



CIOH
www.cioh.org.co

ARTÍCULO

Análisis de la evolución del fondo marino y cambios en la línea de costa, en el área de influencia de la desembocadura del Canal del Dique

Fecha de recepción: 2011-08-07 / Fecha de aceptación: 2011-09-15

Leonardo MARRIAGA ROCHA, LMarriaga@dimar.mil.co
Johanna Paola ECHEVERRY HERNÁNDEZ, paolechhe@gmail.com
Grupo de Investigación Zona Costera, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Barrio Bosque, Sector Manzanillo, Escuela Naval, Cartagena, Colombia.

RESUMEN

Los aportes sedimentarios del Canal del Dique han causado gran cantidad de cambios morfológicos, tanto en la línea de costa, como en el fondo marino adyacente a su desembocadura. Mediante el análisis de batimetrías y líneas de costa de varios años, a través de herramientas de sistemas de información geográfica, fue posible establecer tasas de erosión-sedimentación en la desembocadura, obteniendo como resultado una evidente sedimentación y crecimiento de la boca de la desembocadura a una tasa de 4.17 m/año, en un periodo de 48 años. Similarmente se obtuvo que el fondo marino presenta una fuerte tendencia a la sedimentación en el área inmediatamente adyacente a la desembocadura del canal.

Palabras claves: Erosión, sedimentación, cambio volumétrico, línea de costa, tasas.

ABSTRACT

The sedimentary inputs from the Canal del Dique has been causing large amount of morphological changes, both in the coastline and the adjacent seabed to the mouth. By analyzing bathymetry and shorelines from several years, using geographic information system tools, was possible to determine the erosion-sedimentation rates at the mouth, resulting in a clear sedimentation and growth of the mouth in a 4.17 m/year rate, over a period of 48 years, similarly it was found that the seabed has a strong tendency to sedimentation in the area immediately adjacent to the mouth of the channel.

Key words: Erosion, sedimentation, volumetrical change, coastline, rates.

INTRODUCCIÓN

El Canal del Dique está ubicado al norte de Colombia, en el tramo inferior del Río Magdalena, y hace parte del sistema deltaico que forma el río en su desembocadura al mar Caribe. El canal tiene 115 km de longitud desde su bifurcación del Río Magdalena (Sector Calamar), hasta su conexión con la bahía de Cartagena (Sector Pasacaballos), zona en donde ha sido objeto de rectificaciones y ampliaciones que generan un problema hidrosedimentológico que ha aumentado su caudal promedio de 320 a 540 m/s (figura 1). En ese sentido, la entrada de materiales sólidos produce una sedimentación de los materiales gruesos en el primer tramo del canal, y de los materiales finos en la bahía de Cartagena.

El balance sedimentológico indica que un volumen aproximado de 1.5 millones de m³ de materiales de limos y arenas muy finas aumentan anualmente el delta del Canal del Dique en Pasacaballos, y otros 0.5 millones de m³ de materiales, en el rango de los limos finos, arcillas y coloides, ingresan a la bahía de Cartagena y

participan en la formación de una pluma turbia superficial [1]. Éste constante aporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos provenientes del Canal del Dique en los últimos 20 años ha causado, no solo un incremento en la turbidez del agua de la bahía, sino también, grandes variaciones en la línea de costa en la desembocadura del Canal del Dique y modificaciones en el comportamiento del fondo marino en el sector adyacente a la desembocadura.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente artículo pretende analizar la evolución del fondo marino, en la bahía de Cartagena, en el sector adyacente a la desembocadura del Canal del Dique, durante un periodo de 14 años, en un área de 9975 km² y los cambios morfodinámicos en la línea de costa que conforma la desembocadura del mismo, durante un periodo de 48 años, en una longitud aproximada de 3 km. De lo cual se obtuvieron resultados de cálculos volumétricos y cálculos de las tasas de erosión-sedimentación, en la desembocadura, mediante la utilización de herramientas de Sistemas de Información Geográfica y otras herramientas computacionales.



Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: Modificación mapa base iImágenes ArcGIS Explorer® y NatGeo®. El recuadro rojo muestra el área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

EVOLUCIÓN DEL FONDO MARINO

Para el desarrollo del análisis, se utilizaron datos de levantamientos batimétricos realizados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), en los años 1996, 2000, 2003 y 2004. Estos datos fueron sometidos a procesamiento y análisis mediante la utilización de herramientas (*ToolBox*) disponibles en el Software denominado ArcGIS®, como lo son las *3D Analyst* y *Spatial Analyst Tools*. El software ArcGIS es un producto de la empresa ESRI (*Environmental System Research Institute*) y contiene una gran gama de herramientas que sirven de plataforma para crear, manipular y analizar información geográfica [2].

Con el apoyo de éste software, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Inicialmente, se procede con la creación del modelo digital del Terreno TIN (*Triangular Irregular Network*), que es un archivo geográfico utilizado para representar superficies tres-dimensionales (3D), para lograr la representación de la morfología de una superficie, tomando los datos en forma de columnas e interpolándolos para formar una red de triángulos a través del método de interpolación llamado *Triangulación Delaunay*. Este proceso se aplicó a cada uno de los archivos con datos de batimetría, a través de la herramienta *TIN Management 3D Analyst*, llamada *Create TIN*.

Seguidamente, cada uno de los modelos digitales de terreno (TIN) se convirtieron a formato *Raster*, proceso que consiste en crear una matriz donde cada elemento le corresponde un valor de profundidades. Para este caso, que coincide con el sistema de referencia del TIN, previamente creado. Este proceso se realiza utilizando la herramienta de conversión contenida en la extensión *3D Analyst* llamada *TIN to Raster*.

