

ARTÍCULO

Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos

Fourty years of wave hindcast using Wave Watch III model and calibration with several data sources at the Caribbean Sea

Fecha recepción: 2009-06-28 / Fecha aceptación: 2009-10-28

Andrés Fernando Osorio, Julio César Mesa, Gladis Rocío Bernal,
Grupo OCEÁNICOS, <http://oceanicos.unalmed.edu.co>,
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín
Rubén Darío Montoya, Grupo GICI, Programa de Ingeniería Civil,
Universidad de Medellín



Resumen

Este trabajo describe una primera aproximación al clima de oleaje, dentro del proyecto llamado Interacción entre los procesos Atmósfera-Océano-Tierra en el Caribe colombiano. El principal objetivo es mejorar la información de nivel del mar y climatología del oleaje en las aguas del Caribe colombiano. Para esto 40 años de vientos del proyecto global Reanalysis 1 (resolución de $1.8^\circ \times 1.905^\circ$ y cuatro datos diarios) del National Center for Environmental Prediction y el National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) son empleados como forzamiento del modelo de oleaje WaveWatchIII™ para reproducir series de tiempo de Altura de ola significativa (Hs) y Período (T). Para mejorar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo numérico, éstos han sido corregidos empleando datos de diferentes fuentes de información. Los datos disponibles incluyen vientos y oleaje obtenidos de las boyas 41018 y 42058 de la NOAA, información de satélite obtenida a partir de los proyectos TOPEX/POSEIDON y JASON 1 y datos visuales de barcos en ruta. A partir de esta información se han estudiado las principales características del clima de oleaje para aguas profundas y costeras del Caribe colombiano. Los resultados muestran como el ciclo anual del oleaje presenta un comportamiento bimodal asociado con el comportamiento de los vientos alisios del noreste presentando dos períodos de vientos y oleaje intensos (bajas precipitaciones) y dos períodos de vientos y oleajes débiles (altas precipitaciones). La distribución espacial del oleaje muestra una zona central en el Caribe con mayores valores de altura de ola significativa (Hs) asociados al denominado chorro de San Andrés y una zona costera ubicada entre Cartagena y Santa Marta. Los resultados obtenidos son coherentes con pocos trabajos presentados por otros autores quienes obtienen alturas de olas significativa del orden de 2.5 metros en la época seca en la región de Bocas de Ceniza en Barranquilla.

Palabras claves: Reanálisis de oleaje, datos de oleaje, modelación numérica, modelos de oleaje de viento.

Abstract

This paper describes the first approach to wave climatology, in the project called Interaction between the Atmosphere-Ocean-Land Processes in the Colombian Caribbean Sea. The main objective is to improve the data

of sea level and wave climatology for the Colombian Caribbean waters. To do this, the 40-year global atmospheric Reanalysis 1 (resolution of $1.8^\circ \times 1.905^\circ$ and 4 times daily) carried out by the National Center for Environmental Prediction and The National Center for Atmospheric Research (NCEP NCAR) Centers has been used to force the WaveWatchIII™ model to produce time series of significance wave height (Hs) and Period (T). The hindcast values have been corrected with information from different sources to achieve more accuracy of the data. The available data, including wind, wave and sea-level data, instrumental data from buoys (NOAA: 41018 and 42058, among others) in the Caribbean region, satellite data extracted from TOPEX/POSEIDON and Jason 1, and visual wave data provided by ships of opportunity. Statistical analysis of the produced wave hindcast was performed in order to provide information about the climatological trends in the Caribbean Sea and coastal areas. The results show how the annual cycle of the wave presents a bimodal behavior associated with the behavior of northeast trade winds showing two periods of strong winds and waves (low precipitations) and two periods of weak winds and waves (high rainfall). The spatial distribution of the waves shows a central area in the Caribbean with the higher values of significant wave height (Hs) associated with the so-called San Andrés Low - level jet and a coastal area located between Cartagena and Santa Marta. These results are consistent with a few papers presented by other authors who obtained significant wave heights of about 2.5 meters for dry season in the region of Bocas de Ceniza in Barranquilla.

Keywords: Wave hindcast, wave data, numerical modeling, wind wave models.

Introducción

La información del oleaje juega un papel fundamental en la gestión y planificación costera de nuestro país, pues influye de forma directa en todas las decisiones relacionadas con estudios de defensa costera, desarrollo turístico, protección de ecosistemas naturales y/o todo tipo de diseño portuario, entre otros. Su interacción con los sistemas costeros combinado con una mala gestión puede generar impactos ambientales importantes como la degradación de ecosistemas, alteraciones de la línea de costa por fenómenos de erosión y sedimentación, inundación en poblaciones costeras, afectación de la calidad del agua, desaparición de especies, entre otros.

En Colombia la información existente sobre reconstrucción de clima de oleaje disponible ha sido limitada, los primeros esfuerzos han sido basados en las observaciones visuales y parametrizaciones [1] [2], y por tanto no es adecuada desde el punto de vista de su calidad espectral, distribución espacial y resolución temporal, además no permite obtener información fiable durante condiciones extremas. Uno de los trabajos pioneros en el Caribe colombiano es el reportado por [3] donde se aplicó el modelo NedWAM para cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe, sin embargo sólo hasta los últimos años se cuenta con información instrumental [4] que ha permitido validar la información generada por modelos numéricos. Los modelos numéricos reportados en la literatura no han sido aplicados para reconstruir clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano, además, dichos modelos utilizados hasta la fecha (ej. [3] [5]) no han sido contrastados con otros modelos de tercera generación (ej. [6] [7] [8]) que han incluido mejoras sustanciales desde el punto de vista numérico y de la física del fenómeno. En cuanto a la información de oleaje suministrada por los satélites, aunque permiten la observación de vastas áreas, no es posible obtener datos con alta resolución temporal para un punto dado. El número de boyas fondeadas en aguas profundas y cerca de la costa en nuestro país por km de costa es todavía incipiente [4] cuando se compara con el número de boyas existentes en otros países. Existen otros datos de origen comercial; los cuales son costosos y tampoco contienen toda la plenitud de la información detallada del oleaje.

Debido a la falta de información de oleaje con la resolución temporal y espacial necesaria en el Caribe colombiano para hacer estudios de clima marítimo de olas, es necesario recurrir a otras fuentes de datos dentro de las cuales se encuentran los denominados datos modelados o sintéticos (ej. [6] [7] [8]), que son obtenidos a partir de campos de viento pasados (también modelados) empleando técnicas de reanálisis (proyección hacia atrás). En este trabajo se muestra la aplicación del modelo WaveWatchIII™ [7] para generar 40 años de datos históricos de oleaje y el desarrollo e implementación de una metodología basada en la teoría del *Coficiente de Correlación Vectorial* (CCV) [9] que permite a través de la combinación de diferentes fuentes de datos, corregir el oleaje de origen numérico.

Materiales y métodos

Para la modelación del oleaje en el Caribe colombiano se emplearon diferentes fuentes de datos, que permitieron forzar el modelo y validar los resultados obtenidos. A continuación se presenta una breve descripción de las principales características de cada una de ellas.

Fuentes de información

Información Satelital. En la actualidad son cada vez más las aplicaciones del sensoramiento remoto en las diferentes ramas de la ciencia, dentro de estas se encuentran el monitoreo y medición espacial y temporal de variables oceanográficas y climatológicas tales como velocidad y dirección del viento, variación del nivel medio del mar, temperatura superficial del mar, entre otros. Así, a partir de técnicas de altimetría es posible medir algunos parámetros del oleaje y otras variables climáticas tales como la altura de olas significante (H_s) y el período del oleaje (T) y la magnitud del viento. En el Caribe colombiano se han reportado algunos estudios utilizando información satelital [5]. Sin embargo, en la literatura [10] se ha discutido la fiabilidad de dichas mediciones, donde para condiciones medias las mediciones de altura de ola signficante (H_s) son bastante confiables, pero para condiciones extremas (magnitud de vientos de 20 m/s) disminuye su fiabilidad. Además, estos autores reportan que los altímetros y los escarómetros no pueden medir en cercanías de la costa debido a la interferencia presente en la señal con tierra, no disponible hasta 25-30 km fuera de la costa y no completamente confiable hasta 50-100 km fuera de la línea de costa.

Para este estudio se emplearon los datos de altimetría de los proyectos TOPEX/POSEIDON (T/P) y su sucesor JASON-1, los cuales cuentan con un período de repetición de aproximadamente 10 días (9.5156), lo cual permite la cobertura de todo el océano durante dicho período. T/P y JASON-1, son un esfuerzo conjunto de la *American National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la *French Space Agency* (CNES). Con los datos de T/P es posible medir la velocidad del viento en la superficie y la altura de ola signficante (H_s) con precisiones aproximadas de 2

m/s (10%) y 0.5 m (10%) respectivamente [11] [12] [13], constituyéndose dicha información de vital importancia para la realización de análisis climáticos y la validación y/o calibración de otras fuentes de datos, tales como la generada por modelos numéricos.

En la figura 1, se muestran las órbitas del proyecto TOPEX/POSEIDON y JASON 1; así como la zona empleada para la modelación en el Caribe.

La información del proyecto TOPEX/POSEIDON está disponible en la página web: ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_height/altimeter_ocean_pathfinder/topex_poseidon_v92/data. Para esta misión se cuenta con datos desde septiembre 22 de 1992 hasta el 8 de octubre de 2005.

Los datos de la misión JASON-1, se encuentran disponibles en la página web: ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_height/altimeter_ocean_pathfinder/topex_poseidon_v92/data. Para esta misión se cuenta con información desde enero 15 de 2002 hasta la actualidad.

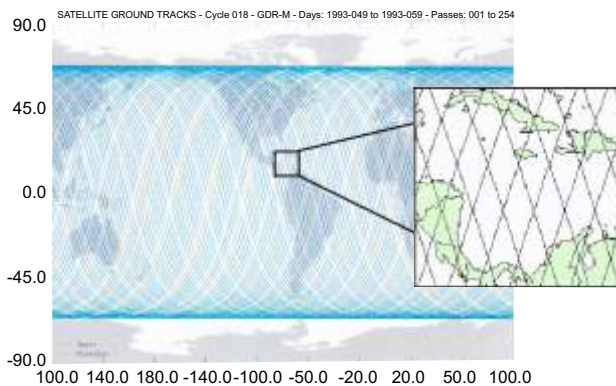


Figura 1. Órbitas del proyecto T/P y JASON 1 en la zona región del Caribe. Fuente AVISO.

