



ARTÍCULO

Contribución de la hidrografía histórica al estudio de la cinemática de los fondos marinos: evolución del golfo de Urabá, Colombia

Contribution of historical hydrography to the sea bottom cinematic study: evolution of the Uraba Gulf, Colombia

Fecha recepción: 2007-09-11 / Fecha aprobación: 2007-10-08

Yves-François Thomas thomas@cnsr-bellevue.fr

Marcella Cesaraccio cesaraccio@cnsr-bellevue.fr

Université Paris Panthéon Sorbonne CNRS: Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591, 1 Place Aristide-Briand, 92195 Meudon Cedex, Francia

Carolina García-Valencia

colombiacgv@invemar.org.co

Invemar: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Cerro Punta de Betín, A.A. 1016, Santa Marta

Loïc Ménanteau

loic.menanteau@univ-nantes.fr

Université de Nantes CNRS: Géolittomer, UMR 6554, B.P. 81227, 44312 Nantes Cedex 3, Francia

Resumen

El reciente desarrollo de herramientas especializadas tanto en geomática, para la solución de problemas de interpolación, como en sistemas de información geográfica, para la conformación, gestión y explotación de bases de datos permitió el rápido desarrollo de estudios en hidrografía histórica. El estudio presentado se basa en una serie de mapas batimétricos realizados entre 1938 y 2001, se muestra la influencia de contribuciones de sólidos en la desembocadura del río Atrato sobre la cinemática del fondo de Bahía Colombia, situada al sureste del golfo de Urabá. El área del fondo que no ha cambiado corresponde a un 35 % de la superficie de la Bahía. Los sectores en erosión representan un 4% de la zona de estudio, se localizan esencialmente sobre la franja litoral y dan cuenta del retroceso de la línea de costa. Sobre distintos brazos del río Atrato, el desplazamiento se evidencia en la localización de estos sectores de forma secundaria hacia el oeste de la Bahía. Las zonas en acumulación representan la mayor parte de los fondos de Bahía Colombia (61 %) en los que el material acumulado tiende a cubrir y aplanar la topografía original. La acumulación sedimentaria media anual del orden de magnitud de $1,8 \cdot 10^7$ m³/año para el conjunto de Bahía Colombia, pone en evidencia, suponiendo una densidad en seco de 0,43, que se acumula una masa de $8 \cdot 10^6$ ton/año, correspondiendo a la sedimentación de la totalidad de la carga de sólidos de los ríos costeros y del río Atrato.

La confrontación de las velocidades de sedimentación actuales con las constatadas en el Holoceno plantea la existencia de una crisis contemporánea de erosión, posiblemente debida al desarrollo de actividades humanas.

Palabras clave: SIG, mapas batimétricos, sedimentología, geomorfología, Colombia, Urabá (*golfo de*), Atrato (*delta del*).

Abstract

The recent development of specialized tools, both in geomathics, for the solution of interpolation problems and the geographical information systems, for the conformation, management and exploitation of data basis, permitted

the quick development of studies in historical hydrography. The study submitted is based on a series of bathymetric charts prepared between 1938–2001, the influence of contributions of solids in the mouth of the Atrato river is shown over the bottom of the Colombia Bay cinematic, located southeast of the Uraba Gulf. The area at the bottom which has not changed corresponds to a 35% of the Bay surface. The sectors in erosion represent some 4% of the study zone; they are located essentially located on the littoral strip and recount to the depression of the shoreline. On different arms of the Atrato river, the displacement is evident at the location of these sectors in a secondary way westwards the Bay. The accumulation zones represent the majority of the Colombia Bay (61%) where the accumulated material tends to cover and flatten the original topography.

The annual media sediment accumulation of the order of magnitude of 1,8–107 m³/year for the set of Colombia Bay, shows up that a mass of 8–106 ton/year is accumulated, supposing a dry density of 0,43, corresponding to the sedimentation of the whole of the charge of the coastal rivers and the Atrato river solids. The confrontation of the present sediment velocities against those stated in the Holoceno brings up the existence of a contemporary erosion crisis, possibly due to the development of human activities.

Key words: SIG, bathymetric charts, sedimentology, geomorphology, Colombia, Uraba (Gulf), Atrato (delta).

Introducción

Los estudios de hidrografía histórica, realizados desde mediados del siglo XX en Francia, Gran Bretaña y Estados Unidos, utilizaron las grandes colecciones de cartas de navegación constituidas desde el siglo XIX. Los primeros estudios de crónicas de mapas coincidieron con las zonas marinas donde los levantamientos hidrográficos frecuentemente se renovaban, principalmente en las áreas geomorfológicamente activas (*i.e.* lagunas, estuarios y deltas) o de importancia económica (sitios portuarios o industriales).

En Francia, el ingeniero hidrógrafo J. Volmat condujo el primer trabajo sobre este tema y publicó entre 1931 y 1953 una serie de contribuciones sobre “*La Pointe de la Coubre et ses abords du XVII^{me} siècle à nos jours*” (*La barra de la Coubre y sus cercanías del siglo XVII hasta*

hoy). En Colombia, este tema es abordado por Molina *et al.* (1992) quienes proponen la comparación de una serie de perfiles batimétricos del golfo de Urabá.

Los trabajos de hidrografía histórica aumentaron por el reciente desarrollo de herramientas especializadas tanto en geomática, para la resolución de los problemas de interpolación, como en sistemas de información geográfica, para la constitución, gestión y explotación de bases de datos. Así pues, Reeve *et al.* (2001) pudieron cuantificar la evolución de los bancos infralitorales de *Great Yarmouth* sobre la costa sureste de Inglaterra aplicando el análisis en componentes principales a una secuencia de levantamientos hidrográficos. De la Torre *et al.* (2002) por su parte, condujeron una reflexión sobre los métodos y límites del empleo de las bases de información geográfica en medio submarino basándose en el ejemplo de levantamientos efectuados en la bahía del río Sena (Francia).

