



ARTÍCULO

Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano

Sea level behaviour on Colombia's Caribbean coast line

Fecha recepción: 2008-09-04 / Fecha aceptación: 2008-09-26

Rafael Ricardo Torres Parra, rrtorresp@yahoo.com

Luis Jesús Otero Díaz, lotero@cioh.org.co

Fernando Afanador Franco, fafanador@cioh.org.co

Leonardo Marriaga Rocha, lmarriaga@cioh.org.co

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH
Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D.T. y C.

Resumen

Se estudió el comportamiento del nivel del mar en el área de tres importantes ciudades de la región continental de Colombia en el Caribe: Cartagena, Coveñas y Santa Marta. Se analizó por separado la marea (generada por fuerzas astronómicas) y el residuo. Se pronosticaron series de marea empleando el método de armónicos a partir de series de nivel del mar medidas *in situ* o generadas usando un modelo numérico de onda larga alimentado en la frontera con información de marea de una base de datos de cubrimiento global. El residuo fue obtenido a partir de la resta de la marea a series *in situ* de nivel del mar. Utilizando simulaciones estadísticas se generaron series de residuo, las cuales se sumaron a las series de marea para obtener el comportamiento esperado del nivel del mar, el cual se presentó en términos de regímenes medio y extremo. Se encontró homogeneidad en el comportamiento de la marea en el área de estudio, catalogada como micromareal, estando además en un rango entre los valores máximos y mínimos del mismo orden de magnitud al rango del residuo, el cual además presentó mayores valores de altura hacia las Antillas Mayores que en el Caribe sur-occidental, debido al paso más frecuente de tormentas tropicales y huracanes. Se encontraron diferencias en el orden de los centímetros entre las alturas de los regímenes medio y extremo del nivel del mar calculado para los tres lugares estudiados.

Palabras claves: Nivel del mar, marea, pronóstico de marea, constantes de marea, análisis estadístico.

Abstract

The sea level behaviour was studied at Cartagena, Coveñas and Santa Marta areas, three important cities of Colombia's continental region in the Caribbean. The tide (due to astronomical forces) and the non tidal residual were analyzed by separate. Tidal series were predicted by harmonic analysis, using *in situ* sea level series or generated by a long wave numerical model with tide information from a worldwide database as boundary conditions. The non tidal residual was obtained subtracting the tide from *in situ* sea level series. Series of non tidal residual were generated using statistical simulations, which were added to the tide series to obtain the expected sea level behaviour that was presented as mean and extreme patterns. Homogeneity was founded in the

tide behaviour at the area of interest, catalogued as microtidal, having also a range between the maximum and minimum values of the same magnitude as the range of the no tidal residual, which also presented higher values toward the Greater Antilles than on the south-western Caribbean, due to the more frequent transit of tropical storms and hurricanes. Differences of the order of centimetres were founded on the heights of the mean and extreme patterns of sea level at the three locations studied.

Key words: Sea level, tide, tidal prediction, tidal constants, statistical analysis.

Introducción

Es de vital importancia conocer el comportamiento del nivel del mar en un lugar, puesto que esta información es indispensable para el diseño y construcción de obras marítimas, el manejo integrado de la zona costera y para garantizar la seguridad a la navegación, cuando se trata de un puerto con limitaciones en profundidad, entre otras. De esta necesidad se tiene conciencia en aquellas zonas donde el rango de variación del nivel del mar es significativo, en tanto que en aquellos lugares como el Caribe colombiano, donde se cuenta con un rango inferior a un metro (catalogada como micromareal [1]), se desestima la importancia de esta información, lo cual puede traer consecuencias en las cotas de diseño de obras o construcción de infraestructura costera, como es el caso de la ciudad de Cartagena, donde se vienen sufriendo inundaciones en algunos sectores de la ciudad como consecuencia de las sobreelevaciones del nivel del mar en casos extremos de mares de leva [2], o incluso, en casos previsible, como durante las mareas de sicigia, generalmente durante el segundo semestre del año.

El nivel del mar en un momento dado, se encuentra determinado por dos factores: primero, por la marea, entendida como las variaciones del nivel producidas por las fuerzas astronómicas generadas por la interacción del planeta con la Luna y el Sol principalmente, la cual puede ser pronosticada con gran acierto por ser una variable determinista. La marea, como componente astronómico del nivel del mar, puede descomponerse en un número finito de ondas conocidas como armónicos, cada una con un

período específico (que varía entre 12 horas y 18.6 años), el cual se asocia a algún movimiento planetario real o ficticio. Mediante el *análisis armónico* realizado a datos del nivel del mar, se puede encontrar la amplitud y fase de cada armónico, con lo cual se describe plenamente el comportamiento de la marea para un sitio en particular.

El segundo factor es el residuo de marea, en el que se circunscriben todos los factores meteorológicos u oceanográficos que pueden modificar el nivel del mar, entre los cuales se incluyen, variaciones por: ondas infragravitatorias, presión atmosférica, dirección e intensidad de los vientos, altura del oleaje, corrientes oceánicas, entre otros. En estuarios es de especial importancia el efecto por los aportes fluviales, como en el caso de la Bahía de Cartagena, donde el Canal del Dique (desembocadura secundaria del río Magdalena) afecta el nivel del mar, mostrando en los mareógrafos una fuerte señal de variación estacional [3]. El residuo de marea es una variable estocástica, por lo cual pueden estudiarse algunos de los efectos mencionados en registros de nivel del mar, pero la mayor parte de ellos no pueden ser pronosticados más allá de escalas operacionales.

En otras escalas de tiempo se pueden también generar variaciones del nivel del mar, que van desde efectos catastróficos de corto tiempo como los causados por ondas de Tsunamis, hasta de largo plazo como con la variación del nivel medio del mar. Estos últimos factores no se tienen en cuenta en el presente estudio.

El objetivo de este artículo es describir el comportamiento del nivel del mar en las áreas de Coveñas (Sucre), Cartagena (Bolívar) y Santa Marta (Magdalena) (figura 1), tres de las más importantes ciudades de Colombia sobre el Caribe, estudiando por separado el comportamiento de la marea y el del residuo. Posteriormente, a partir de este análisis, generar los regímenes medio y extremo del nivel del mar empleando simulaciones estadísticas (método de Monte Carlo). Para la realización de este trabajo se utilizaron los registros de mareógrafos disponibles en la región, así como un modelo numérico que resuelve las ecuaciones de aguas someras integradas en profundidad, para generar la información de marea donde no existen mediciones.

Este trabajo se desarrolló en marco del proyecto de Jurisdicción de la Dirección General Marítima - DIMAR, teniendo como referencia la metodología del bloque temático para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas cuando no se tienen registros instrumentales [4].