En contraposición a la multitud de ventajas y novedades que nos ofrece la altimetría satelital, la baja resolución temporal (1 dato cada 10 días aproximadamente) hacen que dichos datos sean idóneos para estimar el régimen medio de oleaje en una zona, pero no el régimen extremo, ya que durante el recorrido de cada órbita es posible no obtener datos durante dichas condiciones [14].

Información Visual. Los datos visuales del oleaje son tomados en su mayoría desde barcos en ruta y en menor proporción desde boyas oceanográficas, usualmente son empleados en regiones donde no existe información direccional instrumental (boyas) o, bien, donde las series instrumentales no son lo suficientemente largas. Existen muchas décadas de datos y la cobertura espacial es muy extensa; sin embargo toda la información visual requiere ser contrastada con datos instrumentales, siempre que sea posible (Sánchez Arcilla en [1]). La principal limitante de los datos visuales es la distribución preferencial a través de las rutas marítimas más comunes, concentrando la información alrededor de éstas. Otras de las limitaciones de los datos visuales, es que no proporcionan información durante condiciones extremas, ya que las rutas de navegación son modificadas para evitar los temporales [10] [1] [15]; además, la toma de los datos es subjetiva y depende del entrenamiento de los observadores, de la altura del puente, entre otras [1]. A pesar de las limitantes e incertidumbres inmersas en esta información, en países como Colombia donde no se posee una información instrumental confiable (largos períodos de medición), esta fuente de información, se convierte en una gran alternativa para el estudio del oleaje. La incertidumbre asociada a la información visual ha sido documentada por diferentes autores [16] [17] [18] [19] [20].

Los datos visuales fueron obtenidos de la base de datos *Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set* (COADS), administrada por el *US National Center for Atmospheric Research* (NCAR), de la *National Ocean and Atmospheric Administration* (NOAA). Los registros están disponibles desde 1967 hasta 1997, pero son datos esporádicos. La distribución espacial de la información disponible se muestra en la figura 2.

Datos instrumentales. La gran ventaja de los datos instrumentales es la calidad y fiabilidad de la información de oleaje que suministran, con errores muy bajos para la altura de ola significativa (H_s), y para el período pico (T_p) limitada por la frecuencia de toma de datos [10]; sin embargo por ser datos puntuales no permiten una representación espacial adecuada de las características del oleaje. Por esta razón y dado que la duración de las series de datos de

oleaje direccional son todavía demasiado cortas para su uso directo en la elaboración de los regímenes, éstas se utilizan por lo general en el proceso de calibración y validación de otras fuentes de datos, como los obtenidos con los modelos numéricos de generación del oleaje.

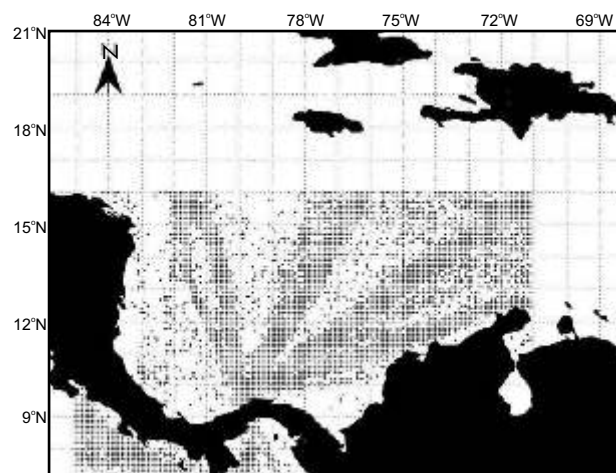


Figura 2. Distribución espacial de los datos visuales en la región del Caribe y Pacífico.

Una de las desventajas de los datos instrumentales es que están afectados por la forma de la estructura sobre la cual están soportados los instrumentos de medición (dichos errores se corrigen en laboratorio). Además, durante condiciones extremas, las boyas tienden a deslizarse o girar alrededor de las crestas más altas introduciendo una desviación negativa en la estimación de los valores altos de altura de ola significativa (H_s) [10].

En el momento de realización de esta investigación para el Caribe colombiano las series de datos instrumentales no eran de dominio público y la longitud de los registros, no eran lo suficiente largas como para utilizarlos fiablemente. Así que la información instrumental empleada corresponde a los datos de las boyas 42058 y 41018 suministrados por el *National Data Buoy Center* (NDBC) de la NOAA, la cual se encuentra disponible en la página web: <http://www.ndbc.noaa.gov/hmd.shtml>. En la figura 3 y en la tabla 1 se muestra la ubicación de las boyas y sus características principales.

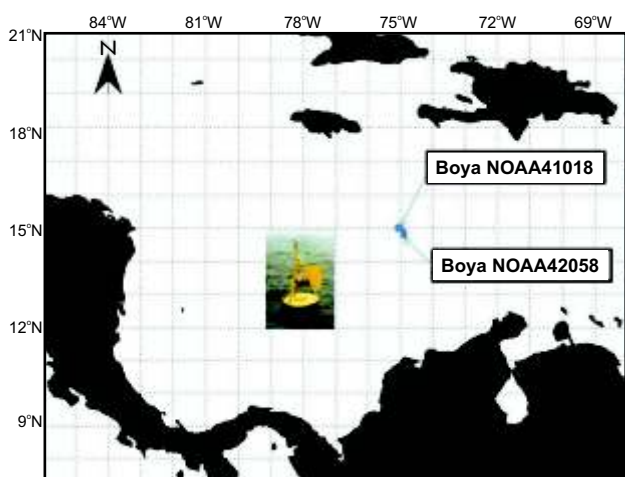


Figura 3. Ubicación boyas NOAA 42058 y 41018 en el Caribe colombiano.

Modelo de oleaje

La evolución de los computadores y los trabajos presentados por diferentes autores impulsaron la aparición de los modelos de tercera generación. [21], presentan una reseña histórica de la evolución de los principales modelos de generación de oleaje de viento. Para el presente estudio se empleó el modelo de tercera generación WaveWatchIII™. Este modelo fue desarrollado en el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), por [22] [7].

El modelo WaveWatchIII™ resuelve la ecuación de acción de balance de densidad espectral para el espectro direccional. La suposición implícita dentro de esta ecuación es que las propiedades del medio, profundidad del agua, corrientes y campo medio del oleaje, varía en escalas espaciales y temporales mucho mayores que las escalas de variación de una única onda. Así, la ecuación de energía modificada está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{x} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} N &= \frac{S}{\sigma} \\ \dot{x} &= c_g + \vec{U} \\ \dot{k} &= -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \\ \dot{\theta} &= -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $N(k, \theta, x, t)$ es la acción de densidad espectral del oleaje, U es la velocidad media de la corriente, k es el número de onda, θ es la dirección de propagación del oleaje perpendicular a la cresta, S es la suma de todos los sumideros o fuentes de energía, s es una coordenada en la dirección θ y m es una coordenada perpendicular a s y $C_g = \sigma / k$ es la celeridad de propagación de grupo.

Para aplicaciones regionales y globales, la ecuación de balance para la acción de densidad espectral $N(k, \theta, x, t)$ se expresa usualmente en coordenadas esféricas, como se muestra a continuación:

Tabla 1. Características de las Boyas NOAA 42058 y 41018.

Boya	Coordenadas		Años de registro	Faltantes	Tipo boya
	Longitud Este	Latitud Norte			
42058 ²	074 59 34	14 58 40	2005 – 2006 (Datos mensuales con resolución horaria)	Enero a mayo de 2005 y septiembre a diciembre de 2006.	Direccional
41018	075 00 00	15 00 00	1994 – 1996 (Datos mensuales con resolución horaria)	Enero a julio de 1994, abril a agosto de 1995 y marzo a diciembre de 1996.	No direccional

²A partir del mes de agosto de 2006 se modificó la ubicación de la boya 42058 a las coordenadas 15 05 33N y 075 03 52E.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos\phi} \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial \phi} N \cos\theta + \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial \lambda} \dot{\lambda} + \frac{\partial \dot{k}}{\partial k} k N + \frac{\partial \dot{\theta}_g}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos\theta + U_\phi}{R}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin\theta + U_\lambda}{R \cos\phi}$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan\phi \cos\theta}{R}$$
(2)

Donde R es el radio de la tierra, λ y θ son la longitud y la latitud y U_λ , U_θ , son las componentes zonal y meridional de las corrientes.

Todos los factores que aportan o restan energía al oleaje (S) son clasificados por lo general en cuatro componentes principales: S_{in} está relacionada con la energía suministrada por el viento; S_{nl} representa las interacciones no lineales entre ondas dadas por [23], quien propuso que las olas interactuaban entre sí y compartían energía; S_{ds} es el término que considera la disipación de energía de la ola por el rompimiento de olas en aguas profundas (Whitecapping) y S_{bot} está relacionado con la pérdida o disipación de energía debida a la fricción con el fondo en aguas someras y con corrientes marinas para aguas profundas.

Forzadores del modelo (Vientos Reanalysis - NCEP/NCAR). El viento constituye la fuente principal de energía en los modelos de oleaje de viento. Por lo general dichos modelos son alimentados a partir de las componentes del viento (zonal y meridional) de forma espacialmente distribuida y con una resolución temporal definida. Por lo general los vientos implementados en los modelos de oleaje provienen de modelos atmosféricos que emplean técnicas de asimilación de diferentes fuentes de datos (satélite, datos de superficie, globos meteorológicos, aviones en vuelo, barcos en ruta, sondas, etc) y mediante técnicas de reanálisis (HindCast o Proyección hacia atrás) reproducen los vientos y otras variables atmosféricas del pasado. Dentro de estas fuentes de información se encuentran el proyecto REANALYSIS I y II del *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA), los proyectos ERA-15 y ERA-40 del *Center*

for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF), el proyecto JRA-25 de la agencia meteorológica Japonesa, entre otros.