El objetivo de este trabajo es mostrar la importancia de la hidrografía histórica para evaluar la influencia de la contribución de sólidos del río Atrato sobre la cinemática de los fondos de Bahía Colombia (sureste del golfo de Urabá) por medio de una serie de mapas batimétricos realizados entre 1938 y 2001.

Marco físico

Las principales características de carácter geológico, estructural, morfológico, hidrológico, climático y geodinámico del golfo de Urabá que alberga en su extremo sur la Bahía Colombia (Figura 1), se presentan brevemente a continuación.

Morfología de los bordes y del fondo. El golfo de Urabá es el más grande del Caribe colombiano. Sus costas pertenecen a los departamentos de Antioquia (este y sur) y Chocó (oeste). Se abre sobre 37 km entre punta Arenas del Norte al este y el Cabo Tiburón al oeste. Tiene 70 km de largo, un ancho máximo de 39 km entre las puntas Triganá y Urabá, un ancho mínimo de 9 km entre punta Las Vacas y la boca Urabá. Paisajes de colinas bajas, acantilados, enseñadas, bahías, playas y deltas caracterizan el borde del golfo cuyos relieves periféricos, inferiores a 500 m, están principalmente constituidos por rocas sedimentarias plegadas. A lo largo de la orilla occidental del golfo, el litoral se caracteriza por la presencia de una secuencia de rocas de composición volcánica e intrusiva, a veces cortadas en acantilados. Las isóbatas presentan una

determinada sinuosidad en sus contornos, a excepción de las localizadas delante de punta Arenas del Norte, que indican la existencia de una pendiente suave y regular hacia el centro del golfo. Existe una disimetría entre los dos lados, presentándose al oeste una morfología sinuosa y pendiente más fuerte. Los cruceros del B.I. Ancón 'Urabá 2003' y 'Urabá 2004' (Thomas *et al*, 2007) permitieron conocer que sus fondos están mayormente compuestos por sedimentos que pertenecen a las clases granulométricas de los limos y arcillas (Figura 2).

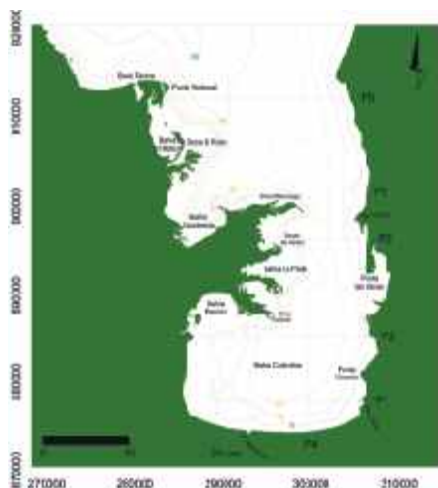


Figura 1. Localización de Bahía Colombia al sur del golfo de Urabá. Las líneas punteadas indican la localización de los perfiles presentados en la figura 3.

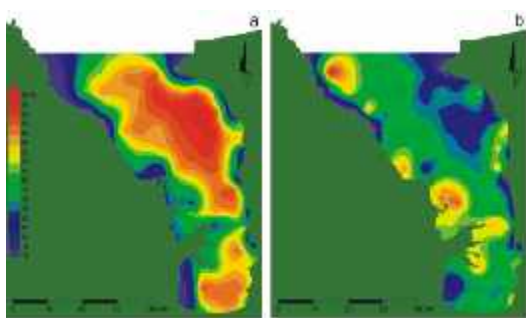


Figura 2. Cartografía de la distribución de los sedimentos que pertenecen a la clase granulométrica de los limos (a) y de las arcillas (b) en el golfo de Urabá (datos del crucero del B.I. Ancón "Urabá 2003").

Las unidades morfosedimentarias del fondo (Molina *et al*, 1992) fueron individualizadas a partir de perfiles realizados con una ecosonda de baja frecuencia (transductor ELAC de 12,5 Khz). Estos perfiles

muestran un sustrato subyacente a la superficie irregular, surcada por canales cuya profundidad varía en función de la posición con relación a la desembocadura del río Atrato. Sobre los perfiles realizados en boca Tarena, los principales canales tienen una profundidad de 10 a 13 m mientras que a la entrada del golfo estos últimos sólo alcanzan de 5 a 7 m. El origen de estos canales se remonta a la última glaciación cuaternaria, cuando los ríos desembocaban en la plataforma continental actual. Las capas depositadas de sedimentos sobre este sustrato tienen espesor variable; forman prismas sedimentarios de forma cóncava cuyo espesor se reduce desde la línea de orilla hacia el centro del golfo. El espesor de estas acumulaciones, a veces superior a 20 m hacia la costa se reduce a menos de tres metros en la entrada del golfo (sector norte). Thomas *et al*, (2007) midieron el espesor de estos depósitos del Holoceno en el sector de Bahía Colombia usando una ecosonda ODEC StrataBox equipada con un transductor de 10 kHz. El estudio arrojó que en el fondo, existen capas de sedimento cuyo espesor puede variar, siendo generalmente entre 20 y 30 m (Figura 3).

