

UNA METODOLOGIA PARA EL CALCULO DE LAS AMPLITUDES Y FASES DE LAS ONDAS COMPONENTES DE LA MAREA UTILIZANDO DATOS DE ALTIMETROS SATELITALES

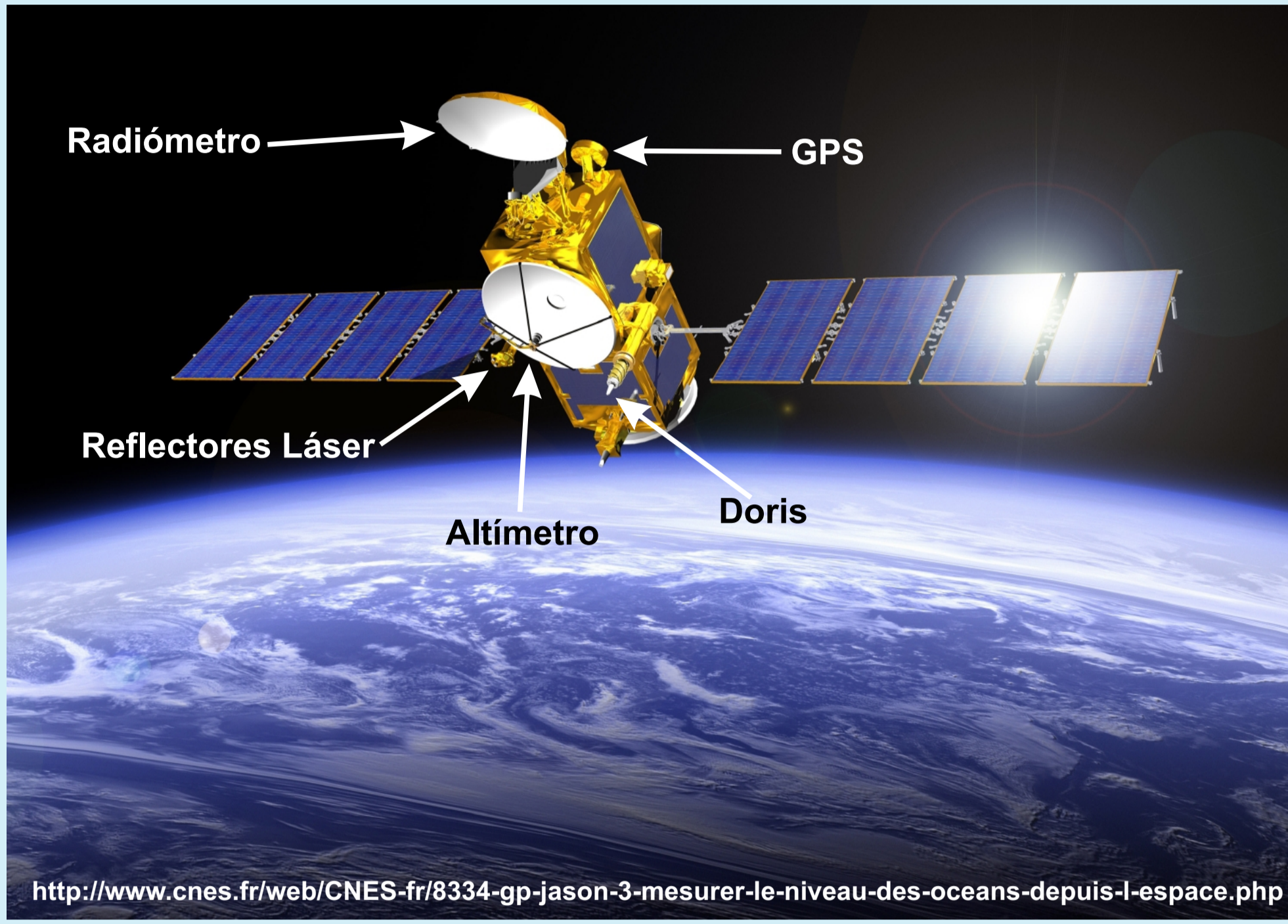
Enrique E. D'Onofrio^{1,2}, Fernando A. Oreiro^{1,2}, Walter H. Grismeyer¹, Mónica M. E. Fiore^{1,2}

