

**APLICACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA EVALUAR LA DINÁMICA DEL OLEAJE Y EL NIVEL DEL MAR EN EL SISTEMA DELTAICO DEL RÍO MIRA (COLOMBIA): BASES PARA LA GESTIÓN COSTERA**

***APPLICATION OF HYDRODYNAMIC MODELS TO ASSES WAVE AND SEA LEVEL DYNAMICS IN THE MIRA RIVER DELTA SYSTEM (COLOMBIA): FOUNDATIONS FOR COASTAL MANAGEMENT***

Juan C. Restrepo L.<sup>1</sup>, Luis Jesús Otero Díaz<sup>2</sup>

Grupo de Modelado Integral de Zona Costera con Énfasis en Riesgos Ambientales Marinos y Procesos, Dirección General Marítima - Centro Control de Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP), Vía El Morro, Capitanía de Puerto de Tumaco, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia.  
<sup>1</sup>jrestr48@eafit.edu.co, <sup>1</sup>jrestrepo@dimar.mil.co, <sup>2</sup>lotero@dimar.mil.co

Restrepo, J. y L. Otero. 2007. Aplicación de modelos hidrodinámicos para evaluar la dinámica del oleaje y el nivel del mar en el sistema deltaico del río Mira (Colombia): bases para la gestión costera. Boletín Científico CCCP, (14): 31-48.

*Recibido en septiembre de 2007; aceptado en diciembre de 2007*

NOTA ACLARATORIA: Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto ‘Modelos de Morfodinámica Litoral para Definir Escenarios de Vulnerabilidad ante Amenazas Naturales: Bahía de Tumaco - Delta del Río Mira’, ejecutado por la Universidad EAFIT y el Centro Control Contaminación del Pacífico (DIMAR - CCCP) con el apoyo financiero de COLCIENCIAS (Código: 12160517616). Sus resultados preliminares se presentaron en la III Conferencia Internacional de Manejo Integrado de Zonas Costeras - CARICOSTAS (Santiago de Cuba, mayo de 2007)

**RESUMEN**

Para evaluar el comportamiento del sistema deltaico del río Mira se implementaron modelos de: (1) propagación de marea y (2) propagación y refracción de oleaje. Para analizar la propagación mareal se procesaron series sintéticas de nivel del mar generadas por modelos numéricos globales y la serie histórica del mareógrafo de Buenaventura (1953-2000). Para caracterizar la dinámica del oleaje se analizó y propagó una serie de oleaje (1979-2000) en aguas profundas con información de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ) y dirección dominante ( $D_p$ ). La marea es semi-diurna con rangos promedio de 2.46 y 2.58m. El oleaje proviene principalmente del SW-SWW, con alturas significativas que varían entre 0.25 y 2.23m, y periodos pico entre 5 y 23s. La implementación de modelos numéricos permite evaluar escenarios oceanográficos como base para la toma de decisiones en un contexto de manejo integral de zonas costeras.

**PALABRAS CLAVE:** modelos hidrodinámicos, nivel del mar, parámetros de oleaje, cuenca Pacífica colombiana, procesos hidrodinámicos.

**ABSTRACT**

Tide propagation, and wave propagation-refraction numerical models were implemented to asses Mira's River delta system dynamics. In this study we analyze tide propagation by looking at sea level synthetic data and records from Buenaventura tide gauge (1953-2000). Wave data from deep waters (1979-2000), including significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and dominant direction ( $D_p$ ) records, was evaluated and propagated to shallow waters to characterize wave dynamics. Tide's behavior is semi-diurnal with mean ranges of 2.46 y 2.58m. Waves comes from SW - SWW mainly, with significant wave height between 0.25 and 2.23m., and peak periods from of 5 to 23 s. The implementation of numerical models allows the evaluation of different oceanographic scenarios as a ground for costal management decision-making processes.

**KEY WORDS:** Hydrodynamic models, sea level, wave parameters, Pacific Colombian basin, hydrodynamics processes.

## INTRODUCCIÓN

Los ambientes deltaicos constituyen sistemas altamente dinámicos, controlados por una compleja interrelación de procesos oceanográficos, fluviales, geomorfológicos y climáticos (Kjerfve, 1979). El conocimiento de los factores que determinan la dinámica de un ambiente deltaico específico permite entender el comportamiento de cada sistema, lo cual es primordial en el planteamiento de modelos cualitativos y cuantitativos sobre morfología litoral, corrientes y circulación, deriva litoral,

dispersión mareal, transporte neto de sedimentos, evolución reciente y patrones de sedimentación, (Kjerfve, 1990), y en última instancia permite diseñar programas de (1) protección de ecosistemas estratégicos, (2) ordenamiento del territorio y (3) manejo integral de zonas costeras (LOICZ, 1995)

Durante los últimos años, la modelación numérica ha sido una de las herramientas más utilizadas para caracterizar los ambientes deltaicos y evaluar los factores que determinan

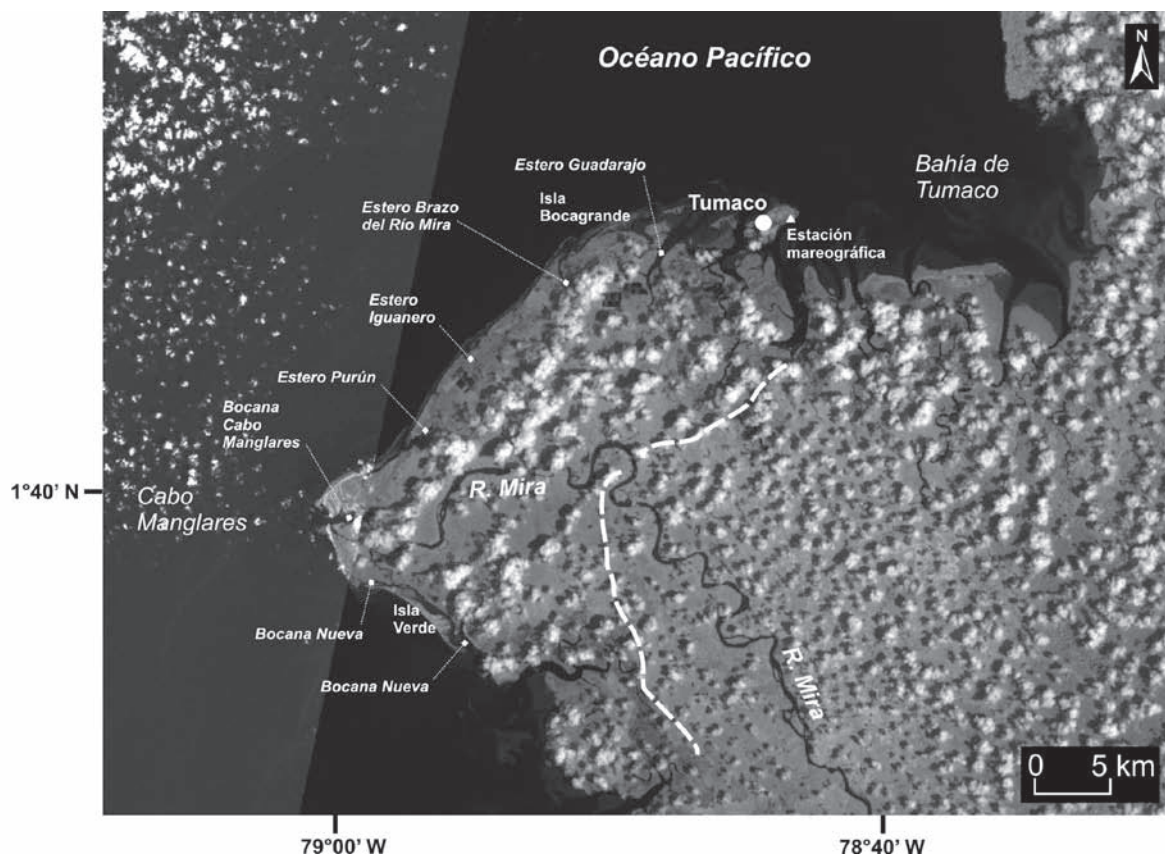


Figura 1. Sistema deltaico del río Mira. La línea discontinua representa el límite aproximado del delta reciente del río Mira. El triángulo muestra la ubicación de la estación mareográfica de Tumaco.

la variabilidad en su dinámica (e.g. Kjerfve, 1990; O'Donnell, 1990; Oey y Mellor, 1993; Kirby, 1996; Cavaleri y Holthuijsen, 1998; Simionato *et ál.*, 2004; Ulses *et ál.*, 2005). Sin embargo, la compleja relación que existe entre los factores que determinan la dinámica de un ambiente estuarino exige la implementación de modelos numéricos que describan la forma como operan estos sistemas, especialmente en zonas donde la combinación

única de características físicas y de intervención humana hace que una región en particular pueda ayudar a entender la alta variabilidad y tasa de cambio de los litorales (LOICZ, 2005)

Una de las regiones y sistemas de interés mundial es el litoral Pacífico colombiano, particularmente el sistema litoral y deltaico del río Mira (Restrepo y Kjerfve, 2004) (Fig. 1). Este sistema se desarrolla bajo condiciones físicas extremas,

incluyendo: (1) altos valores de descarga fluvial de agua y sedimentos; (2) fuertes manifestaciones climáticas y oceanográficas asociadas con los eventos de El Niño y La Niña; (3) condiciones intermedias de energía del oleaje, y (4) rango meso mareal entre 2 y 3m (West, 1957; Correa, 1996; Martínez *et ál.*, 1995; Restrepo y Kjerfve, 2002a, 2002b; Restrepo y López, 2007). Además y debido a su ubicación en la zona de convergencia de placas tectónicas de Nazca y Suramérica (Case *et ál.*, 1971; González *et ál.*, 1998), esta zona litoral está expuesta a amenazas geológicas de gran magnitud, incluyendo la ocurrencia de terremotos y tsunamis. Por lo tanto, y con el fin de contribuir al conocimiento de los procesos oceanográficos que se presentan en el delta del río Mira y determinar el comportamiento del sistema durante condiciones medias y extremas se implementaron modelos de: (1) propagación y refracción de oleaje y (2) propagación de marea en el sistema deltaico del río Mira.

