

MEDIO AMBIENTE**ESTUDIO DE LA RESONANCIA DE ONDA LARGA EN EL PACÍFICO COLOMBIANO Y OTRAS BAHÍAS NATURALES MEDIANTE ECUACIONES PARAMÉTRICAS****Jaime Arturo Orejarena Cuartas*, Pablo Agudelo Restrepo******RESUMEN**

Orejarena Cuartas J.A.; Pablo A.R.: Estudio de la resonancia de onda larga en el pacífico colombiano y otras bahías naturales mediante ecuaciones paramétricas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (139): 253-259, 2012. ISSN 0370-3908.

Las oscilaciones resonantes son un fenómeno conocido y bien documentado en gran número de puertos y bahías en todo el mundo (Vidal et al., 2000). El interés de realizar el seguimiento de estas oscilaciones radica en que todos los puertos y bahías en los que se han observado, alcanzan una gran amplitud y frecuencia lo que a su vez deriva en cuantiosos daños al afectar las estructuras del puerto y los barcos allí anclados, como se ha documentado para el puerto de Ciutadella.

En el presente trabajo se realiza un análisis para observar este importante fenómeno en diferentes bahías naturales en el mundo; se han seleccionado 18 bahías en 8 países (Colombia, Honduras, Estados Unidos, España, Italia, Francia, Ucrania y Rumania), para lo cual se realiza un análisis por Ecuaciones Paramétricas: Los períodos propios de las bahías se determinaron mediante una simplificación de la fórmula de “Merian”, 1828 y las plataformas mediante el cálculo propuesto por Yanomi y Tsuji, 1998.

Se demuestra por medio de este análisis cuales bahías son resonantes, y se concluye que los fenómenos resonantes no son un evento esporádico además que existe una relación directa entre la amplificación resonante de las bahías y las plataformas continentales donde están ubicadas y que debe ser motivo de estudio profundo debido a los desastres que puede causar en obras estructurales importantes.

Palabras claves: Resonance, “Seiches”, Bay in Colombia and the World, Parametric Modelation (“Merian”, 1828 y Yanomi y Tsuji, 1998).

ABSTRACT

Resonant oscillations are a known and well documented phenomenon in many ports and harbors around the world (Vidal et al., 2000). The interest of monitoring of these oscillations is that all ports and bays which have

* Grupo de Investigación Marina, Ambiental y Costera (GIMAC). Escuela Naval de Suboficiales ARC, Barranquilla

** Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC), de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

been observed, reaching a large amplitude and frequency which in turn leads to extensive damage by affecting the harbor structures and ships at anchor, as documented for the port of Ciutadella.

We have selected 18 bays in 8 countries (Colombia, Honduras, United States, Spain, Italy, France, Ukraine and Romania), for analysis of this important phenomenon observed in different natural harbors in the world, by Parametric Equations: the vibration periods of the bays were determined by simplifying the formula of "Merian", 1828 and platforms proposed by calculating Yanomi and Tsuji, 1998.

Resonance was demonstrated for some bays, and we conclude that resonant phenomena are not a sporadic event, because including also a direct relationship between the resonant amplification of the bays and continental shelves where they are located and which should be subject of a depth study due to disasters that can cause about major structural works.

Keywords: Resonancia, "Seiches", Bahías en Colombia y el Mundo, Modelación Paramétrica (fórmula de "Merian", 1828 y Yanomi y Tsuji, 1998).

Introducción

En los procesos costeros se ha demostrado que muchas de las características de una zona pueden estar moduladas por comportamientos intraestacionales e interestacionales que descritas como oscilaciones de ondas globales de propagación en donde el intercambio energético es un factor modulador (Madden y Julian, 1972). La formación de ondas de diferentes magnitudes que transportan energía hacia la costa proviene del océano profundo, esta energía es producida por la fuerza de los vientos que corren sobre la superficie oceánica, por la atracción gravitatoria que ejercen la Luna y el Sol sobre la masa del océano y por las diferentes perturbaciones que se presentan en las estaciones del año tanto en la atmósfera como en las zonas terrestres que hacen contacto con el mar. Todos estos fenómenos influyen en la formación de ondas de diferentes magnitudes que transportan energía hacia la costa, mientras que la configuración de la zona continental y de las plataformas adyacentes modifica y concentra ese flujo de energía, regulando la intensidad de la acción de esas ondas y corrientes en las aguas costeras. (Palacio y Restrepo, 1999, Agudelo, 2002).