Una vez creados los archivos tipo *Raster*, se pueden desarrollar operaciones matemáticas con los mismos, utilizando la herramienta *Raster Calculator*, contenida en el *ToolBox Map Algebra* de la extensión *Spatial Analyst Tools*. Para este análisis se efectuaron operaciones relacionales entre los mismos, lo que permitió comparar, en un sentido físicamente preciso, los raster, obteniendo así, las variaciones entre uno y otro. Por ejem-

plo, al desarrollar la operación "*raster_2000*" > "*raster_1996*", el resultado será los valores de batimetría del año 2000, mayores que los valores de batimetría de 1996, arrojando como resultado las zonas de sedimentación en el lecho marino. Si, por el contrario, se aplica la operación "*raster_2000*" < "*raster_1996*", el resultado será las zonas de erosión en el lecho marino.

Por otro lado, utilizando los modelos digitales de terreno (TIN), fue posible desarrollar el cálculo de volúmenes de sedimentos ganados o perdidos, en cada una de las zonas determinadas como de sedimentación o erosión en el lecho marino, obtenidas en el paso anterior. Este proceso se realiza a través de la herramienta *TIN Difference* de la extensión *3D Analyst*.

EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Teniendo en cuenta que éste es un proceso progresivo en la escala temporal, el análisis de la evolución de la línea de costa requiere la aplicación de metodologías que permitan desarrollar comparaciones espacio-temporales. Indiscutiblemente, el uso de fotografías aéreas se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas a la hora de realizar estudios de erosión-acreción, con ayuda de métodos fotogramétricos, que permiten realizar comparaciones cuantitativas, gracias a su alta resolución, que hace fiable la identificación de la línea de costa, y además, a la posibilidad de adquirir imágenes de diferentes años correspondientes a una misma zona [3].

El proceso de fotointerpretación de imágenes y de creación-edición de los vectores de línea de costa, se realizó mediante la utilización de *ArcMap*®, software de producción, distribución y análisis de información geográfica de la casa ESRI. Para el análisis de tasas de erosión-acreción de la línea de costa, se seleccionaron fotografías aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de los años 1961, 1974 y 1987, imagen satelital tomada de Google Earth® del año 2009, en conjunto con el ortofotomosaico de DIMAR del año 2005, que por su distanciamiento temporal, proporcionan una clara idea de la dinámica costera en éste sector (tabla 1).

Una vez seleccionadas las imágenes que cubren por completo la zona de estudio, se procedió a georreferenciar cada una de ellas, proceso con el que se busca proveer a las imágenes de propiedades métricas reales de la superficie terrestre, para lograr su correcta ubicación dentro

del sistema de coordenadas. Para esto, se tomó como base de georreferenciación el mosaico ortorectificado del año 2005 DIMAR-CIOH (figura 2), considerando su alta resolución espacial de 25 cm.

Una vez finalizado el proceso de georeferenciación al sistema MAGNA-SIRGAS (Sistema de referencia oficial de Colombia), se procedió a vectorizar la línea de costa, digitalizando por medio de herramientas de edición de *ArcMap*®. Es

importante aclarar que, para éste caso, por aplicarse únicamente técnicas de fotointerpretación, la línea de costa se toma como el límite tierra-agua visible en el instante de la toma de la foto.

Las líneas de costa correspondientes a los cinco años se almacenaron en una *Personal Geodatabase* (formato de almacenamiento de información geográfica de ArcGIS, basado en un modelo de datos orientado a objetos), la cual se diseñó especialmente para contener datos tipo línea,

