

Implementación CGPS y altimetría en los Puertos de Ibiza, l'Estartit y Barcelona para monitorización del nivel del mar

J. J. Martínez Benjamín¹, M. A. Ortiz Castellón², A. Ruiz², E. Bosch², A. Termens², M. Martínez García¹, X. Martínez de Osés¹, B. Pérez Gómez³, G. Rodríguez Velasco⁴, F. Pros⁵, J. Gili¹, A. Tapia¹ y R. López¹

¹ Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, 08028 Barcelona

² Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC), Barcelona

³ Puertos del Estado (PE), Madrid

⁴ Universidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid

⁵ Puerto de Barcelona, Barcelona

Resumen

Dos campañas aéreas con el LIDAR Optech ALTM-3025 del ICC (Instituto Cartográfico de Cataluña) fueron realizadas el 16 de Junio de 2007 de día con un Partenavia P-68 y el 12 de Octubre de 2007 de noche con un Cessna Caravan 208B. La validación posible de esta nueva tecnología LIDAR puede ser útil para suministrar medidas en áreas costeras, de unos 15 a 20 km desde la línea de costa, donde la altimetría radar por satélite da problemas severos debido al amplio haz («footprint») que abarca zona de tierra. La segunda campaña aerotransportada se realizó coincidiendo con el paso del satélite ICESat provisto de un láser altímetro. Se describe la situación actual de las infraestructuras CGPS en Ibiza, l'Estartit y Barcelona así como sus aplicaciones a la monitorización del nivel del mar y calibración altimétrica. El objetivo principal es la integración de datos geodésicos espaciales, aerotransportados e in-situ para establecer áreas de calibración altimétrica en el Mediterráneo Occidental en el marco del estudio del Cambio Global.

Palabras clave: mareógrafo, LIDAR, altimetría láser, GPS, nivel del mar.

Abstract

CGPS Implementation and Altimetry in the Ibiza, l'Estartit and Barcelona Harbours for Sea Level Monitoring

Two airborne calibration campaigns carrying an Optech Lidar ALTM-3025 (ICC) were made on June 16, 2007 with a Partenavia P-68 and October 12, 2007, with a Cessna Caravan 208B flying along two ICESat target tracks including crossover near l'Estartit. The validation of this new technology LIDAR may be useful to fill coastal areas where satellite radar altimeters are not measuring due to the large footprint and the resulting gaps of about 15-30 km within the coastline. The second airborne campaign was made at night at the same time of the ICESat overflying. A description of the actual geodetic CGPS (Continuous GPS) infrastructures at Ibiza, l'Estartit and Barcelona is presented as their applications to sea level monitoring and altimeter calibration. The main objective is the integration of spaceborne, airborne and in-situ data for the establishment of altimeter calibration areas in the western Mediterranean in the framework of Global Change.

Key words: Tide gauge, LIDAR, laser altimetry, GPS, sea level.

Introducción

El nivel del mar es una variable medioambiental de importancia ampliamente reconocida en muchas disciplinas científicas como parámetro de control en procesos dinámicos costeros o procesos climáticos en los sistemas atmósfera-océano así como en aplicaciones geodésicas y medioambientales en la Ingeniería. La fuente principal de datos de nivel del mar son las redes nacionales de mareógrafos en la costa, en España perteneciendo a diferentes instituciones como el Instituto Geográfico Nacional (IGN), Puertos del Estado (PE), Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), etc. Los mareógrafos miden el nivel del mar relativo a la tierra. Buenos modelos de mareas existen en el Mediterráneo Occidental. Criticamente dependen de la información batimétrica precisa que ha mejorado recientemente. La variación del nivel del mar para períodos largos ha sido cuantificada recientemente usando datos del Topex/Poseidón, Jason-1/2, ERS-1/2, Envisat y mareográficos a largo período (varias décadas hasta 100 años).

Infraestructura geodesica en los puertos de Ibiza, l'Estartit y Barcelona

La instrumentación de las medidas del nivel del mar está siendo mejorada con la instalación de un nuevo mareógrafo radar de pulsos DATAMAR 3000C, de Geónica, S. L., en el Puerto de Barcelona en donde la Autoridad Portuaria de Barcelona (APB) ya dispone de una estación GPS, formada por un sensor de Leica Geosystems GRX1200 GG Pro y una antena AX 1202 GG capaz de realizar un seguimiento constante de las constelaciones NAVSTAR y GLONASS así como de la futura constelación GALILEO, en la nueva torre de control situada en el muelle de inflamables. Se espera constituya el conjunto una estación CGPS (*Continuous Global Positioning System*) de las redes ESEAS (*European Sea Level*) y TIGA (*GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring*).