La superposición de la onda incidente y reflejada en el interior de la ensenada puede formar, entre otras, una onda larga estacionaria dentro de la misma, conocida como "seiche", cuyas características (período y longitud de onda) dependen de las características geométricas de la ensenada; para una bahía pequeña y poco profunda, el periodo propio puede ser de tan solo unos minutos. Esto normalmente ocurre para algún(os) tipo(s) de onda(s) que no necesariamente existe(n) en el clima marítimo de la zona, y se conoce(n) comúnmente como modo(s) propio(s) o natural(es) de oscilación de la ensenada. El período y la distribución espacial de la superficie libre para cada modo natural de oscilación son controlados por la forma y profundidad de la ensenada considerada. Es-

tas ondas han sido de especial importancia por la relación que presentan con variaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria, por la amplitud que alcanzan las mismas, por la frecuencia en que se producen, y por los tremendos daños que en algunas ocasiones han causado a las estructuras de los puertos y los barcos allí anclados.

Algunos de los "seiches" más relevantes han observado en el mar Adriático y el mar Báltico, resultando en inundaciones de Venecia y San Petersburgo respectivamente. La bahía de Nagasaki es un área típica en Japón donde los "seiches" se presentan de tiempo en tiempo, más frecuentemente en la primavera boreal; en la ensenada de Ciutadella en España que tiene 900 m de longitud y 5 m de profundidad media, se encontró que el periodo propio de oscilación de un "seiche libre" es de 10 minutos y ha generado la atención de la comunidad científica, por los efectos que ha tenido en las estructuras portuarias. Otros eventos se han visto en la Bahía de Palma, donde se presentan con una frecuencia de 23 minutos y para la cuenca del Mediterráneo occidental puede alcanzar hasta horas. (Alonso et al., 1989, Gomis et al., 1996; Rabinovich y Monserrat, 1996).

Para hablar de la resonancia es necesario conocer primero todas las características físicas de la zona. Se entiende por periodo de oscilación libre de una bahía (T_n) el tiempo que transcurre entre dos momentos iguales de altura de agua como respuesta a algún estímulo en la bocana del puerto o bahía. La expresión más sencilla que permite calcularlo es: (Ecuación 1)

$$T_n = \frac{4 \times l}{(2n + 1)\sqrt{gh}}$$

Ecuación 1. Periodo de oscilación libre siendo T_n = el periodo de oscilación natural de una dársena rectangular, estrecha y de longitud l y calado constante h ; n es el modo de oscilación, que toma valor cero para la oscilación fundamental.

El estudio de la resonancia por onda larga inicio por la derivación de expresiones con las que se intentaba estimar rápidamente los modos resonantes de una dársena de geometría sencilla. Proudman (1953) las planteó para lagos y Wilson (1966, 1972) para muchas otras geometrías. Estas expresiones están muy bien resumidas en Dean y Dalrymple (1991); nótese que todas son modificaciones al primer caso (dársena rectangular de profundidad constante con las dos paredes perfectamente reflejantes), desarrollado en 1828 y conocido como “fórmula de Merian”. La hipótesis inicial plantea también la posibilidad de que los periodos propios de oscilación calculados en las bahías coinciden con los calculados en las plataformas continentales por lo que se utilizó el cálculo de estos últimos mediante formulaciones analíticas propuesto por Yanomi y Tsuji.

Este trabajo tiene como objetivo determinar los fenómenos de resonancia en diferentes bahías en el mundo haciendo énfasis en bahías en Colombia y a modo de comparación, se analizan otras bahías. Como eje central se tiene la caracterización de las bahías y los análisis del fenómeno por medio de un análisis paramétrico identificando los periodos propios de oscilación.

Metodología

Para la selección de las bahías del presente estudio se tuvo en cuenta las características geométricas de las mismas, buscando una relación entre la bahía y la plataforma correspondiente, la influencia de la geometría se mide en función de la magnitud de los procesos que afectan a la onda, esto es, en función de la transformación de la onda por asomeramiento, refracción, difracción, reflexión, absorción, y demás. (Garcies, et al., 1996; Gomis et al., 1993; Jong et al., 2003).

El criterio de selección inicial parte de la hipótesis de la relación entre los modos propios de oscilación de algunas bahías y las plataformas donde están ubicadas, fue necesario además plantear las restricciones físicas que parecen tener este tipo de onda: bahías de material suelto no cohesivo, poco antropizadas. A continuación se hace un listado de las bahías seleccionadas. (Tabla 1).

