

Modelización operacional de oleaje en el Pacífico colombiano

Operational modeling of waves in the Colombian Pacific

Fecha de recepción: 2014-05-05 / Fecha de aceptación: 2014-07-04

Ana Lucía Caicedo Laurido¹, Sadid Latandret Solana², Jesús Portilla Yandún³

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Área de Oceanografía Operacional. Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Colombia. Tel: +57 (2) 727 26 37. Correo electrónico: acaicedo@dimar.mil.co¹, slatandret@dimar.mil.co²

Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Av. Diego de Robles y Vía Interoceánica Quito-Ecuador. Correo electrónico: jportilla@gmail.com³

Caicedo AL, Latandret S, Portilla J. Modelización operacional de oleaje en el Pacífico colombiano. Bol. Cient. CIOH 2014;32:71-84.

RESUMEN

El presente trabajo describe la implementación operacional del modelo numérico de oleaje WaveWatchIII® en el Pacífico colombiano; el mismo que es operado actualmente por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico y se encuentra en etapa de verificación. WaveWatchIII® es un modelo "state of the art" de tercera generación, desarrollado por la *National Ocean and Atmospheric Administration*. Dado a que en la zona de estudio el oleaje está dominado por oleaje libre, proveniente de los hemisferios norte y sur, el dominio computacional abarca todo el océano Pacífico. Las condiciones en aguas próximas a la costa fueron obtenidas a través de dos mallados anidados sucesivos, a nivel regional y local, con resoluciones progresivamente más finas. La información batimétrica empleada corresponde a la base de datos satelitales de ETOPO2. El forzamiento atmosférico, así como también las condiciones de cobertura de hielo en los polos correspondieron al *Global Forecast System*. Para la verificación del modelo se cuenta con observaciones de la red de monitoreo de la Dirección General Marítima de Colombia, así como también con observaciones satelitales y datos modelados de otros centros de predicción como *National Ocean and Atmospheric Administration* y el Centro Europeo de Predicción del Clima a Mediano Plazo. Actualmente, el modelo WaveWatchIII se ejecuta de forma operacional en el CCCP para generar el pronóstico de oleaje en el Pacífico colombiano. El horizonte de predicción es de ocho días y se actualiza cada día utilizando el pronóstico meteorológico del *Global Forecast System* más reciente.

PALABRAS CLAVES: WavewatchIII, oleaje, swell, predicción operacional.

ABSTRACT

In this work the operational implementation of the wave model WaveWatchIII® in the Colombian Pacific is presented. This system is currently operated by Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, and it is in verification process. WaveWatchIII® is a state of the art, third generation numerical wave model developed by the National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA). Since the wave conditions in the area of interest are dominated by swell originated both in the Northern and Southern hemispheres, the computational domain cover the whole Pacific Ocean. Wave conditions in the coastal zone are obtained through two nested grids refinements. Bathymetric information corresponds to the ETOPO2 mission. The atmospheric forcing and the ice coverage conditions correspond to the Global Forecast System. For model verification, buoy data from the monitoring network of the Dirección General Marítima de Colombia are available. In addition satellite observations and model results from other centers (e.g., NOAA, ECMWF) will be used. The forecast has a time horizon of 8 days and it is run and updated once a day using the most recent Global Forecast System meteorological forecast.

KEYWORDS: WaveWatchIII, waves, swell, operational forecasting.

INTRODUCCIÓN

Marco general y relevancia

El oleaje es un fenómeno al que toda actividad marina se encuentra sometida y juega un papel muy importante en otros procesos como: el intercambio de gases, de calor y momento entre la atmósfera y el océano, así como también en el intercambio de energía con las corrientes marinas, la interacción con el fondo marino y el transporte de sedimentos [1-2].

Desde el punto de vista socioeconómico, se recaba la relevancia del océano en el desempeño humano cotidiano. Por ejemplo, los recursos pesqueros constituyen un componente muy importante en la nutrición [3] y la mayoría de los bienes que se utilizan a diario son transportados por vía marítima [4]. En ingeniería, el conocimiento de los procesos oceánicos es fundamental para la construcción de estructuras costeras y el desarrollo de operaciones marítimas, como tendido de cables submarinos, operaciones de dragado, entre muchas otras aplicaciones [5-6]. En actividades como la navegación y para el desarrollo de las operaciones militares, el conocimiento adecuado del estado del mar es crucial [7]. Teniendo en cuenta el calentamiento global del planeta y el incremento del nivel del mar [8] recientes avances tecnológicos están siendo dirigidos para aprovechar la energía renovable que proviene de las olas [9, 10]. Además, en las últimas décadas el turismo se ha convertido en un recurso importante en las economías nacionales, por lo que las actividades de placer y recreación son también de consideración [11]. Dada esta relevancia, el objetivo del presente trabajo es la implementación de herramientas que permitan cuantificar y pronosticar las variables principales que describen el oleaje, tales como la altura de las olas, su periodo, longitud, dirección, entre otras.

El oleaje es un fenómeno físico de comportamiento altamente aleatorio, dominado por las condiciones atmosféricas. En la actualidad, el conocimiento avanzado de los fenómenos físicos que dominan los procesos de generación, transporte y transformación del oleaje, así como también el desarrollo tecnológico de sistemas computacionales de alto rendimiento han contribuido notablemente al desarrollo de modelos numéricos que permiten su predicción con una precisión considerable. Los primeros intentos por pronosticar el oleaje se basaron principalmente en relaciones empíricas [12, 13,

14], pero las herramientas actuales incluyen formulaciones físicas más avanzadas útiles para éste.

Uno de los principales avances para la representación matemática de este proceso aleatorio, fue la introducción del concepto del espectro del oleaje [15]. Según este principio, la compleja superficie del océano se representa por una suma infinita de componentes armónicos sinusoidales en el contexto de series de Fourier. Por otro lado, avances importantes en la descripción de la transferencia de momento de la atmósfera al océano [16, 17] y la descripción de las interacciones resonantes entre diferentes trenes de olas [18], han dado origen a los así llamados modelos de oleaje de tercera generación, los cuales incluyen el cálculo de la transferencia de momento por el viento, las interacciones resonantes entre componentes de oleaje y la disipación de energía. Además, la evolución de la cola de alta frecuencia del espectro se computa libre de relaciones paramétricas [19, 20, 21, 22, 23].

