



ARTÍCULO

Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro Jonswap

Study of the wave spectra in the Caribbean observed with buoys and its representation on the JONSWAP spectra

Fecha recepción: 2007-09-06 / Fecha aceptación: 2007-09-21

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 oceanmet.ltda@yahoo.com

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

Resumen

Utilizando información de dos boyas de oleaje direccional instaladas en el Caribe en el Área de Barranquilla e Isla de Providencia en Colombia, se estudió el comportamiento del espectro de frecuencias del oleaje entre marzo de 2006 y agosto de 2007. De manera iterativa se buscaron los valores de las constantes del espectro JONSWAP que mejor reprodujeran los espectros mensuales promediados, al encontrar la menor diferencia de los mínimos cuadrados entre los dos espectros. Se encontró que en todas las ocasiones, el oleaje local y el mar de fondo tienen períodos que fácilmente se diferencian. Así mismo, el mar de fondo es un evento inusual en el Caribe. Se observó una importante variación espacial y temporal en el comportamiento del oleaje en el Caribe. Se encontraron valores de las constantes que satisfactoriamente reprodujeron los espectros mensuales del oleaje medido con las boyas, sin embargo, dada la desviación estándar encontrada, se propone continuar con el estudio de estos valores en la medida que más información esté disponible.

Palabras clave: Datos de oleaje, análisis de oleaje, espectro de oleaje.

Abstract

Using information of two directional wave buoys deployed in the Caribbean nearby Barranquilla and Providencia Island in Colombia, the wave frequency spectrum behavior from March 2006 to August 2007 was studied. Using iterative techniques the values of constants of the JONSWAP spectrum that best reproduced the mean monthly spectrum were investigated, looking for the RMS values between the two spectra. It was found that on all occasions, the Wind Sea and Swell could be easily differentiated due to their Periodo. Also, the Swell is an unusual event on the Caribbean. An important spatial and temporal variation on the wave behavior in the Caribbean was observed. The values of the constants that satisfactorily reproduced the monthly wave spectra measured with buoys were found, however, because of the standard deviation found, to continue the study of the values as long as more information becomes available is advisable.

Key words: Wave data, wave analysis, wave spectra.

Introducción

Uno de los aspectos más importantes de la dinámica del océano que se ha tratado de entender en las últimas décadas es el comportamiento del oleaje, por su impacto en las actividades marítimas como navegación, recreación, ingeniería oceánica, entre otros. Esta necesidad fue reconocida por la Dirección General Marítima de Colombia - DIMAR, la cual en el 2004 inició el proyecto “Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina - SMPOM” [1], dentro del cual se diseñó una red de monitoreo del comportamiento del oleaje para el Caribe y Pacífico colombianos.

La importancia de esta red está en dos áreas principales: el conocimiento del comportamiento del oleaje y la seguridad marítima integral. En el primero, porque los datos recolectados por las boyas permiten el análisis espectral, con lo cual se genera información imprescindible para el diseño de cascos de buques, diseño de plataformas de costa afuera, ingeniería de costas, energía alternativa, entre otros. En cuanto a la seguridad marítima, al contar con la información del oleaje en tiempo real, esta puede utilizarse en análisis sinópticos del estado del mar y al emplearse en técnicas de asimilación o validación de datos en modelos numéricos de pronóstico del oleaje, mejora los resultados de pronóstico, lo cual tiene un importante impacto en la seguridad de actividades marítimas como la navegación, recreación de sol y playa, deportes náuticos, entre otras.

El presente trabajo busca de manera preliminar analizar los espectros del oleaje en el Caribe a partir de las mediciones de las boyas instaladas como parte del proyecto SMPOM hasta agosto de 2007, con el fin de dar los primeros resultados para mejorar el conocimiento del comportamiento del oleaje en esta cuenca. Adicionalmente, se efectuó la representación de estos espectros medidos *in situ* de acuerdo con lo propuesto por Hasselmann et al. [2], con lo cual es posible encontrar las constantes del espectro JONSWAP que mejor caractericen el oleaje en el Caribe.

Esto último es de gran utilidad para el proyecto “Sistema de Pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos a Escala Local - SPOA” [3], el cual está en ejecución en el Centro de Investigaciones

Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH en ejecución desde el año 2007 hasta el año 2010, por cuanto uno de sus objetivos es el de asimilar y validar datos de altura del oleaje, sean medidos por las boyas o por altímetros satelitales en un modelo de pronóstico de oleaje. Para la asimilación de datos satelitales es necesario construir un espectro a partir de la información de altura del oleaje, para lo cual es muy útil contar con las constantes del espectro JONSWAP, tal como fue propuesto por Torres y Lonin [4]. Igualmente los espectros serán de utilidad en el proyecto SPOA por cuanto el modelo de oleaje para aguas profundas contará con grillas anidadas del modelo SWAN para propagar el oleaje hasta aguas someras, donde las condiciones de frontera serán ingresadas a través de los espectros JONSWAP evaluados para el Caribe de acuerdo con la metodología propuesta en el presente artículo.