Teniendo en cuenta su mayor longitud de registros; como vientos forzadores del modelo se emplearon los vientos a 10 metros de altura del proyecto REANALYSIS I del *National Center for Environmental prediction* (NCEP) en colaboración con el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) de la NOAA. Los vientos de superficie están disponibles desde 1948 hasta la actualidad, cuatro veces al día en una grid Gaussiana con una resolución espacial de 1.875° en longitud y 1.9° en latitud. Los datos se encuentran disponibles en <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>. El proyecto reanalysis de NCEP/NCAR no emplea en su método de asimilación de datos los vientos del proyecto QuikSCAT, a lo cual puede atribuirse en parte la subestimación de los vientos en el Caribe colombiano y zonas tropicales [21][24].

Es importante mencionar que la metodología propuesta representa básicamente las condiciones medias del oleaje, pues los vientos del proyecto NCEP/NCAR empleados para el forzamiento del modelo y en general las diferentes bases de datos mencionadas anteriormente subestiman fuertemente los vientos bajos condiciones extremas de huracanes [25].

Para la validación de los datos obtenidos con el modelo numérico se emplearon las fuentes de información mencionadas anteriormente correspondientes a datos visuales (H_{sv}), datos de satélite (H_{ss}) y datos instrumentales (H_{si}). Dicha validación se realizó durante los períodos coincidentes entre las diferentes fuentes de información.

Principales características de simulación. En la tabla 2 se presentan las principales características de simulación empleada para la determinación del oleaje histórico del Caribe colombiano.

Tabla 2. Características generales de simulación.

Características	Descripción
Detalles de la malla computacional	
-Resolución espacial	Malla de 1°x1°.
-Latitud mínima y máxima	9°N - 18°N.
-Longitud mínima y máxima	70°W – 84°W.
-Período de simulación	1 de enero de 1968 - 31 de diciembre de 2007.
Parametrizaciones	
-Energía suministrada por el viento S_{in}	[26] y [27], $C_{inp}=0.25$.
-Interacciones no lineales	Discrete Interaction Aproximation (DIA), [28]. $\lambda=0.25$, Prop.constant=0.278E+8, factor kd=0.75, kd mínimo=0.5, constates de aguas someras (5.5, 0.83 y -1.25).
-Disipación de energía Whitecapping S_{ds}	[26] y [27].
-Fricción con el fondo S_{bot}	[29].
Detalles numéricos	
Resolución espectral	20 frecuencias ($\sigma_m = X_\sigma \sigma_{m+1}$, con $X_\sigma=1.1$) y 36 direcciones.
Pasos de tiempo	900 s (paso de tiempo global), 900 s (espacio X-Y), 900 s (propagación intraespectral) y 300 s (Integración términos fuente o sumidero de energía).
Definición del modelo	Corrida en seco (NO), propagación en x-y <i>activadas</i> , refracción <i>activada</i> , ajuste de número de onda inducido por corrientes <i>activada</i> .
Otros	No se incluyen corrientes y variaciones del nivel medio del mar.

Calibración de series a partir de fuentes diversas

Para la corrección de los datos obtenidos con el modelo numérico **WaveWatchIII™** empleando varias fuentes de información se emplearon las técnicas del *Coefficiente de Correlación Vectorial (CCV)* y del *modelo de regresión con rectas en dos de las tres variables*. A continuación se presenta la descripción detallada de cada una de ellas.

Coefficiente de Correlación Vectorial (CCV). Es una generalización del cuadrado de un coeficiente de correlación simple en una dimensión [30]. Este coeficiente es simétrico respecto a sus argumentos, es invariante a transformaciones de ejes coordenados, esto incluye cambios de escala y rotaciones. El *Coefficiente de Correlación Vectorial (CCV)* es una medida del grado de asociación lineal entre dos variables y tiene un valor de cero (0) cuando los dos

vectores son linealmente independientes y un valor máximo cuando los dos vectores son linealmente dependientes, en el caso que sea en dos dimensiones el valor del coeficiente de correlación vectorial es igual a dos (2). Diversos autores han formulado expresiones para el cálculo del *Coefficiente de Correlación Vectorial (CCV)* que han sido ampliamente utilizadas en oceanografía y meteorología. A continuación se muestran algunas de ellas pero antes de esto se definirán algunos conceptos.

Sea W_1 y W_2 un par de vectores aleatorios en dos dimensiones. Entonces

$$X = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Es un vector de cuatro dimensiones. Además, sea

$$\Sigma_x = \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma(u_1, u_1) & \sigma(u_1, v_1) & \sigma(u_1, u_2) & \sigma(u_1, v_2) \\ \sigma(v_1, u_1) & \sigma(v_1, v_1) & \sigma(v_1, u_2) & \sigma(v_1, v_2) \\ \sigma(u_2, u_1) & \sigma(u_2, v_1) & \sigma(u_2, u_2) & \sigma(u_2, v_2) \\ \sigma(v_2, u_1) & \sigma(v_2, v_1) & \sigma(v_2, u_2) & \sigma(v_2, v_2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

La matriz de covarianzas del vector X . En esta ecuación Σ_{11} es la matriz de covarianza del vector $W1$, Σ_{22} es la matriz de covarianza del vector $W2$, los otros dos términos son la covarianza cruzada entre cada uno de los vectores. En la tabla 3 se presentan algunas de las principales formulaciones presentadas por diferentes autores para el *Coefficiente de Correlación Vectorial (CCV)*.

Tabla 3. Formulaciones del Coeficiente de Correlación Vectorial (CCV). En orden cronológico.

Expresión Matemática	Autor
$\rho_D^2 = \frac{Tr(\Sigma_{12})^2}{Tr(\Sigma_{11})Tr(\Sigma_{22})} \quad (5)$	[31]
$\rho_S^2 = \frac{Tr(\Sigma_{12})^2 + [\sigma(u_1, v_2) - \sigma(u_2, v_1)]}{Tr(\Sigma_{11})Tr(\Sigma_{22})} \quad (6)$	[32]
$\rho_H^2 = \frac{[(\Sigma_{11})^{-1}\Sigma_{12}(\Sigma_{22})^{-1}\Sigma_{21}]}{Tr(\Sigma_{11})} \quad (7)$	[33]
$\rho_C^2 = \frac{Tr[\Sigma_{12}(\Sigma_{22})^{-1}\Sigma_{21}]}{Tr(\Sigma_{11})} \quad (8)$	[34]
$\rho_v^2 = Tr[(\Sigma_{11})^{-1}\Sigma_{12}(\Sigma_{22})^{-1}\Sigma_{21}] \quad (9)$	[35] más adelante desarrollada por [36]

Donde $Tr = S_u^2 + S_v^2$ donde S_u y S_v son las varianzas individuales de las componentes u y v .

En [37] desarrolló una forma expandida de la formulación hecha por [35] en términos de u y v que es muy útil para aplicaciones computacionales. Esta expresión es hallada expandiendo el producto de las matrices de la ecuación y simplificando los resultados. La expresión expandida del coeficiente de correlación vectorial es:

$$\rho_v^2 = \frac{f}{g} \quad (10)$$

Donde,

$$f = \sigma(u_1, u_1) \{ \sigma(u_2, u_2) [\sigma(v_1, v_2)]^2 + \sigma(v_2, v_2) [\sigma(v_1, u_2)]^2 \} + \sigma(v_1, v_1) \{ \sigma(u_2, u_2) [\sigma(u_1, v_2)]^2 + \sigma(v_2, v_2) [\sigma(u_1, u_2)]^2 \} + 2 [\sigma(u_1, v_1) \sigma(u_1, v_2) \sigma(v_1, u_2) \sigma(u_2, v_2)] - 2 [\sigma(u_1, u_1) \sigma(v_1, u_2) \sigma(v_1, v_2) \sigma(u_2, v_2)] - 2 [\sigma(v_1, v_1) \sigma(u_1, u_2) \sigma(u_1, v_2) \sigma(u_2, v_2)] - 2 [\sigma(u_2, u_2) \sigma(u_1, v_1) \sigma(u_1, v_2) \sigma(v_1, u_2)] - 2 [\sigma(v_2, v_2) \sigma(u_1, v_1) \sigma(u_1, u_2) \sigma(v_1, u_2)] \quad (11)$$

y

$$g = \{ \sigma(u_1, u_1) \sigma(v_1, v_1) - [\sigma(u_1, v_1)]^2 \} \{ \sigma(u_2, u_2) \sigma(v_2, v_2) - [\sigma(u_2, v_2)]^2 \} \quad (12)$$

Modelo de regresión con rectas en dos de las tres variables (Relación Funcional). Este modelo de regresión ha sido tomado de [9]:

$$\begin{aligned} X &= T + e_x \\ Y &= \alpha_1 + \beta_1 T + e_y \\ Z &= \alpha_2 + \beta_2 T + e_z \end{aligned} \quad (13)$$

Donde α_1 , α_2 , β_1 y β_2 son los parámetros de la regresión que se estiman mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= S_{YZ}/S_{XZ} \\ \beta_2 &= S_{YZ}/S_{XY} \\ \alpha_1 &= \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \\ \alpha_2 &= \bar{z} - \beta_2 \bar{x} \end{aligned} \quad (14)$$

Y las varianzas de los errores se estiman con:

$$\begin{aligned} Var[e_X] &= \frac{1}{n} S_{XX} - \frac{1}{n} S_{XY} S_{XZ} / S_{YZ} \\ Var[e_Y] &= \frac{1}{n} S_{YY} - \frac{1}{n} S_{XY} S_{YZ} / S_{XZ} \\ Var[e_Z] &= \frac{1}{n} S_{ZZ} - \frac{1}{n} S_{XZ} S_{YZ} / S_{XY} \end{aligned} \quad (15)$$

Una ventaja de este tipo de regresiones es su naturaleza simétrica, que significa que el resultado de aplicar el modelo a los datos es independiente del orden de la identificación de las variables a X , Y o Z .