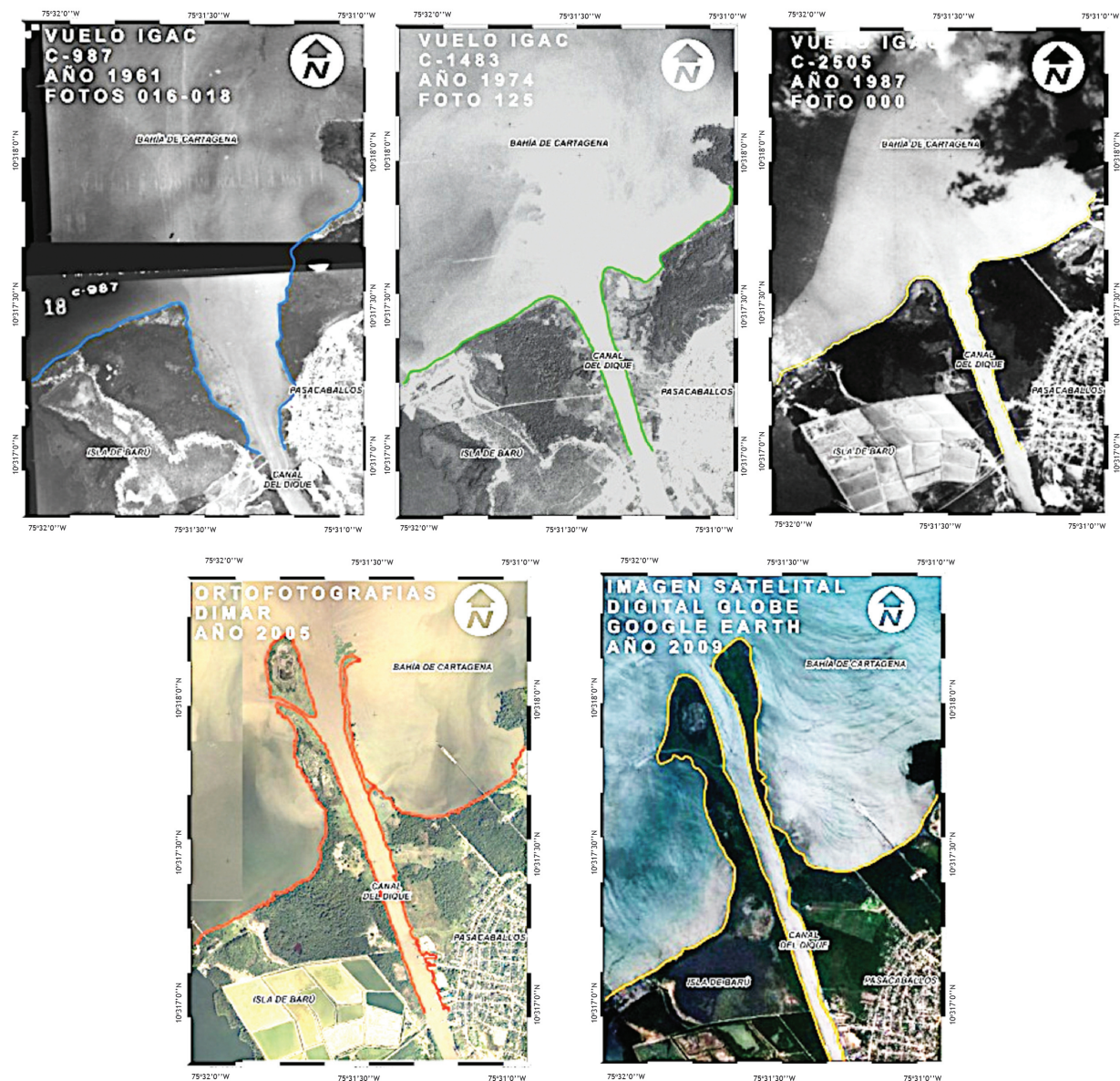


Figura 2. Fotografías aéreas IGAC georreferenciadas, imagen satelital y ortofotomosaico DIMAR utilizados en el análisis.

Tabla 1. Fotografías aéreas empleadas para la fotointerpretación de imágenes y de creación-edición de los vectores de línea de costa.

Vuelo	Año	No. Fotografías
IGAC C-987	1961	016, 018
IGAC C-1483	1974	125
IGAC C-2205	1987	000
DIMAR	2005	Ortofotomosaico
GOOGLE EARTH®	2009	Imagen satelital

con sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, y con atributo "Fecha" como descripción principal para diferenciar las diferentes líneas de costa. Entre la figura 3 y la figura 7, se puede observar la superposición de capas de la *Personal Geodatabase*, efectuada para realizar comparaciones visuales de los cambios ocurridos entre cada uno de los años, identificando claramente los sitios donde se presentan cambios significativos.

Posteriormente, mediante la utilización de los vectores de líneas de costa, se utilizaron he-

rramientas de geoprocésamiento contenidas en ArcGIS, para generar polígonos que representen zonas de erosión o acreción, y así, calcular las áreas en metros cuadrados de avance o retroceso, entre dos años.

Finalmente, teniendo los diferentes vectores tipo línea para representar la posición de la línea de costa para los cuatro años, se inició el cálculo de tasas de erosión-acreción utilizando la herramienta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) versión 4.2, desarrollado por *U.S Geological Sur-*

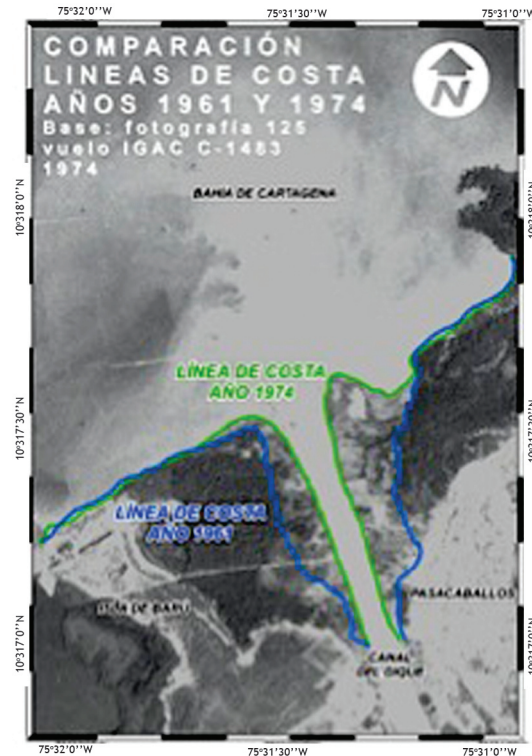


Figura 3. Comparación visual de líneas de costa entre los años 1961 y 1974. La línea azul corresponde al año 1961 y la verde al año 1974.



Figura 4. Comparación visual de líneas de costa entre los años 1974 y 1987. La línea verde corresponde al año 1974 y la amarilla al año 1987.



Figura 5. Comparación visual de líneas de costa entre los años 1987 y 2005. La línea amarilla corresponde al año 1987 y la roja al año 2005.



Figura 6. Comparación visual de líneas de costa entre los años 2005 y 2009. La línea naranja corresponde al año 2009 y la roja al año 2005.