Datos

Como parte del proyecto SMPOM, se instaló en el año 2006 una boya de oleaje direccional TRIAXYS en Bocas de Ceniza cerca de Barranquilla (lat. $11^{\circ}32'N$ y long. $74^{\circ}40'W$) y en el 2007 otra boya al norte de la Isla de Providencia (lat. $13^{\circ}32'N$ y long. $81^{\circ}20'W$). Ambas boyas se encuentran a una profundidad cercana a los 150 metros, con el fin de medir el comportamiento de las olas en aguas profundas, es decir, antes de ser modificado por efecto del fondo. Estas boyas calculan los espectros de frecuencia y direccional del oleaje. La ubicación de las boyas se presenta en la figura 1.



Figura 1. Ubicación boyas de oleaje direccional del proyecto SMPOM.

La información de las boyas está disponible en series de tiempo discontinuas debido a problemas técnicos de sus componentes, errores en la transmisión de los

datos o debido a vandalismo. La información es recolectada cada hora, midiendo las características del oleaje en una ventana de 20 minutos con una frecuencia de 4 Hz (4800 datos por sensor por hora).

El empleo de estos sensores y software permite tener la resolución y exactitud en la medición de oleaje de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1. Características boyas TRIAXYS.

Parámetro	Rango	Resolución	Exactitud
Altura	+/- 20 m	0.01 m	Mejor que 2 %
Período	1.6 – 33.25	0.005 Hz	
Dirección	0 – 360 °	3 °	+/- 1 °

El espectro direccional del oleaje se divide en 121 bandas espaciadas cada 3 °C empezando en la dirección 000 °C (Norte). El espectro de frecuencia se divide en 123 bandas espaciadas 0.005 Hz, con la primera banda centrada en 0.03 Hz ($T=33.33$ s) y la última en 0.64 Hz ($T=1.56$ s). Esta información es almacenada en la memoria interna de la Boya y transmitida en tiempo real [5].

La transmisión de los datos de oleaje se realiza por comunicación satelital Iridium cada hora. En el caso de la boya de Barranquilla, ésta ha tenido dos configuraciones de acuerdo con los periodos de toma de datos indicados en la tabla 2. En los periodos 1 y 2, la boya tomó datos desde el minuto 20 al minuto 40, en tanto que en el período 3 la boya tomó datos en la ventana del minuto 10 al minuto 30 cada hora. La boya de Providencia se configuró para tomar datos cada hora desde el minuto 00 al minuto 20, iniciando la transmisión en el minuto 20.

Tabla 2. Series de tiempo boyas de oleaje disponibles.

Boya	Período	Fecha inicio (ddmmaa)	Fecha término (ddmmaa)	No. Días
Barranquilla	1.	230306	190406	28
Barranquilla	2.	211206	190407	120
Barranquilla	3.	190607	230707	35
Providencia	1.	280507	260807	91

De los archivos generados por el software de las boyas, se utilizarán los de extensión `aaaammddhhmm.NONDIRSPEC`, el cual contiene para cada hora la potencia del espectro $S(f)$ de frecuencia para cada una de las 123 bandas integradas en dirección.

Materiales y métodos

Espectro de frecuencias obtenido con boyas de oleaje

Para analizar los espectros, se usaron los archivos `NONDIRSPEC`. Se utilizó esta información y no la del espectro en función de las frecuencias y direcciones $S(f, \theta)$, por cuanto los resultados de este trabajo serán utilizados como parte del proyecto SPOA como se indicó en la introducción. Para esto se necesita reconstruir un espectro para ser asimilado por el modelo de oleaje usando la información que produce el satélite. En el caso del Jason-1, el altímetro mide la altura significativa de la ola (H_s) pero no contiene información de dirección del oleaje [6]. H_s se encuentra relacionada con el espectro de frecuencias por la fórmula:

$$H_s = 4.0 \sqrt{m_0}$$

Cuando H_s se calcula a partir del espectro de olas, se denomina H_{m0} [7], donde m_0 es el momento cero estadístico del espectro, lo cual físicamente representa la varianza de la serie temporal de altura de olas.

Para el análisis de los archivos `NONDIRSPEC` se utilizó una matriz en la cual las columnas contienen las 123 bandas de frecuencia y cada fila corresponde a un archivo horario. Se calculó para cada mes natural, en función de los datos disponibles (Tabla 3) el promedio, desviación estándar y valor máximo del espectro para cada una de las bandas de frecuencia de la matriz construida. Los resultados se graficaron como puede observarse en las figuras 2 y 3. En el eje de las abscisas el período de las olas en segundos y en el eje de las ordenadas el valor del espectro.

Tabla 3. Series de tiempo disponibles para el análisis espectral.