El modelo WaveWatchIII [24] es uno de estos modelos de tercera generación y es continuamente desarrollado por el departamento *Marine Modeling and Analysis Branch* (MMAB, por sus siglas en inglés) de la *National Ocean and Atmospheric Administration* (NOAA, por sus siglas en inglés), además de un gran grupo de colaboradores e instituciones internacionales [25]. WaveWatchIII es un modelo de libre distribución. Estas características han sido la base para adoptar esta herramienta para el desarrollo de la presente aplicación. La versión pública 3.14_14 es la utilizada en la presente implementación.

En Colombia el estudio del oleaje se ha basado principalmente en el análisis a través de ecuaciones empíricas y datos de oleaje visual. Tal es el caso de la determinación de regímenes de oleaje para el Pacífico colombiano, empleando la base de datos *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (Icoads, por sus siglas en inglés) [26].

Antecedentes

En 2008 la Autoridad Marítima Nacional de Colombia realizó la implementación del Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (Smpomm) [27], donde el componente de oleaje está constituido por una red de boyas de oleaje direccional Triaxys,

compuesta por ocho boyas distribuidas en las localidades de Barranquilla, Puerto Bolívar, Turbo y la Isla de Providencia —Caribe colombiano— y en las localidades de Buenaventura, Tumaco, Solano y la isla de Gorgona —Pacífico colombiano—. Estas boyas registran variables del oleaje tales como: altura significativa, periodo y dirección promedio, además del espectro direccional que es la variable más completa. En el campo de la generación de sistemas de predicción de parámetros meteomarineros el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) creó el Sistema de Pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos (SPOA) —2007— [28], concebido como una herramienta para la seguridad marítima integral del país.

En 2013 Dimar, a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), dispuso la implementación de un sistema de pronóstico de oleaje para el Pacífico colombiano, como aporte a la seguridad en la navegación y la conservación de la vida humana en el mar en esta jurisdicción. Los resultados de esta implementación se describen en el presente artículo.

Objetivos y alcance

El objetivo general es la implementación del sistema de pronóstico de oleaje en el Pacífico colombiano, que permitan obtener variables de oleaje relevantes para el desarrollo de actividades marinas y costeras. Para lograr este objetivo, el proyecto se ha organizado en diferentes etapas a saber:

- Implementación computacional del modelo WaveWatchIII en el CCCP.
- Análisis de las observaciones in situ obtenidas por Dimar.
- Climatología de oleaje del Pacífico colombiano.
- Verificación de los resultados del modelo de oleaje, a través de la comparación con observaciones y climatología.
- Desarrollo del sistema de predicción para la zona costera.
- Difusión de los productos a la comunidad.

El presente artículo cubre la primera fase de este proyecto. El análisis de los datos ha sido entretanto ya desarrollado y se encuentra documentado en [29]. La climatología de oleaje, por su parte, ha sido realizada y documentada en [30]. Al momento el proyecto se encuentra en la etapa de verificación, cuyos resultados serán

publicados oportunamente. Una vez se cuente con el modelo verificado, el proyecto se enfocará en las condiciones de oleaje en la zona costera y los productos serán difundidos a la comunidad.

Esquema del artículo

Este trabajo describe la implementación operacional del modelo de oleaje WaveWatchIII en el Pacífico colombiano. Inicialmente se realiza una breve descripción del área de estudio, haciendo énfasis en el comportamiento del viento y el oleaje en la zona. En la metodología se indican las principales características del modelo numérico, los datos empleados para el forzamiento del mismo y detalles de la implementación; entre ellos la configuración de las mallas de cálculo, condiciones iniciales, intervalos de tiempo de ejecución, sistema operacional y salidas obtenidas en el proceso de simulación. Adicionalmente se presentan los resultados obtenidos, discusión y las conclusiones más relevantes en esta etapa.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio es la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC). Ubicada entre las latitudes 01°30' y 07°10'N y longitudes 77°40' y 82°00'W (Fig. 1) La región costera cuenta aproximadamente con 80000 km² de superficie y está situada en el extremo occidental del territorio colombiano; delimitada al norte con la hoya del río Juradó (7°28'N); al sur con el río Guaitara, afluente del río Patía (0°14'N); al este con el nacimiento del río San Juan (75°51'W), y al oeste con la desembocadura del río Mira, en Cabo Manglares (79°02'W) [31].

Condiciones meteorológicas y de oleaje

Los promedios anuales de los campos de vientos en la mayoría de las regiones de la CPC manifiestan una fuerte influencia de vientos del suroeste, con un rango de velocidades que oscilan entre 1 y 5 m/s, siendo la zona sur y el centro de la CPC donde se detectan las observaciones de superior velocidad [29] [33].

En los primeros meses del año, a causa de la influencia del chorro de viento de Panamá, ingresan vientos a la CPC con magnitudes entre 5 a 9 m/s predominantes del noroeste, norte y noreste. En este semestre se observa un desplazamiento de un cinturón de bajas

velocidades con valores en el rango de 0 a 4 m/s, a causa de la regulación que provoca el chorro de viento de Panamá sobre la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en la CPC [33].

En el segundo semestre del año se presenta un incremento de los vientos Alisios provenientes del sur y de la temperatura superficial del mar (TSM) en la CPC, provocados directamente por la atenuación del chorro de Panamá; produciendo con ello una mayor presencia del chorro en el Chocó de la CPC. Para este periodo se presentan velocidades entre 5 y 9 m/s con predominio de vientos del suroeste [33].

De acuerdo con el análisis de los datos de las boyas y los espectros del modelo del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) [34], el oleaje predominante en la CPC proviene del suroeste [29]. Este oleaje está compuesto de trenes de olas de amplio periodo y moderadas alturas procedentes del océano abierto, que incrementan su altura sobre fondos someros y se refractan perdiendo su energía y cambiando la dirección [30]. Las alturas medias de oleaje varían entre 0.5 y 1.5 m, con periodos que oscilan entre 8 y 10 s [35]. Los datos analizados [34] indican también la presencia de oleaje libre o de fondo (*swell*), proveniente del noroeste, especialmente en los meses del invierno Boreal [36].