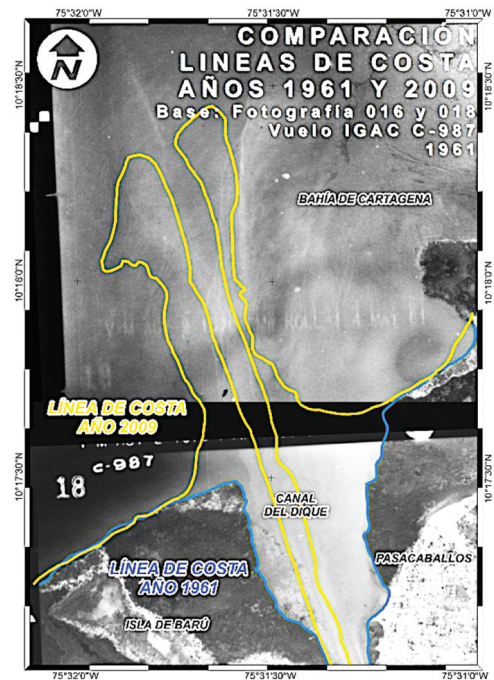


Figura 7. Comparación visual de líneas de costa entre los años 1961 y 2009. La línea azul corresponde al año 1961 y la naranja al año 2009.

vey®, como una extensión para ArcGIS, diseñada para permitir el cálculo de estadísticas de cambios históricos en la costa, a partir de múltiples posiciones. La metodología que emplea el DSAS, consiste en generar transectos perpendiculares a una línea base (línea diferente a las líneas de costa objeto de análisis), con una separación y longitud constantes, definidas por el usuario, con el objetivo de garantizar que en su recorrido atravesase cada una de las líneas de costa (figura 8).

Utilizando los transectos como medida, la herramienta establece la distancia en metros entre cada línea, y desarrollando diferentes análisis estadísticos, suministra la tasa de avance o retroceso de la costa. Para éste caso, los transectos se generaron con una separación de 50 m, generando como resultado un total de 82 transectos, que fueron analizados utilizando el método estadístico *End Point Rate EPR*, o tasa de punto final, cuyo cálculo se efectúa dividiendo la distancia entre dos líneas, por el tiempo transcurrido entre ellas [4].

Como se puede observar en las imágenes, después del año 1987 se presentó acumulación de material en la desembocadura del canal, creando allí conformación de terreno alargado a cada lado de la desembocadura del canal. Dada su forma particular, en esta zona se omitió el análisis de crecimiento con los transectos generados por DSAS, ya que ninguno de ellos cubría correctamente ésta zona, dando origen a errores en los cálculos. Por lo anterior, fue necesario generar transectos independientes para esta formación y así poder calcular su tasa de crecimiento entre los años 1987-2005 y 1961-2005.

RESULTADOS

Con base en la aplicación de la metodología ya señalada para el análisis del fondo marino, desde la figura 9 hasta la figura 12, se presentan los modelos digitales de terreno (TIN), creados a

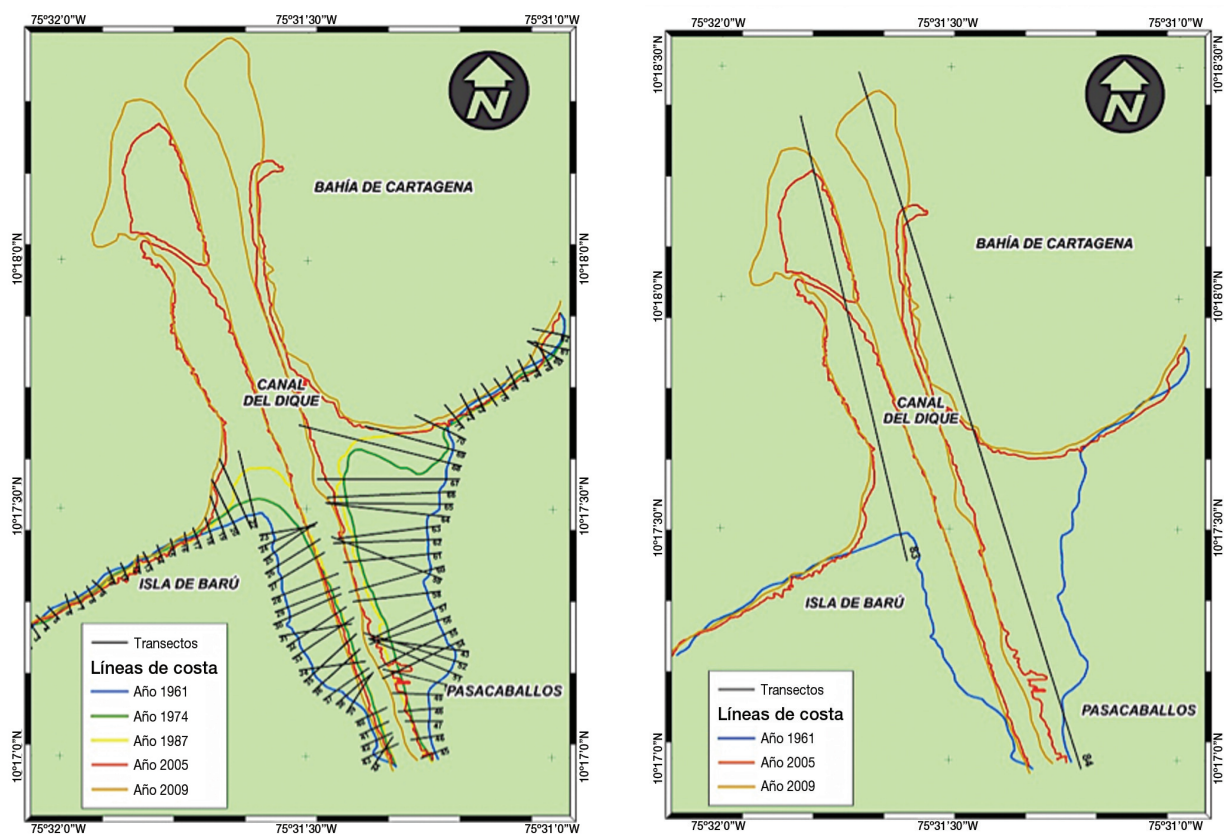


Figura 8. Transectos generados con DSAS para la comparación de líneas de costa en los sectores adyacentes a la desembocadura del Canal del Dique (izquierda) y transectos generados para la comparación de líneas de costa en la zona específica de la desembocadura del mismo (derecha).