Boya	Año	Mes	Dato inicio (dd:hh)	Dato final (dd:hh)	Archivos horarios		
					Usados	No Disp.	Total
Barranquilla	/06	3	23:18	31:23	198	0	198
Barranquilla	/06	4	01:00	19:20	453	0	453
Barranquilla	/06	12	21:00	31:23	264	0	264
Barranquilla	/07	1	01:15	31:23	729	0	729
Barranquilla	/07	2	01:00	28:23	672	0	672
Barranquilla	/07	3	01:00	31:23	664	80	744
Barranquilla	/07	4	01:00	19:05	126	312	438
Barranquilla*	/07	6	20:00	30:23	241	23	264
Barranquilla*	/07	7	01:00	23:19	420	128	548
Providencia	/07	6	01:00	30:23	720	0	720
Providencia	/07	7	01:00	31:23	744	0	744
Providencia	/07	8	01:00	26:17	618	23	595

* Archivos recibidos por comunicación IRIDIUM

La información disponible de las boyas se presentó en la tabla 2. Para el análisis de espectros con las boyas de oleaje, se dividió esta información en series mensuales tal como se presenta en la tabla 3, incluyéndose el mes y año de nueve series de tiempo analizadas para la boya de Barranquilla y tres para la boya de Providencia. Se indica de acuerdo con la disponibilidad de archivos NONDIRSPEC la fecha de inicio y final de la serie de tiempo en UTC, así como el número de archivos horarios utilizados en el cálculo del promedio, desviación estándar y determinación de valores máximos, cuantos no se encontraban disponibles y el total de archivos que debería haber entre el dato inicial y final. Las series de tiempo marcadas con un asterisco, indican que al momento de escribir este artículo, la información disponible correspondía a la enviada por IRIDIUM en tiempo real y no había sido descargada directamente de la boya.

Espectro JONSWAP en el Caribe

Varios espectros idealizados se utilizan para representar el comportamiento del oleaje. El más simple fue el propuesto por Pierson y Moskowitz en 1964 [8], para el cual se asumió el concepto de mar completamente desarrollado, en el cual las olas se encuentran en equilibrio con el viento.

El espectro JONSWAP, propuesto por Hasselmann et al. [2], después de analizar datos medidos durante el proyecto conjunto de observación de oleaje en el Mar del Norte (*Joint North Sea Wave Observation Project - JONSWAP*), está diseñado para describir olas

locales (*Wind Seas*) producidas con *fetch* limitado, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^r \quad r = \exp \left(-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right)$$

$\omega = 2\pi f$, siendo $S(\omega)$ la densidad de energía espectral y f la frecuencia de la ola en Hz. De acuerdo con el experimento JONSWAP usando datos del Mar del Norte, se determinaron los valores de las constantes así [9]:

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{U_{10}^2}{Fg} \right)^{0.22}, \text{ como parámetro de escalamiento,}$$

siendo F la distancia sobre la cual el viento sopla a una velocidad constante o *fetch*, g la gravedad y U_{10} la velocidad del viento 10 metros sobre la superficie del mar.

$$\omega_p = 22 \left(\frac{g^2}{U_{10} F} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ como frecuencia pico del espectro,}$$

$\gamma = 3.3$, siendo el factor de intensificación del pico, y

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 \rightarrow \omega \leq \omega_p, \\ 0.09 \rightarrow \omega > \omega_p \end{cases}$$

Existen otras formas idealizadas del espectro, las cuales esencialmente son derivadas de los espectros de Pierson y Moskowitz y JONSWAP. Existe un espectro de oleaje de seis parámetros desarrollado por Ochi y Hubble [10], con el cual es posible mostrar dos picos, uno asociado con oleaje de fondo (*Swell*) y otro con el oleaje local (*Wind sea*).

Para el presente estudio se utilizará el espectro JONSWAP para representar el espectro de oleaje encontrado en las dos boyas instaladas por la DIMAR en el Caribe por ser en la literatura el de más amplia aplicación y estar diseñado para mares de *fetch* limitado. Este espectro idealizado sólo resuelve el oleaje local y no el del mar de fondo.

Para estudiar el comportamiento general del oleaje en el Caribe, se ajustó el espectro JONSWAP a los datos observados con las boyas, resolviendo mediante iteraciones los valores de las constantes. Teniendo en cuenta que se tienen espectros horarios los cuales contienen mucho ruido, en esta aproximación se reprodujeron los espectros de frecuencias $S(f)$

promedio para cada mes, en los lapsos de tiempo relacionados en la tabla 3.

Para lograr lo anterior, se realizaron diferentes experimentos numéricos con el fin de encontrar los mejores resultados en el ajuste del espectro JONSWAP a los espectros promediados a partir de los datos de las boyas. Dentro de estos ejercicios se estudió la variación de los parámetros σ , α , ω_p y γ , empezando con límites amplios incluyendo valores encontrados en el experimento JONSWAP [9], que se fueron ajustando a los espectros encontrados en el Caribe. Igualmente se estudió el orden en el cual se iteraban estos parámetros con el fin de encontrar más rápidamente convergencia a los valores más adecuados.

Para procesar los datos se utilizó como entrada la información del espectro de frecuencias promedio encontrado con las mediciones de las boyas. Se determinó mantener la frecuencia pico de los datos en el espectro JONSWAP generado. Los valores de σ se mantuvieron como en la propuesta de JONSWAP, 0.07 para las frecuencias menores o iguales a ω_p y 0.09 para las frecuencias mayores a ésta.

Se usaron dos ciclos internos. Uno para buscar el mejor valor de α , para lo cual se iteraron valores iniciando en 0.015 hasta 0.06 con una variación de 0.0001. Durante cada ciclo calcula la diferencia de mínimos cuadrados con respecto al espectro de datos original. Al final del ciclo se guarda el valor de α con la menor diferencia de mínimos cuadrados. El siguiente ciclo interno busca el mejor valor de γ (utilizando el valor de α encontrado en el ciclo anterior) de la misma manera que se hizo con el valor de α , iniciando en 0.6 hasta 2.5, con una variación de 0.001.