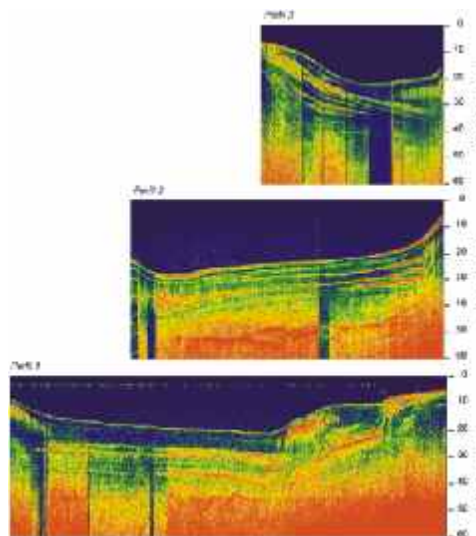


Figura 3. Espesor de los depósitos Holoceno en el sector de Bahía Cartagena por medio de una ecosonda ODEC StrataBox equipada de un transductor de 10 kHz. La localización se indica sobre la figura 1.

Climatología e hidrología del golfo de Urabá

La región del golfo de Urabá posee un clima húmedo tropical, con una pluviosidad considerada entre las más elevadas del mundo. Así pues, las precipitaciones medias sobre la cuenca del Atrato son de 5.318

mm/año. Las lluvias más importantes tienen lugar entre los meses de marzo y noviembre mientras que la temporada menos húmeda corresponde a los meses de diciembre a marzo. Las temperaturas medias anuales son del orden de 27,2° C y las variaciones con relación a la media mensual son inferiores a 2° C.

El río Atrato cuya cuenca se extiende en cerca de 35.000 km² recibe sobre los 720 kilómetros de su curso las aguas de más de 150 ríos y vierte sus aguas en el mar Caribe a través de 16 brazos diferentes, entre los principales se pueden citar Leoncito I, II y III, Urabá, Coco Grande, Matuntugo, Pavas I y II, Roto y Tarena. La parte fundamental de las contribuciones al golfo se hacen hoy por esta última boca. El caudal del Atrato representa la parte la más importante de las contribuciones hídricas al golfo de Urabá con un promedio multianual medido sobre la estación de Domingodó, de 4.155 m³/s (UNESCO, 2002). Cifras poco diferentes de las reportadas por Lozano (1998): 4.500 m³/s. Numerosos ríos, de menor importancia aportan también sus aguas al golfo de Urabá. Así pues, de este a oeste se encuentran los ríos Mulatos (caudal multianual promedio de 10,6 m³/s según IDEAM - 1995), Necoclí, Bobal, Caimán Viejo, El Totumo, Caimán Viejo, Cirilo, Turbo (3,7 m³/s), Guadualito (2,6 m³/s), Currulao (9,8 m³/s), León (63,8 m³/s), Titumate, Negro, Tolo, y Acandí. En su desembocadura, el Atrato forma un delta ancho que ocupa el suroeste del golfo de Urabá. La dinámica del delta y la importancia de las contribuciones de agua dulce son los elementos esenciales del comportamiento de tipo estuarino que caracteriza al golfo de Urabá.

La dinámica marina actual

La marea del golfo de Urabá es de tipo mixto, su régimen es de tipo micromareal. Es generalmente inferior a 0,5m pero bajo los efectos unidos de la presión y del viento puede alcanzar 1m. Se considera generalmente que no tiene ningún efecto directo apreciable en cuanto a la dinámica hidrológica o sedimentológica (Lozano, 1998).

Las corrientes de Bahía Colombia se conocen gracias a los trabajos de Lozano (1998). En superficie, la corriente se establece en dirección del sur y está vinculada al viento dominante y son prácticamente independientes de la marea. A la profundidad de 5m, se observan algunos cambios de dirección indicando la

vuelta en profundidad hacia el norte de las aguas de la bahía. Estas medidas confirman el esquema generalmente reconocido (Molina et al, 1992): entrada de las aguas al golfo por el costado occidental y salida o evacuación por el costado oriental, tanto en superficie como en fondo.

Las observaciones de olas sobre la plataforma del Caribe colombiana se conocen a través de las datos tomados por los VOS (*Voluntary Observing Ship*) disponibles a través de la base de datos COADS (*Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set*) por una parte, y de las medidas de los altímetros radares de los satélites TOPEX-POSEIDON y JASON por otra (Thomas, 2006-a y 2006-b). El sector de estudio elegido está limitado por los paralelos 8 hasta 10° N y los meridianos 76 a 78° W. La dirección de procedencia principal del oleaje se establece tanto entre 315 y 75° en temporada seca como en temporada húmeda. Un segundo pico, menos importante, corresponde al sector 180 a 270° que aparece en temporada húmeda. A lo largo del año, el período medio de olas oscila entre 5,5 y 6,5 segundos, y la altura media de las olas, entre 1,4 (mayo) y 2,0 m (enero). Los valores más probables de las alturas de olas anuales y decenales son respectivamente de 6,8 y 8,9 m en temporada seca y de 5,6 y 7,4 m en temporada húmeda.

Materiales y métodos

Mapas batimétricos trabajados

Cuatro mapas batimétricos fueron seleccionados para el estudio (ver Tabla 1), publicados respectivamente por la *Defense Mapping Agency* (mapas DMA 24515 y 24517) y por el *Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas* (mapas CIOH 412 y 295).

Los cuatro documentos fueron realizados y publicados en proyección Mercator, pero no todos tienen el mismo referencial espacial: El mapa DMA 24515 se realizó refiriéndose al datum *Bogota Observatory*, el mapa DMA 24517 refiriéndose al datum *Word Geodetic System 1972* y los dos últimos (los mapas CIOH 295 y 412) refiriéndose al datum *Word Geodetic System 1984*. Entre tanto las sondas de todos los mapas, recurren al mismo referencial hidrográfico: el nivel medio de las bajas mareas de sicigias.

