

# Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series

Bismarck Jigena-Antelo <sup>a,d</sup>, Juan Vidal <sup>b,d</sup> & Manuel Berrocoso <sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>. Department of Applied Physics, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain. [bismarck.jigena@gm.uca.es](mailto:bismarck.jigena@gm.uca.es)

<sup>b</sup>. Department of Naval Construction, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain. [juan.vidal@uca.es](mailto:juan.vidal@uca.es)

<sup>c</sup>. Department of Mathematics, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain. [manuel.berrocoso@uca.es](mailto:manuel.berrocoso@uca.es)

<sup>d</sup>. Astronomy, Geodesy and Cartography Laboratory (LAGC-UCA), Faculty of Science, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain.

Received: August 26<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: January 20<sup>th</sup>, 2015. Accepted: January 26<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

A detailed study is presented of the tidal constituents for Livingston and Deception Islands (Antarctica) obtained at the LIVMAR and DECMAR tide gauge stations. Data were acquired with tide gauge pressure sensors, and calculated from a long time series of 798 days of data-logging, using the least-squares harmonic estimation method. The results show an improvement over previous results in the region. Seventy tidal constituents were obtained, of which 19 were the most representative with amplitudes greater than 1 cm and a contribution of 93% of the wave energy. In both stations, it was confirmed that the tides are mixed, with a semi-diurnal behavior. The tidal gauge benchmarks (TGBMs) were linked to vertical and horizontal Antarctic Geodetic Networks, which provides a very important contribution for geodetic, oceanographic and hydrographic studies in the area.

Keywords: Antarctica; tidal constituents; harmonic analysis; tidal gauge station; tidal series; tide; Deception Island; Livingston Island; Spanish Antarctic Base.

# Determinación de las constituyentes de marea en las Islas Livingston y Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida), usando series temporales anuales

## Resumen

Se presenta un estudio detallado de las constituyentes de marea en las islas Livingston y Decepción (Antártida), obtenidas en las estaciones mareográficas LIVMAR y DECMAR. Los datos fueron tomados con mareógrafos de sensores de presión. Los cálculos se realizaron a partir de series de marea de largo período, con 798 días de observación, aplicando el método de análisis armónico por mínimos cuadrados. Los resultados obtenidos mejoran trabajos previos en la región, se han obtenido setenta constituyentes, siendo 19 las más representativas con amplitudes superiores a 1 cm y un aporte del 93% de la energía de la onda. En ambas estaciones se confirma que la marea tiene un régimen mixto de comportamiento semi-diurno. Los benchmark de referencia de mareógrafos (TGBM) se encuentran enlazados a las redes geodésicas de control vertical y horizontal de la Antártida, que es de gran importancia para trabajos geodésicos, oceanográficos e hidrográficos en la zona.

*Palabras clave:* Antártida, constituyentes de marea, análisis armónico, estación de mareas, series de marea, marea, Isla Decepción, Isla Livingston, Base Antártica Española.

## 1. Introducción

Las Islas Shetland del Sur, al ser parte de la Antártida, es una zona geográfica bastante extrema y con un entorno bastante complejo para realizar observaciones

oceanográficas y geofísicas en el terreno. Las observaciones de marea en la Antártida son muy escasas y la mayoría corresponden a registros de la temporada del verano austral, debido a las duras condiciones climáticas de la Antártida durante el resto del año, donde normalmente las aguas de las zonas costeras permanecen congeladas hasta el inicio del

verano [10]. Se tienen muy pocos registros con un período de tiempo suficiente que permita obtener los principales constituyentes de marea, en la mayoría de los casos los datos han sido tomados en temporada de verano y no se conocen datos de un año de duración marea [18, 28]. Hasta la fecha, para muchos estudios oceanográficos y geofísicos, se han utilizado datos obtenidos indirectamente, como las cartas cotidales, cartas de iso-amplitud y datos de altimetría por satélites. Es muy importante obtener una serie de mareas en base a medidas directas, pues nos permite estudiar, con datos reales, la propagación y características de la onda en el entorno de la estación y extrapolarlo a lugares próximos.

Las primeras observaciones de los niveles del mar en la isla Decepción se realizaron en 1970, por personal del Servicio Hidrográfico Argentino (SHA), los datos de marea se obtuvieron durante cuatro días en verano por medio de una regla de marea (mareómetro) instalado cerca de la Base Argentina "Decepción"; podemos ver un histórico de los registros de marea en esta área en [4, 6]. Con estos datos de marea se obtuvo el primer datum vertical referido al vértice geodésico BARG (Base Argentina), perteneciente a la Red Geodésica Isla Decepción (REGID), que fue utilizado como referencia vertical y horizontal durante varios años. Este datum vertical fue trasladado mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico hasta el punto LN00, utilizado como referencia vertical de red RENID (Red de Nivelación de Isla Decepción) a partir del año 2003[2, 3, 5, 17].

Diversos autores utilizaron estaciones hidrográficas y correntómetros para estimar la circulación y el transporte en la cuenca oriental del Estrecho de Bransfield [20, 21, 22]. Además de los datos hidrográficos y de corrientes, estos autores instalaron una serie de mareógrafos de fondeo (Registradores de fondeo para niveles de marea, tipo Aanderaa) en las islas Low, Rey Jorge y Livingston, en su estudio, pusieron mucho énfasis en el carácter de las mareas, de las corrientes y la importancia relativa de flujo de las mareas en la hidrodinámica general de circulación en el estrecho. Determinaron que las mareas en el Estrecho de Bransfield tienen una combinación de frecuencias diurnas y semi-diurnas, donde las componentes principales de mareas son O1 (0.0387 cph, ciclos por hora), K1 (0.0418 cph), M2 (0.0805 cph) y S2 (0.0833 cph). Estos autores observaron que las mareas varían de diurna a semi-diurna en período quincenal, con rangos máximos de marea entre 1.7 m y 2.1 m. De estas tres estaciones, la que corresponde a nuestra área de estudio es Isla Livingston (62°30' S, 60°23' W) y tiene un nivel máximo de variación de 1.98 m, donde la componente M2 es la más importante, con una amplitud de 0,39 m y retardo de fase de 277°. Las componentes K1, O1 y S2 presentan amplitudes similares, de alrededor de 0,28 m.

En base a los estudios de los niveles medios del mar en las islas Low, Rey Jorge y Livingston [14], se demostró que la propagación de la onda M2es perpendicular a la dirección del estrecho de Bransfield, mientras que las ondas diurnas viajan longitudinalmente hacia el sur-oeste a lo largo de la costa, con dirección NE-SW.

Una descripción detallada de la propagación y amplificación de la marea en el lado norte de la Península Antártica (Estrecho de Gerlache, Estrecho de Bransfield y el

Tabla 1.

Constantes Armónicas de las principales constituyentes de marea, en las estaciones mareográficas HM, PC y WB.

Estación	HM		PC		WB	
	Amp. (m)	Fase (G)	Amp. (m)	Fase (G)	Amp. (m)	Fase (G)
Const.						
M2	0.43	281	0.46	280	0.44	281
S2	0.24	335	0.28	-	0.29	-
O1	0.28	49	0.29	55	0.29	48
K1	0.28	66	0.26	73	0.26	66

Source: Adapted from Dragani et. al., 2004

noroeste del Mar de Weddell) se da en un estudio realizado por [10]. Basado en cartas co-tidales y cartas de iso-amplitud (co-range), estos autores reportaron las amplitudes y desfases de las principales componentes de marea (M2, S2, O1 y K1) en el Estrecho de Bransfield. Para su estudio utilizaron los resultados del análisis armónico de series de mediciones directas del nivel del mar tomadas de [9, 31]. En el trabajo citado [10], las estaciones se encuentran situadas en Isla de Livingston (Estación Media Luna, HM) y en Isla Decepción, Caleta Péndulo (Estación Péndulo, PC) y Bahía Balleneros (Estación Balleneros, WB). Los niveles de marea se midieron con un mareógrafo de flotador en la Estación de Media Luna (HM) y con un mareómetro o regla de marea (Visual Tide Staff) en las estaciones de Caleta Péndulo (PC) y la Bahía Balleneros (WB). Los períodos de tiempo del registro de los datos de marea fueron muy variables: 38 días en HM, 19 días en PC y 12 días en WB. La Tabla 1 presentan las constantes armónicas de las principales mareas en estas tres estaciones, según [10].

