

Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico, Colombia

Wind and wave regime characterization in the Atlantic department, colombian Caribbean

Fecha de recepción: 2015-06-30 / Fecha de aceptación: 2015-10-02

Inger Daniel¹, Aldemar Higgins Álvarez¹, Cristian Ayala Mantilla¹, Paola Martínez Duarte¹, Paulo Tigreiros Benavides¹, Alejandro Muñoz Vargas¹

¹ **Escuela Naval de Suboficiales (ARC Barranquilla)**. Grupo de Investigaciones Marinas, Ambientales y Costeras (GIMAC). Vía 40 Calle 58 esquina, Batallón Naval. Tel. (5) 369 33 33 Ext. 5239. Correo electrónico: gimac.ensb@gmail.com.

Daniel, I., Higgins Álvarez, A., Ayala Mantilla, C., Martínez Duarte, P., Tigreiros Benavides, P. y Muñoz Vargas, A. (2015). Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico, Colombia. Bol. Cient. CIOH, 33: 231-244.

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar el régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico se utilizaron datos (2005-2015) de re-análisis del modelo espectral de NOAA-WWIII (WaveWatch III), desarrollada por *National Oceanic And Atmospheric Administration* (NOAA, <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>), para un punto ubicado en la coordenada 11°9'59"N y 74°49'59"O en la zona de desembocadura del río Magdalena, Caribe colombiano. Con los resultados de la modelación se realizó un análisis estadístico con el que se generaron rosas de vientos y oleaje y función de distribución de probabilidad acumulada para estos parámetros. Se encontró que la velocidad del viento y la altura significativa del oleaje son más energéticos para la época seca y provienen de la dirección NE; mientras que los vientos y el oleaje menos intensos se presentan en la época de lluvia mayor. La información obtenida es relevante para conocer el régimen de viento y oleaje en la zona de desembocadura del río Magdalena, en la cual se encuentra ubicado el principal puerto del departamento de Atlántico; además estos son dos forzadores que influyen en el proceso de dispersión de sedimentos o contaminantes, así como en la hidrodinámica y morfodinámica de la desembocadura. Esta metodología constituye una herramienta que puede ser aplicada en otras latitudes.

PALABRAS CLAVES: litoral, departamento del Atlántico, WaveWatch III, régimen oleaje y viento.

ABSTRACT

In order to characterize the regime of wind and waves on the Atlantic department littoral, re-analysis data (2005-2015) from NOAA-WWIII (WaveWatch III) spectral model developed by National Oceanic And Atmospheric Administration –NOAA were used, to a point located at the 11°9'59"N and 74°49'59"O, in the Magdalena river mouth, Colombian Caribbean. With the results of the modeling, a statistical analysis was made in which rose winds, waves, and accumulated distribution probability function was generated for these parameters. It was found that the wind speed and significant wave height are more energetic for the dry season and come from the NE direction, while less intense winds and waves come in the period of greatest rainfall. The obtained information is relevant to know the wind and wave regime in the Magdalena river mouth, in which is located the main port of the Atlantic department, moreover, these are two enforcers that influence the process of sediments or contaminants dispersion as well as the hydrodynamics and morphodynamics mouth. This methodology is a tool that can be applied to other latitudes.

KEYWORDS: Atlantic department, WaveWatch III, Wave regime and Wind.

INTRODUCCIÓN

La caracterización del clima marítimo es una actividad prioritaria para la explotación de los recursos marítimos de un país [1]. Las actividades que se desarrollan en las zonas costeras como la pesca, tránsito marino, la explotación petrolera, la construcción, la recreación y el turismo, requieren información sobre pronóstico del viento y del oleaje [2]. Los vientos gobiernan las grandes circulaciones oceánicas y transfieren momentum a la superficie del océano para producir corrientes marinas y olas [3]. El oleaje a su vez aporta parámetros morfológicos e hidrodinámicos que influyen en el modelamiento de las costas y transporte de sedimento [4], por lo que el conocimiento de estos parámetros es importante para comprender los procesos costeros que se presentan en las diferentes playas del litoral colombiano, debido a que influye de forma directa en los estudios de estabilización de playas del litoral colombiano y protección de ecosistemas [5].

El estudio del clima marítimo en las franjas litorales del país no ha sido equitativo. En el Pacífico se tienen estudios sobre el oleaje de agua profundas que determinan su comportamiento en su tránsito hacia agua someras, después de sufrir los efectos de asomeramiento, refracción, difracción, disipación por fricción con el fondo y rotura [6]. En el Caribe colombiano son pocos los trabajos que conduzcan a determinar el clima marítimo, destacándose el desarrollado por [7], que incluye una propuesta estadística para determinar el oleaje, basado en observaciones visuales de oleaje y viento recopiladas por la base de datos de la *British Maritime Technology Limited* (BMTL). El estudio fue limitado debido a la falta de validación de la información obtenida por medio de comparación con datos medidos por instrumentos in situ. Por su parte, el clima del oleaje medio extremal para aguas profundas en el Caribe colombiano lo determinaron con base a información visual de barcos en rutas y la boya escalar No 41018 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), concluyendo que los parámetros de ajuste de los datos son aplicables a cualquier dato de oleaje visual del mar Caribe [8].

A nivel más localizado se evaluaron diferentes escenarios oceanográficos en el extremo norte del golfo de Urabá, en donde se determinó el clima del oleaje medio y extremal a partir de los datos de del modelo WaveWacht III (WWIII) y la boya de la Dirección General Marítima (Dimar),

reportando para septiembre y noviembre la presencia de trenes de olas provenientes de las direcciones norte, suroeste y sur-suroeste [9].