Esto implica que se puede determinar los coeficientes de la relación cruzada entre dos de las variables, pudiendo obtener relaciones de calibración como por ejemplo $Y = \beta_3 + \beta_3 Z$. A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene que:

$$\begin{aligned} \beta_3 &= \beta_1/\beta_2 = S_{XY}/S_{XZ} \\ \alpha_3 &= \alpha_1 - \alpha_2 \beta_1/\beta_2 = \bar{y} - \beta_3 \bar{z} \end{aligned} \quad (16)$$

Metodología de corrección. A continuación se presentará una metodología para el reanálisis de series de oleaje obtenidas mediante una modelación numérica (con WaveWatchIII™). Se proponen 6 pasos: 1) Recopilación de toda la información del oleaje que se encuentre disponible (boyas, información satelital, información visual), 2) Estimar el *coeficiente de correlación vectorial (CCV)* con los datos del modelo y de su relación con la distancia, establecer la función de pesos para establecer la influencia de la información sobre el punto de estudio, 3) Corregir los datos satelitales y los datos visuales con los datos instrumentales, 4) Aplicación de la función de pesos a los datos visuales corregidos, 5) Aplicar la *relación funcional* con rectas en dos de las tres variables [9] para obtener a partir de las tres fuentes de información los coeficientes de calibración para la serie obtenida de reanálisis y (6) Aplicación de los coeficientes obtenidos a los datos modelados. A continuación se presenta el detalle de cada uno de los pasos de la metodología.

A partir de la información suministrada por el modelo WaveWatchIII™ y mediante la expresión formulada por [35] para estimar el coeficiente de correlación vectorial explicado en la sección anterior, se pretende establecer el grado de dependencia lineal del flujo medio de la energía del oleaje, en sus componentes x y y de los puntos donde exista una *Boya Virtual (BV)* generada con el modelo y el flujo medio de la energía en sus mismas componentes en el punto de interés; esto con el fin de ver como es la correlación entre el oleaje en la *Boya Virtual (BV)* y los datos alrededor de la misma.

Las componentes de flujo medio de la energía son calculadas mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} FM_x &= 570 * H_s^2 * T_p * \cos(Dir) \\ FM_y &= 570 * H_s^2 * T_p * \sin(Dir) \end{aligned} \quad (17)$$

Donde H_s es la altura de ola significativa, T_p es el período pico y Dir es la dirección predominante del oleaje.

De la relación entre el *coeficiente de correlación vectorial (CCV)* y la distancia del punto con respecto a la posición de la boya virtual, se extraen las *funciones de peso* para la corrección de las fuentes de información. Se escogió la información simulada debido a que es la única fuente de información que posee un período de registro largo para cumplir con una de las hipótesis del *coeficiente de correlación vectorial (CCV)*, que el número de datos tienda a infinito. La figura 4 muestra como el (CCV) disminuye a medida que la distancia de los puntos con respecto a la boya virtual aumenta, el valor máximo de correlación es 2 y según la zona cardinal respecto al punto objetivo los valores pueden bajar hasta casi 0.5 en algunos casos. De los gráficos mostrados se puede inferir que a medida que aumenta la distancia al punto de interés, la correlación de los flujos medios de energía entre el punto objetivo y su alrededor es menor.

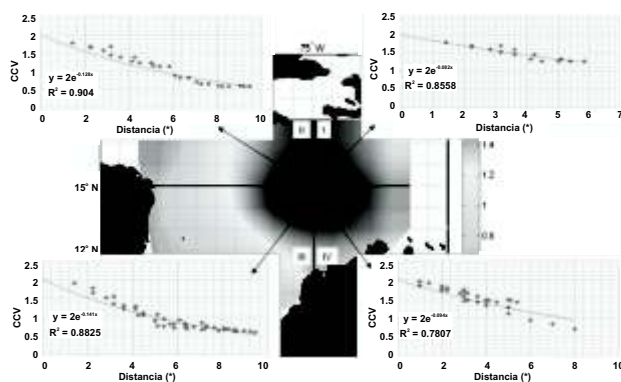


Figura 4. Relación entre el *coeficiente de correlación vectorial (CCV)* y la distancia.

Por ser una medida *in situ* del oleaje, la información instrumental (*boyas*) es considerada como la información más confiable con la que se cuenta en el Caribe colombiano; sin embargo como el período de registro de esta fuente es tan corto y más aún por ser una fuente puntual de información, se utilizará sólo para la corrección de las otras fuentes de información (satelital y visual) y para la validación posterior de la metodología.

Los datos de satélite son tomados en intervalos de segundos en las trayectorias que describen sus órbitas, por eso se hace necesario establecer el valor horario para esta fuente de información, con el fin de poder corregir estos datos con los datos de las boyas de la NOAA (41018 y 42058). Para lograr esto se proponen dos metodologías: la primera es tomar todo los datos que se encuentren en el intervalo de tiempo $t \pm 0.5$ horas, donde t es el valor de la hora en punto, y promediar los datos para ese intervalo y asignarle el valor a la hora en punto; la segunda metodología consiste en tomar los datos dentro del intervalo de tiempo definido anteriormente y escoger el valor más cercano al punto de interés como valor representativo del oleaje en la hora en punto. Para llevar a cabo esta corrección sólo se tomará la información satelital que se encuentre a una distancia para la cual el coeficiente de correlación vectorial sea igual o superior a 1.8. Una vez obtenidos los valores horarios para la información satelital se buscan sus correspondientes valores en las boyas (41018 y 42058) y mediante una regresión del tipo lineal se obtienen los parámetros de corrección, que serán invariantes en el tiempo y en el espacio (ver figura 8).

Actualmente existen diversas metodologías para el cálculo de la altura de ola significativa (H_s) a partir de la información suministrada por los barcos en ruta. Cabe recalcar que estas metodologías fueron desarrolladas en diferentes partes del mundo y hasta el momento en el Caribe colombiano no se posee aún, una metodología propia que tenga en cuenta los datos que se encuentran en la región. Es por esto que en este trabajo se pretende formular una metodología para el cálculo de la altura de ola significativa a partir de los datos de oleaje visual existentes en la región, dada por las siguientes expresiones:

$$H_v = \frac{(H_{sea} + H_{swell})}{2}, \text{ si } H_{SEA} \text{ y } H_{SWELL} \text{ son suministrados por la fuente de información}$$

$$H = H_{sea}, \text{ si sólo es reportado } H_{SEA} \quad (18)$$

$$H = H_{swell}, \text{ si sólo es reportado } H_{SWELL}$$

Estos criterios difieren al que se utiliza para la obtención de una altura de ola y dirección, a partir de un espectro direccional instrumental [38]. Empleando los valores de H_v y mediante una regresión lineal con los valores coincidentes de la boya se obtienen los

parámetros de corrección para la información visual (ver figura 8).

Con la información satelital y visual corregida con la información de las boyas, el siguiente paso es hacer que todas las mediciones (serie de WaveWatchIII™, serie satelital corregida y serie visual corregida) coincidan en el tiempo y en el espacio. Para este paso se lleva toda la información satelital y la información visual a los puntos en donde se encuentran las boyas virtuales obtenidas con el modelo WaveWatchIII™ y a una resolución temporal horaria. Sólo se considerarán los datos que tengan un *coeficiente de correlación vectorial (CCV)* superior a 1.5 alrededor de la *Boya Virtual (BV)*, ya que en este se presentan los valores de oleaje con mayor influencia sobre el punto donde ésta se encuentra. Para la información satelital se toman todos los datos que se encuentren dentro de la región delimitada por el criterio del (CCV) y en el intervalo de tiempo $t \pm 0.5$ horas; donde t es el valor de la hora en punto. Luego de todos los valores dentro de este intervalo se escoge el valor más cercano al punto de interés como valor representativo del oleaje para esa hora. Debido a que a partir de la información visual se pueden encontrar varios valores de altura de ola significativa (H_s) para la misma hora, se hace necesario darle mayor relevancia a los oleajes que se encuentren más cercanos a la ubicación de la (BV). En la figura 5 se presenta un esquema de dicho procedimiento.

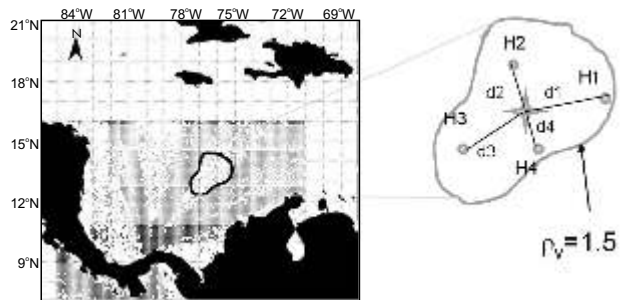


Figura 5. Esquema explicativo para la ponderación por distancia del oleaje visual.

Teniendo en cuenta lo anterior se propone un método en el cual el oleaje esté afectado por una función de peso que dependa del *Coficiente de Correlación Vectorial (CCV)*. Dicha función está dada por la siguiente expresión:

$$W_i = \frac{\rho_{v_i}}{\sum \rho_{v_i}} \quad (19)$$

Los pesos obtenidos mediante la expresión anterior, son aplicados a los datos de oleaje visual mediante la siguiente expresión, para obtener un valor representativo de la zona cercana a la *Boya Virtual (BV)*:

$$H_{sv} = W_1 H_1 + W_2 H_2 + W_3 H_3 + W_4 H_4 \quad (20)$$

Una vez hecha la corrección de los datos con la información instrumental y después de llevar la información dispersa obtenida de satélites y barcos en ruta a las coordenadas de las boyas virtuales obtenidas con el modelo WaveWatchIII™, se procede a buscar los datos que coinciden temporalmente en las tres fuentes de información. Después de realizar el paso anterior y teniendo las tres series de datos coincidiendo en el mismo año, mes, día y hora se les aplica la *relación funcional* a las series (modelo con rectas en dos de las tres variables presentado por [9]), explicando en la sección de arriba (ecuación 13), con el fin de obtener los parámetros α (α) y β (β) de corrección para las series modeladas. En la figura 6 se pueden ver los valores de β (β) aplicados en el modelo de regresión con rectas en dos de las tres variables.