Se tiene un ciclo externo que compara las diferencias de los mínimos cuadrados entre los espectros JONSWAP, que se calcularon con los valores de α y γ seleccionados en cada ciclo interno hasta que la diferencia entre el espectro de un ciclo al otro sea menor a 0.001, encontrando los mejores valores de α y γ .

El espectro JONSWAP que se está calculando y la comparación de las diferencias de los mínimos cuadrados no se hace sobre todo el espectro, puesto que como se indicó, este espectro fue prediseñado para oleaje local, por lo que sólo se hace con las frecuencias iguales o mayores a 0.08, es decir a períodos iguales o menores a 12.5 segundos, por ser éste el límite entre oleaje local y mar de fondo, observado en los espectros de oleaje de las boyas como se describirá en los resultados. Esta aproximación se considera especialmente válida para el caso del Caribe, por cuanto se logró determinar que el mar de fondo es un fenómeno inusual en este dominio.

Resultados y discusión

Espectro de frecuencias obtenido con boyas de oleaje

En la Figura 2 se presenta la salida del análisis de las nueve series de tiempo mensuales de la boya de Barranquilla y en la figura 3 las tres series de tiempo de la boya de Providencia. En la línea azul el promedio de los datos disponibles por frecuencias, en rojo el promedio más una desviación estándar con el fin de estimar la dispersión de los datos y en negro el valor máximo registrado para cada frecuencia.

Se encontró que en términos generales en todas las salidas mensuales de las dos boyas, el comportamiento del oleaje producido por vientos locales, tiene períodos inferiores a los 12 segundos.

En los meses de febrero y marzo de 2007 en la boya de Barranquilla sobresalen en los datos máximos (línea negra) la presencia de picos de alta energía con un período pico de 28 segundos y un intervalo entre los 14 y 40 segundos (apreciable también en otros meses), que inicialmente se pensó fueron causados por mar de fondo (oleaje *Swell*), es decir, aquel caracterizado por un período más largo y regular en las ondas oceánicas, desplazadas de su área de formación.

Al efectuar un análisis detallado de este suceso entre el 7 y 9 del mes de febrero/07, con una energía cuatro veces superior al oleaje local, se encontró que se debió a un error instrumental de la boya de oleaje direccional, por dos razones: primero se encontraron varios registros de la boya inadecuados, uno por ejemplo con una altura máxima de la ola de 12.65 metros y H_{m0} de 4.47 m, con un período pico de 28.57 segundos lo cual para la ubicación de la boya en Barranquilla son poco probables, además de la inexistencia esos días de algún evento atmosférico extremo. Stewart [9] en la figura 16.8 de su libro presenta de acuerdo con el espectro de Pierson-Moskowitz [8] la relación entre el período y altura significativa de la ola en función de U_{10} , para mares completamente desarrollados ($F \rightarrow \infty$). En esta figura un H_{m0} como el encontrado, correspondería a $U_{10} = 15 \text{ ms}^{-1}$ y un período de 11 segundos. El máximo período de la ola sería menor a los 20 segundos, con lo cual los valores registrados por la boya no son consecuentes con registros de olas de gravedad.

La segunda razón se encontró al analizar el espectro por frecuencias y direcciones en estos días. En la figura 4, en el centro, se puede observar el promedio para estos tres días. En esta imagen la dirección está en convención náutica (0° corresponde al Norte - arriba) y la frecuencia en Hz aumentando del centro hacia afuera. Es evidente por un lado la baja frecuencia del espectro por debajo de los 0.5 Hz, pero más importante, la presencia de energía en todas las direcciones lo cual no es posible. Llama la atención que en las figuras 2 y 3, todos los espectros en alguna medida muestran esta energía centrada alrededor de los 28 segundos. Este error instrumental puede deberse a problemas con la línea de fondeo por la profundidad a la que se instalaron las boyas el cual corresponde al límite sugerido por el fabricante, pero deberá investigarse con mayor detalle, en especial las condiciones que generan este mal funcionamiento. En

la figura 4, arriba, se presenta el promedio del espectro para los días del 4 al 6 de febrero/07, donde se observa el comportamiento del oleaje local muy similar al de los días del mal funcionamiento de la boya, por lo cual parece poco probable que este problema haya sido causado por un cambio de dirección o intensidad del oleaje.

En las figuras 2 y 3, la única evidencia de mar de fondo, corresponde a la registrada en agosto/07 por la boya de Providencia, el cual tuvo niveles de energía similares a los del oleaje local, por lo cual no se tradujo en un aumento en H_s . En esta oportunidad el mar de fondo se presentó entre los días 19 y 20 de este mes, con un período entre los 14 y 16 segundos, proviniendo del noreste, en tanto que el oleaje local presentó un período alrededor de los 7 segundos, proviniendo del nornoreste. En la figura 4, abajo, se observa claramente la diferencia entre el oleaje local y mar de fondo en el espectro de frecuencias y dirección. Es evidente la diferencia con el espectro del centro que indica el problema instrumental.

