



ARTÍCULO

## Construcción de espectros de oleaje en el Mar Caribe a partir de mediciones satelitales

### Wave spectra construction in the Caribbean Sea using satellite measurements

Fecha recepción: 2007-09-06 / Fecha aceptación: 2007-10-05

**Rafael Ricardo Torres Parra**

rtorres@cioh.org.co

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D. T. y C.

**Serguei Lonin**

slonin@costa.net.co

Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"

□ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D. T. y C.

### Resumen

Se explora la construcción de espectros de oleaje a partir de información de altura significativa de la ola del satélite Jason-1, utilizando el espectro preconcebido JONSWAP, con el fin de ser empleados en la asimilación de datos en el modelo de oleaje de tercera generación del CIOH. Se utilizó información de un producto operacional, el Compendio de Datos Operacionales del Sensor (OSDR), disponible con un retraso de 3-5 horas, al cual se le aplicó una corrección para eliminar errores sistemáticos y el control de calidad necesario para alcanzar la mayor exactitud del Compendio Intermedio de Datos Geofísicos (IGDR), otro producto con mayor procesamiento disponible con un retraso de 2-3 días. Para verificar los resultados de la construcción de los espectros se utilizaron dos boyas de oleaje direccional instaladas por la Dirección General Marítima de Colombia, encontrándose gran coincidencia entre el espectro de las boyas y el construido.

**Palabras clave:** Altura significativa de la ola, Jason-1, espectro de oleaje.

### Abstract

Construction of wave spectra using significant wave height from Jason-1 satellite has been explored employing the JONSWAP preconceived spectra, to be used on data assimilation on a third generation wave model operated in the Oceanographic and Hydrographic Research Center -CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas). Information from an operational data product, the Operational Sensor Data Record (OSDR) available within a 3-5 hour delay was employed, on which a correction to eliminate systematic bias and necessary quality control were applied to achieve a higher accuracy offered on the Interim Geophysical Data Record (IGDR), a more detailed data product available within a 2-3 day delay. Two directional wave buoys installed by Colombia's Maritime Authority were used to verify the wave spectra construction results, finding a great coincidence between the buoy and constructed spectra.

**Key words:** Significant wave height, Jason-1, Wave spectra

## Introducción

En las últimas décadas la comunidad oceanográfica ha reconocido la importancia de la modelación numérica y mediciones satelitales en el conocimiento y descripción de la dinámica del oleaje en el océano, lo cual ha generado importantes esfuerzos en el desarrollo de experimentos a nivel internacional como el Proyecto de Oleaje Conjunto en el Mar del Norte (JONSWAP [1]), Proyecto de Modelación de Olas del Mar (SWAMP [2]) o el Grupo de Modelación de Oleaje (WAMDI [3]), así como misiones satelitales como la del TOPEX/Poseidon, ERS, GFO por citar algunos [4]. Esta necesidad también fue reconocida por la Dirección General Marítima de Colombia DIMAR, la cual para el año 2007 contaba con dos proyectos de investigación relacionados con el monitoreo y pronóstico del oleaje.

Pese al avance alcanzado en el pronóstico del estado del mar con modelos numéricos de tercera generación, y aún cuando éstos numéricamente permiten resolver el comportamiento del espectro del oleaje, siempre habrá incertidumbre en cuanto a la exactitud de los resultados de los pronósticos, causados por el planteamiento físico del problema, el empleo de métodos numéricos con diferentes órdenes de aproximación, la calidad de datos de entrada, restricciones computacionales, entre otros. Para lograr superar este problema, es necesario tratar de disminuir al máximo la brecha entre la realidad (siempre desconocida) y las salidas de los modelos numéricos, para lo cual se utilizan técnicas que permitan la asimilación de datos, en las cuales se combinan los diferentes métodos de medición de oleaje disponibles con las herramientas de modelación numérica [5].

Esta problemática fue abordada en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH de la Dirección General Marítima - DIMAR, donde se encuentra en operación el modelo numérico para la predicción de oleaje NEDWAM [6] desde 1996. Sin embargo, dada las limitaciones computacionales existentes en el momento de su implementación y que el modelo no había sido actualizado, éste arrojaba resultados adecuados solo en una escala regional. Motivados por el deseo de mejorar ésta y otras herramientas numéricas disponibles en el CIOH, DIMAR inició en el año 2007

el proyecto “Sistema de pronósticos oceanográficos y atmosféricos a escala local - SPOA” [7].

Uno de los objetivos de este proyecto es mejorar el modelo de oleaje de tercera generación disponible en el Caribe, asimilando las mediciones de oleaje disponible, logrando pronósticos más exactos, lo cual es posible aprovechando la mayor capacidad computacional por la puesta en funcionamiento de un cluster con un arreglo de 24 procesadores como parte del proyecto SPOA, el contar con mediciones *in situ* de las boyas de oleaje direccional instaladas por DIMAR como parte del proyecto “Sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina - SMPOM” [8] y el acceso a mediciones satelitales de altura de la ola [4].

En el desarrollo de este objetivo, un reto surgió por cuanto las mediciones con altímetros a bordo de plataformas satelitales proveen información exclusivamente de la altura significativa de la ola ( $H_{s_{sat}}$ ), en tanto que en los modelos de oleaje de tercera generación, el espectro del oleaje se computa mediante la integración de la ecuación del balance de energía, sin ninguna restricción previa, por lo cual es necesario asimilar información espectral.

El presente trabajo muestra una propuesta para la construcción de espectros de oleaje en el Mar Caribe a partir de mediciones de  $H_{s_{sat}}$  del satélite Jason-1, que puedan ser asimilados de manera operacional en el modelo de oleaje utilizado en el CIOH, empleando el espectro preconcebido JONSWAP [1] de acuerdo con los resultados de Torres y Lonin [9].

Se usaron datos del satélite Jason-1, el cual orbita desde el 7 de diciembre de 2001 como sucesor del satélite TOPEX/Poseidon, en una misión conducida en conjunto por la Agencia Francesa Espacial (*Centre National d'Etudes Spatiales* - CNES) y la Administración Espacial y Aeronáutica de los Estados Unidos (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA). En el artículo se evalúan los productos que se generan con datos del satélite y el control de calidad aplicado a los mismos.

Las mediciones de  $H_{s_{sat}}$  del satélite Jason-1 han sido estudiadas en trabajos como los siguientes: Ménard et al. [10], quienes evaluaron los niveles de error de

diferentes productos con la plataforma ya en vuelo. Desai y Vincent [11] realizaron la evaluación estadística de las mediciones del altímetro comparado dos productos. Queffeuou [12] validó mediciones de  $Hs_{sat}$  de diferentes altímetros entre sí y con respecto a boyas de oleaje. También la asimilación de datos del satélite Jason-1 en modelos de tercera generación fue estudiado por Skandrani y Queffeuou [4], quienes compararon el impacto de asimilar datos de múltiples satélites para el pronóstico de oleaje a escala global.

