrica y se ha sustituido por el OTT RLS, pero todavía se utiliza de manera extensa en todo el mundo.
2. Existen otros instrumentos VEGAPULS en la misma familia. Según el inventario de la OHI, el VEGAPULS 62 se utiliza en el Perú y en España, aunque el dispositivo está diseñado para aplicaciones industriales más exigentes que el VEGAPULS 61. Además, como indica el inventario de la OHI, en Chile se utiliza un sensor Vaisala QHR104 para tomar mediciones de 4 Hz del nivel del agua con una frecuencia de 1 min. De hecho, se trata de un VEGAPULS 62 con una interfaz SDI-12. Creemos que grupos alemanes utilizan también el VEGAPULS 62. Por lo visto, el VEGAPULS 63 y el VEGAPULS 66 de banda C se emplean en Australia (Mettres y Ryan, Suplemento).
3. El medidor de Campbell Scientific es una versión del VEGAPULS-61 con una interfaz SDI-12.
4. El Krohne BM70 se sustituye ahora por el Optiwave 7300C, y el BM100, por el Optiflex 1300C. Es probable que el SHOM fuera el único usuario de las versiones anteriores.
5. Diversas versiones del medidor Miros están disponibles con diferentes alcances y anchuras de haz de antena. Existe un modelo más reciente SM-140 que cuenta con sistemas electrónicos, carcasa y programas informáticos rediseñados y ofrece una salida de potencia más elevada.
6. El medidor de Radac está disponible en versiones idóneas para su funcionamiento al aire libre y en un cilindro de amortiguación.
7. Este dispositivo no transmite por radar al aire libre, sino a través de un cable vertical de guía de onda suspendido en un cilindro de amortiguación.
8. Este parece ser un medidor de radar reforzado para operaciones en puertos o sobre el terreno.

Los instrumentos de esta lista incluyen todos los mencionados por la OHI (2015).

Los instrumentos de esta lista incluyen todos los mencionados por la OHI (2015).

La "precisión habitual" procede de la información de los fabricantes y no se debería comparar el rendimiento de los medidores sobre la base de estos valores. La "salida" indica solo uno de los métodos principales. En determinados casos, el instrumento puede disponer de varios métodos de salida.

N/R = No es relevante, N/M = No se menciona

Anexo 2 :

Lista de acrónimos

ARP	Punto de referencia de la antena
BAFG	Instituto Federal de Hidrología, Alemania
BGAN	Red de Área Mundial de Banda Ancha (de INMARSAT)
BKG	Organismo Federal de Cartografía y Geodesia, Alemania
BODC	Centro Británico de Datos Oceanográficos
CA	Corriente alterna
CARIBE-EWS	Sistema de Alerta contra los Tsunamis y otras Amenazas Costeras en el Caribe y Regiones Adyacentes
CC	Control de calidad
CCMD	Control de calidad de modo diferido
CGNSS	Sistema Mundial de Navegación por Satélite de medición continua
CGNSS@TG	CGNSS en mareógrafos (antes CGPS@TG)
CIU	Unidad de Efectos sobre la Costa (Queensland, Australia)
COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental CREX Clave de caracteres para la representación e intercambio de datos meteorológicos
CW	(Radar de) onda continua
DO	Offset del dátum
DORIS	Sistema de Orbitografía de Precisión y Localización
EGNSS	Campañas episódicas de GNSS
EMODnet	Red Europea de Observación e Información del Mar
EUMETSAT	Organización Europea de Explotación de Satélites Meteorológicos
FMCW	(Radares de) onda continua de frecuencia modulada
GEO	Órbita geoestacionaria
GFZ	Geo Forschungs Zentrum, Potsdam (Alemania)
GLOSS	Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar
GNSS	Sistema Mundial de Navegación por Satélite
GNSSBM	Cota del GNSS
GOES	Sistema de satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente
GPRS	Servicio general de paquetes de radio
GPS	Sistema mundial de localización
GRGS	Grupo de Investigación de Geodesia Espacial, Toulouse (Francia)
GSM	Mensajería general conmutada
GX	Global Express (INMARSAT)
ICSU	Consejo Internacional de la Ciencia
IGN	Instituto Geográfico Nacional (España)
IP	Protocolo Internet

