

# DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN MEDIO DE OLEAJE EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO LEÓN

## DETERMINATION OF THE WAVE MEAN REGIME IN THE MOUTH OF LEON RIVER

OSCAR ALVAREZ-SILVA

*M.Ing, Doctorando en Ciencias del Mar, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, oaalvare@unal.edu.co*

ANDRÉS F. OSORIO

*Ph.D, Profesor Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, afosorioar@unal.edu.co*

ANDRÉS GÓMEZ-GIRALDO

*Ph.D, Profesor Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, eagomezgi@unal.edu.co*

Recibido para revisar Mayo 11 de 2011, Aceptado Enero 20 de 2012, versión final Febrero 15 de 2012

**RESUMEN:** La desembocadura del río León es una importante vía fluvial en el Urabá Antioqueño. Para optimizar el desarrollo de las actividades alrededor las desembocaduras es fundamental conocer los procesos hidrodinámicos que ocurren en el sistema, entre ellos el oleaje. El régimen medio de oleaje en la zona se determinó a partir de simulaciones numéricas de escenarios que representan el régimen medio de viento en la Bahía Colombia. Se utilizó el modelo SWAN para simular el oleaje en la Bahía y el modelo SMC para simular el oleaje en detalle alrededor de la desembocadura y las corrientes asociadas a la rotura del oleaje. Los resultados muestran que el oleaje de fondo tiene poca influencia en el oleaje al interior de la Bahía Colombia y que el régimen de oleaje y corrientes se ve fuertemente influenciado por la variabilidad intra-anual del régimen de viento en la zona de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** Bahía Colombia, simulación numérica, régimen medio, oleaje local, oleaje de fondo.

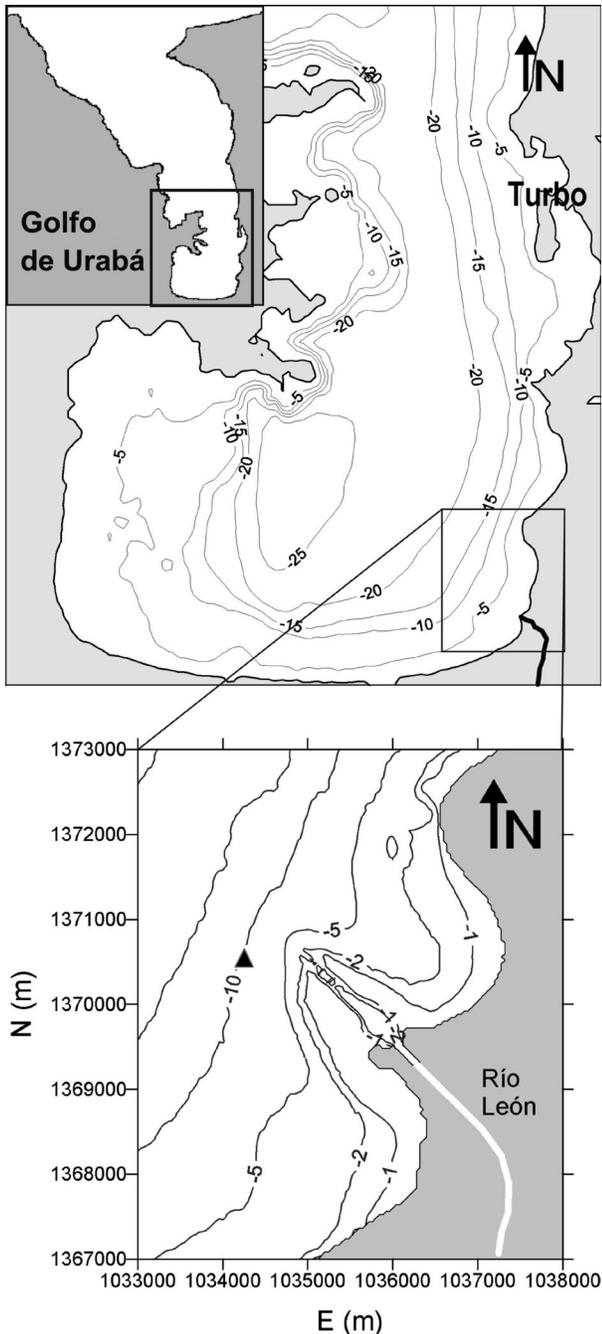
**ABSTRACT:** The León River mouth is a major waterway in Urabá region. To optimize the activities around the mouth it is essential to understand the hydrodynamic processes taking place in the system, including waves. The average wave regime was determined from numerical simulations of different scenarios of the wind regime in the Colombia Bay. SWAN model was used to simulate the waves in the bay and SMC model was used to simulate the waves in detail around the mouth and the currents associated with breaking waves. The results show that the swell waves have little influence on the wave regime into the Colombia Bay and that the wave average regime and currents are strongly influenced by the intra-annual variability of the wind regime in the study area.