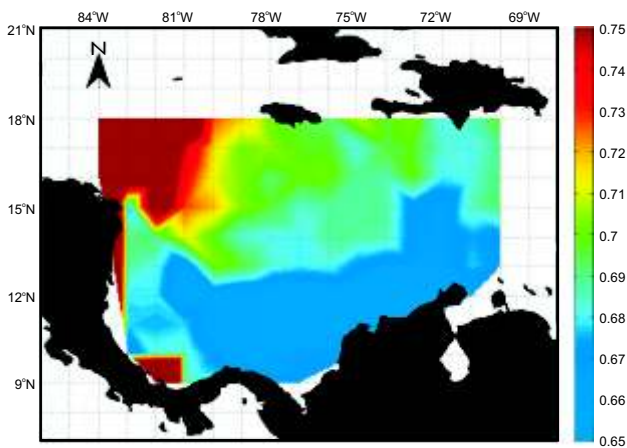


Figura 6. Valores de β del modelo de regresión con rectas en dos de las tres variables.

Resultados y discusión

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos de altura de ola significativa (H_s) para el período comprendido entre agosto de 1994 y febrero de 1996. Puede observarse claramente una subestimación de los datos modelados cuando se comparan con los medidos por la boya 41018. Dicho comportamiento se debe en gran parte a la subestimación de los vientos empleados para el forzamiento del modelo numérico WaveWatchIII™ como se mencionó anteriormente.

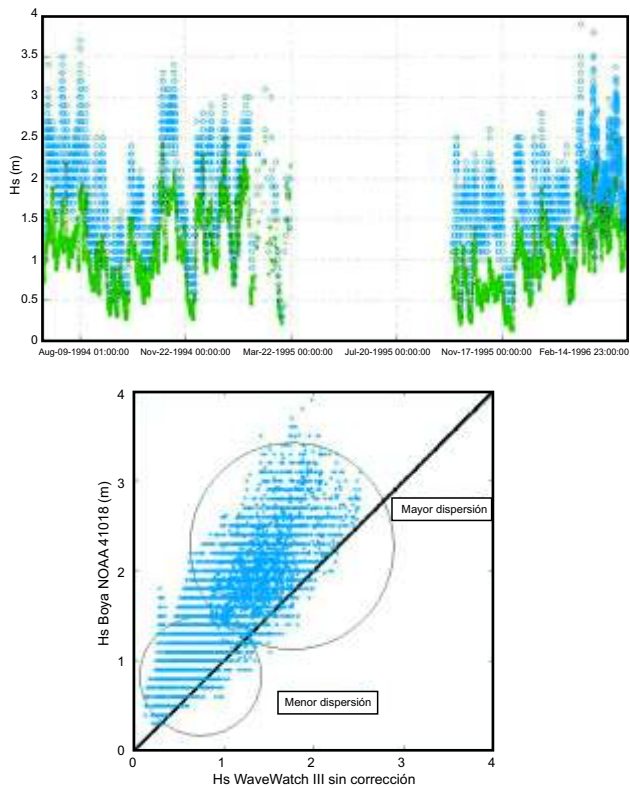


Figura 7. Comparación datos boya 41018 y datos modelados con los vientos de NCEP/NCAR.

La subestimación en los datos de H_s se presenta también para la boya 42058, (no mostrados en este artículo); siendo mayor para condiciones de vientos más intensos que para los más débiles. En la figura 7 se puede observar una gran dispersión de los datos, sin embargo dicha dispersión es mucho mayor para valores altos de H_s (superiores a 1.5 metros aproximadamente).

Para comparar la fiabilidad de los datos obtenidos para las demás fuentes de información, en la figura 8 se comparan los valores de altura de ola significativa (Hs) medidos en la boya 41018 con los datos visuales y de satélite. Puede observarse cómo para los datos de satélite se tiene menor cantidad de datos coincidentes con los datos de las boyas (1 dato aproximadamente cada 10 días); los datos presentan una menor dispersión respecto a la recta de ajuste y un coeficiente de correlación mayor ($R^2=0.89$) respecto a los resultados obtenidos a partir de los datos visuales ($R^2=0.84$). Esto parece ser un indicador de la mayor precisión de los datos satelitales con respecto a los datos visuales.

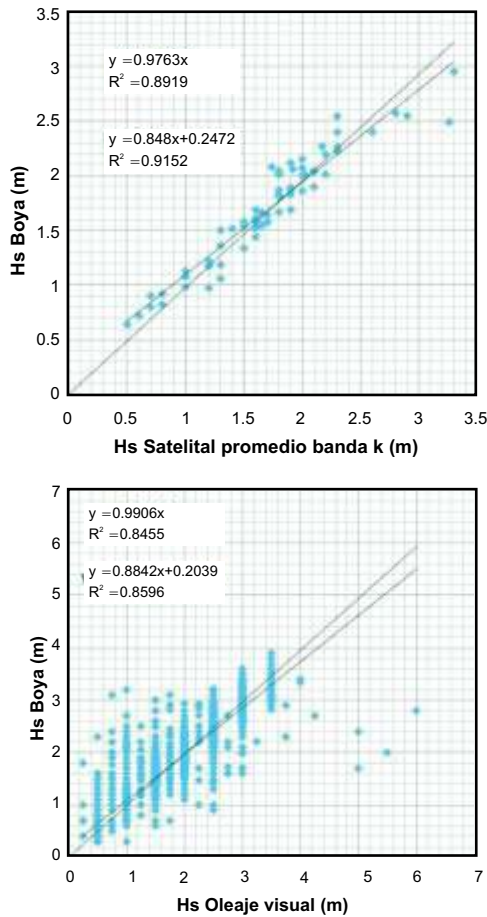


Figura 8. Comparación altura de ola significativa (Hs) en la boya contra datos satelitales y visuales.

Para un mismo valor de altura de ola significativa (Hs) medido visualmente se tienen diferentes valores de

altura de ola significativa medidos en la boya (figura 8), los cuales oscilan en rangos entre 2.5 a 0.3 veces por encima o por debajo respectivamente respecto a los valores registrados por la boya (41018), y disminuyen para valores más altos. Esto es un claro indicador de los problemas presentes en el oleaje visual [16] [17] [18] [19] [20].

Datos corregidos

A partir de las técnicas mencionadas anteriormente se realizó la corrección de los datos numéricos obtenidos con el modelo WaveWatchIII™, para todo el dominio computacional. En la figura 9 se muestra la comparación entre los datos de altura de ola significativa (Hs) para la boya NOAA 41018 antes y después de la aplicación de la metodología de corrección.

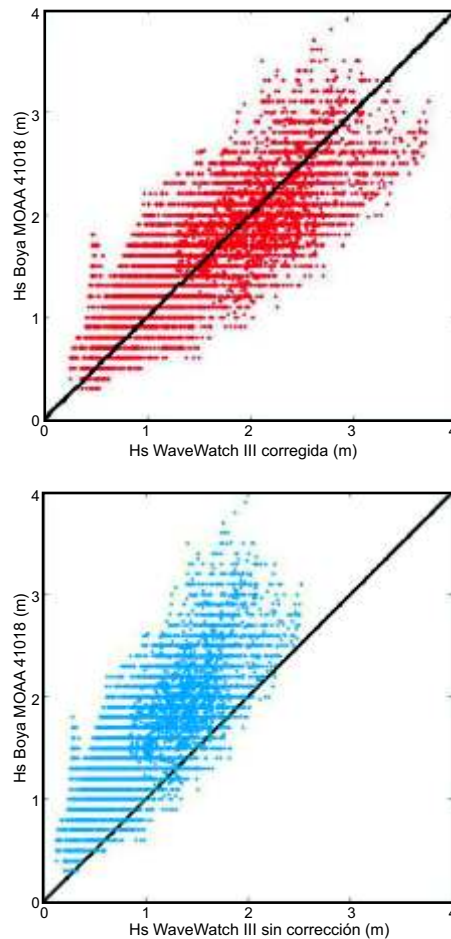


Figura 9. Comparación entre datos corregidos y sin corregir para la boya 41018.

Antes de la corrección puede observarse cómo los resultados del modelo a pesar de seguir la variabilidad del fenómeno (figura 7), no logra reproducir la magnitud de la altura de ola significativa y tienden a subestimar las mediciones (los errores de las series son considerablemente altos para la magnitud de olas que se presentan en el Caribe colombiano). Después de aplicar la metodología de corrección se puede observar (ver figura 9) cómo el error cuadrático medio (RMSE) entre los datos modelados y las mediciones de la boya para los datos sin calibración es de 0.7 m, mientras que para los datos corregidos de 0.4 m, lo que evidencia una disminución del RMSE de casi un 43%. La suma de los errores al cuadrado (SSE) es casi 3 veces menor, donde para los datos sin calibrar $SSE=4122.8$, mientras que con la calibración se obtiene $SSE=1413.0$. La desviación del error entre las series para los datos sin corregir es 0.48 m mientras que para los datos corregidos de 0.23 m. Estos datos permiten demostrar claramente el aumento en la fiabilidad de dichas series corregidas.

Climatología

Ciclo anual. La variabilidad espacio temporal de los vientos en el Caribe son de vital importancia en la formación de los patrones del oleaje (magnitud, dirección), pues estos definen los forzadores principales del oleaje. En el Caribe diferentes autores han estudiado la variabilidad climática (a diferentes escalas temporales) y su relación con variables como Presión a nivel del mar, Temperatura superficial del Mar, Precipitación, velocidad y dirección del viento y fenómenos como el ENSO, los huracanes, etc, dentro de éstos se encuentran los estudios de [39] [40] [41] [42] [43] [44].