Con el artículo se logra mostrar que es posible construir adecuadamente el espectro de frecuencias  $S(f)$  con mediciones de  $Hs_{sat}$  del satélite Jason-1 en el mar Caribe, quedando disponible para ser asimilada en un modelo de oleaje de tercera generación.

## ***Materiales y métodos***

### **Datos del Satélite Jason-1**

El Jason-1 es un satélite de órbita polar que repite su huella en tierra cada 9.9156 días en lo que se denomina un ciclo. Cada ciclo consta de 254 pases, en cada uno de los cuales el satélite transita sobre el planeta en sentido Norte - Sur o viceversa. El tránsito del satélite en cada pase demora aproximadamente 56 minutos. De estos pases, dieciséis tienen su huella en tierra dentro del dominio del Mar Caribe (en la figura 1 se muestran cinco de estos pases), por lo cual pueden ser utilizados para la asimilación de datos en el modelo de oleaje usado en el CIOH.

De los múltiples instrumentos con que cuenta el satélite, el sensor más importante a bordo es el altímetro de radar "Poseidón 2", cuya señal se analiza en tiempo real con un algoritmo de estimaciones a bordo del satélite, con el cual se calcula, entre otros,  $Hs_{sat}$  [13]. También tiene un radiómetro de microondas, para calcular el contenido de vapor de agua en la troposfera a lo largo del pulso del altímetro, con lo cual se puede obtener el error del satélite en las mediciones de distancia causadas por el retraso del pulso por el vapor de agua [14].

Los principales parámetros medidos por el altímetro son la altitud,  $Hs_{sat}$  y el "retorno de potencia" conocido también como coeficiente de reflexión de la señal en la misma dirección de la emisión (*backscatter coefficient*  $\sigma_0$ ). Estos parámetros son estimados cada

50 m, es decir con una frecuencia de 20 Hz, las cuales son comprimidas (dependiendo de la cantidad de mediciones disponibles) mediante promedio o regresión lineal a mediciones de 1 Hz. La distancia de la huella en tierra de estas mediciones en el dominio del Mar Caribe fueron calculadas en aproximadamente 5.930 metros, por lo que cada valor de  $Hs_{sat}$  es representativo para una distancia de aproximadamente 6.000 metros sobre la huella del satélite en tierra. Las distancias de los datos tomados a 20 Hz serán entonces de menos de 300 metros entre sí.

De acuerdo con Picot et al. [14], se tienen tres niveles de procesamiento de los datos: (1) datos de telemetría o en bruto, (2) compendio de datos del sensor y (3) compendio de datos geofísicos. El compendio de datos operacionales del sensor - OSDR (Operational Sensor Data Record), es un producto no validado que utiliza información de ubicación y altitud disponibles por una órbita computada a bordo del satélite en tiempo real. Estos archivos están disponibles con un atraso de 3 a 5 horas, e incluyen datos de  $Hs_{sat}$  con una frecuencia de 1 Hz. Este producto tiene como finalidad primordial proveer a centros de pronósticos los datos del satélite para ser usados en la asimilación de manera operacional en modelos numéricos, lo cual es del mayor interés dentro del proyecto SPOA.

De otra parte, el compendio de datos geofísicos está disponible a través de dos productos: El compendio intermedio de datos geofísicos - IGDR (*Interim Geophysical Data Record*) y el compendio de datos geofísicos - GDR. Éstos se diferencian de los OSDR por cuanto se aplica un re-traqueo en tierra a las ondas electromagnéticas del altímetro, con lo cual se mejora la exactitud de las mediciones. Otra diferencia es que los compendios de datos geofísicos contienen todas las correcciones ambientales y geofísicas. En estos productos  $Hs_{sat}$  está disponible con una frecuencia de 1 y 20 Hz [14].

El IGDR es un producto no validado cuyos archivos están disponibles con una demora de 2 a 3 días, en tanto que el GDR es un producto completamente validado que utiliza una órbita precisa y re-traqueo en tierra, estando disponibles con una demora de 30 días. La diferencia más significativa entre los productos IGDR y GDR, es que este último utiliza una órbita más precisa.

Los productos de este satélite se encuentran dispuestos por el CNES a través del “Archivo, validación e interpretación de datos oceanográficos satelitales” - AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*), así como por la NASA a través del “Centro de distribución y archivo activo de oceanografía Física” - PO.DACC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*).

### Datos de las boyas de oleaje direccional

Como parte del proyecto SMPOM [8], DIMAR instaló en el año 2006 una boya de oleaje direccional en Bocas de Ceniza, cerca de Barranquilla (Lat. 11°32'N y Long. 74°40'W) y en el año 2007 otra boya al norte de la isla de Providencia (Lat. 13°32'N y Long. 81°20'W) a una profundidad cercana a los 150 m. Éstas recolectan información espectral del oleaje cada hora en una ventana de 20 minutos con una frecuencia de muestreo de 4 Hz. De los archivos generados por el software de las boyas, se utilizarán los de extensión “NONDIRSPEC”, los cuales contienen para cada hora la potencia del espectro de frecuencia para cada una de las 123 bandas de frecuencia  $S(f)$  integradas en dirección [9].

### Selección de productos del satélite Jason-1 y control de calidad

Para la selección del producto del satélite Jason-1 a utilizar en la asimilación de datos, se revisó la información contenida en los archivos OSDR e IGDR de  $Hs_{sat}$  para evaluar las diferencias en las mediciones de los dos productos en el Caribe, sin perder de vista la necesidad de emplear operacionalmente la información para ser asimilada en el modelo de oleaje. Se conoce que el producto IGDR presenta un error en la estimación de  $Hs_{sat}$  de 0.4 metros o 10% (el que sea mayor) [10], sirviendo de referencia al ser un producto más exacto [14]. Por otra parte, los productos OSDR al estar disponibles pocas horas después de efectuadas las mediciones de  $Hs_{sat}$ , se pueden emplear en la asimilación de datos. Para lograr que los productos OSDR tengan los mismos niveles de exactitud que los IGDR se deben aplicar unos filtros y eliminar el error sistemático de acuerdo con la expresión:

$$Hs_{sat}^o = 0.011 + 1.053 Hs_{sat}^i \quad (\text{en metros})$$

Los índices ( $o$ ) e ( $i$ ), denotan los valores de los productos OSDR e IGDR respectivamente [11].