La realización de estos distintos mapas marinos se enmarca entre 1938 y 2001, intervalo de tiempo

durante el cual las técnicas tanto de localización como de medida de la profundidad de agua evolucionaron ampliamente. Las sondas adquiridas para hacer los documentos más recientes se obtuvieron con ayuda de GPS diferencial (para la localización) y ecosondas verticales o multi haz de calidad hidrográfica asociados a centrales e inercia (para la adquisición los datos de balanceo y cabeceo) y de mareómetros (para la fijación del nivel de referencia). Por el contrario, los primeros datos fueron adquiridos empleando círculos hidrográficos, de ecoscopio, o incluso de sondeos a mano con línea y plomo, y de escalas de marea. La interpretación de los resultados deberá pues tener en cuenta esta evolución tecnológica.

Las fechas de toma de datos deberán también tenerse en cuenta: los mapas DMA 24515 y CIOH 412 y 295 son mapas originales; el mapa DMA 24517 es una continuación del mapa CIOH 295. El mapa DMA 24515, publicado a escala del 1:100.000, muestra el estado de los fondos observado en 1938. Por último, los mapas CIOH 295 y 412, respectivamente publicados en las escalas 1:35.000 y 1:100.000, indican el estado de los fondos observado entre 1983 y 1990, luego entre 1983 y 2001, según la parte del mapa considerada. Un hecho debe destacarse: a excepción del mapa DMA 24515, estos mapas sufren multitemporalidad: los levantamientos batimétricos que sirvieron a su realización se extendieron sobre una decena de años, o incluso más.

Sólo los dos mapas con mayor intervalo temporal fueron seleccionados, es decir los mapas DMA 24515 llevando las sondas observadas en un crucero hidrográfico del U.S.S. *Bushnell* en 1938 y COL 412 llevando aquéllas observadas durante misiones hidrográficas del CIOH realizadas entre 1983 y 2001. El intervalo de tiempo entre las distintas adquisiciones se extiende pues, entre 45 años cuanto menos y 63 años como máximo.

Con el fin de determinar el orden de magnitud de la evolución de los fondos de Bahía Colombia se compararon los dos documentos seleccionados.

Análisis de información batimétrica

Las distintas etapas del procedimiento de análisis se describen a continuación. Los mapas fueron escaneados a color en el espacio colorimétrico RGB a razón de 300 puntos por pulgada. El contorno de la línea de costa, las isobatas y las sondas fueron rectificadas geoméricamente y extraídos por empleo

del programa informático Didger[®] de *Golden Software*. Los datos adquiridos en brazos fueron transformados en metros. Los datos disponibles en el datum *Bogota Observatory* fueron convertidos al datum *World Geodetic System 1984* empleando el programa informático Geotrans[®] de la *Nacional Imagery and Mapping Agency*. Por último, las bases de datos así constituidas fueron interpoladas empleando el programa informático Surfer[®] de *Golden Software*. Las figuras 4-a y 4-b presentan respectivamente las sondas de los mapas DMA 24515 y CIO 412.



Figura 4. Puntos de sondeo de mapas hidrográficos (a) 24515 del Defense Mapping Agency de 1938 y (b) 412 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de 2001.

Elaboración de Modelos Numéricos de Terreno

La interpolación espacial es un problema clásico de estimación de una función $F(\mathbf{x})$, donde $\mathbf{x} = (x, y)$, en un punto \mathbf{x}_p del plan a partir de valores conocidos de F en un determinado número m , de puntos circundantes x_i (Gratton, 2002): $F(x_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(x_i)$

El problema consiste en determinar la ponderación, i.e. los W_i , de cada uno de los puntos circundantes. Se escogieron y se compararon dos técnicas de interpolación: la interpolación por triangulación de *Delaunay* seguida de una interpolación lineal, y la interpolación por *kriging*.

Triangulación de Delaunay seguida de una interpolación lineal. El interpolador se compone de dos fases. Una primera, consiste en establecer una triangulación de *Delaunay* del conjunto de los puntos de medida. La segunda fase es la interpolación propiamente dicha. El algoritmo crea una red de

triángulos en las formas optimizadas trazando segmentos entre las sondas originales. Los puntos originales se conectan de tal manera que ningún borde de triángulo se entrecruce por otros triángulos, resulta una malla de triángulos sobre el conjunto de la grilla de puntos. Los tres puntos que definen cada triángulo materializan un plan de inclinación y altitud conocidas a la cual se aplica una interpolación lineal. Los resultados de la interpolación siguen muy estrechamente los datos originales en la medida en que estos últimos se utilizan para definir los triángulos. Este método proporciona un interpolador exacto. La triangulación de *Delaunay* seguida de una interpolación lineal da buenos resultados cuando los datos se distribuyen regularmente sobre el conjunto de la grilla. La grilla de datos que muestran sectores desparramados por su parte se describen menos perfectamente.

Interpolación por kriging. Este método geoestadístico permite considerar los valores de una propiedad en todo el espacio por interpolación exacta según el concepto de variable regionalizada a partir del parámetro de varianza (Matheron, 1970; Armstrong y Carignan, 1997). El kriging proporciona una estimación lineal no sesgada (media sin cambios) que minimiza la variación del error de estimación.

Proporciona una única estimación para un modelo matemático de variograma (gráfico que indica la relación entre la varianza y la distancia) dado. El variograma experimental es una función que caracteriza el grado de coherencia espacial de los datos. Su modelación es una etapa necesaria para realizar estimaciones por kriging. Se propusieron numerosos modelos de variogramas (Marcotte, 1991). Las figuras 5-a y 5-b presentan respectivamente los variogramas de las sondas de los mapas DMA 24515 y CIO 412.