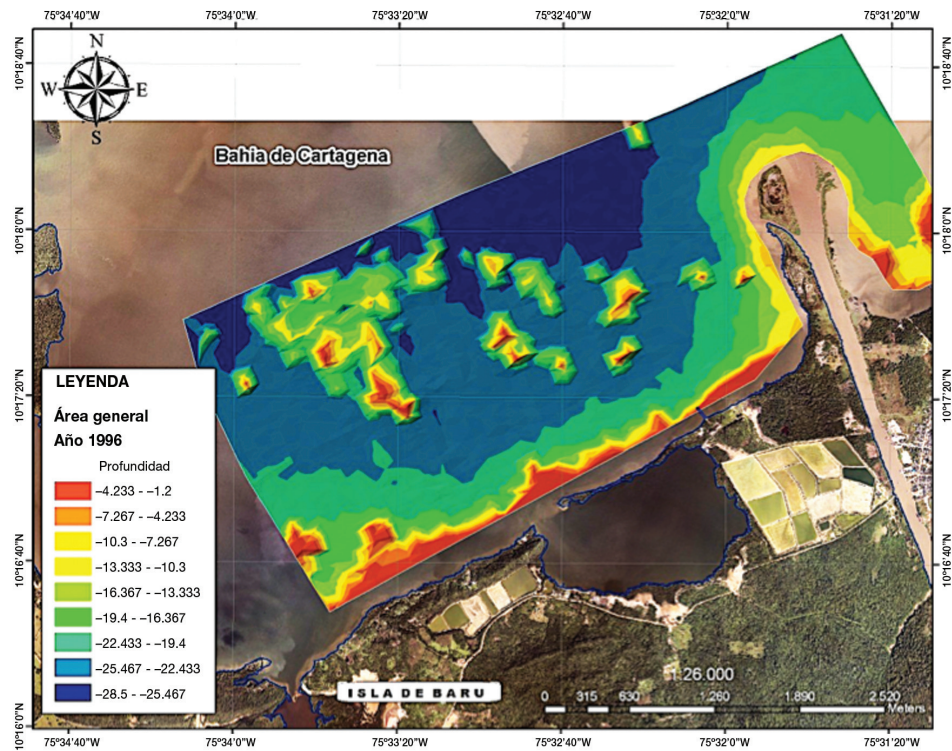


Figura 9. Vista en planta de la batimetría del año 1996, en el área de estudio.

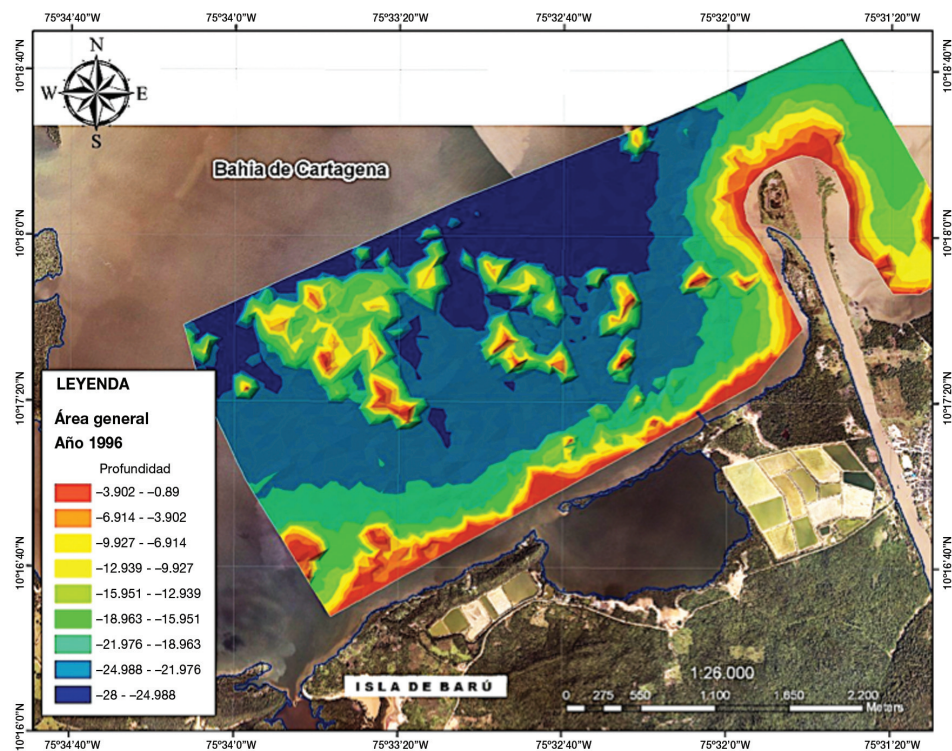


Figura 10. Vista en planta de la batimetría del año 2000, en el área de estudio.