En este estudio preliminar se puede afirmar que el mar de fondo es un evento aislado en el Caribe, pues de todas las series de tiempo analizadas, sólo se hizo presente por un corto período de 3 días, sin superar la energía característica del oleaje local.

En cuanto a la energía mostrada por el espectro, se encuentra un comportamiento diferente para las dos boyas. En la de Barranquilla se observa en promedio un pico de oleaje local cercano a los $5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y un máximo alrededor de los $26 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. La excepción a este comportamiento se observa en las salidas de marzo y abril de 2006, con valores menores aproximadamente un 50%. En la boya de Providencia el pico del espectro promedio oscila entre 0.5 y $1.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, más bajo que el encontrado en Barranquilla y los valores máximos no superan los $7 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

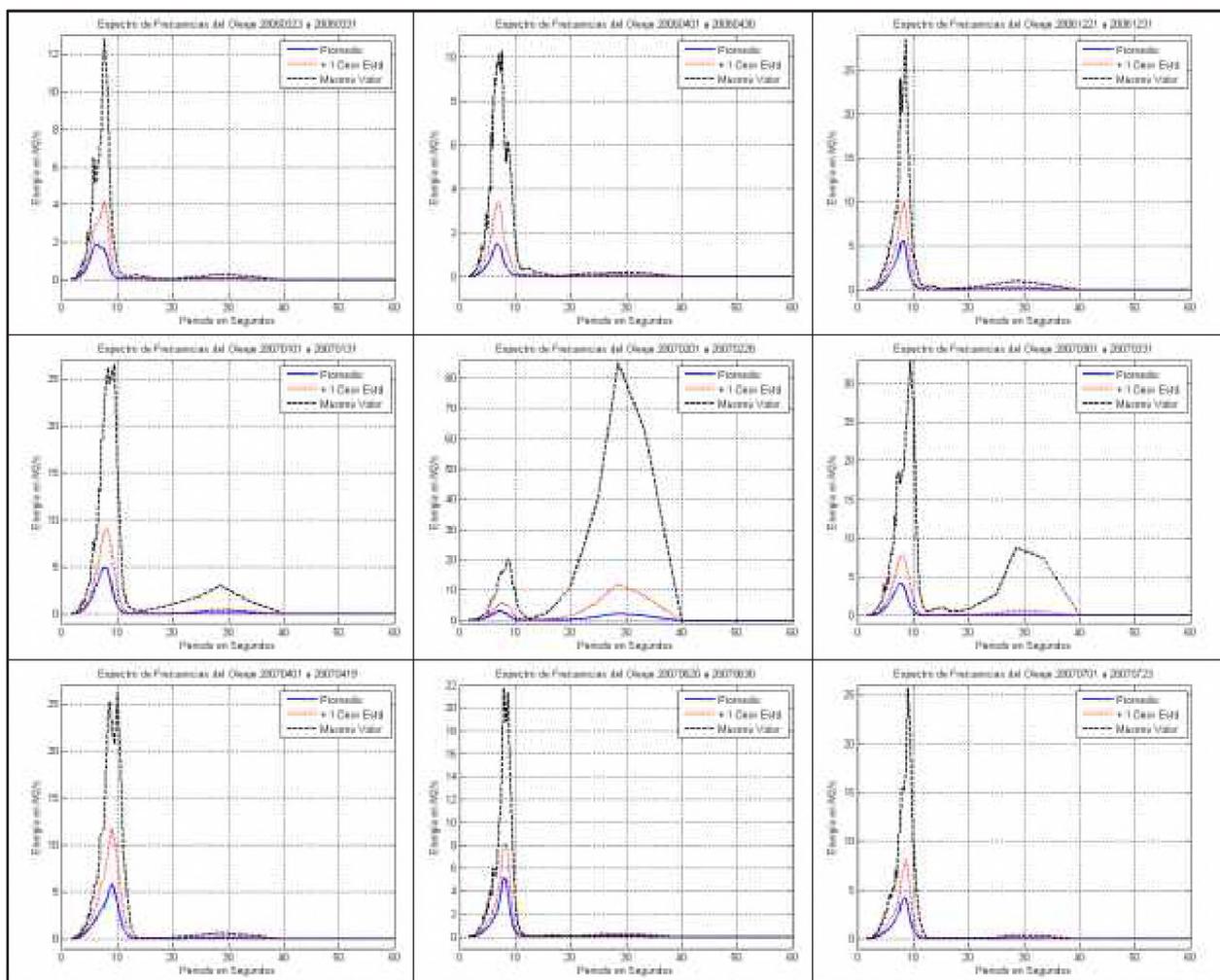


Figura 2. Comportamiento del espectro de frecuencias del oleaje a partir de datos de la boya de oleaje de Barranquilla. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se encuentran las salidas de marzo/06, abril/06, diciembre/06, enero/07, febrero/07, marzo/07, abril/07, junio/07 y julio/07.

