



*Ricardo Molares B.
Jsemon@cioh.org.co

*CIOH

CIOH
www.cioh.org.co

Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano

Resumen

Muy poca investigación ha sido efectuada para caracterizar las principales componentes de marea en el mar Caribe colombiano. Por muchos años el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha recolectado información de niveles del mar en Cartagena, Islas del Rosario y San Andrés Islas con propósitos estadísticos.

En el presente estudio, las series de tiempo de nivel del mar fueron tratadas para su análisis armónico usando las rutinas de Matlab de R. Pawlowicz y para análisis espectral se empleó la transformada rápida de Fourier.

Usando el criterio de Courtier, el análisis muestra que las mareas en Cartagena y las Islas del Rosario es mixta principalmente diurna mientras que en San Andrés Isla la marea es mixta principalmente semidiurna.

Palabras claves: Mar Caribe, componentes de marea.

Abstract

Very few research had been done in order to characterized the tides main components in the colombian Caribbean sea. For many years the IDEAM have gathered the sea level data in Cartagena, Rosario Island and San Andres Island just for statistical purposes.

In this paper the sea level time series had been treated for harmonic analysis using R. Pawlowicz Matlab routines and spectral analysis with the Fast Fourier Transform (FFT).

Using the Courtier criteria the analysis shows that the tides in

Cartagena and Rosario Island is mixed mainly diurnal and in San Andres Island is mixed mainly semidiurnal.

Key words: Caribbean Sea, tide components.

Introducción

La primera referencia significativa que se conoce con relación a la marea del Caribe colombiano, fue descrita por Wiedemann (1973), quien determinó que las mareas del Caribe son débiles, con un rango mareal que varía de 20 a 30 cm y rara vez excede los 50 cm, por lo cual, fue catalogada como micromareal (rango <2 m). La marea fue caracterizada como mixta, de tipo diurno y semidiurno, con cierta irregularidad. Otra referencia conocida se encuentra en Kjerfve, B (1983) el cual empleando información de varias estaciones de marea del Caribe, construyó cartas de marea empleando las componentes M₂, S₂, K₁, N₂, O₁ y P₁.

A pesar de que existe el conocimiento sobre el tipo de marea que se presenta en el Caribe colombiano, este se basa en el comportamiento del nivel del mar mediante la interpretación directa de los datos obtenidos por las estaciones mareográficas ubicadas a lo largo de la costa colombiana y áreas insulares.

La información recolectada por las estaciones de marea ha sido organizada por el IDEAM efectuando una primera aproximación del conocimiento de los niveles del mar efectuando análisis estadístico de la información, identificando las medias mensuales y multianuales del nivel medio del mar, altas y bajas mareas.

La información recolectada por el IDEAM mediante su red mareográfica compuesta por equipos ubicados en Capurganá, Islas del

Rosario, Cartagena y la Islas de San Andrés en el Caribe así como las del Pacífico en Tumaco y Buenaventura, es utilizada por el US Coast Geodetic Survey (IDEAM, 2000) para la elaboración del pronóstico de mareas del continente americano, base del pronóstico anual de mareas en los principales puertos del país, publicado por el IDEAM.

Una primera aproximación a la determinación del comportamiento de las mareas en la bahía de Cartagena demostró que el factor que más afecta las fluctuaciones de la marea es la declinación lunar, cuya constituyente K₁ lunar declinacional aporta la mayor variación de altura para la predicción (Lozano y Parra, 1993). Este mismo factor tiene un gran efecto sobre las variaciones mensuales del nivel del mar, haciéndolo elevar casi 10 cm con declinación 0°. De igual forma se determinó que las constituyentes que más influyen en las fluctuaciones de la marea para el área de Cartagena son las componentes K₁, O₁, M₂, M_n, y P₁, las cuales agrupan el 95 % de los valores de la marea (Tabla 1). Igualmente se definió que las constituyentes de largo periodo, que en su mayoría no sobrepasan los 2 mm, son prácticamente despreciables para la predicción de la marea (Tabla 1).