La implementación de modelos numéricos que muestren cómo funcionan los sistemas naturales ante la interacción de diferentes variables y procesos, permite obtener una estimación más precisa de los efectos ambientales ocasionados por fenómenos naturales, evaluar su tendencia en el tiempo y diseñar estrategias que permitan prevenir o mitigar sus efectos adversos (*e.g.* Bird, 1993, 2000; Komar, 1998). En definitiva, estos modelos proporcionan las bases para: (1) predecir el comportamiento de los sistemas costeros; (2) conocer regionalmente los procesos dinámicos que operan en deltas y costas bajas, y, con base en los modelos numéricos, (3) identificar el grado de vulnerabilidad ante amenazas naturales (*i.e.* Gornitz *et ál.*, 1994; Hesp y Short, 1999)

## ÁREA DE ESTUDIO

### Sistema deltaico del río Mira

El río Mira nace en el límite entre Colombia y Ecuador, cerca del eje de la cordillera de Los Andes, a 3350msnm; recorre una longitud de 272km hasta llegar a la costa Pacífica y tiene un área de drenaje de 9530km<sup>2</sup>. A partir de registros de caudal obtenidos durante el periodo 1980 - 2003 en la estación San Juan, la más cercana a la desembocadura del río al océano Pacífico, se estima que el río Mira tiene un caudal promedio anual de 870m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, con

valores máximos anuales de 1104.9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y mínimos anuales de 533.7m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, durante mayo y agosto, respectivamente (Restrepo, 2006). Su carga sólida en suspensión, estimada en 9.77 x 10<sup>6</sup> t a<sup>-1</sup> (Restrepo y López, 2007), constituye junto con la carga de los ríos Patía y San Juan cerca del 50% del aporte total de sedimentos de los ríos del Pacífico colombiano, que se calcula en ~96 x 10<sup>6</sup>t año<sup>-1</sup> (Restrepo y Kjerfve, 2000)

El delta del río Mira tiene una superficie subaérea de 520km<sup>2</sup>, que se extiende desde el ápice ubicado aproximadamente a 20km de la línea de costa y está compuesto por un sistema de descarga principal localizado en cabo Manglares y siete distributarios menores al sur y al norte del canal principal (Fig. 1). El plano deltaico subaéreo tiene un gradiente de 53.3 x10<sup>-5</sup>mm<sup>-1</sup> y puede dividirse en sectores superior e inferior con base en la ubicación de la vegetación de manglares y la extensión de los esteros mareales. La fracción subacuosa del delta se puede dividir en tres zonas: (1) Los planos submareales (*i.e.* plano deltaico subacuoso), de menos de 5m de profundidad; (2) El frente deltaico, a profundidades que oscilan entre 5 y 40m, y (3) El prodelta, a profundidades mayores de 40m. El límite entre el plano submareal y el frente deltaico se localiza aproximadamente a 1.4km costa afuera. El gradiente del plano submareal es de 3.57 x 10<sup>-3</sup>mm<sup>-1</sup>, mientras que la pendiente del frente deltaico es de 0.02mm<sup>-1</sup>. Todo el sistema ha sido construido sobre una plataforma continental con una amplitud menor de 5km.

La estabilidad y evolución reciente del delta del río Mira está determinada por la presencia de fallas activas, responsables de una alta sismicidad superficial e intermedia y de desplazamientos diferenciales de bloques tectónicos (Correa, 1996). Estos desplazamientos afectan el gradiente del plano deltaico, así como la pendiente de la plataforma costera y la configuración del prodelta, controlando el desarrollo y orientación de los canales distributarios, la intensidad de los procesos marinos que inciden en el frente de los deltas y la preservación de cañones submarinos por donde potencialmente puede escapar una proporción de sedimentos continentales al océano (Correa, 1996; Restrepo *et ál.*, 2002). Otros factores, como la tendencia del nivel relativo del mar o sus fluctuaciones por la influencia del ENOS, también pueden afectar la estabilidad de las costas y deltas

en el Pacífico colombiano (*e.g.* Morton *et ál.*, 2000; Restrepo *et ál.*, 2002; INVEMAR, 2003)

Por medio del procesamiento de 6416 observaciones de dirección, periodo y altura de las olas de tipo seas y swells, recopiladas entre los años 1963 y 2000 por el International Comprehensive Ocean - Atmospheric Data Set (ICOADS) en la plataforma costera y el sector marino proximal del delta del río Mira, Restrepo y López (en prensa) establecieron que el clima de olas para el sector marino proximal y la plataforma costera está dominado en un 64% por la ocurrencia de trenes de oleaje bien definidos (swells), provenientes de una zona de generación localizada al suroeste, a una distancia aproximada de 650km del delta. Para aguas abiertas, estas olas presentan una altura promedio de  $1.4 \pm 0.6\text{m}$  y un periodo promedio de  $6.3 \pm 2.6\text{s}$ , mientras que hacia la línea de costa, la altura de oleaje muestra una disminución importante en altura de 0.25m, debido a procesos de refracción. Las mareas en el delta son típicamente semi-diurnas. El análisis de la serie de datos del mareógrafo de Tumaco (1953 a 2000) indica que el rango mareal promedio es de 2.6m y el máximo promedio de 3.1m, con una tasa general de descenso de  $\sim 1.14\text{mm a}^{-1}$ ; definida a partir de análisis de regresión y que puede estar relacionada con la convergencia tectónica de placas y el levantamiento de segmentos de la costa (Restrepo y López, 2007)

## METODOLOGÍA

### Nivel del mar

#### a. Datos de nivel del mar

El nivel del mar está determinado por la marea astronómica, la marea meteorológica debida a la presión en la superficie libre y la acción del viento, y por la configuración y batimetría de la costa (Pugh, 1987). Teniendo en cuenta que en el área de interés no existe un registro histórico de nivel del mar para desarrollar un análisis armónico de mareas, es necesario emplear modelos numéricos de propagación de ondas largas con condiciones de contorno abierto generadas a partir de modelos globales de niveles de marea (Andersen *et ál.*, 1995). Para la generación de la serie de marea astronómica como condición de contorno abierto para el modelo de propagación de ondas largas, se

utilizaron los datos obtenidos mediante un método de interpolación basado en el modelo AG95.1, que genera datos de marea astronómica para cualquier región oceánica alrededor del mundo (Andersen *et ál.*, 1995). Una vez se han generado las series de marea astronómica se procede a su propagación desde aguas profundas hacia puntos de interés, mediante el empleo del modelo hidrodinámico H2D que resuelve las ecuaciones de ondas largas, integradas en vertical, considerando que la longitud de la onda propagada es significativamente mayor en comparación con la profundidad sobre la que se propaga (GIOC, 2002a)

De otro lado, cuando no se cuenta con registros instrumentales de los cuales se pueda obtener el comportamiento de la marea meteorológica, es necesario analizar los residuos meteorológicos de series medidas de nivel del mar de las estaciones más cercanas al área de interés, ya que se considera que los factores meteorológicos, como el viento y los campos de presión ejercen su influencia en una escala regional, lo que implica variaciones similares del nivel del mar en extensas zonas de la costa (Pugh, 1987). Por lo tanto, teniendo en cuenta la proximidad y la extensión, continuidad y calidad de la serie de datos, se utilizó el registro horario de la serie de nivel del mar del mareógrafo de Buenaventura (1953 - 2000) para analizar la componente meteorológica de la marea en el delta del río Mira. Los datos obtenidos fueron ajustados a una distribución Gumbel, con el fin de obtener los parámetros de ajuste de la distribución y calcular la elevación adicional por marea meteorológica (Agudelo, 2003)

#### b. Modelo hidrodinámico (H2D)

Para la generación de la marea astronómica se utilizó el modelo hidrodinámico H2D (GIOC, 2002a). Éste fue calibrado utilizando las series históricas de nivel del mar de los mareógrafos de Tumaco y Buenaventura, ubicados en Colombia, y el de Balboa, ubicado en Panamá (Otero, 2005)

Este modelo numérico bidimensional resuelve las ecuaciones de ondas largas, integradas en vertical, asume un flujo horizontal con las componentes horizontales de la velocidad ( $u$  y  $v$ ) mucho mayores que la componente vertical ( $w$ ) y considera los términos no-lineales advectivos. La consideración de flujo horizontal permite una simplificación de las ecuaciones generales



del movimiento, ya que elimina la componente vertical como incógnita y establece una distribución de presiones hidrostáticas. Este modelo no es aplicable en áreas locales con pendientes del fondo muy pronunciadas (*i.e.*  $> 1/5$ ) o en áreas en las que se produzcan fenómenos de afloramientos, hundimientos o frentes oceánicos (GIOC, 2002a)