Para el control de calidad a los datos se utilizó la información provista por el CNES en los formatos establecidos para cada uno de los dos productos [15], estableciéndose el uso de los siguientes filtros:

- Filtro espacial. Se eliminan los datos fuera de los límites en latitud y longitud del dominio del modelo. Para este caso los límites del Mar Caribe utilizados fueron: latitud mínima 9.5° N, latitud máxima 17.5° N, longitud mínima 61° W y longitud máxima 89° W.
- Filtro del tipo de superficie. Usando una bandera asignada internamente por el algoritmo del satélite durante el procesamiento con base a un archivo plantilla, se remueven los datos marcados con una superficie diferente a “océanos abiertos” o “mares semi-cerrados”.
- Filtro de tipo de eco del altímetro. Con el algoritmo interno del satélite se asigna un valor a los ecos de “tipo oceánico”. Se eliminan los datos que indiquen ecos diferentes.
- Filtro de tipo de eco del radiómetro. El algoritmo interno del satélite asigna un valor a los ecos de “tipo oceánico”. Este filtro se diseñó para eliminar datos erróneos de velocidad del viento medidos por el radiómetro, pero no se aplicó por cuanto se encontró que en el dominio del Caribe elimina datos correctos de  $Hs_{sat}$  ubicados cerca a la Tierra.
- Filtros de calidad para datos de 1 Hz. El algoritmo interno del satélite asigna banderas teniendo en cuenta la calidad de los datos del altímetro y radiómetro. Se eliminaron los datos con banderas de datos erróneos.
- Se diseñó un filtro para eliminar los datos de  $Hs_{sat}$  menores o iguales a 0.1 metros, por estar por debajo de los niveles de exactitud del altímetro y debido a que su baja energía dificulta la construcción de un espectro.
- Número de puntos válidos empleados para calcular los datos de 1 Hz. Los formatos de los

archivos incluyen el número de valores colectados a 20 Hz empleados para el cálculo de  $H_{S_{sat}}$  a 1 Hz. Se utilizó un filtro para eliminar los valores de  $H_{S_{sat}}$  a 1 Hz promediados con menos de 15 datos.

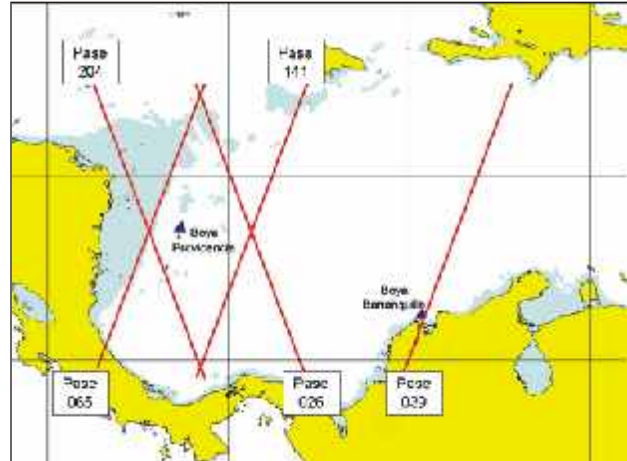
- h) Filtro a desviaciones estándar superiores a los 0.7 metros. El valor de  $H_{S_{sat}}$  compilado a 1 Hz, corresponde al promedio de 20 mediciones. En los archivos se encuentra disponible la información de la desviación estándar de estos datos. Con este filtro se eliminan datos poco representativos por presentar demasiada dispersión.
- i) Filtro de alto gradiente. Para evitar cambios demasiado bruscos en los valores medidos de  $H_{S_{sat}}$  a 1 Hz, se aplica un filtro en el cual si el valor absoluto de la diferencia entre el promedio de los cuatro datos alrededor del dato evaluado y el dato evaluado es mayor a 0.5 metros, el dato evaluado es removido. De manera similar se hace con los dos primeros y dos últimos datos de  $H_{S_{sat}}$  pero comparándolos con el promedio de los tres datos alrededor del valor evaluado.

En el trabajo de Desai y Vincent [11], para el control de calidad a los productos OSDR utilizaron los filtros b, c, d y e, además de un filtro para editar aquellos datos en que la desviación estándar al promediar (con datos de 20 Hz) el coeficiente de reflexión ( $\sigma_0$ ), fuera superior a 3 dB. El valor de la desviación estándar está en la plantilla del producto.

Para seleccionar el producto del Jason-1 a utilizar y el control de calidad más apropiado a aplicar a los datos, se comparó el comportamiento de en los productos OSDR e IGDR, realizando el siguiente experimento.

Se tomó el pase 039 (figura 1) del ciclo 201 del satélite, en el cual se efectuaron mediciones en el centro de la cuenca del Caribe el 22 de junio de 2007, entre las 20 horas 24 minutos y 20 horas 26 minutos tiempo UTC. Se procesó la información de este pase contenido en los archivos “JA1\_IGD\_2PbP201\_039.CNES” para los productos

IGDR, y para el producto OSDR el archivo “JA1\_OSD\_2PbS20070622\_184328\_07326.NASA”. Este último archivo se procesó con y sin tener en cuenta el filtro aplicado al coeficiente de reflexión ( $\sigma_0$ ).



**Figura 1.** Pases del satélite Jason-1 más cercanos a las boyas de Barranquilla y Providencia, graficados con información batimétrica de la Carta Náutica 007 de DIMAR.

En la figura 1 se presentan los pases del satélite más cercanos a la posición de las boyas. En azul claro las aguas con profundidad menor a 50 metros, lo cual es importante, por cuanto en estas áreas, las olas tendrán un comportamiento de aguas en transición, modificando sus características por el efecto del fondo.

### Construcción del espectro con mediciones satelitales

Para la construcción del espectro con base en mediciones satelitales se utilizó la información de  $H_{S_{sat}}$  medida por el altímetro del satélite Jason-1 provista en archivos OSDR. Se aplicó el control de calidad a los datos satelitales empleando los filtros comentados anteriormente. Con esta información se calculó el área bajo el espectro de frecuencias que corresponde a esta altura despejando  $m_{0\_sat}$  de la fórmula  $H_{S_{sat}} = 4.0 \sqrt{m_{0\_sat}}$  [16].