En total 18 bahías en todo el mundo sin importar su distribución geográfica entre los que se encuentran Colombia, EEUU, España, Francia, Italia, Rumania y Ucrania. (Figura 1).

A las 18 Bahías seleccionadas se les realizó un cálculo inicial para determinar en cuales de ellas la frecuencia de las ondas resonantes observadas en la bahía coincidía con las observadas en la plataforma. Se tomaron las medidas de las bahías de longitud y profundidad teniendo en cuenta los registros de batimetría disponibles y en algunos casos basadas en información secundaria disponible.

Tabla 1. Bahías seleccionadas a nivel mundial para determinar la frecuencia de las ondas resonantes por el método del análisis paramétrico.

Bahías seleccionadas para el cálculo de frecuencias por el método de análisis paramétrico		
ID	País	Región
1	Colombia	Buenaventura
2		Málaga
3		Cupica
4		Solano
5	Honduras	Golfo de Fonseca
6	Estados Unidos	St. Joseph
7		Cape Code
8	España	Alcuida
9		Palma
10		Alfacs
11		Fangar
12	Italia	Sacca di Goro
13	Francia	Marsella
14		Port de Bouc
15	Ucrania	Armiansk
16		Odesa
17		Primors'ke
18	Rumania	Tulcea



Figura 1. Mapamundi con la Ubicación general de las 18 bahías seleccionadas para el análisis por Modelación Paramétrica

También se midieron las plataformas continentales de cada área donde se encuentran las bahías. Las medidas establecidas fueron la longitud, la profundidad media y el ancho. A partir de los datos de la profundidad media y el ancho se realizó el cálculo de la pendiente de la plataforma. Las medidas se hicieron teniendo en cuenta que el final de la plataforma continental se encuentra delimitada hasta iniciar el cambio brusco de profundidad reflejado en la batimetría, también en la mayoría de los casos este dato se encuentra en información secundaria. (Figura 2)

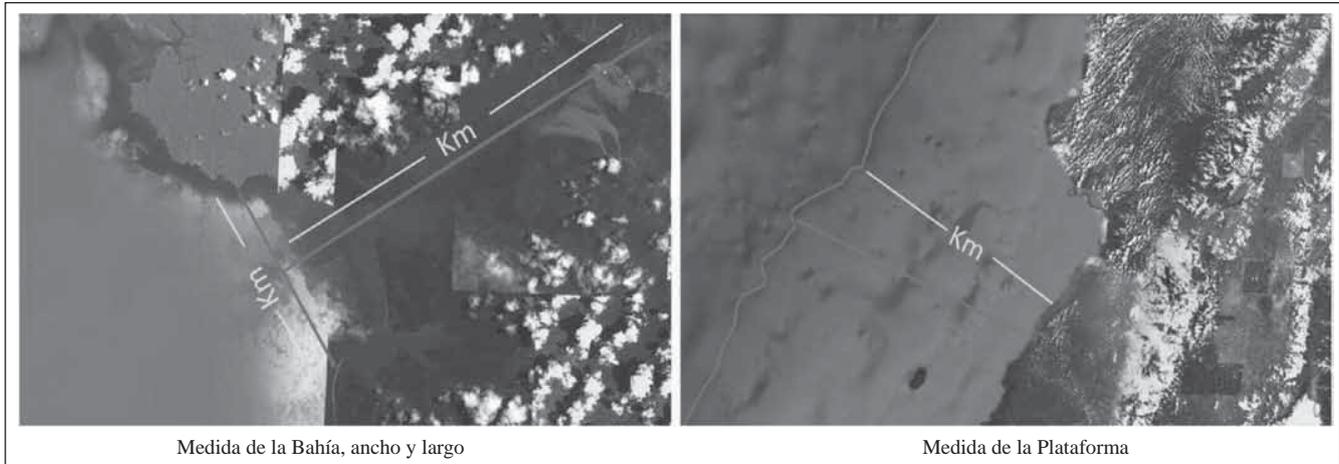


Figura 2. Imagen de las medidas tomadas en cada una de las Bahías y Plataformas

Los períodos propios de las bahías se determinaron mediante una simplificación de la fórmula de “Merian” (Ecuación 2)

$$T_n = \frac{2}{n} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{\sqrt{g h(x)}}$$

Ecuación 2. “Formula de Merian”

donde n es el modo resonante, l la longitud, g la aceleración de la gravedad y h(x) la función de variación del fondo en sentido longitudinal.