En el departamento del Atlántico no se han realizado estudios detallados sobre los factores oceanográficos y climáticos que influyen sobre la intensidad del viento y el oleaje en sus playas; haciendo necesario dicha caracterización, de manera que los resultados sean una herramienta útil para comprender la dinámica del transporte, bien sea de contaminantes y/o sedimentos. Los resultados del modelo numérico de tercera generación WaveWacht III, utilizado en este estudio, han sido validados a escala global con datos provenientes de boyas de oleaje y datos de altimetría satelital (ER-1) con óptimos resultado [10-12], obteniendo errores cuadráticos de 15 % con respecto a la altura media del oleaje registrada por boyas escalares y altimetría satelital. En la zona del Caribe los trabajos realizados por [13-15] validaron los resultados del oleaje obtenidos con el modelo WWIII y datos de las boyas pertenecientes a Dimar y al *National Data Buoy Center* (NDBC) de la NOAA con buenos resultados. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante destacar que los datos utilizados en este estudio son confiables y representan las variables vientos y oleaje en la zona de interés. La presente investigación tiene por objetivo servir como herramienta de ponderación confiable para la determinación de las condiciones del viento y oleaje (regímenes medios), para el uso y manejo adecuado de estos datos, en cualquier proyecto o estudio de la zona litoral del departamento de Atlántico.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona del departamento del Atlántico, el cual se enmarca dentro de las coordenadas 10°15'36"N (sur de San Pedrito) a 11°06'37"N (Bocas de Ceniza) y 74°42'47"W (margen izquierdo del río Magdalena) a 75°16'34"W (intersección Santa Catalina y Arroyo Grande (Figura 1). La precipitación anual se encuentra alrededor de los 1500 mm·a⁻¹, siendo los meses con mayor lluvia mayo y octubre [16]. El clima de la región se encuentra influenciado por el desplazamiento norte a sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), definiendo cuatro épocas climáticas: seca mayor (diciembre a abril), caracterizada por una mayor intensidad de los vientos alisios; lluviosa menor (mayo-junio), seca menor o "Veranillo de San Juan" (julio-agosto), y, finalmente, la lluviosa mayor (septiembre-noviembre) [17-

23]. Estas épocas climáticas pueden cambiar tanto en duración como intensidad debido a la influencia del sistema americano de Monzones, las corrientes de vientos atmosféricos de bajo nivel y los eventos El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en su fase cálida (El Niño) y fría (La Niña) [21, 23].

Los mayores aportes de agua dulce a la zona marina costera del departamento provienen del río Magdalena que abarca un área de 262 000 km² [24]. Su desembocadura es llamada Bocas de Ceniza, debido al color cenizo generado por las descargas de sedimentos hacia el océano [25].

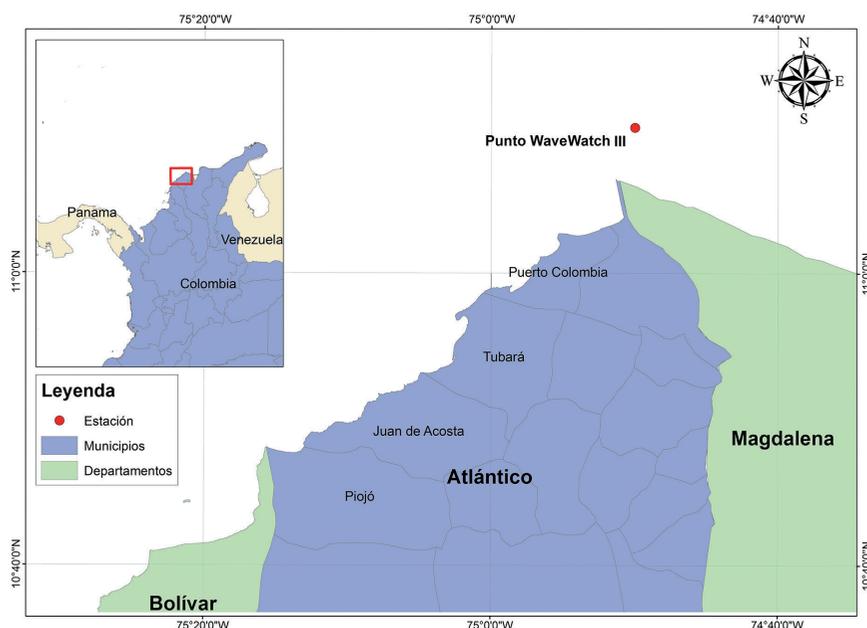


Figura 1. Localización general del sitio donde se obtuvo información de viento y oleaje-datos del punto WWIII (11°9'59"N y 74°49'59"O).

METODOLOGÍA

Para caracterizar el régimen del viento y el oleaje en el área de estudio para el periodo de febrero de 2005 a febrero de 2015 se utilizó la base de datos histórica de WWIII, disponible en el enlace: <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>. Esta base de datos incluye todos los registros de altura significativa, período y dirección del oleaje, así como la magnitud y dirección del viento [26-27], para un punto ubicado en las coordenadas 11°9'59"N y 74°49'59"O, en la zona de desembocadura del río Magdalena en el Caribe. Los datos tienen una resolución temporal de 3 h. Con la información extraída se realizaron los análisis de régimen medio del oleaje y el viento, agrupando los datos por épocas climáticas multi-anual; así, por ejemplo, se tomaron los meses de diciembre a abril de cada año de la serie para representar la

época seca mayor, de igual manera se procedió para las demás épocas (lluviosa menor, seca menor y lluviosa mayor).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del régimen del oleaje y viento

De acuerdo con la metodología descrita se presentan a continuación los resultados y discusión de la caracterización del régimen medio del oleaje y viento, para el periodo febrero 2005 a febrero de 2015, en un punto cercano en la zona de desembocadura del río Magdalena. Esta información se organizó de acuerdo a las cuatro épocas climáticas que se presentan en el Caribe colombiano, con el fin de determinar el régimen medio del oleaje y el viento. La distribución

temporal del oleaje se encontró asociada con la intensificación o debilitamiento de los vientos Alisios del NE, mostrando un periodo de oleaje con mayor energía coincidente con la época seca

y transición, exhibiendo los máximos valores de altura de la ola entre diciembre a marzo y un periodo de oleaje de baja energía en la época de lluvia menor y mayor (Figura 2).