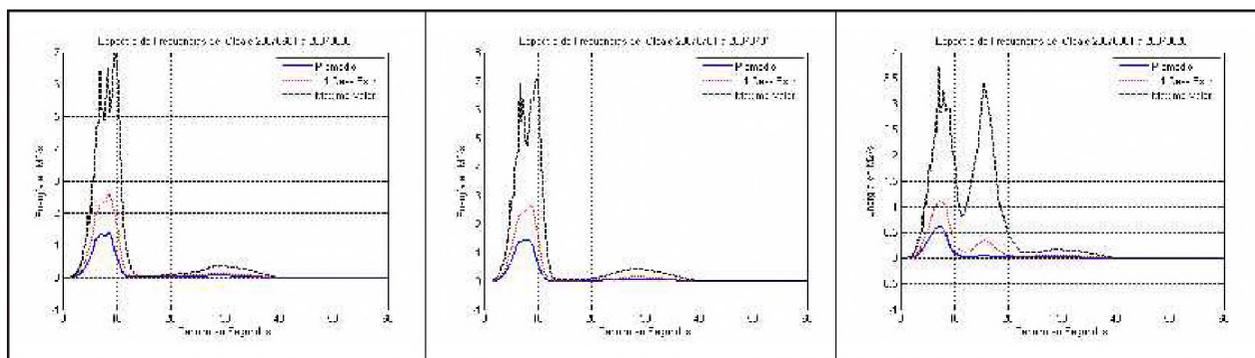


Figura 3. Comportamiento del espectro de frecuencias del oleaje a partir de datos de la boya de oleaje de Providencia. De izquierda a derecha se encuentran las salidas de junio, julio y agosto/07.

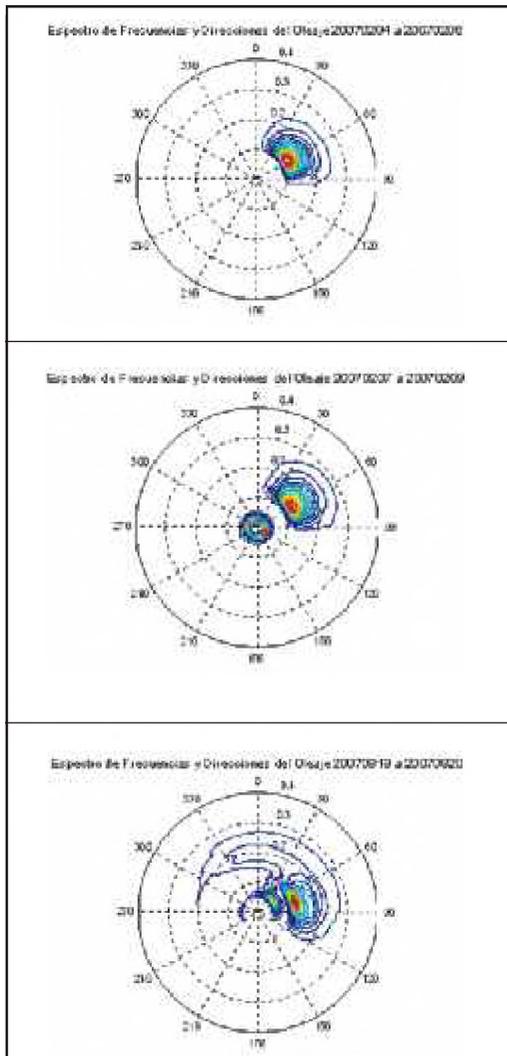


Figura 4. Arriba y en el centro $S(f, \theta)$ en Barranquilla promediado para los días 4 a 6 y del 7 a 9 de febrero de 2007 respectivamente. Abajo $S(f, \theta)$ en Providencia promediado para los días 19 a 20 de agosto de 2007.

Llama la atención la comparación de los meses de marzo y abril, con información disponible para el 2006 y 2007 en la boya de Barranquilla, por cuanto a pesar de ser el mismo mes, los promedios correspondientes al año 2006 tuvieron menor energía a los del 2007. Esto se evidencia al comparar el promedio mensual de H_{mo} , el cual para el mes de abril/06 fue de 1.65 metros, en tanto que para abril/07 fue de 2.36 metros, con una diferencia de 0.71 metros.

En el caso de la altura de la ola, ésta presenta variaciones estacionales, lo cual era de esperar de

acuerdo con el análisis realizado por Torres [11] con base en información del satélite Geosat de la altura de la ola, compilada en el Atlas de Young [12] en celdas de 4×4 grados con información mensual, o si se tiene en cuenta la variación en el comportamiento de los regímenes de viento en el Mar Caribe, como fue descrito detalladamente por Andrade [13], al ser este factor el generador del oleaje.

Al comparar los meses de junio y julio de 2007 registrados por la boya de Barranquilla y la de Providencia, se encontró que en estos períodos de tiempo muy similares (tabla 3), se presentó menor energía en la boya de Providencia. Este comportamiento se observa claramente al comparar el promedio mensual de H_{mo} , el cual en Barranquilla fue de 2.11 y 1.93 metros para los meses de junio y julio/07 (datos parciales), en tanto que fue de 1.55 y 1.62 metros en Providencia para los mismos meses, evidenciando apreciables variaciones espaciales en el comportamiento promedio del oleaje en la cuenca del Mar Caribe, con diferencias en el mes de junio de 0.56 metros y en julio de 0.31 metros.