Materiales y métodos

A continuación se explican dos métodos usados para obtener los pronósticos de la marea empleando el análisis armónico, uno basado en los registros *in situ* del nivel del mar y otro basado en la aplicación de un modelo numérico para propagar la onda de marea hasta el sitio de interés. Se presentan igualmente las metodologías empleadas para obtener el residuo de marea, y para la generación de los regímenes medio y extremo del nivel del mar.

Series de marea a partir de registros *in situ*

La información *in situ* recolectada por mareógrafos se obtuvo de la base de datos del Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawaii UHSLC [5], la cual se utilizó por cuanto aplica una política de aseguramiento de calidad a los datos, permitiendo al usuario conocer la calidad de la información que proveen, así como facilitando la comparación entre series de tiempo de diferentes lugares. En la figura 1 se presentan con puntos rojos las estaciones disponibles en el Caribe, así como el año de inicio y final de cada serie de tiempo disponible. Con puntos azules las ciudades de Santa Marta y Coveñas.

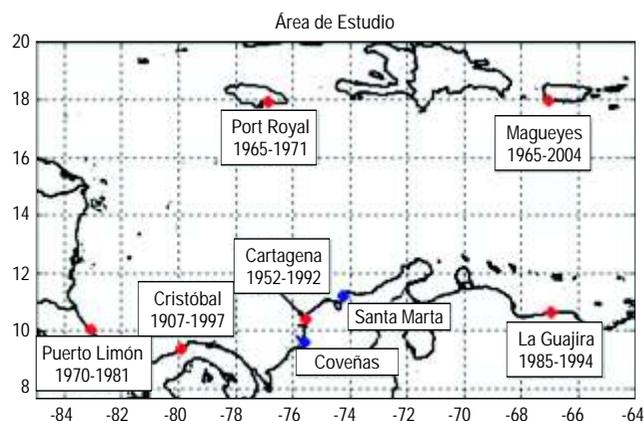


Figura 1. Estaciones de nivel del mar del UHSLC en el Caribe.

Se utilizaron los datos horarios del UHSLC clasificados de “calidad de investigación” referidos al Tiempo Universal Coordinado UTC, los cuales se encuentran distribuidos en un archivo por año con datos de nivel del mar. Estas series tienen diferente calidad, dado el porcentaje de datos faltantes y observaciones por cambios de nivel vertical, ubicación, medición del tiempo, entre otros. Un resumen de estas observaciones se presenta en la tabla 1 del trabajo de Torres, *et al.*, [3].

Las series de nivel del mar usadas para la estimación de la marea se limitaron a 19 años teniendo en cuenta el período de la regresión de los nodos lunares, lo cual permite encontrar los valores de amplitud y fase de los armónicos que mejor describen el comportamiento de la marea [6]. Antes de efectuar el análisis armónico, a los datos del nivel del mar del UHSLC se le restó a cada año su propio promedio, con el fin de no incluir en el cálculo de las constantes el aumento en el nivel del mar o cambios en el nivel de referencia vertical de los datos, centrándola sobre el nivel medio del mar.

Para calcular la amplitud y fase de los armónicos, se emplearon las herramientas numéricas desarrolladas por Pawlowicz, *et al.*, [7], basado en las rutinas de Foreman, [8], las cuales son también aplicadas por la UHSLC. Como entrada se utilizó la serie de 19 años de nivel del mar como se describió en el párrafo anterior, obteniendo como resultado una serie horaria de la marea para el mismo período de tiempo, así como los valores de las amplitudes y fases de 68 constantes armónicas, las cuales quedaron disponibles para el pronóstico de la marea para cualquier período de tiempo.

Series de marea generadas empleando el modelo numérico H2D

Para generar las series de marea en los lugares donde no se cuenta con registros instrumentales, se utilizó el modelo numérico de onda larga H2D [9] para la propagación de la onda de marea desde aguas profundas hacia la costa, empleando como condiciones de contorno un método de interpolación de marea basado en el modelo AG95.1 desarrollado por Andersen, *et al.*, [10] que utiliza la base de datos Grenoble, con información disponible entre 1985 y 1995, empleando 13 constantes armónicas.

Este procedimiento fue realizado para Santa Marta, Cartagena y Coveñas en los dominios que se muestran en la figura 2, donde se presenta ampliado el utilizado en Cartagena, con los puntos rojos (nodos) indicando la ubicación de dos series de tiempo calculadas. En la tabla 1 se presenta la configuración empleada en el modelo para obtener las series de un año que posteriormente se utilizaron para pronosticar 19 años de marea en cada lugar.

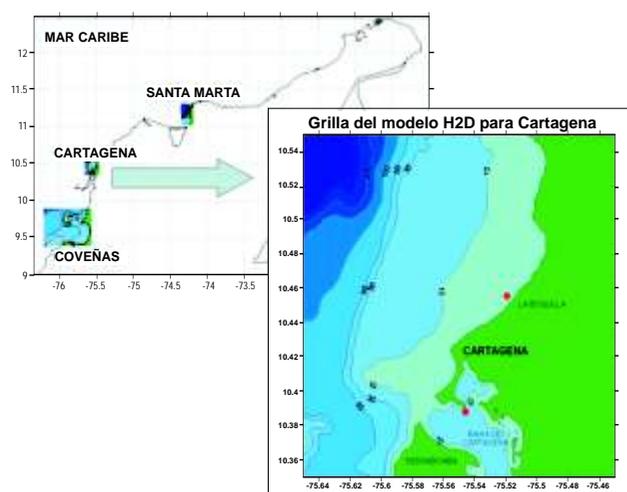


Figura 2. Malla del modelo H2D para Cartagena.

Tabla 1. Configuración modelo H2D.

Variable	Coveñas	Cartagena	Santa Marta
Límite N	9.9° N	10.55° N	11.02° N
Límite S	9.45° N	10.35° N	11.30° N
Límite E	75.56° W	75.45° W	74.18° W
Límite W	76.2° W	75.65° W	74.35° W
ΔX (m)	700	250	330
ΔY (m)	890	250	334
No. Nodos x	80	90	58
No. Nodos y	80	90	94
Δt (s)	15	1	4
Visc. remolino	12.6	5	6.5
Lat. Salida	9.45° N	75.52° N	11.24° N
Long. Salida	75.64° W	10.45° W	74.21° W

En todos los casos: (i) se utilizó información batimétrica del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH a la mejor resolución disponible, (ii) se generó la serie de tiempo de nivel del mar para el año de 1988, (iii) se utilizó un tiempo de cálculo que asegurara la estabilidad

numérica del modelo teniendo en cuenta la condición de Courant, y (iv) se determinaron otras constantes de acuerdo con las recomendaciones presentadas por Otero [11].

Una vez se obtuvo un año de datos de marea con el modelo H2D, nuevamente se usaron las herramientas numéricas desarrolladas por Pawlowicz, *et al.*, [7], para encontrar las amplitudes y fases de los armónicos en cada uno de los tres lugares, las cuales fueron empleadas para pronosticar 19 años de datos de marea, entre 1988 y el 2006.