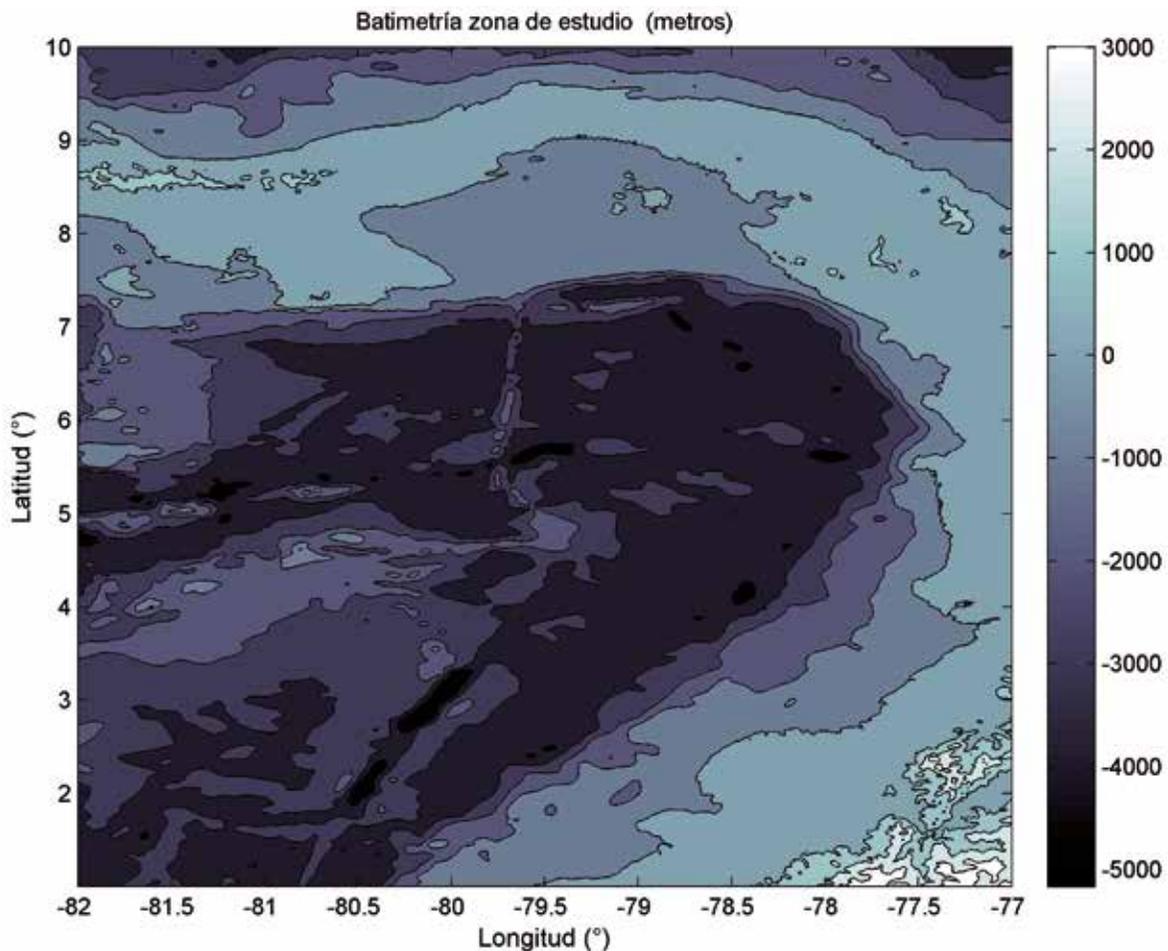


Figura 1. Área de estudio correspondiente al Pacífico colombiano y rangos batimétricos de la zona. (Fuente: [32]).

METODOLOGÍA

El sistema de predicción de oleaje consta de varios componentes, entre los cuales está principalmente el modelo de oleaje propiamente dicho, que en este caso es WaveWatchIII. El modelo requiere de varios insumos como son batimetría, datos de viento y cobertura de hielo en las zonas polares. Por otro lado, la ejecución operacional automática del sistema requiere de varios procedimientos computacionales que han sido la parte central de este desarrollo. Estos procedimientos incluyen rutinas de descarga de datos, procesamiento y análisis, suministro al modelo, ejecución del modelo como tal y procesamiento de las salidas para su difusión.

Modelo numérico

En el desarrollo de la presente implementación se empleó el modelo de oleaje

de tercera generación WaveWatchIII [37]. Esta generación de modelo a diferencia de las anteriores permite conocer la evolución en términos de espacio y tiempo de los diferentes parámetros de oleaje, entre ellos la altura de ola significativa, y el espectro de frecuencias, sin imponer la forma del espectro [38] [39].

WaveWatchIII resuelve la ecuación de balance de acción en los dominios espectral y espacial, expresada usualmente en coordenadas esféricas. 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 menores que las escalas de variación de una única onda [40].

Los términos fuente/sumidero en aguas profundas incluyen procesos no lineales que no se tienen en cuenta en la ecuación de advección (Ecu. 1).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos\theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S_{TOT}}{\sigma} \quad [1]$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos\theta + U_\phi}{R} \quad [2]$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin\theta + U_\lambda}{R \cos\phi} \quad [3]$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan\phi \cos\theta}{R} \quad [4]$$

Donde,

N es la densidad espectral de acción del oleaje

R es el radio de la Tierra

$C_g = \partial w / \partial k$ es la celeridad de propagación de grupo

λ y ϕ son la longitud y la latitud, respectivamente

U_ϕ y U_λ son las componentes zonal y meridional de las corrientes

El principal proceso fuente es la transferencia de momento desde la atmósfera, S_{in} . El término S_{nl} incluye la redistribución de energía entre los diferentes componentes espectrales debido a las interacciones de onda no lineales. El término S_{wc} representa el rompimiento de olas en aguas profundas conocidas como *white-capping* [41].

$$S_{TOT} = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} \quad [5]$$

Insumos del modelo

Batimetría

La información batimétrica fue tomada de la base de datos de ETOPO2 [42] que tiene una resolución espacial de dos minutos geográficos.