Con los valores de las constantes del espectro JONSWAP [1] encontradas para el Caribe (alfa=0.0312 y gama=1.1806) [9], se iteran valores de la frecuencia pico ( $w_{pi}$ ) entre los valores mínimo y máximo de 0.6 y 1.3  $rad \times seg^{-1}$  respectivamente, con una variación de 0.0025  $rad \times seg^{-1}$ . A cada valor de  $w_p$  se le calcula el espectro JONSWAP, hasta encontrar el valor con el cual el área bajo la curva del espectro JONSWAP  $m(w_{pi})$  sea más parecida al área bajo la curva que corresponde al valor de  $Hs_{sat}$  ( $m_{0\_sat} \approx m(w_{pi})$ ).

Este procedimiento se realiza para cada valor de  $Hs_{sat}$ , obteniendo finalmente un espectro JONSWAP construido para cada valor del satélite en el Caribe con frecuencia de 1 Hz.

Para evaluar los resultados de la metodología propuesta, se comparó el espectro JONSWAP construido con base en la información de  $Hs_{sat}$  con el medido *in situ* por la boya de oleaje ( $S(f)_{JONSWAP} \approx S(f)_{boya}$ ).

Para esta comparación fue necesario contar con mediciones del oleaje simultáneas y cercanas del satélite Jason-1 (archivo OSDR) y del  $S(f)$  medido por la boya (archivo NONDIRSPEC). En la Tabla 1 se presentan los archivos disponibles para cada una de las boyas, con los de los pases del satélite que cumplen con estas condiciones para cada caso.

**Tabla 1.** Archivos NONDIRSPEC y OSDR disponibles para evaluar la construcción del espectro de oleaje en el Caribe.

Boya	Pase Jason-1	Nombre archivo	
		Nondirspec	OSDR
Barranquilla	039	200706222010	2PbS20070622_184328_07326
Barranquilla	039	200707021810	2PbS20070702_164153_07328
Barranquilla	039	200707121610	2PbS20070712_144050_07295
Barranquilla	039	200707221410	2PbS20070722_123918_07325
Providencia	026	200708102100	2PbS20070810_213027_06820
Providencia	065	200708120900	2PbS20070812_090040_07264
Providencia	141	200708051000	2PbS20070805_101310_07316
Providencia	204	200706290700	2PbS20070629_063842_05944
Providencia	204	200707090500	2PbS20070709_042036_06962
Providencia	204	200707190300	2PbS20070719_021902_06974
Providencia	204	200707290100	2PbS20070729_001724_07149

Para la boya de Barranquilla sólo se tomó en cuenta el pase 039 por pasar muy cerca de la boya, en tanto que para la boya de Providencia se evaluaron los pases 026, 065, 141 y 204 (figura 1). Los nombres de los archivos NONDIRSPEC indican en UTC aaaammddhhmm el inicio de la toma de datos por la boya en la ventana de 20 minutos, en tanto que los de los archivos OSDR después del 2Pb indican en UTC aaaammdd\_hhmmss\_microsegundos. Nótese que la hora de los archivos OSDR corresponde al primer dato del archivo, el cual tiene una extensión mayor a dos horas, incluyendo los datos medidos por el satélite en su tránsito por el Caribe cerca de las boyas.

Para la evaluación inicialmente se ubica la posición de los puntos (latitud-longitud) con información de  $Hs_{sat}$  medidos a 1 Hz, que estén a una distancia mínima de la boya. Esta distancia para cada boya se estimó de la siguiente manera:

Por la corta distancia entre la huella en tierra del pase 039 y la boya de Barranquilla, se empleó un radio de 15 kilómetros (figura 1). En el caso de la boya en Providencia se evaluaron cuatro pases cercanos a esta boya, el 26, 65, 141 y 204. Los pases 26 y 141 no se consideraron por cuanto la distancia mínima a la boya es de 207.5 y 205 kilómetros respectivamente, distancia a la cual las características del oleaje pueden ser muy diferentes. En cuanto al pase 65, se puede observar en la figura 1 cómo los puntos de medición del satélite más cercanos a la boya (89.7 kilómetros) se encuentran sobre la plataforma continental centroamericana con menos de 50 metros de profundidad, por lo que el comportamiento de este oleaje será diferente al de la boya, al haber sido modificado por la interacción con el fondo. Para la boya de Providencia se empleó entonces un radio de 88 kilómetros con datos del pase número 204.

De los puntos dentro de la distancia establecida, se determina el que tenga el valor de  $Hs_{sat}$  más cercano a la altura de la ola medida con la boya ( $Hs_{boya}$ ), el cual se calcula sumando el área bajo el espectro usando las frecuencias mayores o iguales a 0.08 Hz, limitando el espectro al oleaje local (*Wind Sea*), evitando usar el mar de fondo (*Swell*) [9].

El espectro JONSWAP construido con  $H_{s_{sat}}$  en el punto seleccionado ( $S_j(f)$ ), se compara con el espectro de la boya ( $S_b(f)$ ) para evaluar los resultados de la metodología planteada. Esta comparación no se hizo con el punto más próximo a la boya por la cercanía de estas a aguas someras, con lo cual las mediciones satelitales pueden ser de una naturaleza diferente a las de la boya (aguas profundas), siendo inadecuado hacer una comparación en este caso de los dos espectros.

Finalmente para valorar los resultados, se utilizó la suma del cuadrado de las diferencias entre el  $S_j(f)$  y  $S_b(f)$ , dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\sum_i^N (S_b - S_j)_i^2}{N}, \text{ con } N \text{ el número de frecuencias usadas en los espectros.}$$

Se tomó  $N = 113$  datos correspondientes a las frecuencias del 0.08 a 0.64 Hz, con una variación de 0.005 Hz, tal y como se encuentra disponible el espectro de frecuencias generado por la boya  $S_b(f)$  y filtrando las frecuencias de mar de fondo [9].

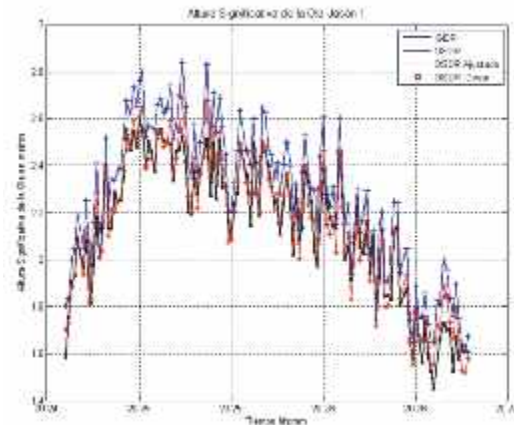
## Resultados

### Selección de archivos y filtros

Para la selección del producto del satélite Jason-1 a usar, se realizó el experimento como se indicó en la metodología, comparando el comportamiento de  $H_{s_{sat}}$  en los productos OSD R e IGDR y el uso del filtro al coeficiente de reflexión ( $\sigma_o$ ), usando el pase 039 de 22 de junio de 2007.