IGS	Servicio Internacional de GNSS
InSAR	Interferometría de radar de apertura sintética
IOOS	Sistema Integrado de Observación Oceánica (de la NOAA)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ITRF	Marco Internacional de Referencia Terrestre
JASL	Archivo Conjunto sobre el Nivel del Mar (en el UHSLC)
JMA	Agencia Meteorológica de Japón
LCD	Pantalla de cristal líquido
LEO	Órbita cercana a la Tierra
LIDAR	Radar óptico para detección y localización por ondas luminosas
LO	Offset del registrador de datos
M2M	Máquina a máquina
MD	(Datos en) modo diferido
MEO	Órbita terrestre media
MSS	Sistema móvil de comunicaciones por satélite
MTSAT	Sistema de satélites meteorológicos (JMA)
NEAMTWS	Sistema de Alerta Temprana contra los Tsunamis y Atenuación de sus Efectos en el Atlántico Nororiental y el Mediterráneo y Mares Adyacentes
NIO	Instituto Nacional de Oceanografía (India)
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (EE. UU.)
NOC	Centro Nacional de Oceanografía (Reino Unido)
NODC	Centro Estadounidense de Datos Oceanográficos (EE. UU.)
NRC	Ministerio de Recursos Naturales del Canadá
OHI	Organización Hidrográfica Internacional
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PSI	Proveedor de servicios de Internet
PACT	Herramienta de configuración para el procesamiento automatizado
PSMSL	Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar
PSTN	Red pública de telefonía conmutada
PTT	Plataforma de transmisión terminal (del sistema ARGOS)
PTWC	Centro de alerta de tsunamis del Pacífico
PTWS	Sistema de alerta de tsunamis del Pacífico
PZR	Punto de rango cero
RADAR	Detección y localización por radio
REDMAR	Red de Mareógrafos de Puertos del Estado de España
RINEX	Formato independiente de intercambio de datos de navegación (para datos de GNSS)
RLR	Referencia local revisada (conjunto de datos del PSMSL)
RSM	Marca de medición de referencia
RUDICS	(Protocolo de) soluciones de conectividad digital ilimitada de interconexión de redes basada en routers

SANHO	Organismo Hidrográfico de la Marina de Sudáfrica
SATOI	Sistemas de alerta de tsunamis en el océano Índico
SCP	Protocolo de copia segura
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (Chile)
SHOM	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina (Francia)
SIM	Módulo de identidad del abonado
SLMF	Servicio de Observación del Nivel del Mar (de la COI en VLIZ)
SMT	Sistema Mundial de Telecomunicaciones
SO	Offset del sensor
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (Universidad de La Rochelle)
TASK	Kit de programas informáticos para el análisis de mareas (del NOC)
TCR	(Datos en) tiempo cuasi real
TCXO	Oscilador de cristal con compensación de temperatura
TGBM	Cota de referencia del mareógrafo
TGZ	Cero del mareógrafo
TIGA	Proyecto de mareógrafos del IGS
TR	Tiempo real
UHSLC	Centro sobre el Nivel del Mar de la Universidad de Hawái
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
VLIZ	Instituto Marino de Flandes
VSAT	Terminal de apertura muy pequeña
WCDAS	Estación de Comando y Adquisición de Datos de Wallops
WDS	Sistema Mundial de Datos (del ICSU)
WHSU	Unificación Internacional de los Sistemas de Altura

Anexo 3 :

Contenido de un boletín del SMT y ejemplo de un mensaje de plataforma de recogida de datos en código CREX

Contenido de un boletín del SMT

Encabezamiento abreviado

Los encabezamientos de la OMM se determinan utilizando las definiciones de dicha organización. Un ejemplo de encabezamiento procedente de un mareógrafo del SHOM sería SZIO01 EUMS 031216.