Puertos del Estado dispone de un mareógrafo radar MIROS en el Puerto de Barcelona

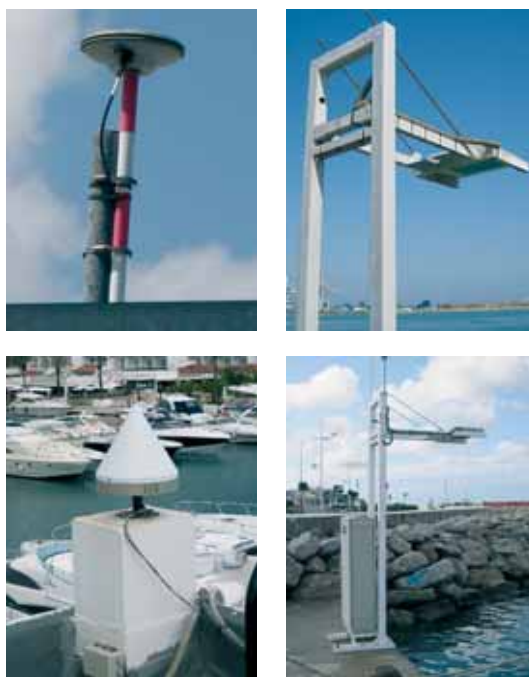


Figura 1. Infraestructura CGPS en el Puerto de Barcelona (imagen superior) y del Puerto de Ibiza (imagen inferior).

además de un CGPS en el Puerto de Ibiza básico en la campaña IBIZA2003 (Martinez-Benjamin *et al.*, 2004), (Martinez-Benjamin *et al.*, 2007) de calibración altimétrica del Jason-1. La determinación del sistema de referencia altimétrico portuario (SRAP), está basada en los registros históricos realizados con mareógrafos, de los niveles del mar en cada puerto. En el puerto de Barcelona desde hace 20 años se dispone de instrumentación mareográfica integrada en la red REDMAR de PE.

Las medidas mareográficas permiten la determinación de ceros ó niveles de referencia, la realización de dragados, el cálculo de constantes armónicas del puerto para predicción de la marea, el estudio de las tendencias del nivel medio del mar a largo plazo, la ayuda a la navegación en el puerto, contribución al sistema de alerta de los tsunamis, etc. (Fig. 1).

La ubicación de la estación GPS en el Puerto de Barcelona es particularmente adecuada debido a la proximidad del mareógrafo que estaría ubicados a escasos 50 m. de la torre de control posibilitando que se tengan cubiertas tanto las necesidades de posicionamiento para la topografía terrestre como pa-

ra la topografía hidrográfica. Esta proximidad permite la reiteración de datos no totalmente iguales que utilizan tipologías de análisis diferentes y complementarias, siempre que estén ligados altimétricamente con precisión. El conjunto mareógrafos-GPS se enlazarán con la red de nivelación REDNAP del IGN y la Red de Nivelación de Cataluña Xda del ICC mediante nivelación de alta precisión 1 mm/km.

Los datos mareográficos son esenciales para elaborar la batimetría pues conectan los trabajos batimétricos con el sistema de referencia altimétrico del Puerto de Barcelona (SRAP) permitiendo la determinación de los fondos. La cartografía precisa en el área portuaria, adquiere una importancia capital desde el momento que el puerto empieza a ser visitado por buques de grandes calados. No es habitual la visita de grandes buques cisterna, a excepción de los buques gaseosos, pero sí, en cambio de grandes portacontenedores. Este tipo de buques precisan de un margen de seguridad que solo una batimetría exacta puede proporcionarles.

La Facultad de Náutica de la UPC dispone de una estación meteorológica DAVIS PRO2 que consiste en un conjunto de sensores de estado sólido integrados (*Integrated Sensor Suite*, ISS). El ISS contiene sensores de presión atmosférica, temperatura y de humedad.

