

## Campañas altimétricas de calibración en el Mediterráneo Occidental

*Martinez Benjamin, Juan Jose<sup>a</sup>; Martinez Garcia, Marina<sup>a</sup>; Ortiz Castellon, Miquel Angel<sup>b</sup>; Rodríguez Velasco, Gema<sup>c</sup>; Martín Davila, Jose<sup>d</sup>; Garate Pasquin, Jorge<sup>d</sup>; Bonnefond, Pascal<sup>e</sup>; Perez Gomez, Begoña<sup>f</sup> and IBIZA2003Team*

<sup>a</sup>Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Dpt. Ingenieria del Terreno, Cartográfica y Geofísica, ETSECCPB, Barcelona, España, jj.benjamin@upc.edu, marina@fa.upc.es

<sup>b</sup>Institut Cartografic de Catalunya (ICC), Barcelona, España, mangelo@icc.es

<sup>c</sup> Universidad Complutense de Madrid (UCM), España Gema\_Rodriguez@mat.ucm.es

<sup>d</sup> Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (ROA), Cadiz, España, mdavila@roa.es, jgarate@roa.es

<sup>e</sup> Observatoire de la Côte d'Azur (OCA/GEMINI) Grasse, Francia, Pascal.Bonnefond@obs-azur.fr

<sup>f</sup> Puertos del Estado (PE), Madrid, España, bego@puertos.es

### RESUMEN

Tres experiencias en el Cabo de Begur para calibración altimétrica y mapeo del geoide marino realizadas en 1999, 2000 y 2002 son descritas. Una campaña más ha sido realizada en Junio de 2003 en el área de la Isla de Ibiza. Calibración absoluta directa estimando el bias del Alt-B del Topex fue realizada durante el overflight del satélite usando boyas GPS. La ventaja de este método es que no necesita el modelo de geoide ni el error de marea. Otro objetivo importante era obtener el perfil de la Superficie Media Marina a lo largo de las trazas del T/P o Jason-1 con boyas/catamarán GPS. Mapear la superficie marina para la calibración altimétrica indirecta tiene la ventaja de permitir la calibración de cualquier radar que cruce el área estudiada pero, en cambio, la desventaja es que el método requiere el conocimiento de la marea oceánica y el geoide lo que reduce la precisión de la estimación del bias por un factor 2.

Una contribución española a las experiencias de calibración ha sido el diseño de las Boyas y Catamarán GPS teniendo en cuenta diseños previos de la Universidad de Boulder en Colorado y las de Senetosa/Capraia. Para el mapeo de las áreas de calibración centradas en las trazas del satélite, el Catamarán era arrastrado por la patrullera Deva de la Marina Española. Una calibración directa adicional fue realizada el 14 de Junio. Datos complementarios fueron suministrados por cinco estaciones GPS de referencia localizadas en Ibiza, San Antonio y Portinatx., y por dos mareógrafos georeferenciados situados en los puertos de Ibiza y San Antonio. Presentamos los primeros resultados de la calibración del altímetro del Jason-1 usando el geoide marino obtenido en la campaña. Las actividades geodesicas (ej. GPS, nivelación) han permitido construir una red local muy precisa (pocos mm) relacionada a la europea, con un sistema de referencia compatible con el de las misiones altimétricas (ITRF2000).

Palabras Clave: Calibración. Altimetría. Gradiente del Geoide.

### ABSTRACT

Three Begur Cape experiences on radar altimeter calibration and marine geoid mapping made on 1999, 2000 and 2002 are overviewed. One campaign has also been made in June 2003 at the Ibiza island area. Direct absolute calibration estimating the Topex Alt-B bias was performed during the satellite overflight by using GPS buoys. The advantage of that method is that neither geoid modeling nor tidal error is needed. Other main objective was to map the profile of the Mean Sea Surface (mss) along the closest T/P and Jason-1 groundtrack. Mapping the marine surface for indirect

altimeter calibration has the advantage of allowing the calibration of any radar sensor that crosses the studied area but, in turn, the disadvantage is that the method requires ocean tide and geoid knowledge, which reduces the accuracy of the bias estimate by a factor of 2.