**KEYWORDS:** Colombia Bay, numerical simulation, mean regime, sea waves, swell waves.

### 1. INTRODUCCIÓN

La desembocadura del río León se encuentra ubicada en el extremo sureste de la Bahía Colombia en el Golfo de Urabá, litoral Caribe Colombiano (Figura 1). Esta desembocadura es la vía de transporte fluvial y marítimo más importante de la región bananera de Urabá. Para optimizar el desarrollo de las actividades que se realizan en el área de influencia de la desembocadura,

se debe entender los procesos hidrodinámicos que se desarrollan allí. Uno de los forzadores hidrodinámicos más importantes en los sistemas costeros es el oleaje, que produce oscilaciones en la superficie del agua y al acercarse a la costa rompe al sentir el fondo generando corrientes en sentido longitudinal al frente de onda.



**Figura 1.** Desembocadura del río León y su ubicación. Sistema de coordenadas Colombia Zona Occidental. El triángulo muestra el punto de evaluación de resultados.

El objetivo de este artículo es determinar el régimen medio de oleaje y las corrientes por rotura asociadas en la desembocadura del río León, teniendo en cuenta la fuerte variabilidad estacional del régimen de vientos en la zona. Para esto se propone una metodología basada en simulación de escenarios representativos de los

forzadores medios, que puede ser aplicada en zonas con información escasa, como es el caso de gran parte del litoral en Colombia y la región.

## 2. ZONA DE ESTUDIO

La desembocadura del río León es un sistema morfodinámico de tipo delta que se caracteriza por la acumulación del sedimento proveniente del río en la zona de intersección entre el río y el mar. En el caso del río León, gran parte del delta permanece sumergido y se extiende más de 1.5km desde la línea de costa hacia el interior de la Bahía Colombia, en una configuración alargada influenciada por la constante operación de dragado de un canal navegable central que allí se desarrolla (Figura 1).

El fenómeno físico que más influencia la climatología intra-anual de esta zona de Colombia es la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) [1]. La migración de la ZCIT determina la existencia de dos épocas climáticas muy marcadas a lo largo del año en el litoral Caribe Colombiano: la época húmeda entre abril y noviembre y la época seca entre diciembre y marzo [2].

La mejor información disponible del viento de la zona de estudio es la registrada por la estación Turbo, propiedad del International Station Meteorological Climate Summary (ISMCS), la cual estuvo ubicada en las coordenadas  $8^{\circ}04'30''N - 76^{\circ}44'20''W$ , en el sector de Punta Las Vacas en el Municipio de Turbo, Antioquia, y tiene registros entre enero de 1949 y mayo de 1984. Las rosas de viento estacionales generadas a partir de dicha información se muestran en la Figura 2.

Según esta información, en la época seca el viento es fuerte y constante proveniente principalmente del norte, del nornoroeste y del noroeste con probabilidades de ocurrencia del 43.3%, 17.1% y 10.1% respectivamente y con un 16.6% de probabilidad de calma (no viento). Por otra parte, en la época húmeda los vientos son débiles y de direcciones variables con un 21.7% de probabilidad de ocurrencia de vientos del sur, seguido por 13.6% de probabilidad de viento del norte y un periodo de calma del 32.0%. En cuanto a la marea, se presenta un régimen micromareal semidiurno, al igual que en otras regiones del Caribe Colombiano [3], con amplitud máxima de 0.4m [4].