Se encontró que los filtros aplicados para el control de calidad en esta oportunidad, fueron superados por 125 datos del producto IGDR y por 127 datos del OSD R. De éstos, 123 datos superaron los filtros aplicados a ambos archivos. Al aplicar el filtro del coeficiente de reflexión, sólo 9 datos del archivo OSD R lo superaron, lo que indica un significativo impacto en el dominio del Caribe al remover un gran número de mediciones de  $H_{s_{sat}}$ .

En la figura 2 se presentan los resultados del experimento. En negro  $H_{s_{sat}}$  del producto IGDR el cual sirve de referencia por ser más exacto [14]. En azul  $H_{s_{sat}}$  del OSD R de antes de realizar el ajuste lineal propuesto por Desai y Vincent [11] y en rojo después de aplicado. En círculos magenta los nueve valores de  $H_{s_{sat}}$  que superaron el filtro del coeficiente de reflexión.

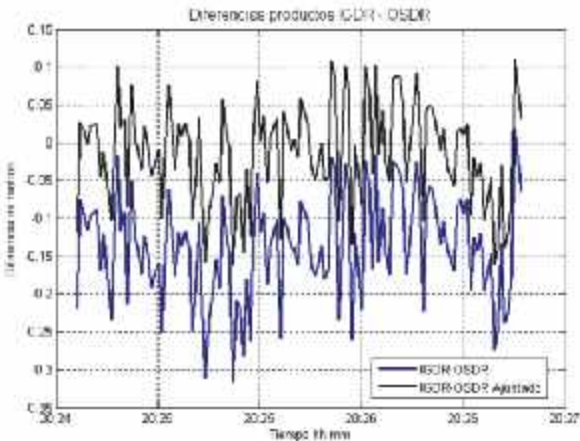


**Figura 2.** Comparación de la medición de altura significativa de la ola de diferentes productos del satélite Jason-1 del pase 039 de 22 de junio de 2007.

En la figura anterior se puede observar cómo el ajuste lineal aplicado a los datos de  $H_{s_{sat}}$  del archivo OSD R, logran valores muy cercanos a los encontrados con el IGDR. Igualmente se observa la gran pérdida de datos al aplicar el filtro del coeficiente de reflexión, sin un impacto en la calidad de las mediciones, puesto que muchos de los puntos que no superaron este filtro tienen mejor coincidencia con los datos IGDR que algunos de los 9 puntos que si superaron el filtro.

Para cuantificar la diferencia de aplicar o no la corrección lineal a la  $H_{s_{sat}}$  del producto OSD R se compararon los 123 datos coincidentes con el producto IGDR. En la figura 3 se muestra esta diferencia en metros en el eje de las ordenadas. La serie de tiempo azul indica la diferencia entre IGDR menos OSD R, la cual en promedio fue de -0.1386 m con una desviación estándar de 0.0694 m, en tanto que en negro se presenta la diferencia entre IGDR menos el OSD R ajustado linealmente, la cual en promedio

fue de  $-0.0135$  m, con una clara mejoría de un orden de magnitud y una desviación estándar de  $0.0658$ . Esto indica que al corregir linealmente los valores de  $H_{s_{sat}}$  de OSDR, se obtiene mayor exactitud al compararlo con los datos IGDR.



**Figura 3.** Diferencias en la medición de altura significativa de la ola de productos IGDR y OSDR del satélite Jason-1 del pase 039 de 22 de junio de 2007.

Un ejercicio similar se realizó con el pase 204 (figura 1) del mismo ciclo 201, el cual transitó sobre el oeste del Caribe el 29 de junio de 2007 alrededor de las 06:51 UTC. En este caso, 141 datos OSDR superaron los filtros, en tanto que 144 datos IGDR lo hicieron igualmente. Aplicando el filtro del coeficiente de reflexión al producto OSDR, tan sólo permanecieron 17 datos. 135 datos superaron igualmente los filtros aplicados a los productos OSDR e IGDR.

Los resultados en el ejercicio con el pase 204 fueron muy similares a los presentados en las figuras 2 y 3 para el pase 039. La diferencia entre IGDR menos OSDR, en esta ocasión fue de  $-0.0795$  m con una desviación estándar de  $0.0895$  m, mientras que al restarle al IGDR el valor de OSDR ajustado linealmente, se obtuvo un promedio de  $0.0218$  m con una desviación estándar de  $0.0806$  m.

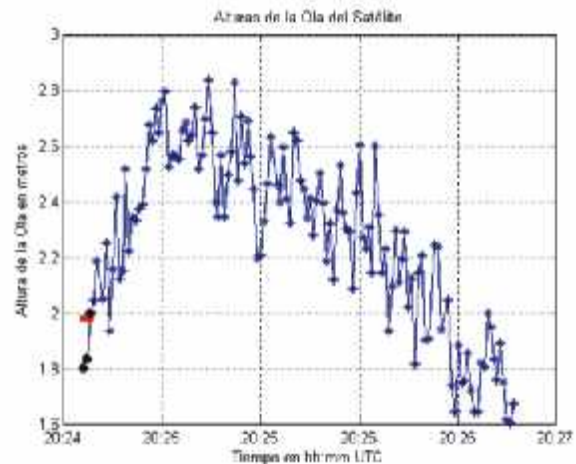
Teniendo en cuenta lo anterior, se consideró adecuado para el presente trabajo, usar los archivos OSDR ajustando linealmente los valores de  $H_{s_{sat}}$  [11], aprovechando de esta manera la ventaja de tener acceso a la información pocas horas después de efectuadas las mediciones, pero manteniendo niveles

de exactitud similares a los de los productos IGDR registrados por Ménard et al. [10]. Por otro lado, los filtros indicados en la metodología realizaron un apropiado control de calidad. No se utilizó el filtro del coeficiente de reflexión por cuanto implica para el dominio del Caribe una gran pérdida de datos correctos de  $H_{s_{sat}}$ .

### Construcción del espectro con mediciones satelitales

En las Figuras 4 a 7 se presentan las salidas gráficas de la metodología propuesta para la construcción del espectro con mediciones satelitales, usando los datos de la boya de Barranquilla y del pase 039 del satélite para el 22 de junio de 2007 (tabla 1).