Series del residuo de marea

Para obtener una serie del residuo de marea es necesario contar con datos instrumentales *in situ* del nivel del mar. Empleando las herramientas numéricas desarrolladas por Pawlowicz, *et al.*, [7], a la serie de tiempo de nivel del mar de interés se le realizó el análisis armónico, obteniendo las constantes que son usadas para pronosticar la serie de marea (sólo el componente astronómico) para el mismo período de tiempo.

A la serie del nivel del mar instrumental, se le restó la serie de marea pronosticada, obteniendo como resultado el residuo de marea. Este procedimiento parte de la hipótesis de que toda variación del nivel del mar por causas astronómicas (marea) es reconstruido por el análisis de armónicos, por lo cual, el residuo de este análisis, contiene todas las variaciones del nivel del mar por causas diferentes a las astronómicas (sean meteorológicas u oceanográficas).

Régimen medio y extremo del nivel del mar

Para la construcción de estos regímenes se parte de las siguientes hipótesis: (i) El nivel del mar está constituido por la suma entre la marea y el residuo de marea, (ii) la marea es una variable determinista, (iii) el residuo de marea es una variable aleatoria y sigue una distribución aproximadamente normal, y (iv) la marea y el residuo son variables estadísticamente independientes.

Es necesario simular largas series de tiempo del nivel del mar para obtener resultados de probabilidad que representen adecuadamente la realidad, por cuanto los datos *in situ* son limitados o inexistentes. Para obtener la marea, en las tres zonas estudiadas se utilizaron las series simuladas con el modelo numérico H2D

durante un año para obtener las componentes armónicas y predecir 19 años de marea. Las series de residuo de marea se generaron mediante simulaciones de Monte Carlo de acuerdo con el procedimiento establecido por DIMAR [4] basado en la metodología aplicada en el Atlas de Inundación del Litoral Español [12], para lo cual se tomó el comportamiento estadístico de 38 años del residuo de la marea en Cartagena, obtenido conforme con la metodología presentada, uniendo los resultados encontrados en dos períodos de 19 años, el primero entre 1955 a 1973 y el segundo entre 1974 y 1992. Se utilizaron períodos de 19 años, atendiendo las variaciones de largo plazo por la regresión de los nodos lunares [6].

Para el régimen medio del nivel del mar se simularon 150 series de residuo de marea de 19 años cada una, a la cual en cada caso se le sumó la serie de 19 años de marea, obteniendo 2850 años de nivel del mar con datos horarios para cada área. Se construyó una curva de probabilidad acumulada (P), con valores de 0 a 1, de acuerdo con la siguiente ecuación [4]:

$$P(x) = \frac{x}{N + 1} \quad (1)$$

donde x es la posición de cada altura al ordenarse de menor a mayor y N el número total de datos.

Para el régimen extremo del nivel del mar se simularon 2000 series de residuo de marea de 19 años cada una. A cada una de estas series se le sumó la serie de 19 años de marea, obteniendo finalmente una serie de nivel del mar de 38000 años con datos horarios. Se tomó el máximo valor de nivel del mar para cada uno de los 38000 años generados. Se construyó una curva con el período de retorno en años (R) de acuerdo con la siguiente ecuación [4]:

$$R(x) = \frac{1}{1 - P(x)} \quad (2)$$

En este caso, el período de retorno indica el máximo valor de altura del nivel del mar esperado en ese lapso de tiempo. Esta información es muy útil para el cumplimiento de estándares en construcciones costeras.

Finalmente, a lo largo del artículo con el fin de valorar cuantitativamente las diferencias entre dos curvas o

series de tiempo, se empleó la Raíz de la Suma del Cuadrado de las Diferencias (RSCD), definida por la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\frac{\sum_i^N (C1 - C2)_i^2}{N}} \quad (3)$$

Donde N es el número de datos con los que se construyeron las dos curvas (C).

Resultados

Comportamiento de la marea

Para su análisis, los resultados se presentan primero en términos del comportamiento de las series de tiempo de la marea para 1988 *in situ* y conseguidas con el modelo en Cartagena, segundo como curvas de probabilidad acumulada del mismo año, y tercero como curvas de probabilidad acumulada a partir de 19 años de datos horarios pronosticados usando los datos obtenidos con el modelo en las tres ciudades e *in situ* de Cartagena.

Inicialmente, con el fin de evaluar las diferencias entre las series de marea obtenidas por los dos métodos descritos en la sección anterior, estos fueron aplicados en Cartagena, por ser la única ciudad del Caribe colombiano con datos instrumentales suficientemente largos y disponibles en el UHSLC. Para esta comparación se escogió el año de 1988, por contar con un 96% de los datos *in situ*, coincidiendo además con los años disponibles en la base de datos de marea *Grenoble*, empleada en el modelo numérico. La comparación se efectuó entre los resultados de marea arrojados por el modelo H2D dentro de la bahía y la serie de marea obtenida con base en los registros instrumentales de nivel del mar, después del análisis armónico. El punto rojo más al sur en la figura 2 (Lat. 10.388° N, Long. 75.546° W), indica la localización del nodo del modelo más cercano a donde se encontraba el mareógrafo con el que se tomó la serie de tiempo [5].

En la figura 3 arriba se observa en azul la serie de tiempo de marea pronosticada para 1988 utilizando los 68 componentes obtenidos con el análisis armónico [7] de la serie de nivel del mar entre 1974 y 1992 (en el apéndice A se presentan como referencia las constantes de los 13 principales componentes

encontrados en este análisis). En rojo se muestra la serie obtenida directamente con el modelo H2D, y en negro, la diferencia entre las dos series. Nótese en la diferencia, como la serie pronosticada con base en datos *in situ* incluye una clara señal de período anual, la cual no aparece en la serie construida con el modelo.