Viento

Los datos de viento provienen del modelo *Global Forecast System* (GFS), de NOAA [43] y están constituidos por las componentes zonales y meridionales del viento a la altura de 10 m, con una resolución espacial de 0.5 grados geográficos [44].

Concentración de hielo en la zona polar

Esta capa de obstrucción es también suministrada diariamente por el modelo GFS a una resolución espacial de 0.5 grados geográficos [45].

Debido a las características del clima de oleaje en el Pacífico colombiano proveniente de lugares muy remotos que incluyen la región Antártica [28], la concentración de hielo en esa zona debe tenerse en consideración debido a la disipación de la energía que produce a lo largo de la trayectoria del oleaje hasta su llegada a la zona de estudio [46].

Zonas de bloqueo

Adicionalmente, en razón a que el océano Pacífico está cubierto de varias islas de tamaño inferior a la resolución del modelo, en la configuración se incluyó la capa de obstrucciones por islas que implican un porcentaje de bloqueo de la energía del oleaje. Se destacan en el área de estudio la presencia del archipiélago de Galápagos en Ecuador y la isla Malpelo en Colombia (Fig. 2).

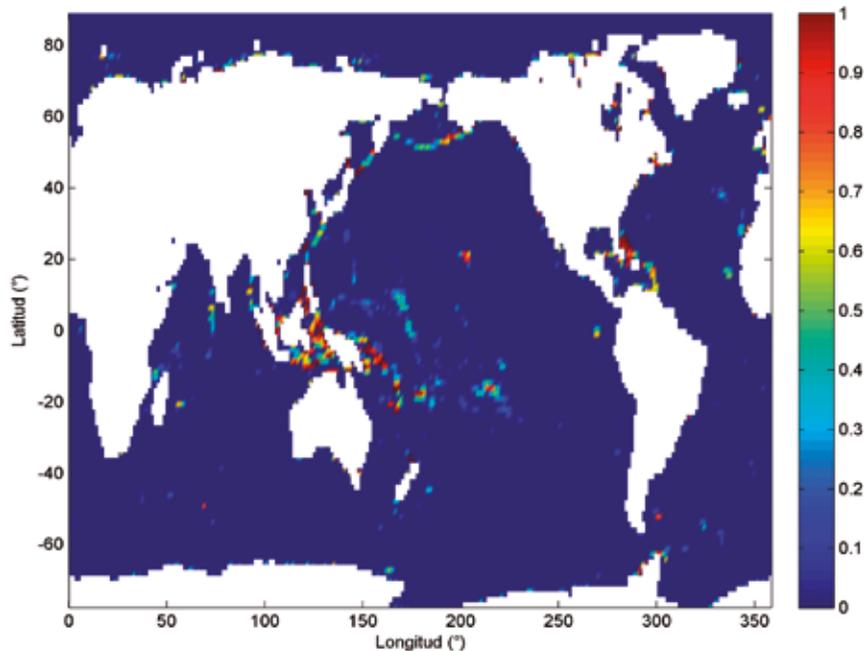


Figura 2. Malla de obstrucción por islas empleada en la configuración del modelo de oleaje de aguas profundas para el Pacífico colombiano.

Implementación del sistema operacional

Mallas computacionales

La implementación operacional del modelo WaveWatchIII en el Pacífico colombiano se realizó a partir de la configuración de tres mallas anidadas; la primera de ellas abarca todo el océano Pacífico con una resolución espacial de

un grado geográfico (60/60°), la segunda es una malla regional que cubre todo el Pacífico colombiano con una resolución espacial de 10 minutos geográficos (10/60°), y la tercera malla cubre toda la costa del Pacífico colombiano hasta una distancia de 100 mn, con una resolución de 2 minutos geográficos (2/60°) (Fig. 3 y Tabla I). La generación de las mallas fue realizada usando el software auxiliar GRIDGEN [47] e información batimétrica de ETOPO 2.

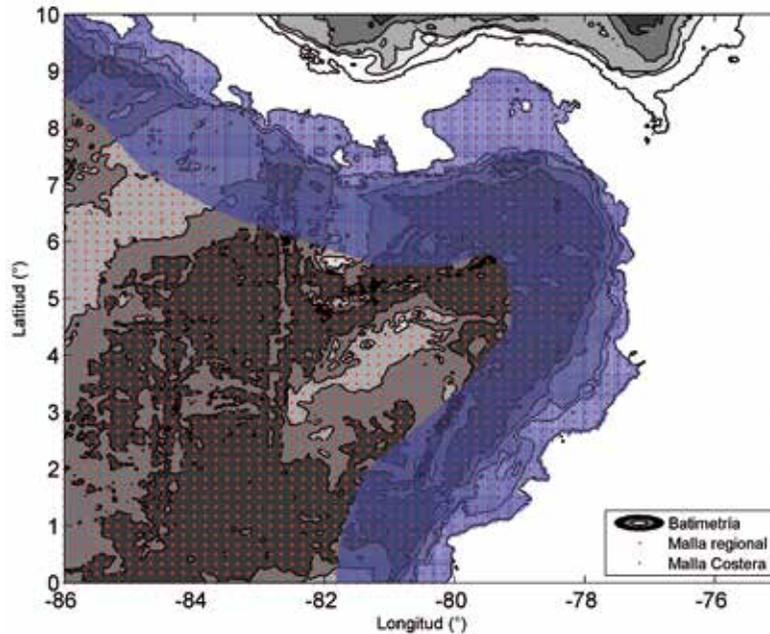


Figura 3. Dominio y mallas de cálculo empleadas en la implementación operacional del modelo de oleaje en el Pacífico colombiano.

Tabla I. Características generales de las mallas empleadas en la simulación.