Un modelo regional de alta resolución (1/30° x 1/60°) para la región de la Península Antártica y el Mar de Weddell, fue desarrollado por [25] y descrito más recientemente por [39]. A partir de este modelo, es posible estimar las principales componentes de marea para esta zona de estudio. El modelo calcula las principales constituyentes armónicas de marea en las islas y en los pasos estrechos alrededor de la Península Antártica. Los resultados de este estudio se muestran en [25, 30].

También se estudiaron los registros de marea obtenidos en la Base Argentina Jubany (actual Base Carlini), en la isla Rey Jorge [27]. Estos autores presentan el análisis armónico de dos series temporales de registros de mareas correspondientes a los períodos comprendidos entre febrero y diciembre de 1996 y de marzo a diciembre de 1997, con un total de 12 componentes de marea, donde la componente M2 presenta amplitudes de 0.47 - 0.48 m y retardos de fase de 277° a 278°. El factor de forma de la marea (índice de Courtier) es de 0,8 calculado como:

$$F = (K1 + O1) / (M2 + S2) \quad (1)$$

De acuerdo a este índice obtenido, las mareas se definen como mareas mixtas predominantemente semi-diurna, teniendo todos los días dos pleamares y dos bajamares con desigualdades en altura y tiempo, coincidiendo en lo definido por [8, 27]. La amplitud media de la marea viva, calculada como 2 (M2 + S2), es de 1.48 m.

Posteriormente, el Laboratorio de Astronomía,

Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (LAGC-UCA) realiza observaciones de marea en las Islas Decepción y Livingston (Antártida) desde diciembre de 2007. En la Campaña Antártica 2007-08 se fondearon dos mareógrafos con sensores de presión, obteniendo registros continuos in situ durante 81 días de observación, se obtienen las primeras series de marea para las estaciones de LIVMAR y DECMAR, entre diciembre de 2007 y marzo de 2008, calculando las primeras constituyentes de marea para las Islas Decepción y Livingston. Se obtienen valores de amplitud y desfase para nueve componentes (M2, S2, N2, K2, O1, P1, K1, Mm, MSf) [36, 37, 17]. Los resultados son similares en amplitud a los obtenidos por [10], pero respecto al desfase hay diferencias a considerar en la componente K1. El coeficiente de forma obtenido fue de 0,86 para DECMAR y 0.80 para LIVMAR, que determina el mismo régimen definido anteriormente por [8, 10]. Con estos registros de marea se calcularon los niveles medios del mar respecto a vértices de la red REGID (Red Geodésica de Isla Decepción) y red RGAE (Red Geodésica Antártica Española) para las estaciones DECMAR, Isla Decepción y LIVMAR, Isla Livingston [37, 17].

En sucesivas campañas se continuaron las observaciones durante el período estival, pero a partir de Febrero de 2011 se han obtenido series temporales continuas con más de dos años de observación (798 días) en ambas islas [17]. En este trabajo presentamos los resultados de nuevas observaciones de marea, correspondientes a dos años completos en las estaciones de DECMAR y LIVMAR, que corresponden a las campañas antárticas españolas 2010-11, 2011-12 y 2012-13 y que constituyen las primeras series mareográficas continuas en la Antártida, cuyos resultados pueden ser válidos para las Islas Shetland del Sur y el Estrecho de Bransfield, tomando como referencia las islas Livingston y Decepción.

## 2. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las islas Livingston y Decepción, que forman parte del archipiélago de las islas Shetland del Sur y del Estrecho de Bransfield. El Estrecho de Bransfield es parte del Océano Glacial Antártico, se encuentra delimitado por el Archipiélago de las islas Shetland del Sur, al Norte, y la Península Antártica, al sur. El estrecho es también denominado por los argentinos como Mar de la Flota, tiene unos 500 km. de longitud y unos 120 km de anchura media, es una cuenca marginal activa en donde se ha identificado un eje de extensión con dirección NE-SW entre los paralelos 60° y 63° Sur. Bautizado con ese nombre por James Weddell alrededor de 1825 en homenaje a Edward Bransfield, que cartografió las islas Shetland del Sur en 1820. El estrecho está protegido de mar abierto por las islas Smith, Snow y Livingston por el norte y al oeste, y por la Isla Rey Jorge, al norte y al este [19]. La cuenca está ocupada por seis edificios volcánicos alineados aproximadamente según la dirección principal de la propia cuenca, tiene una actividad volcánica reciente manifestada por los volcanes Bridgeman, Pingüino (Penguin) y Decepción, siendo este último (63°00' S, 60°35' W) el que en la actualidad presenta volcanismo activo y uno de los pocos volcanes activos existentes en la Antártida.

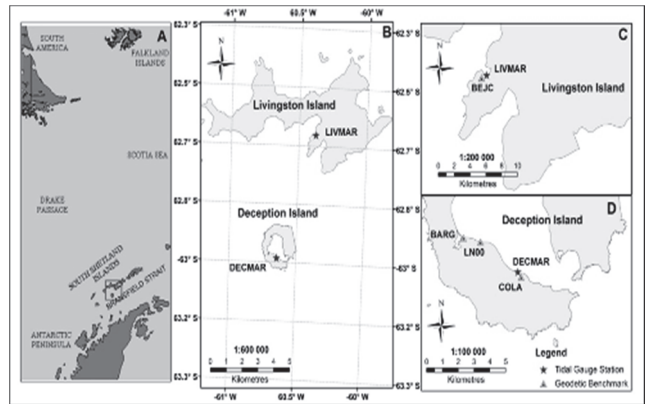


Figura 1. A. Ubicación del área de estudio. B. Ubicación de las estaciones mareográficas en las islas Livingston y Decepción. C. Detalle de Isla Livingston, ubicación de la estación LIVMAR y la BAE "Juan Carlos I". D. Detalle de Isla Decepción, ubicación de la estación DECMAR, BAE "Gabriel de Castilla" y Base Antártica Argentina "Decepción" (BARG). Source: LAGC-UCA

En las islas Livingston y Decepción se instalaron dos estaciones mareográficas en puntos cercanos a la costa, denominadas LIVMAR (Caleta Johnsons, Isla Livingston) y DECMAR (Punta Colatinas, Isla Decepción), las estaciones se encuentran próximas a las Bases Antárticas Españolas "Juan Carlos I" y "Gabriel de Castilla", respectivamente.

La Isla Decepción es un volcán activo, tiene forma de herradura y un diámetro de unos 14 kilómetros: La isla tiene una bahía interior llamada Puerto Foster, que fue la caldera central del volcán, que colapsada, fue inundada por el agua de mar y se comunica al estrecho de Bransfield a través de un paso angosto y poco profundo denominado Fuelles de Neptuno[29]; la estación DECMAR se encuentra ubicada en Punta Colatinas a unos 3 km al sur de la BAE Gabriel de Castilla y cerca de los Fuelles de Neptuno (unos 3 km).

