

## La red de mareógrafos del Instituto Geográfico Nacional. Inicios, estado y evolución. *The tide gauge network of the National Geographic Institute. Beginnings, status and evolution.*

MARTÍN GUIJARRO, Víctor <sup>(1)</sup>; PUENTE GARCÍA, Víctor <sup>(2)</sup>;

<sup>(1)</sup> Instituto Geográfico Nacional, Calle del General Ibáñez de Ibero, 3, 28003, Madrid, vmarting@mitma.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geográfico Nacional, Calle del General Ibáñez de Ibero, 3, 28003, Madrid, vpuente@mitma.es

### SUMMARY

*The tide gauge network of the National Geographic Institute of Spain (IGN) has a set of sensors that gather changes and variations of the mean level over the time. It started in the 19<sup>th</sup> century, when three tide gauges were set up in order to determine the national altimetry datum. The purpose was to establish the required infrastructure to start levelling works. The tide gauge network has been extended and its instruments have been improved since then. Nowadays National Geographic Institute has ten tide gauges located in Iberian Peninsula, Alboran Island and Canary Islands. In addition to maintenance works, network management and connection to High Precision Levelling Network (REDNAP), National Geographic Institute is analysing the historical series of its tide gauges. It is also comparing mean sea level changes with GNSS observations among which a new technique is standing out. It is called GNSS reflectometry (GNSS-R) and it is still under study.*

### PALABRAS CLAVE

Geodesia, Mareógrafo, Estación mareográfica, Nivel medio del mar, NMM, GNSS, GNSS-R, Reflectometría, Nivelación, Red de Nivelación de Alta Precisión, REDNAP, Instituto Geográfico Nacional.

### INTRODUCCIÓN

Los océanos, sus aguas y sus fondos siguen siendo tan interesantes como desconocidos a ojos de la ciencia. Son muchas las especialidades que han enfocado su campo de estudio sobre los interrogantes que lo envuelven. La geodesia, entre otras aplicaciones, ha tratado de dar respuesta a la compleja tarea de establecer una superficie de referencia, con la cual desarrollar un sistema de referencia de altitudes. El Instituto Geográfico Nacional (IGN), lleva desde sus inicios estableciendo un datum de altitudes para España, que serviría de base para la posterior red de nivelación y del Mapa Topográfico Nacional. Pero esta tarea no ha sido sencilla, debido tanto a las limitaciones iniciales del instrumental, como de las dificultades debidas a las dinámicas oceánicas, la variabilidad y cambios del nivel del mar. Este documento pretende, a modo de artículo sobre el estado del arte, exponer los trabajos llevados a cabo por el Instituto Geográfico Nacional con relación a los mareógrafos y el nivel del mar. Los inicios de la red de mareógrafos, su evolución a lo largo del tiempo, las actividades que se llevan a cabo y hacia dónde nos lleva la ciencia y la técnica en el futuro más próximo.

### INICIOS DE LA RED DE MAREÓGRAFOS DEL IGN

El Instituto Geográfico Nacional, como institución competente en geodesia en España, lleva desarrollando desde hace más de cien años la labor de registro y estudio del nivel del mar. El origen de esta red se remonta al siglo XIX, cuando, con el propósito de determinar un datum altimétrico para la España Peninsular, el cual serviría de origen de altitudes del Mapa Topográfico Nacional, estableció en Alicante el primer registro del nivel medio del mar.

La elección de Alicante no fue casual. Tras estudiar las limitaciones que las metodologías e instrumental de la época ofrecían, se buscó el emplazamiento en la costa española en la que las variaciones entre bajamar y pleamar fueran las menores posibles. El datum altimétrico de Alicante se estableció inicialmente en base a mediciones sucesivas en una regla de mareas entre los años 1870 y 1872. Estas medidas fueron referidas al clavo NP1, ubicado en el Ayuntamiento de Alicante. Desde allí, las altitudes se fueron trasladando al resto de España mediante líneas y ramales de nivelación que conformarían la primera Red de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP).

En 1874 se instaló el primer mareógrafo de registro continuo que funcionó en España, localizado en el puerto de Alicante. Posteriormente y de forma paralela a los trabajos de nivelación, se densificó la red construyendo nuevos mareógrafos en Santander (1876), Cádiz (1880) y Santa Cruz de Tenerife (1926); los dos primeros ya extintos, aunque se conservan todavía los edificios y los registros de datos. Con el devenir de los años y las sucesivas ampliaciones de las infraestructuras portuarias, en muchos casos los mareógrafos han cambiado de emplazamiento, construyéndose otros nuevos y enlazando mediante nivelación las señales de referencia de las estaciones antiguas y nuevas para conseguir la continuidad de la serie de datos. A mediados del siglo pasado se construye el mareógrafo de La Coruña (1948) y un segundo mareógrafo en Alicante (1953). Seguidamente se van estableciendo nuevas ubicaciones: Almería, Cartagena, Pasajes, Puerto del Rosario (Fuerteventura) y más recientemente, en Puerto de la Cruz y Los Cristianos, estos últimos en la isla de Tenerife.