Según [45], el ciclo anual de la hidroclimatología colombiana está dado dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), asociada con la dinámica trans-ecuatorial de advección de humedad por los vientos alisios del este, la actividad del chorro del Chocó y de los sistemas convectivos de mesoescala. En el Caribe dicho desplazamiento es causante de la variabilidad del ciclo anual de los vientos, y por ende del oleaje. Para mostrar las mejoras sustanciales en los datos de oleaje obtenidos después de la aplicación de la metodología de corrección propuesta, en la figura 10 se muestra el

ciclo anual del oleaje en tres boyas virtuales ubicadas en sitios estratégicos de las costas del Caribe colombiano (Guajira, Barranquilla, golfo de Morrosquillo).

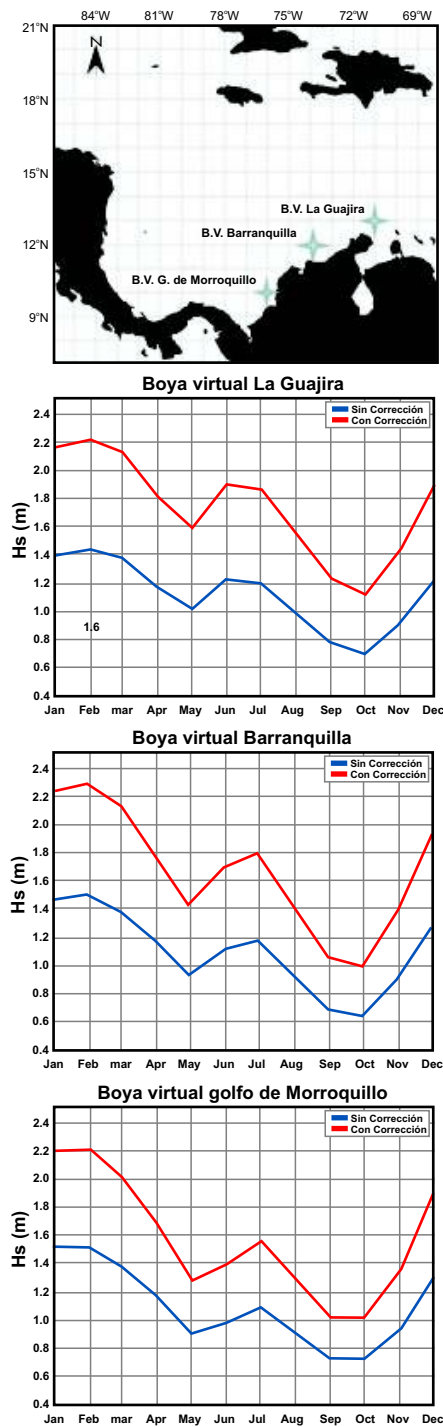


Figura 10. Ciclo anual de la altura de ola significativa (Hs) en las boyas virtuales (datos corregidos).

Las diferencias entre el ciclo anual obtenido a partir de los datos corregidos y sin corregir son significativas (diferencias entre el 50% y 60%) para todas las boyas virtuales. Estos errores pueden traducirse en errores importantes en el diseño de estructuras costeras y en general de todo de tipo de estudios relacionados con el oleaje.

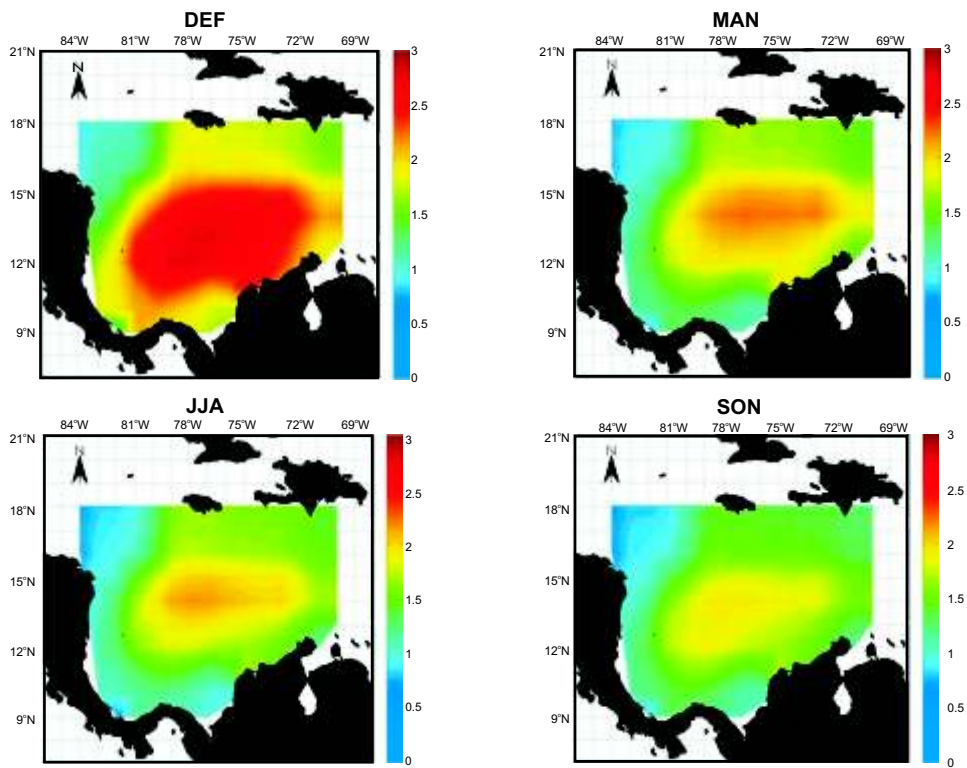
Desde el punto de vista climático, se observa claramente una relación directa de la altura de ola significativa (Hs) con el ciclo anual de los vientos en el Caribe, el cual ha sido reportado por diferentes autores ([44] [45] [46], entre otros), se presenta un comportamiento bimodal de la altura de ola significativa (Hs) con un período más intenso entre (DEF) y un período más débil entre (JJA) cuando los vientos alisios del este se debilitan. A partir del mes de marzo se presenta un primer período de debilitamiento importante en los vientos alisios del este con una asociada disminución en la altura de ola significativa (Hs) que continúa hasta los meses de abril y mayo. El período más débil de altura de ola significativa se presenta entre los meses de (SON) donde los vientos alisios alcanzan valores mínimos en las zonas costeras del Caribe colombiano. Los máximos y mínimos valores de altura de ola significativa se presentan en los meses de febrero y octubre respectivamente para todas las boyas virtuales empleadas. Para analizar la variabilidad espacial asociada con el ciclo anual del oleaje en el Caribe colombiano, en la figura 11a se muestra la altura de ola significativa (Hs) empleando los datos corregidos y en la figura 11b se muestra la magnitud y las direcciones predominantes de los vientos de NCEP/NCAR.

En la figura 11b se observa una banda longitudinal de fuertes vientos zonales, (Inducida por el Sistema Subtropical del Noratlántico –NASH). Los vientos predominantes zonales del Caribe se intensifican a medida que se dirigen hacia el Oeste, formando el denominado Chorro de San Andrés ubicado a una latitud aproximada de entre 14° y 15° de latitud Norte. (*Caribbean Low Level Jet*, [41]).

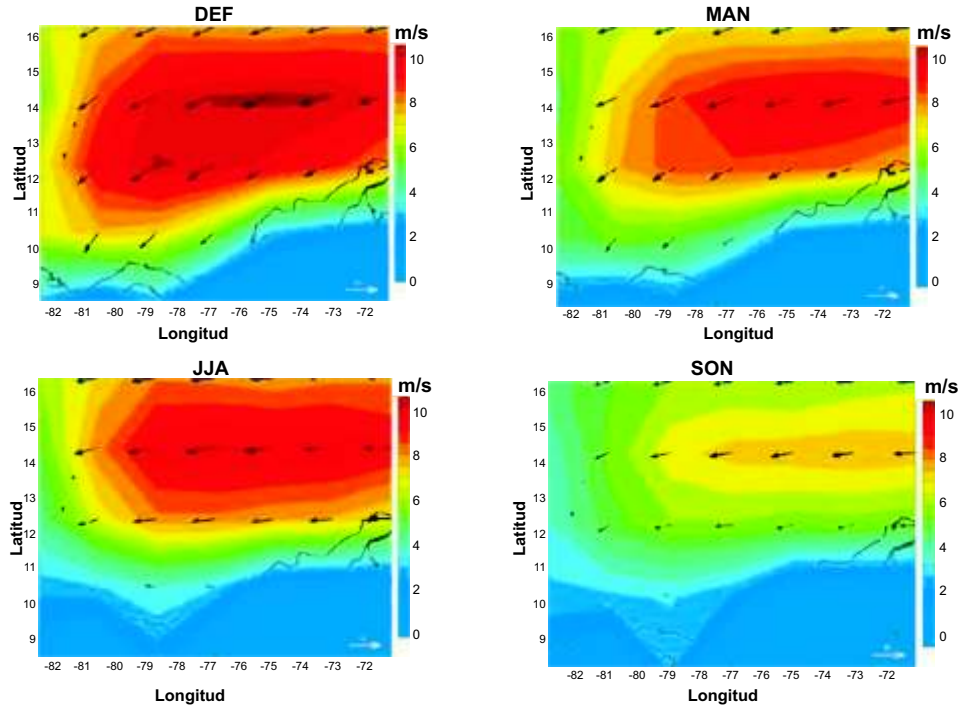
El oleaje responde a la variabilidad espacial y temporal de los vientos predominantes en el Caribe.

Se observa como las mayores alturas de ola significativa (Hs) se concentran en la parte central del Caribe entre los 13° y los 15° latitud norte y disminuye para longitudes entre los 72° y los 86° oeste. Los resultados de esta variabilidad espacial del oleaje, se notan a lo largo de la línea costera y en general en toda la región de estudio. Se observa una zona en cercanías de la costa Caribe colombiana entre las ciudades de Cartagena y Santa Marta (no presente en la distribución espacial de los vientos, figura 11b), donde se presentan las mayores alturas de ola significativa, esta situación se verifica en la figura 10, en la cual las mayores valores para todos los meses del año se obtienen en la boya virtual ubicada en la ciudad de Barranquilla (Entre las ciudades de Cartagena y Santa Marta). Estas altas concentraciones de energía en el sector entre Barranquilla y Santa Marta coincide con lo reportado por la comunidad local y estudios anteriores realizados con otras fuentes de información [1][2].