A technical Spanish contribution to the calibration experience has been the design of GPS buoys and GPS catamaran taking in account the University of Colorado at Boulder and Senetosa/Capraia. For the mapping of the extended calibration areas centered on satellite ground tracks, the catamaran was tracked by the Patrol Deva, from the Spanish Navy. An additional absolute altimeter direct calibration was performed on June 14. Complementary data came from five GPS reference stations deployed at Ibiza, San Antonio and Portinatx, and from vertically-referenced tide gauges located at Ibiza and San Antonio. We present first results on Jason-1 altimeter calibration using the marine geoid derived from data collected during the campaign. Moreover, the geodetic activities (e.g., GPS, leveling) has permitted to build a very accurate (few mm) local network linked to the European one, with a reference frame compatible with the satellite altimetry missions (ITRF2000).

Keywords: Calibration. Altimetry. Geoid gradient.

## Introducción

La calibración absoluta del altímetro Alt-B del TOPEX/POSEIDON (T/P) ha sido el objetivo de dos campañas de calibración realizadas en 1999 y 2000 en el Mediterráneo Occidental cerca del Cabo de Begur. La campaña del 15 al 18 del Marzo de 1999 fue dirigida a la calibración altimétrica directa mediante estimación del bias instrumental, Martínez-Benjamin et al. (2000). La campaña del 4 a 7 de Julio de 2000 consistió en la estimación de la superficie media marina MSS a lo largo de una traza ascendente del T/P con boyas GPS, orientada básicamente a la calibración altimétrica indirecta y a la consolidación de los resultados obtenidos en la calibración directa de 1999, Martínez-García et al. (2000). La zona geográfica escogida presenta características idóneas para las campañas como son la traza del satélite suficientemente próxima a la costa, la existencia a la región de estaciones GPS de la red CatNet y la Red de Nivelación de Alta Precisión de Cataluña (ambas del ICC), una buena cobertura de la órbita del satélite por estaciones láser SLR, altura significativa de las olas pequeña de unos 0,9m de media anual, señal de marea débil y por último, los puertos base como Llafranc o l'Estartit cercanos y bien comunicados.

La zona Noroeste del Mediterráneo ya ha sido desde hace años zona de calibración altimétrica del T/P y ERS-1 de la ESA, Menard et al. (1994), Bonnefond et al. (1998). Por otra parte las medidas realizadas con boyas GPS han demostrado su idonea aplicación a la estimación precisa del nivel del mar, Born et al. (1994), Schone et al. (2000).

Las boyas GPS representan una metodología operacional para la obtención del nivel medio de la superficie marina en el área de calibración y juntamente con los datos mareográficos en zonas costeras cercanas permitir la

calibración altimétrica indirecta. La utilización de boyas GPS permite además la medida instantánea del nivel del mar que combinado con el paso simultáneo sobre la vertical del satélite altimétrico conlleva la calibración absoluta del altímetro y la determinación del bias.

## Métodos de Calibración

La metodología utilizada en la calibración directa ha consistido en la comparación de la altura instantánea de la superficie marina, SSH, estimada por dos técnicas independientes simultáneas en el mismo punto geográfico. La SSH instantánea obtenida a partir de las medidas del altímetro Alt-B del TOPEX, es decir, la diferencia entre la altura orbital del satélite ( $h_{orbit}$ ) y la medida altimétrica ( $h_{alt}$ ) corregida básicamente de los errores troposférico e ionosférico, el bias del estado del mar y el retraso instrumental:

$$SSH_{TOPEX} = h_{orbit} - h_{alt}$$

Se compara este valor con la misma magnitud  $SSH_{GPS}$ , que puede ser considerada la medida «real» del nivel instantáneo del mar, estimado a partir de medidas obtenidas por boyas GPS colocadas en puntos de la traza del T/P, obteniéndose el bias del altímetro:

$$BIAS = SSH_{GPS} - SSH_{TOPEX}$$

Mediante medidas tomadas en mareógrafos de la costa, preferiblemente con datos recogidos a lo largo de un período suficientemente largo de tiempo, se pueden calcular correcciones geofísicas para ser aplicadas a la  $SSH_{GPS}$  instantánea obtenida con boyas GPS a lo largo de la traza del T/P, siempre y cuando la distan-

cia mareógrafo-punto de medida con boya GPS no sea demasiado grande.

### **Boyas GPS**

Las boyas de sendas campañas se diseñaron y construyeron en el Institut Cartografic de Catalunya, inspiradas en una boya tipo «wave rider» de la Universidad de Colorado en Boulder, introduciendo mejoras de estabilidad, estanqueidad y reduciendo al máximo la distancia del centro de fase de la antena GPS a la superficie del mar (fig.1).