Livingston es la segunda isla en tamaño del archipiélago de las Shetland del Sur, tiene unos 70 km de largo y ancho variable entre los 4 y los 32 kilómetros, la estación LIVMAR se encuentra instalada en Caleta Johnsons, es una pequeña cala semi-cerrada, poco profunda, situada en el sur de la isla Livingston, cerca de la Base Antártica Española "Juan Carlos I", la Fig. 1 muestra la ubicación de las estaciones mareográficas en el área de estudio.

## 3. Instrumentación, datos y metodología.

### 3.1. Equipos utilizados para toma de datos de marea

Los datos fueron obtenidos mediante dos sensores de presión, se utilizaron como referencia sensores de presión SAIV modelo TD304, con sensores adicionales de temperatura y conductividad que tienen una precisión de  $\pm 0,01\%$  del fondo de escala en la medida de la presión por cada 10 m, es decir, una precisión de 1 mm. Los datos de presión, temperatura y conductividad se registraron en las estaciones por medio de un sensor CTD 204 SAIV SD que tiene una precisión de  $\pm 0,02$  ppt en salinidad (para conductividad) y  $\pm 0,01$  °C para la temperatura; además, se utilizaron sensores

AQUAlogger PT520 de temperatura y de presión que tienen una precisión de  $\pm 0,05$  ° C en temperatura y de 0,005% a escala completa para cada 10 m, en presión. Con estos datos, se obtuvieron mediciones instantáneas del nivel del mar.

### 3.2. Fondeo de sensores de presión

El problema principal de instalación de estaciones mareográficas en la Antártida, son las extremas condiciones climatológicas, que tienen como consecuencia el congelamiento de la capa superficial del agua de mar durante el invierno, formando banquisa y placas de hielo que al moverse pueden desplazar el sensor y romper los cables y cabos que los aseguran a la costa y con ello perder el equipo y los datos. Por esta razón, hemos diseñado un sistema bastante seguro, que protege tanto a los sensores de presión, asegurados en los lastres de fondeo y colocados en el interior de un tubo de hierro galvanizado, abierto en uno de sus costados; como a todo el sistema de fondeo, pues el lastre de fondeo fue asegurado a las rocas de la orilla, mediante anclajes con cables y cabos de gran resistencia a la tracción, para evitar que se rompan y que el sensor pueda perderse en el fondo (Fig. 2, 3) y de esta manera minimizar los riesgos de desplazamiento, obtener mediciones directas de los niveles de marea con la mayor seguridad y precisión posible y evitar los saltos en la serie temporal provocados por estos desplazamientos.

Los sensores de presión fueron fondeados a unas profundidades aproximadas de 7.5 m y 3.5 m en LIVMAR y DECMAR respectivamente, y en ambos casos cercanos a la costa, a unos 30 metros de la línea de playa, con la finalidad de minimizar los errores en la posterior referencia al respectivo benchmark de referencia de mareógrafo (TGBM, Tide Gauge Benchmark), ubicado en tierra.

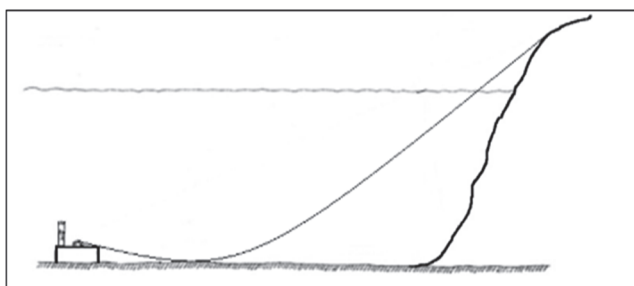


Figura 2. Sistema de fondeo y anclaje del mareógrafo a la costa  
Source: LAGC-UCA

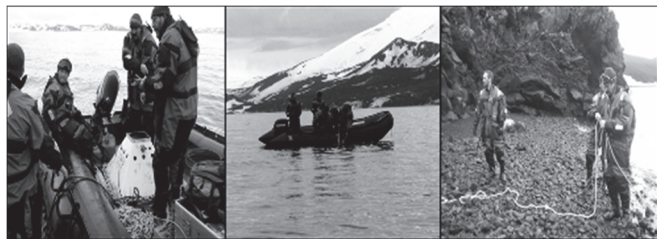


Figura 3. Fondeo del sensor de presión principal (PTG) en la estación mareográfica DECMAR  
Source: LAGC-UCA

Para el fondeo de los mareógrafos se utilizó como plataforma de trabajo una embarcación neumática Zodiac Pro 500, quedando los fondeos ubicados a unos 30 metros de la línea de playa y entre los 3 y los 9 metros de profundidad, dependiendo de la configuración del fondo en los sitios de fondeo. La Fig. 6 muestra la maniobra de fondeo de los mareógrafos.

### 3.3. Georreferenciación de estaciones

Para el control vertical, los datos de marea fueron referidos altimétricamente a un TGBM, que a su vez está enlazado con otras marcas auxiliares de referencia de nivel (TGAR, Tide Gauge Auxiliary Reference). Los valores locales de profundidad promedio en cada una de las estaciones fueron de 3.147 m. en la isla Decepción y 7.475 m. en Livingston. Para obtener los valores medios de profundidad de fondeo de los sensores, las medidas del nivel del mar obtenidas con el sensor principal (PTG) se vincularon altimétricamente al TGBM fijo en tierra, mediante un método indirecto, instalando cercano a la zona donde se encuentra fondeado el PTG, otro sensor de presión colocado en una regla de nivelación (TSG, Tide Staff Gauge), del cual se conoce su cero o nivel de referencia vertical y cuya parte superior sobresale del agua para poder realizar las lecturas mediante un nivel óptico; tomando las lecturas simultáneas a las dos reglas de nivelación, TSG y TGBM, mediante nivelación geométrica, obtenemos el desnivel del TSG con respecto al TGBM, y por lo tanto las alturas de marea son referidas al TGBM, que luego son comparadas con las lecturas de marea obtenidas por el PTG, del cual hemos obtenido su profundidad mediante un ajuste lineal y por lo tanto, todas las lecturas de marea quedan referidas al TGBM [33, 34]. Por este método, lo que se hace es comparar las lecturas simultáneas del nivel de marea obtenida con el sensor principal PTG, contra sensor de control móvil instalado en la regla de nivelación TSG, que ha sido referenciado mediante nivelación geométrica al TGBM, que se encuentra en tierra. Este procedimiento de referenciación altimétrica fue realizado en ambas estaciones (LIVMAR y DECMAR). Por el método de nivelación geométrica, también se realizaron los enlaces entre el TGBM y sus respectivas marcas auxiliares de referencia (TGAR), para más detalles ver Fig. 4-6.

Los TGBM y TGAR fueron monumentados mediante un clavo, situados sobre una roca de fácil visualización que se encuentre por encima del nivel de la pleamar y muy próximos al sitio de fondeo de los mareógrafos [35, 17]. Cada TGBM se encuentra vinculado al menos a dos marcas auxiliares TGAR, que es la marca vertical auxiliar de seguridad para la recuperación de la referencia principal TGBM, en caso de una posible destrucción o pérdida. Toda la vinculación altimétrica se ha realizado mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico con la ayuda de nivel óptico Wild (Leica) modelo NA2, cuya precisión es de 0.7 mm por cada kilómetro de doble nivelación. Los TGBM son posteriormente vinculados a puntos de las redes geodésicas de la Antártida, tanto en vertical como en horizontal [37, 17].