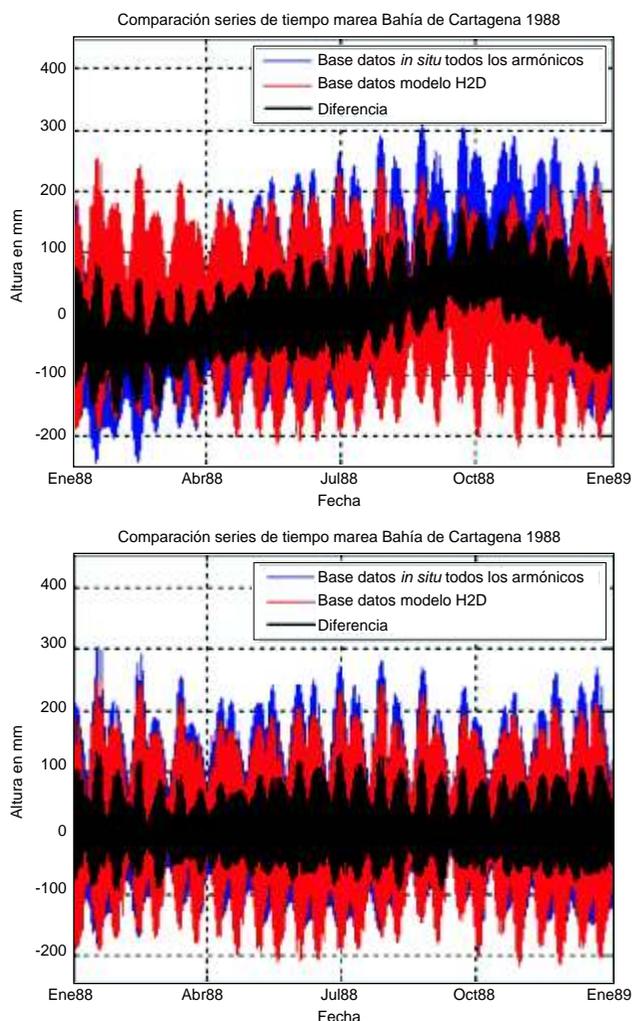


Figura 3. Comparación series de tiempo de marea en Cartagena año 1988.

Con el fin de estudiar mejor este comportamiento encontrado, se pronosticó nuevamente la serie de tiempo de la marea empleando las mismas constantes halladas usando los datos *in situ* entre 1974-92, pero sin usar los armónicos SA, SSA y S1, los cuales tienen períodos de un año, medio año y un día respectivamente, teniendo en cuenta que estos son los principales armónicos para representar señales de variación diaria o estacional, relacionadas con

condiciones meteorológicas con cierto grado de periodicidad [13]. Esta salida se presenta en la curva azul abajo en la figura 3. Se observa en esta oportunidad como al no emplear estos armónicos en el pronóstico de marea, desaparece la señal estacional.

De lo anterior se destaca la fuerte señal estacional existente en los datos de nivel del mar obtenidos dentro de la Bahía de Cartagena. Efectuando un análisis del valor de amplitud de los armónicos (calculados de la serie de nivel del mar entre 1974 y 1992), se encontró que SA, SSA y S1 están entre los 12 armónicos con mayor amplitud (apéndice A), aportando entre los tres el 17% del total de la amplitud de la marea pronosticada.

Comparando la serie de tiempo obtenida con el modelo con respecto a la pronosticada usando todos los armónicos se encontró una correlación del 84% y el valor del RSCD fue de 5.89 cm, en tanto que al compararla con la serie pronosticada a la cual se le eliminó la señal estacional, la correlación fue del 91% y el valor del RSCD fue de 4.26 cm.

Al comparar las series de tiempo de la marea a partir de registros *in situ* con la obtenida con el modelo numérico no se encontraron discrepancias significativas en términos de la fase.

Para el segundo análisis del comportamiento de la marea, se usaron las series de tiempo de 1988 para construir curvas de probabilidad acumulada, por ser estas de mayor interés en el presente artículo. Realizando la comparación entre la curva de probabilidad con los datos del modelo y la obtenida usando todos los armónicos se encontró un valor de RSCD de 1.82 cm, mientras que al compararla con los datos pronosticados sin la señal estacional, este valor fue de 1.41 cm, ambos mucho menores a los valores de RSCD obtenidos al comparar las series de tiempo.

Se observa de los resultados anteriores como son más ajustados los datos del modelo H2D a los pronosticados con base en los datos *in situ* cuando se excluyen los tres armónicos con la señal estacional. Igualmente, como los dos métodos empleados para calcular la marea presentan resultados con alta correlación y pequeñas diferencias en las series de tiempo, las cuales se disminuyen al colocar los datos en funciones de probabilidad acumulada.

Terminada la comparación entre los dos métodos de simulación de series de marea con datos de 1988, se procedió a pronosticar 19 años de marea entre 1988 y el 2006 para las áreas de Coveñas, Cartagena y Santa Marta, cada una con los valores de amplitud y fase de las constantes encontradas al realizar el análisis armónico a las series de tiempo horaria de 1988 construidas con el modelo H2D, tal y como se indicó en la metodología. En esta ocasión, los datos de Cartagena se tomaron de un nodo fuera de la bahía (punto rojo más al norte en la figura 2), en la posición que se indica en la tabla 1, con el fin de mostrar un comportamiento representativo en aguas abiertas. Adicionalmente, en el caso de Cartagena siguiendo el procedimiento que emplea datos *in situ*, se pronosticaron 19 años de marea, entre 1974 y 1992 (usando los 68 armónicos). Con estas series de tiempo se construyeron las cuatro curvas de probabilidad acumulada que se presentan en la figura 4.

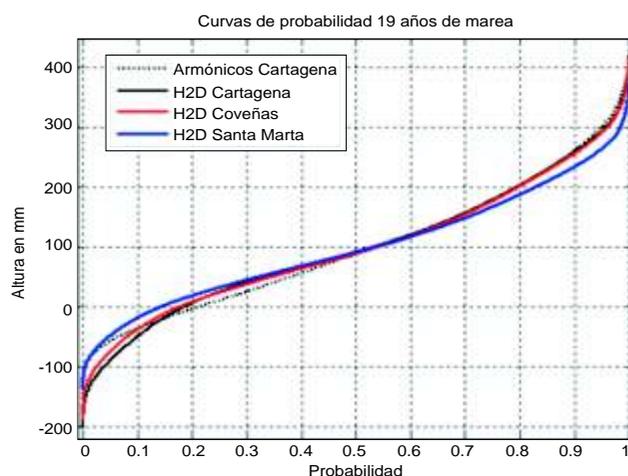


Figura 4. Comparación curvas de probabilidad de 19 años de marea.

Al comparar las dos curvas de probabilidad en Cartagena con 19 años de datos se encontró un RSCD de 1.30 cm, menor al encontrado al comparar un solo año de datos (1.82 cm), lo cual muestra como en la medida que se aumentan los años simulados el ajuste de las curvas de probabilidad de los dos métodos es mejor. La buena coincidencia entre estas curvas permite esperar resultados adecuados de las curvas de probabilidad de marea obtenidas con base en datos del modelo.

De otro lado, al comparar las curvas con datos obtenidos por el modelo de Cartagena y Coveñas se

encontró un RSCD de 0.55 y de 1.97 cm, entre Cartagena y Santa Marta. Esto muestra que al confrontar el comportamiento de la marea calculado por un sólo método (datos del modelo), las diferencias no fueron grandes, especialmente entre Cartagena y Coveñas. En la tabla 2 se presentan las alturas en cm. a diferentes probabilidades, así como el rango entre el valor máximo y mínimo en los 19 años de marea pronosticados para las cuatro curvas de la figura 4.