Las ondas largas poseen números de Reynolds elevados, por lo que el flujo se considera siempre turbulento. Esta característica permite aproximar los términos de tensiones tangenciales por medio de gradientes de la velocidad turbulenta media. Por lo tanto, el modelo H2D considera la viscosidad de remolino, la fricción con el fondo y el efecto de arrastre por viento (GIOC, 2002a)

El modelo calcula las ecuaciones de conservación del momento y conservación de la masa correspondiente a fluidos incompresibles por medio de un algoritmo de diferencias finitas, implícito de dirección alterna (Leendertse, 1970). La resolución numérica de las ecuaciones requiere transformar el dominio de cálculo continuo en un dominio discreto, formado por una malla rectangular de cálculo. Para garantizar la estabilidad numérica del modelo se debe cumplir la condición de Courant (GIOC, 2002a). Información más detallada sobre las mallas de cálculo, datos de entrada, condiciones de contorno y los parámetros de ejecución del modelo puede encontrarse en Otero (2005)

## Caracterización del oleaje

### a. Datos de oleaje

Para determinar el comportamiento del oleaje en la desembocadura del río Mira se analizó una serie de oleaje (1979 - 2000) en aguas profundas generada por medio del modelo de tercera generación Wavewatch III (NWWIII), desarrollado por NOAA/NCEP (Tolman, 2002). El modelo numérico NWWIII es un modelo de generación de oleaje de tercera generación, en el que los procesos físicos que describen el crecimiento y decaimiento del oleaje son parametrizados de manera explícita e incluyen el cálculo de las interacciones no-lineales del oleaje individual. Estos modelos proporcionan una relación estadística de un estado de mar y no permiten obtener una descripción determinística de un evento (Tolman, 1992; Tolman y Chalikov, 1994)

Para la calibración de los datos NWWIII generados frente a las costas de Suramérica en el

Pacífico Ecuatorial se ha utilizado una boya escalar de oleaje instalada por NOAA en aguas profundas frente a la costa de Perú (boya NOAA 32302), por su ubicación geográfica ( $18.0^{\circ}\text{S}$ ,  $85.0^{\circ}\text{W}$ ) y extensión de la serie de datos (*i.e.* 9 años) (GIOC, 2004). Utilizando un punto de generación NWWIII situado en la posición de la boya NOAA 32302, el GIOC (2004) comparó datos instrumentales de altura de oleaje registrados a escala horaria con datos de altura significativa simulados cada tres horas mediante NWWIII para el periodo comprendido entre 1986 y 1995, encontrando que en promedio, los datos instrumentales eran mayores en un 5% con respecto a los datos sintéticos. Finalmente, la comparación de 21 percentiles de las series instrumentales y sintéticas de datos de altura de oleaje permitieron que el GIOC (2004) obtuviera una curva de ajuste para los datos de altura significativa generados por el modelo NWWIII (ecuación 1):

$$H_s = 0.297 + 0.068H_{\text{NWWIII}} \quad (1)$$

donde,

$H_{\text{NWWIII}}$  es la altura significativa (m) generada por medio del modelo NWWIII.  
 $H_s$  es la altura de oleaje significativa (m) corregida usando datos instrumentales.

De este modelo se recolectaron series de oleaje generadas para diferentes sitios en el Pacífico colombiano, de las cuales se utilizó la correspondiente al lugar más cercano al área de estudio ( $1.5^{\circ}\text{N}$ ,  $80.0^{\circ}\text{W}$ ) (Graham y Díaz, 2001). La serie de datos obtenida y ajustada por medio de la ecuación (1), con un total de 64544 datos, contiene información de estados de mar generada cada tres horas entre enero de 1979 y diciembre de 2000. La información analizada consta de valores de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ) y dirección dominante ( $D_p$ ), y fue clasificada por cuadrante de arribo ( $22.5^{\circ}$ ) para definir la dirección predominante, la altura significativa y el periodo pico del oleaje incidente en el sistema deltaico del río Mira.

### b. Modelo espectral de oleaje (Oluca SP)

Estados de mar derivados de la serie NWWIII en aguas profundas se propagaron hacia diferentes

puntos de la desembocadura del río Mira mediante el modelo numérico de propagación de oleaje Oluca-SP (GIOC, 2002b). Este modelo de propagación de oleaje utiliza la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave y sirve para modelar la propagación de un espectro direccional sobre una batimetría irregular considerando los procesos de asomeramiento, refracción-difracción, disipación por fricción con el fondo y rotura del oleaje (Kirby y Dalrymple, 1986a, 1986b). Este modelo no incluye los efectos del viento ni la aceleración de Coriolis y considera condiciones de presión constante en la superficie libre (GIOC, 2002b)

Para ejecutar el modelo es preciso seleccionar el modelo espectral y definir como dato de entrada un estado de mar direccional en el contorno exterior, caracterizado por un espectro bidimensional y discretizado en componentes de frecuencia y dirección que son propagados de manera simultánea. Además, como parámetros de entrada se deben fijar: (1) El modelo para resolver el espectro, (2) Las ecuaciones de cálculo para la disipación por rotura y fondo, (3) Las condiciones de contorno en el dominio de cálculo y (4) Las condiciones de marea de referencia (GIOC, 2002b)

El modelo espectral utilizado fue el TMA (*i.e.* Texel, Marsen and Arsloe) (Bouws *et al.*, 1985), que se aplica en zonas cercanas a la costa en donde las profundidades son relativamente poco profundas y las olas son afectadas por el fondo (USGS, 2002). Por medio de la ecuación (2) se estimó la profundidad ( $d$ ) desde la cual se propagó el oleaje incidente (USGS, 2002),

$$d=0.5L_o \quad ; \quad L_o = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (2)$$

donde,

$L_o$  es la longitud de onda del oleaje propagado.

$g$  la aceleración de la gravedad.

$T_p$  el periodo típico del tren de olas que serán propagadas.

Para resolver el espectro se utilizó el modelo compuesto (Kirby y Özkan, 1994) que cubre un mayor rango de profundidades agua y por lo tanto permite una mejor aproximación a la dispersión del oleaje debido a la altura de ola significativa

(GIOC, 2002b). La disipación por fondo se calculó por medio del modelo de capa límite turbulenta en el fondo (Dean y Dalrymple, 1984), mientras que la disipación por rotura se estimó por medio del modelo Thornton y Guza (1983). En los procesos de calibración del modelo Oluca SP, desarrollados por la Universidad de Cantabria, se obtuvieron las mejores aproximaciones a la disipación de energía del oleaje con estos métodos (GIOC, 2002b)

La resolución numérica de las ecuaciones implica transformar el dominio de cálculo continuo en un dominio discreto formado por una malla rectangular de cálculo (GIOC, 2002a), por lo que se estableció un conjunto de tres pares de mallas anidadas orientadas de acuerdo con la dirección de propagación del oleaje, con una resolución espacial de 50m. Información más detallada sobre los datos de entrada, condiciones de contorno y los parámetros de ejecución del modelo puede encontrarse en GIOC (2002b)

## RESULTADOS

### Régimen de nivel del mar

Se desarrollaron modelaciones para generar series de marea astronómica en dos puntos ubicados en el delta del río Mira: (1) Canal principal de desembocadura y (2) Estero Purún (Fig. 1). Se generaron como condición de contorno para cada una de las mallas series de marea horarias a partir del primero de enero de 1997 hasta el 31 de diciembre de 1998, generando series con una extensión de dos años. El análisis de componentes armónicos (Tabla I) indica que las mareas en la desembocadura del río Mira son semi-diurnas, con un factor de forma  $F$  (*i.e.* relación entre las principales componentes diurnas y semi-diurnas) de 0.075 y 0.077 para la desembocadura y el estero Purún, respectivamente. En la desembocadura el rango mareal promedio es 2.58m y durante sicigia (spring tides) alcanza 2.90m En el estero Purún se observa una ligera disminución en los rangos de marea, llegando a un promedio de 2.46m y a 2.84m durante sicigia.

Para el ajuste de los datos de marea meteorológica a una distribución de Gumbel se empleó la serie horaria de marea para el puerto de Buenaventura (1953 - 2000). Para obtener el residuo meteorológico de la serie total se

Tabla I. Principales constantes armónicas mareales determinadas para la desembocadura del río Mira y el estero Purún (Figura 2).  $H_n$  (cm) es la amplitud y  $g_n$  es la fase de retraso ( $^{\circ}G$ ) de la marea. Solo se muestran los constituyentes con amplitud mayor de 1 cm.