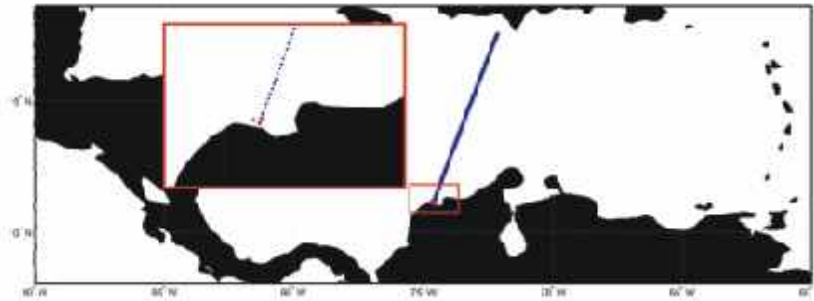
En la figura 4 se presenta con asteriscos las  $H_{s_{sat}}$  del archivo OSDR. En este caso, 127 datos superaron los filtros propuestos en la metodología. En el eje de las abscisas el tiempo UTC en que el satélite midió la altura de la ola. Nótese que el satélite recorre el Caribe (figura 5) en menos de tres minutos. Con asteriscos negros  $H_{s_{sat}}$  en los tres puntos dentro del radio de 15 kilómetros a partir de la ubicación de la boya de Barranquilla. En asteriscos rojos  $H_{s_{sat}}$  medida en la ventana de las 20:10 a las 20:30 horas UTC. En este ejemplo, la comparación de espectros (figura 7) usa el  $S_j(f)$  construido con la información  $H_{s_{sat}}$  del tercer punto, por tener el valor de altura de la ola más similar al medido por la boya (diferencia de  $0.0961$  metros).



**Figura 4.** Altura de la ola medida por el satélite Jason-1 en el pase 039 de 22 de junio de 2007.



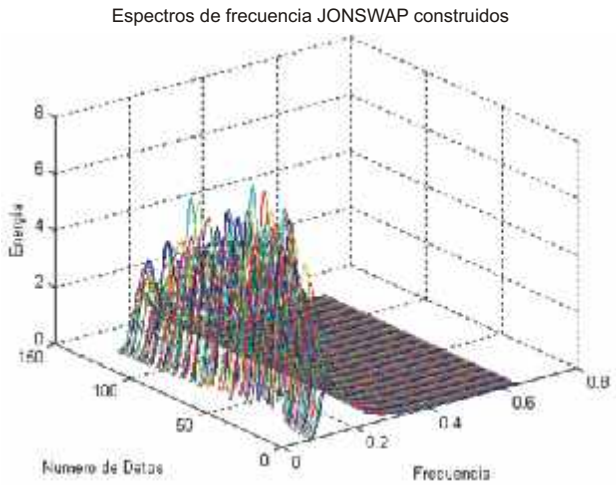
En la figura 5 se presenta en planta la ubicación espacial de los 127 datos que superaron los filtros aplicados al archivo OSDR. Cada asterisco indica la posición en la que se calculó cada uno de los valores de  $H_{s_{sat}}$  presentados en la figura 4 en el tránsito de Sur a Norte del pase 039 del satélite. El acercamiento en el recuadro del área de Barranquilla en la figura 5, muestra en rojo la ubicación de la boya y en magenta los tres puntos dentro del radio de 15 kilómetros. La  $H_{s_{sat}}$  del tercero de estos puntos es el que tiene mayor coincidencia con la  $H_{s_{sat}}$ , debido posiblemente a la dirección predominante del oleaje (noreste) y a la ubicación de los dos primeros puntos en aguas en transición (figura 1).



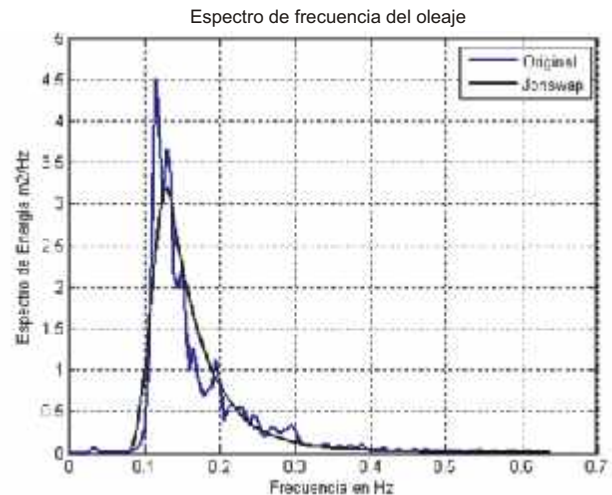
**Figura 5.** Ubicación espacial de las mediciones de altura de la ola del satélite Jason-1 en el pase 039 de 22 de junio de 2007.

En la figura 6 se observan los 127 espectros JONSWAP construidos uno para cada valor de  $H_{s_{sat}}$  que pasó los filtros aplicados al archivo OSDR. Al comparar las áreas de los espectros con el comportamiento de la figura 4, se observa cómo se lograron reproducir las variaciones en la altura de la ola medidas por el satélite. A mayor altura de la ola, el espectro JONSWAP registra mayor área en el espectro y menor frecuencia pico (mayor período de la ola).

En la figura 7 se compara en azul el espectro  $S_b(f)$  medido con la boya de Barranquilla en una ventana de tiempo (minuto 10 a 30) que coincidió con el tránsito del satélite por el Caribe siguiendo la trayectoria del pase 039. La línea negra presenta el espectro JONSWAP  $S_j(f)$  construido a partir de la información de  $H_{s_{sat}}$  para el tercer punto de medición del satélite. Se observa la buena coincidencia de los dos espectros.



**Figura 6.** Espectros de frecuencia JONSWAP construidos para las alturas de la ola medidas por el satélite Jason-1 en el pase 039 de 22 de junio de 2007.



**Figura 7.** Comparación de espectros de frecuencia del oleaje medido *in situ* con el construido con base al espectro JONSWAP y la altura de la ola medida por el satélite Jason-1 en el pase 039 de 22 de junio de 2007.

En la tabla 2 se presentan los resultados del experimento para los pases 039 y 204 de los pares de archivos relacionados en la tabla 1. En las primeras

dos columnas la hora en que se realizó la medición del satélite y el inicio de la ventana de 20 minutos de toma de datos de la boya (UTC). En la tercera columna el número de datos de  $Hs_{sat}$  del archivo OSDR que superaron los filtros aplicados de acuerdo con lo descrito en la metodología. En las columnas cuatro y cinco, se presenta la distancia a la boya y la diferencia entre las alturas de la ola medidas por la boya y por el satélite, para el punto seleccionado por tener el valor de  $Hs_{sat}$  más similar al de  $Hs_{boya}$ , estando dentro del radio determinado para cada boya. En la sexta y séptima columnas la frecuencia pico ( $w_p$ ) del espectro  $S_b(f)$  y del  $S_J(f)$  construido. En la última columna la suma del cuadrado de las diferencias entre los dos espectros.