Se puede ver la variabilidad en la dirección del oleaje, que depende de la dirección predominante de los vientos y la posición de la boya virtual, los menores valores de altura de ola, se presentan en la boya virtual ubicada más al sur en el golfo de Morrosquillo, donde los vientos alisios se debilitan aún más (1.7 m, comparados con 2.6 m para Barranquilla y 2.1 m para la Guajira aproximadamente, para DEF). La disminución de la altura de ola se puede ver también a lo largo del año, debido a las estaciones climáticas tan marcadas en la región, se nota un aumento del oleaje en la época seca (DEF) debido a la intensificación de los vientos y en la época del veranillo de San Juan (junio-julio-agosto, JJA). Los dos períodos mínimos en el ciclo anual entre (MAM) y (SON) están asociados a la época húmeda cuando los vientos no son tan intensos en la región. Como es de esperarse la condición climática de épocas secas y vientos fuertes (DEF y JJA) presentan las condiciones más altas de oleaje, sin ser despreciable en épocas húmedas y vientos débiles (MAM y SON). Incluso en la época de vientos más débiles (SON) esta condición media mantiene alturas de olas del orden de 1.5 m. Es muy



a) Altura de ola significante H_s [m]



b) Velocidad del viento [m/s]

Figura 11. Distribución espacial del ciclo anual de la altura de ola significante H_s con los datos corregidos (a) y la magnitud del viento (b) [47].

importante recordar que esta condición de flujo medio de energía es la que domina la erosión o acumulación de sedimentos todo el año.

En cuanto a la dirección predominante del oleaje la figura 12 muestra la distribución direccional para cada uno de los puntos correspondientes a las boyas virtuales, se observa una componente predominante ENE y NE con un porcentaje alto de ocurrencia de entre 40% y 70% para las boyas de las Guajira y Barranquilla respectivamente. Para la boya virtual ubicada en la zona del golfo de Morrosquillo aproximadamente el 60% de las olas tiene una dirección predominante del oleaje NNE. Sólo un pequeño porcentaje del oleaje (entre 5% y 20%) presenta direcciones NE, esto es debido básicamente a que las direcciones más predominantes de los vientos alisios en las zonas costeras del Caribe colombiano corresponden precisamente a las direcciones ENE o NE. Se observa claramente la influencia entre las direcciones predominantes de los vientos y la ubicación respecto a la línea de costa, por ejemplo la boya virtual de La Guajira presenta un porcentaje importante (40% aproximadamente) de olas del orden de dos metros que provienen del Este y que son generadas por los vientos alisios provenientes de dicha dirección (figura 10b).

Para el diseño de estructuras costeras es fundamental conocer las curvas de distribución de probabilidad acumulada, a partir de éstas es posible obtener las alturas de ola significativa (H_s) asociadas a cierta probabilidad de excedencia o período de retorno Tr . En la figura 13 se muestran dichas curvas para cada uno de los puntos de interés. Se presentan además las alturas de ola significativa para algunos valores de probabilidad de no excedencia. Para una probabilidad de no excedencia del 99% (Tr de 100 años) se tienen valores de altura de ola significativa de 2.39 m (golfo de Morrosquillo), 2.77 m (Barranquilla) y 2.20 m (Guajira) para cada una de las boyas virtuales. Nuevamente los valores más altos asociados a todas las probabilidades de no-excedencia corresponden a la boya virtual de Barranquilla, seguidos del Golfo de Morrosquillo y la Guajira respectivamente.

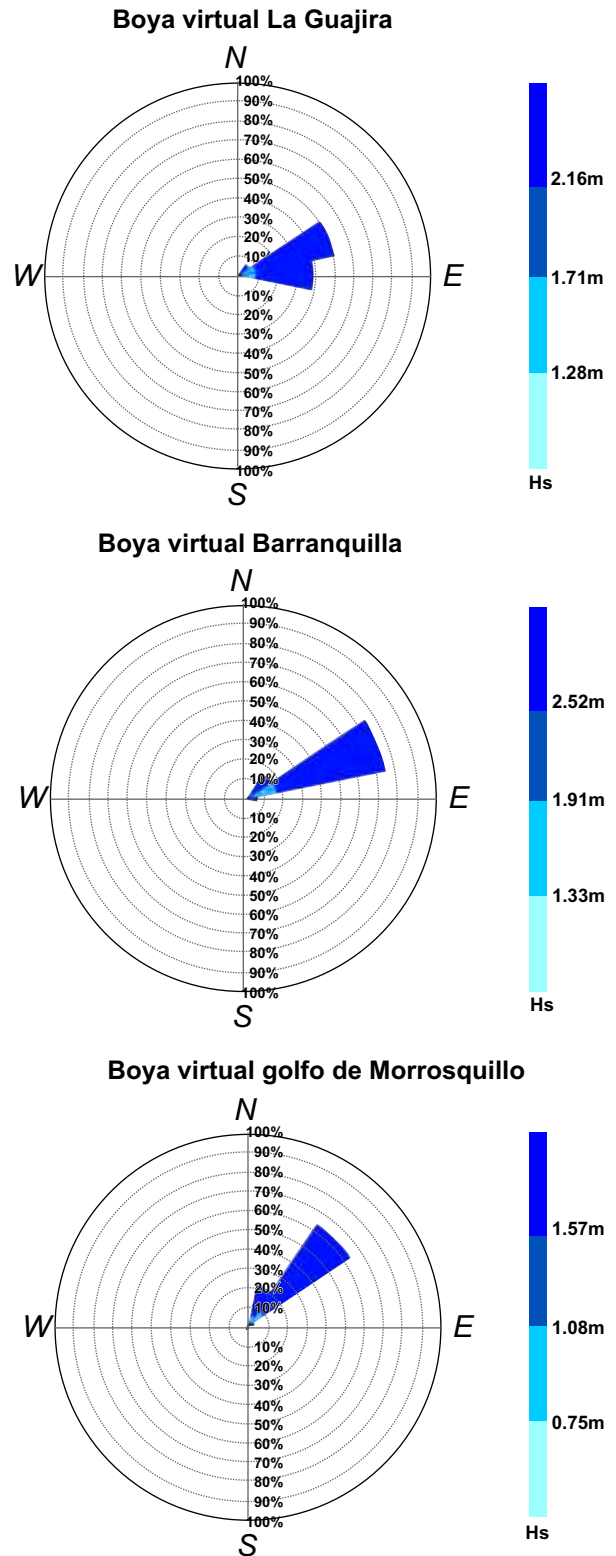


Figura 12. Distribución direccional del oleaje (sea-swell) para las boyas virtuales (datos corregidos).

Conclusiones

Los vientos obtenidos por el proyecto NCEP/NCAR a partir de técnicas de asimilación de datos presentan subestimaciones importantes en regiones tropicales como el Caribe colombiano. Tal como se ha mostrado en el presente trabajo y otros como [48] [24]. Su utilización se traduce en subestimaciones importantes en los datos de altura de ola significativa cuando son empleados como forzadores de los modelos de generación de oleaje. Para mejorar esta situación, se ha propuesto una metodología basada en la teoría del *Coficiente de Correlación Vectorial (CCV)* vectores de correlación que permite corregir los datos numéricos modelados a partir de diferentes fuentes de información.

Los resultados muestran una mejora sustancial de los parámetros del oleaje (Hs) después de la aplicación de la metodología de corrección, lo cual representa una contribución importante en la búsqueda de información histórica confiable de oleaje (para condiciones medias) en el Caribe colombiano.

Se ha observado como la climatología del oleaje responde a la dinámica de los vientos alisios del noreste en el Caribe colombiano presentando un comportamiento bimodal con dos períodos de vientos y oleaje máximos entre DEF y JJA (época seca de baja precipitación) y dos períodos de vientos y oleaje más débil (época húmeda de altas precipitaciones).

La distribución espacial del oleaje muestra una zona central en el Caribe con mayores valores de altura de ola significativa (Hs) asociados al denominado chorro de San Andrés reportado por [41]. Los resultados obtenidos son coherentes con los presentados por otros autores como [49] quienes obtienen alturas de olas significativa del orden de 2.5 metros en la época seca en la región de Bocas de Ceniza en Barranquilla

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a COLCIENCIAS por el apoyo al financiamiento del

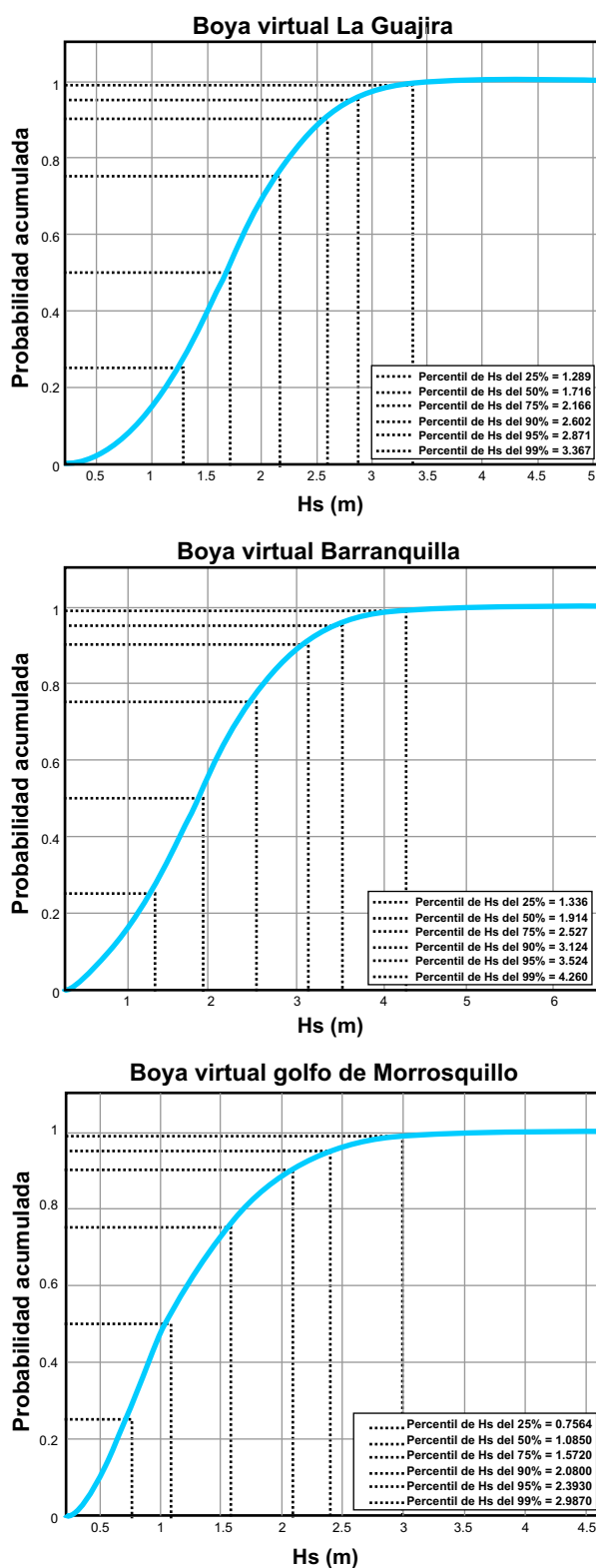


Figura 13. Distribuciones de probabilidad acumulada para las boyas virtuales (datos corregidos).