En el Puerto de l'Estartit se instaló un mareógrafo de flotador en 1990 que ha funcionado en el mismo lugar hasta octubre de 2006 registrando los datos medios del nivel del mar cada dos horas, junto a las condiciones meteorológicas, y suministrando series temporales de buena calidad de la altura del nivel del mar a nivel centimétrico similar a la magnitud de las mareas en estas áreas del Mediterráneo. Fue de particular interés para las campañas marinas de calibración altimétrica absoluta de los satélites Topex/Poseidon (marzo 1999 y Julio 2000) y Jason-1 (agosto 2002), realizadas en el área del Cabo de Begur. En mayo de 2008 ha sido reinstalado en un lugar próximo al anterior, punto 314049003, vértice geodésico (clavo próximo al mareógrafo) de la Red Utilitaria del ICC, continuando la generación de series temporales de nivel del mar (Fig. 2).



Figura 2. Mareógrafo del Puerto de l'Estartit.

Campañas lidar aerotransportadas

La novedad de la campaña aerotransportada se basa en la aplicación de la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) al ámbito marino y a la determinación de cuáles son las condiciones óptimas de trabajo bajo las que los modelos de la superficie marina que se deriven pueden ser de utilidad para otros campos o técnicas como son la altimetría espacial, por ejemplo, para la calibración/validación de satélites altimétricos de forma más eficiente que en la actualidad.

Una ventaja del LIDAR aerotransportado es que a diferencia de otras tecnologías de observación de la Tierra (como por ejemplo la altimetría) las observaciones pueden acercarse mucho más a la línea de la costa sin que ello suponga una contaminación de las medidas realizadas.

Actualmente se trabaja activamente en Altimetría costera en el procesado de las formas de onda y reprocesado de los datos altimétricos dentro de los proyectos COASTALT (ESA) y de PISTACH (CNES).

El objetivo de las campañas aerotransportadas era la evaluación de la aplicabilidad del LIDAR como método de determinación del nivel

del mar en la zona costera y su complementariedad con respecto a la calibración clásica altimétrica en mar abierto. Se ha realizado un primer vuelo sobre el área de l'Estartit mediante el avión Partenavia P-68 del Instituto Cartográfico de Cataluña el 16 de Junio de 2007, aproximadamente de las 11 h a las 13 h 30 m. En la Figura 3 se muestra el avión, la boya GPS, el Lidary la trayectoria realizada.

En el cálculo de la trayectoria GPS/INS en el sistema de referencia ETRS89, se utilizaron las estaciones permanentes de referencia de la red CATNET del ICC: CASS, MATA y PLAN. Finalmente se obtiene un fichero ASCII por pasada incluyendo el tiempo GPS, las coordenadas X,Y y altura elipsoidal en UTM huso 31 sobre ETRS89 a una frecuencia de 200 Hz y la intensidad de cada punto láser, tanto para el primero como el segundo eco (Moysset, 2008). La precisión interna que se obtiene en el proceso de cálculo de la trayectoria GPS/INS es del orden de unos 10 cm. Posteriormente se realiza un control de calidad de la trayectoria GPS/IMU y del cálculo de los puntos láser así como del ajuste además de la clasificación de los ecos, filtrado e incidencia del oleaje. Se utilizó una boya GPS que se mantuvo en el puerto de l'Estartit entre las 10 h y las 13:30. Una estación de referencia GPS fue instalada en Aiguablava.

La segunda campaña con el avión CESSNA Caravan 2083 (ICC) se realizó de noche el 12 de octubre de 2007. Ha estado basada en la intercalibración del Lidar aerotransportado, con excelente resolución espacial de unos 80 cm, y el láser altimétrico GLAS del ICESat, que suministra alturas elipsoidales muy precisas.

Altimetría laser por satélite

ICESat fue lanzado el 13 de enero de 2003 y colocado en órbita circular a 600 km de altura y con 94° de inclinación. Tiene un subperíodo de repetición de 33 días. Estaba dotado de tres Lasers Nd:Yag L1, L2 y L3, trabajando a 1.064 nm (IR próximo) para altimetría y a 532 nm (verde) para estudios atmosféricos. El footprint es de unos 70 m y el espaciado a lo largo de la traza es de 170 m aproximadamente (Schutz *et al.*, 2005). La misión ha terminado el 11 de octubre de 2009.



Figura 3. Campaña LIDAR del 16 de junio de 2007.