**Tabla 2.** Resultados de la comparación del espectro de la boya de oleaje y el espectro JONSWAP construido con la altura de la ola medida por el satélite.

aammddhhmm de Mediciones en UTC		No. datos satélite superan filtros	Medición del satélite compara espectros		Frecuencia pico en Hz		Suma cuadrado de diferencias entre espectros
Jason 1	Boya		Distancia a la boya (Km)	Diferencia Hmo boya - Hs sat (m)	Boya	JON-SWAP	
Boya de Barranquilla - Pase 039							
0706222024	0706222010	127	12.4962	0.0961	0.115	0.1317	14.054
0707021823	0707021810	118	12.0539	0.0913	0.11	0.1214	21.5284
0707121621	0707121610	112	8.693	0.043	0.13	0.1253	14.2132
0707221420	0707221410	89	7.5805	0.0439	0.13	0.1548	9.9562
Boya de Providencia - Pase 204							
0706290651	0706290700	146	87.5196	-0.008	0.11	0.1333	21.9065
0707090449	0707090500	136	87.3328	-0.0249	0.12	0.1397	9.0481
0707090248	0707190300	145	87.9064	-0.0126	0.175	0.1643	2.1119
0707290046	0707290100	139	87.9509	-0.0242	0.16	0.1524	1.642

En la tabla 2 se puede observar que para los pares de datos seleccionados (boya – satélite), el máximo tiempo entre la ventana de observación de datos de la boya y el paso del satélite fue de 14 minutos en Providencia el 29 de julio de 2007. El tiempo máximo de diferencia entre una medición satelital y la de la boya será de 20 minutos, dada la frecuencia con que esta última está programada para recolectar datos.

Con la información de la tercera columna se puede encontrar que, en promedio, el pase 039 del satélite mantuvo 111.5 datos después de aplicados los filtros descritos en la metodología, en tanto que el pase 204 en promedio mantuvo 141 datos, lo cual se explica por ser un transecto más largo. La diferencia entre el

mayor y menor número de datos en Barranquilla fue de 38 datos, en tanto que para Providencia fue de 10 datos. Esto indica que en cada pase en particular a pesar de ser sobre la misma huella en tierra, el altímetro tiene un comportamiento diferente que depende del estado de mar en cada ocasión. Sin embargo, se presenta un número significativo de datos en cada pase (mínimo 89) para ser empleados en la asimilación del modelo de oleaje.

En la columna 4 se observa como el pase 039 siempre tuvo mediciones de  $Hs_{sat}$  con distancias a la boya de Barranquilla inferiores a los 15 km, así como distancias del pase 204 a la boya de Providencia menores a los 88 km, cumpliendo en ambos casos con el criterio de distancia establecido. En Barranquilla el promedio de distancia del punto de medición satelital seleccionado para la comparación con el espectro de la boya fue de 10.2 kilómetros, en tanto que para Providencia fue de 87.6 kilómetros.

Con información de la quinta columna se encontró en promedio una diferencia en la altura significativa de la ola entre la medición de la boya y el satélite en Barranquilla de 6.8 centímetros y en Providencia de -1.7 centímetros, la primera con una desviación estándar de 2.9 y la segunda de 0.8 centímetros. Estos valores indican una excelente coincidencia entre los dos métodos de medición del estado del mar siguiendo la metodología de comparación descrita en este artículo, en parte por el buen resultado de las correcciones y filtros aplicados a los archivos OSDR. El signo negativo indica que el satélite sobreestimó el valor medido por la boya, el cual es el valor de referencia, debido a la mejor exactitud del instrumento.

Para analizar los resultados en la reconstrucción de  $w_p$  (columnas 6 y 7 de la tabla 2) obtenida al iterar diferentes espectros de oleaje JONSWAP, se hace en términos del período de la ola. Se encontró para Barranquilla una diferencia promedio entre el período pico de la medición con la boya y del espectro construido de 0.725 segundos, con una desviación estándar de 0.69 segundos. En la boya de Providencia el promedio de esta diferencia fue de 0.52 segundos con una desviación estándar de 1 segundo.

Lo anterior indica en promedio una adecuada restitución de  $w_p$  para ambas boyas, con una dispersión en Barranquilla similar al promedio, en tanto que en Providencia la dispersión es el doble que el promedio. Estos valores muestran que la reconstrucción del período pico es posible mediante la metodología planteada, aceptando unos niveles de variación, lo cual es de esperar por cuanto el espectro medido por la boya (línea azul de la figura 7) al ser construido a partir de mediciones en el campo durante 20 minutos contiene ruidos de alta frecuencia, en tanto que usando el espectro JONSWAP se suaviza el comportamiento espectral, logrando representar el mayor aporte en las señales. Adicionalmente el hecho de usar valores constantes de Alfa y Gama en la construcción del espectro JONSWAP, contribuyen a la dispersión encontrada.

Para evaluar cuantitativamente el éxito de la reconstrucción del espectro propuesto en este artículo, especial cuidado se tuvo al analizar el resultado de la suma al cuadrado de las diferencias entre el  $S_b(f)$  y el  $S_j(f)$  construido (columna 8 de la tabla 2). Este valor se dividió en los 113 elementos de frecuencia y se le sacó la raíz cuadrada, obteniendo de esta manera la diferencia promedio entre los dos espectros para cada una de las 113 frecuencias medida en  $m^2/s$ .

Para el caso de la boya de Barranquilla, la máxima suma del cuadrado de las diferencias de los espectros fue la encontrada el 2 de julio/07 con un valor de  $21.5284 (m^2/s)^2$ , la cual correspondería en promedio para cada una de las 113 frecuencias a una diferencia entre los espectros de  $0.43 m^2/s$ . Este valor se consideró bajo teniendo en cuenta que el espectro de la boya contó para este caso con un pico de energía superior a los  $6 m^2/s$ .

De manera similar para la boya de Providencia, se encontró que la máxima suma del cuadrado de las diferencias sucedió el 29 de junio/07 con un valor de  $21.9065 (m^2/s)^2$ , la cual correspondería en promedio para cada una de las 113 frecuencias a una diferencia entre los espectros de  $0.44 m^2/s$ . Este valor igualmente se consideró bajo con respecto al espectro de la boya,

que en esta oportunidad presentó un pico de energía cercano a los  $4 m^2/s$ .