¹ Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, Av. Montes de Oca 2124 (C1270ABV), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
² Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214 (C1127AAR), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Los satélites altimétricos orbitan alrededor de la Tierra, llevando a bordo un instrumento llamado altímetro de radar, que envía un pulso muy estrecho, a un tiempo dado, el cual es reflejado por la superficie terrestre y recibido en el altímetro cierto tiempo después. Observando estos tiempos, calculando la velocidad de propagación del pulso en el medio y la posición del satélite en su órbita con respecto a un elipsoide de referencia, es posible conocer la altura de la superficie del mar con respecto a este elipsoide. De esta manera los altímetros miden sistemáticamente la topografía de la superficie del mar, por lo que se han constituido en una herramienta muy importante para realizar estudios oceanográficos. Si bien estas misiones altimétricas comenzaron en mayo de 1973, con el lanzamiento del Skylab, recién a partir de la puesta en órbita de la misión TOPEX/Poseidon en agosto de 1992 fue posible detectar con precisión la señal de la marea astronómica. Tanto TOPEX/Poseidon como sus sucesores Jason 1 y Jason 2 muestrean la superficie del mar con un intervalo de 1 segundo entre los 66°S y 66°N (correspondiendo a una resolución espacial de 5,8 km a lo largo de la traza). La resolución temporal es de 9,9156 días, siendo éste el intervalo transcurrido entre 2 pasajes sucesivos del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre con un error de ±1km. Si bien este intervalo de muestreo genera aliasing en las frecuencias de las ondas componentes de la marea, como son conocidas estas últimas, es posible calcular las frecuencias aliadas.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para realizar análisis armónico por el método de mínimos cuadrados utilizando observaciones del nivel de la superficie del mar, a lo largo de la traza, de los altímetros TOPEX/Poseidon, Jason 1 y Jason 2. La misma se aplica a una serie de alturas de la superficie del mar provistas por AVISO, comprendidas en el interior de un círculo de 2.5km de radio centrado en las coordenadas 53.3417°S y 67.7650°O. Este radio se determina teniendo en cuenta que la variación de la altura de la marea dentro del círculo es del orden de 3cm (error adoptado para las alturas satelitales). Esta posición es elegida debido a que dista 6km de un fondeo de un mareógrafo S4 que permite comparar los resultados obtenidos. Para ambas posiciones se calculan las amplitudes y fases de 25 ondas componentes de marea. Las amplitudes más grandes corresponden a las componentes M₂, S₂ y N₂ con valores promedio de ambas mediciones de 287cm, 73cm y 72cm respectivamente. Con el objeto de comparar las amplitudes y fases obtenidas se calcula el valor medio cuadrático del desajuste (RMS_{Misfit}) para las 25 componentes. Para 20 componentes el RMS_{Misfit} es menor a 1cm, para 4 componentes es menor a 2cm y para la M₂ es de 6.7cm. Teniendo en cuenta los 6km entre ambas mediciones, las amplitudes y fases de las 25 ondas calculadas muestran una muy buena concordancia, lo cual valida la metodología empleada.



La figura superior muestra los instrumentos principales del satélite de la misión Jason2.

- Un Altimetro Poseidon-3 operando a 2 frecuencias, una de 13,575 GHz (principal) y otra de 5,3 GHz (secundaria), utilizada para determinar el contenido de electrones en la atmósfera.
- Un radiómetro que mide la radiación reflejada utilizando 3 frecuencias, con el objeto de calcular el agua y vapor de agua presentes en la atmósfera.
- Un receptor DORIS que utiliza una red terrestre de antenas para posicionar al satélite por efecto doppler
- Un arreglo de espejos, ubicado sobre el satélite, que reflejan señales láser emitidas desde estaciones terrestres, para posicionar al satélite
- Un receptor "Global Positioning System" (GPS).