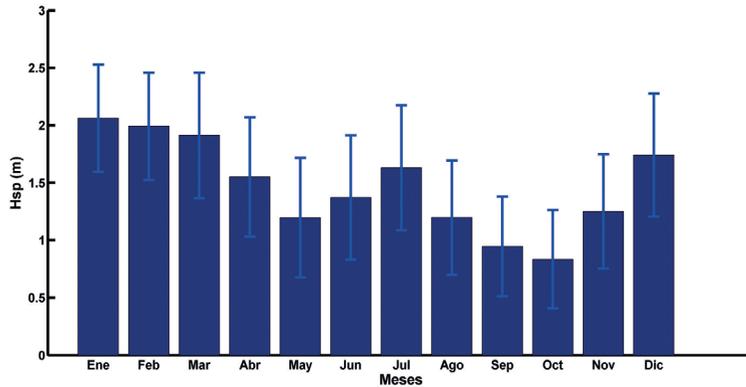


Figura 2. Medias mensual interanual de la altura significativa de la ola con la barra de desviación estándar para el periodo (2005-2015). Datos correspondientes al punto de oleaje extraído WWIII.

Época seca mayor

De acuerdo a la rosa de viento para la época seca se observó una dirección predominante de los vientos y del oleaje del NE (Figura 3). Se presentaron vientos con velocidades de 11.95 y 13.90 m·s⁻¹ con una probabilidad de no excedencia de 90 y 99 %, respectivamente (Tabla I). La velocidad del viento excedida 12 horas al año en régimen medio fue de 15.50 m·s⁻¹. Por su parte, el régimen de Hs varió entre 0.21 y 3.6 m, presentándose valores entre 1.96 y 3.09 m que correspondieron a probabilidad de no excedencia de 50 y 99 %, respectivamente

(Tabla II). La época seca en el Caribe colombiano se ve afectada por el desplazamiento de la ZCIT y el incremento de los vientos del noreste [17, 18, 28]; además se encuentra influenciada por el chorro de San Andrés, coincidente con la incursión de los vientos del NE [23]. Del mismo modo, para la época seca se presentan los vientos y el oleaje de mayor intensidad para el área de estudio, respondiendo a la variabilidad espacial y temporal de los vientos predominantes en el Caribe [3, 29]. En el sector cercano a la boya ubicada en Barranquilla se determinaron oleajes energéticos en toda la costa, con alturas cercanas a los 2.7 m [29].

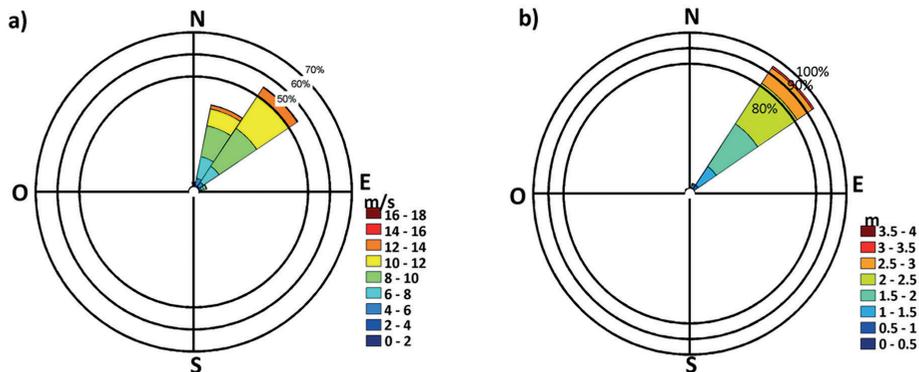


Figura 3. a) Rosa de viento y b) Rosa de oleaje para la época seca mayor.

Tabla I. Resumen estadístico de la serie de viento (V_w) correspondiente al punto WWIII. $V_{w_{12}}$ es la velocidad del viento excedida 12 veces al año en régimen medio. Época seca mayor.

| Dirección | Probabilidad | Vw 50 % | Vw 90 % | Vw 99 % | Vw 12 |
|-----------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.02 | 4.92 | 6.56 | 7.72 | 7.98 |
| NNE | 0.37 | 8.69 | 11.25 | 13.46 | 14.55 |
| NE | 0.55 | 9.61 | 11.95 | 13.90 | 15.50 |
| ENE | 0.03 | 7.15 | 9.78 | 11.30 | 11.91 |
| E | 0.002 | 4.52 | 5.79 | 10.22 | 10.22 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| O | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ONO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NNO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabla II. Resumen estadístico de la serie de oleaje (H_s) correspondiente al punto WWIII. $H_{s_{12}}$ es la altura de la ola significativa en profundidades indefinidas excedida 12 veces al año en régimen medio. Época seca mayor.

| Dirección | Probabilidad | Hs50 % | Hs 90 % | Hs 99 % | Hs 12 |
|-----------|--------------|--------|---------|---------|-------|
| N | 0.003 | 1.06 | 2.62 | 2.72 | 2.72 |
| NNE | 0.03 | 1.42 | 2.30 | 2.82 | 2.87 |
| NE | 0.95 | 1.96 | 2.59 | 3.09 | 3.45 |
| ENE | 0.001 | 0.42 | 0.90 | 1.20 | 1.20 |
| E | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| O | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ONO | 0.0005 | 1.18 | 2.22 | 2.22 | 2.22 |
| NO | 0.006 | 1.44 | 2.18 | 2.33 | 2.34 |
| NNO | 0.002 | 1.48 | 1.88 | 2.42 | 2.42 |

En la función de distribución acumulada de la velocidad del viento (Figura 4a) se observó que para los cuartiles 50 y 75 %, ésta fue igual

al 9.10 y 10.47 $m \cdot s^{-1}$; mientras que la altura significativa para estos cuartiles tuvo valores entre 1.93 y 2.3 m (Figura 4b).