Nótese cómo el mayor rango es el de Cartagena con el modelo (62.26 cm), en tanto que el menor es el de Santa Marta (50.93 cm). Igualmente las mayores alturas por marea con datos del modelo corresponden a las de Cartagena (31.93 cm sobre el nivel medio del mar).

Comportamiento del residuo de marea

El estudio del residuo de la marea se dividió en dos partes. Inicialmente para evaluar el comportamiento espacial y temporal en el Caribe colombiano, se estudiaron tres series bianuales distanciadas entre sí por aproximadamente 10 años del residuo de marea en Cartagena, Cristóbal y Magueyes (figura 1), por contar estos lugares con series de tiempo en el UHSLC. Los residuos de marea se obtuvieron como se indica en la metodología para cada año, uniendo los resultados de los años consecutivos. Los períodos estudiados fueron de 1965-1966, 1976-1977 y 1987-1988, los cuales fueron escogidos teniendo en cuenta la cantidad de datos disponibles en las series recolectadas *in situ*.

A las series de tiempo con los residuos de marea se les calcularon los valores de correlación. Entre las series de Cartagena y Cristóbal, la mayor correlación fue de 0.60 en el 87-88 y la mínima de 0.44 en el 65-66. Entre Cartagena y Magueyes la mayor correlación fue de 0.34 en el 65-66, y la mínima de 0.15 en el 76-77. Entre Cristóbal y Magueyes la mayor correlación fue de 0.22 en el 65-66, en tanto que la menor fue de 0.13 en el 76-77. Nótese como la correlación disminuye al aumentar la distancia entre las series comparadas. También se destacaron las diferencias entre las alturas máximas de los tres lugares en todos los períodos bianuales, como por ejemplo entre el 76-77, se observaron valores de 14.13, 14.17 y 31.07 cm en Cartagena, Cristóbal y Magueyes respectivamente. Obsérvese como la máxima altura en Puerto Rico fue más del doble que la de los otros dos lugares.

En la figura 5 se presentan las series de tiempo del residuo de la marea para los tres lugares evaluados entre 1987 y 1988. Llama la atención una altura de 31.49 cm en la serie de Magueyes, la cual se presentó el 11 de septiembre de 1988, como consecuencia del huracán Gilbert, que en esa fecha pasó a 200 kilómetros al sur de Puerto Rico, siendo de categoría 1.

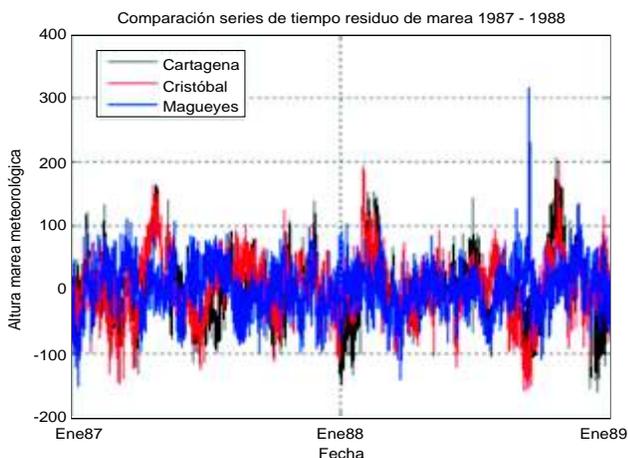


Figura 5. Serie de tiempo del residuo de la marea de 1987 y 1988 para Cartagena, Cristóbal y Magueyes.

El comportamiento de los tres períodos y lugares evaluados se presentan en la figura 6 como curvas de probabilidad acumulada. Al comparar las curvas de 1987-88 se encontró un valor de RSCD de 0.43 cm entre Cartagena y Cristóbal, y de 1.5 cm entre Cartagena y Magueyes, mostrando nuevamente la mayor coincidencia en el comportamiento del residuo de la marea entre las estaciones de Colombia y Panamá.

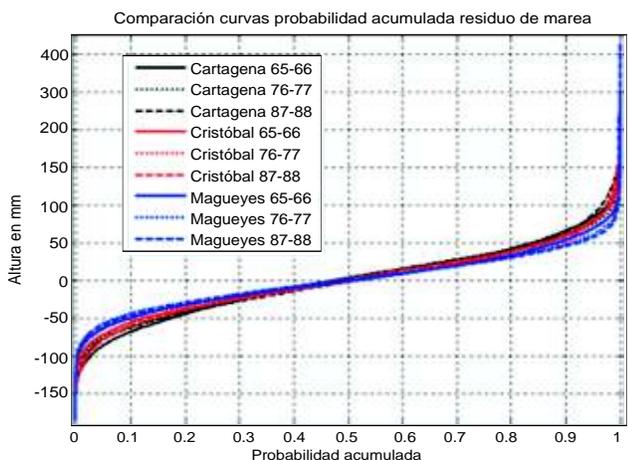


Figura 6. Curvas de probabilidad del residuo de la marea de períodos bianuales en Cartagena, Cristóbal y Magueyes.

El comportamiento del residuo de la marea, con mayor correlación entre Cartagena y Cristóbal, así como las diferencias en las alturas máximas y los valores de RSCD encontrados, indican que los fenómenos meteorológicos y oceanográficos presentes en el mar Caribe suroccidental tienen características similares en la cuenca, pero diferentes en la medida que se alejan en dirección a las Antillas mayores.

Una de las razones para esta diferencia es que el Caribe colombiano ha sido caracterizado como una zona de baja probabilidad de formación y desarrollo de tormentas tropicales [14], a diferencia de las Antillas mayores, que durante el paso de estos fenómenos aumentan significativamente los valores de alturas en el residuo de marea (efecto de las *ondas de tormenta storm-surge*). Por todo lo anterior, no se consideró utilizar datos de residuo de marea calculados en Magueyes en el cálculo de niveles del mar en el Caribe continental colombiano.

Adicionalmente se calculó la correlación entre los seis años del residuo de marea en Cartagena, encontrando que el mayor valor de correlación fue de 0.26, entre 1965 y 1976, en tanto que el menor valor fue de 0.002 entre 1965 y 1987. Esto confirma la naturaleza estocástica del residuo de marea y la gran variación entre diferentes años en Cartagena.

La segunda parte del análisis del residuo de marea se efectuó con base en 38 años de datos horarios obtenidos de las series *in situ* de Cartagena y Cristóbal para lo cual se analizaron dos períodos de 19 años, el primero entre 1955 a 1973 y el segundo entre 1974 y 1992, uniendo los resultados del residuo de marea en una sola serie. Estos períodos se seleccionaron con base en la información disponible y características de la base de datos de la UHSLC para Cartagena [3,5]. En la figura 7 se presentan las curvas de probabilidad de estos datos.