PRINCIPIOS DE LA ALTIMETRIA SATELITAL



El altímetro determina la distancia R existente entre su posición y la superficie libre del mar (figura superior). Como se conoce la distancia H del satélite con respecto a un elipsoide de referencia (ligeramente diferente al WGS84), la diferencia de ambas distancias ($H-R$) permite calcular la altura (h) de la superficie del mar respecto del mencionado elipsoide. En muchas aplicaciones oceanográficas y geodésicas se utiliza la topografía dinámica del mar que es la altura ($hd=h-G$) de la superficie del mar referida al geode. La distancia R es estimada a través del tiempo de viaje de la señal por:

$$R = c \cdot \frac{t}{2} - \sum \Delta R_j$$

El primer término de la ecuación es la distancia calculada, despreciando la refracción atmosférica, utilizando una velocidad de la luz teórica c y un tiempo de viaje t . La sumatoria restada corresponde a correcciones del pulso radar que se muestran en la Tabla superior

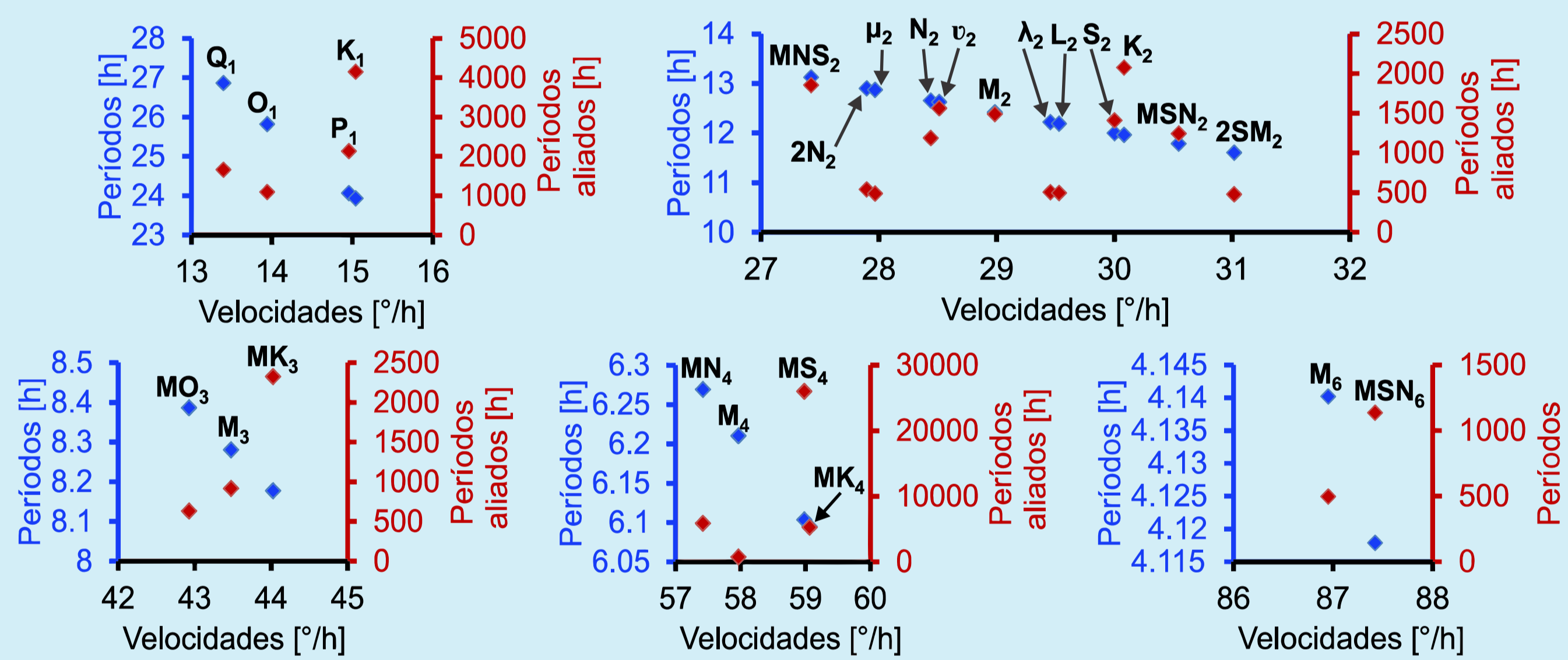
CORRECCION	OBJETIVO (breve síntesis)
Troposfera seca	Calcula la masa de aire seco en la trayectoria del pulso radar
Troposfera húmeda	Calcula la masa de vapor de agua en la trayectoria del pulso radar
Ionosfera	Calcula el retraso del pulso radar en la ionosfera utilizando doble frecuencia
Bias del estado del mar	Como hay más reflectores del pulso radar, en la parte baja de la ola que en la parte alta, se calcula la energía reflejada correspondiente a la superficie del mar sin olas.
Marea Oceánica	Se utilizan los modelos globales GOT4.7 y GOT4.8 (Ray, 1999) para restar la marea astronómica, si es necesario.
Carga oceánica	Calcula la deformación del fondo marino debido a la marea
Marea de la Tierra sólida	Respuesta elástica de la Tierra debido al potencial de marea
Marea de los polos	Respuesta del océano a pequeñas perturbaciones en la dirección del eje de rotación de la Tierra.
Dinámica atmosférica	Calcula la variación de altura del nivel del mar debido a la acción del viento y la presión atmosférica. Se utiliza el modelo MOG2D (Carrère and Lyard, 2003).