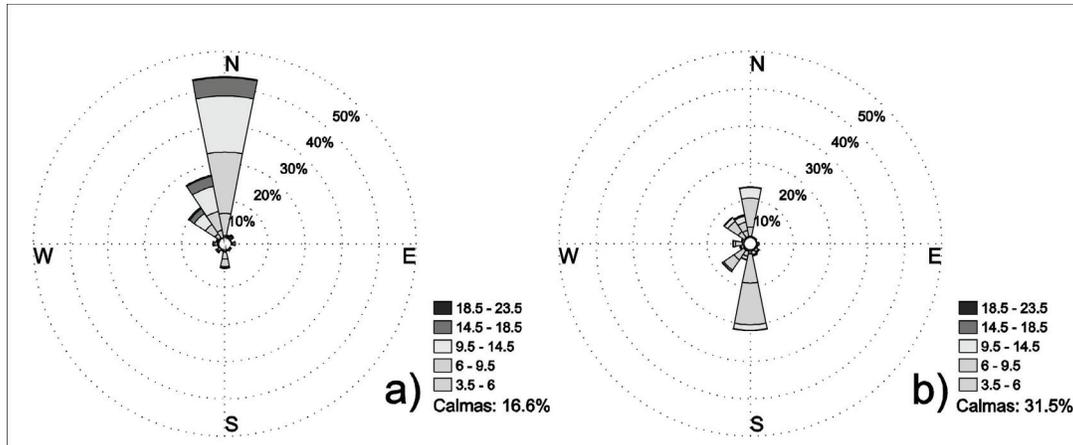


Figura 2. Rosa de vientos para la estación Turbo. a) época seca y b) época húmeda. La dirección indica de donde viene el viento.

### 3. METODOLOGIA

Para determinar el régimen medio del oleaje en la desembocadura del río León, primero se caracterizó el oleaje general de la Bahía Colombia por medio de simulaciones numéricas del oleaje de fondo proveniente del Mar Caribe y del oleaje local que se genera por efecto del viento en la Bahía Colombia. Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo con el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft [5]. Este modelo incluye ecuaciones que simulan la propagación del oleaje de fondo, la generación y propagación de oleaje producido por el viento local y la fricción con el fondo. Además reproduce adecuadamente los procesos de refracción, asomeramiento y disipación de energía por rotura. El modelo fue calibrado y validado para la zona de estudio, los detalles del proceso son presentados en [6].

En principio se determinó la importancia relativa del oleaje local y de fondo simulando, por una parte, los vientos de 50 años de periodo de retorno provenientes del N, NNW y NW que son las direcciones en que el viento alcanza mayores velocidades (Figura 2); y por otra parte, se simularon los mismos casos de viento incluyendo el oleaje de fondo de 50 años de periodo de retorno, el cual se obtuvo a partir de las trayectorias de huracanes reportadas por la

NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Agency), entre 1950 y 2006. Con esta información se estimó la altura de ola producida por el paso de huracanes en la coordenada 9°N; 77°W, a las afueras

del Golfo de Urabá, utilizando el método de Young [7], según el cual:

$$H_s^{max} = 0.0016 * \left[ \frac{V_{max}^2 * X}{g} \right]^2 \tag{1}$$

donde  $H_s^{max}$  es la altura de ola significativa producida por el paso del huracán,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $V_{max}$  es la velocidad máxima de viento producida por el huracán y  $X$  es la mínima distancia entre el fetch geográfico y la distancia de máximo desarrollo del oleaje ( $X_{full}$ ) calculada como

$$X_{full} = 23123 * V_{max}^2 * g \tag{2}$$

Con las simulaciones preliminares se encontró que en la Bahía Colombia es mucho más significativo el oleaje local que el oleaje de fondo debido a que la energía del oleaje de fondo se disipa a medida que se propaga hacia el interior del Golfo de Urabá. Por tanto en la determinación del régimen medio de oleaje solo se tuvo en cuenta el oleaje local.