El RSCD entre estas dos curvas fue de 0.54 cm, mostrando gran similitud. En la tabla 2 se muestran las alturas del residuo de marea de ambos lugares a diferentes probabilidades. Se destaca la gran diferencia del valor máximo, siendo superior en Cartagena en 11.51 cm, posiblemente por tener mayor probabilidad que Cristóbal a sufrir el efecto

de elevación del nivel del mar debido a las *ondas de tormenta* ante el paso de huracanes. El resto de valores de las alturas son más coincidentes.

Nótese en la tabla 2 que al comparar el rango entre valores máximos y mínimos de la altura de la marea con respecto a los del residuo (para los 38 años utilizados para calcular las curva de probabilidad de la figura 7), que los valores son de similar magnitud, lo cual muestra la importancia en el Caribe de los cambios en el nivel del mar causados por efectos meteorológicos y oceanográficos, al ser del mismo orden de magnitud a los cambios producidos por efectos astronómicos. Teniendo en cuenta que el residuo de marea es una variable aleatoria y por consiguiente asociada a una probabilidad de ocurrencia, en la medida que se calcule el residuo para un período mayor de tiempo, es de esperar que aumente el rango entre valores máximos y mínimos.

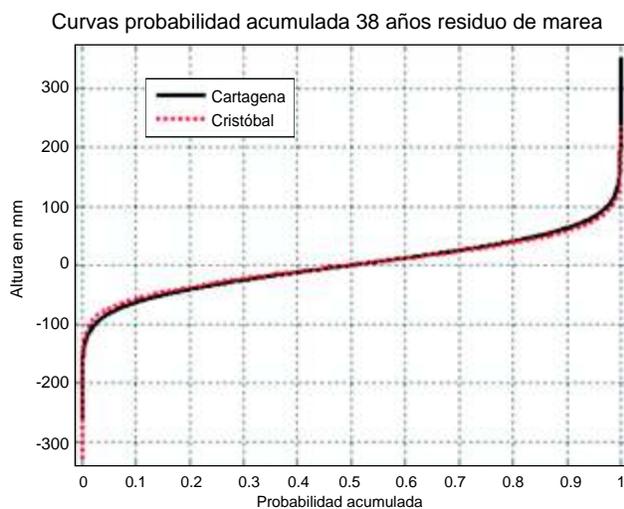


Figura 7. Curvas de probabilidad del residuo de la marea de 38 años en Cartagena y Cristóbal.

Tabla 2. Diferencia cuantitativa curvas de probabilidad.

Probabilidad	Altura de Marea (cm)				Altura del Residuo (cm)	
	In situ	Modelo H2D		C/gena	Cristóbal	
	C/gena	C/gena	Coveñas	S. Marta	C/gena	Cristóbal
100%	32.31	31.93	31.37	27.13	35.20	23.69
95%	20.08	19.33	19.04	16.34	8.15	7.49
90%	16.10	15.79	15.52	13.33	6.26	5.75
75%	7.77	7.89	7.65	6.67	3.22	3.00
50%	-1.24	-0.82	-1.12	-0.90	-0.04	0.03
0%	-25.48	-30.32	-28.68	-23.80	-26.81	-33.08
Rango	57.78	62.26	60.05	50.93	60.23	56.78

Teniendo en cuenta (i) la coincidencia entre las curvas de probabilidad acumulada del residuo de marea entre Cartagena y Cristóbal, (ii) el no contar con registros adecuados de mediciones *in situ* del nivel del mar en Coveñas y Santa Marta, así como (iii) la cercanía de estas ciudades a Cartagena (figura 1, Coveñas 112 km y Santa Marta 172 km), por lo cual se esperan valores máximos causados por el efecto de elevación del nivel del mar por las *ondas de tormenta* similares, se consideró adecuado utilizar la información estadística de los 38 años de residuo de marea encontrada en Cartagena para la elaboración de los regímenes medio y extremo en las tres ciudades colombianas. No obstante lo anterior, se observa en la tabla 2 como la diferencia entre los valores máximos en los 38 años analizados entre Cartagena y Cristóbal, es de 11.51 cm, diferencia que se hace más significativa en la medida que se utilicen períodos de retorno mayores, o se aumente la distancia entre el punto de estudio y Cartagena.

Finalmente, en la figura 8 se presenta el histograma de los 38 años de residuo de marea en Cartagena, mostrando un comportamiento estadístico normal, confirmando de esta manera una de las hipótesis para la construcción de regímenes de nivel del mar, presentadas en la metodología. El valor medio es de -0.44 mm, con una desviación estándar de 50.84 mm.

Histograma de frecuencias para 38 años de residuo de marea

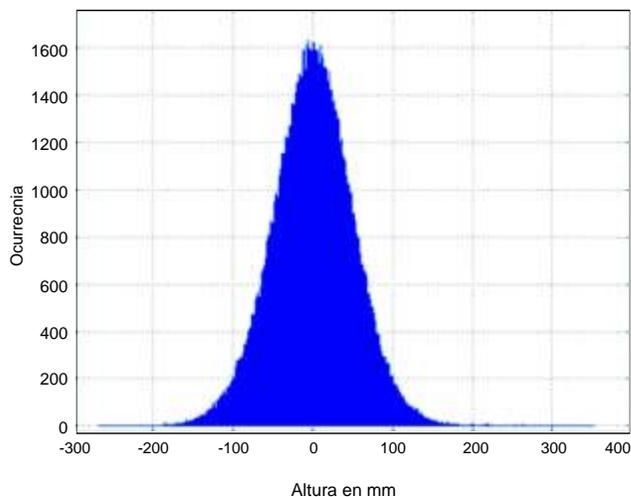


Figura 8. Histograma de frecuencias para el residuo de marea de 38 años en Cartagena.

Regímenes medio y extremo de nivel del mar

De acuerdo con la descripción de la metodología se construyeron las curvas de probabilidad acumulada del régimen medio y del período de retorno para el régimen extremo en los tres lugares de estudio. En la figura 9 se presenta la curva de régimen medio mostrando las probabilidades de ocurrencia por encima del 50%.

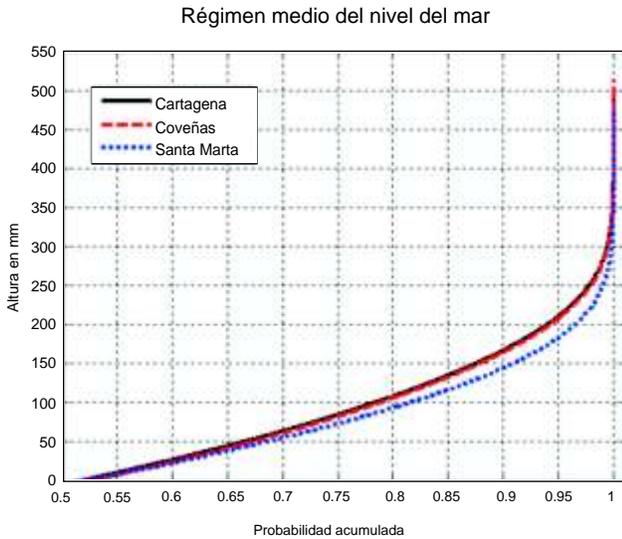


Figura 9. Curva de probabilidad acumulada para el régimen medio del nivel del mar.