Característica	Global	Regional	Costera
Resolución espacial	60/60°	10/60°	2/60°
Coordenadas			
Norte	89.5°	10°	10°
Sur	-77.5°	0°	0°
Este	0°	-287°	-287°
Oeste	359°	-274°	-274°
Computación			
Intervalo de tiempo de advención	3600 s	1800 s	450 s
Tamaño de grilla	360x168	79x61	391x361

Intervalos de tiempo de ejecución

Uno de los aspectos de relevancia dentro de los procesos de la modelización numérica es la definición de los pasos de tiempo que satisfagan el criterio de CFL (Courant-Friedrichs-Levy) [37]. Éste establece que la mayor velocidad de las olas en el modelo debe ser menor o igual al cociente entre el espaciamiento de las mallas y el tiempo de residencia en el volumen finito. Por esta razón cada una de las mallas de cálculo empleadas en la presente implementación cuenta con un paso de tiempo especialmente definido de acuerdo a esta consideración.

Condiciones iniciales

La ejecución inicial del modelo fue establecida bajo condiciones de calma de la superficie del mar. Por esta razón se empleó un periodo de calentamiento de quince días que permitiera la completa propagación del oleaje libre hasta la zona de estudio. Este tiempo de calentamiento es sólo relevante en la corrida inicial, ya que en las condiciones normales de operación, al término de un día de pronóstico, el modelo archiva las condiciones de oleaje para cada punto, las mismas que se utilizan como condiciones iniciales para la simulación del día siguiente.

Salidas del modelo

La configuración realizada permite predecir la altura significativa de ola, periodo promedio, periodo pico, y dirección del oleaje a intervalos de cada tres horas, generando un total de ocho días de pronóstico representados en 65 salidas.

Las salidas del modelo son graficadas empleando la herramienta para la manipulación y visualización de datos científicos *Grid Analysis and Display System* (GrADS) [48]. Las salidas obtenidas como resultado de la implementación del modelo se muestran en las figuras 5 y 6. En esta

última se indican series de la altura significativa del oleaje a profundidades intermedias para las localidades de Buenaventura, Tumaco, Gorgona y Bahía Solano -Pacífico colombiano-, obteniendo con ello una aproximación del comportamiento de este parámetro en estos puntos de forma más específica.

Finalmente, los productos operacionales generados mediante esta implementación son distribuidos de manera automática a los usuarios finales.

Sistema operacional

El sistema operacional consta de los siguientes elementos:

- Inicio del sistema: activa el sistema computacional por medio de tareas programadas a través del programador de tareas (crontab) de Linux.
- Subrutina de descarga de datos de viento y hielo, y procesamiento: descarga los datos de viento y hielo del GFS, decodifica los archivos y los escribe en formato del modelo.
- Subrutina de ejecución del modelo: ejecuta el modelo haciendo varias verificaciones de archivos y condiciones de arranque.
- Subrutinas de post-procesamiento: procesa los archivos de salida, extrayendo las variables relevantes y ejecuta rutinas para generación de las gráficas.
- Subrutina de distribución (web, e-mail): envía automáticamente la información generada vía correo y servidor web.

Este sistema se describe gráficamente en la Figura 4 y constituye el resultado principal de esta etapa del proyecto.

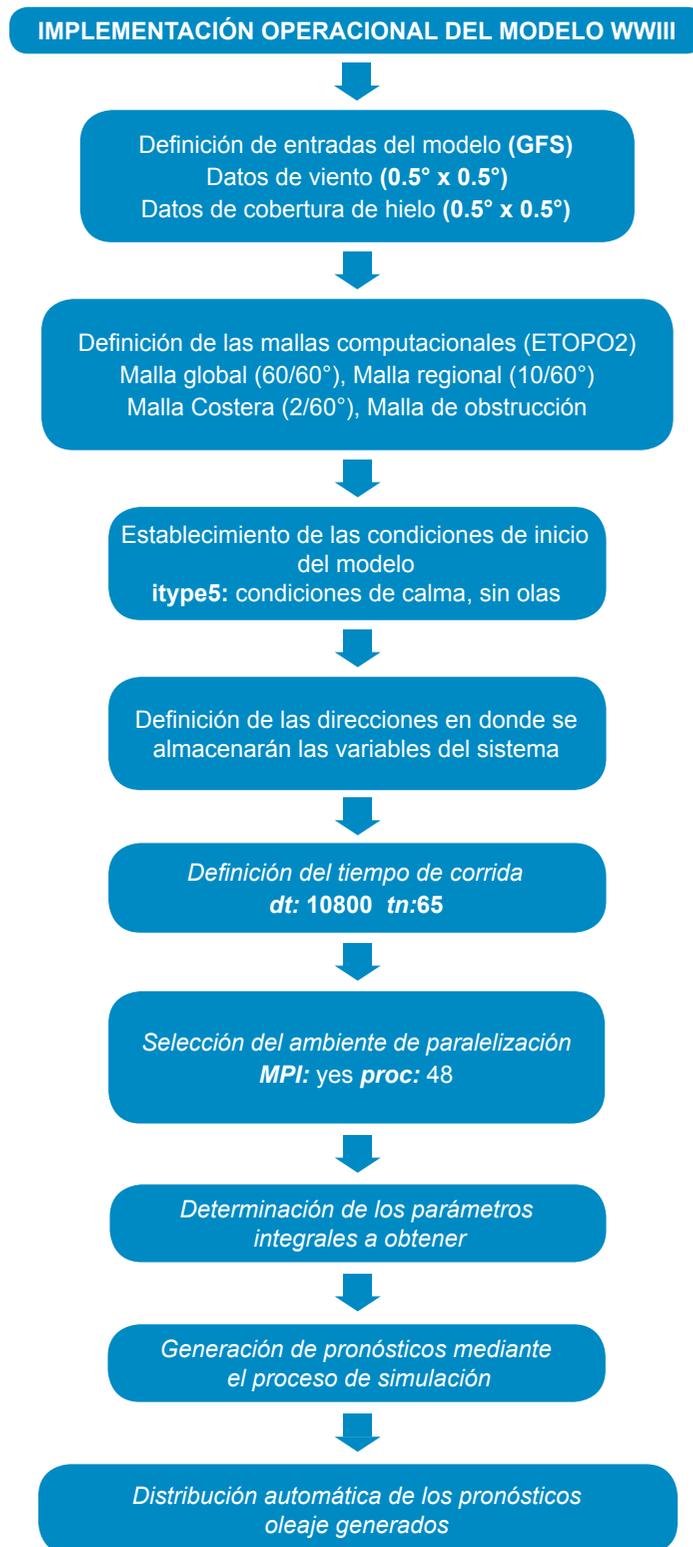


Figura 4. Algoritmo de ejecución automático del sistema operacional de oleaje.