Componente	Origen	Frecuencia	Delta del río Mira	
			Desembocadura $H_n$ (cm)/ $g_n(^{\circ})$	Esteros Purún $H_n$ (cm)/ $g_n(^{\circ})$
Diurno				
$O_1$	Mayor elíptico lunar	13.39	0.8/154	0.8/19
$O_1$	Lunar principal	13.94	2/160	2/21
$P_1$		14.95	3/77	3/70
$K_1$	Solar - lunar principal	15.04	9/61	9/87
Semi-diurno				
$M_2$	Lunar principal	28.98	114/338	112/49
$S_2$	Solar principal	30.00	31/32	30/27
$L_2$	Menor elíptico lunar	29.52	2/130	2/64
$K_2$	Lunar-solar declinatorio	30.08	6/128	6/172
$N_2$	Mayor elíptico lunar	28.43	22/101	22/24
$U_2$		27.96	3/18	3/63
Aguas someras				
$M_4$	Lunar principal de marea máxima	57.96	0.2/97	0.5/63
$MS_4$		58.98	0.1/105	0.3/78
$M_6$		86.95	0.1/135	0.1/73
$2N_2$		27.89	2/176	2/94
$T_2$		29.95	2/46	2/13
$V_2$		28.51	4/65	4/141

reconstruyó la serie de marea astronómica para Buenaventura, a partir de las componentes armónicas calculadas mediante el análisis armónico, que finalmente es restada de la serie de marea total (Otero, 2005). Los datos de la serie total de residuo meteorológico se ordenaron en forma ascendente y a cada uno de ellos se le asignó una probabilidad acumulada y se ajustaron dos rectas en un papel probabilístico Gumbel, una para régimen medio y otra para régimen extremal. Por medio del análisis estadístico de los datos de

la serie de marea meteorológica se obtuvieron sus parámetros de localización y de escala para los regímenes medio ( $\lambda_m = -0.4525$ ,  $\delta_m = 0.0787$ ) y extremal ( $\lambda_e = 0.43567$ ,  $\delta_e = 0.0239$ )

Para encontrar el punto en donde se interceptan las rectas ajustadas, que será necesario conocer para la construcción del régimen medio y extremal del nivel del mar, se igualan las ecuaciones de las rectas ajustadas a cada uno de los regímenes de distribución de Gumbel,

$$F_p = \exp \left[ - \exp \left( \frac{S_{mm} - \lambda_m}{\delta_m} \right) \right]$$

(Régimen medio)

$$S_{mm} = \lambda_m - \delta_m \ln \left[ - \ln (F_p) \right]$$

(3)

$$F_p = \exp \left[ - \exp \left( \frac{S_{mm} - \lambda_e}{\delta_e} \right) \right]$$

(Régimen extremal)

$$S_{mm} = \lambda_e - \delta_e \ln \left[ - \ln (F_p) \right]$$

(4)

donde,

$F_p$  hace referencia al punto de intersección de los dos regímenes.

$\lambda_m$  y  $\lambda_e$  son los parámetros de localización del régimen medio y extremal, respectivamente.

$\delta_m$  y  $\delta_e$  son los parámetros de escala del régimen medio y extremal de marea meteorológica, respectivamente.

Igualando las ecuaciones (3) y (4) se obtiene el punto de intersección que corresponde una probabilidad ( $F_p$ ) de 0.999845, que se encuentra asociada a un nivel de marea meteorológica ( $S_{mm}$ ) de 0.645m.

Con la información sobre marea astronómica y meteorológica se calculó el régimen medio de nivel del mar utilizando simulaciones de Montecarlo (Dronkers, 1964). Se obtuvieron regímenes de nivel medio del mar para la desembocadura del río Mira y el estero Purún (Fig. 2). En la desembocadura del río Mira se estimaron niveles medios del mar que varían entre 1.15 y 3.97m., encontrando niveles de 2.02 y 3.56m que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 99%, respectivamente. En el estero Purún, ubicado al norte de la desembocadura, se observaron niveles ligeramente superiores, encontrando para probabilidades de no excedencia

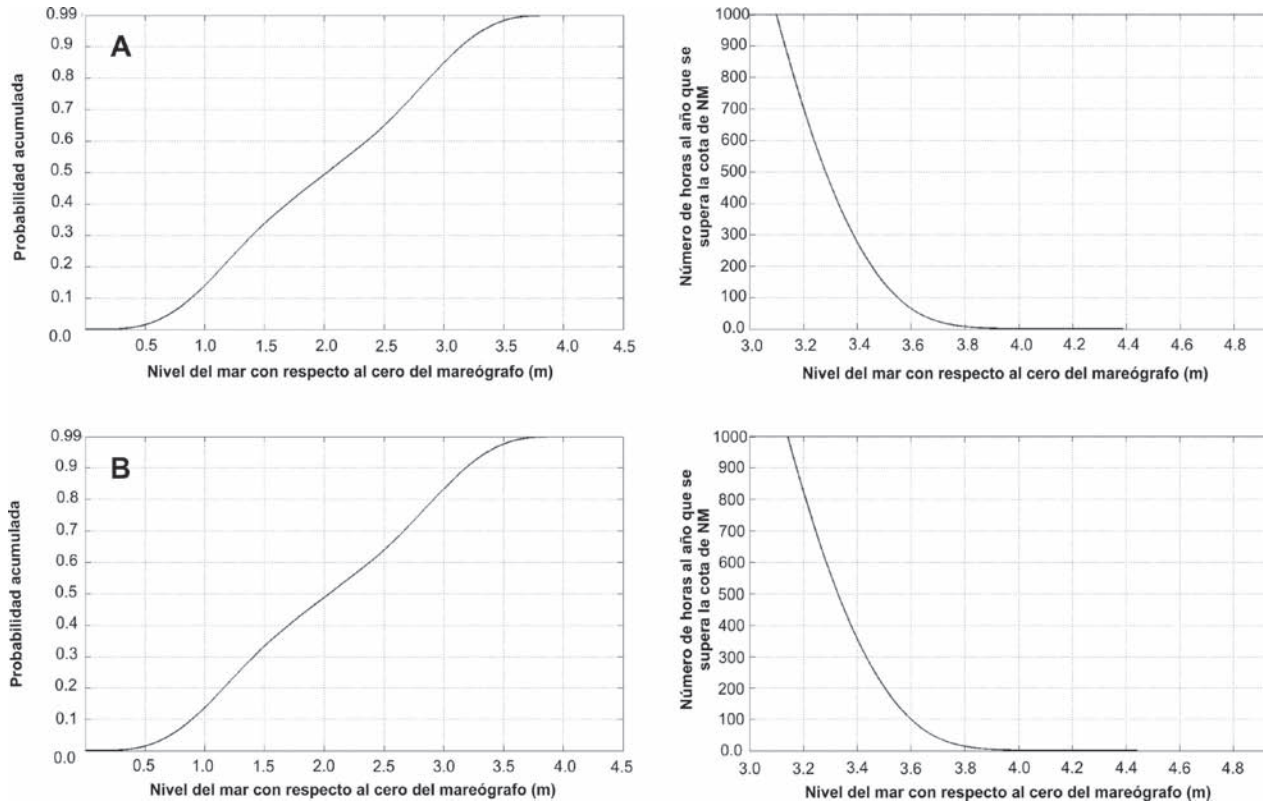


Figura 2. Distribución de probabilidad acumulada de nivel medio del mar y número de horas al año en que se supera la cota de nivel medio del mar para (A) Desembocadura del río Mira (cabo Manglares) y (B) Estero Purún. La localización de estos sitios puede ser observada en la Figura 1. El nivel del mar se estimó tomando como referencia la posición de la estación mareográfica de Tumaco (Fig. 1)



de 50 y 99% niveles medios del mar de 2.05 y 3.64m, respectivamente (Fig. 2). Las diferencias entre los regímenes de nivel medio del mar estimados para estas zonas son causadas, en gran medida, por la mayor interacción que existe entre la onda de marea y el plano subacuoso del delta en el sector de la desembocadura del río Mira, en donde el frente deltaico tiene mayor extensión que en el sector del estero Purún.

Los datos necesarios para el cálculo del régimen extremal de nivel de marea son los mismos que para el régimen medio, siguiendo el mismo procedimiento de cálculo. Sólo que aquí se usa el máximo valor anual del nivel de marea y se generan  $n$  series que servirán para obtener la media y la desviación estándar para cada valor de probabilidad con los que se estiman bandas de confianza del 90% (Dronkers, 1964). Con los valores máximos anuales obtenidos de todos los años simulados se construyó el régimen extremal, calculando para la desembocadura del río Mira niveles que varían entre 3.95 y 4.35m, mientras que para el estero Purún se obtuvieron niveles del orden de 4.15 y 4.37m (Fig. 3)

#### a. Caracterización del oleaje

El procesamiento y análisis de la serie de datos NWWIII (1979 - 2000) señala que el clima de olas para el sector marino proximal y la plataforma costera del delta del río Mira se caracteriza por un oleaje en aguas profundas con alturas significativas

que se encuentran entre 0.29 y 2.23m, y periodos que varían entre 5.0 y 23.0s (Tabla II). En cuanto a la dirección predominante, el clima de olas está dominado por trenes de olas provenientes del suroeste (SW) (47.2%) y el sur-suroeste (SSW) (28.8%), caracterizados por alturas significativas de  $0.91 \pm 0.2m$  y  $0.92 \pm 0.2m$ , y periodos de  $13.8 \pm 1.8s$  y  $13.4 \pm 1.7s$ , respectivamente. También existe un componente significativo proveniente del noroeste-oeste (NWW) (10.8%), que presenta alturas significativas hasta de 2.23m y periodos que varían entre 7.0 y 23.0s (Tabla II)

La base de datos NWWIII indica que durante la mayor parte del año (marzo - diciembre) el oleaje proviene del SW y SSW, mostrando ligeras diferencias en la dirección predominante ( $210^\circ < D_p < 219^\circ$ ) durante este tiempo (Tabla III). Este oleaje se caracteriza por periodos del orden de  $13.8 \pm 1.8$  y  $14.0 \pm 1.8s$ , y alturas significativas que varían entre  $0.83 \pm 0.16$  y  $0.96 \pm 0.22m$ . En los meses de enero y febrero el sistema se caracteriza por la ocurrencia de trenes de oleaje provenientes del NWW, encontrando alturas significativas entre  $0.89 \pm 0.22$  y  $0.99 \pm 0.26m$ , y periodos medios de  $13.8 \pm 2.0$  y  $14.0 \pm 1.9s$  (Tabla III)