Para caracterizar el oleaje local se simularon los escenarios de magnitud y dirección de viento con mayor probabilidad de ocurrencia en la época seca y en la época húmeda; de esta forma se puede asumir que los casos seleccionados reproducen las condiciones medias del oleaje a escala intra-anual. Para la época seca, se seleccionaron las direcciones N, NNW y NW, cuya probabilidad sumada a los periodos de calma (periodos de velocidad de viento  $V = 0$  m/s.), representan el 87.1% de todos los eventos de viento registrados para esta época del año. Para la época húmeda se seleccionaron las direcciones N, NNW, NW,

S y SW, cuya probabilidad sumada a los periodos de calma representan el 87.9% de los vientos registrados en esta época.

Para cada dirección se propagaron las olas generadas por las velocidades de viento correspondientes al valor medio de los intervalos de velocidad mostrados en la Figura 2. Los resultados de las simulaciones se evaluaron en el punto mar a dentro de la desembocadura del río León marcado con un triángulo en la figura 1.

A partir de los resultados de alturas de ola significativa y periodo pico y de la probabilidad de ocurrencia de estas alturas y periodos, se encontraron las funciones de distribución de probabilidad que mejor se ajustaran a los resultados de las simulaciones con el fin de reconstruir el régimen medio de oleaje direccional para cada una de las dos épocas climáticas.

Una vez obtenidos el régimen medio de oleaje cerca a la desembocadura se simuló en detalle el oleaje y las corrientes de rotura en el delta del río León utilizando el modelo MOPLA desarrollado por la Universidad de Cantabria (ya que el modelo SWAN no simula las corrientes asociadas al oleaje). MOPLA, que hace parte del paquete SMC (Sistema de Modelado Costero), es un modelo de evolución morfológica para zonas costeras de esquema 2DH de corto plazo basado en procesos. MOPLA está compuesto por tres módulos: un módulo de propagación y transformación del oleaje (OLUCA), un modelo de cálculo de corrientes promediadas en la vertical (COPLA) y un módulo de transporte potencial de sedimentos y evolución morfológica (EROS). Los tres módulos del modelo MOPLA han sido validados ampliamente con mediciones de campo, pruebas de laboratorio y comparaciones con resultados de otros modelos numéricos similares [8].

El modelo MOPLA se aplicó en una zona de 2.5km x 2.0km alrededor de la desembocadura del río León con una malla de cálculo de celdas de 10m x 10m.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Importancia relativa del oleaje local y de fondo

Del análisis estadístico de los datos de viento se encontró que la velocidad del viento con 50 años de periodo de retorno para las direcciones N, NNW y NW

son 17.2m/s, 22.1m/s y 22.6m/s, respectivamente. Del análisis estadístico de las series de oleaje producido por el paso de huracanes se encontró que el oleaje de 50 años de periodo de retorno equivale a 6.3m de altura de ola (en el extremo superior de la banda de confianza) y 11.8s de periodo pico proveniente del NNW. Los resultados de estas simulaciones para el punto representado con un triángulo en la Figura 1 se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resultados de simulaciones con y sin oleaje de fondo.

Dirección del Viento	N	NNW	NW
Vel. del viento (m/s)	17.2	22.1	22.6
Hs(m) sin oleaje de fondo	1.25	1.80	1.65
Hs(m) con oleaje de fondo	1.45	1.91	1.83

En la tabla anterior se observa que el efecto del oleaje de fondo en los casos más extremos es del orden del 10% del oleaje producido por el viento local. Por tanto el oleaje de fondo no se tuvo en cuenta en la determinación del régimen medio de oleaje.

### 4.2. Régimen medio de oleaje cerca de la desembocadura

Como se mencionó en la metodología, para determinar el régimen medio de oleaje cerca de la desembocadura del río León, se simuló para las direcciones de viento con mayor probabilidad de ocurrencia las velocidades de viento correspondientes al valor medio de los intervalos de velocidad mostrados en la Figura 2. Las Tablas 2 y 3 resumen la información de los casos propagados para las épocas seca y húmeda respectivamente y presentan los resultados de altura de ola y periodo pico hallados por el modelo SWAN en el punto representado con un triángulo en la Figura 1.

A partir de los resultados de alturas de ola y periodo pico y de la probabilidad de ocurrencia de estas alturas y periodos entre los eventos de cada dirección (\*\*), se encontraron las funciones de distribución de probabilidad que mejor se ajustan a los resultados de las simulaciones con el fin de reconstruir el régimen medio de oleaje direccional para cada una de las dos épocas climáticas.

