

TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN APLICADAS AL ESTUDIO DE LAS ONDAS INTERNAS EN EL ESTRECHO DE GIBRALTAR

S. Flecha ^(*), A. Vázquez ^(**) y G. Navarro ^(*).

() Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, (CSIC). Campus Universitario, 11510 Puerto Real, Cádiz.
susana.flecha@icman.csic.es*

*(**) Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz
Campus Universitario, 11510 Puerto Real, Cádiz.*

RESUMEN

En el presente estudio se ha utilizado una serie de imágenes instantáneas procedentes de sensores de Temperatura Superficial del Mar (AVHRR), rugosidad de la superficie (ASAR) y de color oceánico (MODIS y MERIS), para la caracterización de la generación y propagación de las ondas internas en el Estrecho de Gibraltar. El procesamiento de las imágenes de color oceánico nos ha permitido relacionar los procesos físicos asociados a los frentes de ondas con sus implicaciones biológicas. Las imágenes de MODIS y MERIS muestran, durante la generación de las ondas internas, unas estructuras con máximos de clorofila y aguas frías en los bordes costeros al norte y sur del umbral de Camarinal. Cuando las ondas se encuentran en el Mar de Alborán, se observa en las imágenes de color, la presencia de máximos de clorofila asociados a los frentes de onda. Estos resultados parecen indicar que durante la generación de las ondas internas existe una succión de aguas costeras ricas en clorofila que penetra hacia el centro del canal y que acompaña a las ondas internas en su viaje hacia el Mar de Alborán.

ABSTRACT

In the present study images from surface temperature sensor (AVHRR), surface roughness sensor (ASAR) and ocean color (MODIS and MERIS) were used to characterize the internal waves generation and propagation in the Strait of Gibraltar. The ocean color image processing enable us to relate the physical processes associated to the wave fronts with their biological implications. MODIS and MERIS images display, during the generation of internal waves, maxima chlorophyll and cold water structures near coastal edges in the North and South of the Camarinal Sill.

When the wave fronts are in the Alboran Sea, the presence of a chlorophyll maximum associated is observed in the color images. These results suggest that during the generation of internal waves a suction of coastal rich-chlorophyll waters occurs and they penetrates to the center of the channel, accompanying internal waves on their travel towards the Alboran Sea.

Palabras clave: Estrecho de Gibraltar, ondas internas, radar, color oceánico, temperatura superficial del mar.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se desarrolla en el área comprendida por el Estrecho de Gibraltar y el Mar de Alborán. Uno de los fenómenos oceanográficos más característicos de esta zona es la presencia de ondas internas de gran amplitud y corto periodo. Estas ondas se generan debido a la interacción del flujo de marea con la topografía del fondo produciéndose un salto hidráulico en la zona Oeste del umbral de Camarinal, el cual es un relieve submarino de ~200 m de profundidad que recorre el estrecho de norte a sur entre Punta Camarinal y Punta Altares. Este evento sucede durante la máxima saliente de flujo de marea hacia el Atlántico (Watson y Robinson, 1990), las ondas permanecen al menos cuatro horas en el umbral hasta que el flujo saliente se debilita, entonces se liberan sufriendo una desintegración progresiva y propagándose hacia el

Mediterráneo (Bruno *et al.*, 2002). Las señales producidas por las ondas internas consisten en bandas rugosas (denominadas hervideros) separadas a una distancia de 1 Km cada una y alineadas con el umbral de Camarinal, que se corresponden con zonas de convergencia y divergencia (Bruno *et al.* 2002).