A partir de la información estadística obtenida de la serie original de datos de oleaje en aguas profundas (tablas II y III) se definieron los casos de propagación (Tabla IV). Para cada una de las categorías establecidas se realizó un análisis de distribución de frecuencias para la dirección

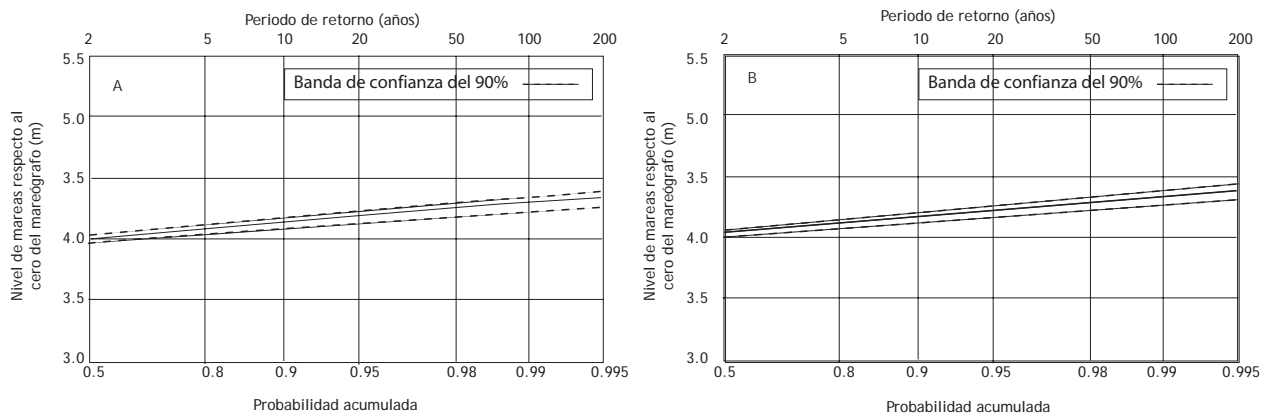


Figura 3. Periodo de retorno y distribución de probabilidad acumulada para el régimen extremal de nivel del mar en la (A) Desembocadura del río Mira (cabo Manglares) y el (B) Estero Purún. La localización de estos sitios puede ser observada en la Figura 1. Las líneas punteadas indican el intervalo para un nivel de confianza del 90 %. El nivel del mar se estimó tomando como referencia la posición de la estación mareográfica de Tumaco (Fig. 1)

Tabla II. Resumen estadístico de una serie de oleaje (1979 - 2000) en aguas profundas generada por medio del modelo Wavewatch III para el sector Pacífico sur de Colombia. Para la serie ajustada de la base de datos NWWIII (Graham y Díaz, 2001) se obtuvieron los valores mínimos, medios y máximos de dirección dominante ( $D_p$ ), altura significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ) para cada una de las categorías establecidas. Se presenta el número total de datos por cuadrante de arribo, la cifra en paréntesis indica el porcentaje de cada cuadrante con respecto al número total de datos.

Cuadrante de arribo	Dirección dominante (°)			Altura significativa (m)			Periodo pico (s)			Datos
	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	
NW	304.0	304.8	308.0	0.49	0.97	1.85	8.0	16.5	23.0	1322 (2.0%)
NWW	282.0	296.2	303.0	0.49	1.02	2.23	7.0	14.4	23.0	6982 (10.8%)
W	259.0	270.2	281.0	0.29	0.93	1.94	7.0	13.2	19.0	3255 (5.0%)
SWW	237.0	246.3	258.0	0.29	0.87	1.65	5.0	13.0	19.0	3851 (5.9%)
SW	214.0	220.9	236.0	0.29	0.91	1.75	5.0	13.8	23.0	30474 (47.2%)
SSW	192.0	208.6	213.0	0.29	0.92	1.65	6.0	13.4	20.0	18634 (28.8%)
S	189.0	190.1	191.0	0.39	0.44	0.68	8.0	10.1	17.0	34 (0.0%)

dominante, altura significativa y periodo pico, seleccionando las combinaciones más representativas ( $D_p$ ,  $H_s$ ,  $F_p$ ), por medio de un análisis de probabilidad conjunta. Los oleajes provenientes del noroeste y el sur tienen una participación poco significativa dentro de la serie original de datos (Tabla II), por lo que no fueron considerados dentro de los casos de propagación de oleaje. Los casos de propagación de oleaje se evaluaron durante tres estados de marea: (1) Bajamares de sicigia (0.0m), (2) Pleamares de cuadratura (2.6m) y (3) Pleamares de sicigia (3.8m). Por lo tanto se ejecutaron un total de 60 casos de propagación de oleaje desde profundidades indefinidas hacia aguas someras en el frente deltaico del río Mira (Tabla IV)

Para cada uno de los casos de propagación de oleaje se obtuvieron en el dominio de cálculo los vectores de propagación e isolíneas de altura significativa ( $H_s$ ); lo que permite evaluar la interacción del oleaje con el frente deltaico y la línea de costa, identificar zonas de concentración de energía de oleaje y estimar la altura del oleaje a profundidades definidas. De esta forma es posible establecer relaciones entre procesos oceanográficos y geomorfológicos, en una zona en donde se ha indicado que la presencia de olas de energía moderada, favorecidas por la poca interacción con una plataforma estrecha, constituye uno de los

agentes primarios de erosión y redistribución de los sedimentos costeros (Correa, 1996)

La interacción del oleaje con el frente deltaico y la línea de costa está relacionada con las variaciones en los parámetros que definen un estado de mar (figuras 4, 5 y 6). Durante abril, cuando los vientos que provienen del SW son de intensidad moderada, el oleaje converge en las barras de desembocadura del río y hacia el sur del sistema de descarga fluvial, en donde el oleaje alcanza alturas hasta de 1.7m debido a los procesos de asomeramiento y refracción del oleaje (Figura 4). En agosto, cuando los vientos procedentes del SW se intensifican en el sector del delta del río Mira, se presentan alturas hasta de 2.5m en los sectores donde se presenta mayor concentración de los rayos de oleaje incidente por efectos de la refracción-difracción (Figura 5). En estos sectores existe mayor susceptibilidad a los procesos de erosión y deriva litoral, debido a que allí los procesos de refracción, asomeramiento y ascenso del oleaje son más intensos en comparación con otras zonas del delta (figuras 4 y 5). Estas condiciones persisten durante la mayor parte del año, ya que entre marzo y diciembre el oleaje proviene del SW y SSW ( $210^\circ < D_p < 219^\circ$ ), mostrando sólo ligeras diferencias en la altura significativa y el periodo pico del oleaje incidente (Tabla III)

Tabla III. Resumen estadístico - estacional de una serie de oleaje (1979 - 2000) en aguas profundas generada por medio del modelo Wavewatch III para el sector Pacífico sur de Colombia. Para la serie ajustada de la base de datos NWWIII (Graham y Díaz, 2001) se obtuvieron los valores mínimos, medios y máximos de dirección dominante ( $D_p$ ), altura significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ), para cada una de las categorías establecidas.

Cuadrante de arribo	Dirección dominante (°)			Altura significativa (m)			Periodo pico (s)		
	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx
Ene	189.0	302.0	307.0	0.29	0.89	2.13	6.0	13.8	23.0
Feb	193.0	301.0	308.0	0.29	0.99	1.94	7.0	14.0	23.0
Mar	197.0	215.0	307.0	0.49	0.96	2.23	10.0	14.0	22.0
Abr	197.0	215.0	306.0	0.39	0.90	1.55	7.0	13.9	21.0
May	198.0	219.0	301.0	0.49	0.95	1.65	9.0	14.0	21.0
Jun	195.0	216.0	304.0	0.49	0.94	1.65	8.0	13.8	20.0
Jul	190.0	213.0	276.0	0.39	0.90	1.55	6.0	13.5	20.0
Ago	198.0	210.0	297.0	0.49	0.94	1.55	5.0	13.6	22.0
Sep	192.0	213.0	303.0	0.49	0.87	1.65	6.0	13.5	22.0
Oct	196.0	213.0	304.0	0.49	0.91	1.74	5.0	13.8	23.0
Nov	195.0	216.0	308.0	0.49	0.88	1.45	5.0	13.6	20.0
Dic	195.0	215.0	307.0	0.49	0.83	1.36	6.0	13.5	23.0

Nota. Mín= mínimo; Prom= promedio; Máx=máximo

Tabla IV. Casos de propagación de oleaje considerando las combinaciones más representativas de dirección dominante ( $D_p$ ), altura significativa ( $H_s$ ) y frecuencia pico ( $F_p$ ), obtenidas de la caracterización del oleaje en aguas profundas.