Estas diferencias en la altura de la ola en estos dos puntos del Mar Caribe se encuentran en una buena concordancia con la intensidad de los vientos, los cuales en Bocas de Ceniza son más fuertes que en la isla de Providencia. Los datos climatológicos de Da Silva y Levitus [14], perfectamente muestran que en términos de las tensiones turbulentas de Reynolds en la superficie del mar (de las cuales linealmente depende el crecimiento de las olas) para el mes de junio son en Providencia 0.081 Nm^{-2} y en Barranquilla 0.112 Nm^{-2} (28% de diferencia relativa), en tanto que para julio son 0.095 Nm^{-2} y 0.137 Nm^{-2} respectivamente (31% de diferencia). Las diferencias encontradas en las mediciones de las boyas de H_{mo} son de similar magnitud.

Se observaron entonces, al construir el espectro de frecuencias en el Caribe con información de las boyas de oleaje, significativas variaciones interanuales como espaciales, las cuales se deberán seguir estudiando en más detalle en la medida que se cuenten con series de tiempo en más lugares y más completas de las boyas de oleaje.

Del análisis de estos espectros se encontró que las olas locales como las olas de mar de fondo tienen un

comportamiento constante en el período de la ola durante el año, tanto en las series de tiempo de Barranquilla como en las de Providencia. Las primeras con períodos inferiores a los 12 segundos y las segundas con períodos entre los 14 y 16 segundos. Así mismo, fue evidente que el mar de fondo es un fenómeno inusual en el Caribe, pues sólo se presentó una vez en los períodos de oleaje analizados.

Espectro JONSWAP en el Caribe

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de construir el espectro JONSWAP para cada uno de los períodos indicados en la tabla 3. Se muestra la frecuencia pico en Hz de los datos, la cual no se modificó, los valores de α y γ encontrados por medio de las iteraciones descritas en la metodología, el número de veces que se iteró el ciclo externo y las diferencias de los mínimos cuadrados entre el espectro del promedio mensual de los datos de la boya (S_b) y el espectro JONSWAP construido (S_j), dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\sum_i^N (S_b - S_j)_i^2}{N}$$

en los espectros.

Tabla 4. Valores de α y γ del espectro JONSWAP.

Boya	Año	Mes	Fp de los datos	Valores por iteración		Ciclos usados	Dif. min. cuadrado
				Alfa	Gama		
Barranquilla	/06	3	0.13	0.0351	0.671	10	4.5829
Barranquilla	/06	4	0.15	0.0398	1.447	9	0.1203
Barranquilla	/06	12	0.12	0.0317	1.449	13	15.1501
Barranquilla	/07	1	0.13	0.0537	1.252	12	1.0143
Barranquilla	/07	2	0.135	0.0477	1.03	11	0.4105
Barranquilla	/07	3	0.13	0.0424	1.32	11	1.0711
Barranquilla	/07	4	0.11	0.025	1.224	12	11.1344
Barranquilla*	/07	6	0.125	0.0266	2.128	8	2.6507
Barranquilla*	/07	7	0.12	0.0209	1.773	10	2.7775
Providencia	/07	6	0.115	0.015	0.6	2	3.5687
Providencia	/07	7	0.14	0.0215	0.673	8	0.9807
Providencia	/07	8	0.145	0.015	0.6	2	0.3282
Promedio				0.0312	1.1806		3.6491
Desv. Estándar				0.0127	0.4892		4.7253

En la figura 5 se presenta el espectro JONSWAP (negro) que mejor se ajustó a los datos promedios del espectro de frecuencias observado por las boyas de

oleaje (azul), para los meses de diciembre/06 y enero/07 de la boya de Barranquilla, y para el mes de julio/07 de la boya de Providencia. Estos espectros se encuentran normalizados ($S(f)/\sigma^2$) y se presenta un límite de confianza de +/- una desviación estándar (rojo). Se seleccionaron estas gráficas como simple indicador visual del ajuste del espectro JONSWAP a los datos.

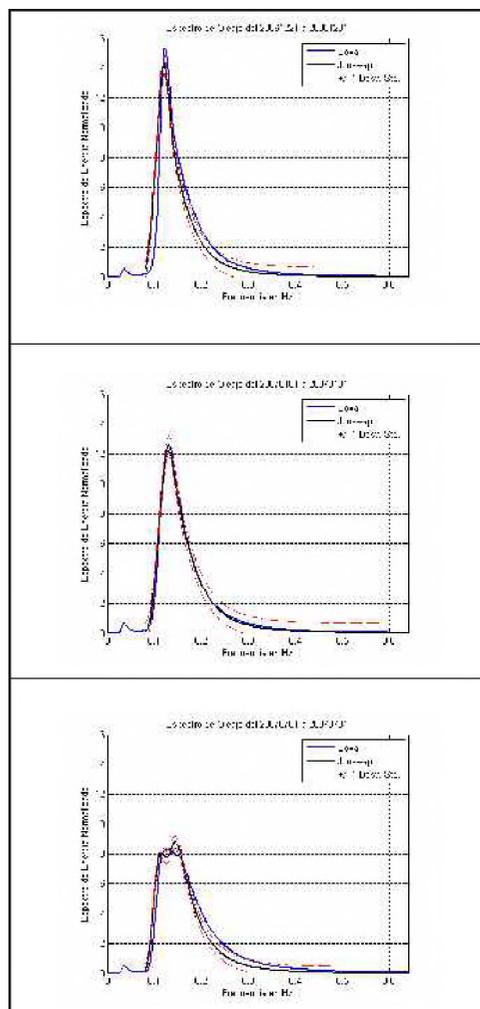


Figura 5. Ajuste del espectro de frecuencias JONSWAP a datos medidos por las boyas de oleaje. De arriba a abajo se encuentran las salidas de dic/06 y ene/07 de Barranquilla, y jul/07 de Providencia.