Este tipo de boya consiste básicamente en una antena GPS, albergada directamente sobre un aro flotador mediante una pieza cilíndrica por su base y protegida por una cúpula en su parte superior, ambas piezas de metacrilato. La antena recibe las señales de los satélites GPS y las envía mediante un cable de conexión, debidamente preparado para no interferir en el movimiento libre de la boya sobre el agua, al receptor GPS que se encuentra situado en una embarcación auxiliar.

La concepción de esta boya, relativamente pequeña y de poco peso, es la de seguir el movimiento de las olas permaneciendo siempre en su superficie. Se debe tener en cuenta en el diseño de la misma los siguientes puntos conflictivos:

- a) Estanqueidad entre la base y la cúpula de metacrilato para evitar la entrada de agua a la antena.
- b) La disposición y características de la cúpula y el efecto que produce en la trayectoria de las señales GPS que le llegan.
- c) Las características de la cúpula, o sea el efecto que produce en la trayectoria de las señales GPS que llegan y su disposición respecto a la antena GPS.
- d) La correcta determinación de la geometría de la boya y en particular el valor de la distancia entre el centro de fase de la antena GPS y la línea de flotación del mar en calma.
- e) Estructura de la boya manejable, de fácil transporte y reciclable para ser utilizada en futuras campañas.

El diseño de las boyas GPS realizado en el ICC ha evolucionado desde las dos primeras realizadas en 1999 a la última realizada en el 2000.

Las mejoras se han concentrado en dotar de una mayor estabilidad a la estructura mediante la situación del centro de gravedad de la boya más cerca de la línea de flotación así como

un sellado más eficiente de la cúpula de metacrilato para preservar la antena situada al interior contra el agua salada y los efectos de humedad y corrosión.

La calibración de la boya GPS debe realizarse antes y después de cada campaña, con la boya preparada para su uso y en una zona cercana a la de estudio para que las características de flotación sean idénticas. Consiste en la medida de la distancia del centro de fase de la antena GPS a la superficie del mar midiendo sobre cuatro marcas distribuidas en cruz.



**Figura 1:** Boya GPS sobre el agua

### **Infraestructura Geodésica**

-CatNet: RED DE ESTACIONES PERMANENTES GPS DE CATALUÑA

Para el procesado de datos se han utilizado los observables obtenidos a partir de tres de las estaciones de la red CatNet del ICC, concretamente la estación situada en Bellmunt de Segarra (BELL), fig.2, otra en el Cap de Creus (CREU) y la tercera en Llivia (LLIV), y una cuarta estación emplazada temporalmente en el punto de la costa más cercano a la zona de paso del T/P, en el Cap de Begur (BEGU), fig.1.

La estrategia utilizada ha sido la solución de free-network solution, Zumberge et al. (1997), utilizando el software GIPSY-OASISII desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory, JPL. Esta estrategia proporciona precisión subcentimétrica en la estimación como parámetros constantes de las coordenadas de la estación, los retrasos del reloj y el retraso troposférico húmedo cenital (Wet Zenith Tropospheric Delay, WZTD).



**Figura 2:** Estación de referencia GPS temporal BEGU

#### -MAREOGRAFOS

En la campaña de 1999 bajo la coordinación de Puertos del Estado se instalaron dos mareógrafos en el Puerto de Llafranc. Uno era de presión y otro de flotador. Ambos mareógrafos fueron referenciados a una marca geodésica en el puerto, muy próxima a los dos mareógrafos, siendo periódicamente calibrados para controlar la concordancia entre sus medidas.

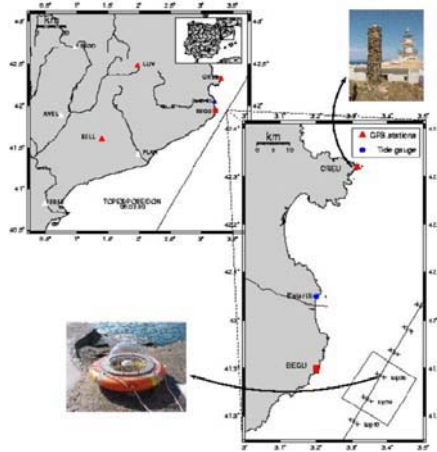
En la segunda campaña se trabajó únicamente con los datos del mareógrafo de l'Estartit. Se encuentra situado a unos 20-50 km de la zona donde se estimó la MSS. Se trata de un mareógrafo de flotador convencional situado en el interior del Puerto de l'Estartit. Se utilizaron datos del nivel del mar tomados en intervalos de 2 horas. La precisión de las medidas es alrededor de 2mm.