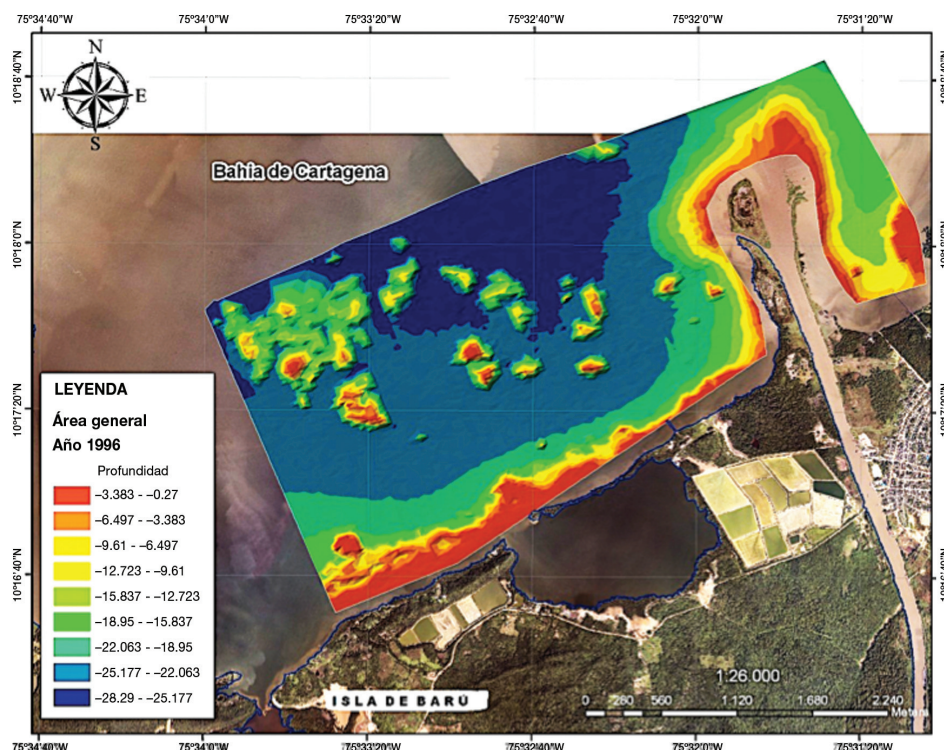


Figura 11. Vista en planta de la batimetría del año 2003, en el área de estudio.

partir de las batimetrías para los distintos años disponibles para el análisis.

En la comparación realizada, tanto volumétricamente (figura 13), como numéricamente (figura 14), entre las batimetrías del área general de los años 1996 y 2000, se encontró que las áreas de sedimentación están ubicadas principalmente en la salida del Canal del Dique y, sobre el borde costero del área de estudio. El volumen de sedimentos entre estos dos años para las zonas determinadas como tal, se calculó en 15'337,067.9 m³ (figura 15).

En la comparación realizada, tanto volumétricamente (figura 16), como numéricamente (figura 17), entre las batimetrías del área general de los años 2000 y 2003, se encontró que las áreas de sedimentación, en este periodo, están ubicadas principalmente en la salida del Canal del Dique y, en menor extensión, sobre el denominado "Bajo Coquitos". El volumen de sedimentos entre estos dos años para las zonas determinadas como tal, se calculó en 2'764,633.8 m³ (figura 18).

En la comparación volumétrica (figura 19) y numérica (figura 20) realizada, entre las batimetrías de los años 2003 y 2004, se encontró que las áreas donde se presentó ganancia de sedimentos, están distribuidas en toda la zona de estudio (en un área mayor a las identificadas en las comparaciones anteriores), donde el volumen de sedimentos se calculó en 5'839,891.17 m³. Es decir, en este periodo, el volumen de sedimentos ganados es mayor, comparativamente hablando, respecto de los periodos previamente analizados, sin embargo, por estar distribuidos en un área mucho más grande, el incremento volumétrico es significativamente menor (figura 21).

Por otra parte, luego de la aplicación de la metodología señalada para la estimación de los cambios sufridos en la línea de costa en el área de influencia directa del Canal del Dique (aproximadamente un kilómetro a lado y lado de la desembocadura del canal y un kilómetro también hacia el interior de éste), los resultados obtenidos muestran que entre los años 1961 y 1974 se presentó una gran acumulación de sedimentos de aproximadamente 366,250.86 m², en la zona de la desembocadura del canal, cambiando