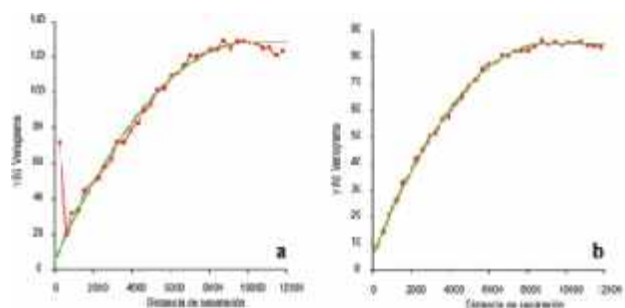


Figura 5. Variograma experimental omnidireccional con ajuste de un modelo cuadrático (a) para las sondas de los

mapas hidrográficos de 1938 (efecto pepita: 6, meseta: 122,5 y rango: 10200) y para (b) las sondas de 2001 con ajuste de un modelo cuadrático (efecto pepita: 6, meseta: 79 y rango: 9000)

Las principales propiedades y características asociadas al kriging se describen a continuación. Si se considera un punto conocido se encuentra el valor conocido ya que es un interpolador exacto. Presenta un efecto de filtro puesto que los puntos, los más cercanos, reciben los pesos más importantes (este efecto de filtro varía según la configuración y según el modelo de variograma utilizado para el kriging). Tiene en cuenta la continuidad del fenómeno estudiado a causa de la utilización del variograma. Finalmente efectúa generalmente una suavización: las estimaciones son menos variables que el contenido real que se pretende estimar.

Resultados y discusión

Análisis de Modelos Numéricos de Terreno

Se presentan a continuación los resultados de las interpolaciones de batimetría para Bahía Colombia obtenidas con una grilla de interpolación de 498 líneas por 440 columnas tanto por triangulación de *Delaunay* como por *kriging* a partir de los mapas DMA 24515 (Figura 6) y CIO 412 (Figura 7). Como se podía esperar, la interpolación por triangulación de *Delaunay* da buenos resultados en el centro de la bahía, donde los datos se distribuyen de manera regular sobre el conjunto de la grilla, pero resulta menos eficaz, donde se distribuyen desigualmente las sondas y donde hay gran pendiente, i.e. sobre los márgenes de los brazos del Atrato. Para estudiar la evolución de los fondos sobre el intervalo de tiempo 1938 - 2001, solamente se tomaron los resultados proporcionados por el método *kriging*. La Figura 8 muestra las curvas de frecuencia de ocurrencia de las profundidades para cada uno de estos dos mapas. Altas frecuencias a 35m y 30m desaparecen sobre el mapa de 2001 y las frecuencias de 26m y 23m se unen para no formar más que un aumento a los 22m. En general, se confirma la reducción de altas frecuencias, acompañado de su desplazamiento hacia profundidades menores.

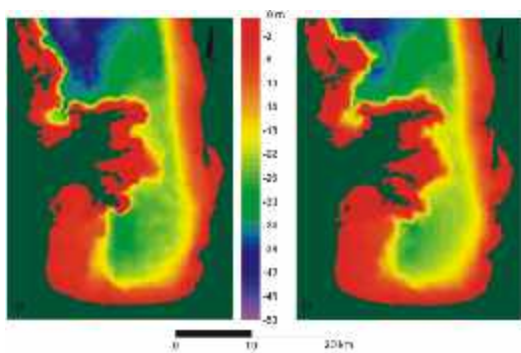


Figura 6. Modelo numérico de terreno de Bahía Colombia, sur del golfo de Urabá (Colombia), obtenido por triangulación e interpolación lineal de costa y sondas (a) del mapa hidrográfico 24515 levantado por el Defense Mapping Agency (1938) y (b) del mapa hidrográfico 412 levantado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (2001).

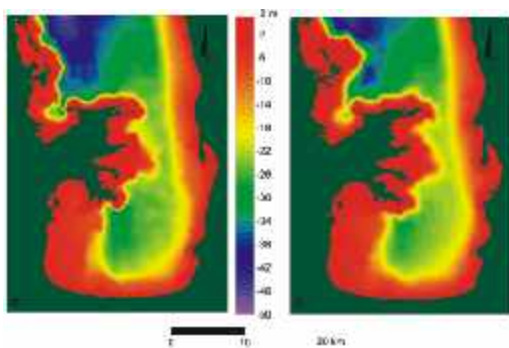


Figura 7. Modelo numérico de terreno de Bahía Colombia, sur del golfo de Urabá (Colombia), obtenido por “kriging” a partir de la línea de costa y sondas (a) del mapa hidrográfico 24515 levantado por el Defense Mapping Agency (1938) y (b) del mapa hidrográfico 412 levantado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (2001).

La comparación realizada de los mapas, permite considerar la sedimentación en términos absolutos: $\Delta Z = Z_{2001} - Z_{1938}$, i.e. en metros entre las dos fechas de publicación. Sin embargo, cada punto de estos MNT debe ser ponderado por un factor que tiene en cuenta el intervalo de tiempo efectivo que pasó entre los levantamientos hidrográficos efectuados en el crucero del *U.S.S. Bushnell* en 1938 y los levantamientos de las misiones hidrográficas que condujeron a la elaboración del mapa COL 412. El intervalo de tiempo necesario para la realización de un mapa hidrográfica impone la definición de un término de ponderación $K_{año}$ para cada pixel del mapa considerando el intervalo cronológico

real entre levantamientos para cada punto del espacio cartografiado. El valor de este término se presenta en la Figura 9, su utilización permitió calcular la velocidad de erosión o sedimentación anual: $\Delta Z_{año} = \Delta Z / K_{año}$ expresadas en m/año para el intervalo temporal 1938-2001 (Figura 8).