Las medidas se toman respecto al cero del mareógrafo, que está a 1,72 m por debajo de la marca geodésica de la XU (Red Utilitaria de Cataluña) que a su vez forma parte de la XdA (Red de Nivelación de Alta Precisión de Cataluña). Esta marca geodésica está clasificada en el ICC con el número 314 094 002 con las coordenadas UTMX=517199,76m, UTM Y=4655985,52m y H=+1,72m.

#### **Campañas de Calibración Altimétrica y Resultados**

En la campaña de 1999 se siguió la traza ascendente (187) del ciclo 239 el 18 de Marzo de las 8:15 UTC a las 12:00 UTC, fig.3. La calibración directa se realizó a las 8:45 UTC durante el sobrevuelo del T/P sobre las dos boyas GPS. En la campaña de 2000 se recorrió la misma traza ascendente del ciclo 287 el 6 de

Julio. La calibración directa se efectuó a las 7:34 durante el sobrevuelo del T/P sobre la boya GPS. Se realizó además una estimación de la MSS a lo largo de la traza desde las 7:29 UTC a las 16:57 UTC.



**Figura 3:** Zona geográfica de calibración altimétrica del T/P

Diferentes grupos con diferentes software de procesado de datos GPS obtuvieron el bias del altímetro Alt-B del TOPEX:

5,1 +/-6cm, campaña 1999, GIPSY, Krusinga et al. (1999)

6,8 +/-10cm, campaña 1999, KARS, Shum et al. (1999)

4,7 +/-9cm/7,6 +/-7cm, cam. 1999, GIPSY, Martínez -García et al. (2000)

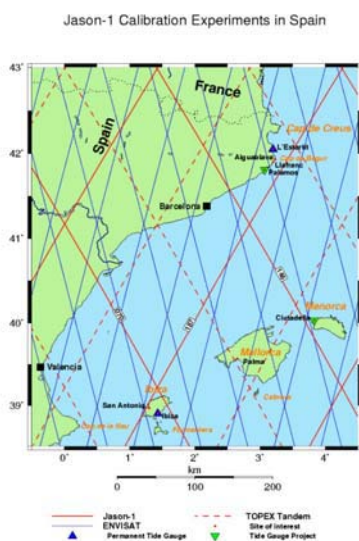
3,7 +/-4,9cm, campaña 2000, GIPSY, Martínez-García et al. (2000)

Además de la región del Cabo de Begur, la zona geográfica próxima a la Isla de Ibiza se considera muy conveniente para las futuras campañas de calibración teniendo en cuenta la distribución de las trazas de diferentes satélites altimétricos.

#### **Campaña IBIZA2003**

El objetivo de la experiencia española IBIZA 2003 (Figura 4), además de la implantación de la isla de Ibiza como área permanente de calibración en el Mediterráneo Occidental, era adquirir un conjunto amplio de datos GPS de nivel del mar alrededor de la isla de Ibiza según dos trazas nominales ascendente y descendente del Jasón-1, suficientemente denso en espacio y tiempo, para obtener el geoide local marino, te

niendo en cuenta que el principal resultado no era determinar la altura del geoide marino, sino la pendiente del geoide entre los datos altimétricos válidos en mar abierto y el lugar donde se encuentran los mareógrafos costeros localizados en Ibiza y San Antonio.



**Figura 4:** Zona geográfica de calibración altimétrica en el área Mediterránea Occidental

En esta campaña se utilizaron 5 estaciones de referencia GPS en tierra: una en Portinatx (PORT -antena y receptor Leica), dos en San Antonio (SANA- antenna y receptor ASTEC, SANB-antena y receptor Topcon) y dos en Ibiza (IBIA- antenna Trimble y receptor ASTEC, e IBIB, antenna y receptor Leica).

Se utilizó un catamarán para realizar medidas continuas del nivel del mar. Su diseño fue tomado del usado en Senetosa por P. Bonnefond. Llevaba dos antenas diferentes, Trimble (CATL) y Leica (CATR) con resultados desiguales. Asimismo se utilizó una boya GPS para medidas relativas en el puerto respecto al catamarán y el mareógrafo, así como para su calibración.