Tabla 1. Constantes armónicas de las constituyentes principales en la Bahía de Cartagena (Lozano y Parra, 1993)

COMP.	VEL. NNG	H (Cm)	FASE	VALOR (G)
M ₂	28.98	6.9	347.5	- 6.15
N ₂	28.44	2.8	325.4	- 8.87
K ₂	30.08	0.5	248.6	- 0.66
S ₂	30.00	1.9	248.6	- 1.07
O ₁	13.94	5.6	163.0	- 5.82
P ₁	14.96	3.6	165.6	- 0.74
K ₁	15.04	10.6	173.0	- 0.33
Q ₁	13.39	1.2	137.0	- 8.54
MM	0.54	5.1	317.0	+ 2.73

Tabla 2. Estaciones de estudio

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
Cartagena	10°23'23'' N	75°31'59'' W
I. del Rosario	10°10'49'' N	75°45'00'' W
San Andrés	13°20'00'' N	81°23'00'' W

Metodología

El proceso de identificación de las componentes armónicas de mareas implica la utilización de un método de análisis. Para el presente estudio se determinó utilizar el análisis armónico de mareas diseñado por la Universidad de British Columbia, que corresponde al desarrollo de los programas originales en Fortran diseñados por M.G.G Foreman del Institute Of Ocean Sciences (IOS); también se empleó el método de análisis espectral mediante el uso de la TRF, con el objeto de comparar la diferencia entre ambos.

Las series de tiempo utilizadas para el análisis fueron las recolectadas por el IDEAM en diferentes estaciones mareográficas (Tabla 2). Las series debieron ser tratadas con el fin de completar los espacios faltantes mediante una interpolación espectral.

Series de tiempo

La organización de las series de tiempo horaria de las estaciones de Cartagena, Islas del Rosario y San Andrés permitió reconocer el estado de los datos, determinando que en muchos de los casos la información disponible no era suficiente y que los lapsos de información faltante, hasta de tres meses en algunos casos, imposibilitaba la interpolación de la serie (Tabla 3).

Tabla 3. Series de Datos. En la tabla se muestra la cantidad de información de nivel del mar disponible para cada una de las estaciones, entre 1990 y 2000 (dt= 1h)

Est.	Año	% Datos Disponibles
CTG	1990	63.64
CTG	1991	89.03
CTG	1992	82.71
CTG	1993	82.58
CTG	1994	51.96
CTG	1995 2000	100
IR	1990	72.72
IR	1991	39.10
IR	1992	61.35
IR	1993	81.66
IR	1994	71.54
IR	1995	85.53
IR	1997	84.34
IR	1998	71.54
IR	1999	95.03
IR	2000	64.18
SA	1997	86.32
SA	1998	91.99
SA	1999	75.90

Teniendo en cuenta lo anterior, se escogieron series de tiempo con la menor cantidad de datos consecutivos faltantes que permitieran la utilización del método de análisis de armónicas (series de un año) y la aplicación de la TRF, con la mayor cantidad de datos disponibles para hallar los espectros de frecuencia de las series de tiempo horarias (Tabla 4).

Tabla 4. Series de Tiempo escogidas para la aplicación del método de Foreman y el análisis espectral

EST.	FOREMAN	TRF
CTG	1999	95/2000
IR	1999	97/2000
SA	1999	97/2000

La aplicación del análisis espectral supone mayor resolución en la medida que se tenga mayor cantidad de datos, lo cual se vio limitado por la falta de información que interrumpía la continuidad de la serie. En algunos casos los datos faltantes pudieron ser interpolados mediante un método de interpolación espectral.

Método de interpolación

Teniendo en cuenta la característica periódica de la marea, fue escogido el método de interpolación espectral de la TRF el cual asume $x(t)$ como una función periódica p , muestreadas en puntos igualmente espaciados, $x(i) = x(t(i))$ donde: $T(i) = (i - 1) * P/M$, $i = 1:M$, donde $M = \text{longitud}(x)$. Luego entonces $y(t)$ es otra función periódica con el mismo periodo y $Y(j) = Y(T(j))$ donde $T(j) = (j-1) * P/N$ $j = 1:N$, $N = \text{longitud}(Y)$. Si N es la integral múltiple de M , entonces $Y(1:N/M:N) = X$. Básicamente lo que se hace es aplicar la TRF a la serie original. Una vez encontradas las frecuencias de la serie, se aplicó la inversa de la TRF, restaurando la serie (Figura 1).

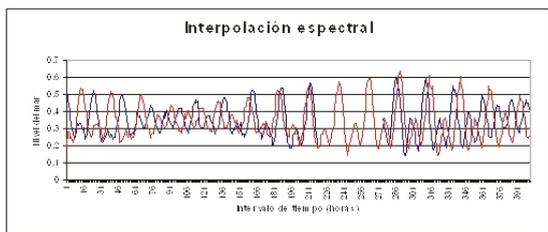


Figura 1. Serie de tiempo horaria del nivel del mar en Cartagena. En rojo, resultado de la interpolación espectral de la serie original (azul).