En cuanto a las implicaciones biológicas, se ha observado que las ondas internas son capaces de redistribuir las células de fitoplancton (Lamb 1997), causando un ascenso de las mismas a la superficie (Witman *et al.*, 1993) o un empaquetamiento en manchas de alta concentración de clorofila (Helfrich 2003). Los procesos de mezcla asociados a las ondas internas son capaces de provocar la recirculación hacia el interior del Mar de Alborán de una parte de los nutrientes totales que contiene el MOW (del inglés Mediterranean Output Water). Esta fuente de

nutrientes podría provocar un crecimiento exponencial de las poblaciones fitoplanctónicas dentro del Chorro Atlántico debido a la existencia de mecanismos de advección horizontal de masas de agua costera desde el Norte o el Sur y su incorporación a la circulación general entre cuencas a través del Estrecho (Macías *et al.*, 2008). Este agua costera suele presentar mayores concentraciones de clorofila que serían incorporadas de forma pulsante o periódica a la zona central del Estrecho, coincidiendo con la presencia de fenómenos ondulatorios sobre el umbral (Bruno *et al.*, 2002).

Los procesos de generación y propagación de las ondas internas de gran amplitud y corto periodo en el Estrecho se caracterizan por su elevada variabilidad espacio-temporal y, por lo tanto, el análisis de imágenes promediadas de color oceánico y temperatura superficial del mar, no contienen información suficiente para llevar a cabo el estudio de la relación entre procesos físicos y biológicos asociados a las ondulaciones internas de esta zona. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es caracterizar los procesos ondulatorios y sus repercusiones biológicas en el área comprendida por el Estrecho de Gibraltar y el Mar de Alborán occidental a través de la utilización de imágenes instantáneas de radar, color oceánico y Temperatura Superficial del Mar, tanto en la zona de generación como en la de propagación de las ondas internas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Imágenes de satélite. Radar de Apertura Sintética (SAR).

Las imágenes estudiadas proceden del sensor ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) el cual se encuentra a bordo del satélite ENVISAT. Las imágenes se han obtenido para todo el periodo de estudio comprendido entre los años 2003-2008, a través de la aplicación Eoli-sa 6.0.1. Se han seleccionado las Imágenes del Image Mode (IM), ya que son imágenes que poseen una alta resolución espacial aproximadamente de 30 m. Una vez obtenidas las imágenes se han seleccionado los días con una mayor presencia de ondas internas, y se han localizado las coordenadas de los frentes de onda para superponerlos sobre las imágenes de color oceánico.

Temperatura Superficial del Mar

Para la estimación de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) desde el satélite se han utilizado los datos del sensor AVHRR obtenidos a través del CREPAD (INTA). Las imágenes se han descargado vía FTP y previamente han sido procesadas por el CREPAD. El algoritmo utilizado

para la obtención de la TSM es el Multi-Canal denominado MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature) obtenido por McClain (1985). Posteriormente estas imágenes se han proyectado y graficado utilizando una proyección Mercator y usando M_Map v1.3 toolbox para Matlab.

Color Oceánico

En este trabajo se han empleado imágenes de color oceánico procedentes de los sensores: MODIS y MERIS. Las imágenes del sensor MODIS se solicitaron a la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), y se descargaron por FTP en formato HDF. Posteriormente se procesaron y representaron mediante una proyección Mercator usando rutinas propias de Matlab. Para la obtención de las imágenes del sensor MERIS se ha utilizado la herramienta Eoli-sa 6.0.1, seleccionando las imágenes de alta resolución espacial (300 m). Las imágenes han sido leídas con el *software* Beam VISAT 4.1.1, se ha seleccionado la zona de interés y posteriormente se ha proyectado con el mismo *software*. Por último, se ha exportado en formato HDF v5 para ser representada en proyección Mercator usando el programa Matlab. Sobre las imágenes MERIS, se han situado los frentes de ondas obtenidos de las imágenes ASAR.

Predicciones de corriente

Se han realizado predicciones de corrientes de marea en el umbral de Camarinal utilizando el *software* Tides 2000 Versión 1.1, a partir de un modelo de predicción armónica. Este modelo reproduce con suficiente validez el comportamiento de las corrientes en el umbral de Camarinal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta una serie de imágenes instantáneas para un caso concreto de generación y otro de propagación de las ondas internas en el año 2008.