En la tabla 3, se presentan los datos correspondientes a algunas probabilidades del régimen medio. Por ejemplo, la altura en Coveñas con una probabilidad del 97%, indica que durante 263 horas al año, el nivel del mar estaría por encima de los 23.24 cm con respecto al nivel medio del mar (teniendo en cuenta que un año cuenta con 8760 horas), o lo que es igual, que durante 8497 horas al año, el nivel del mar estaría por debajo de esta altura.

Tabla 3. Alturas (cm) del régimen medio del nivel del mar.

Probabilidad	Horas/Año	C/gena	Coveñas	S. Marta
99%	88	28.06	27.70	24.64
97%	263	23.56	23.24	20.55
95%	438	20.99	20.69	18.24
93%	613	19.04	18.76	16.51
90%	876	16.68	16.42	14.42
75%	2190	8.47	8.22	7.32
50%	4380	-0.50	-0.75	-0.58
0%	8760	-49.53	-47.64	-43.93

Las curvas de Coveñas y Cartagena tienen un comportamiento casi idéntico, en tanto que la de Santa Marta es un tanto menor, sin embargo, en los valores presentados en la tabla 3, las diferencias entre uno y otro sitio, están en el orden de los cm, mostrando gran homogeneidad. Igualmente se observa un comportamiento casi lineal del régimen medio hasta la probabilidad del 90%, por lo cual a mayores probabilidades se pueden esperar mayores cambios en este comportamiento medio entre uno y otro año.

En la figura 10 se presenta la curva del régimen extremo para Cartagena, Coveñas y Santa Marta hasta los 120 años de período de retorno.

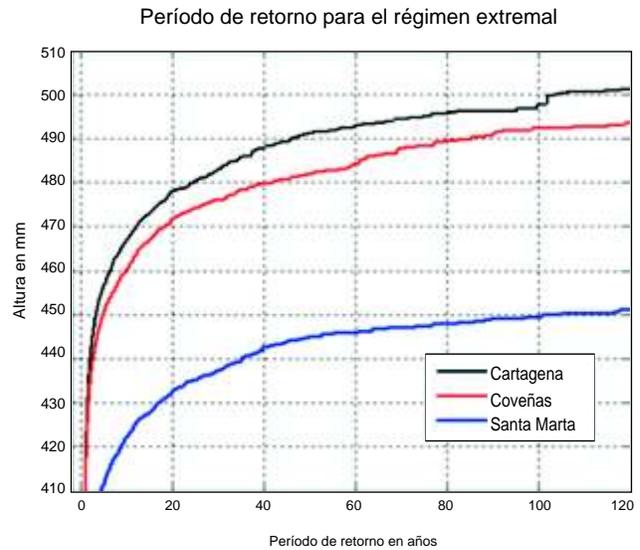


Figura 10. Curva del período de retorno del régimen extremo del nivel del mar.

En la tabla 4 se muestran los datos correspondientes a algunos períodos de retorno del régimen extremo. Por ejemplo, en el caso de los 50 años, se esperaría que la máxima altura del nivel del mar durante este período para Santa Marta sea de 44.48 cm sobre el nivel medio del mar.

Se observa cómo nuevamente la curva de Cartagena presenta valores más altos a causa del mayor rango de la marea, sin embargo las diferencias en altura en todos los períodos de retorno para las tres curvas, están en el orden de los cm. También hay gran variabilidad en las alturas en los períodos de retorno de menos de 15 años (figura 10).

Al comparar los resultados de la construcción de regímenes medio y extremo es clara la diferencia de los conceptos. Por ejemplo, para Cartagena, el comportamiento medio del nivel del mar indicaría que durante el año el 95% del tiempo, el nivel del mar estará por debajo de los 20.99 cm con respecto al nivel medio del mar. Este valor es un indicativo para determinar los terrenos de bajamar, es decir, las zonas que regularmente cubren y descubren con la variación del nivel del mar.

Por otro lado, la altura del nivel del mar esperada para Cartagena en un período de retorno de 20 años es de 47.79 cm, lo cual sirve de referencia para diseño de obras de ingeniería costera. Nótese cómo esta altura es más del doble que el 95% del régimen medio, lo cual es de esperar por cuanto fue construida con base en los casos extremos de cada año simulado.

Tabla 4. Alturas (cm) del régimen extremo del nivel del mar.

Período de retorno en años	C/gena	Coveñas	S. Marta
10	46.67	46.00	42.22
20	47.79	47.17	43.23
30	48.29	47.59	43.72
40	48.76	47.97	44.26
50	49.12	48.18	44.48
100	49.76	49.22	45.92
120	50.10	49.36	45.14
200	50.69	49.82	45.50
500	52.05	51.23	47.30

Discusión

El comportamiento en el Caribe de la marea fue estudiada previamente por Kjerfve, (1983) [15], Lozano, *et al.*, (1993) [16] y Molares, (2004) [1], todos coincidiendo al catalogar la marea del Caribe como micromareal, tal como se corrobora en este trabajo.

En las amplitudes calculadas para los armónicos de la marea empleando los datos *in situ* de 19 años en la Bahía de Cartagena entre 1974 y 1992, se encontró que las principales componentes fueron K1, M2, O1 y SA, aportando al total de la señal un 19 %, 15 %, 12 % y 11 % respectivamente, sumando entre las cuatro el

57 % de la amplitud de marea para los 68 armónicos utilizados. S2 es el octavo armónico con mayor amplitud en la marea, aportando un 3.3 % a la composición de ésta, correspondiendo a una clasificación de marea mixta principalmente diurna (coeficiente de Coutier de 1.72), tal como fue descrito en trabajos anteriores [1].

La señal anual y semestral encontrada en los registros de nivel del mar en la Bahía de Cartagena de acuerdo con la importancia relativa de los armónicos SA y SSA corresponde a lo encontrado anteriormente a partir del análisis al espectro de frecuencia de datos mensuales [3]. Se recomienda continuar con la investigación para poder determinar las causas de esta señal en el nivel del mar, sea de origen astronómico, oceanográfico, atmosférico, los aportes del canal del Dique, o una combinación de éstas, así como su carácter local o regional.

De acuerdo con Pugh, [17] la desviación estándar del residuo de la marea es útil para medir los efectos no astronómicos en el nivel del mar, variando de pocos centímetros en islas en medio del océano en el trópico, a las decenas de centímetros en áreas de aguas someras y alta ocurrencia de temporales. El valor obtenido de 5.08 cm en la desviación estándar del residuo en Cartagena es comparable con el de Honolulu (6 cm), lo cual llama la atención, mostrando que a pesar de las características someras y estuarinas de la Bahía de Cartagena, los datos del residuo de la marea son poco dispersos (figura 8).