El código del encabezamiento de un boletín especifica el tipo y forma de los datos, junto con la información geográfica (6 caracteres, en este caso SZIO01). Los dos primeros caracteres del código identifican el tipo de datos: para los datos de mareógrafos, se utiliza SZ, puesto que "SZ está asignado para datos del nivel del mar y datos de tsunami en niveles bajos del océano en cualquier clave alfanumérica, particularmente en CREX".

Los dos siguientes caracteres identifican la región o zona de la plataforma de recogida de datos: IO designa el océano Índico (CA, el Caribe, etc.) y los números diferencian los boletines, pero no tienen un significado específico.

A continuación, el indicador de ubicación de origen representa la estación que produce o recopila el boletín del SMT (4 caracteres, EUMS). El indicador de ubicación de origen de las plataformas de recogida de datos de la EUMESAT procesadas por el centro regional de telecomunicaciones de Offenbach es EUMS.

Después de estos dos códigos iniciales, se añade el del grupo fecha-hora que especifica el día del mes y la hora (HUC) de la observación o recopilación del boletín (6 caracteres, 031216 para la recopilación de un mensaje el tercer día del mes a las 12:16 HUC).

Identificador de código

El identificador de código indica el tipo de datos contenidos en el mensaje. CREX++, por ejemplo, identifica un mensaje en CREX

Message météorologique

El mensaje meteorológico consiste en los datos del boletín, que pueden contener hasta 15 kbyte en el caso de mensajes en ASCII o 500 kbyte de datos en código binario. El requisito de puntualidad en la entrega de boletines de las plataformas de recogida de datos a la interfaz del SMT establece un plazo de 10 minutos tras su recepción en el Centro de Control de Misiones de la EUMETSAT, lo que puede ser restrictivo para sistemas de alerta temprana, como alerta de tsunamis en el Mediterráneo y el Caribe. Las oficinas o institutos meteorológicos nacionales que cuentan con un equipo especial (aproximadamente 10.000 euros al año), como los centros de alerta de tsunamis, pueden acceder directamente al SMT para recibir los mensajes lo antes posible.

Los proveedores de datos sobre el nivel del mar, para los que varios minutos adicionales son aceptables, pueden visualizar y descargar los datos y mensajes sobre el nivel del mar a través del SLMF de la COI. Este servicio, desarrollado y gestionado por VLIZ bajo los auspicios de la COI, ofrece a los proveedores de datos de mareógrafos una herramienta web exclusiva para compartir sus datos. Es muy sencillo participar y los usuarios pueden configurar una estación del SMT en el mapa del sitio web con una simple solicitud de inicio de sesión. Es un servicio gratuito y no requiere ningún equipo. En 2014, mostraba alrededor de 900 mareógrafos de todo el mundo y casi la mitad utilizaba una conexión

Ejemplo de un mensaje de plataforma de recogida de datos con código CREX

El siguiente es un ejemplo de un mensaje generado por una plataforma de recogida de datos operada por el SHOM. Las plataformas de recogida de datos de mareógrafos del SHOM en la región del Mediterráneo cuentan con un intervalo de transmisión de 6 min, lo que permite la transmisión de 6 mediciones de 1 minuto del nivel del agua. Además, las 6 mediciones anteriores se añaden a la sección de datos para obtener mensajes de repetición que identifiquen redundancias. Por lo tanto, cada mensaje contiene 12 mediciones. Los descriptores de datos utilizados en el encabezamiento permiten que el usuario pueda especificar:

- ix. Versión CREX utilizada
- x. Tipo de datos
- xi. Ubicación del mareógrafo (lat./long.)
- xii. Tipo de incrementos
- xiii. Fecha de las mediciones
- xiv. Varias comprobaciones de calidad
- xv. Dátum de las mediciones

A continuación, se reproduce y descodifica el mensaje completo:

```
CREX++
T000103 A001 D01021 D06019 R01012 B22038++
4615833 -00122056 FR034 2013 07 01 13 25 //// 11 07 00 01
04038 04023 04009 04002 03989 03975 03962 03951 03934 03922 03907 03907++
7777
```