ALIASING

Cuando las alturas del nivel del mar se obtienen con un muestreo de una hora o menor, se utiliza el criterio de Rayleigh (Pugh, 1987) para determinar el período mínimo de medición necesario para resolver, sin interferencia de otras componentes, cualquiera de las ondas incluidas en el análisis armónico. En el caso de las series provenientes de los altímetros satelitales el intervalo de muestreo (9.9156 días) produce aliasing en las frecuencias de las ondas componentes de la marea. Las figuras de la derecha muestran las 25 ondas incluidas en este trabajo en color negro. Debajo del nombre de cada onda, con un rombo de color azul, se marcan los períodos de cada onda, y con un rombo de color rojo los correspondientes períodos aliados. Los períodos aliados (T_a) se calculan utilizando las frecuencias originales (f_r) y el intervalo de muestreo ($\Delta T = 9.9156$ días), con la siguiente ecuación (Chelton et al., 2001):

$$T_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta T}{\Delta \phi} \quad \text{donde} \quad \Delta \phi = 2 \cdot \pi \cdot (f_r \cdot \Delta T - [f_r \cdot \Delta T + 0.5])$$

El conocimiento de las frecuencias aliadas permite continuar aplicando el criterio de Rayleigh.

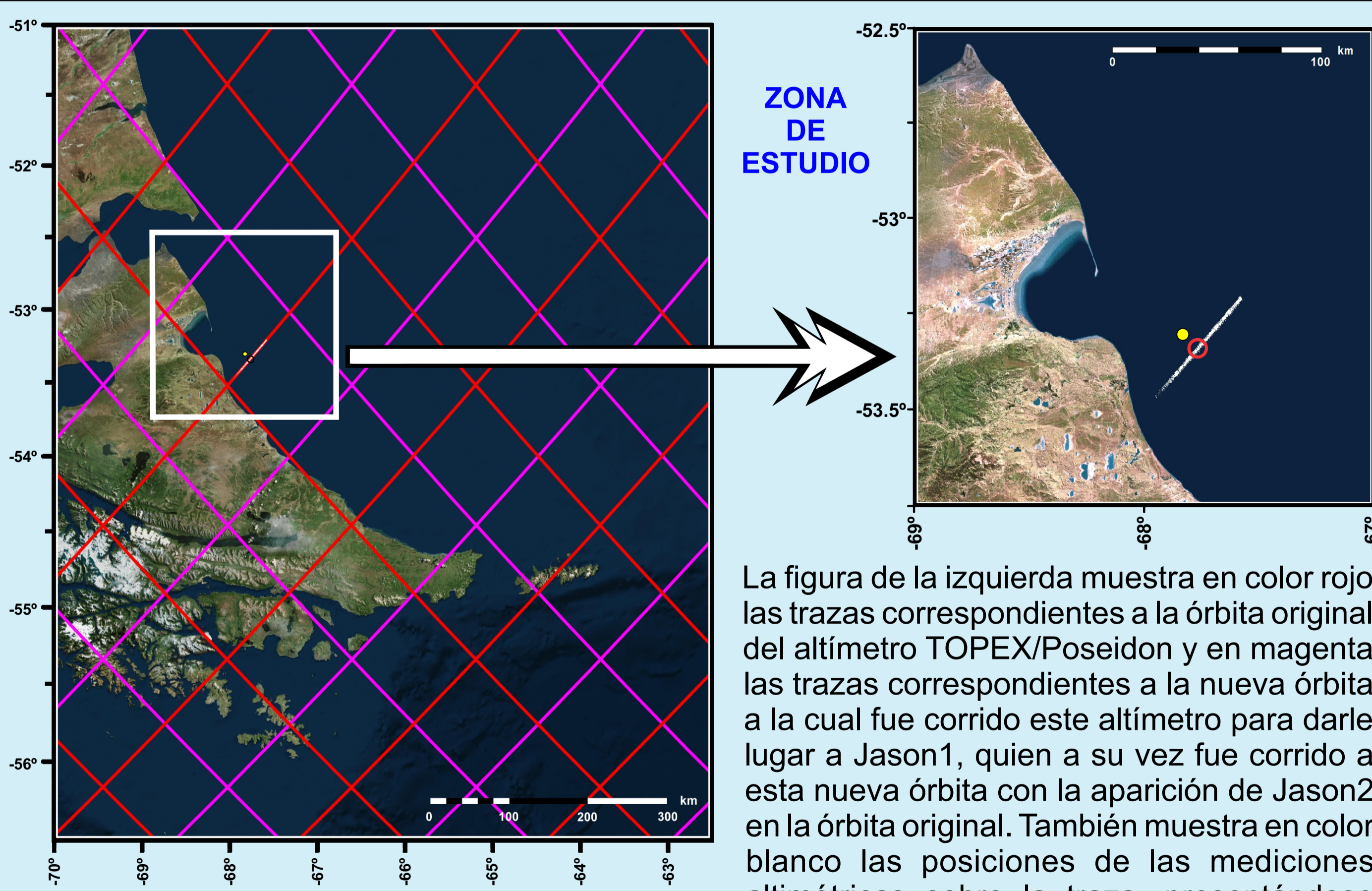


METODOLOGIA EMPLEADA

Se realizan análisis armónicos por el método de mínimos cuadrados utilizando la siguiente ecuación:

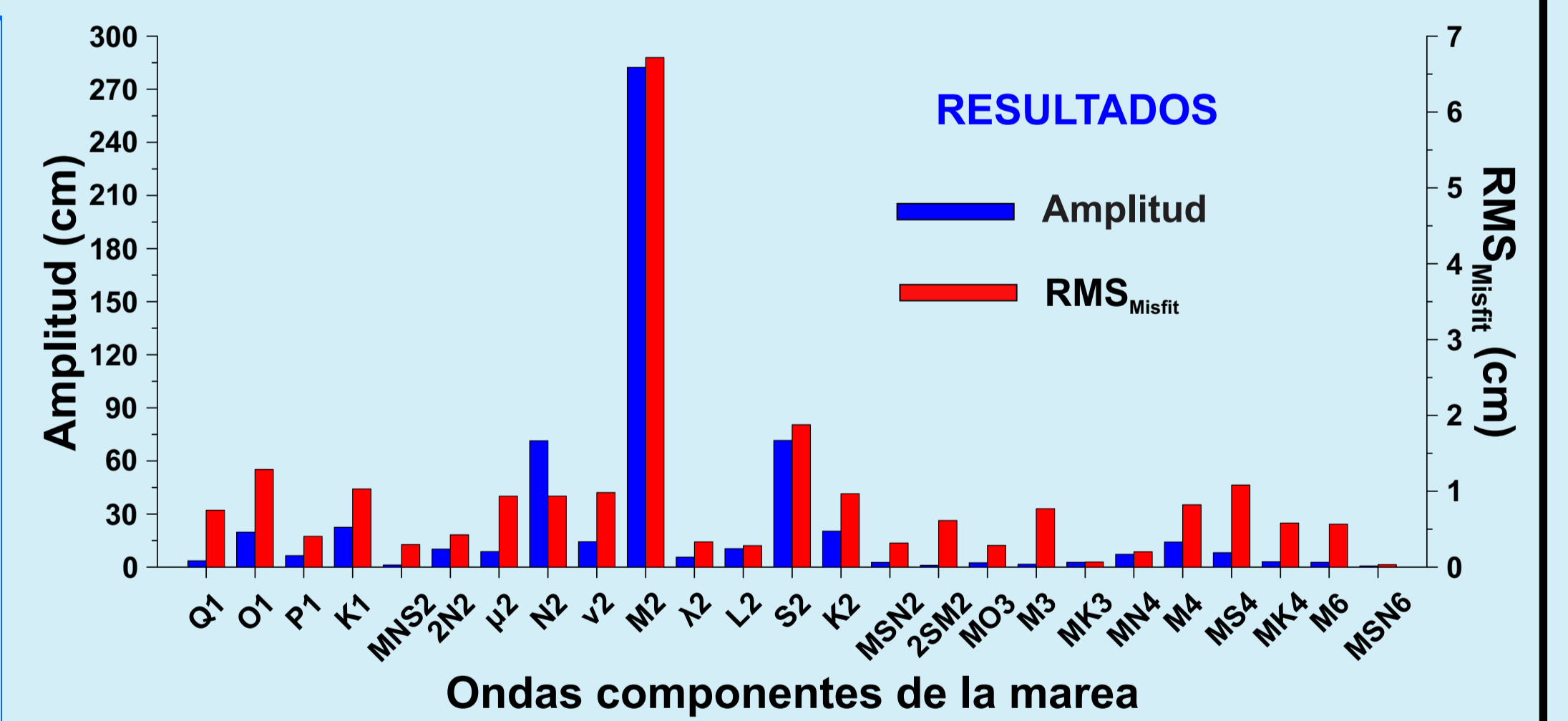
$$h(t) = Z_0 + \Delta Z \cdot t + \sum_{j=1}^n H_j \cdot f_j \cdot \cos((V + u)_j - g_j)$$