Se encontraron los bias del altímetro del Jason-1 para los pasos 187 y 248 usando los mareógrafos de Ibiza y San Antonio. Como lugares de calibración, contribuyen a controlar los erro-

res geográficamente correlados que son significativos cuando se toma un lugar individual. Se encontró un 'geoide marino local' con una precisión de unos 3 cm. El resultado importante fue la implementación de la isla de Ibiza como área permanente de calibración altimétrica.

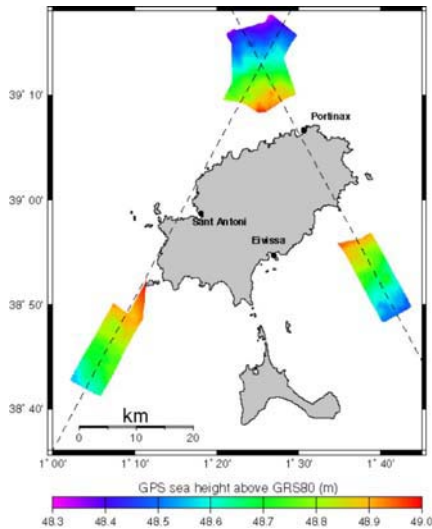
El estado actual respecto de la determinación del Bias<sub>alt</sub> del altímetro radar a bordo del satélite Jason-1 se resume en la tabla 1.

Site	BIAS Alt-A (mm)	BIAS Alt-B (mm)	Número de ciclos en alt-A o alt-B	Referencias
Harvest	+141.8 Ø6.3	+97.4 Ø7.4	108 / 29	Haines et al.
Corsica	+107.9 Ø6.7	+86.3 Ø8.6	84 / 21	Bonnefond et al.
Bass Strait	+152.3 Ø7.7	+105.0 Ø8.3	18 / 18	Watson et al.
Gavdos	+131.0 Ø15	NA	20 / NA	Pavlis et al.
Ibiza	+120.5 Ø4.4	NA	33 / NA	Martínez-Benjamín et al.

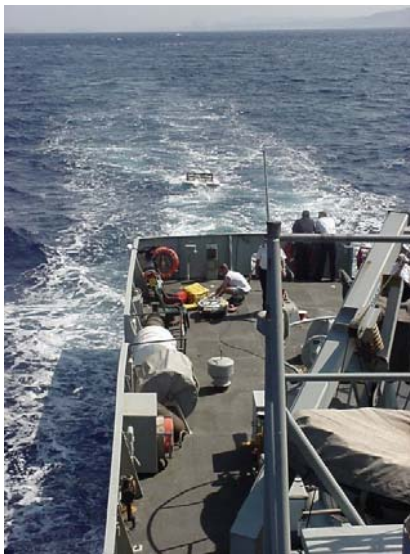
**Tabla 1:** Valores de los Bias<sub>alt</sub> estimados para Jason-1 en los diferentes sites de calibración absoluta respecto de la medidas del altímetro.

En la fig. 5 se indican las zonas observadas mediante el catamarán GPS a lo largo de las trazas ascendente 187 (del SW al NE) y descendente 254 (del NW al SE) de Jason-1. Se ha utilizado el modelo barotrópico MOG2D del LEGOS/CNES para corrección de la marea oceánica en las zonas alejadas de los mareógrafos de Ibiza y San Antonio.

El 'geoide marino' encontrado ha sido utilizado en el proceso de calibración altimétrica para dos pasos del Jason-1 y los dos mareógrafos. El bias del altímetro del Jason-1 ha sido de  $+120 \pm 5$  mm que es muy coherente con los encontrados en otras áreas de calibración.



**Figura 5 :** Zonas geográficas, a lo largo de las trazas del Jason-1, mapeadas por el catamarán GPS en la campaña IBIZA2003



**Figura 6:** Catamarán GPS en la campaña IBI- ZA2003 arrastrado por el buque Deva.

## Agradecimientos

Las campañas de calibración altimétrica del T/P y Jason-1 en el Cabo de Begur y la isla de Ibizahán sido realizadas en el marco del Programa Nacional de Espacio I+D , CICYT, Ministerio de Educación y Ciencia, ref:ESP97-1816-CO4 y ESP2001-4534-PE. La colaboración del Real Instituto y Observatorio de la Armada ha sido muy apreciada en la campaña IBIZA2003.