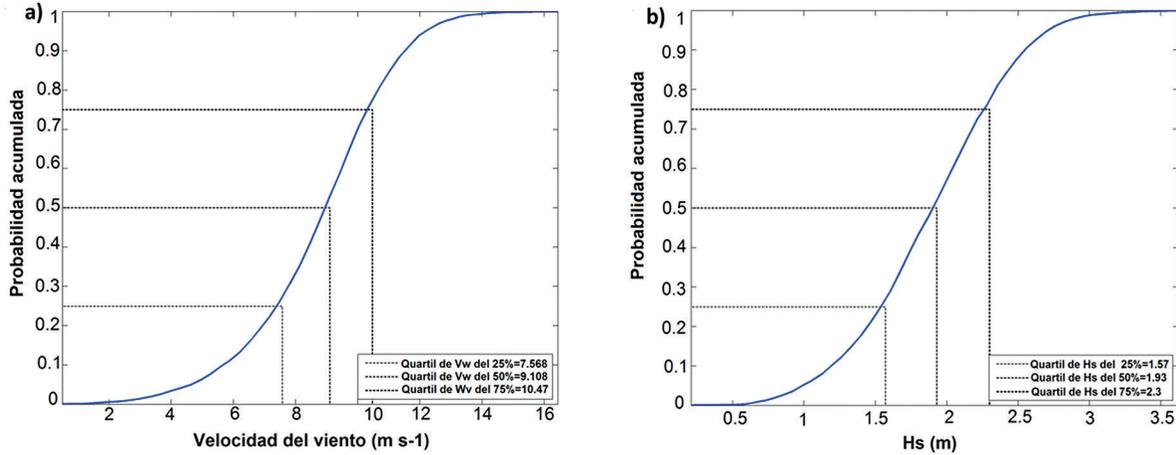


Figura 4. Función de distribución acumulada de **a)** Velocidad del viento (V_w) y **b)** Altura significativa de la ola (H_s) para la época seca.

Época lluviosa menor

En la rosa del viento y del oleaje para la época de lluvia menor se observó una disminución de los vientos Alisios con direcciones variables y predominio en las componentes NE y NO (Figura 5). La dirección predominante fue NE, con una probabilidad de ocurrencia del 41 %, con velocidades entre 7.39 y 11.85 $m \cdot s^{-1}$ para probabilidades de no excedencia del 50 y 99 %, respectivamente (Tabla III). La velocidad del viento excedida 12 horas al

año en régimen medio fue de 12.85 $m \cdot s^{-1}$. La H_s mantuvo la dirección predominante definida para el viento y su probabilidad de no excedencia del 99 % con altura de 2.59 m y una H_s excedida 12 horas al año en régimen medio de 3.00 m (Tabla IV). Durante esta época se presentó, en relación al periodo seco mayor, una disminución en la magnitud de los vientos y la altura significativa del oleaje, asociado al desplazamiento más hacia el norte de la ZCIT [28], donde se da un primer debilitamiento de los Alisios.

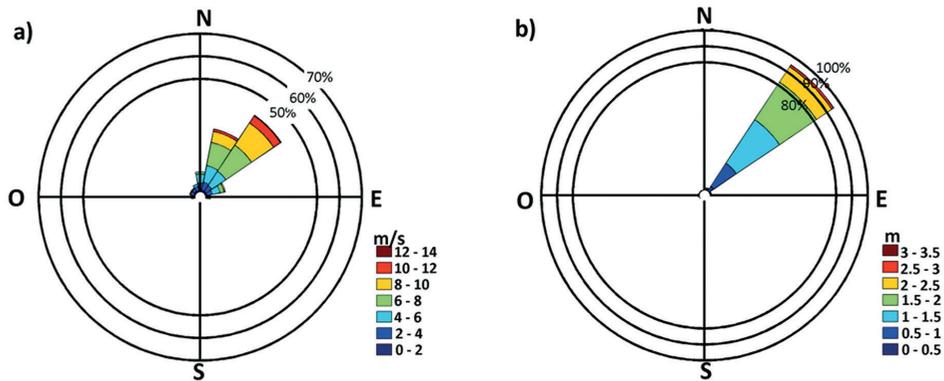


Figura 5. **a)** Rosa viento y **b)** Rosa de oleaje para la época de lluvia menor.

Tabla III. Resumen estadístico de la serie de viento (Vw) correspondiente al punto WWIII. Vw_{12} es la velocidad del viento excedida 12 veces al año en régimen medio. Época lluviosa menor.

| Dirección | Probabilidad | Vw 50 % | Vw 90 % | Vw 99 % | Vw 12 |
|------------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.08 | 4.26 | 6.07 | 7.22 | 7.89 |
| NNE | 0.28 | 6.37 | 8.97 | 10.99 | 12.56 |
| NE | 0.41 | 7.39 | 9.99 | 11.85 | 12.85 |
| ENE | 0.09 | 4.71 | 7.57 | 9.29 | 10.88 |
| E | 0.02 | 3.26 | 4.97 | 6.42 | 6.56 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| O | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ONO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NNO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabla IV. Resumen estadístico de la serie de oleaje (Hs) correspondiente al punto WWIII. Hs_{12} es la altura de la ola significativa en profundidades indefinidas excedida 12 veces al año en régimen medio. Época lluviosa menor.