donde $h(t)$ es la altura de la marea observada al tiempo t , Z_0 es la altura del nivel medio del agua correspondiente al tiempo de origen de la serie, ΔZ es la tendencia lineal de la serie, H_j es la amplitud de la componente j , f_j es el factor nodal de la componente j , $(V+u)_j$ es el argumento de equilibrio de la componente j , g_j es la fase de la componente j y n es el número de componentes. A diferencia de los análisis armónicos tradicionales (Pugh, 1987; Schureman, 1988), esta ecuación evita utilizar a la velocidad angular de cada componente como la variación temporal del argumento de equilibrio ($V+u$), debido a que no tiene en cuenta la variación del factor u (período de 18.61 años). Además en los dos primeros términos del segundo miembro de la ecuación se tiene en cuenta la posible variación lineal del nivel medio.



La figura de la izquierda muestra en color rojo las trazas correspondientes a la órbita original del altímetro TOPEX/Poseidon y en magenta las trazas correspondientes a la nueva órbita a la cual fue corrido este altímetro para darle lugar a Jason1, quien a su vez fue corrido a esta nueva órbita con la aparición de Jason2 en la órbita original. También muestra en color blanco las posiciones de las mediciones altimétricas sobre la traza, presentándose una ampliación de estas últimas en la figura superior. La metodología propuesta se aplica a un fondeo realizado con un mareógrafo S4, denotado en las figuras con un círculo amarillo centrado en las coordenadas 53.3057°S y 67.8308°O, y a alturas altimétricas contenidas en un círculo rojo de 2.5km de radio centrada en las coordenadas 53.3417°S y 67.7650°O, que dista a 6km del fondeo. Se elige este radio teniendo en cuenta que la variación de la altura de la marea dentro del círculo es del orden de 3cm, similar al error adoptado para las alturas satelitales. Las alturas de la superficie del mar con sus correcciones, provenientes de los altímetros TOPEX/Poseidon, Jason1 y Jason2, para el periodo 1992-2012, fueron calculadas por Collecte Localisation Satellites (CLS) Space Oceanography Division y distribuidas por Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO), con soporte del Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).

Onda	Velocidad [°/h]	Serie de datos altimétricos		Serie medida con S4	
		Amplitud [cm]	Fase referida a Greenwich [°]	Amplitud [cm]	Fase referida a Greenwich [°]
Q ₁	13.3986609	3.6	26.2	4.5	34.3
O ₁	13.9430356	19.7	57.2	21.5	58.4
P ₁	14.9589314	6.5	104.2	6.4	109.3
K ₁	15.0410686	22.5	119.2	23.8	117.5
MNS ₂	27.4238338	1.2	238.4	1.6	235.2
2N ₂	27.895355	10.2	282.1	10.7	280.8
μ ₂	27.9682085	8.8	288.7	9.7	295.0
N ₂	28.4397295	71.4	317.8	72.7	318.1
v ₂	28.5125832	14.3	318.9	15.5	321.6
M ₂	28.9841042	282.4	347.3	291.6	346.9
λ ₂	29.4556253	5.7	356.2	5.4	352.1
L ₂	29.5284789	10.4	3.1	10.2	5.0
S ₂	30.0000000	71.6	39.4	73.7	40.7
K ₂	30.0821373	20.3	36.1	21.5	38.2
MSN ₂	30.5443747	2.7	239.4	2.6	249.1
2SM ₂	31.0158958	1.1	298.7	1.9	296.7
MO ₃	42.9271398	2.5	288.0	2.9	289.1
M ₃	43.4761564	1.7	73.9	0.6	64.8
MK ₃	44.0251729	2.7	9.1	2.7	7.3
MN ₄	57.4238338	7.3	116.1	7.1	114.1
M ₄	57.9682085	14.2	146.8	15.0	143.6
MS ₄	58.9841042	8.1	196.5	8.4	206.9
MK ₄	59.0662415	3.1	197.2	2.3	204.7
M ₆	86.9523127	2.7	348.4	3.3	359.3
MSN ₆	87.4238338	0.7	18.3	0.6	19.3