**Tabla 2.** Resultados de las simulaciones de los casos seleccionados para determinar el régimen medio de oleaje en época seca.

	Intervalos vel. viento (m/s)	0.5 – 3.5	3.5 – 6	6 – 9.5	9.5 – 14.5	14.5 -18.5	18.5 – 23.5	
Caso # y dirección	Marca de clase vel. viento (m/s)	2.1	4.6	7.6	11.8	16.4	21	% total por dirección
Caso 1 N	prob (%) *	0.5	6.1	16.4	15.1	4.9	0.3	43.3
	prob N (%) **	1.2	14.1	37.9	34.9	11.3	0.7	
	Hs (m)	0	0.2	0.37	0.71	1.16	1.61	
	Tp (s)	1.5	2.2	2.7	3.6	4.4	4.8	
Caso 2 NW	prob (%) *	0.2	1.3	3.1	3.6	1.5	0.4	10.1
	prob NW (%) **	2	12.9	30.7	35.6	14.9	4	
	Hs (m)	0	0.19	0.34	0.61	1.02	1.43	
	Tp (s)	1.5	1.9	2.5	3	3.6	4.4	
Caso 3 NNW	prob (%) *	0	2.1	5.1	6.9	2.7	0.3	17.1
	prob NNW (%) **	0	12.3	29.8	40.4	15.8	1.8	
	Hs (m)	--	0.19	0.37	0.73	1.16	1.6	
	Tp (s)	1.5	2	2.7	3.6	4.4	4.8	
<b>periodos de calma</b>								16.6

\* Probabilidad de ocurrencia de los eventos de magnitud y dirección del viento entre todos los eventos registrados en la época seca.

\*\* Probabilidad de ocurrencia de los eventos de magnitud del viento entre los eventos registrados en cada dirección respectiva en la época seca.

**Tabla 3.** Resultados de las simulaciones de los casos seleccionados para determinar el régimen medio de oleaje en época húmeda.

	Intervalos vel. viento (m/s)	0.5 – 3.5	3.5 – 6	6 – 9.5	9.5 – 14.5	14.5 -18.5	18.5 – 23.5	
Caso # y Dirección	Marca de clase vel. viento (m/s)	2.1	4.6	7.6	11.8	16.4	21	% total por dirección
Caso 4 N	prob (%) *	0.3	2.5	7.8	2.8	0.2	0	13.6
	prob N (%) **	2.2	18.4	57.4	20.6	1.5	0	
	Hs (m)	0	0.2	0.37	0.71	1.16	--	
	Tp (s)	1.5	2.2	2.7	3.6	4.4	--	
Caso 5 NW	prob (%) *	0.2	2.1	3.3	1.1	0.2	0	6.9
	prob NW (%) **	2.9	30.4	47.8	15.9	2.9	0	
	Hs (m)	0	0.19	0.34	0.61	1.02	--	
Caso 6 NNW	prob (%) *	0.3	1.7	2.3	1.6	0.3	0.1	6.3
	prob NNW (%) **	4.8	27	36.5	25.4	4.8	1.6	
	Hs (m)	0	0.19	0.37	0.73	1.16	1.6	
	Tp (s)	1.5	2	2.7	3.6	4.4	4.8	
Caso 7 S	prob (%) *	1.1	7.8	11.2	1.5	0.1	0	21.7
	prob S (%) **	5.1	35.9	51.6	6.9	0.5	0	
	Hs (m)	0	0.1	0.23	0.42	0.64	--	
	Tp (s)	1.5	1.5	1.7	2.5	3	--	
Caso 8 SW	prob (%) *	0.4	3.2	3.3	0.4	0.1	0	7.4
	prob SW (%) **	5.4	43.2	44.6	5.4	1.4	0	
	Hs (m)	0	0.18	0.29	0.5	0.79	--	
	Tp (s)	1.5	1.9	2.2	2.7	3.3	--	
<b>periodos de calma</b>								32

\* Probabilidad de ocurrencia de los eventos de magnitud y dirección del viento entre todos los eventos registrados en la época húmeda.

\*\* Probabilidad de ocurrencia de los eventos de magnitud del viento entre los eventos registrados en cada dirección respectiva en la época húmeda.