Análisis armónico de mareas (M.G.G Foreman)

La herramienta para el análisis de marea de M.G.G. FOREMAN usa el análisis armónico para estimar los componentes de marea y su incertidumbre en las series de tiempo escalares y vectoriales.

La versión en Matlab utilizada en el presente estudio está basada en el paquete para el análisis de marea desarrollado inicialmente en Fortran por S.Lentz (I.O.S) y B. Beardsley (WHOI), quienes iniciaron la traslación de los códigos de programación de Fortran a Matlab, mejorando la estimación del error usando los códigos espectrales de Matlab. R.Pawlowicz de U.B.C (UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA), luego la completó y reescribió usando matemática compleja.

Existe un máximo de 69 posibles componentes de marea que pueden ser incluidas en el análisis de marea, 45 de esas son de origen astronómico (componentes principales) mientras que las restantes 24 son componentes de aguas someras que derivan de los componentes principales M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 y O_2 (Tabla 5).

Los componentes de marea de aguas someras aparecen de la distorsión de las componentes de marea principales en aguas someras, debido a que la velocidad de propagación de una onda progresiva es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del agua en que la onda está viajando; las aguas someras tienen el efecto de retardar el paso de la onda mas que la cresta. Esto distorsiona la forma original de la onda, introduciendo señales armónicas que no son predecidas en el desarrollo potencial de la marea.

Tabla 5. Componentes de aguas someras tenidas en cuenta y componentes principales de donde se derivan.

Comp. aguas someras	Constituyentes que la componen		
SO ₁	S ₂	O ₁	
MKS ₂	M ₂	K ₂	S ₂
MSN ₂	M ₂	S ₂	N ₂
MO ₃	M ₂	O ₁	
SO ₃	S ₂	O ₁	
MK ₃	M ₂	K ₁	
SK ₃	S ₂	K ₁	
MN ₄	M ₂	N ₂	
M ₄	M ₂		
SN ₄	S ₂	N ₂	
MS ₄	M ₂	S ₂	
MK ₄	M ₂	K ₂	
S ₄	S ₂		
SK ₄	S ₂	K ₂	
2MK ₅	M ₂	K ₁	
2SK ₅	S ₂	K ₁	
2MN ₆	M ₂	N ₂	
M ₆	M ₂		
2MS ₆	M ₂	S ₂	
2MK ₆	M ₂	K ₂	
2SM ₆	S ₂	M ₂	
MSK ₆	M ₂	S ₂	K ₂
3MK ₇	M ₂	K ₁	
M ₈	M ₂		

Para la selección de las componentes de marea presentes en la serie de tiempo se utiliza el criterio de comparación de RAYLEIGH. El criterio decide si un componente específico debe ser incluido o no en el análisis. Si FO es la frecuencia de una componente, F1 es la frecuencia de la componente de comparación de RAYLEIGH y T es el tiempo de la serie de datos para ser analizada, luego la componente será incluida en el análisis sólo si, $FO - F1 \leq T$ (RAY = 1):

Para determinar los pares de comparación de RAYLEIGH, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Dentro de cada grupo de componentes, éstas están en orden teniendo en cuenta la disminución de la magnitud del potencial de la amplitud de la marea.
- Se compara el candidato a componente con la más cercana en frecuencia.
- Cuando existan dos componentes cercanas relativamente iguales en cuanto a potencial de amplitud, se escoge la representación del par cuya inclusión sea lo más temprano posible. Esto dará pronta información sobre el rango de frecuencia.
- El análisis de las series de mareas se hace utilizando el método de los mínimos cuadrados para la determinación de la amplitud y la fase.

El desarrollo y explicación del método se omite teniendo en cuenta que se encuentra descrito en *MANUAL FOR TIDAL HEIGHTS ANALYSIS AND PREDICTION* (Foreman, 1996).

Análisis espectral

La identificación de los componentes de marea mediante el empleo de la TRF utiliza una metodología diferente al análisis de armónicas que emplea mínimos cuadrados, aunque la finalidad es la misma. La determinación de las componentes no se hace por comparación con una base de datos sino que soluciona las frecuencias implícitas en la señal de marea (serie de tiempo) mediante la suma de senos y cosenos.