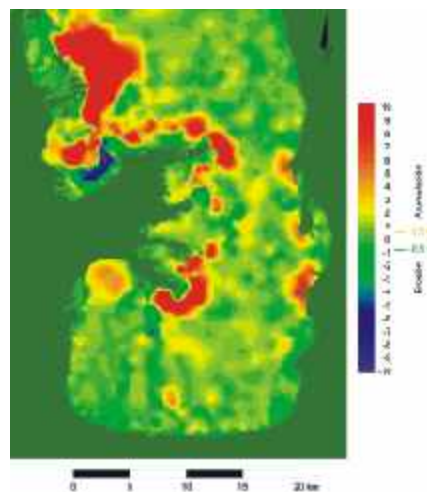


Figura 8. Cartografía de los sectores en acumulación y en erosión, expresadas en m/año, en Bahía Colombia, sur del Golfo de Urabá (Colombia), para el intervalo temporal 1938-2001.

Volumen sedimentado o erosionado

Se considera que los mapas hidrográficos no presentan un error más importante que un pie entre 0 y 30 m de profundidad (Cailliau, 1978). Es pues a un error máximo de $2 * 0,3 \text{ m} = 0,6 \text{ m}$, que deberá ser tenido en cuenta para el intervalo de tiempo considerado. Las evoluciones inferiores o iguales al centímetro al año, se pueden calificar de dudosas.

El volumen de sedimento acumulado en Bahía Colombia entre 1938 y 2001 es aproximadamente de 10^9 m^3 , o sea $1,8 * 10^7 \text{ m}^3/\text{año}$. Los sectores estables representan un 35% de los fondos y los sectores en erosión, un 4% de los fondos. Estos últimos se localizan esencialmente sobre la franja litoral donde revelan el retroceso de la línea de costa sobre distintos brazos del río Atrato, además del desplazamiento que indican hacia el oeste, de Bahía Colombia. Las zonas en acumulación representan la parte esencial de los fondos (61 %) dónde los materiales acumulados tienden a cubrir y alisar la topografía original como lo certifican distintos perfiles de la bahía (Figura 9).

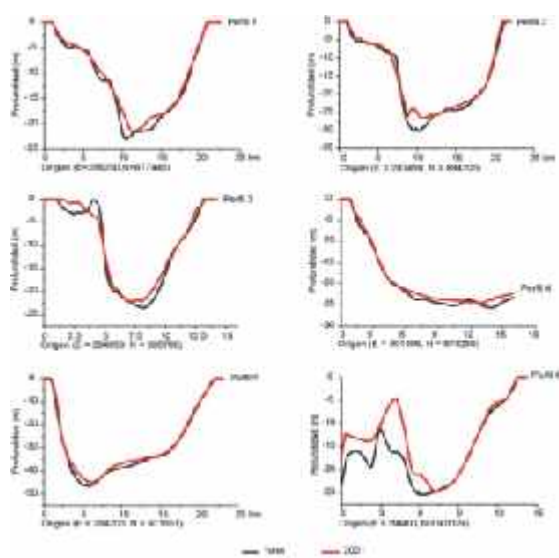


Figura 9. Perfiles biométricos en el centro y sur del golfo de Urabá (Colombia) realizados a partir del modelo numérico de terreno presentado en figura 7. La localización de los perfiles se indica sobre la figura 1.

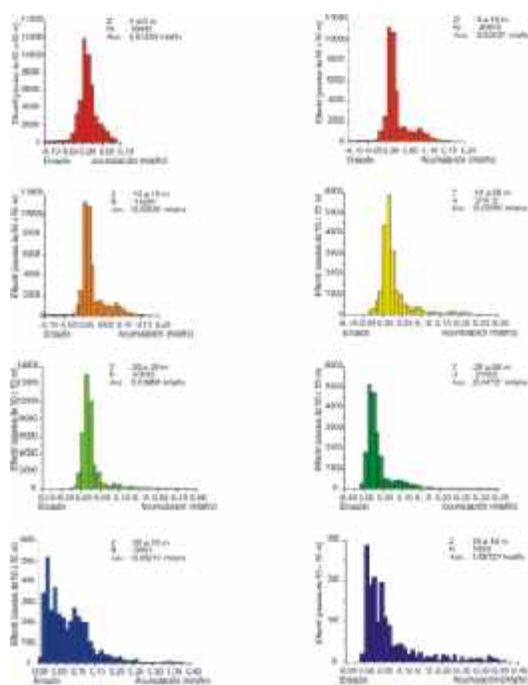


Figura 10. Histogramas de altura de sedimentos erosionados y/o acumulados por tramo de profundidad de agua. Las profundidades de referencia corresponden al mapa hidrográfico 24515 del Defense Mapping Agency (1938). La erosión se hace poco importante a partir de la profundidad de 20 m, la acumulación crece linealmente a medida que la profundidad aumenta.

Un análisis más detallado, conducido por tramo batimétrico de 5 en 5 metros (Figura 10), determina que los sectores en erosión, para la mayoría, se restringen a profundidades inferiores a 20m mientras que los sectores en acumulación están presentes a cualquier profundidad. Por otra parte, en las mayores profundidades se encuentran las velocidades de sedimentación más importantes (Tabla 1 y Figura 11). Este aumento de la velocidad de sedimentación debe relacionarse con la disminución de la agitación del mar debida al viento, en los fondos. Varios ensayos de simulación de oleaje conducidos por los autores en el golfo de Urabá, usando el modelo SWAN (Ris, 1997), han mostrado que el oleaje debido al mar de fondo no puede afectar la partes central y occidental de Bahía Colombia.