Y los periodos propios de oscilación en las plataformas continentales se realizó con el cálculo mediante formulaciones analíticas (Ecuación 3) propuesto por Yanomi y Tsuji, 1998 de la siguiente manera:

$$\omega^2 = \frac{(2v+1)(2m+1)\pi\alpha g}{2L}$$

Ecuación 3: “Formula Yanomi y Tsuji”

Donde: ω^2 : Es la frecuencia angular
 v : Es el modo transversal de la onda
 m : Es el modo longitudinal de la onda
 α : Es la pendiente transversal de la plataforma
 g : La aceleración de la gravedad
 L : La longitud de la plataforma

Resultados y Discusión

Tipos de Medidas y Cálculos

Entre las bahías de mayor longitud medidas se encuentra la del Golfo de Fonseca en Honduras con una longitud de 63

km, y la de menor longitud se dio en Bahía de Cupica en Colombia con 7.4 km. En cuanto a la profundidad, Bahía Solano, está cerca de los 60 m, mientras que en el caso del Mediterráneo las bahías no superan los 5 m como se encontró en Alfacs y Fangar que fue de 3.5 m.

La plataforma continental más grande corresponde a Honduras en la que se encuentra el Golfo de Fonseca y la más pequeña es la que comparten la Bahías de Cupica y Solano en Colombia. (Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Características Geométricas de 18 bahías analizadas en diferentes regiones en el mundo

Características geométricas bahías				
ID	País	Región	Longitud (m)	Calado (m)
1	Colombia	Buenaventura	19800	10
2		Málaga	21000	25
3		Cupica	13200	35
4		Solano	16000	50
5	Honduras	Golfo de Fonseca	63902	10
6	Estados Unidos	St. Joseph	21615	15
7		Cape Code	37900	25
8	España	Alcuida	13870	10
9		Palma	18400	15
10		Alfacs	18000	3,5
11		Fangar	8000	3
12	Italia	Sacca di Goro	8000	9
13	Francia	Marsella	14100	20
14		Port de Bouc	13400	20
15	Ucrania	Armiansk	53400	15
16		Odesa	50379	15
17		Primors'ke	8580	5
18	Rumania	Tulcea	10100	7

Tabla 3. Características Geométricas de las plataformas continentales de las áreas donde se encuentran las bahías analizadas en diferentes regiones en el mundo.

Características geométricas plataformas				
ID	País	Región	Longitud de la Plataforma (m)	Pendiente media
1	Colombia	Buenaventura y Málaga	160000	0,0063
2		Cupica y Solano	47000	0,0140
3	Honduras	Golfo de Fonseca	1235000	0,0041
4	Estados Unidos	St. Joseph	355557	0,0033
5		Cape Code	385000	0,0006
6	España	Mallorca	69000	0,0058
7		Valencia-Tarragona	270000	1,6667
9	Italia	Comacchio	157028	0,0056
10	Francia	Marsella y Port de Bouc	35790	0,0031
11	Ucrania	Armiansk, Odesa y Primors'ke	175000	0,0012
12	Rumania	Tulcea	90469	0,0018

Cálculo de los periodos propios en las bahías

El mayor periodo resonante se obtuvo en la bahía de Honduras (Golfo de Fonseca) en el nodo 0 (siendo este el nodo principal), con un valor de 7.169 h y el menor valor se obtuvo en Bahía Solano en Colombia con un valor de 0.343 h. (Tabla 4)

Tabla 4. Resultados en horas del cálculo realizado para los periodos propios de las bahías estudiadas mediante el uso de la formula simplificada de Merian

Cálculo de los periodos en bahías (h)						
ID	País	Región	MODOS			
			0	1	2	3
1	Colombia	Buenaventura	2,221	0,74	0,444	0,317
2		Málaga	2,356	0,785	0,471	0,337
3		Cupica	0,792	0,264	0,158	0,113
4		Solano	0,803	0,268	0,161	0,115
5	Honduras	Golfo de Fonseca	7,169	2,39	1,434	1,024
6	Estados Unidos	St. Joseph	1,98	0,66	0,396	0,283
7		Cape Code	2,689	0,896	0,538	0,384
8	España	Alcuida	1,556	0,519	0,311	0,222
9		Palma	1,685	0,562	0,337	0,241
10		Alfacas	3,413	1,138	0,683	0,488
11		Fangar	1,639	0,546	0,328	0,234
12	Italia	Sacca di Goro	0,946	0,315	0,189	0,135
13	Francia	Marsella	1,118	0,373	0,224	0,16
14		Port de Bouc	1,063	0,354	0,213	0,152
15	Ucrania	Armiansk	4,891	1,63	0,978	0,699
16		Odesa	4,615	1,538	0,923	0,659
17		Primors'ke	1,361	0,454	0,272	0,194
18	Rumania	Tulcea	1,354	0,451	0,271	0,193