| Dirección | Probabilidad | Hs 50 % | Hs 90 % | Hs 99 % | Hs 12 |
|------------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.004 | 0.40 | 0.66 | 0.87 | 0.87 |
| NNE | 0.01 | 0.86 | 2.21 | 2.61 | 2.77 |
| NE | 0.95 | 1.41 | 2.09 | 2.59 | 3.00 |
| ENE | 0.01 | 0.48 | 0.66 | 0.81 | 0.83 |
| E | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0008 | 0.15 | 0.26 | 0.28 | 0.28 |
| O | 0.009 | 0.37 | 0.56 | 0.66 | 0.67 |
| ONO | 0.003 | 0.31 | 0.53 | 0.59 | 0.59 |
| NO | 0.003 | 0.70 | 0.86 | 1.10 | 1.10 |
| NNO | 0.001 | 0.63 | 0.91 | 0.93 | 0.93 |

La función de distribución acumulada de la velocidad del viento (Figura 6a) muestra un debilitamiento de los vientos Alisios,

obteniéndose para los cuartiles 50 y 75 % velocidades del viento entre 5.9 y 7.8 m·s⁻¹ y Hs de 1.38 y 1.76 m (Figura 6b).

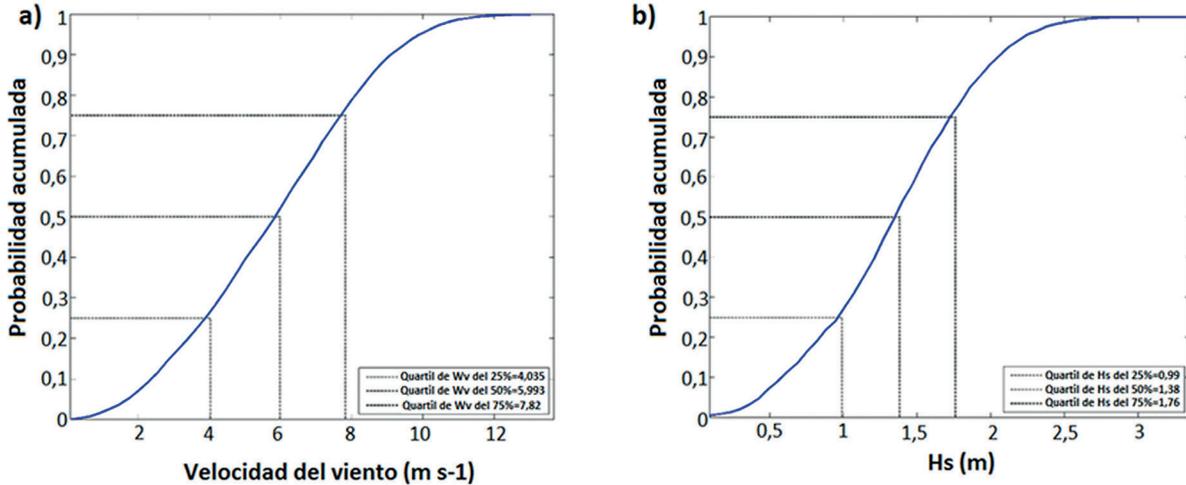


Figura 6. Función de distribución acumulada de **a)** Velocidad del viento (Vw) y **b)** Altura significativa de la ola (Hs) para la época de lluvia menor.

Época seca menor

Las direcciones, tanto para el viento como el oleaje, para esta época climática presentaron direcciones variables, aunque continúa el predominio NE (Figura 7). La velocidad del viento obtuvo valores de 6.81 y 9.42 m·s⁻¹ con una probabilidad de no excedencia del 50 y 90 %, respectivamente (Tabla V). La Hs mostró valores de 1.43 y 2.71 m para una probabilidad de no excedencia del 50 y 99 %. La

altura de ola que es superada 12 horas al año en régimen medio fue 2.9 m (Tabla VI). Para esta época seca menor se presentó un máximo relativo del viento y oleaje, concordante con el incremento en los Alisios en el denominado "Veranillo de San Juan" [3]. Asimismo, los resultados encontrados estarían influenciados por el segundo máximo del chorro de San Andrés, que se presenta para esta época debido a la intensificación temporal del sistema de alta presión del Atlántico Norte [30].

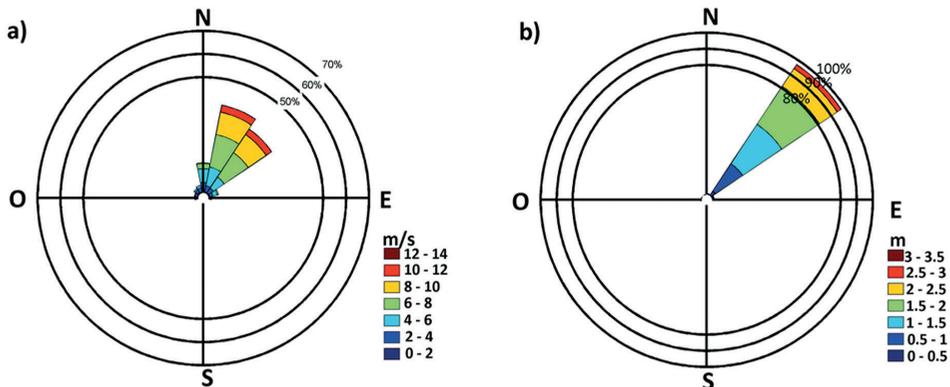


Figura 7. a) Rosa viento y b) Rosa de oleaje para la época seca menor.