Generación de ondas internas

En las imágenes de satélite correspondientes al 2 de Junio de 2008, se puede observar en el área del umbral de Camarinal, la generación de ondas internas en la imagen del sensor ASAR (Fig. 1.a), mostrando la predicción de marea para las 10:00 horas del día 2 de junio, una velocidad de corriente vaciante superior a -1 m s^{-1} (Fig. 1.b), por lo que la generación de ondas internas es propicia (Vázquez *et al.*, 2008), y por otro lado, el aumento de clorofila superficial en la zona costera del umbral de Camarinal próxima a la costa de Marruecos, como se contempla en la imagen del sensor MERIS (Fig. 1.c) y MODIS (Fig. 1. d-e).

Este aumento se produce debido a la succión provocada por la divergencia/convergencia producida por la generación de ondas internas en este área del Estrecho (Macías *et al.*, 2008). Este máximo costero, como se muestra en las imágenes consecutivas del sensor MODIS, ha sufrido un desplazamiento hacia el este y hacia el centro del canal en el tiempo, debido al transporte producido por la propagación de las ondas internas en dirección hacia el Mediterráneo. Igualmente, las imágenes del sensor AVHRR (Fig. 1. f-h) muestran una pequeña zona de aguas más frías en la costa marroquí, correspondiente al ascenso de aguas mediterráneas.

Propagación

De las imágenes y datos obtenidos para el día 11 de Enero de 2008, se puede observar, en la imagen del sensor ASAR (Fig. 2.a), una onda interna bien desarrollada, en forma de tren de ondas con seis crestas fácilmente identificables y sus correspondientes senos, saliendo del Estrecho de Gibraltar hacia el Mar de Alborán. En el momento de toma de la imagen de radar, las 10:28 horas, la corriente de marea se encuentra aproximadamente con una velocidad casi nula, como se muestra en la predicción de corriente de marea (Figura 2.b). Sin embargo, debido a la velocidad de propagación y a la distancia recorrida (Vázquez *et al.*, 2008) la generación del tren de ondas internas observado en la imagen ASAR corresponde al anterior ciclo de marea en el momento de máxima saliente, correspondiente a las 00:00 del día 11, en el que la predicción refleja una velocidad de -0.93 m s^{-1} .

En la imagen del sensor MERIS (Fig. 2.c) se observa la presencia de bandas de valores altos de clorofila $\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$, las cuales, al representar en la imagen obtenida del sensor MERIS, las crestas de las ondas internas extraídas de la imagen radar (Fig. 2.d), se revela que se localizan en el área en la que se encuentra el tren de ondas desplazándose hacia el Mar de Alborán. Estas bandas se pueden observar con detalle en los transectos longitudinales de concentración de clorofila (Fig. 2.e), tratándose estos, de tres picos máximos, desplazados ligeramente hacia el oeste en los transectos Norte y Sur, y hacia el Este en el transecto central, correlacionados con la forma del frente de la onda interna representado en la imagen del sensor MERIS. Estas bandas de valores superiores de clorofila superficial, se producen debido a la

advección de las ondas internas hacia el este, y al tener las ondas internas una mayor velocidad sobre las crestas que sobre los senos, se produce un forzamiento que genera una zona de convergencia en la superficie del mar que provoca la acumulación de clorofila.

BIBLIOGRAFIA

- Bruno M., Alonso J.J., Cózar A., Vidal J., Ruiz-Cañavate A., Echevarría F. y Ruiz J. 2002, The boiling-water phenomena at Camarinal Sill, the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Research II*, 49, 4097-4113.
- Helfrich K.R. y Pineda J. 2003, Accumulation of particles in propagating fronts. *Limnology and Oceanography*, 48 (4), 1509-1520.
- Lamb K.G. 1997, Particle transport by nonbreaking, solitary internal waves. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C8), 18641-18660.
- Macías D., Lubian L.M., Echevarría F., Huertas I.E., García C.M. 2008. Chlorophyll maxima and water mass interfaces: Tidally induced dynamics in the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Research I*, 55, 832-846.
- McClain, E. P., Pichel, W. G., & Walton, C. C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90, 11,587-11,601.
- Vázquez A., Bruno M., Izquierdo A., Macías D., Ruiz-Cañavate A. 2008. Meteorologically torced subinertial flows and internal wave generation at the main sill of the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Research I*, 55, 1277-1283.
- Watson G. y Robinson I.H. 1990. A study of internal wave propagation in the Strait of Gibraltar using shore-based radar images. *Journal of Physical Oceanography*, 20, 374-395.
- Witman J.I., Leichter J.J., Genovese S.J. y Brooks D.A. 1993, Pulsed phytoplankton supply to the rocky subtidal zone: influence of internal waves. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 90, 1686-1690.