$D_p$ (°)	$H_s$ (m)	$F_p$ (Hz)
(SSW) 210	0.78	0.0625 - 0.0769
	1.36	0.0625 - 0.0769
(SW) 220	0.87	0.0625 - 0.0769
	1.45	0.0625 - 0.0769
(SWW) 245	0.87	0.0625 - 0.0769
	1.26	0.0625 - 0.0769
(W) 270	0.87	0.0625 - 0.0769
	1.55	0.0625 - 0.0769
(NWW) 300	0.78	0.0555 - 0.0714
	1.45	0.0555 - 0.0714

El tren de olas tiene mayor celeridad en los cañones debido a la profundidad, por lo que la cresta del oleaje comienza a deformarse a medida que se aproxima a la costa. Considerando que la energía del oleaje se propaga de manera perpendicular a la cresta de la ola, se presenta una concentración de energía en las zonas en donde se origina la refracción, ocasionando diferencias significativas en

la altura de la ola de una región a otra (zonas más oscuras en las figuras 4, 5 y 6)

Durante el periodo de mayor presencia de oleaje proveniente del NWW, que corresponde a los meses de enero y febrero, en el frente deltaico se observan alturas significativas similares a las estimadas para el resto del año ( $H < 2.0\text{m}$ ) (Figura 6). Los procesos de refracción-difracción y

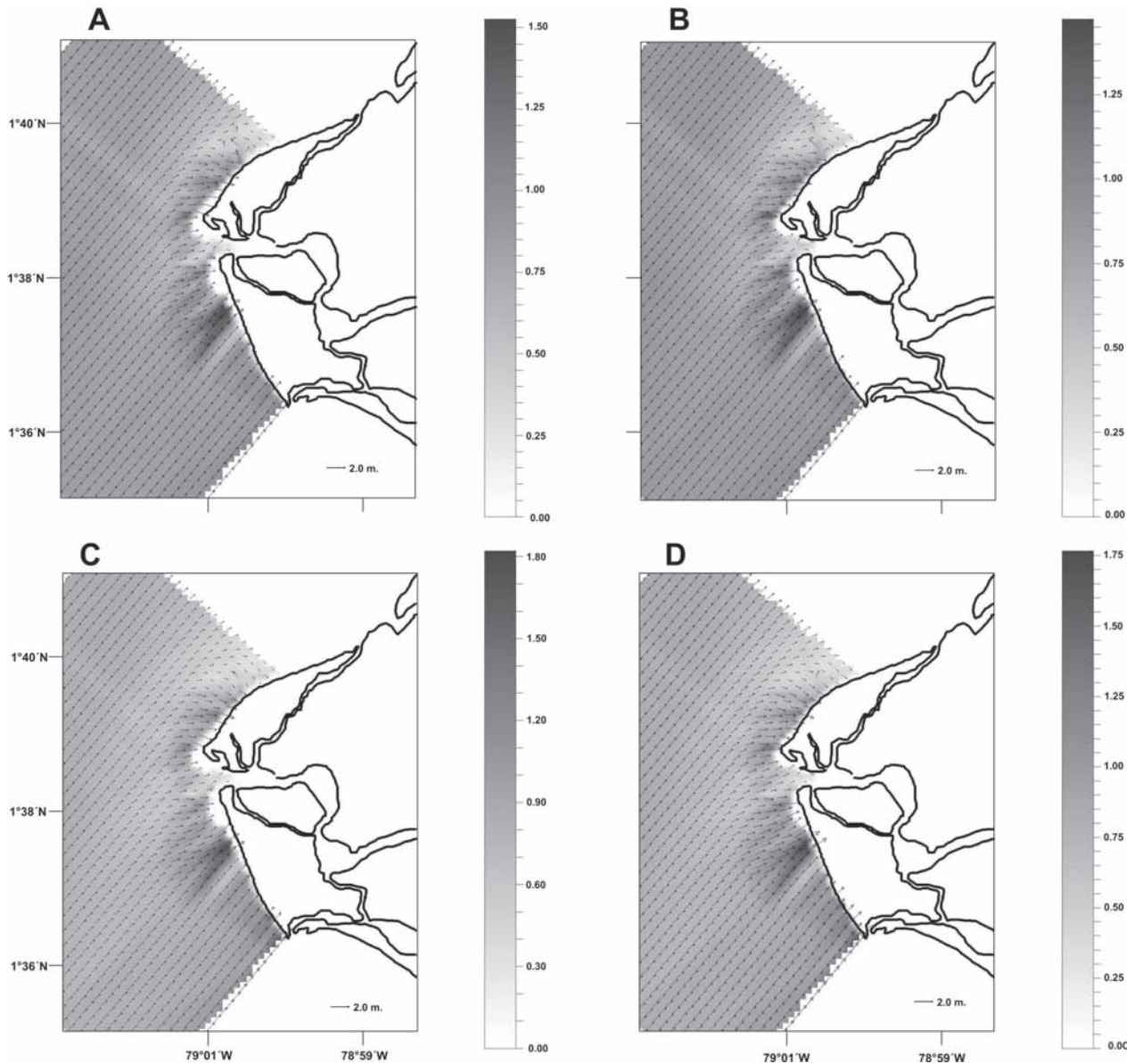


Figura 4. Vectores de propagación y magnitud del oleaje ( $H_s$ ) en la plataforma deltaica del río Mira para diferentes estados de mar definidos a partir de la dirección predominante del oleaje, la altura significativa, el período pico y el nivel de marea de referencia ( $D_p$ ,  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $h$ ). Casos de propagación: (A)  $220^\circ$ , 0.87m, 13s, 2.6m; (B)  $220^\circ$ , 0.87m, 13s, 3.8m; (C)  $220^\circ$ , 0.87m, 16s, 2.6m; (D)  $220^\circ$ , 0.87m, 16s, 3.8m. El oleaje fue propagado en un conjunto de mallas anidadas desde una profundidad de 300m. La intensidad de la escala de colores es proporcional a la magnitud de la altura significativa (m)



asomeramiento tienen una intensidad equivalente a la que se presenta durante las demás temporadas del año (abril - diciembre). Sin embargo, en la barra ubicada al norte de la desembocadura del río Mira se intensifican los procesos de asomeramiento y refracción muy cerca de la línea de costa, ya que en este sector la batimetría es prácticamente paralela a la dirección de propagación NWW (Figura 6)

## DISCUSIÓN

La implementación de modelos numéricos en áreas que no cuentan con registros instrumentales permanentes o de alta resolución constituye una herramienta útil para la toma de decisiones en

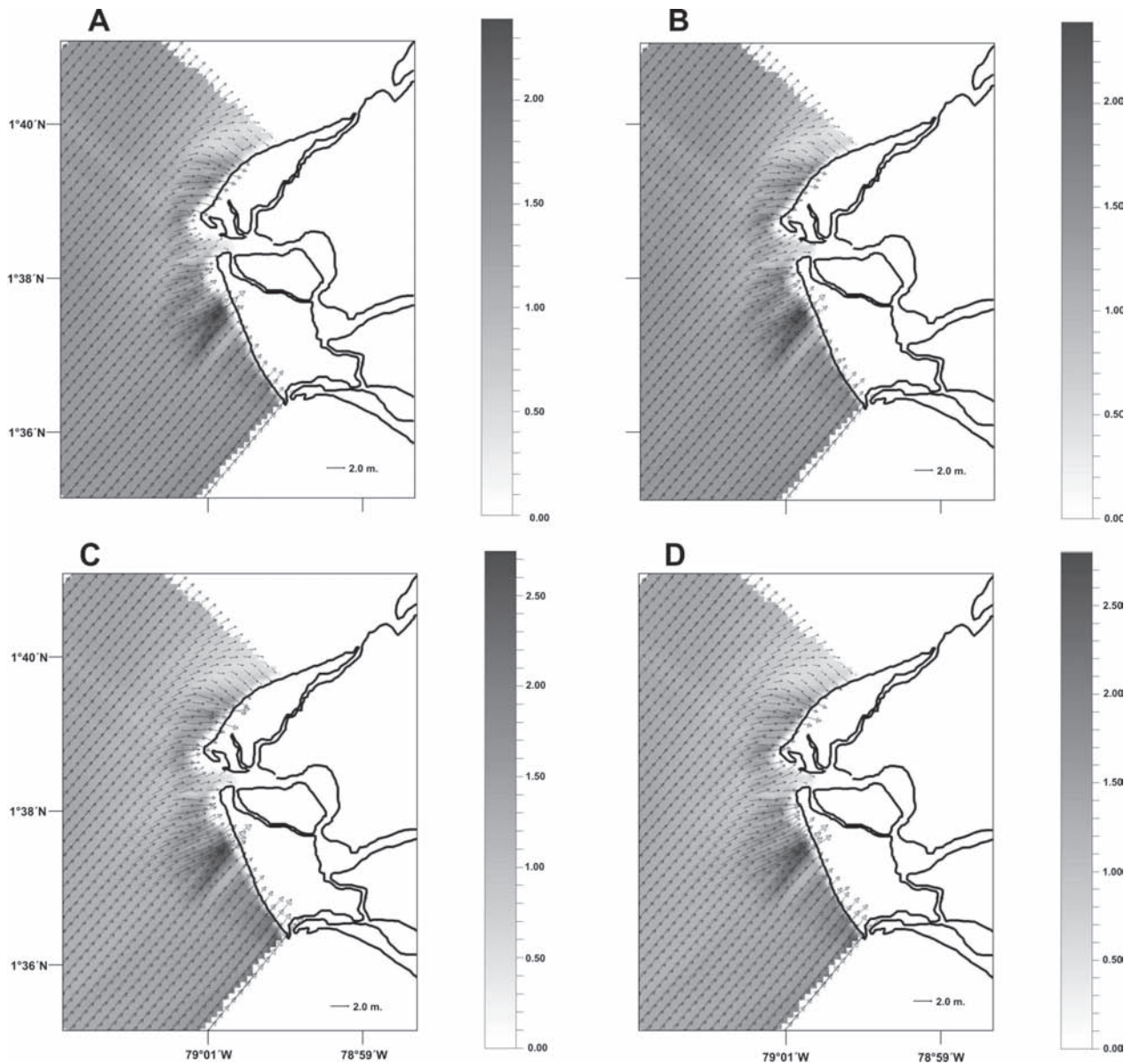


Figura 5. Vectores de propagación y magnitud del oleaje ( $H_s$ ) en la plataforma deltaica del río Mira para diferentes estados de mar definidos a partir de la dirección predominante del oleaje, la altura significativa, el periodo pico y el nivel de marea de referencia ( $D_p$ ,  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $h$ ). Casos de propagación: (A)  $220^\circ$ , 1.45m, 13 s, 2.6m; (B)  $220^\circ$ , 1.45m, 13s, 3.8m; (C)  $220^\circ$ , 1.45m, 16s, 2.6m; (D)  $220^\circ$ , 1.45m, 16s, 3.8m. El oleaje fue propagado en un conjunto de mallas anidadas desde una profundidad de 300 m. La intensidad de la escala de colores es proporcional a la magnitud de la altura significativa (m)