Tabla V. Resumen estadístico de la serie de Viento (V_w) correspondiente al punto WWIII. $V_{w_{12}}$ es la velocidad del viento excedida 12 veces al año en régimen medio. Época seca menor.

| Dirección | Probabilidad | Vw 50 % | Vw 90 % | Vw 99 % | Vw 12 |
|------------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.12 | 4.50 | 6.28 | 7.87 | 9.09 |
| NNE | 0.31 | 6.81 | 9.41 | 11.09 | 12.03 |
| NE | 0.33 | 6.87 | 9.42 | 11.48 | 11.91 |
| ENE | 0.07 | 4.29 | 6.22 | 7.92 | 8.34 |
| E | 0.02 | 3.08 | 5.13 | 6.21 | 6.57 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| O | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ONO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NNO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabla VI. Resumen estadístico de la serie de oleaje (H_s) correspondiente al punto WWIII. $H_{s_{12}}$ es la altura de la ola significativa en profundidades indefinidas excedida 12 veces al año en régimen medio. Época seca menor.

| Dirección | Probabilidad | Hs 50 % | Hs 90 % | Hs 99 % | Hs 12 |
|------------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.002 | 0.66 | 1.26 | 1.28 | 1.28 |
| NNE | 0.005 | 0.70 | 1.81 | 1.96 | 1.96 |
| NE | 0.97 | 1.43 | 2.18 | 2.71 | 2.98 |
| ENE | 0.01 | 0.50 | 0.65 | 1.31 | 1.34 |
| E | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| O | 0.004 | 0.34 | 0.52 | 0.63 | 0.63 |
| ONO | 0.001 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| NO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NNO | 0.0004 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |

La función de distribución acumulada del oleaje (Figura 8a) mostró que los cuartiles 50 y 75 %

presentaron valores de 5.6 y 7.5 m·s⁻¹. Asimismo, Hs tuvo valores de 1.41 y 1.81 m (Figura 8b).

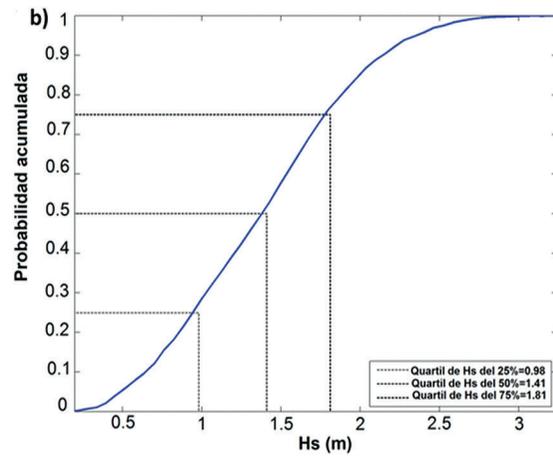
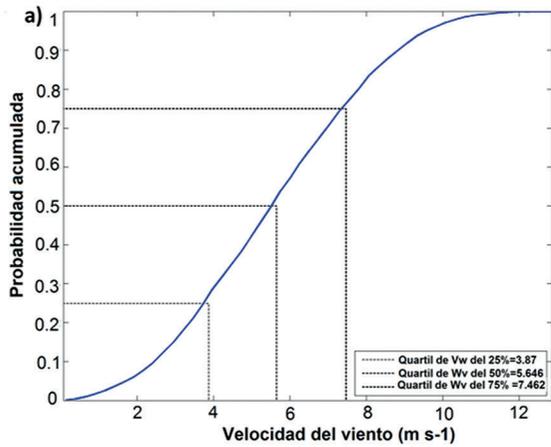


Figura 8. Función de distribución acumulada de **a)** Velocidad del viento (Vw) y **b)** Altura significativa de la ola (Hs) para la época seca menor.

Época de lluvia mayor

La rosa del viento y del oleaje mostró direcciones variadas, pero continúa el predominio de NE (Figura 9). Se intensificaron los componentes NNE, ENE y N con velocidades de 11.2; 9.7 y 7.9 m·s⁻¹, respectivamente, para probabilidades de no excedencia del 99 % (Tabla VII). En cuanto a la Hs, la dirección predominante fue NE con alturas de 0.99 y 1.73 m para probabilidades de no excedencia del 50 y 90 % (Tabla VIII). El oleaje excedido 12 horas al año en régimen medio fue 2.8 m, con procedencia NNE. Para esta época en la zona de estudio se observó una notable disminución de los vientos y oleaje,

debido al desplazamiento hacia el centro del Caribe de la ZCIT, la cual ocasiona que los vientos Alisios alcancen valores mínimos en el Caribe colombiano [23, 3] y por ende, una disminución de la altura significativa del oleaje [29]. En todas las épocas climáticas las observaciones del viento y el oleaje se mantuvieron con un predominio en los cuadrantes NE. La dirección de propagación del oleaje en el departamento del Atlántico, específicamente en Bocas de Cenizas ha sido definida como NEE-E para todo el año, debido a la orientación de la corriente con respecto a la dirección del oleaje que tiene una mayor incidencia sobre la desembocadura, asociado también al incremento del caudal del río Magdalena [25].

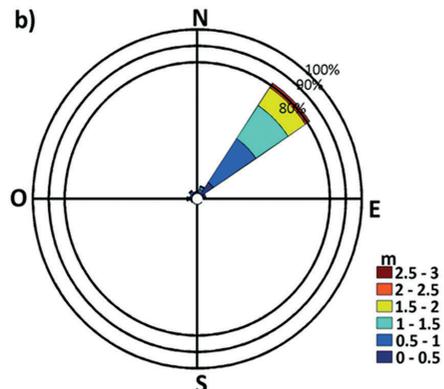
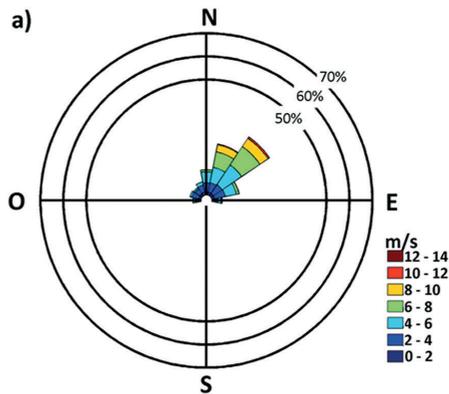


Figura 9. **a)** Rosa de viento y **b)** Rosa de oleaje para la época de lluvia mayor.