Las elevaciones de ICESat/GLAS sobre el océano son suministradas en el producto global designado como GLA06 «*Elevation*», y el producto oceánico GLA15 «*Ocean Elevation*». Sobre tierra, GLA06 y GLA14 «*Land/Canopy elevation*», superficies como la vegetación pueden producir múltiples picos en las formas de onda «*Waveforms*». Para la comparación con los vuelos LIDAR como el del 12 de octubre de 2007, se usan GLA06 y GLA01, distribuidos por el NSDIC, *National Snow and Ice Data Center*. Los datos pueden obtenerse en www.nsidc.org, aunque en la colaboración UPC, Universidad Politécnica de Cataluña con CSR/UT, Center for Space Research/The University of Texas at Austin, se utilizan un sub-

ICESat Targets of Opportunity (TOOs) near Ibiza, l'Estartit, and Barcelona, Spain

Track	Pass Direction	Date/DOY		Off-Nadir Target Angle							
		L3g Oct-Nov 2006	L3h Mar-Apr 2007	L3i Oct-Nov 2007	L3j Feb-Mar 2008	L3k Oct-Nov 2008					
Ibiza											
0023	Des	31 Oct/304	0.51°	18 Mar/077	0.46°	09 Oct/282	0.55°	24 Feb/055	0.53°	-	
0209	Asc	13 Nov/317	1.22°	31 Mar/090	1.18°	21 Oct/294	1.07°	07 Mar/067	1.10°	-	
l'Estartit											
0075	Asc	04 Nov/308	1.01°	22 Mar/081	1.05°	12 Oct/285	1.06°	27 Feb/058	1.03°	14 Oct/288	1.01°
0142	Des	08 Nov/312	3.60°	26 Mar/085	3.49°	17 Oct/290	3.64°	-	-	-	
0261	Des	16 Nov/320	3.27°	03 Apr/093	3.28°	25 Oct/298	3.22°	11 Mar/071	3.30°	-	
Barcelona											
1310	Asc	-	-	-	-	-	-	-	-	6 Oct/280	2.23°
0023	Des	-	-	-	-	-	-	-	-	10 Oct/284	2.66°
0142	Des	-	-	-	-	-	-	03 Mar/063	4.20°	18 Oct/292	4.12°

Track	Pass Direction	L2d Nov-Dec 2008	L2e Feb-Mar 2009	L2f Oct 2009		
Ibiza						
0023	Des	-	-	07 Oct/280	0.35°	
0209	Asc	03 Dec/338	1.07°	- no data -	-	
l'Estartit						
0075	Asc	-	19 Mar/078	0.94°	10 Oct/283	0.92°
0142	Des	-	-	-	-	
0261	Des	- no data -	- no data -	-	-	
Barcelona						
1310	Asc	-	11 Mar/070	2.32°	02 Oct/275	2.25°
0023	Des	-	15 Mar/074	2.67°	-	-
0142	Des	[28 Nov/333	0.43°]	23 Mar/082	4.14°	-

Figura 4. Periodos de observación del ICESat en los puertos de Ibiza, Estartit y Barcelona

conjunto de datos focalizados en el área de estudio de Ibiza y l'Estartit. Todos los productos de ICESat/GLAS son descritos en la dirección <http://glas.wff.nasa.gov/>, en particular, los períodos operacionales de GLAS.

La campaña con el Laser 3, L3k, comenzó el 4 de octubre de 2008 y el fallo definitivo del Laser se produjo el 19 de octubre de 2008. Se pasó al Laser 2 comenzando L2d el 25 de noviembre y finalizando el 17 de diciembre de 2008. Se realizó un nuevo período operacional con el Laser 2, L2e, que comenzó el 9 de marzo y terminó el 11 de abril de 2009 (los 33 días). Finalmente otro período observacional, L2f, comenzó el 30 de septiembre y terminó con el fallo definitivo del Laser y la misión ICESat el 11 de octubre de 2009. El satélite dejó de funcionar después de solo unos 10 días y

medio. Se han realizado medidas de ICESat en las áreas de los puertos de Ibiza, Estartit y Barcelona (Fig.4).

Se muestra L3i, en el que la observación de GLAS el 12 de octubre de 2007 fue dirigida al área de l'Estartit al mismo tiempo que el avión Cessna del ICC sobrevolaba el lugar, así como las alturas hae sobre el elipsoide (TOPEX), en donde se diferencian las trazas de referencia (en puntos) de las trazas observadas por GLAS en observación oblicua (tras solicitud al *Goddard Space Flight Center GSFC/NASA*) a los lugares de calibración de Ibiza y l'Estartit (en trazo continuo) (Martínez-Benjamin *et al.*, 2008) (Fig.5).