Interpretación del ejemplo:

Línea	Grupo	Significado
1	CREX	Indicador de un mensaje en CREX
2	T000103	Tabla principal de CREX número 00, edición 01, versión 03
A001	Tipo de datos 001:	datos de superficie – mar
D 01 021		Ubicación con alta precisión lat./long.
D 06 019		Identificación de informe de marea, controles del nivel del agua, incrementos de tiempo
R01012		Repetir 1 descriptor 12 veces
B22038		Elevación de la marea con respecto al dátum hidrográfico local
++		Final de la sección de datos
3	4615833	Latitud: 46,15833 grados
-00122056		Longitud: -001,22056 grados
FR034		Estación mareográfica del SHOM número FR034
2013		Año: 2013
07		Mes: julio
01		Día: 01
13		Hora: 13 h HUC
25		Minuto de la primera medición del mensaje: 25
////		Sin datos de la temperatura de la superficie del mar
11		Datos fiables

07 No se han realizado controles manuales del nivel del agua
00 Incremento de tiempo: 0 minutos aplicados al tiempo base de 2013/07/01 13:25 HUC
01 Incremento de tiempo de 1 minuto
4 04038 Elevación de la marea de 038 mm en 4 ocasiones a la hora 13:25 HUC,
04023 Elevación de la marea de 023 mm en 4 ocasiones a la hora 13:26 HUC,
.... etc. (12 mediciones en total)
++ Final de la sección de datos
5 7777 Final del mensaje en CREX

IOC Manuals and Guides

No.	Title
1 rev. 2	Guide to IGOSS Data Archives and Exchange (BATHY and TESAC). 1993. 27 pp. (English, French, Spanish, Russian)
2	International Catalogue of Ocean Data Station. 1976. (Out of stock)
3 rev. 3	Guide to Operational Procedures for the Collection and Exchange of JCOMM Oceanographic Data. Third Revised Edition, 1999. 38 pp. (English, French, Spanish, Russian)
4	Guide to Oceanographic and Marine Meteorological Instruments and Observing Practices. 1975. 54 pp. (English)
5 rev. 2	Guide for Establishing a National Oceanographic Data Centre. Second Revised Edition, 2008. 27 pp. (English) (Electronic only)
6 rev.	Wave Reporting Procedures for Tide Observers in the Tsunami Warning System. 1968. 30 pp. (English)
7	Guide to Operational Procedures for the IGOSS Pilot Project on Marine Pollution (Petroleum) Monitoring. 1976. 50 pp. (French, Spanish)
8	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 16)
9 rev.	Manual on International Oceanographic Data Exchange. (Fifth Edition). 1991. 82 pp. (French, Spanish, Russian)
9 Annex I	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 17)
9 Annex II	Guide for Responsible National Oceanographic Data Centres. 1982. 29 pp. (English, French, Spanish, Russian)
10	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 16)
11	The Determination of Petroleum Hydrocarbons in Sediments. 1982. 38 pp. (French, Spanish, Russian)
12	Chemical Methods for Use in Marine Environment Monitoring. 1983. 53 pp. (English)
13	Manual for Monitoring Oil and Dissolved/Dispersed Petroleum Hydrocarbons in Marine Waters and on Beaches. 1984. 35 pp. (English, French, Spanish, Russian)
14	Manual on Sea-Level Measurements and Interpretation. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. I: Basic Procedure. 1985. 83 pp. (English)
	Vol. II: Emerging Technologies. 1994. 72 pp. (English)
	Vol. III: Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. 2002. 55 pp. (English)
	Vol. IV: An Update to 2006. 2006. 78 pp. (English)
	Vol. V: Radar Gauges. 2016. 104 pp. and Supplement: Practical Experiences. 118 pp. (English)
15	Operational Procedures for Sampling the Sea-Surface Microlayer. 1985. 15 pp. (English)
16	Marine Environmental Data Information Referral Catalogue. Third Edition. 1993. 157 pp. (Composite English/French/Spanish/Russian)
17	GF3: A General Formatting System for Geo-referenced Data
	Vol. 1: Introductory Guide to the GF3 Formatting System. 1993. 35 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 2: Technical Description of the GF3 Format and Code Tables. 1987. 111 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 3: Standard Subsets of GF3. 1996. 67 pp. (English)
	Vol. 4: User Guide to the GF3-Proc Software. 1989. 23 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 5: Reference Manual for the GF3-Proc Software. 1992. 67 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 6: Quick Reference Sheets for GF3 and GF3-Proc. 1989. 22 pp. (English, French, Spanish, Russian)
18	User Guide for the Exchange of Measured Wave Data. 1987. 81 pp. (English, French, Spanish, Russian)