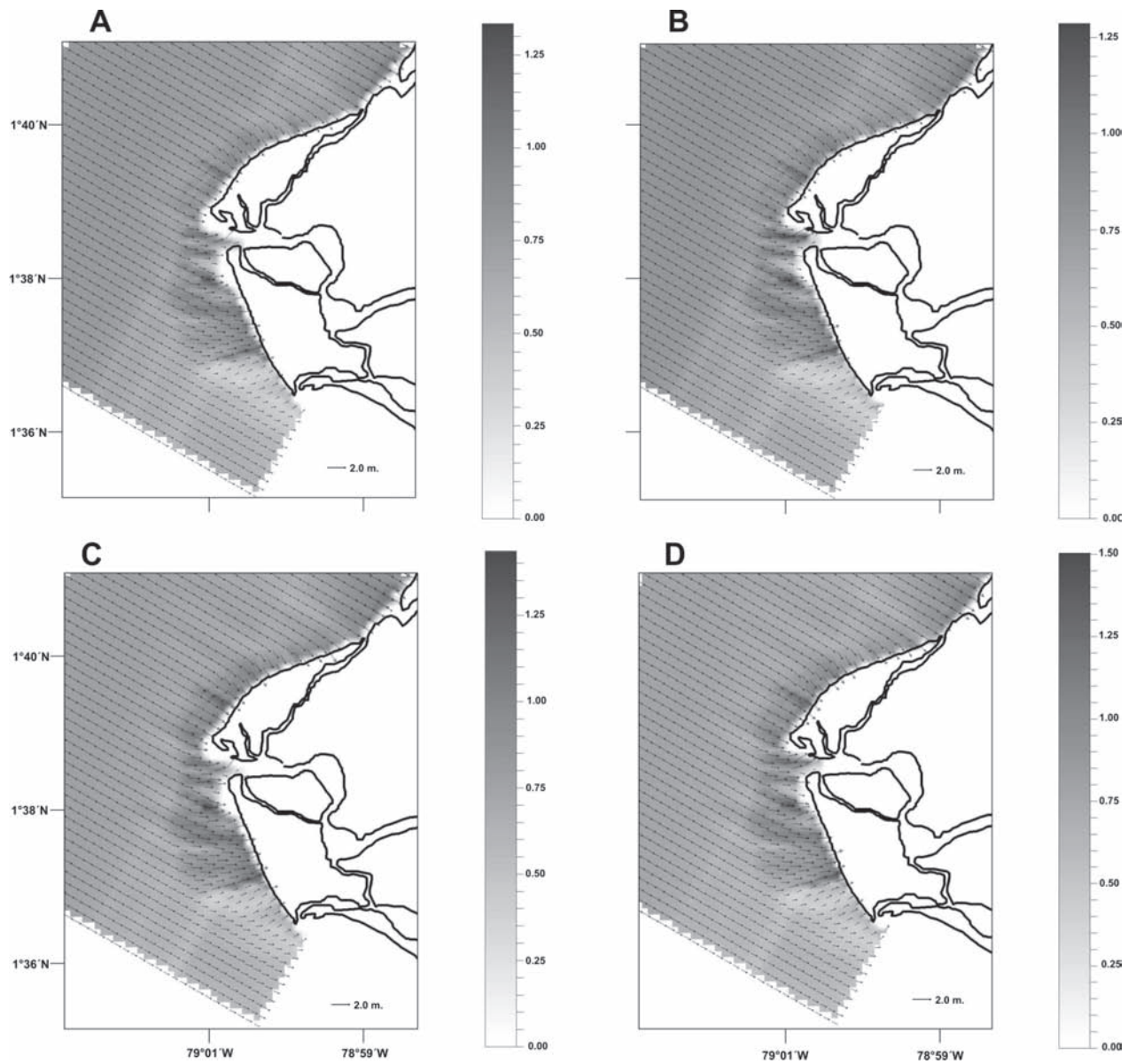


Figura 6. Vectores de propagación y magnitud del oleaje ( $H_s$ ) en la plataforma deltaica del río Mira para diferentes estados de mar definidos a partir de la dirección predominante del oleaje, la altura significativa, el periodo pico y el nivel de marea de referencia ( $D_p$ ,  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $h$ ). Casos de propagación: (A)  $300^\circ$ , 0.78m, 13s, 2.6m; (B)  $300^\circ$ , 0.78m, 13s, 3.8m; (C)  $300^\circ$ , 0.78m, 16s, 2.6m; (D)  $300^\circ$ , 0.78m, 16s, 3.8m. El oleaje fue propagado en un conjunto de mallas anidadas desde una profundidad de 300 m. La intensidad de la escala de colores es proporcional a la magnitud de la altura significativa (m)

los campos de ordenamiento territorial de zonas costeras, preservación de ecosistemas costeros y prevención frente a desastres naturales de origen marino. A partir de los resultados del modelo de propagación se generan los regímenes medio y extremal de oleaje. El análisis estadístico de los casos propagados permite obtener los coeficientes

de propagación que luego son aplicados a la serie original de datos de oleaje en aguas profundas (Tabla I). Finalmente, la serie ajustada de oleaje en aguas profundas se propaga sobre puntos de interés en la costa utilizando técnicas de simulación de Montecarlo para obtener los regímenes medio y extremal de oleaje.

La generación de regímenes sintéticos de nivel del mar y oleaje incide de manera directa en la estimación de la línea de más alta marea en áreas de interés. En Colombia, el concepto de línea de más alta marea tiene implicaciones legales y económicas relacionadas con la ocupación de bienes de uso público, el otorgamiento de concesiones, el desarrollo de infraestructura costera y portuaria, y la explotación de recursos naturales. Además, por medio de los regímenes medios y extremos se pueden definir cotas para diferentes escenarios de inundación, lo que constituye un elemento determinante en la elaboración de planes de prevención de desastres y en la implementación de medidas para disminuir la vulnerabilidad de la población (*i.e.* Gornitz *et al.*, 1994)

En otro contexto, el conocimiento de los regímenes medio y extremal del nivel del mar permitirá analizar la respuesta del sistema deltaico del río Mira frente a procesos climático - oceanográficos y anomalías quasi-periódicas. Morton *et al.* (2000) y Restrepo *et al.* (2002) han documentado la relación existente entre la manifestación oceanográfica de El Niño en las costas del Pacífico central colombiano y la ocurrencia de fenómenos de sobrelavado y erosión costera acelerada. Para el delta del río Mira, según los datos de nivel relativo del mar en la estación mareográfica de Tumaco, las anomalías de altos niveles del mar en la serie de tiempo 1953 - 2000, con valores entre -10 y 40 cm, muestran buena coherencia con las anomalías extremas del Índice de Oscilación del Sur (SOI) correspondientes a los periodos El Niño (e.g. 1982 - 1983 y 1997 - 1998) (Restrepo y López, 2007)

De igual forma, la información sobre el oleaje incidente puede ser analizada en el contexto de la hidrodinámica del sistema con el fin de establecer relaciones con los procesos erosivos que ocurren en el delta. Los datos de propagación de oleaje generados por medio del modelo Oluca SP pueden ser utilizados para estimar campos de corrientes inducidas por oleaje, con el fin de acoplarlos a un modelo morfodinámico de corto plazo para la zona de rompientes. Este modelo evalúa la evolución morfológica de una playa en planta sometida a la acción de unas condiciones de oleaje específicas, resolviendo las ecuaciones de flujo de sedimentos dentro de la zona de rompientes, así como los cambios en la

batimetría asociados a las variaciones espaciales del transporte de sedimentos (GIOC, 2002b)

## CONCLUSIONES

Se implementaron modelos numéricos de propagación de marea, propagación y refracción de oleaje que contribuyen a la caracterización oceanográfica y física del sistema deltaico del río Mira. En el caso del nivel del mar, los resultados del modelo de propagación permitieron generar regímenes medios y extremos en puntos de interés en la costa y obtener estadísticos que describen la dinámica de las mareas en el frente deltaico. Por su parte, el modelo de propagación y refracción de oleaje sirvió para evaluar la interacción del oleaje con el frente deltaico y la línea de costa, identificar zonas de concentración de energía de oleaje y estimar la altura del oleaje en profundidades definidas. De esta forma es posible establecer relaciones entre procesos oceanográficos y geomorfológicos en el sistema deltaico. Además, los resultados del modelo de propagación pueden ser empleados para generar los regímenes medio y extremal de oleaje en puntos de interés, que junto con los regímenes de nivel del mar permiten obtener cotas para diferentes escenarios de inundación.