Cálculo de los periodos propios en las Plataformas

En los nodos principales (n=0) el valor máximo se observo en la plataforma continental de la Bahía de Cape Code en Massachussets, Estados Unidos con un valor de 11.259 h; el valor mínimo se calculo para la Bahía de Cupica y Solano con un valor de 0.620 h. (Tabla 5)

Tabla 5. Resultados en horas del cálculo realizado para los periodos propios de las Plataformas continentales estudiadas mediante el uso de la formula simplificada de Yanomi y Tsuji.

Cálculo de los periodos en plataformas						
ID	País	Región	MODOS			
			0	1	2	3
1	Colombia	Buenaventura y Málaga	2,251	0,750	0,450	0,322
2		Cupica y Solano	0,815	0,272	0,163	0,116
3	Honduras	Golfo de Fonseca	7,685	2,562	1,537	1,098
4	Estados Unidos	St. Joseph	4,594	1,531	0,919	0,656
5		Cape Code	11,259	3,753	2,252	1,608
6	España	Mallorca	1,541	0,514	0,308	0,220
7		Valencia-Tarragona	3,190	1,060	0,640	0,809
9	Italia	Comacchio	7,708	2,569	1,542	1,101
10	Francia	Marsella y Port de Bouc	1,127	0,376	0,225	0,161
11	Ucrania	Armiansk, Odesa y Primors'ke	5,469	1,823	1,094	0,781
12	Rumania	Tulcea	3,119	1,040	0,624	0,446

Comparación modelos Bahías vs. Plataformas

En 13 Bahías de 18 analizadas se presenta el fenómeno de resonancia, demostrado en que el cálculo de la energía de la onda producida en la plataforma es equivalente a la que se calculó en la Bahía, (Figura 3).

De acuerdo a la gráfica resultado de los cálculos realizados, las bahías que presentan resonancia son (Tabla 6).

Esta amplificación resonante es muy clara en bahías que comparten las siguientes características: 1) aquellas cuya influencia antropogénica es mínima, 2) aquellas donde la energía de descargas fluviales es menor que la energía del mar, 3) aquellas formadas por material moldeable.

Las Bahías de St. Joseph y Cape Code en EEUU tienen fuerte influencia antropogénica. Comacchio en Italia, Primorske en Ucrania y Tulcea en Rumania tienen una gran influencia del río que desemboca en ellas. En todas estas, la hipótesis de concordancia entre la resonancia de la plataforma y de la bahía no se cumplió.

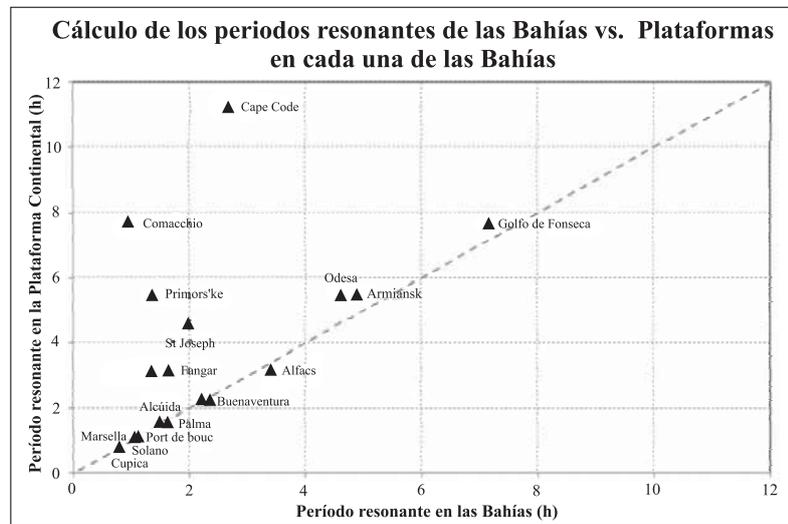


Figura 3. Diagrama de dispersión del Periodo Resonante calculado en las Bahías vs. el calculado en las Plataformas Continentales.