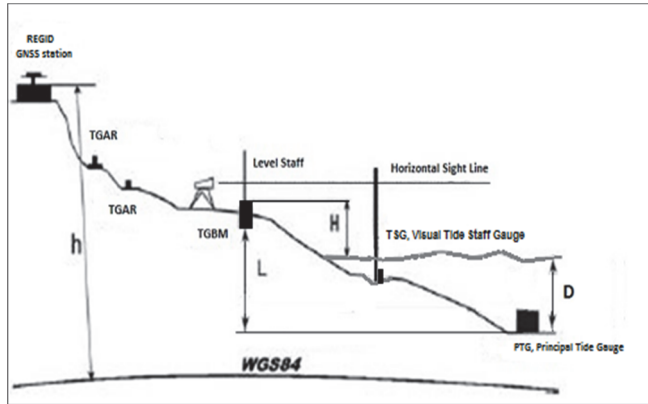


Figura 4. Diagrama de enlaces de nivelación en las estaciones mareográficas, entre los benchmarks de referencia de mareógrafos (TGBM), las marcas auxiliares de referencia (TGAR) y los sensores utilizados en la toma de datos.  
Source: Adapted from Vidal et. al., 2012.

Para obtener la profundidad de fondeo respecto al TGBM en las estaciones de LIVMAR y DECMAR, se realizó un ajuste lineal entre las alturas instantáneas del nivel del mar medidas por el sensor principal PTG, definida como D, contra las alturas medidas con el sensor de control TSG, tomadas simultáneamente y temporalmente sincronizadas. Las mediciones de control, entre PTG y TSG se realizaron en días escogidos, días sin viento y sin olas (mar en calma) tomando las lecturas simultáneas durante 1 hora con una frecuencia (data sampling) de 10 minutos. Para la estación DECMAR, se realizaron medidas durante 7 días obteniéndose 36 medidas distribuidas durante todo el periodo de registro de la serie. El mismo procedimiento se siguió para LIVMAR, con controles durante dos días con un total de 13 medidas que se realizaron al inicio y al final del periodo de registro de marea (dos días).

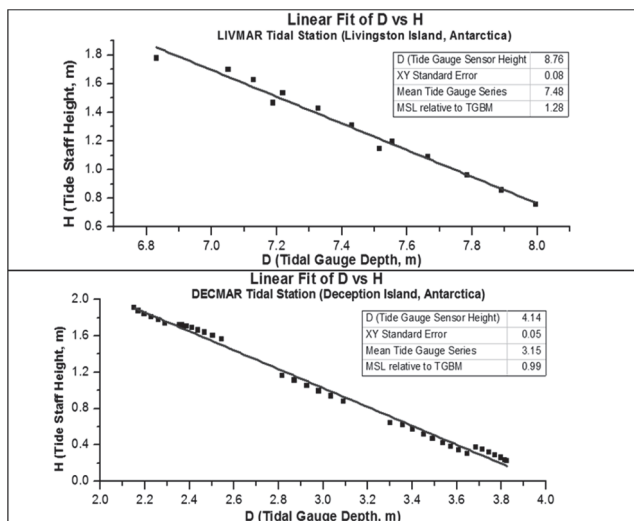


Figura 5. Ajuste lineal entre las medidas instantáneas del nivel medio del mar en LIVMAR y DECMAR.  
Source: LAGC-UCA



Figura 6. Referenciación altimétrica de las medidas de marea  
Source: LAGC-UCA

El ajuste lineal entre la presión del sensor principal PTG, transformada en profundidad y corregida por presión atmosférica (D), contra los datos de altura (H), tomados por el sensor de control TSG, instalado en la regla de marea y corregidos por lectura de nivelación tomada al TGBM, nos proporciona un valor medio del nivel de marea para cada instante de la lectura, y en base a los cuales se corrigen altiméricamente los datos de la serie. La Fig. 5 nos muestra los resultados del ajuste lineal realizado por este método en las estaciones de DECMAR y LIVMAR.

Este método de control altimétrico de los registros de marea es muy difícil de aplicar de forma continua, debido a que solo puede ser instalado y utilizado durante la época estival; debido, al uso de personal técnico para su ejecución; además, el mareógrafo de control TSG se debe quitar durante el invierno para evitar daños o su destrucción por la banquisa o las placas de hielo marino. La Fig. 6 nos muestra la instalación y utilización de las reglas de control.

El período de registro de marea, tanto en LIVMAR como en DECMAR, está comprendido entre el 3 de febrero de 2011 y el 11 de Abril de 2013. El intervalo de muestreo de los datos fue de 10, 20 y 60 minutos, aunque para el cálculo y análisis armónico todas las series fueron normalizadas a 60 minutos (1 dato/hora), obteniendo las series temporales respectivas en cada estación, que fueron sometidas a un análisis armónico utilizando una aplicación en Matlab desarrollada de acuerdo a [12]. Hay que recalcar que esta es la primera vez que se tienen series de marea en la Antártida con más de un año de registro, hasta la fecha los registros de marea se limitaban a

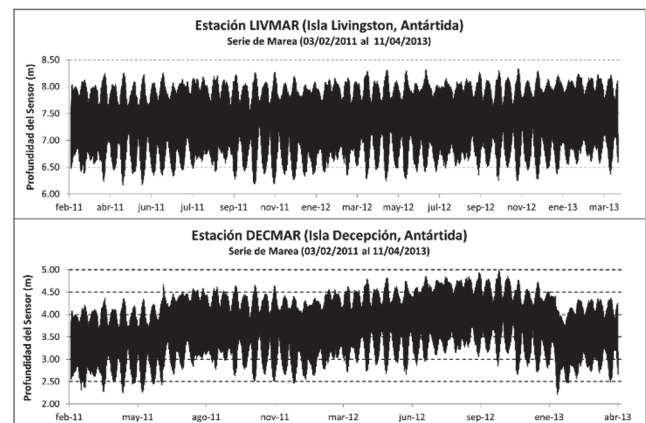


Figura 7. Series de marea obtenidas en LIVMAR y DECMAR  
Source: LAGC-UCA

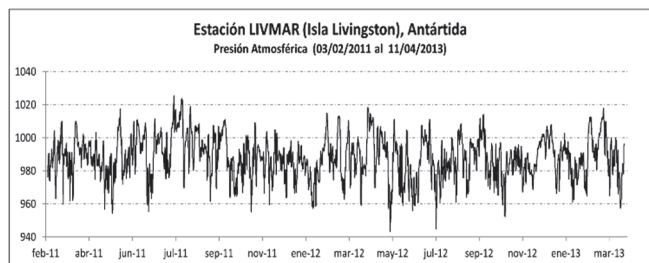


Figura 8. Serie de presión atmosférica en LIVMAR  
Source: LAGC-UCA

la temporada de verano debido a las extremas condiciones climatológicas durante el resto del año.

Durante todo el periodo del registro de datos de marea, también se obtuvieron datos meteorológicos de presión atmosférica y temperatura del aire, tomados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET), registrados en las estaciones de Gabriel de Castilla (Isla Decepción) y Juan Carlos I (Isla Livingston). La presión atmosférica en la estación de Isla Livingston osciló entre un mínimo de 943,35 mb el 22 de mayo de 2012 y un máximo de 1025, 59 mb el 09 de abril de 2013 y un promedio de 988,27 mb. Para la presión atmosférica, se tomó como serie de referencia, la serie obtenida en Livingston, al ser una serie muy completa y estable, puesto que el registro de la estación Gabriel de Castilla tenía muchos datos faltantes. La Fig. 7, presenta la serie de presión atmosférica obtenida en la estación LIVMAR.

Para convertir la presión hidrostática a una altura equivalente del nivel del mar, usamos:

$$h = (P - P_a) / \rho g \quad (2)$$

donde, P es la presión registrada por el sensor del mareógrafo, P<sub>a</sub> es la presión atmosférica de referencia (un valor constante, 990.8 mb), g es la aceleración debida a la gravedad cuyo valor medio en Isla Decepción es 9,822956 m/s<sup>2</sup> y ρ la densidad del agua en el área de estudio, cuyo valor medio es de 1025 kg/m<sup>3</sup>, calculado utilizando los registros de temperaturas y salinidades para un valor medio de la zona [33, 11]. Al valor obtenido se denomina nivel del mar ajustado (NMA). El sensor de presión mide la presión total, por lo tanto, no muestra los efectos estáticos de variaciones de la presión atmosférica. Una variación de la presión atmosférica de referencia es equivalente a mover el nivel de referencia del sensor [24, 1].