En la actualidad, la red de mareógrafos del IGN consta de diez estaciones operativas a lo largo de toda la costa de la España Peninsular, las Islas Canarias y la Isla de Alborán: Alicante 1, Alicante 2, Cartagena, Almería, La Coruña, Alborán (Isla de Alborán), Santa Cruz de Tenerife (Isla de Tenerife), Puerto de la Cruz (Isla de Tenerife), Los Cristianos (Isla de Tenerife), Puerto del Rosario (Isla de Fuerteventura).

### TIPOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

Los mareógrafos más antiguos con los que cuenta el IGN tienen una disposición y estructura tradicional. Consisten básicamente en un edificio en el cual hay un pozo conectado al mar. Los ascensos y descensos del nivel medio del mar se corresponderán con los de la lámina de agua del pozo, con la ventaja de que el pozo reduce considerablemente influencias locales de la orilla del mar, como tráfico portuario, tormentas, etc.

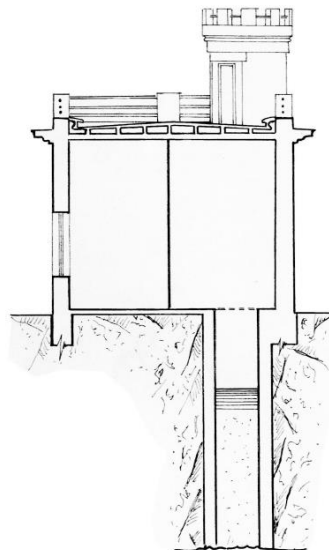


Figura 1: Alzado del mareógrafo de Alicante

- Registro gráfico: los movimientos del flotador se registran de forma continua sobre una banda de papel. Es la forma en la que se registraron las series históricas. Se dejaron de utilizar a finales del siglo XX.
- Registro digital mediante codificador angular: el movimiento se transmite por una boya que flota en el agua y que está unida a un cable que mueve una rueda. Posteriormente este movimiento se traduce en una señal digital.
- Sensor radar: permite la medición de las variaciones del nivel del mar de la lámina de agua mediante ondas de radar. Tiene la ventaja de que no es necesario el contacto entre el propio sistema de medición y el agua.

En la mayoría de los casos se combinan varias técnicas o sensores con el objeto de comparar los datos, corroborar y calibrar. En la Tabla 1 se muestra la instrumentación de que disponen actualmente los mareógrafos del IGN.

Tabla 1: Instrumentación de los mareógrafos del IGN

Mareógrafos	Codificador angular	Sensor radar	Barómetro
La Coruña 1	1	1	-
Alicante 1	1	1	-
Alicante 2	1	1	1
Alborán	-	1	-
Almería 2	1	1	-
Fuerteventura 2	-	2	-
Cartagena 2	1	1	-
Santa Cruz de Tenerife	-	2	-
Puerto de la Cruz	-	1	-
Los Cristianos	-	1	-

## ANÁLISIS DE LAS SERIES HISTÓRICAS

La importancia de un mareógrafo aumenta con los años y los datos que va registrando. Así pues, el IGN cuenta con abundante documentación histórica de mareógrafos como Alicante, Santander o Santa Cruz de Tenerife. Para el estudio de estas series se requiere un proceso de digitalización, ya que hasta finales del siglo XX la mayoría de los mareógrafos registraban únicamente en papel. De igual modo el proceso de análisis de los datos registrados por los mareógrafos ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, al igual que la instrumentación, captura de la información y almacenamiento de la misma.

En un principio, los valores de marea se obtenían midiendo directamente sobre el registro gráfico longitudes o superficies con los que obtener los valores y promedios. Posteriormente se procedió a la digitalización de la curva en mesa digitalizadora, obteniendo de una imagen vectorial los valores de la curva. Actualmente, cuando se trata de recuperar datos históricos registrados en banda, se escanea la imagen y se digitaliza la misma para obtener los valores.

Hoy en día, todos los mareógrafos poseen registradores digitales, por lo que este proceso no es necesario ya que se transmiten en tiempo real a la base de datos donde se almacenan.