De la revisión de la literatura se estableció que las distribuciones de probabilidad Lognormal, Weibull y Rayleigh son las que mejor se ajustan a las variables altura de ola y periodo pico [9]. Tras la comparación de las tres funciones de probabilidad con los datos simulados se encontró que la distribución Rayleigh se ajusta mejor a los resultados de altura de ola significativa mientras que la distribución Weibull se ajusta mejor los resultados de periodo pico. La distribución Rayleigh, es de la forma:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{H_s}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

donde  $H_s$  es la altura de ola significativa y  $\sigma$  la desviación estándar de los datos. La distribución Weibull, es de la forma:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{T_p}{c}\right)^K\right] \quad (4)$$

donde  $T_p$  es el periodo pico,  $c$  es el parámetro de forma y  $K$  el parámetro de escala. La Tabla 4 contiene los valores de los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad Rayleigh y Weibull para cada época climática y dirección.

**Tabla 4.** Parámetros de ajuste de las funciones de distribución de probabilidad del régimen medio de altura de ola y periodo pico.

Caso #	Época Seca			Época Húmeda				
	1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetro	N	NW	NNW	N	NW	NNW	S	SW
$\sigma$ (m)	0.325	0.224	0.101	0.128	0.201	0.26	0.337	0.37
$K$	4.9625	6.088	7.304	8.437	6.12	4.181	5.17	4.968
$C$ (m)	3.417	3.007	1.791	2.197	2.584	2.999	3.065	3.576

### 4.3. Régimen medio y corrientes de detalle

Se escogió para simular el régimen medio de oleaje detallado y las corrientes, la altura de ola significativa superada doce horas al año ( $H_{s12}$ ) para cada una de las direcciones que representan el régimen medio de oleaje utilizando el modelo MOPLA-SMC. El  $H_{s12}$  es un

parámetro estadístico ampliamente utilizado en diseños en la Ingeniería de Costas. La Tabla 5 muestra los valores de  $H_{s12}$  con sus respectivos periodos pico hallados de los ajustes de probabilidad del régimen medio (Tabla 4). También muestra la probabilidad de ocurrencia de los eventos de oleaje con respecto a los eventos de cada época climática y con respecto a todos los eventos del año.

**Tabla 5.**  $H_{s12}$  para los casos que componen el régimen medio.

Caso #	Época Seca			Época Húmeda				
	1	2	3	4	5	6	7	8
Dirección	N	NNW	NW	N	NNW	NW	SW	S
$H_{s12}$ (m)	0.85	0.97	0.88	0.59	0.68	0.53	0.34	0.26
$T_{p_{H_{s12}}}$ (s)	4.4	4.6	3.9	3.7	4	3.2	2.5	2.1
Prob. época (%)	43.3	17.1	10.1	13.6	6.3	6.9	7.4	21.7
Prob. anual (%)	14.4	5.7	3.4	9.1	4.2	4.6	4.9	14.5

La Figura 3 muestra los resultados de las propagaciones de los casos de oleaje mostrados en la Tabla 5 y la Figura 4 muestra las corrientes de rotura asociadas. En estas figuras se observa que el oleaje tiene mayor magnitud en la parte extrema del delta y disminuye a medida que se acerca a la boca del río. Esto produce gradientes de altura de ola a lo largo de las barras del delta que generan corrientes en sentido longitudinal al delta. Se observa además que el oleaje y las corrientes por rotura son mayores en la época seca, para la época

húmeda el escenario más probable (caso 8) es en el que se generan el menor oleaje y las menores corrientes.

Aunque en la mayor parte de los casos del régimen medio, el oleaje proviene del cuadrante norte –noroeste, el oleaje y las corrientes tienen magnitudes similares en la parte externa de las barras norte y sur debido a que este oleaje se refracta al acercarse al delta y se reacomoda para entrar de frente sobre ambas barras.