Para el presente trabajo se tomaron registros de presión atmosférica, simultáneos a las medidas de marea, obteniendo unos valores medios de 988,39 mb en Decepción y 987,27 mb en Livingston, siendo el valor medio para la zona de 988.27 mb, que no difiere significativamente del valor utilizado en [37, 17], que utiliza como presión atmosférica de referencia, un valor constante de 990.8 mb (hPa) que corresponde a la presión atmosférica media en la región de la Isla Rey Jorge y el entorno cercano de la estación Arctowski durante el periodo 1978-1989 [26]. De esta manera, el nivel del mar efectivo, lo podemos obtener para cualquier tiempo en particular y puede ser corregida mediante la adición o

sustracción de los cambios causados en la presión atmosférica respecto a los valores de referencia; a frecuencia lo suficientemente baja la corrección es de aproximadamente al descenso de un centímetro (-1.0 cm) en el nivel de la superficie del mar, por cada milibar de aumento (+1 mb) en la presión atmosférica [7,15, 24, 40].

Se ha realizado el análisis armónico por mínimos cuadrados a los registros de marea, acorde con [12, 13, 16]. Las series de marea analizadas tienen un total de 19143 datos horarios, lo que supone un registro de más de dos años (798 días) para ambas estaciones. Sin embargo, los registros corresponden a varias series tomadas para la misma estación, siendo seis series para DECMAR y tres series para LIVMAR, que fueron unidas en una sola y corregidas por saltos, principalmente por las diferentes profundidades a las que se instalaron los sensores en cada campaña. Para corregir los saltos provocados durante el cambio de equipos en un nuevo fondeo, se ajustan las dos series aplicando el algoritmo de corrección del escalonamiento por elevación de la serie. También se utilizó como sensor de referencia un sensor de presión adicional fondeado en las proximidades, cuyos registros se solapan con los de las series anterior y posterior al cambio de equipo.

Una vez corregidos los saltos, hemos reconstruido las series completas de marea en ambas estaciones. A las alturas de marea corregidas aplicamos el análisis armónico para evaluar las amplitudes y el desfase de las componentes. Las amplitudes de marea y el desfase han sido calculadas para la hora UTC correspondiente a huso horario de la estación, aplicando la corrección nodal, con un intervalo de muestreo de una hora y para un intervalo de confianza del 95%.

#### 4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en amplitud de los principales componentes de marea en ambas estaciones se muestran en la Fig. 9, se han realizado cuatro análisis para cada estación, tres de ellos para series de un año y el cuarto para la serie

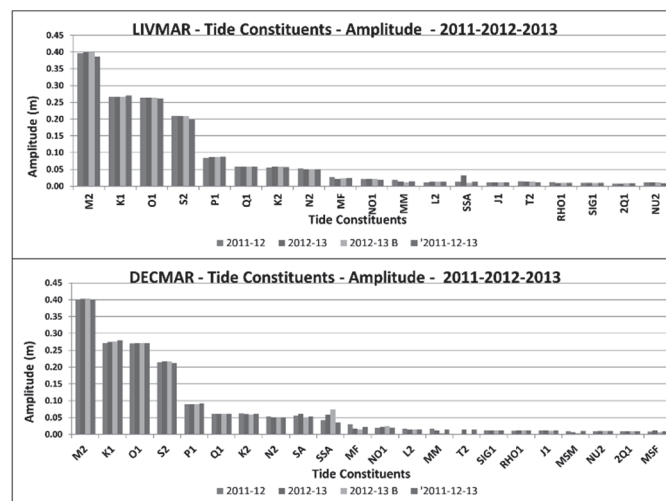


Figura 9. Amplitud de las principales constituyentes de marea en LIVMAR y DECMAR.  
Source: LAGC-UCA

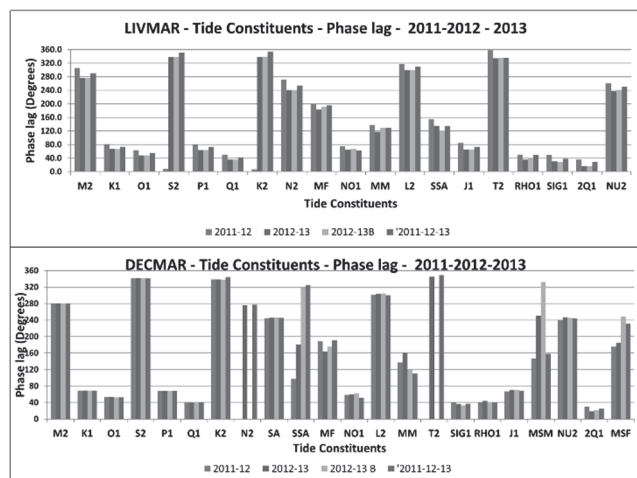


Figura 10. Desfase de las principales constituyentes de marea en LIVMAR y DECMAR.  
Source: LAGC-UCA

completa. En todos ellos podemos observar bastante uniformidad en los resultados obtenidos que nos dan una buena idea de la validez de los mismos. En cuanto al desfase los resultados también son similares.

En cuanto al desfase los resultados son similares en las principales constituyentes y se muestran en Fig. 10.

En la Tablas 2A y 2B, se muestran los resultados del análisis realizado a la serie completa, habiendo obtenido para ambas estaciones una condición de matriz de 0.82 y un ajuste de 0.993.

Tabla 2A.  
Estación LIVMAR. Principales constituyentes de marea

Estación LIVMAR			
Constante	Frecuencia	Amplitud (m)	Desfase (grados)
M2	0.08051	0.39	290.1
K1	0.04178	0.27	73.5
O1	0.03873	0.26	54.9
S2	0.08333	0.20	351.2
P1	0.04155	0.09	73.1
Q1	0.03722	0.06	41.8
K2	0.08356	0.06	354.6
N2	0.07900	0.05	253.8
MF	0.00305	0.02	195.5
NO1	0.04027	0.02	62.3
MM	0.00151	0.02	128.5
L2	0.08202	0.01	308.9
SSA	0.00023	0.01	133.7
J1	0.04329	0.01	71.9
T2	0.08322	0.01	335.4
RHO1	0.03742	0.01	49.4
SIG1	0.03591	0.01	37.9
2Q1	0.03571	0.01	29.2
NU2	0.07920	0.01	250.6
Longitud serie (días)			797.63
Datos Observados			19143
Condición de Matriz			0.82
Ajuste			0.993
Courtier			0.91

Source: LAGC-UCA

Tabla 2B.  
Estación DECMAR. Principales constituyentes de marea

Estación DECMAR			
Constante	Frecuencia	Amplitud (m)	Desfase (grados)
M2	0.08051	0.40	280.5
K1	0.04178	0.28	68.9
O1	0.03873	0.27	52.5
S2	0.08333	0.21	341.2
P1	0.04155	0.09	68.5
K2	0.08356	0.06	338.5
Q1	0.03722	0.06	40.3
N2	0.07900	0.05	245.1
SSA	0.00023	0.04	324.9
MF	0.00305	0.02	190.4
NO1	0.04027	0.02	51.7
L2	0.08202	0.01	300.2
MM	0.00151	0.01	110.3
T2	0.08322	0.01	348.6
SIG1	0.03591	0.01	37.0
RHO1	0.03742	0.01	39.6
J1	0.04329	0.01	68.5
NU2	0.07920	0.01	243.6
2Q1	0.03571	0.01	25.0
Longitud serie (días)			797.63
Datos Observados			19143
Condición de Matriz			0.82
Ajuste			0.993
Courtier			0.90

Source: LAGC-UCA

En la Tablas 2A y 2B presentamos los diecinueve constituyentes de marea más importantes, cuya amplitud es superior a un centímetro (M2, K1, O1, S2, P1, Q1, K2, N2, NO1, MF, MM, L2, SSA, J1, T2, RHO1, SIG1, 2Q1, NU2) y cuyo aporte de energía es del 93% del total de la onda para ambas estaciones.