La Tabla de la izquierda muestra los resultados de los análisis armónicos de la serie de alturas, muestreadas cada 20 minutos, proveniente del fondeo del S4 durante el periodo 29/09/2008 al 12/06/2009, y de datos altimétricos correspondientes al periodo 1992-2012, a los cuales no se les aplica la corrección por marea. Dado el tiempo de medición del S4 fueron descontaminadas las componentes P₁, K₁ y S₂, utilizando las constantes armónicas de Río Gallegos, siguiendo la metodología propuesta por Godin (1972). Las amplitudes más grandes corresponden a las componentes M₂, S₂ y N₂ con valores promedio de ambas mediciones de 287cm, 73cm y 72cm respectivamente. Con el objeto de comparar las amplitudes y fases obtenidas se calcula el valor medio cuadrático del desajuste (RMS_{Misfit}) para las 25 componentes (figura superior), utilizando la siguiente ecuación:

$$RMS_{Misfit} = \left(\frac{|H_A \cdot \cos(g_A) - H_{S4} \cdot \cos(g_{S4})|^2 + |H_A \cdot \sin(g_A) - H_{S4} \cdot \sin(g_{S4})|^2}{2} \right)^{1/2}$$

donde H_A y g_A son la amplitud y la fase referida al meridiano de Greenwich de cada una de las 25 componentes de marea de la serie de datos altimétricos y H_{S4} y g_{S4} las correspondientes de la serie de alturas provenientes del S4.

CONCLUSIONES

Las diferencias de las amplitudes de las ondas correspondientes de los dos análisis armónicos realizados son menores a 2cm, con excepción de la diferencia de la M₂ que es de 9.3cm. Esta última diferencia se explica por la distancia de 6km existente entre las dos mediciones. Las diferencias de las fases correspondientes, transformadas con la velocidad de las ondas a unidades de tiempo, muestran a 19 componentes con una diferencia menor que 10min, 3 con diferencias menores que 15min, 2 con diferencias cercanas a 20min y una de alrededor de 36min. Con el objeto de comparar conjuntamente las amplitudes y fases obtenidas se calcula el valor medio cuadrático del desajuste (RMS_{Misfit}) para las 25 componentes. Para 20 componentes el RMS_{Misfit} es menor a 1cm, para 4 componentes es menor a 2cm y para la M₂ es de 6.7cm. Teniendo en cuenta los 6km entre ambas mediciones y los errores propios de las mediciones altimétricas (3cm) y del registrador S4 (4cm), las comparaciones realizadas para las amplitudes y fases de las 25 ondas calculadas muestran una muy buena concordancia, lo cual valida la metodología empleada.

REFERENCIAS

Carrère L. and F. Lyard, 2003. Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing - comparisons with observations. Geophysical Research Letters, Vol. 30, No. 6: 1275, doi: 10.1029/2002GL016473.
 Chelton, D.B., B.J. Ries, B.J. Haines, L.L. Fu and P.S. Callahan, 2001. Satellite altimetry. In: Fu, L.L., A. Cazenave, (Eds.), Satellite Altimetry and Earth Sciences. International Geophysics Series, New York. pp. 1-126.
 Godin, G., 1972. The Analysis of Tides. University of Toronto Press. Toronto, pp. 264.
 Pugh, D. T., 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley & Sons Ltd. pp. 472.
 Ray, R.D., 1999. A global ocean tide model from TOPEX/Poseidon altimetry. NASA Rep. NASA/TM-1999-209478, pp. 58.
 Schureman, P., 1988. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey. Special Publication No. 98. pp. 317.