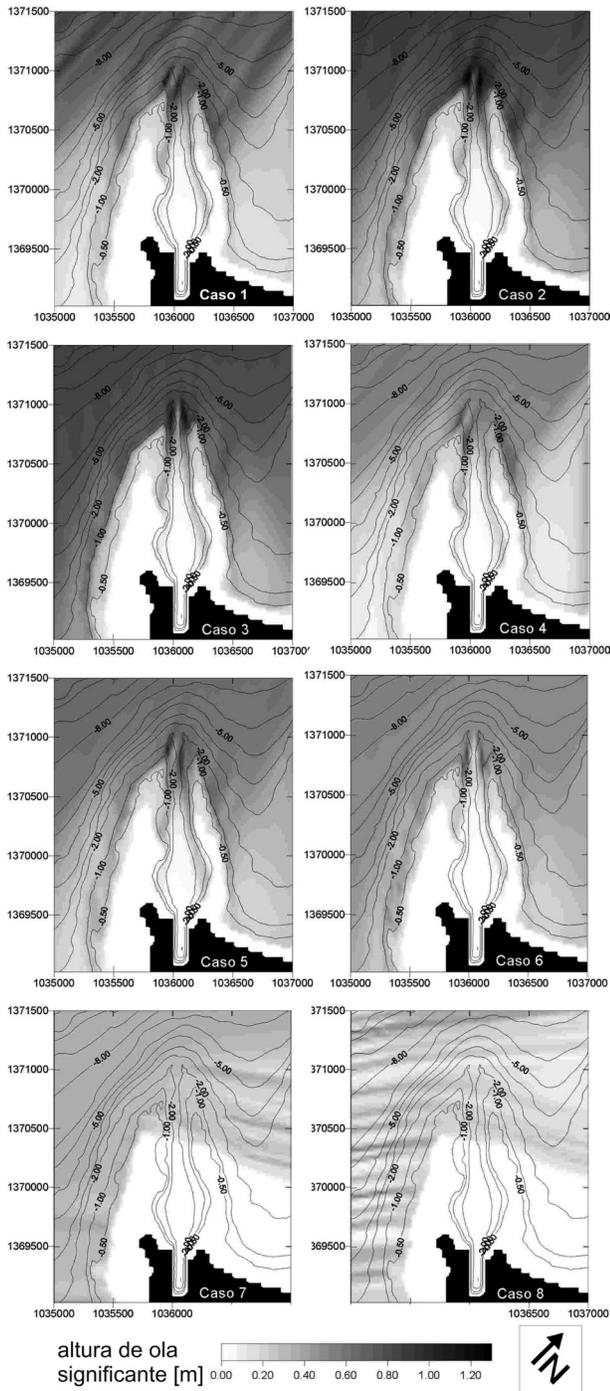


Figura 3. Resultados de las simulaciones de oleaje para los casos que componen el régimen medio.

### 5. CONCLUSIONES

Se estudió el efecto relativo del oleaje local y de fondo en la Bahía Colombia. Uno de los resultados más importantes encontrados es la fuerte influencia del viento en el oleaje de la Bahía Colombia y el casi