En todos los análisis armónicos realizados, se muestra que la mayor cantidad de energía de la onda de marea (85%) es aportada por ocho componentes, cuatro semi-diurnas (M2, S2, K2, N2) y cuatro componentes diurnas (K1, O1, P1, Q1), con un aporte similar para cada grupo de más o menos un 42,5%.

En lo referente a las amplitudes de las series, los resultados nos muestran que las amplitudes, máxima y mínima, son de 4.986 m. y 2.224 m. con un rango de 2.762 m para DECMAR, y de 8.334 m y 6.169 m con un rango de 2.165 m para LIVMAR.

El factor de forma de marea o índice de Courtier obtenido es 0,91 y 0.90 para LIVMAR y DECMAR respectivamente, ha sido calculado de acuerdo a (1) y nos determina que en el área de estudio las mareas tienen un régimen mixto, con una componente predominantemente semi-diurna ( $0.25 < C < 1.50$ ), teniendo todos los días dos pleamares y dos bajamares, como habían definido [8, 10].

En general, los resultados en amplitud, desfase y régimen de marea, no difieren significativamente, los resultados obtenidos por [30, 28, 20, 14, 27, 22, 31, 25, 9, 10, 37, 17], sin embargo, se observan variaciones significativas en la constituyente K1 con respecto a los valores dados por [10, 37]. La Fig. 11 nos muestra el registro de mareas durante un mes y en ella se aprecia el régimen mixto y semi-diurno de las mismas.

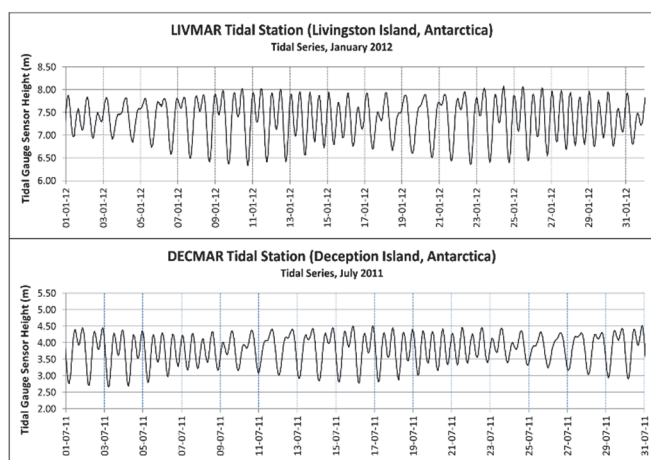


Figura 11. Serie de marea en LIVMAR (Enero/2012) y DECMAR (julio/2011).

Al contar con una serie de más de dos años de observaciones con el análisis armónico hemos obtenido setenta constituyentes de marea, entre las cuales tenemos constituyentes de frecuencia quincenal, mensual, semi-anual y anual.

El resultado del ajuste entre los datos reales y los datos predichos es de un 99.3%, que es un parámetro excelente y muy representativo para realizar predicciones en base a los datos obtenidos y utilizados en el análisis.

## 5. Conclusiones

La Antártica es una región donde los datos de mareas son escasos; por este motivo, las series temporales de más de un año, son datos muy valiosos para estudios de la marea en la zona.

En este trabajo presentamos un estudio de los registros de mareas en Decepción y Livingston correspondientes a 798 días de observación continua, lo que ha permitido obtener las constituyentes de marea de corto periodo (diurno y semi-diurno) y de largo periodo (quincenal, mensual, semi-anual y anual). Estas series de marea corresponden a los datos obtenidos en las estaciones de LIVMAR y DECMAR, en las campañas antárticas 2010-11, 2011-12, 2012-13, en la que además se han tomado datos simultáneos de presión atmosférica para las mismas estaciones.

Para la obtención de las amplitudes y los retardos de fase de los diferentes constituyentes, hemos utilizados el análisis armónico por mínimos cuadrados, habiendo obtenido 70 armónicos, siendo 19 constituyentes los más representativos, cuya amplitud es superior a 1 cm y que aportan un 93% de la energía de la onda de marea. Los resultados obtenidos nos muestran que la marea en ambas estaciones tiene un régimen de marea mixta con un comportamiento semi-diurno.

Una conclusión importante es la falta de registros de marea referenciados altimétricamente a puntos de referencia vertical permanentes, que sean utilizados a partir de la fecha como benchmarks de referencia de mareógrafos (TGBM). Uno de los objetivos fue dejar monumentados los (TGBM, Tide Gauge Benchmark) y las marcas auxiliares de referencia

de nivel (TGAR, Tide Gauge Auxiliary Reference), que quedaran como datums fundamentales para referencia vertical y horizontal de las estaciones mareográficas de LIVMAR y DECMAR, y que utilizaremos posteriormente para la determinación del nivel medio del mar en la zona.

El nivel medio del mar (NMM) es el plano de referencia vertical fundamental, de obligada utilización en aplicaciones geodésicas, geofísicas y oceanográficas tanto técnicas como científicas. Este trabajo es uno de los primeros de una serie de estudios de marea utilizando series de datos a largo periodo y que en el futuro podrá ser vinculado para la referenciación altimétrica de la Red Geodésica de Isla Decepción (REGID) y la Red Geodésica de la Antártida Española (RGAE).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible a la financiación de los siguientes proyectos, dependientes del Ministerio Español de Ciencia e Innovación, a través del programa de Investigación Antártica y recursos naturales:

- SEGAVDEC-GEODESIA (CGL2007-28768-E/ANT), “Seguimiento de la actividad volcánica de la Isla Decepción (Antártida)”
- SERTEMANT-GEODESIA (CTM2008-03113-E/ANT), “Continuidad y análisis de series temporales geodésicas en la Antártida”
- GEOTINANT (CTM2009-07251/ANT), “Investigaciones geodésicas y geotérmicas, análisis de series temporales e innovación volcánica en la Antártida (Islas Shetland del Sur y Península Antártica)”

Los autores agradecen a la tripulación del Buque de Investigación Oceanográfica “BIO Las Palmas” y al personal de las Bases Antárticas Españolas “Gabriel de Castilla” y “Juan Carlos I”, por su apoyo en los trabajos de campo para instalación de equipos y toma de datos, en las diferentes campañas.

Nuestro agradecimiento a los profesores Oscar Álvarez de la Universidad de Cádiz, por sus comentarios y proporcionar el software UCAD2D y Francisco García de la Universidad del Magdalena (Colombia) por proporcionar el software T-Tide, que nos han servido para comparar y validar nuestros resultados. Al Dr. Andrés Jiménez, de la Universidad de Cádiz, por su ayuda y sugerencias en el tratamiento de las series temporales.