En este contexto, la implementación y validación de modelos numéricos en áreas que no cuentan con registros instrumentales permanentes o de alta resolución constituye un elemento de gran importancia en el manejo integrado de zonas costeras; presentan gran utilidad para predecir el comportamiento de los sistemas costeros, conocer regionalmente los procesos dinámicos que operan en deltas y costas bajas, y, con base en los modelos numéricos, identificar el grado de vulnerabilidad ante amenazas naturales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) por la información suministrada sobre caudales en el río Mira (Convenio marco de cooperación entre el IDEAM y la Dirección General Marítima, DIMAR)

## LITERATURA CITADA

- Andersen, O. B., P. L. Woodworth y R. A. Flather. 1995. Intercomparison of recent ocean tide models. *J. Geophys. Res.*, (100): 25261-25282.
- Agudelo, P. 2003. Cota de inundación del litoral Pacífico colombiano. Tesis de maestría. Universidad de Cantabria, Santander (España)
- Bird, E. C. F. 1993. Submerging coasts: the effects of a rising sea level on coastal environments. John Wiley and Sons, Chichester.
- Bird, E. C. F. 2000. Coastal geomorphology: an introduction. Wiley, Chichester.
- Bouws, E., H. Gunther y C. L. Vincent. 1985. Similarity of Wind Wave Spectrum in Finite-Depth Water, Part I: Spectral Form. *Journal of Geophysical Research*, (85): 1524 - 1530.
- Case, J. E., L. E. Durán, A. López y W. R. Moore. 1971. Tectonic investigations in western Colombia and eastern Panama. *Geological Society of America Bulletin*, (82): 2685-2712.
- Cavaleri, L. y L. H. Holthuijsen. 1998. "Wave modelling in the WISE group". *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Copenhagen*, pp. 498-508.
- Correa, I. D., 1996. Le littoral Pacifique colombien: Interdependance des agents morphostructuraux et hydrodynamiques. Ph.D. These-Geologie Marine. Université Bordeaux I, 178 pp.
- Dean, R. G. y R. A. Dalrymple. 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientist*. Englewood Cliffs: Prantice - Hall.
- Dronkers, J. J. 1964. *Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters*. North- Holland Publishing Company. Ámsterdam.
- GIOC. 2004. Determinación de los regímenes de oleaje en la costa Pacífica costarricense. Reporte Técnico elaborado para el Instituto Costarricense de Turismo. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Costa Rica, 119 pp.
- GIOC, 2002a. Documento de referencia - Dinámicas. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria, Santander, 187 pp.
- GIOC, 2002b. Modelo de Propagación de Oleaje OLUCA SP-Manual de referencia. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Universidad de Cantabria, Santander, 159 pp.
- González, J. L., L. C. Marín, J. O. Martínez y J. H. Carvajal. 1998. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Pacífico colombiano. Publicación especial del INGEMINAS, Bogotá, Colombia, pp. 75 -111.
- Gornitz, V., R. C. Daniels, T. W. White y K. R. Birdwell. 1994. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea level rise in the US southeast. *Journal of Coastal Research, Special Issue (12)*: 327-338.
- Graham, N. E. y H. F. Díaz. 2001. Evidence for Intensification of North Pacific Winter Cyclones since 1948. *Bulletin of Meteorological Society*, (82): 1869 - 1893.
- Hesp P. A. y A. D. Short. 1999. Barrier morphodynamics. *In: Short AD (ed.) Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley, pp. 307-333.
- INVEVAR. 2003. El cambio relativo del nivel del mar. *En: Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costeras colombianas (Caribe y Pacífico) y medidas para su adaptación*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Gómez de Andreis. Informe final y Atlas digital. Informe técnico (1): 62-77 (formato digital)
- Kirby, J. T. 1996. Nonlinear, dispersive long waves of variable depth. *In: Hunt (ed.) Gravity Waves in Water of Variable Depth*. J.N. Advances in Fluid Mechanics. Computational Mechanics Publications.
- Kirby, J. T. y H. T. Özkan. 1994. Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. Ref/Dif s version 1.1. Documentation

- and User's Manual. Report No. CACR-94-04. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Kirby, J. T. y R. A. Dalrymple. 1986a. Modelling waves in surfzones and around Islands. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, (112): 78-93.
- Kirby, J. T. y R. A. Dalrymple. 1986b. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. *Coastal Engineering*, (9): 545-561.
- Kjerfve, B. 1979. Measurement and analysis of water current, temperature, salinity, and density. In: Dyer, K. R. (Ed.). *Estuarine hydrography and sedimentation*. Cambridge University Press, 230 pp.
- Kjerfve, B. 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. UNESCO/UNDP Regional Mangrove Project RAS 79/002 and RAS/86/120. Occasional paper, 79 pp.
- Komar, P. 1998. *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edn.
- Leendertse, J. J. 1970. Water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas. Principles of computation (1). RAND Corp., Santa Monica, Calif. (USA). Technical Report. 71 pp.
- LOICZ. 1995. Science Plan and Implementation Strategy. Land Ocean Interaction in the Coastal Zone. Netherlands, 60 pp.
- Martínez, J. O., J. L. González, O. H. Pilkey y W. J. Neal. 1995. Tropical Barrier Islands of Colombia's Pacific Coast. *Journal of Coastal Research*, (11): 432-453.
- Morton, R. A., J. L. González, G. I. López e I. D. Correa. 2000. Frequent non-storm washover of barrier islands, Pacific coast of Colombia. *Journal of Coastal Research*, (16): 82-87.
- O'Donnell, J. 1990. Surface fronts in estuaries: a review. *Estuaries*, (16): 12-39.
- Oey, L. y G. L. Mellor. 1993. Subtidal variability of estuarine outflow, plume and coastal current: a model study. *Journal of Physical Oceanography*, (23): 164-171.
- Otero, L., 2005. Metodología para la determinación de la línea de más alta marea en zonas donde no se cuentan con registros instrumentales. Dirección General Marítima. Reporte Técnico, 59 pp.
- Pugh, D. T., 1987. *Tides, surges, and sea-level: a handbook for engineers and scientists*. John Wiley and Sons, New York, 472 pp.
- Restrepo, J. C. 2006. Aporte de caudales de los ríos Baudó, San Juan, Patía y Mira a la cuenca Pacífica colombiana. *Boletín Científico CCCP*, (13): 17-32.
- Restrepo, J. D. y B. Kjerfve. 2000. Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Rio San Juan. *Journal of Geology*, (108): 17-33.
- Restrepo, J. D. y B. Kjerfve. 2002a. Oceanografía del Delta del San Juan: Mareas, Circulación, Dispersión Salina y Relaciones Ambientales. En: Correa, I. D. y J. D. Restrepo (eds.), *Geología y Oceanografía del Delta del Río San Juan*, Litoral Pacífico de Colombiano. Fondo Editorial U. EAFIT y COLCIENCIAS, pp 57-90.
- Restrepo, J. D. y B. Kjerfve. 2002b. The San Juan Delta, Colombia: Tides, Circulation, and Salt Dispersion. *Continental Shelf Research*, (22): 1249-1267.
- Restrepo, J. D. y B. Kjerfve. 2004. The Pacific and Caribbean Rivers of Colombia: Water Discharge, Sediment Transport and Dissolved Loads. In: Lacerda, L., R. Santelli, E. Duursma y J. Abrao. (Eds.). *Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments*. Springer Verlag, (Berlín): 169-187.
- Restrepo, J. D. y S. López. 2007. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean Deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*.

- Restrepo, J. D., B. Kjerfve, I. D. Correa y J. González. 2002. Morphodynamics of a high discharge tropical delta, San Juan river, Pacific coast of Colombia. *Marine Geology*, (192): 355-381.
- Simionato, C. G., W. Dragani, V. Meccia y M. Núñez. 2004. A numerical study of the barotropic circulation of the Rio de la Plata Estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, (61): 261-273.
- Thornton, E. B. y R. T. Guza. 1983. Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, (88): 5925-5938.
- Tolman, H. L. 1992. Effects on numerics on a physics of a third-generation wind-wave model. *Journal Physical Oceanographic*, (22): 1095-1111.
- Tolman, H. L. 2002. Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Computing*, (28): 35-52.
- Tolman, H. L. y D. Chalikov. 1994. Source terms in a third-generation wind-wave model. *Journal Physical Oceanographic*, (26): 2497-2518.
- Ulses, C., C. Grenz, P. Marsaleix, E. Schaaff, C. Estournel, V. Meulé y C. Pinazo. 2005. Circulation in a semi-enclosed bay under influence of strong freshwater input. *Journal of Marine Systems*, (56): 113-132.
- USGS. 2002. Shore and Beach Manual. *Water Wave Mechanics*. United States Geological Survey. Chapter 2: Meteorology and Wave Climate, 77 pp.
- West, R. C. 1957. The Pacific lowlands of Colombia - A Negroid Area of the American Tropics. Baton Rouge, Louisiana University Press, 278 pp.