Programa de investigación de la Gestión Integral del Agua en Colombia, llevado a cabo por el Grupo Red de Cooperación en Investigación sobre el Agua (GRECIA) del cual hace parte el proyecto *Procesos de Interacción Atmósfera-Océano-Tierra en el Caribe colombiano*. Los resultados obtenidos hacen parte las tesis de maestría y doctorado de algunos de sus autores. Al DIME de la Universidad Nacional Sede Medellín por el apoyo del proyecto *Bases para establecer la cota de inundación en la zona costera del Caribe colombiano*. El segundo autor agradece a COLCIENCIAS por la financiación de sus estudios de doctorado realizados en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en el marco de convocatorias para el apoyo de doctorados 2006; así como a la Universidad de Medellín por el financiamiento económico del mismo.

Referencias bibliográficas

- [1] Tejada, C.; M. Gonzáles y L. Otero. Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para aguas jurisdiccionales colombianas. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Sao Pedro, estado Sao Paulo, Brasil. 2004; 11.
- [2] Agudelo P., Restrepo A.F, Molares R., Tejada C.E, Torres R., Osorio A.F. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano, Boletín Científico CIOH. 2006; 23: 33-45.
- [3] Lonin S., Tuchkovenko Y., Lonina I. Utilización del modelo Nedwam para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe. Boletín Científico CIOH. 1996; 17: 37-45.
- [4] Torres R. y Lonin S. Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. Boletín Científico CIOH. 2007a; 25: 8-18.
- [5] Torres R. y Lonin S. Construcción de espectros de oleaje en el Caribe a partir de mediciones satelitales. Boletín Científico CIOH. 2007b; 25: 19-31.
- [6] Komen GJ, Cavaleri L, Donelan M, Hasselmann K, Hasselmann S and Janssen PAEM. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press. 1994.
- [7] Tolman H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note. 2002; 222: 133.
- [8] SWAN. Technical Documentation. Delft University of Technology, Version 40.51A. 2007: 111.
- [9] Cairns, S.; Sterl A. Validation of ocean wind and wave data using triple collocation, J. Geophys. Res. 2003; 108(C3), 3098.
- [10] Cavaleri, L and Sclavo, M. The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean sea. Coastal Engineering. 2006; 53: 613-627.
- [11] Dobson E, Monaldo F, Goldhirsh J and Wilkerson J . Validation of Geosat derived wind speeds and significant wave heights using buoy data, J. Geophys. Res. 1987; 92: 10719–10731.
- [12] Duchossois, G. The ERS-1 mission objectives. ESA Bull. 1991; 65: 16–25.
- [13] Fu, L.L., Christensen, E.J., Yamarone, C.A., Lefebvre, M., Menard, Y., Escudier, P. TOPEX–POSEIDON mission overview. J. Geophys. Res. 1994; 99 (C12): 24369–24381.
- [14] Krogstad, H. E; Barstow, S. F . Satellite wave measurements for coastal engineering applications. Coastal Engineering. 1999; 37: 283-307.
- [15] DelBalzo, D.R., Schultz, J.R. and Earle, M.D. Stochastic time-series simulation of wave parameters using ship observations. Ocean Engineering. 2003; 30: 1417–1432.
- [16] Cartwright, D.E. Committee 1, environmental conditions. Report of the Third International Ship Structures Congress, Det Norske Veritas. 1967.
- [17] Hogben, N., Lumb, F.E. Ocean wave statistics. National Physical Laboratory Report, Her Majesty's Stationery Office, UK. 1967.
- [18] Nordenstrom, N. Methods for predicting long term distributions of wave loads and probability of failure of ships, appendix II, Relationships between visually estimated and theoretical wave heights and periods. Research Report 69-22-S, Det Norske Veritas. 1969.
- [19] Wilkerson, J.C., Earle, M.D. A study of differences between environmental reports by ships in the voluntary observing program and measurements from NOAA buoys. Journal of Geophysical Research. 1990; 95: 3373–3385.
- [20] Gulev, S.K., Hasse, L. North Atlantic wind waves and wind stress fields from voluntary observing ship data. Journal of Physical Oceanography. 1998; 28: 1107–1130.
- [21] Montoya R.D y Osorio A. Los modelos de generación de oleaje de viento: Características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. En: Avances en recursos hidráulicos. 2007; 15: 47-74.
- [22] Tolman, H.L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depth and currents. Journal of Physical Oceanography. 1991; 21: 782–797.

- [23] Hasselmann, K. A criterion for non-linear wave stability. *J. Fluid Mech.* 1967; 30:737-739.
- [24] Caires, S., Steri, A., Bidlot, J.R., Graham, N., and Swail, V. Intercomparison of different wind-wave Reanalysis. *Journal of Climate.* 2004; 17: 1893-1913.
- [25] Montoya R.D., Osorio A., Ortiz J.C, and Ocampo, F. Importance of accurate background winds combined with hurricane wind models: Case study of Hurricane Katrina. *Waves In Shallow Environments (WISE Meeting).* Ensenada, B.C. Mexico. 2009.
- [26] Snyder, R. L., Dobson, F. W., Elliott, J. A. y Long, R.B. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *J. Fluid Mech.* 1981; 102: 1-59.
- [27] Komen, G.J., Hasselmann, S. y Hasselmann, K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *J. Phys. Oceanogr.* 1984; 14: 1271-1285.
- [28] Hasselmann, S., Hasselmann, K.J., Allender H. y Barnett, T.P. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* 1985; 15: 1378-1391.
- [29] Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch. Hydrog. Z. Suppl.* 1973; 12: A8.
- [30] Crosby et al. A proposed definition for vector correlation in geophysics: Theory and application. *Journal of atmospheric and ocean technology.* American meteorological society. 1992; 10: 355-367.
- [31] Detzius, R. Extension of correlations methods and the method of least squares to vectors. *Sitzungsber. Akad. Wiss.* 1916; 125(IIa): 3-20.
- [32] Sverdrup, H. U. On correlation between vectors with applications to meteorological problems. *Meteor. Z.* 1917; 34: 285-291.
- [33] Hotelling, H. Relations between two sets of variables. *Biometrika.* 1936; 28: 321-377.
- [34] Court, A. Wind correlation and regression. AFCRC TN-58-230. Contract AF19(604)-2060. Cooperative Research Foundation. 1958; 16.
- [35] Hooper, J.W. Simultaneous equations and canonical correlation theory. *Econometrica.* 1959; 27:245-256.
- [36] Jupp, P. E.; Mardia, K. V. A general correlation coefficient for a directional data and related regression problems. *Biometrika.* 1980; 67: 163-173.
- [37] Crosby, D.S., L.C. Breaker, and W.H. Gemmill, 1990: A definition for vector de correlation and its application to marine surface winds. National Meteorological Center Office Note. 1990; 365:50.
- [38] Vidal, C. et al. Determinación de los regímenes medios direccionales de altura de ola a partir de datos visuales, *GIOC.* 2001.
- [39] Amador J.A. A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Top Meteor Oceanogr.* 1998; 5(2):1-13.
- [40] Amador J.A., Magana V. Dynamics of the low level jet over the Caribbean Sea. Preprints, the 23rd conference on hurricanes and tropical meteorology, American Meteorological Society. 1999; 868-869.
- [41] Poveda G, Mesa O.J. The low level westerly jet (Choco jet) and two other jets in Colombia: climatology and variability during ENSO phases (in Spanish). *Rev Academia Colomb Cienc.* 1999; 23(89):517-528.
- [42] Poveda G., Waylen P.R., Pulwarty R.S. Annual and interannual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* 2006; 234:3-27.
- [43] Bernal G., Poveda G., Roldán P. & Andrade C. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2006; 30 (115): 195-208.
- [44] Wang, C. Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *Clim Dyn* 2007; 29:411-422.
- [45] Poveda, G, Velez J.I, Mesa O.J, Hoyos C.D, Mejia J.F, Barco O.J y Correa P.L. Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos, *meteorología colombiana.* 2002b; 6:121-130.
- [46] Gil, M.M, y Quiceno, N. La influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia, Trabajo Dirigido de Grados, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1997.
- [47] Ruiz, M. y G. Bernal. (En prep). Variabilidad estacional del viento sobre la Cuenca Colombia, mar Caribe. *Revista Avances en Recursos Hidráulicos.*

[48] Montoya, R.D, Osorio, A.F y Mesa, J.C. Influencia de las parametrizaciones empleadas para los términos fuentesumidero de energía en la modelación del oleaje en el Caribe colombiano. XIII Seminario Nacional De Ciencia y Tecnología del Mar SENALMAR 2008.

[49] Giraldo, L, y Lonin S. Cálculo del oleaje y el transporte de sedimentos en la costa Caribe colombiana. Boletín Científico del CIOH. 1997; 18, 39 -49.