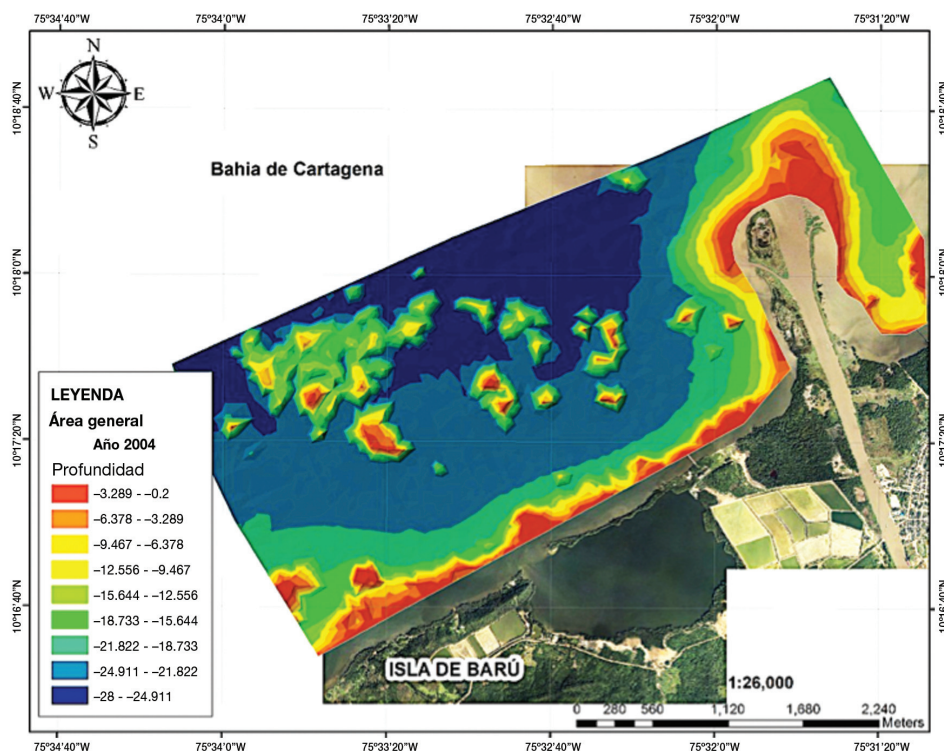


Figura 12. Vista en planta de la batimetría del año 2004, en el área de estudio.

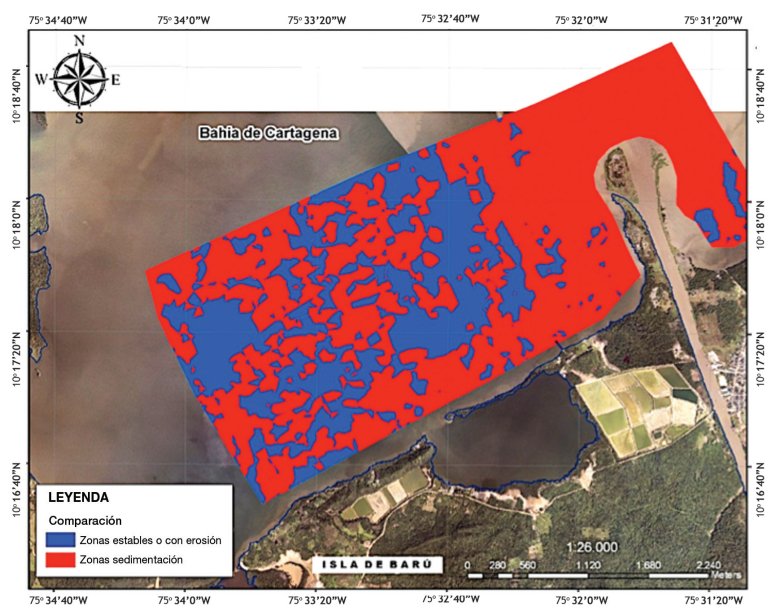


Figura 13. Vista en planta de la diferencia volumétrica entre las batimetrías del año 1996 vs 2000. El color rojo representa las zonas donde se presentaron incrementos de volumen (sedimentación), el color azul representa las zonas donde se presentaron decrementos o invariabilidad (estabilidad o erosión).

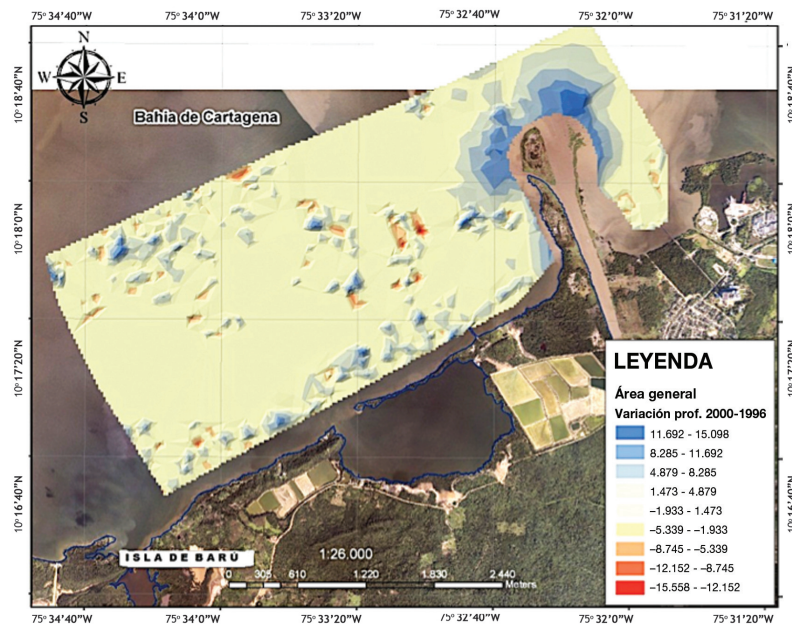


Figura 14. Vista en planta del resultado de la comparación numérica entre la batimetría del año 1996 vs 2000. Los valores positivos (gama de azules) indican zonas de sedimentación y los valores negativos (gamas de rojos) zonas de erosión.