Para estudiar el potencial del Lidar para conectar las medidas del nivel del mar de los mareógrafos en la costa con las medidas altimétricas en mar abierto se ha considerado la

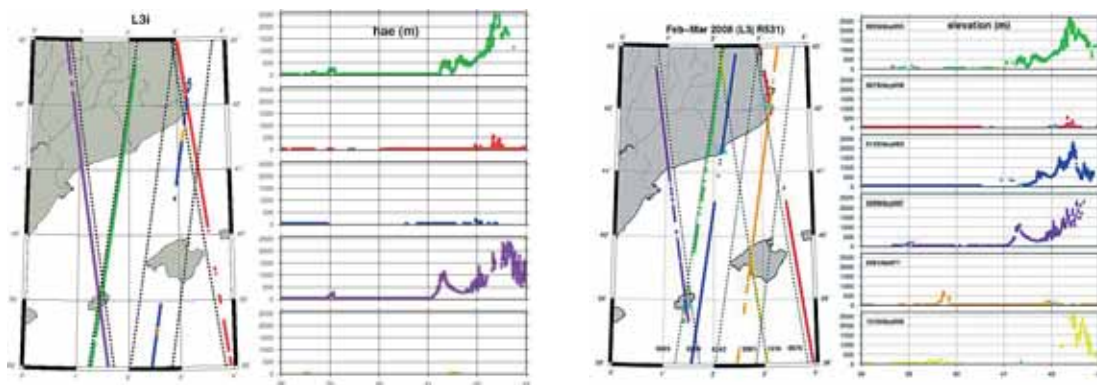


Figura 5. Observaciones laser de los periodos L3i y L3j

campana Lidar aerotransportada con vuelo sobre la traza de ICESat del 12 de octubre. El altímetro láser GLAS del ICESat suministra alturas elipsoidales y puede ser usado sobre tierra para calibrar el Lidar aerotransportado dentro del avión y en consecuencia puede ser utilizado sobre el océano para obtener la altura de la superficie marina SSH. Actualmente no hay ningún altímetro radar que suministre datos fiables a una distancia de la costa menor de unos 15 km, sin embargo hay mareas en aguas someras y fenómenos de dinámica oceánica que son observados por los mareógrafos pero no por la altimetría aunque un sistema Lidar podría ser usado para conectar estos dos sistemas diferentes de medidas. Dado que el Lidar aerotransportado está afectado por inclinaciones en actitud y bias, una calibración sobre tierra podría realizarse y solo la altimetría ICESat suministra elevaciones precisas sobre tierra en comparación a las mucho menos precisas del altímetro radar sobre tierra.

Agradecimientos

Se agradece a los dos revisores anónimos sus interesantes observaciones y sugerencias.

Este trabajo ha sido realizado dentro del Proyecto ESP2005-05829 y de la Acción Complementaria ESP2005-25306-E financiados por el Plan Nacional I+D+i del Ministerio de Educación y Ciencia.

Referencias

- MARTINEZ BENJAMIN, J. J., *et al.* 2004, Ibiza Absolute Calibration Experiment: Survey and Preliminary Results, *Marine Geodesy*, Taylor&Francis, Vol.27 (ISSN 0149-0419 print/1521-060X online).
- MARTINEZ BENJAMIN, J. J., *et al.* 2007, Campañas altimétricas de calibración en el Mediterráneo Occidental, *XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, Mar del Plata, Argentina.
- MARTINEZ BENJAMIN, J. J., SCHUTZ, B., URBAN, T., & ORTIZ CASTELLON, M. A. 2008, Space Borne Laser and Airborne Lidar Experiences at l'Estartit (Spain), *Internacional Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS2008*, Proceedings CD 4p., Boston, Massachusetts, Estados Unidos.
- MOYSSET, M. 2008, Informe del projecte campanyes LIDAR a l'Estartit, *Informe interno*, ICC.
- SCHUTZ, B., *et al.* 2005, Overview of the ICESat misión, *Geophysical Research Letters*, Vol.32, L21S01, doi:10.1029/2005GL024009.