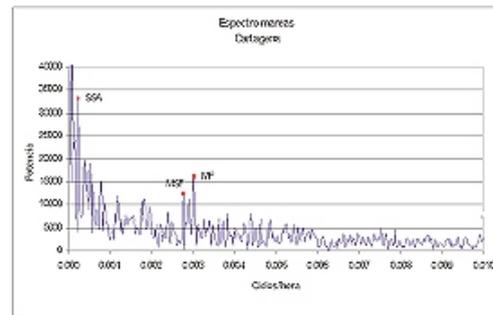
Para facilitar la aplicación numérica (TRF) fue empleado Matlab, con el uso de las herramientas para el procesamiento de señales de ese programa. Como en el caso del análisis armónico de mareas, las series de tiempo horarias debieron ser interpoladas para completar los lapsos faltantes de información, logrando series de cinco años como en el caso de Cartagena y tres años para las Islas del Rosario y San Andrés, lo que permitió hallar bajas frecuencias correspondientes a componentes de largo periodo con mayor exactitud que con el método de Foreman.

Resultados

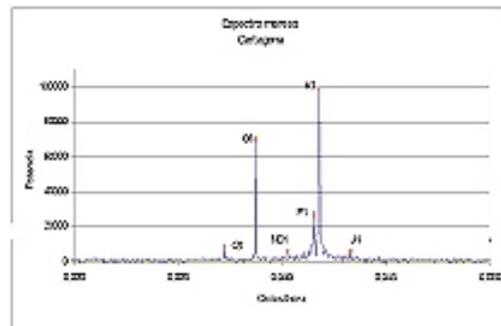
Del análisis de las series de tiempo se identificaron gran cantidad de componentes, aunque las diez principales componentes representan el 82.4% de la energía de la señal para el caso de Cartagena, mientras que para las Islas del Rosario y San Andrés corresponden a un 80.9% y 77.8% respectivamente, siendo entonces ese número de componentes, las representativas para caracterizar las mareas en cada una de las áreas estudiadas.

No existen mayores diferencias entre los métodos utilizados, aunque en el caso de la componente de largo periodo SSA (Cartagena) existe una diferencia de 62.25 horas debido a que la serie de tiempo utilizada para su análisis espectral comprende mayor número de datos dando una mayor resolución. Sin embargo la diferencia corresponde al 1.43% siendo insignificante (Tabla 6, anexa). En la Figura 2 se representan las componentes de la marea mediante espectros de frecuencias de las series de nivel del mar para Cartagena.

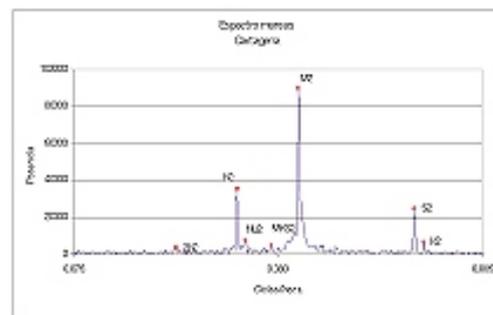
Los resultados obtenidos de las metodologías de análisis de las mareas para las Islas del Rosario y San Andrés se identifican en las Figuras 3 y 4 y en las Tablas anexas 7 y 8.