Tabla 6. Bahías que presentaron resonancia mediante el cálculo por métodos paramétrico

ID	País	Región	Modo Principal Bahía	Modo Principal Plataforma
1	Colombia	Buenaventura	2,221	2,251
2		Málaga	2,356	2,251
3		Cupica	0,792	0,815
4		Solano	0,803	0,815
5	Honduras	Golfo de Fonseca	7,169	7,685
6	España	Alcuída	1,556	1,541
7		Palma	1,685	1,541
8		Alfacs	3,413	3,19
9		Fangar	1,639	3,19
10	Francia	Marsella	1,118	1,127
11		Port de Bouc	1,063	1,127
12	Ucrania	Armiansk	4,891	5,469
13		Odesa	4,615	5,469

Conclusión

Se ha constatado la existencia de ondas que coinciden con los períodos resonantes de algunas bahías alrededor del mundo, el cálculo plantea que existe una relación directa entre la magnitud de cierto tipo de ondas y algunas características morfométricas de zonas semicerradas en las cuales se observa amplificación resonante, mostrando que la frecuencia de estas ondas dentro de las bahías es equivalente a lo calculado en las plataformas continentales, solamente algunas bahías observadas no cumplen con lo esperado debido a que esta

hipótesis se cumple en bahías formadas por material granular, suelto no cohesivo y que no hayan sido alteradas como el caso de Cape Code en Estados Unidos.

Bibliografía

- Agudelo, P.; Posada, L. y Roldán A. 2002. "Erosión costera al norte del golfo de Morrosquillo (Caribe central colombiano)". En: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.
- Alonso, B., Field, M.E., Gardner, J. y Maldonado, A. 1989. Sedimentary evolution of Plio-Pleistocene Spanish Ebro Margin. *Maryne Geology*.
- Dean, R.G. and R.A. Dalrymple. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific. pp 157-158.
- Garcies, M. D., Gomis, D., and Monserrat, S. 1996. Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands. Part II: Observational study, *J. Geophys. Res.*, 101, pp 6453-6467.
- Gomis, D., S. Monserrat, J. Tintoré. 1993: Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands. *J. Geophys. Res.*, pp 14437-14445
- Gomis, D., Garcies, M., and Monserrat, S. 1996.: Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands. Part II: Observational study, *J. Geophys. Res.*, pp 6453-6467,
- Jong, M. P. C. de, L. H. Holthuijsen, and J. A. Battje. 2003. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 108. pp 10-25.
- Madden, R. A., and P. R. Julian (1972), Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1109-1123.
- Monserrat, S. A.B. Rabinovich, B. Casas. 1998: On the Reconstruction of the Transfer Function for Atmospherically Generated Seiches. *Geophys. Res.* pp 2197-2205
- Palacio, H. H. y Restrepo, A.F. 1999. "Influencia de la evolución del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral Caribe Antio-

- queño". Medellín. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. 141 p.
- Proudman, J.** 1953: *Dynamical Oceanography*, Methuen–John Wiley, London, 409, 1953.
- Rabinovich, A. B.:** Long Ocean Gravity Waves: Trapping, Resonance and Leaking. *Gidrometeoizdat* (in Russian), St. Petersburg, pp 300-325.
- Rabinovich, A.B., Monserrat, S.,** 1996. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis. *Natural Hazard*, pp 55–90.
- Vidal, C., R. Medina, S. Monserrat, F. L. Martín;** 2000: Harbor Resonance induced by pressure-forced surface waves, *Coastal Engineering*, 2000, pp 3615-3628.
- Wilson, B.W.,** 1966. Generation of long-period seiches in Table Bay, Cape Town, by barometric oscillations. *Transactions of the American Geophysical Union* 35 (5), pp 733–746.
- Wilson, B.W.,** 1972. Seiches. *Advances in Hydrosience* 8, pp 1–94.
- Yanuma T. and Tsuji Y.** 1998. Observation of Edge Waves Trapped on the Continental Shelf in the Vicinity of Makurazaki Harbor, Kyushu, *JapanJournal of Oceanography*, Vol. 54, pp. 9-18.

Recibido: 15 de febrero de 2012

Aceptado para publicación: 4 de junio de 2012