No.	Title
19	Guide to IGOSS Specialized Oceanographic Centres (SOCs). 1988. 17 pp. (English, French, Spanish, Russian)
20	Guide to Drifting Data Buoys. 1988. 71 pp. (English, French, Spanish, Russian)
21	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 25)
22 rev.	GTSP Real-time Quality Control Manual, First revised edition. 2010. 145 pp. (English)
23	Marine Information Centre Development: An Introductory Manual. 1991. 32 pp. (English, French, Spanish, Russian)
24	Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment. 1992. 178 pp. (English)
25	Standard and Reference Materials for Marine Science. Revised Edition. 1993. 577 pp. (English)
26	Manual of Quality Control Procedures for Validation of Oceanographic Data. 1993. 436 pp. (English)
27	Chlorinated Biphenyls in Open Ocean Waters: Sampling, Extraction, Clean-up and Instrumental Determination. 1993. 36 pp. (English)
28	Nutrient Analysis in Tropical Marine Waters. 1993. 24 pp. (English)
29	Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements. 1994. 178 pp. (English)
30	MIM Publication Series:
	Vol. 1: Report on Diagnostic Procedures and a Definition of Minimum Requirements for Providing Information Services on a National and/or Regional Level. 1994. 6 pp. (English)
	Vol. 2: Information Networking: The Development of National or Regional Scientific Information Exchange. 1994. 22 pp. (English)
	Vol. 3: Standard Directory Record Structure for Organizations, Individuals and their Research Interests. 1994. 33 pp. (English)
31	HAB Publication Series:
	Vol. 1: Amnesic Shellfish Poisoning. 1995. 18 pp. (English)
32	Oceanographic Survey Techniques and Living Resources Assessment Methods. 1996. 34 pp. (English)
33	Manual on Harmful Marine Microalgae. 1995. (English) [superseded by a sale publication in 2003, 92-3-103871-0. UNESCO Publishing]
34	Environmental Design and Analysis in Marine Environmental Sampling. 1996. 86 pp. (English)
35	IUGG/IOC Time Project. Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. 1997. 122 pp. (English)
36	Methodological Guide to Integrated Coastal Zone Management. 1997. 47 pp. (French, English)
37	International Tsunami Survey Team (ITST) Post-Tsunami Survey Field Guide. 2nd Edition. 2014. 120 pp. (English) Post-Tsunami Survey Field Guide. First Edition. 1998. 61 pp. (English, French, Spanish, Russian)
38	Guidelines for Vulnerability Mapping of Coastal Zones in the Indian Ocean. 2000. 40 pp. (French, English)
39	Manual on Aquatic Cyanobacteria – A photo guide and a synopsis of their toxicology. 2006. 106 pp. (English)
40	Guidelines for the Study of Shoreline Change in the Western Indian Ocean Region. 2000. 73 pp. (English)
41	Potentially Harmful Marine Microalgae of the Western Indian Ocean Microalgues potentiellement nuisibles de l'océan Indien occidental. 2001. 104 pp. (English/French)
42	Des outils et des hommes pour une gestion intégrée des zones côtières - Guide méthodologique, vol.II/ Steps and Tools Towards Integrated Coastal Area Management – Methodological Guide, Vol. II. 2001. 64 pp. (French, English; Spanish)
43	Black Sea Data Management Guide (Cancelled)
44	Submarine Groundwater Discharge in Coastal Areas – Management implications, measurements and effects. 2004. 35 pp. (English)