Tabla VII. Resumen estadístico de la serie de viento (Vw) correspondiente al punto WWIII. Vw_{12} es la velocidad del viento excedida 12 veces al año en régimen medio. Época lluviosa mayor.

| Dirección | Probabilidad | Vw 50 % | Vw 90 % | Vw 99 % | Vw 12 |
|------------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.10 | 4.00 | 5.84 | 6.96 | 7.96 |
| NNE | 0.22 | 5.54 | 8.38 | 10.18 | 11.27 |
| NE | 0.30 | 5.66 | 8.49 | 10.68 | 11.33 |
| ENE | 0.12 | 3.92 | 5.90 | 7.99 | 9.71 |
| E | 0.04 | 3.90 | 6.57 | 9.42 | 11.02 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| S | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| OSO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| O | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ONO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| NNO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabla VIII. Resumen estadístico de la serie de oleaje (Hs) correspondiente al punto WWIII. Hs_{12} es la altura de la ola significativa en profundidades indefinidas excedida 12 veces al año en régimen medio. Época lluviosa mayor.

| Dirección | Probabilidad | Hs 50 % | Hs 90 % | Hs 99 % | Hs 12 |
|------------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| N | 0.01 | 0.69 | 0.89 | 1.73 | 1.74 |
| NNE | 0.04 | 0.88 | 1.94 | 2.32 | 2.79 |
| NE | 0.81 | 0.99 | 1.73 | 2.00 | 2.53 |
| ENE | 0.02 | 0.44 | 0.60 | 0.76 | 0.83 |
| E | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ESE | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| SE | 0.0001 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 |
| SSE | 0.0001 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| S | 0.0004 | 0.77 | 0.78 | 0.78 | 0.78 |
| SSO | 0.0003 | 0.45 | 0.48 | 0.48 | 0.48 |
| SO | 0.0005 | 0.44 | 0.81 | 0.81 | 0.81 |
| OSO | 0.007 | 0.46 | 0.77 | 1.75 | 1.77 |
| O | 0.03 | 0.64 | 1.17 | 1.63 | 1.84 |
| ONO | 0.01 | 0.63 | 0.89 | 1.04 | 1.06 |
| NO | 0.03 | 0.75 | 1.76 | 2.12 | 2.12 |
| NNO | 0.0 | 0.73 | 1.36 | 1.93 | 1.95 |

De acuerdo a la función de distribución acumulada, se observó el debilitamiento de la velocidad del viento, donde el cuartil 75 % fue

igual a $6.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; este mismo cuartil para la Hs es igual a 1.33 m (Figura 10a y 10b).

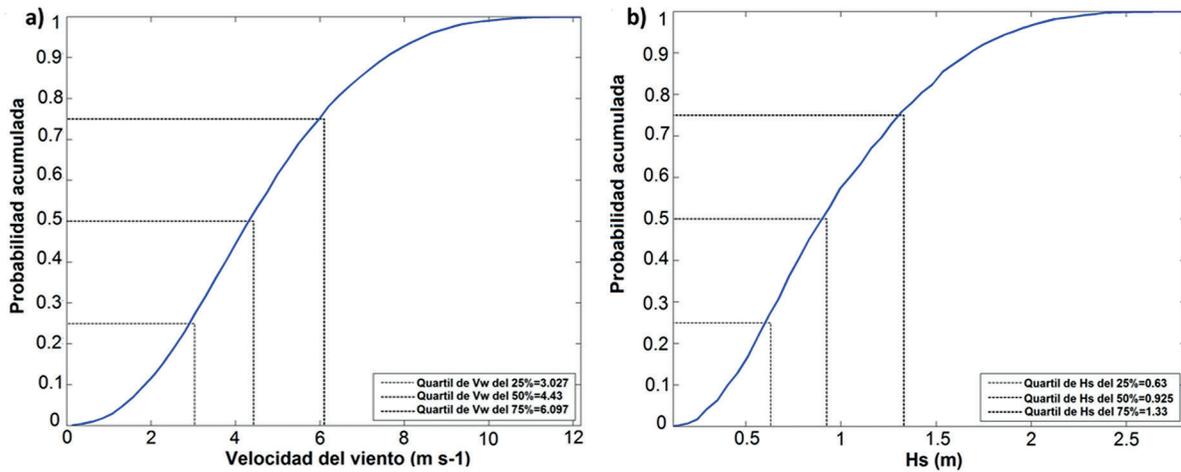


Figura 10. Función de distribución acumulada de **a)** Velocidad del viento (V_w) y **b)** Altura significativa de la ola (H_s) para la época lluviosa mayor.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada en el desarrollo del presente estudio es adecuada para ser empleada en zonas donde no existan registros históricos de oleaje de forma experimental, para la caracterización del régimen medio del oleaje y su principal forzador el viento. El análisis del viento y el oleaje por época climáticas demostró un comportamiento estacional de estos parámetros; además existe una estrecha relación entre la magnitud del viento y la altura significativa del oleaje. En la época seca se presentaron fuertes vientos y oleaje energéticos, con una dirección predominante del NE y velocidades de hasta $13.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y altura de ola significativa de hasta 3.6 m. En las condiciones de transición (lluviosa menor y seca menor) se presentó una mayor dispersión en la dirección del viento y oleaje, mientras en la lluviosa mayor se encontró una disminución considerable en la magnitud de estos parámetros. Estos resultados responden al desplazamiento de la ZCIT, al Chorro superficial de San Andrés y la intensificación temporal del sistema de alta presión del Atlántico Norte.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó en el marco del proyecto "Consolidación de la línea base ambiental

(descripción, diagnóstico y prospección) de la zona marino costera del departamento del Atlántico, que contribuya al diseño de estrategias y delimitación de unidades de gestión ambiental como parte del Proyecto Programa Red de Ciencia, Tecnología e Innovación en Recursos Hídricos del Caribe. Fase I. Todo el departamento Atlántico, Caribe", ejecutado por el Grupo de Investigaciones Ambientales, Marinas y Costeras de la Escuela Naval de Suboficiales ARC "Barranquilla" y Fundación WISE Innovations.