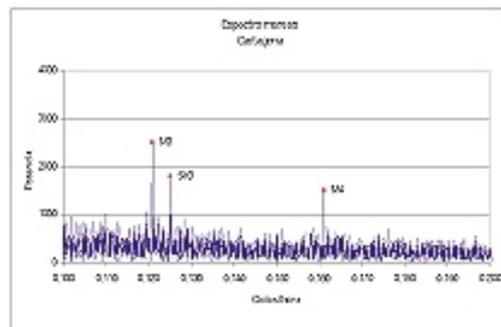
a) Componentes de largo período



b) Componentes diurnas

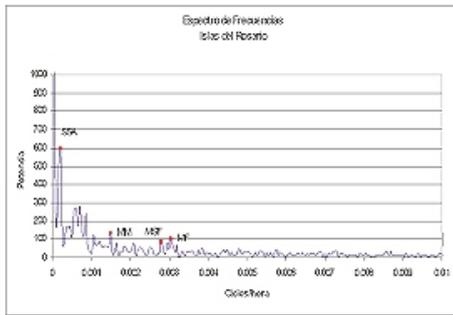


c) Componentes semidiurnas

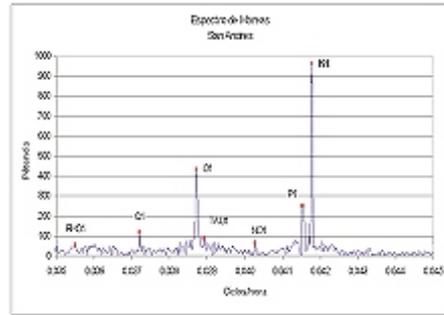


d) Componentes de alta frecuencia

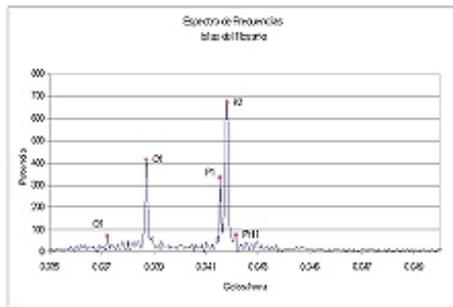
Figura 2. Espectros de frecuencia de la marea en Cartagena



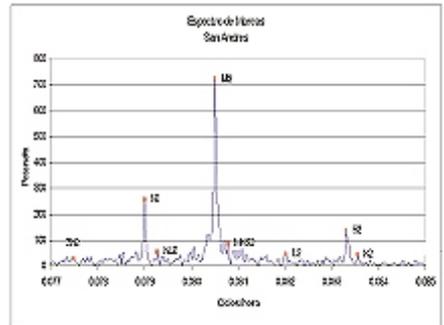
a) Componentes de largo período



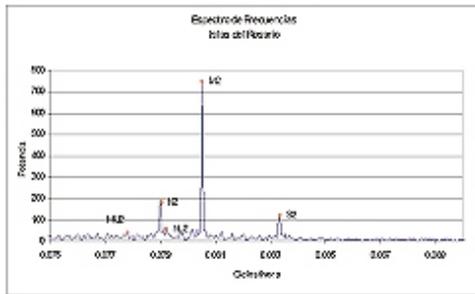
b) Componentes diurnas



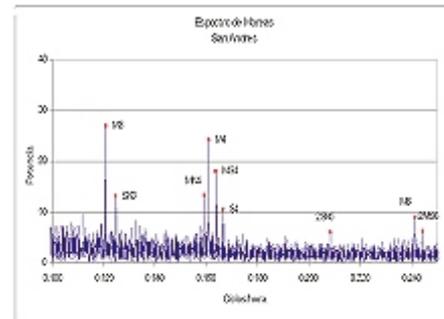
b) Componentes diurnas



c) Componentes semidiurnas

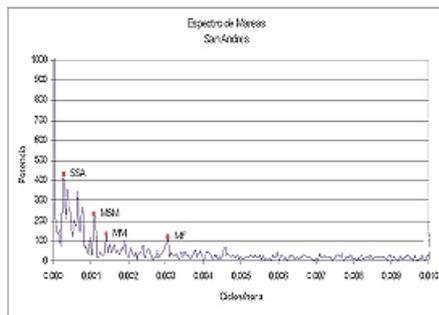


c) Componentes semidiurnas



d) Componentes de alta frecuencia.

Figura 3. Espectros de frecuencia de la marea en las Islas del Rosario



a) Componentes de largo período

Figura 4. Espectros de frecuencia de la marea en San Andrés Islas.

Clasificación de mareas

Para clasificar las mareas se utiliza el coeficiente de Coutier definido como:

$$F = (K_1 + O_1) / (M_2 + S_2)$$

donde los símbolos de las constituyentes indican sus respectivas amplitudes, clasificando

las mareas en cuatro categorías (Tabla 9).

Tabla 9. Clasificación de las mareas acuerdo criterio Coutier

VALOR DE F	CATEGORIA
0 - 0.25	semidiurna
0.25 - 1.5	mixta, principalmente semidiurna
1.5 - 3	mixta, principalmente diurna
> 3	diurna

La clasificación de la marea para las tres áreas de estudio se resume en la Tabla 10, considerando la aplicación de la fórmula con los

valores de las amplitudes de las constantes encontradas para cada área, definiendo así la categoría de la marea en cada sector.

Tabla 10. Clasificación de la marea de las estaciones de estudio

ESTACION	K1	O1	M2	S2	Valor F	CLASIFICACION DE LA MAREA
Cartagena	8.68	4.86	7.19	1.65	1,53	Mixta, principalmente diurna
Islas de Rosario	9.13	5.46	7.67	1.65	1,56	Mixta, principalmente diurna
San Andrés	8.27	4.15	7.29	1.35	1,43	Mixta, principalmente semidiurna

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de los datos se puede concluir en relación a las estaciones estudiadas del Caribe colombiano que, Cartagena e Islas del Rosario se encuentran dentro de la clasificación de marea mixta, principalmente diurna mientras que San Andrés se encuentra dentro de la clasificación de marea mixta, principalmente semidiurna.