## Referencias

- [1] Álvarez, O., Tejedor B., Tejedor L. and Kagan B.A., A note on sea-reeze-induced seasonal variability in the K1 tidal constants in Cádiz Bay, Spain. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 58, pp. 805-812, Elsevier Ltd., 2003. DOI:10.1016/S0272-7714(03)00186-0
- [2] Berrocoso M., Jiménez Teja Y. and Páez R., Determination of a physical reference frame for Deception Island. *Geophysical Research Abstracts*. 2006.
- [3] Berrocoso, M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A., Torrecillas, C., Enríquez-Salamanca, J.M., Pérez-Peña, A., Páez, R., Jiménez-Teja, Y., González-Fuentes, M.J., Sánchez-Alzola, A., García-García, A., Tárraga, M. y García-García, F., Diseño, desarrollo, objetivos y estado actual de las redes geodésicas establecidas en la Antártida durante las campañas antárticas españolas. VII Simposio de Estudios Polares, Granada, Spain. 2006.[en línea] Disponible en: [https://www.uam.es/otros/cn-scar/pdf/simposio\\_polar.pdf](https://www.uam.es/otros/cn-scar/pdf/simposio_polar.pdf)



- [4] Berrocoso, M., Fernández-Ros, A., Torrecillas, C., Enriquez-Salamanca, J.M., Ramírez, M.E., Pérez-Peña, A., González-Fuentes, M.J., Páez, R., Jiménez-Teja, Y., García-García, A., Tarraga M. and García-García, F., Geodetic research on Deception Island, Antarctica. In Fütterer, D.K., Damaske, D., Kleinschmidt, G., Miller, H. and Tessensohn, F., Eds. *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Berlin. Springer, [Online]. pp. 391-396, 2006. Available at: [https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fcontent%2Fpdf%2F10.1007%252F3-540-32934-X\\_49.pdf&ei=D1\\_BVfTJ-GsygOA4YLIDA&usq=AFQjCNE73DDT42zTVL8DhzKZKdw7cV8hQ&sig2=6dY9SgSkQ5FwrcRcgt7A](https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fcontent%2Fpdf%2F10.1007%252F3-540-32934-X_49.pdf&ei=D1_BVfTJ-GsygOA4YLIDA&usq=AFQjCNE73DDT42zTVL8DhzKZKdw7cV8hQ&sig2=6dY9SgSkQ5FwrcRcgt7A)
- [5] Berrocoso, M., Salamanca, J.M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A. and Jigena, B., Determination of a local geoid for Deception Island, in Antarctica: A keystone in a Changing World, [Online]. Proceedings of the 10th ISAES X, edited by A. K. Cooper and C.R. Raymond et al., USGS Open-File Report 2007-2007-1047, Extended Abstract 123, 5 P., Poster Sesión 145, 10.3133/of2007-1047.141 p. 2007. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1047/ea/of2007-1047ea123.pdf>
- [6] Berrocoso, M., Fernández-Ros, A., Ramírez, M.E., Enriquez-Salamanca, J.M., Torrecillas, C., Pérez-Peña, A., Páez, R., García-García, A., Jiménez-Teja, Y., García-García, F., Soto, R., Gárate, J., Martín-Dávila, J., Sánchez-Alzola, A., de Gil, A., Fernández-Prada, J.A. and Jigena, B. Geodetic research on Deception Island and its Environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) during Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). In: Capra, A. & Dietrich, R., Eds. *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica*. Springer-Verlag, Berlin, [Online]. pp 97-124. 2008. Available at: <file:///C:/Users/Bismarck/Dropbox/PROY%20NMM-DEC/Articulos%20Cientificos/0%20DYNA/Articulos%20Referencia/Book%20Capra%20%253A978-3-540-74882-3.pdf>
- [7] Chelton, D.B. and Enfield., Ocean signals in tide gauge records. *Journal of Geophysical Research*, [Online]. 91, pp. 9081-9098. 1986. Available at: [http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/16001/Chelton\\_and\\_Enfield\\_JGR\\_1986.pdf?sequence=1](http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/16001/Chelton_and_Enfield_JGR_1986.pdf?sequence=1)
- [8] Defant, A., *Physical oceanography*, 2. New York: Pergamon Press, 598 P, 1961.
- [9] D'onofrio, E.E., Dragani, W.C., Speroni, J.O. and Fiore, M.E., Propagation and amplification of tide at the north-eastern coast of the Antarctic Peninsula. An observational study. *Polar Geoscience*, 16, pp. 53-60. 2003.
- [10] Dragani, W.C., Drabble, M.R., D'onofrio, E.E. and Mazio, C.A., Propagation and amplification of tide at Bransfield and Gerlache straits, northwestern Antarctic Peninsula. An observational study. *Polar Geosciences*, 17, pp. 156-170, 2004.
- [11] Fofonoff, N.P. and Millard, Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Technical Papers in Marine Science, [Online]. 44, 53 P. 1983. Available at: <http://unesdoc.unesco.org/images/0005/000598/059832eb.pdf>
- [12] Foreman, M.G.G., *Manual for tidal heights analysis and prediction*. Sidney, BC: Institute of Ocean Sciences, Pacific Marine Science Report 77-10, [Online]. 97 P. 1977. Available at: <ftp://canuck.seos.uvic.ca/docs/MFTides/heights.pdf>
- [13] García, F., Palacio, C. and García, U., Tide constituents at Santa Marta Bay (Colombia). *DYNA*, [Online]. 78 (167), pp. 142-150, 2011. Available at: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25777/26199>
- [14] García, M.A., *Oceanografía dinámica de un mar Antártico: El Estrecho de Bransfield. Investigación Española en la Antártida, Seminario de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo*. Santander, 19–23 Julio, 1993. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Educación y Ciencia, pp. 193-208. 1994.
- [15] Gill, A.E., *Atmosphere-Ocean Dynamics*, In: *International Geophysics*, 30. [Online]. Editor Academic Press, 1982. 662 P., San Diego, California. 1982. Available at: [http://books.google.fr/books?id=1WLNx\\_HfRp8C&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.fr/books?id=1WLNx_HfRp8C&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [16] Godin, G., *The analysis of tides*. Toronto: University of Toronto Press, 264 P. 1972.
- [17] Jigena, B., Vidal, J. and Berrocoso, M., Determination of the mean sea level at Deception and Livingston Islands, Antarctica. *Antarctic Science* [Online]. 27 (01) pp. 101-102. 2015. DOI: DOI:10.1017/S0954102014000595
- [18] King, M.A. and Padman, L., Accuracy assessment of ocean tide models around Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 32, L23608, DOI:10.1029/2005GL023901. 2005.
- [19] Lenn, Y.D., Chereskin, T.K. and Glatts, R.C., Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in an Antarctic ecosystem at Deception Island. *Deep-Sea Research II* (50), pp. 1665-1683. 2003. DOI:10.1016/S0967-0645(03)00085-7
- [20] López, O., García, M.A. y Sánchez-Arcilla, A.S., Marea y circulación en el Estrecho de Bransfield durante el verano austral 92/93. In Cacho, J. and Serrat, D. (Eds). *Actas del V Simposio Español de Estudios Antárticos*. Madrid. Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, pp. 389-401, 1993.
- [21] López, O., García, M.A. and Sánchez-Arcilla, A.S., Tidal and residual currents in the Bransfield Strait, Antarctica. *Annales Geophysicae*, [Online]. 12, pp. 887-902- 1994. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00585-994-0887-5>
- [22] López, O., García, M.A., Gomis, D., Rojas, P., Sospedra, J. and Sánchez-Arcilla, A.S., Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep-Sea Research I*, 46, pp. 1755-1778. 1999. DOI:10.1016/S0967-0637(99)00017-5
- [23] Meredith, M.P., Brandon, A., Wallace, M.I., Clarke, A., Leng, M.J., Renfrew, M.A., van Lipzig, N.P.M. and King, J.C., Variability in the freshwater balance of northern Margarite Bay, Antarctic Peninsula: results from  $\delta^{18}O$ . *Deep-Sea Research II*, 55, pp. 309-322. 2008. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.11.005
- [24] Muñoz-Pérez, J.J. and Abarca-Molina, J.M., Effect of wind and atmospheric pressure variations on the mean sea level of salt marshes and estuaries. *Revista de Obras Públicas*, [Online]. 156 (3505), ISSN 0034-8619. 2009. Available at: [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2009/2009\\_diciembre\\_3505\\_02.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2009/2009_diciembre_3505_02.pdf)
- [25] Padman, L., Fricker, H.A., Coleman, R., Howard, S. and Erofeeva, L., A new tide model for the Antarctic ice shelves and seas. *Annals of Glaciology*, 34, pp. 247-254. 2002. DOI: 10.3189/172756402781817752
- [26] Rakusa-Suszczewski, S., Mietus, M. and Piasecki, J., *Pogoda i klimat in Rakusa-Suszczewski S., Eds. Zatoka Admiralicji Antarktyki. Dziekanów Les'ny*. Poland. Institut Ekologii PAN, pp. 41-50. 1992.
- [27] Schöne, T., Pohl, M., Zakrajsek, A.F. and Schenke, H.W., Tide gauge measurements, a contribution for the long-term monitoring of the sea level. In: Wiencke, Ferreyra, Arntz, Rinaldi (Eds.): *The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica, Berichte zur Polarforschung*, [Online]. 299, pp. 12-14, 1998. Available at: <http://epic.awi.de/4288/>
- [28] SCAR (Scientific Committee for Antarctic Research), *Antarctic digital database on CD-ROM*. Cambridge: SCAR. 1993.
- [29] Smith, Jr. K.L., Baldwin, R.J., Glatts, R.C., Chereskin, T.K., Ruhl, H. and Lagun, V., Weather, ice, and snow conditions at Deception Island, Antarctica: Long time-series photographic monitoring. *Deep-Sea Research II*, 50, pp. 1649-1664, 2003. DOI:10.1016/S0967-0645(03)00084-5
- [30] Smithson, M.J., *Pelagic tidal constants 3*, IAPSO Publication Scientifique 35. Birkenhead: IAPSO, IUGG, 191 P, 1992.
- [31] Speroni, J.O., Dragani, W., D'onofrio, E.E., Drabble, M.R. y Mazio, C.A., Estudio de la marea en el borde de la Barrera Larsen, Mar de Weddell Noroccidental, Antártida. *GeoActa*, 25, pp. 1-11, 2000.
- [32] Thompson, R.O.R.Y., Low pass filter to suppress inertial and tidal frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13, pp. 1077-1083. 1983. DOI:10.1175/1520-0485(1983)013<1077:LPTS>2.0.CO;2
- [33] UNESCO, Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. *Technical Papers in Marine Science*, [Online]. 36, 25 P. 1981. Available at: <http://unesdoc.unesco.org/images/0004/000461/046148eb.pdf>