El estudio de las series históricas revela el ascenso del nivel medio del mar, debido fundamentalmente al cambio climático. Permite también realizar análisis de las dinámicas oceánicas, y las diferencias entre el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico, así como sus diferencias altimétricas. El análisis de series históricas ha permitido la publicación de varios artículos, como Cádiz [1] Marcos M et al. (2011), Tenerife [2] Marcos M et al. (2013) o Alicante y Santander Cádiz [1] Marcos M et al. (2020).

## NIVEL MEDIO DEL MAR Y NIVELACIÓN

Al ubicar un mareógrafo, se persigue la máxima estabilidad y la mínima alteración a lo largo del tiempo. No obstante, pueden suceder multitud de factores que modifiquen y afecten de alguna manera al mareógrafo y el registro óptimo de sus datos. Factores como obras en las instalaciones portuarias, accidentes con barcos, subsidencias y asentamientos de la dársena o dique donde se sitúa el pozo, acumulación de arena en el fondo del mismo o el deterioro del mareógrafo debido a temporales, entre otras causas, afectan negativamente al registro de datos y a la propia permanencia del mareógrafo.

Para tener un control altimétrico cada estación tiene un clavo de nivelación situado en el brocal del pozo o lo más próximo al punto de medida, denominado *Bench Mark* (BM). Es en esta señal sobre la que se refiere el nivel del mar. Para controlar los posibles movimientos verticales que pueda experimentar el mareógrafo, esta señal se enlaza con otra situada en una zona que se considera estable y a la que irán referidos los cálculos finales de niveles medios, la señal *Join Mark* (JM). Resulta pues fundamental ejecutar periódicamente un control altimétrico de cada mareógrafo. El método empleado es la nivelación geométrica. Se nivela desde la *Bench Mark* y otras señales en los alrededores del mareógrafo hasta otras señales, más estables, fuera de la influencia del puerto, el mareógrafo y los factores negativos que puedan alterarlos (*Join Mark*). Lo idóneo es tener un control altimétrico de todos estos cambios, para poder conocer su valor, causa y así poder corregir su efecto en las series de datos.



Figura 2: Trabajos de nivelación del mareógrafo de Puerto de la Cruz, abril 2022

Además, resulta imprescindible enlazar todos los mareógrafos a REDNAP, mediante ramales de nivelación, ya que a partir de uno o varios mareógrafos es como se establece el datum altimétrico. Lógicamente, tanto el propio enlace como los trabajos de control altimétrico se hacen siguiendo el pliego de prescripciones técnicas de REDNAP, para el aseguramiento de unas homogéneas metodologías de trabajo, precisiones y resultados en las nivelaciones.

### APLICACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS)

El Sistema de Navegación por Satélite (GNSS) es una técnica de geodesia espacial que permite conocer la posición de puntos sobre la superficie terrestre por medio de la observación a satélites. El IGN mantiene y gestiona estaciones permanentes GNSS en varios de sus mareógrafos, incluso en mareógrafos de otras instituciones como Puertos del Estado (PdE). Este proceder responde a una necesidad mutua de ambas técnicas: en los mareógrafos, el uso del GNSS permite disponer de un nuevo sensor para detectar posibles cambios en la posición del emplazamiento, debidos a alteraciones, subsidencias u otros fenómenos como los mencionados en el apartado anterior. Para la Red Española GNSS (ERGNSS), supone la densificación de la red con la instalación de nuevas estaciones permanentes GNSS en zonas de costa, en emplazamientos que ya previamente contaban con alimentación eléctrica y comunicación a Internet. En la Tabla 2 se recogen los mareógrafos en España equipados con una estación GNSS.

Tabla 2: Mareógrafos en España equipados con una estación GNSS

Mareógrafos	Titularidad Mareógrafo	Estación Permanente	Titularidad GNSS
A Coruña 1	IGN	ACOR	IGN
Langosteira	PdE	LNGS	IGN-PdE
Gijón 2	PdE	XIX1	IGN-PdE
Barcelona 2	PdE	BCL1	IGN-PdE
Tarragona	PdE	TRRG	IGN-PdE
Alicante 2	IGN	ALAC	IGN
Cartagena 2	IGN	CARG	IGN
Almería	IGN	ALM1	IGN
Tarifa	IEO	TAR0	IGN
Huelva 5	PdE	HUE1	IGN-PdE
Melilla	PdE	MLLL	IGN-PdE
Palma de Mallorca	PdE	MAL1	IGN-PdE
Sta. Cruz de Tenerife	IGN	TN01	IGN
Sta. Cruz de Tenerife 2	PdE	TN01	IGN
La Gomera	PdE	GOM1	IGN-PdE

En el resto de mareógrafos, tanto del IGN como de Puertos del Estado (PE) o el Instituto Español de Oceanografía (IEO), suelen estar enlazados a alguna estación permanente GNSS que, no estando en el propio emplazamiento del mareógrafo, está en las inmediaciones y se ha nivelado.