En promedio para los cuatro casos estudiados en la boya de Barranquilla, la diferencia entre espectros por frecuencia fue de  $0.36 m^2/s$ , con una desviación estándar de  $0.057 m^2/s$ . De manera similar para Providencia, el promedio de los cuatro casos arrojó un valor de  $0.24 m^2/s$  con una desviación estándar de  $0.149 m^2/s$ , más bajo en promedio, pero con mayor dispersión, debido a que los espectros de energía de Providencia fueron menores a los de Barranquilla, lo cual desmejora el resultado en la reconstrucción del espectro.

## Discusión

De los productos con información de  $H_{s_{sat}}$  del satélite Jason-1, los OSDR al estar disponibles a las pocas horas de efectuadas las mediciones permiten ser utilizados para la asimilación de datos en modelos de oleaje. De otro lado, el producto con mayor exactitud para medir  $H_{s_{sat}}$  es el (I)GDR [14], sin embargo, con los archivos OSDR es posible alcanzar niveles similares de exactitud efectuando el control de calidad a los datos y aplicando la corrección lineal a los datos OSDR propuesta por Desai y Vincent [11]. De los filtros propuestos por estos autores, no se aplicó el del coeficiente de reflexión ( $\sigma_0$ ), para los datos en el Caribe, por cuanto elimina muchos datos correctos de  $H_{s_{sat}}$ .

En el trabajo de Queffeuilou [12] se estimó la calidad de las mediciones de  $H_{s_{sat}}$  de varios altímetros incluyendo el Poseidón-2. Al compararlos con mediciones de boyas empleó una distancia de 50 kilómetros y diferencia en tiempo entre mediciones de máximo 30 minutos, en tanto que al realizar comparaciones entre altímetros utilizó un criterio de distancia de 100 kilómetros, distancias que consideró adecuadas a partir de una estimación del error geofísico de las mediciones satelitales. Teniendo como referencia lo anterior, se consideran adecuadas las distancias empleadas en el presente trabajo para comparar los  $S_b(f)$  y el  $S_j(f)$  construido. En cuanto al

tiempo, debido a que la boya mide datos horarios en una ventana de 20 minutos, el tiempo máximo de diferencia entre una medición satelital y la medición de la boya será de 20 minutos.

Se considera que siguiendo la metodología propuesta es posible en el dominio del Mar Caribe construir espectros de oleaje adecuados, a partir de datos de  $H_{s_{sat}}$  medidos por el satélite Jason-1 y disponibles a través de archivos OSD. R.

Finalmente se recomienda como parte del proyecto SPOA [7] evaluar la aplicabilidad e impacto de utilizar la construcción de espectros propuesta en este trabajo para asimilar datos de en el modelo de oleaje, así como la metodología de comparación de espectros  $S_b(f)$  y  $S_j(f)$  para validar los resultados.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección General Marítima por el apoyo y financiamiento del proyecto de investigación SPOA, marco en el cual se realizó este estudio. Especial gratitud al personal del CIOH por el apoyo técnico en la realización de este trabajo, así como a los revisores anónimos por sus comentarios constructivos. Se resalta el extraordinario apoyo recibido por AVISO-CNES y PO.DACC-NASA quienes mantienen excelentes bases de datos para acceder a los archivos generados por el satélite Jason-1.

## Referencias Bibliográficas

[1] Hasselmann K, T Barnett, E Bouws, H Carlson, D Cartwright, K Enke, J Ewing, H Gienapp, D Hasselmann, P Kruseman, A Meerburg, P Muller, D Olbers, K Richter, W Sell and H. Walden. 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl. A 8(12), 95p.

[2] SWAMP group: JH Allender, TP Barnett, L Bertotti, J Bruinsma, VJ Cardone, L Cavaleri, J Ephraums, B Golding, A Greenwood, J Guddal, H Günther, K Hasselmann, S Hasselmann, P Joseph, S Kawai, GJ Komen, L Lawson, H Linné, RB Long, M Lybanon, E Macland, W Rosenthal, Y Toba, T Uji and WJP de Voogt. 1985. 'Sea wave modeling project (SWAMP). An

intercomparison study of wind wave predictions models, part 1: Principal results and conclusions'. In: Ocean wave modeling; Plenum, New York, 256p.

[3] WAMDI group: S Hasselmann, K Hasselmann, E Bauer, PAEM Janssen, GJ Komen, L Bertotti, P Lionello, A Guillaume, VC Cardone, JA Greenwood, M Reistad, L Zambresky and JA Ewing. 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810.

[4] Skandrani Ch and Queffeulou P. 2004: Impact of multisatellite altimeter data assimilation on wave analysis and forecast. Marine Geodesy, 27: 511 -533.

[5] Lionello P, H Günther and PAEM Janssen. 1992. Assimilation of altimeter data in a global third generation wave model. J. Geophys. Res. C97, 14453-14474.

[6] Lonin S, I Lonina y J Tuchkovenko. 1996 (a): Utilización del modelo Nedwam para el cálculo y pronóstico del oleaje en el Mar Caribe. Boletín Científico CIOH. V. 17. p. 37 - 45.

[7] Torres R. 2006: Ficha anteproyecto "Sistema de pronósticos oceánicos y atmosféricos a escala local SPOA", DIMAR CIOH.

[8] Moreno L y Muñoz A. 2006: Desarrollo de un sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina para el litoral Caribe y Pacífico colombianos. Boletín Científico CIOH. V. 24. P. 148 - 157.

[9] Torres R y Lonin S. 2007: Estudio preliminar del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. Boletín Científico CIOH. V. 25. P. 8 - 18.

[10] Ménard Y, L Fu, P Escudier, B Haines, G Kunstmann, F Parisot, J Perbos, P Vincent and S Desai. 2003: The Jason-1 mission. Marine Geodesy, 26:131-146.

[11] Desai S and P Vincent. 2003: Statistical evaluation of the Jason-1 Operational Sensor Data Record. Marine Geodesy, 26:187-199.

[12] Queffeulou P. 2004: Long-term validation of wave height measurements from altimeters. Marine Geodesy, 27: 495-510.

[13] Carayon G, N Steunou, J Courriere and P Thibaut. 2003: Poseidon-2 radar altimeter design and results of in-flight performances. Marine Geodesy, 26:3, 159 - 165.

[14] Picot N, K Case, S Desai and P Vincent. 2003: AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC).

[15] Centre National d'Etudes Spatiales, 2004: SSALTO products specifications Volume 1: Jason-1 User Products. SSM-ST-M-EA-10879-CN. 36p. Disponible Internet (4-6-2007):

<ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub/jason-1/documentation/handbook/>.

[16] U.S. Army Corps of Engineers, 2001: Coastal Engineering Manual CEM, Part II Coastal Hydrodynamics, Chapter 1 Water Wave Mechanics. U.S. Government Printing Office, DC, EM 1110-21100, 99p.