- [34] UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission workshop on sea level measurements in hostile conditions, 28–31 March 1988, Bidston, UK. IOC Workshop Report, [Online]. 54, 81 P. 1988. Available at: [http://www.jodc.go.jp/info/ioc\\_doc/Workshop/081610eo.pdf](http://www.jodc.go.jp/info/ioc_doc/Workshop/081610eo.pdf)
- [35] UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission manual on sea level measurement and interpretation. II. Emerging technologies. UNESCO Manuals and Guides, [Online]. 14, 77 P. 1994. Available at: [http://www.psmsl.org/train\\_and\\_info/training/manuals/ioc\\_14ii.pdf](http://www.psmsl.org/train_and_info/training/manuals/ioc_14ii.pdf)
- [36] Vidal, M., Berrocoso, M. and Jigena, B., Hydrodynamic modeling of port foster, Deception Island (Antarctica). In: Nonlinear and Complex Dynamics: Applications in Physical, Biological, and Financial Systems. [Online]. pp 193-203, 2011. Available at: [http://springer.libdl.ir/chapter/10.1007/978-1-4614-0231-2\\_16](http://springer.libdl.ir/chapter/10.1007/978-1-4614-0231-2_16)
- [37] Vidal, J., Berrocoso, M. and Fernández-Ros, A. Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica. Antarctic Science 24 (2), pp 193-201, 2011. DOI:10.1017/S095410201100068X
- [38] Walters, R.A. and Heston, C., Removing tidal period variations from time-series data using low-pass digital filters. Journal of Physical Oceanography, 12, pp. 112-115. 1982. DOI: 10.1175/1520-0485(1982)012<0112:RTPVFT>2.0.CO;2
- [39] Willmott, V., Domack, E., Padman, L. and Canals, M., Glaciomarine sediment drifts from Gerlache Strait, Antarctic Peninsula. In: Hambry, M., Christoffersen, P., Glasser, N.F., Hubbard, B. (Eds). Glacial sedimentary processes and products. IAS Special Publication. New York: Blackwells, pp. 67-84. 2007. DOI: 10.1002/9781444304435.ch6.
- [40] Wunsch, C. and Stammer, C., Atmospheric loading and the “inverted barometer” effect. Reviews of Geophysics, 35, pp. 79-107. 1997. DOI: 10.1029/96RG03037

**B. Jigena-Antelo**, es Ing. Hidrógrafo de ROA-IHM, España, en 1995, Ing. en Organización Industrial en 2006, Lic. en Náutica y Transporte Marítimo en 2011, Diploma de Estudios Avanzados (DEA) en Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Fotogrametría, en 2008, todos por la Universidad de Cádiz, España. MSc. en Ingeniería del Agua de la Universidad de Sevilla, en 2009. Desde 1987 ha trabajado en cargos técnicos, directivos y gerenciales en diferentes empresas y organismos técnicos, en áreas de geodesia, topografía, sistemas de información geográfica y teledetección, navegación e hidrología fluvial. Docente desde 1988 y desde 2006 es profesor investigador en el Departamento de Física Aplicada e investigador del Grupo RNM-314 Geodesia y Geofísica Cádiz y en el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Geofísica e investigador antártico, de la Universidad de Cádiz. Sus líneas de investigación: Modelos geoidales, altimetría y niveles del mar, redes geodésicas y sistemas GPS, Sistemas de información geográfica y teledetección.

**J. Vidal**, es Lic.en Ciencias del Mar en 1994 y Dr. en Ciencias del Mar en 2002 por la Universidad de Cádiz, España. Es profesor del Departamento de Construcciones Navales de la Universidad de Cádiz, España e investigador del grupo RNM-160 (Andalusian Research Plan) adscrito al Centro Andaluz de Ciencia y Tecnologías Marina. Líneas de investigaciones en niveles del mar, modelos hidrodinámicos y aplicaciones medioambientales. Experiencia como técnico especialista y, posteriormente como profesor investigador, en campañas oceanográficas durante más de 15 años. Colaborador e investigador de proyectos antárticos del Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz, España.

**M. Berrocoso-Domínguez**, es licenciado en Ciencias Matemáticas, especialidad de Astronomía, Geodesia y Mecánica Celeste en 1985, por la Universidad Complutense de Madrid, España y Dr. en Matemáticas en 1997, por la Universidad de Cádiz, España. Es profesor titular del área de Astronomía y Geodesia adscrito al Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias; investigador principal de proyectos de investigación financiados por el Gobierno de España. Responsable del Grupo de Investigación del área de Recursos Naturales y Medio Ambiente RNM314 Geodesia y Geofísica de la Junta de Andalucía. Líneas de investigación principales: Geodesia clásica y espacial, Satélites GNSS, Deformación tectónica y volcánica, Redes Geodésicas GNSS permanentes.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de  
Recursos Hidráulicos  
Especialización en Gestión Ambiental  
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos  
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo  
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos  
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: [acia\\_med@unal.edu.co](mailto:acia_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5105