IBIZA2003 TEAM: Julia Talaya, Anna Baron, Cristina García, Enrique Alvarez, Sergio Gonzalez, Amparo Nuñez, Felipe Buill, Jaime Lopez-Marco, Manuel Espino, Damia Gomis, Marta Marcos, Yves Menard, Florent Lyard, Olivier Laurain, Gwenaële Jan, Eric Jeansou, Laurent Roblou

## Referencias

- P.Bonnefond, P.Exertier, E.Jeansou, A.Orsoni, B.Haines, D.Kubitschek and G. Gaillmain, Cap de Senetosa: descriptif des operations,OCA-CERGA, Grasse, France,1998.
- G.Born, M.Parke, P.Axelrad, K.Gold, J.Johnson, K. Key, D. Kubitschek, Calibration of TOPEX altimeter by using a GPS buoy, J. Geophys. Res,99, 1994.
- B.J.Haines, D. Dong, G.H.Born and S.K.Gill. 2003. The Harvest experiment: Monitoring Jason-1 and TOPEX/POSEIDON from a California offshore platform, *Marine Geodesy*, 26(3-4), 239-259.
- G.Kruizinga, B. Haines, J. Martinez Benjamin, M. Martinez Garcia, J. Talaya, M.A. Ortiz and B. Perez, The CATALA experiment, preliminary results of Alt-B calibration using GPS buoys off the Catalonia coast (Spain), Alt-B Calibration Workshop, April 22, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 1999.
- J.J. Martinez-Benjamin, M. Martinez-Garcia, S. Gonzales Lopez, A.Nunez Andres, F. Buill Pozuelo, M. Espino Infantes, J. Lopez-Marco, J.Martin Davila, J. Garate Pasquin, C. Garcia Silva, P. Bonnefond, O. Laurain, A.M. Baron Isanta, M.A. Ortiz Castellon, J. Talaya Lopez, B. Perez Gomez, E. Alvarez Fanjul, G. Rodriguez Velasco, D. Gomis, M. Marcos, Y. Menard, G. Jan, E. Jeansou, F. Lyard, and L. Roblou. Ibiza Absolute Calibration Experiment: Survey and Preliminary Results, *Mar. Geod.*, Special Issue on Jason-1 Calibration/Validation, Part 3, Vol. 27, No. 3-4, 2004.

- J.J. Martinez Benjamin, J. Martín Davila, J. Garate Pasquín, Pascal Bonnefond and Ibiza 2003 Team, «Geoid Determination/Jasón-1 Absolute Altimeter Calibration: Ibiza-2003 Campaign Report», Boletín ROA, No. 6/2005, Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, Ministerio de Defensa, 72 pp., Diciembre 2005 (ISSN 1131-5040).
- J.J. Martinez Benjamin, M. Martinez Garcia, M.A. Ortiz, J. Talaya, G. Kruizinga, B. Haines, J. Garate, J.M. Davila, J.M. Ferrandiz, M.I. Vigo Aguiar, B. Perez and E. Alvarez, Absolute TOPEX altimeter calibration in the NW Mediterranean Sea and calibration site selection for Jason-1, Tenth General Assembly of the WEGENER project, San Fernando, Spain, 2000.
- M. Martinez Garcia, J.J. Martinez Benjamin and M.A. Ortiz, Obtaining the sea level by using GPS buoys in the North Western Mediterranean Sea, Tenth General Assembly of the WEGENER project, San Fernando, Spain, 2000.
- Y. Menard, E. Jeansou and P. Vincent, Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters at Lampedusa: Additional results at Harvest, J. Geophys. Res., 99, 1994.
- E. Pavlis and the GAVDOS Team. 2002. Absolute Sea Level Monitoring and Altimeter Calibration at Gavdos, Crete. Proceedings of the Jason-1 SWT Meeting, 10-12 June 2002, Biarritz, France.
- T. Schone, A. Braun, M. Rentsch, C.K. Shum and C. Reigber, Concept for using GPS-buoys for Radar Altimetry drift monitoring, Proc. ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, ESA SP-461, 2000.
- C.K. Shum, Preliminary results of TOPEX Side B altimeter calibration campaigns, T/P Jason-1 SWT Meeting, St. Raphael, France, 1999.
- C. Watson, R. Coleman, N. White, J. Church. And R. Govind. 2003. «Absolute Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS Buoys in Bass Strait, Australia», *Marine Geodesy*, 26(3-4), 285-304.
- J. Zumberge, M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins and F. Webb, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102, 1997.