Datos de verificación

Para la verificación del modelo se está haciendo un *hindcast* por un periodo de tres años (2011-2013). Para este proceso se cuenta con datos de altura significativa de la ola, periodo, dirección promedio y espectro direccional, obtenidos gracias a las observaciones *in situ* de la red de monitoreo de Dimar [27] dispuestas a lo largo del Pacífico colombiano en las localidades de Buenaventura, Tumaco, Gorgona y Solano. Adicionalmente, para el desarrollo de esta verificación se dispone del modelo WAM del ECMWF [34] y datos de altimetría satelital [49].

RESULTADOS

De acuerdo con la organización del proyecto, el resultado principal de esta etapa fue la implementación del sistema de pronóstico, el mismo que se encuentra operando actualmente en el CCCP.

El modelo genera variables de oleaje como altura significativa (en metros) y dirección (en grados), que son producidas diariamente en un horizonte de pronóstico de ocho días. Un ejemplo de estas salidas se presenta en la Figura 5. Estas variables se presentan en la web como animaciones que muestran la evolución del oleaje en todo el periodo de pronóstico.

Para los sitios en los cuales se tienen datos de boyas (i.e., Tumaco, Gorgona, Buenaventura y Solano) se obtienen también variables de oleaje en formato de series de tiempo, como las que se presenta en la Figura 6.

Dado a que el modelo de oleaje WWIII resuelve las ecuaciones para los fenómenos físicos relevantes para el oleaje, los resultados iniciales son en general bastante consistentes con las observaciones [36, 50, 51]. La comparación y verificación formal de estas variables se encuentra actualmente en proceso de desarrollo y será documentada oportunamente.

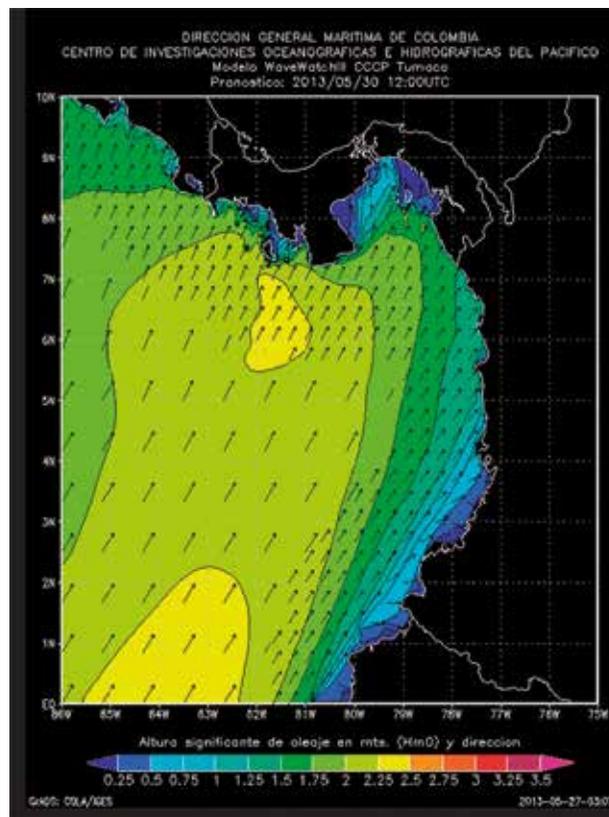


Figura 5. Pronóstico de la altura significativa de oleaje (H_s) en metros y dirección del oleaje (D_p) en grados para el Pacífico colombiano.