### DETERMINACIÓN DEL NMM MEDIANTE REFLECTOMETRÍA GNSS

La reflectometría GNSS (GNSS-R) es una técnica que permite detectar y medir los cambios y variaciones que se puedan producir en el entorno circundante a una estación permanente mediante el análisis exclusivamente de señales reflejadas. Estas señales llegan a la antena GNSS rebotadas de alguna superficie como el suelo, la cubierta vegetal, nieve o una lámina de agua.

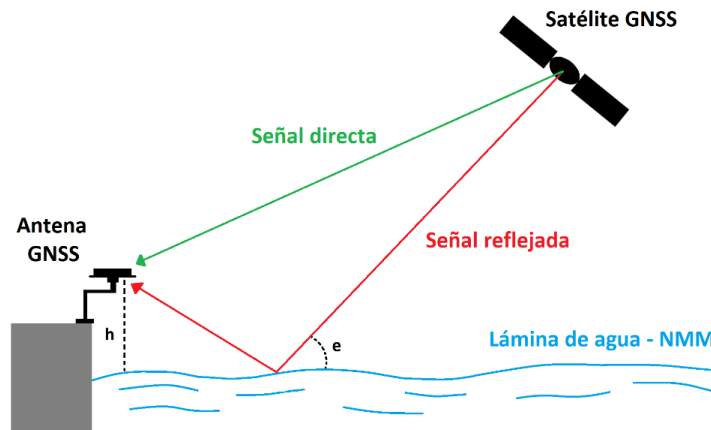


Figura 3: Esquema GNSS-R para determinar el NMM

La metodología consiste en seleccionar valores de elevación y acimut entorno a la estación que sean de interés, de forma que se pueda asegurar que los datos registrados procedan exclusivamente de señales reflejadas por la superficie del agua en este caso. A continuación se analizan los observables de señal-ruido (*signal to noise ratio* o SNR) cuya variación está asociada a los cambios en la altura de la superficie reflectante.

Se ha llevado a cabo una prueba piloto con las estaciones GNSS que están en los mareógrafos de Barcelona (BCL1, Figura 4), Alicante (ALAC) y Palma de Mallorca (MAL1) utilizando la metodología propuesta por *Strandberg*, [4] *Strandberg et al.* (2016). Los resultados se han comparado posteriormente con las variaciones registradas por los propios sensores radar de cada mareógrafo para el mismo periodo de tiempo, viendo que los resultados son coherentes con un error medio cuadrático de unos 3 cm [5] *Puente y Valdés* (2019). En la Figura 5 se muestra el registro del nivel del mar obtenido mediante RADAR y el estimado mediante GNSS-R para los dos primeros meses del año 2022 en la estación de BCL1.

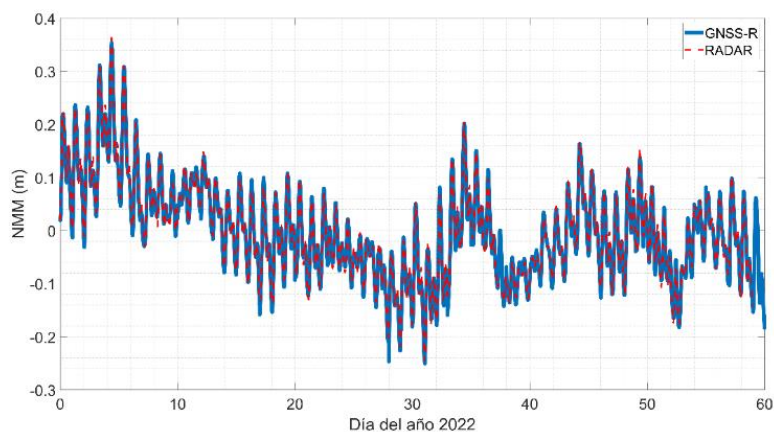


Figura 5: Comparación serie del mareógrafo de Barcelona con la estación permanente GNSS BCL1 en 2022.

El uso de esta nueva técnica permitiría usar los GNSS en un nuevo enfoque, analizando y cuantificando las variaciones debidas a las señales reflejadas, que suelen ser las que tradicionalmente se han venido desechando de todos los cálculos y procesamientos GNSS precisamente por su peor calidad. La reflectometría GNSS puede ser un complemento idóneo en el registro del nivel del mar de un mareógrafo, pues permitiría comprobar y contrastar los datos del radar o del codificador angular, completando posibles huecos en las series de datos en caso de fallar alguno de los otros dispositivos.