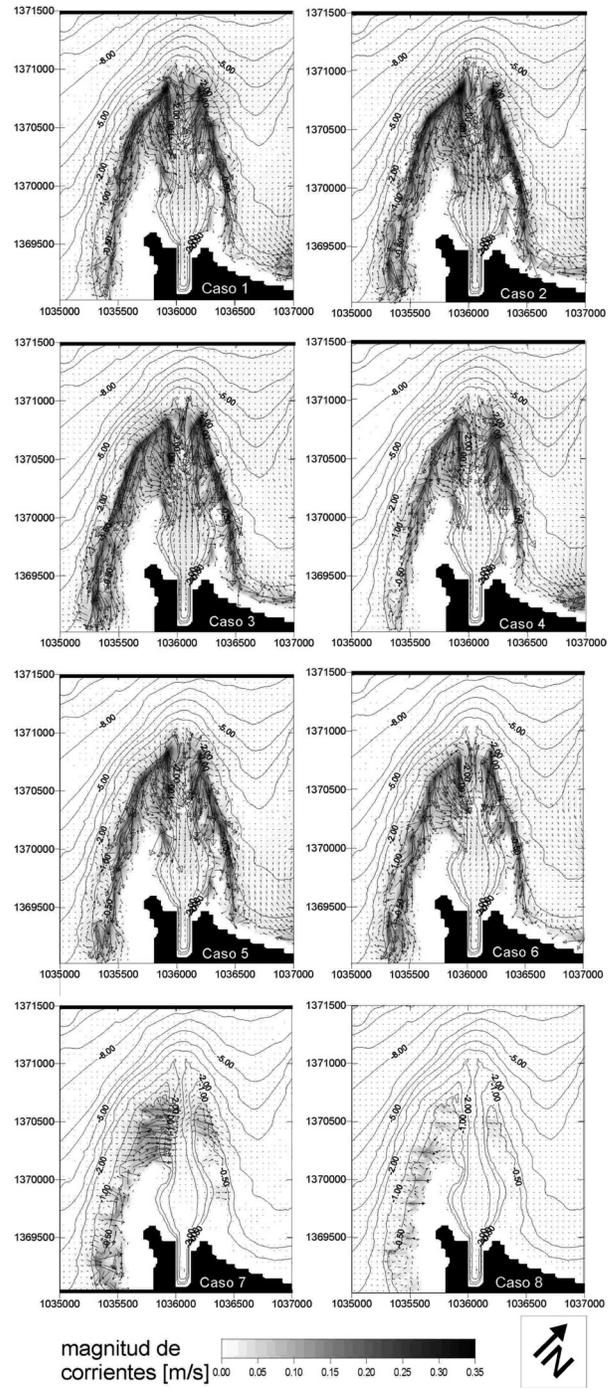


Figura 4. Resultados de las simulaciones de corrientes por rotura de oleaje para los casos del régimen medio.

nulo efecto del oleaje de fondo, ya que el oleaje que se produce en el Mar Caribe se disipa casi en su totalidad al propagarse hacia el interior del Golfo de Urabá.

Se realizó una selección de casos de propagación para determinar los patrones detallados del oleaje y las

corrientes medias en la desembocadura del río León a partir del régimen medio de viento en la Bahía Colombia. Los resultados muestran que en la época seca, cuando los vientos en la zona son fuertes y constantes provenientes del norte, se genera el oleaje de mayor magnitud del año; mientras que en la época húmeda las bajas magnitudes y la alta variabilidad en la dirección del viento conllevan a que el oleaje sea casi nulo.

Para implementar la metodología propuesta en este artículo no se requiere contar con gran cantidad de información. Basta con conocer los estadísticos estacionales del viento en la zona de estudio (que se pueden extraer, por ejemplo, de la información que provee libremente el ISMCS en un gran número de estaciones alrededor del mundo), y contar con mediciones de oleaje de campañas de campo de corta duración para calibrar y validar los modelos numéricos. Por tanto, esta metodología puede ser replicada en zonas costeras que cuenten con poca información del clima marítimo, como es el caso de gran parte del litoral colombiano y latinoamericano, entre otras zonas del mundo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Buceos Industriales y Dragados de Urabá y al proyecto Expedición Estuarina del Golfo de Urabá por el patrocinio de la investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Poveda, G., La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria, *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), pp. 201-222, 2004.
- [2] Andrade, C., Análisis de la velocidad del viento sobre el Mar Caribe, *Boletín Científico CIOH*, 13, pp. 33-44, 1993.
- [4] García, F., Palacio, C., García, U., Constituyentes de la marea en la Bahía de Santa Marta (Colombia), *Revista Dyna*, 167, pp. 142 – 150, 2011.
- [4] Correa, I.D., Vernet, G., Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes – Turbo) Costa Caribe Colombiana, *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 33, pp. 7 – 28, 2004.
- [5] Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 7649-7666, 1999.
- [6] Álvarez, O., Osorio, A., Gómez, A., Calibración y validación de un modelo de oleaje de la Bahía Colombia, *Memorias XIV Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (SENALMAR)*, Cali, Colombia, pp. 546 – 551, octubre 2010.
- [7] Young, I.R., Parametric wave prediction model. *J. of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 114, pp. 637-652, 1988.
- [8] González, M., et al. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, *SMC, Computers & Geosciences*, 33, pp. 916-931, 2007.
- [9] Goda Y. Random seas and design of maritime structures. *Advanced Series on Ocean Engineering*, V15, World Scientific Publishing, Singapore, 2000.