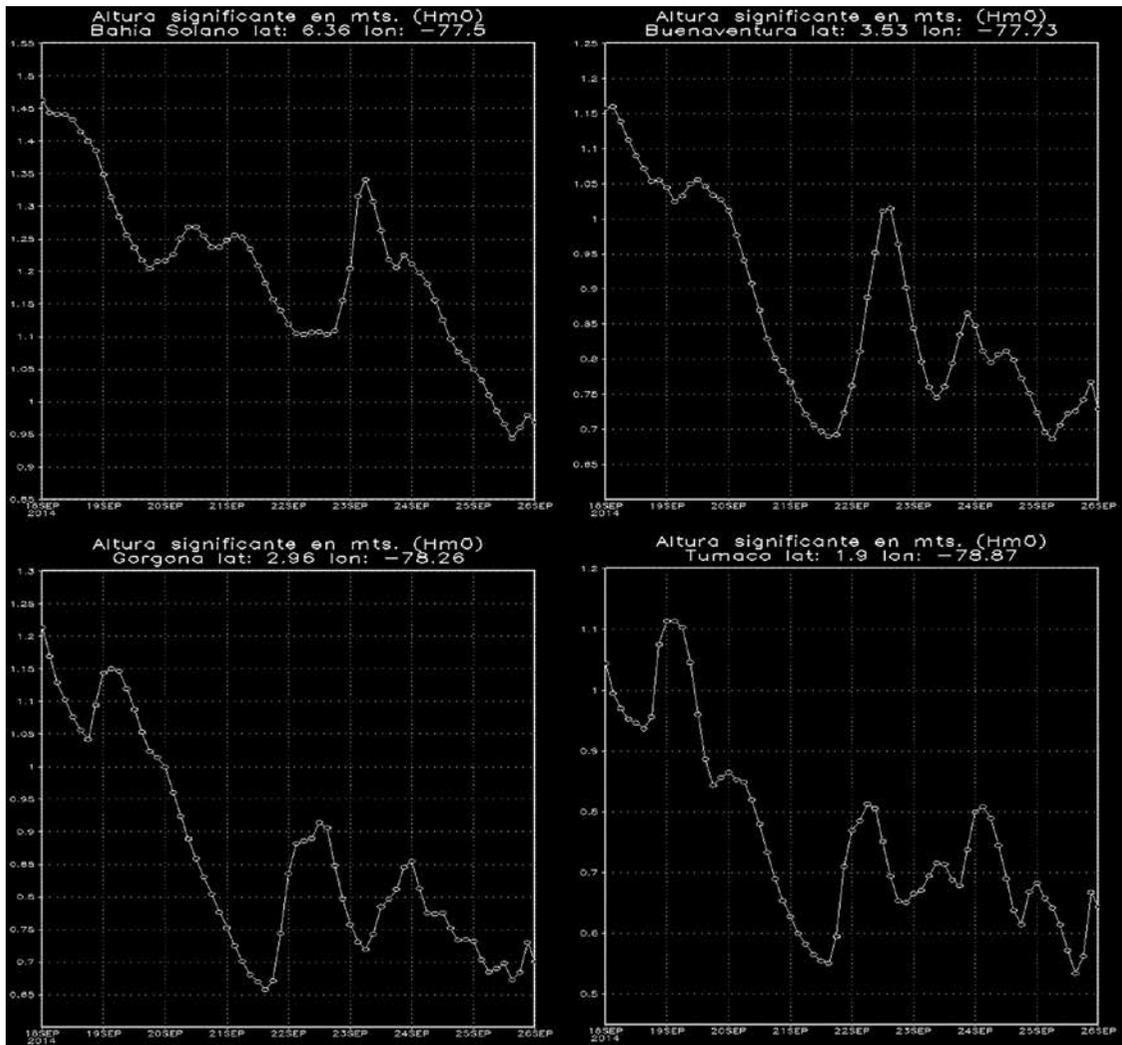


Figura 6. Pronósticos de altura significativa del oleaje (H_s) en cuatro puntos del Pacífico colombiano. Bahía Solano, Buenaventura, Gorgona y Tumaco.

DISCUSIÓN

Como se ha indicado, el presente proyecto abarca algunos componentes desarrollados secuencialmente. La etapa documentada en este artículo tiene por objeto crear el contexto técnico para el desarrollo y documentación de los trabajos de las otras etapas.

CONCLUSIONES

- Dado a que el oleaje en la zona de estudio está dominado por la presencia de oleaje libre originado en zonas muy remotas de los hemisferios Norte y Sur, la selección del dominio espacial de simulación debe abarcar todo el Pacífico, incluyendo además las condiciones de concentración de hielo en la región Antártica, que desempeñan un rol importante como condiciones de contorno. No tomar en cuenta estas condiciones de oleaje en la zona daría como resultado una pobre representación del oleaje libre, que es la condición predominante.
- Dado a que el dominio computacional es bastante extenso (cubre todo el Pacífico), ha

sido necesario diseñar un sistema eficiente por medio de anidamiento sucesivo de mallas con refinamiento sucesivo, con baja resolución en mar abierto y mayor resolución (~3.7 km) en la franja costera donde se encuentran las zonas de interés. Por medio de este esquema se pueden conseguir tiempos de simulación aceptables y condiciones de contorno apropiadas.

- El presente trabajo es parte del sistema de predicción y monitoreo de oleaje del Pacífico colombiano a cargo de Dimar-CCCP. Los resultados del pronóstico son actualmente entregados a las instancias competentes y servirán a futuro como herramienta para el manejo costero y la emisión de alertas. Al momento el sistema se encuentra en fase de verificación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su profundo agradecimiento a la Dirección General Marítima Colombiana, la cual a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (Dimar), contribuyó institucional, académica y logísticamente en el desarrollo del presente estudio.

Se hace un reconocimiento especial a la Universidad San Francisco de Quito (USFC) en Ecuador, por los conocimientos suministrados a los investigadores en el tema de estudio.

LITERATURA CITADA

- [1] Chuan J.H, Fangli Q. Wave-turbulence interaction and its induced mixing in the upper ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012) Volume 115, Issue C4, April 2010.
- [2] Alexander B. *Breaking and Dissipation of Ocean Surface Waves*. Cambridge University Press. 2011; ISBN 1139502727, 9781139502726.
- [3] FAO. Fisheries and Aquaculture Department has published the *Global Aquaculture Production Statistics for the year 2011* [On-line]. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/FI/news/GlobalAquacultureProductionStatistics2011.pdf> [Consultado en mayo 10 de 2013].
- [4] UNCTAD/RMT. *Review of Maritime Transport 2012* [On-line]. Disponible en: http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2012_en.pdf [Consultado en diciembre 12 de 2013].
- [5] Goda Y. *Random Seas and Design of Maritime Structures* (3rd Edition) World Scientific. 2010; ISBN 9814282405, 9789814282406.
- [6] Robert G, Dean, Robert A. Dalrymple. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Publishing Company Incorporated; 1991. ISBN 9810204213, 97898102042111991.
- [7] Don DeYoung. *Naval Research Laboratory, Fulfilling Roosevelt's Vision*. 2006; NRL/MR/1001-06-8951.
- [8] IPCC. *The Fifth Assessment Report (AR5)* [On-line]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pdf/ar5/ar5-outline-compilation.pdf>. [Consultado en mayo 12 de 2013].
- [9] Cruz J. *Ocean Wave Energy-Current Status and Future Prospects*. Springer. 2008; ISBN 3-540-74894-6.
- [10] Portilla J, Sosa J, Cavaleri L. *Wave energy resources: Wave climate and exploitation Renewable Energy* [On-line]. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113001419> [Consultado en noviembre 2012].
- [11] UNWTO. *The World Tourism Barometer*. Disponible en: http://dtxtq4w60xqpw.cloudfront.net/sites/all/files/pdf/unwto_barom13_01_jan_excerpt_0.pdf [Consultado en enero 10 de 2013].
- [12] Sverdrup H, Munk W. *Wind sea and swell: theory of relations for forecasting*. Publication 601, U.S. Navy. Hydrographic Office; 1947.
- [13] Gelci R, Cazalé H, Vassal J. *Prévision de la houle. La méthode des densités spectroangulaires*, Bulletin d'information du Comité central d'Océanographie et d'Etude des Cotes. 1957.
- [14] Phillips O. *On the generation of waves by turbulent wind*. *Journal of Fluid Mechanics*; 1957.
- [15] Pierson WJ, Neumann G, James R. *Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra*