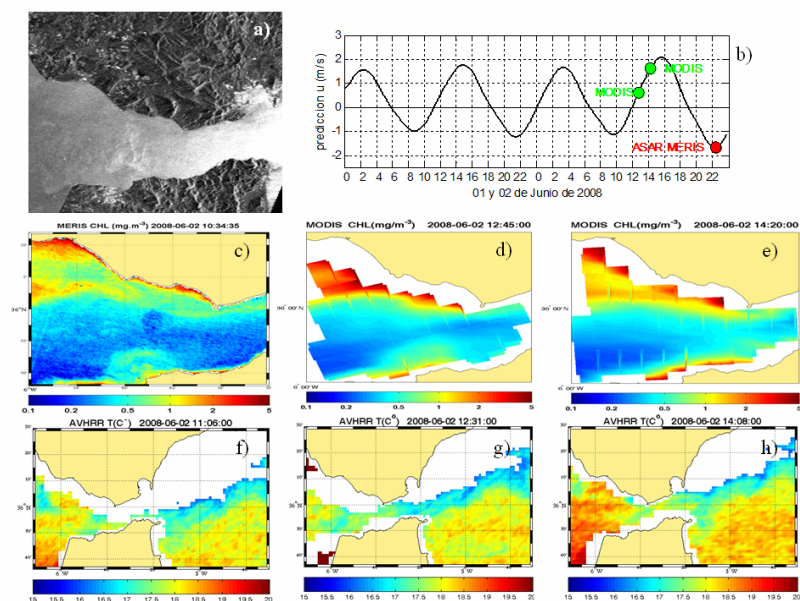


Figura 1.- Imagen ASAR; (a) predicción de marea (b) e imágenes de MERIS (c), MODIS (d-e) y de AVHRR (f-h) para el 02 de Junio de 2008.

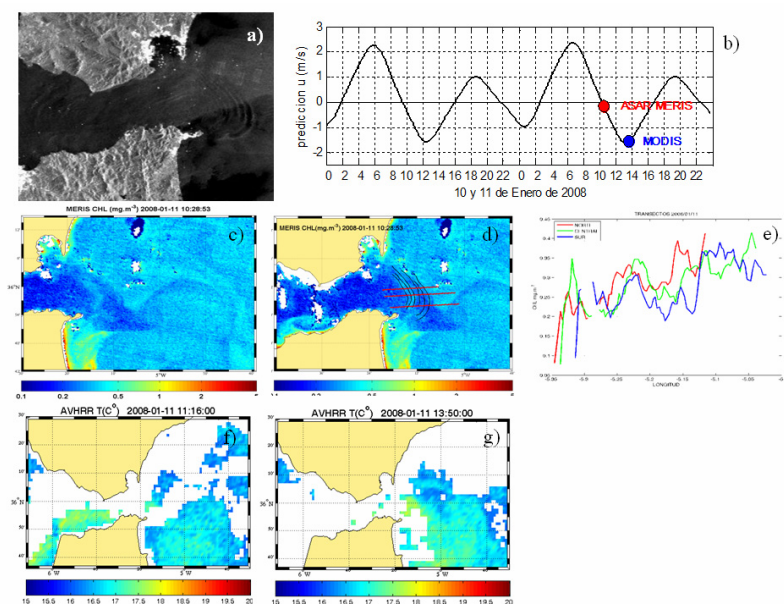


Figura 2.- Imagen ASAR (a), predicción de marea (b) imagen de MERIS (c), representación de los frentes de onda (d) y transectos (e) e imágenes de AVHRR (f-g), correspondientes al 11 de Enero de 2008.