No.	Title
45	A Reference Guide on the Use of Indicators for Integrated Coastal Management. 2003. 127 pp. (English). ICAM Dossier No. 1
46	A Handbook for Measuring the Progress and Outcomes of Integrated Coastal and Ocean Management. 2006. iv + 215 pp. (English). ICAM Dossier No. 2
47	TsunamiTeacher – An information and resource toolkit building capacity to respond to tsunamis and mitigate their effects. 2006. DVD (English, Bahasa Indonesia, Bangladesh Bangla, French, Spanish, and Thai)
48	Visions for a Sea Change. Report of the first international workshop on marine spatial planning. 2007. 83 pp. (English). ICAM Dossier No. 4
49	Tsunami preparedness. Information guide for disaster planners. 2008. (English, French, Spanish)
50	Hazard Awareness and Risk Mitigation in Integrated Coastal Area Management. 2009. 141 pp. (English). ICAM Dossier No. 5
51	IOC Strategic Plan for Oceanographic Data and Information Management (2008–2011). 2008. 46 pp. (English)
52	Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk – and what to do about it. 2009. 82 pp. (English)
53	Marine Spatial Planning. A Step-by-step Approach. 2009. 96 pp. (English; Spanish). ICAM Dossier No. 6
54	Ocean Data Standards Series:
	Vol. 1: Recommendation to Adopt ISO 3166-1 and 3166-3 Country Codes as the Standard for Identifying Countries in Oceanographic Data Exchange. 2010. 13 pp. (English)
	Vol. 2: Recommendation to adopt ISO 8601:2004 as the standard for the representation of date and time in oceanographic data exchange. 2011. 17 pp. (English)
55	Microscopic and Molecular Methods for Quantitative Phytoplankton Analysis. 2010. 114 pp. (English)
56	The International Thermodynamic Equation of Seawater—2010: Calculation and Use of Thermodynamic Properties. 2010. 190 pp. (English)
57	Reducing and managing the risk of tsunamis. Guidance for National Civil Protection Agencies and Disaster Management Offices as Part of the Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Region – NEAMTWS. 2011. 74 pp. (English)
58	How to Plan, Conduct, and Evaluate Tsunami Exercises / Directrices para planificar, realizar y evaluar ejercicios sobre tsunamis. 2012. 88 pp. (English, Spanish)
59	Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. 2011. 70 pp. (Español solamente)
60	Global Temperature and Salinity Profile Programme (GTSP) — Data user's manual, 1st Edition 2012. 2011. 48 pp. (English)
61	Coastal Management Approaches for Sea-level related Hazards: Case-studies and Good Practices. 2012. 45 pp. (English)
62	Guide sur les options d'adaptation en zone côtières à l'attention des décideurs locaux – Aide à la prise de décision pour faire face aux changements côtiers en Afrique de l'Ouest / A Guide on adaptation options for local decision-makers: guidance for decision making to cope with coastal changes in West Africa / Guia de opções de adaptação a atenção dos decisores locais: guia para tomada de decisões de forma a lidar com as mudanças costeiras na África Ocidental. 2012. 52 pp. (French, English, Portuguese). ICAM Dossier No. 7.
63	The IHO-IOC General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) Cook Book. 2012. 221 pp. (English). Also IHO Publication B-11
64	Ocean Data Publication Cookbook. 2013. 41 pp. (English)
65	Tsunami Preparedness Civil Protection: Good Practices Guide. 2013. 57 pp. (English)

No.	Title
66	IOC Strategic Plan for Oceanographic data and Information Management (2013-2016). 2013. 54 pp. (English/French/Spanish/Russian)
67	IODE Quality Management Framework for National Oceanographic Data Centres (in preparation)
68	An Inventory of Toxic and Harmful Microalgae of the World Ocean (in preparation)
69	A Guide to Tsunamis for Hotels: Tsunami Evacuation Procedures (in preparation)
70	A guide to evaluating marine spatial plans. 2014. 96 pp. (English)