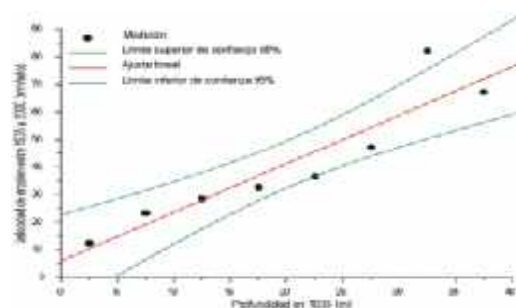


Figura 11. Gráfico cartesiano de la velocidad de sedimentación en función de la profundidad de deposición. Las profundidades de referencia corresponden a las del mapa hidrográfico 24515 del Defense Mapping Agency (1938). La acumulación se expresa en mm/año.

Las medidas realizadas en Bahía Colombia por dos de los autores (YFT y CGV) conducen a la estimación de un valor medio de la densidad seca de los sedimentos igual a 0,43. Los depósitos anuales de $1,8 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ corresponderían a la acumulación de una masa de sedimento del orden de $7,9 \cdot 10^6 \text{ ton/año}$.

La carga de sólidos de los ríos del golfo de Urabá se conoce gracias a las mediciones del IDEAM (1995) y a los trabajos de Restrepo y Kjerfve (2000) y Restrepo *et al.* (2006). Estos autores consideran que la contribución de sólidos recibida por el golfo de Urabá, en realidad es esencialmente para Bahía Colombia, del orden de $1,3 \cdot 10^7 \text{ ton/año}$. La contribución del Atrato se estima en $1,1 \cdot 10^7 \text{ ton/año}$.

La confrontación de nuestros resultados con las estimaciones de Restrepo y de Kjerfve (2000) llevan a pensar que cerca del 61 % de la totalidad de la carga de

Tabla 1. Mapas batimétricos seleccionados para el estudio del golfo de Urabá.

Mapa	24515	24517	412	295
Editor	DMA	DMA	CIOH	CIOH
Título	golfo de Urabá	Bahía Colombia	golfo de Urabá	Bahía Colombia
Escala	1:100.000	1:30.000	1:100.000	1:35.000
Datum	OB ⁽¹⁾	WGS 72 ⁽²⁾	WGS 84 ⁽³⁾	WGS 84
Fecha	Septiembre 1979	Juin 1984	Septiembre 2001	Janvier 1995
Edición	Segunda	Primera	Segunda	Segunda
Formato	789.0 x 1161.0	918.6 x 1044.6	752.8 x 940.1	787.4 x 895.3
Datos	1938	de 1977 hasta 1980	de 1983 hasta 2001	de 1983 hasta 1990
Sondas	Brazas	Metros	metros	metros
Nivel	MLWS ⁽⁴⁾	MLWS ⁽⁴⁾	NMBS ⁽⁵⁾	NMBS ⁽⁵⁾
Fuente	Original	Col 295	original	original
Límite NW	77°23'W y 8°55'N	76°57'W y 8°10'N	77°23'W y 8°44'N	76°57'W y 8°10'N
Límite SE	76°40'W y 7°52'N	76°42'W y 7°53'N	76°42'W y 7°53'N	76°42'W y 7°53'N

(¹): Bogota Observatory, (²): Word Geodetic System 1984, (³): Word Geodetic System 1984, (⁴): Mean Low Water in Sysigies, (⁵): Nivel Medio de bajamar en Sicigias

sólidos de los ríos costeros y del río Atrato se depositan en Bahía Colombia.

Esta migración limitada a escala local de los sedimentos en suspensión es confirmada tanto por el análisis de 9 años de imágenes del radiómetro SEAWIFS del satélite SEASTAR (García Valencia *et al*, 2007) que revela la presencia excepcional de penachos expulsados desde el golfo de Urabá como por campañas *in situ* de medidas de turbidez que revelan valores inferiores a 0,3 NTU y concentración de sólidos inferiores a 1 mg/l sobre la totalidad de la altura de la columna de agua hacia el extremo septentrional del golfo de Urabá.

La velocidad de sedimentación observada varía entre 1 y 8 cm/año (Tabla 2). Debe compararse con la observada entonces durante el Holoceno (Figura 3) que se estima en 0,2 cm/año. La hipótesis de una fuerte compactación de los sedimentos después de su depósito no basta para explicar tales diferencias. Estos valores plantean una crisis erosiva actual que podría ser explicada por las actividades humanas sobre la cuenca del río Atrato y demás corrientes de agua que llegan al golfo.

Conclusión

La búsqueda de hidrografía histórica cuantitativa, es ya posible por el desarrollo de herramientas especializadas tanto en geomática, para la solución de

los problemas de interpolación, así como para a creación, gestión y utilización de las bases de datos cartográficos (SIG). La disponibilidad de dos mapas hidrográficos publicados en 1938 (mapa DMA 24515) y en 2001 (mapa CIO 412) condujo al estudio de la cinemática de los fondos marinos de Bahía Colombia (sureste del golfo de Urabá). Las principales conclusiones son las siguientes: un 35% de la zona de estudio es estable y solamente 4 %, está en erosión, esencialmente sobre la franja litoral (distintos brazos del río Atrato, oeste de Bahía Colombia) mientras que los espacios en acumulación corresponden a la mayoría de los fondos de la bahía (61 %) donde los materiales tienden a cubrir y alisar la topografía original.

Tabla 2. Velocidad de sedimentación entre 1938 y 2001 expresada en función de la profundidad de depositación.