Teniendo en cuenta que las primeras 10 componentes en cada uno de los casos estudiados abarcan un 80% de la energía de la señal de marea, en las tablas 11 12 y 13 se identifican las principales.

Tabla 11. Principales componentes de marea identificadas en Cartagena

CARTAGENA				
Componente	Frecuencia	Periodo	Amplitud	Fase
*K1	0,04178	23,9348971	8,6829	146,28
*M2	0,08051	12,4208173	7,1923	154,6
*O1	0,03873	25,8197779	4,8631	354,46
*P1	0,04155	24,0673887	3,1462	153,71
*SSA	0,00023	4347,82609	2,9493	64,63
*N2	0,079	12,6582278	2,389	226,38
*S2	0,08333	12,00048	1,6539	240,02
*MF	0,00305	327,868852	1,1555	128,32
*Q1	0,03722	26,8672757	0,7627	82,3
*NO1	0,04027	24,8323814	0,545	260,23

Tabla 12. Principales componentes de marea identificadas en Islas del Rosario

I. ROSARIO				
Componente	Frecuencia	Periodo	Amplitud	Fase
*K1	0,04178	23,9348971	9,13	169,62
*M2	0,08051	12,4208173	7,67	159,65
*O1	0,03873	25,8197779	5,46	324,4
*SSA	0,00023	4347,82609	5,16	65,95
*P1	0,04155	24,0673887	2,61	164,84
*N2	0,079	12,6582278	2,5	233,27
*MM	0,00151	662,251656	1,77	274,96
*S2	0,08333	12,00048	1,65	249,5
*MF	0,00305	327,868852	1,36	211,31
*PHI1	0,04201	23,8038562	0,82	180,21

Tabla 13. Principales componentes de marea identificadas en San Andrés

SAN ANDRES				
Componente	Frecuencia	Periodo	Amplitud	Fase
*K1	0,04178	23,9348971	8,27	165,08
*M2	0,08051	12,4208173	7,29	280,35
*O1	0,03873	25,8197779	4,15	67,28
*SSA	0,00023	4347,82609	3,49	66,97
*P1	0,04155	24,0673887	3,4	159,55
*N2	0,079	12,6582278	2,56	251,51
*S2	0,08333	12,00048	1,35	212,53
*MF	0,00305	327,868852	1,23	97,26
*MM	0,00151	662,251656	1,12	359,15
*Q1	0,03722	26,8672757	1,03	71,25

El análisis de los datos del nivel del mar efectuado en el presente estudio, permitió la identificación de los componentes de marea principales y de aguas someras, constituyéndose como la base de predicciones futuras de las mareas para San Andrés, Cartagena e Islas del Rosario.

Se hace necesario mejorar o completar las bases de datos de mareas, ya que existe gran cantidad de vacíos de información que no permiten una caracterización completa de las mareas.

Referencias bibliográficas

Caldwell, P. Procesamiento de datos del nivel del mar IBM PC., Joint archive for the sea level of the NODC., 2000, p.49

Foreman M.G.G., 1996. Manual for tidal heights analysis and prediction. IOS, Pacific Marine Science Report 77 10.

IDEAM, 2000., Pronóstico de pleamares y bajamares en la costa Caribe colombiana.

Kjerfve, B. Tides of the Caribbean Sea., Journal of Geophysical Research, Vol 86, 1981, p. 4243-4247

Lozano y Parra, , Análisis armónico y predicción de la marea para la Bahía de Cartagena., Cartagena de Indias, 1993., 120p. Trabajo de grado (Oceanografía Física), Escuela naval de Cadetes Almirante Padilla. Facultad de Oceanografía

UNESCO 1985, Manual de medición e interpretación del nivel del mar, Manuales y Guías, Comisión Oceanográfica Intergubernamental, 1985.

Wiedemann, H. Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: Physical

Parameters and Geological History. En: Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient. No 7. (1973). p. 85- 119. Citado por: ANDRADE, C y LONIN, S. Informe final del proyecto: “Estudio de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y la boca del río Toribío”, 2003.

Zetler, B. and Lennon, G., 1967. Some comparative test of tidal analytical processes, Int. Hidrog., 44(1), 139-147. Citado por: SPERONI, Jorge et al., Estudio de la marea en el borde de la Barrera Larsen, Mar de Weddell Noroccidental. Argentina: GEOACTA, 2000. Vol 25; p.4