Para el mes de dic/06, a pesar de tener la mayor diferencia en los mínimos cuadrados encontrada

(tabla 4), arriba de la figura 5 se observa un buen ajuste del espectro JONSWAP. Con niveles de energía similares, en el centro se encuentra la salida del mes de enero/07 de la boya de Barranquilla, en la cual la diferencia de mínimos cuadrados fue menor, por lo que se ajusta muy bien el espectro JONSWAP. Abajo la salida de junio/07 de la boya de Providencia, la cual a pesar de tener niveles de energía menores a las anteriores, igualmente alcanzó un buen ajuste.

Como se observa en la tabla 4 el valor promedio de $\alpha = 0.0312$ con una desviación estándar de 0.0127, en tanto que el valor promedio de $\gamma = 1.1806$ con una desviación estándar de 0.4892. A pesar de encontrar una desviación estándar significativa y que los valores de α y γ encontrados de las series de Providencia son más bajos a los de Barranquilla, para esta aproximación inicial serán utilizados en el trabajo de Torres y Lonin [4], teniendo en cuenta que se busca la construcción de los espectros en todo el Mar Caribe, solamente utilizando información de la altura de la ola proveída por el satélite Jason-1, para lo cual se dejaron constantes los valores de α y γ , buscando el valor más adecuado de ω_p .

Estos valores de α y γ en el Caribe son muy diferentes a los encontrados durante el experimento JONSWAP con las condiciones del Mar del Norte, con un $\gamma = 3.3$ y para un $F = 48 \text{ mn}$ y $U_{10} = 10 \text{ ms}^{-1}$ típicos para el Caribe, correspondería un valor de $\alpha = 0.0062$, un orden de magnitud menor. Estas marcadas diferencias eran de esperarse por el contraste entre las condiciones geofísicas entre uno y otro mar. Además es importante debido a la sensibilidad del espectro JONSWAP a estos valores.

El ajuste del espectro JONSWAP a los promedios mensuales de espectros de las boyas de oleaje dio resultados satisfactorios con las constantes utilizadas. Sin embargo, en la medida que se cuenten con mediciones del espectro del oleaje en otros lugares del Caribe y con series de tiempo más completas se deberá continuar con el estudio de los valores de α y γ . El espectro JONSWAP es muy sensible a estos valores, por lo cual posiblemente sea mejor no utilizarlos como valores constantes sino como función de la altura de la ola. Así por ejemplo α de los tres meses de Providencia en promedio tuvo un valor de 0.017,

significativamente menor al de Barranquilla que en sus nueve meses promedió un valor de 0.036. De manera similar sucedió con el valor de γ con valores promedio de 0.62 y 1.37 respectivamente para Providencia y Barranquilla. Los menores valores de estas constantes en Providencia, están asociados igualmente a menores valores de altura de la ola.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección General Marítima por el apoyo y financiamiento de los proyectos de investigación SMPOM y 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.

Referencias bibliográficas

- [1] 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.
- [2] Hasselmann K, Barnett T, Bouws E, Carlson H, Cartwright D, Enke K, Ewing J, Gienapp H, Hasselmann D, Kruseman P, Meerburg A, Muller P, Olbers D, Richter K, Sell W and Walden H, 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.
- [3] Torres R, 2006: Ficha anteproyecto "Sistema de pronósticos oceánicos y atmosféricos a escala local SPOA", DIMAR - CIOH.
- [4] Torres R y Lonin S, 2007: Construcción de espectros de oleaje en el Caribe a partir de mediciones satelitales. Boletín Científico CIOH. V. 25. P. 19 - 31.
- [5] Axys Technologies Inc., 2005: User Manual TRIAXYS Directional Wave Buoy, 126p.
- [6] Picot N, Case K, Desai S and Vincent P, 2003: AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC).
- [7] 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.

[8] Pierson W and Moskowitz L, 1964: A proposed spectral form for fully Developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophysical Research* 69: 5181-5190.

[9] Stewart R, 2005: Introduction to Physical Oceanography. 246 p. Disponible Internet (4-6-2007): http://oceanworld.tamu.edu/ocean410/ocng410_text_book.html.

[10] Ochi M and Hubble E, 1976: Six parameter wave spectra. *Proc. 15th Coastal Engr. Conf.*, Vol 1, p. 301 - 328.

[11] Torres R, 2003: Estudio del potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos. Trabajo de investigación. Disponible biblioteca Escuela Naval Almirante Padilla.

[12] Young R, 2000: Wind and wave climate. Reino Unido. Software.

[13] Andrade C, 2000: The circulation and variability of the Colombian basin in the Caribbean sea. University of Wales. School of Ocean Sciences.

[14] Da Silva A and Levitus S, 1994: Atlas of surface marine data. NOAA Atlas NESDIS 6, Washington D.C.