- and Statistics. Publication 603, U.S. Navy Hydrographic Office; 1955. 300 pp.
- [16] Miles JW. On the generation of surface waves by shear flows., *Journal of Fluid Mechanics* 1957;3:185-204.
- [17] Janssen PAEM. Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography* 1991;21:1631-1642.
- [18] Hasselmann K. On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part 1: General theory, *Journal of Fluid Mechanics* 1962;12:481-500.
- [19] Cavaleri L, Alves J, Ardhuin F, Babanin AV, Banner ML, Belibassakis K, et al. Wave modelling: the state of the art. *Progress in Oceanography*; 2007.
- [20] Fabrice A, Erick R, Alexander B, Jean-François F, Rudy M, Aaron R, et al. Fabrice Collard Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *Journal of Physical Oceanography* 2010;40(9): 1917-1941.
- [21] Holthuijsen L. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University; 2007.
- [22] Van der Westhuysen A. *Advances in the spectral modelling of wind waves in the nearshore*. PhD Thesis of the Technische Universiteit Delft; 2007.
- [23] Rogers WE, Hwang PA, Wang DW. Investigation of Wave Growth and Decay in the SWAN Model: Three Regional-Scale Applications. *Journal of Physical Oceanography* 2003;33:366-389.
- [24] Tolman HL User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276; 2009. 194 pp.
- [25] The WISE Group 2007, Cavaleri L, Alves JHGM, Ardhuin F, Babanin A, Banner M, Belibassakis K, Benoit M, Donelan M, Groeneweg J, Herbers THC, Hwang P, Janssen PAEM, Janssen T, Lavrenov IV, Magne R, Monbaliu J, Onorato M.
- [26] Tejada CE. Desarrollo de un modelo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. *Bol. Cient. CCCP* 2002;9:88-98.
- [27] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (Smpomm). [En línea]. Disponible en: <http://www.cioh.org.co/index.php/noticias-mainmenu2-677/18-oceanografoperacional/519-sistema-de-medicie-partros-oceanogrco-y-de-meteorologmarina-smpom>. [Consultado en diciembre 9 de 2013].
- [28] Torres R. Implementación de un sistema de pronósticos oceánicos y atmosféricos a escala local en el Caribe y Pacífico colombianos. Informe técnico. Centro de investigaciones oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH); 2007.
- [29] Portilla J, Caicedo A, Padilla-Hernández R. Observations of directional wave spectra in the Colombian Pacific. *Avances USFQ*, V5, C5-C21. 2013. http://www.usfq.edu.ec/publicaciones/avances/archivo_de_contenidos/Documents/volumen_5_numero_2/c5_5_2_2013.pdf
- [30] Portilla J, Caicedo A, Padilla-Hernández R, Cavaleri L. Spectral Wave Conditions in the Colombian Pacific Ocean, *Journal of Ocean Modelling* (artículo en revisión); 2013.
- [31] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). *Compilación oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana*. (Ed.) Dimar. San Andrés de Tumaco: CCCP, Serie de Publicaciones Especiales CCCP, Vol.1; 2002. P. 16.
- [32] Smith WHF, Sandwell DT. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings *Science* 1997;277:1957-1962.
- [33] Rueda Bayona J, Rodríguez-Rubio E, Ortiz J. Caracterización espacio-temporal del campo de vientos superficiales del Pacífico colombiano y el golfo de Panamá a partir de sensores remotos y datos in situ. *Bol. Cient. CCCP* 2007;14:49-68.
- [34] European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). [On-line]. 2013 Disponible en: <http://www.ecmwf>.

- int/about/. [Consultado en junio 10 de 2013].
- [35] Correa ID. Le littoral Pacifique colombien: Interdependance des agents morphostructuraux et hydrodynamiques. Ph.D. These-Geologie Marine. Université Bordeaux I; 1996. 178 pp.
- [36] Restrepo JD, López S. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean Deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*. 2008. Volume 25, Issue 1, pp. 1-21.
- [37] Tolman HL. Development and Implementation of Wind-Generated Ocean Surface Wave Modelsat NCEP. *Wea. Forecasting* 2002;17:311-333.
- [38] Tolman HL, Chalikov D. Source terms in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.* 1994;26:2497-2518.
- [39] Montoya RD, Osorio A. Los modelos de generación de oleaje de viento: Características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. En: *Avances en Recursos Hidráulicos* 2008;15: 47-74.
- [40] Tolman HL. Effects on numerics on a physics of a third- generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.* 1992;22:1095-1111.
- [41] Komen G, Hasselmann S, Hasselman K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.* 1984;14(8):1271-1285.
- [42] Global Gridded 2-minute Database, National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Dept. of Commerce.
- [43] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). United states department of commerce. [On-line]. Disponible en: <http://www.noaa.gov/>. [Consultado en junio 20 de 2013].
- [44] Global Forecast System Atmospheric Model. Environmental Modeling Center- National Center for Environmental Prediction. [On-line]. Disponible en: http://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/AGFS_DOC_1103.pdf. [Consultado en junio 10 de 2013].
- [45] Grumbine R. Automated passive microwave sea ice concentration analysis. Technical note 120, NCEP/NOAA/NWS, National Center for Environmental Prediction, Washington DC. 1996.
- [46] Portilla J. Storm-Source-Locating Algorithm Based on the Dispersive Nature of Ocean Swells. *Avances Universidad San Francisco de Quito*. 2012. ISSN 1390-5384.
- [47] Tolman HL, Chawla A. Automated grid generation for WAVEWATCH III®. NOAA/NWS/NCEP/EMCEMC, National Center for Environmental Prediction; 2008.
- [48] Grid Analysis and Display System (GrADS). Institute of Global Environment and Society. [On-line]. Disponible en: <http://iges.org/grads/>. [Consultado en junio 10 de 2013].
- [49] European Space Agency. [On-line]. Disponible en: <http://www.esa.int/ESA>. [Citado 2013 Jun. 18].
- [50] Restrepo J, Otero L, López S. Clima de oleaje en el Pacífico Sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros. *Academia Colombiana de Ciencia* 2009;33(128):357-375. ISSN 0370-3908.
- [51] Agudelo P. Cota de inundación del litoral Pacífico colombiano. Tesis de maestría. Universidad de Cantabria; 2003. 85 pp.