No se conocen estudios previos en el Caribe en los cuales se hayan evaluado los regímenes medio y extremo del nivel del mar, por lo cual no es posible comparar los resultados encontrados con trabajos de otros autores. Sin embargo, verificando 40 años de nivel del mar medidos *in situ* en Cartagena entre 1953 y 1992 (habiendo restado el promedio anual a los datos para eliminar la señal de variación climática), se encontró un valor máximo de 49.33 cm, tan sólo 0.57 cm mayor al período de retorno de 40 años para esta ciudad presentado en la tabla 4, lo cual muestra que la metodología seguida presenta resultados adecuados.

Se destaca el hecho de que en Cartagena los rangos entre los valores máximos y mínimos tanto de la marea como de su residuo, se encuentren en el mismo orden de magnitud, lo cual explica por qué un cambio en el segundo, sea por factores meteorológicos y/u

oceanográficos tiene un impacto tan evidente en la zona costera, como es el caso de los mares de leva [2]. Igualmente los casos extremos de altura en el residuo de la marea en el Caribe son superiores en las Antillas Mayores, en tanto que van disminuyendo en la medida que descienden en latitud, al alejarse de las áreas en las cuales son más altas las probabilidades de trayectorias de tormentas tropicales y huracanes.

En el Caribe continental colombiano el comportamiento de la marea (sólo el efecto astronómico), es muy homogéneo, con pequeñas diferencias en el rango entre los valores mínimos y máximos. El comportamiento en Santa Marta presentó un rango entre valores mínimos y máximos de aproximadamente 10 cm menos a los de Cartagena y Coveñas, lo cual indica una disminución del rango de la marea hacia el norte de la costa Caribe colombiana. El mayor rango en la marea encontrada en Cartagena con respecto al de Coveñas, podría ser explicado por efectos de aguas someras en la onda de marea.

Las pequeñas diferencias encontradas en los regímenes medio y extremo entre los tres lugares evaluados, a pesar de construirse con los mismos valores del residuo de marea (lo cual se considera válido a partir del análisis regional realizado), son consecuencia de la similitud en el comportamiento de la marea. Por lo anterior es de suponer que las alturas encontradas en este trabajo sirven de referencia de manera general para todo el Caribe continental colombiano (teniendo en cuenta las limitaciones comentadas en la sección de resultados-comportamiento del residuo de marea).

Finalmente se recomienda al utilizar los valores de período de retorno presentados en la tabla 4, tener en cuenta la tendencia de aumento de nivel medio del mar para la región, la cual fue calculada por Torres, *et al.*, [3] en 3.58 mm/año, lo cual por ejemplo, para un período de retorno de 50 años, equivaldría a una sobre elevación de 17.9 cm, más del 30% de las alturas máximas del nivel del mar esperadas para este período de retorno en las tres ciudades estudiadas.

Agradecimientos

Al Servicio Nacional del Océano (NOS) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

(NOAA) de los Estados Unidos de América, quienes patrocinan el Archivo Conjunto par nivel del mar, el cual se mantiene con esfuerzos mancomunados del Centro Nacional de Datos Oceanográficos de EUA (NODC) y el Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawaii (UHSLC), por proporcionar las series de nivel del mar. Igualmente a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios.

Referencias bibliográficas

- [1] Morales R. Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH 2003; (22): 105-114.
- [2] Lerma A. Variabilité du niveau de la mer de 1950 à 2000 et risque associé aux épisodes de mar de leva pour la presqu'île de Bocagrande (Carthagène des Indes, Colombie). Thèse de Master 2. Université de Paris 1 Panthéon Sorbonne; 2008.
- [3] Torres R, Gómez J, Afanador F. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH 2006; (24): 64-72.
- [4] Dirección General Marítima DIMAR. Procedimiento técnico para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas cuando no se tienen registros instrumentales. Cartagena (Colombia); 2006.
- [5] Universidad de Hawaii, Centro del Nivel del Mar. Datos disponibles en <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>.
- [6] Organización Oceanográfica Internacional OHI. Manual de hidrografía. Capítulo 5. Nivel del mar y flujos. Publicación M-13; 2005.
- [7] Pawlowicz R, B Beardsley, S Lentz. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_Tide. Computers and Geosciences. 2002; 28: 929-937.
- [8] Foreman M. Manual for tidal height analysis and prediction. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria BC. Pacific Marine Science Report 1977; 77-10.
- [9] Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria - GIOC. Manual de referencia modelo numérico H2DII. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria. Santander (España); 2001.
- [10] Andersen O, Woodworth L, Flather A. Intercomparison of recent global ocean tide models. J. Geophys. Res., 1995; 100 (C12), 25, 261-25, 282.
- [11] Otero L. Aplicación de un modelo hidrodinámico bidimensional para describir las corrientes y la propagación de la onda de marea en la Bahía de Buenaventura. Boletín Científico CCCP 2005; (12): 9-21.

[12] Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas GIOC. Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español. Documento Temático. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria. Santander (España); 2002.

[13] National Oceanographic and Atmospheric Administration, Tide and current glossary. U.S. Department of commerce. Silver Spring MD; 2000.

[14] Ortiz J. Huracanes y tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1900. *Boletín Científico CIOH* 2007; (25): 54-60.

[15] Kjerfve B. Tides of the Caribbean Sea. *J Geophys. Res.*, 1981; 86: 4243-4247.

[16] Lozano A, Para B. Análisis armónico y predicción de la marea para la Bahía de Cartagena. Trabajo de grado. Facultad de Oceanografía. Escuela Naval Almirante Padilla. Cartagena (Colombia); 1993.

[17] Pugh D. Changing sea levels: effects of tides, weather and climate. Cambridge University Press. U.K.; 2004.

Apéndice A

Componentes de la marea identificadas a partir de registros *in situ* del nivel del mar en Cartagena entre 1974 y 1992.

Componente	Período (h)	Amplitud (mm)	Amp_err (mm)	Fase (°)	Pha_err (°)
K1	23.934	97.6855	0.804	240.19	0.47
M2	12.421	74.5424	0.494	134.97	0.36
O1	25.819	58.9667	0.720	240.61	0.77
SA	8764.242	52.9553	5.050	253.71	5.70
P1	24.066	30.4655	0.838	241.38	1.46
N2	12.658	26.3244	0.470	109.81	0.93
SSA	4382.121	24.6052	4.922	55.64	13.05
S2	12.000	16.4922	0.509	44.83	1.68
MF	327.858	15.7653	4.849	357.19	18.84
Q1	26.868	10.0021	0.722	236.54	4.33
MM	661.288	8.1115	5.118	347.53	39.38
S1	24.000	6.9950	0.695	332.19	6.38