Los autores expresan su agradecimiento por su apoyo y contribución al Grupo de Física aplicada-Oceanografía Física de la Universidad del Norte. Finalmente, agradecen a los revisores del manuscrito quienes contribuyeron con sus valiosos aportes al mejoramiento del documento final.

LITERATURA CITADA

- [1] Ruiz, G., Mendoza, E. y Silvia, R. Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral del México. Ingeniería del Agua 2009, 16 (1): 51-64.
- [2] Montoya Ramírez, R.D. y Osorio Arias, A.F. Los modelos de generación de oleaje de

- viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos* 2007, (15): 47-74.
- [3] Yves François, T., Nicolae Lerma, A., Posada, P. y Oliva, B. Atlas climatológico del mar Caribe colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar); Convenio Especial de Cooperación Colciencias, Gobernación del Magdalena, 2012.
- [4] Wright, L.D. & Coleman, J.M. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *AAPG Bulletin* 1973, 57 (2): 370-398.
- [5] Osorio, A.F., Montoya, R.D., Mesa, J.C. y Bernal, G.R. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII TM y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH* 2009, 27: 37-56.
- [6] Restrepo L.J., Otero, C.L. y López, S.A. Clima de oleaje en el Pacífico Sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2009, 33 (128): 357-375.
- [7] Horrrillo, C.J., Maza, C.M. y Rejtman, O.P. Análisis de oleaje para la zona del Caribe colombiano con información escasa. Universidad de Cartagena - Instituto de hidráulica y Saneamiento Ambiental, I.H.S.A. 2000, pp. 10-11.
- [8] Agudelo, P., Restrepo, A., Molares, R., Tejada, C., Torres, R. y Osorio, A. Determinación del clima de oleaje medio extremal en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH* 2005, 23:33-45.
- [9] Orejarena, A., Otero, L., Dagua, C., Rocha, L. y Herrera, E. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el norte del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH* 2013, 31:109-124.
- [10] Tolman, H.L. Effect on numerics on a physics of a third generation wind-wave model. *Journal of Physical Oceanography* 1992, 22:1095-1111.
- [11] Tolman, H. & Chalikov, D. Source terms in a third-generation wind-wave model. *Journal of Physical Oceanography* 1994, 26: 2497-2518.
- [12] Tolman, H.L., Balasubramanian, B., Burroughs, L.D., Chalikov, D.V., Chao, Y. Y., Chen, H. S. & Gerald, V.M. Development and implementation of wind-generated ocean surface wave modelsat NCEP*. *Weather and forecasting* 2002, 17(2): 311-333.
- [13] Osorio, A. y Montoya, R. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el Mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH* 2009, 27: 37-56.
- [14] Orejarena, A.F., Otero, L.J., Dagua, C.J., Marriaga, L. y Herrera, E. Determinación del clima del oleaje medio y extremal en el norte del Golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH* 2013, 31: 109-124.
- [15] Otero, L., Ortiz-Royero, J.C., Ruiz-Merchan, J.K., Higgins, A.E. & Henriquez, S.A. Storms or cold fronts: what is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region?. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2016, 16(2): 391-401.
- [16] Mesa, S.O., Poveda, J.G. y Carvajal, L. Introducción al Clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 1997. 390pp.
- [17] Márquez, G. Los sistemas ecológicos marinos del sector adyacente a Santa Marta, Caribe colombiano I: Generalidades. *Ecol. Trop* 1982, 2 (1): 5-18.
- [18] Bula-Meyer, G. Oceanografía. En: Jimeno MC (ed). Caribe de Colombia, pp. 135-153. Fondo José Celestino Mutis, 1990. Bogotá.
- [19] Pujos, M., Pagliardini, J., Steer, R., Vernet, G. y Weber, O. Influencia de la contra-corriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental: su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena. *Bol. Cient. CIOH* 1986, 6: 3-15.
- [20] Corredor, J. Dinámica espacio-temporal de la surgencia de La Guajira. In *Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar*

- y Congreso Centroamericano y del Caribe en Ciencias del Mar. Santa Marta, 1992, Vol. 1, pp. 206-221.
- [21] Andrade, C.A., & Barton, E.D. Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 2000, 105(C11): 26191-26201.
- [22] Franco-Herrera, A. Una aproximación a la oceanografía de la ensenada de Gaira: El Rodadero, más allá que un centro turístico. *Univ. Jorge Tadeo Lozano*, 2005. Santa Marta.
- [23] Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P. y Andrade, C. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Revista Academia Colombiana de Ciencias* 2006, 30 (115): 195-208.
- [24] Otero, A. El puerto de Barranquilla: retos y recomendaciones. *Revista de Economía del Caribe* 2012, (10):126-159.
- [25] Urbano, C.P., Otero, L.J. y Lonin, S. Influencia de las corrientes en los campos de oleaje en el área de Bocas de Ceniza. *Bol. Cient. CIOH* 2013, (31): 191-206.
- [26] Tolman H.L. Validation of WAVEWATCH III versión 1.15 for a global domain. National Oceanic and Atmospheric Administrations, Environmental Modeling Center-Ocean Modeling Branch. Technical Note, 2002a. 33 pp.
- [27] Tolman H.L. Distributed -memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Computing* 2002b, 28: 35-52.
- [28] Poveda, G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista Academia Colombiana de Ciencias* 2004, 28 (107): 201-222.
- [29] Mesa, C. Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el Caribe colombiano. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, 2009. 114 pp.
- [30] Giannini, A., Kushnir, Y. & Cane, M.A. Interannual variability of Caribbean rainfall, ENSO, and the Atlantic Ocean. *Journal of Climate* 2000, 13(2): 297-311.