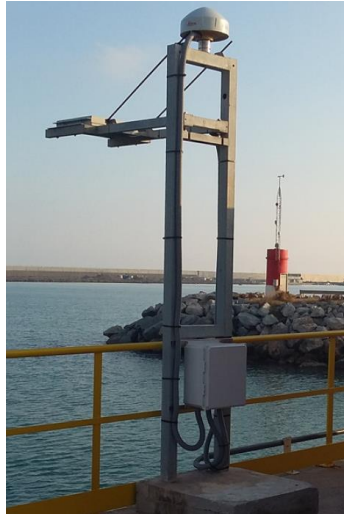


Figura 4: Mareógrafo de Barcelona y estación permanente GNSS BCL1

## PUBLICACIÓN DE DATOS

El IGN dispone de un [servicio](#) de consulta de los datos de todos sus mareógrafos. Además, comparte los datos con Puertos del Estado para que también se puedan consultar junto a sus mareógrafos en el visor [Portus](#). También se publican los datos en visores y servicios de organizaciones de ámbito internacional, como el *Permanent Service for Mean Sea Level* ([PSMSL](#)), *Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales* ([SONEL](#)) o *Global Sea Level Observing System* ([GLOSS](#)).

## SISTEMA DE ALERTA DE TSUNAMIS

Los mareógrafos también se utilizan en otras Áreas del IGN, por ejemplo intervienen en el Sistema de Alerta de Tsunamis. Este sistema, pionero en España, se encarga de registrar, analizar y alertar de cualquier evento sísmico que tenga su foco en el lecho marino y que pueda producir un tsunami que llegue a nuestras costas. Los mareógrafos, permitirían constatar fehacientemente el momento en el que la ola alcance tierra firme, así como su envergadura y dimensiones.

Para ello, además de los mareógrafos del IGN antes citados, se cuenta con otros específicos para el sistema de alerta de tsunamis, que son los siguientes: Mahón (Menorca), Ciudadela (Menorca). Cartagena, Ceuta, Cádiz, Garachico (Tenerife) Y Tazacorte (La Palma).

Además, las estaciones mareográficas de las islas Canarias, y en concreto las de Puerto de la Cruz y Los Cristianos en la isla de Tenerife se instalaron para recoger información para el Servicio de Vigilancia Volcánica del IGN. Conclusiones



Figura 6: Mapa con los mareógrafos que participan en la Red de Alerta de Tsunamis

## CONCLUSIONES

El Instituto Geográfico Nacional cuenta con una nutrida red de mareógrafos desplegados por la práctica totalidad de las costas españolas y todos los océanos que las bañan. La antigüedad de sus registros, da un valor añadido si cabe a esta red, ya que permiten análisis temporales muy completos en sus mareógrafos. La llegada de Internet, las telecomunicaciones y el avance de la instrumentación han permitido una mejor captura, gestión y almacenamiento de los datos, lo que también repercute en los usuarios finales, ya que facilita la publicación y libre distribución de los mismos.

La irrupción del GNSS ha permitido disponer de una nueva técnica para detectar posibles variaciones en los mareógrafos, como subsidencias o deformaciones en el emplazamiento. Además, con la reflectometría GNSS ha quedado probada para el futuro su aplicabilidad para medir el nivel del mar, pudiendo usarse en lugares donde no exista una red de mareógrafos previa y a un menor coste y mantenimiento que los mareógrafos convencionales.

## REFERENCIAS

- [1] Marcos M, Puyol B, Wöppelmann G, Herrero C, Garcia-Fernandez MJ. (2011): "The long sea level record at Cadiz (southern Spain) from 1880 to 2009". *J. Geophys Res* 116:C12003, doi:10.1029/2011JC007558
- [2] Marcos M, Puyol B, Calafat FM, Wöppelmann G. (2013): "Sea level changes at Tenerife Island (NE Tropical Atlantic) since 1927". *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, doi:10.1002/jgrc.20377
- [3] M. Marcos, B. Puyol, A. Amores, B. Pérez Gómez, M.A. Fraile, S. Talke. (2020): "Historical tide-gauge sea-level observations in Alicante and Santander (Spain) since the 19th century". EGU 2020
- [4] Strandberg, J.; Hobiger, T.; Haas, R. (2016): "Improving GNSS-R sea level determination through inverse modeling of SNR data". *Radio Sci.* 2016, 51, 1286–1296.
- [5] Puente V y Valdés M., (2019): Sea level determination in the Spanish coast using GNSS-R. *Proceedings 2019*, 19, 11. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019019011>