Profundidad (m)	Observaciones (número)	Erosión promedio (mm/año)
2,5	49.043	12,36
7,5	41.613	23,27
12,5	18.201	28,36
17,5	21.512	32,55
22,5	43.162	36,55
27,5	21.082	47,27
32,5	3.901	82,18
37,5	1.680	67,27

Los sectores erosionados se localizan en gran parte hacia las profundidades inferiores a 20m, mientras que los sectores en acumulación, están presentes a cualquier profundidad. Es a las profundidades más importantes que se encuentran las mayores velocidades de sedimentación: 0,023 m/año a 10m de profundidad, 0,033m/año a 20m, 0,047m/año a 30m y 0,067m/año a 40m. Una acumulación sedimentaria anual media de cerca de $1,8 \cdot 10^7$ m³/año pudo ser estimada.

Al suponer una densidad seca cercana a los 0,43, los depósitos anuales corresponderían a una masa de $7,9 \cdot 10^6$ ton, es decir cerca del 61 % de la totalidad de la carga sólida de los ríos costeros y del río Atrato.

La confrontación de las velocidades de sedimentación actuales (de 1 hasta 8 cm/año) con las estimadas en el Holoceno (0,2 cm/año) ponen de manifiesto, incluso después de considerar el apisonamiento de los sedimentos antiguos, la existencia de una crisis contemporánea erosiva posiblemente debida al desarrollo de actividades humanas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer muy especialmente COLCIENCIAS e INVEMAR que financió esta investigación en el marco del convenio 175/97 "Movilidad de investigadores" y el CIOH que puso a disposición sus archivos cartográficos.

Referencias bibliográficas

- [1] Armstrong M & Carignan J. (1997). Géostatistique linéaire: application au domaine minier. Paris: Les Presses de l'École des Mines. 112 p.
- [2] Cailliau E. (1978). Hydrographie et cartographie marine. Paris, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, 320 p.
- [3] CIOH (1995) COL 295: Bahía Colombia. Carte marine à l'échelle du 1:35.000. Cartagena de Indias, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas Ed., 2^{ème} édition.
- [4] CIOH (2001) COL 412: Golfo de Urabá. Carte marine à l'échelle du 1:100.000. Cartagena de Indias, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas Ed., 2^{ème} édition.
- [5] De la Torre Y, Gourmelon F & Augris C. (2002). Évolution morpho-sédimentaire des fonds marins côtiers. Revue Internationale de Géomatique, Volume 12, 311-324.
- [6] DMA (1984) DMA 24515: Golfo de Urabá. Carte marine à l'échelle du 1:100.000. Washington D.C., Defense Mapping Agency Ed., 3^{ème} édition.
- [7] DMA (1984) DMA 24517: Bahía Colombia. Carte marine à l'échelle du 1:30.000. Washington D.C., Defense Mapping Agency Ed., 1^{ère} édition.
- [8] Elms JD, Woodruff SD, Worley SJ & Hanson C. (1994). Digitizing Historical Records for the Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS). Earth System Monitor, 4 (2), 4-10.
- [9] García-Valencia C & Thomas YF. (2003). Contribución de los SIG a la hidrografía histórica y al estudio de la cinemática de los fondos marinos: evolución de Bahía Colombia, golfo de Urabá, Colombia. X Congreso Latino Americano de Ciencias del Mar, 22 - 26 septiembre de 2003, San José, Costa Rica.
- [10] García-Valencia C, Pétus C, Thomas YF & Cesaraccio M. (2006). Procesamiento de datos satelitales para el estudio de la surgencia en la Guajira. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés, noviembre 2006, 30 p.
- [11] Gratton Y. (2002). Le krigeage: la méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, juin 2002: <http://www.iag.asso.fr>
- [12] IDEAM (1995). Estadísticas hidrológicas de Colombia 1990 - 1993. Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ed., 589 p. + 508 p.
- [13] Lozano LH. (1998). Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera que comprende la bahía Colombia desde el río Turbo hasta Matuntugo. Cartagena de Indias, Escuela naval Almirante Padilla, Facultad de Oceanografía Física, 283 p., 81 fig., 25 tabl.
- [14] Marcotte D. (1991). Cokrigeage with matlab, Computers and Geosciences, 17 (9), 1265-1280.
- [15] Matheron G. (1970). La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 212 p.
- [16] Molina A, Molina C & Chevillot Ph. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas del golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. Cartagena de Indias, Boletín Científico del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, No. 11, pp. 43-58.
- [17] Reeve D, Li B & Thurston N. (2001). Eigenfunction analysis of decadal fluctuations in sandbank morphology at Gt Yarmouth. Journal of Coastal research, vol. 17, pp. 371-382.
- [18] Restrepo JD & Kjerfve B. (2000). Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. The Journal of Geology, vol. 108, pp. 17-33.
- [19] Ris RC. (1997). Spectral modelling of wind waves in coastal areas. Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, Delft, The Netherlands.
- [20] Thomas YF. (2006). Climatologie des vagues pour la mer territoriale sous juridiction colombienne (8° à 19° N 69° à 84° W): analyse des données ICOADS. Paris, rapport de convention LGP - INVEMAR, 127 p.
- [21] Thomas YF. (2006). Climatologie des vagues pour la mer territoriale sous juridiction colombienne (8° à 19° N 69° à 84° W): analyse des données du satellite TOPEX POSEIDON. Paris, rapport de convention LGP - INVEMAR, 69 p.
- [22] Volmat J. (1953). La Pointe de la Coubre et ses abords du 17^{ème} siècle à nos jours. Paris, Recherches Hydrographiques sur le Régime des Côtes, vol. 28, 77 p. Tabla 1. Mapas batimétricos seleccionados para el estudio del golfo de Urabá.