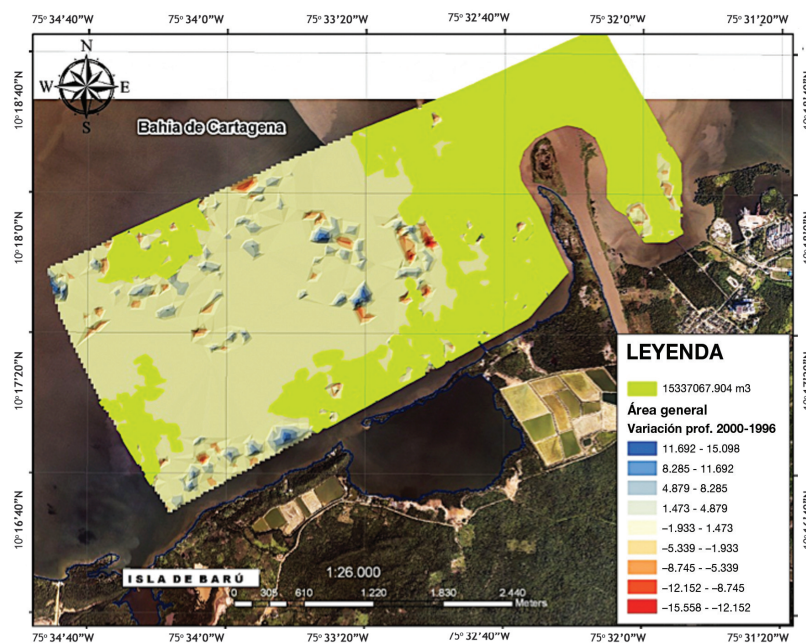


Figura 15. Vista en planta de la comparación de las batimetrías 1996 vs 2000, tanto volumétrica como numérica. En color verde se indican las zonas en donde se efectuó el cálculo de variación de volumen.



Figura 16. Vista en planta de la diferencia volumétrica entre las batimetrías del año 2000 vs 2003. El color rojo representa las zonas donde se presentaron incrementos (sedimentación) de volumen, el color azul representa las zonas donde se presentaron decrementos o invariabilidad (estable o erosión).

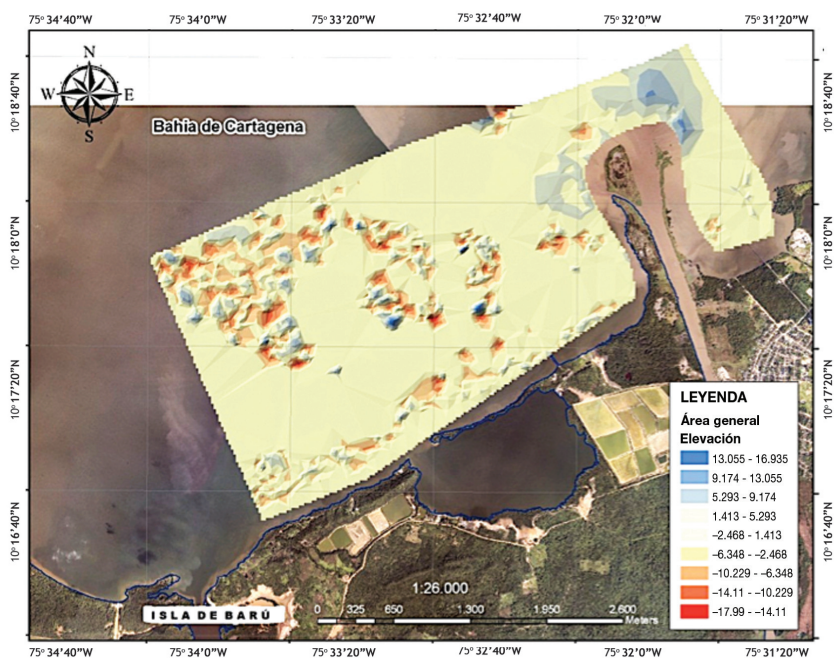


Figura 17. Vista en planta del resultado de la comparación numérica entre la batimetría del año 2000 vs 2003. Los valores positivos indican zonas de sedimentación (gamas de azules) y los valores negativos zonas de erosión (gamas de rojos).

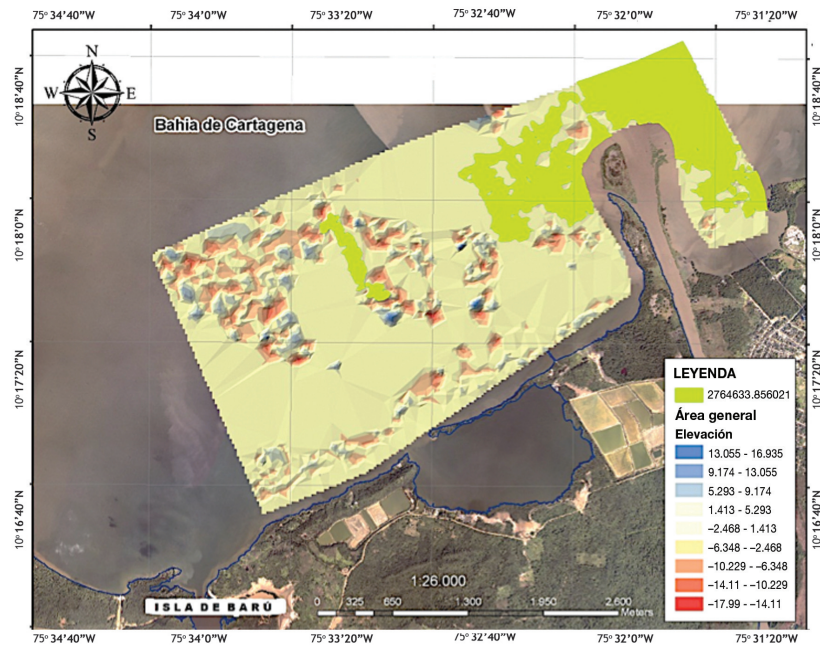


Figura 18. Vista en planta de la comparación de las batimetrías 2000 vs 2003, tanto volumétrica como numérica. En color verde se indican las zonas en donde se efectuó el cálculo de variación de volumen.

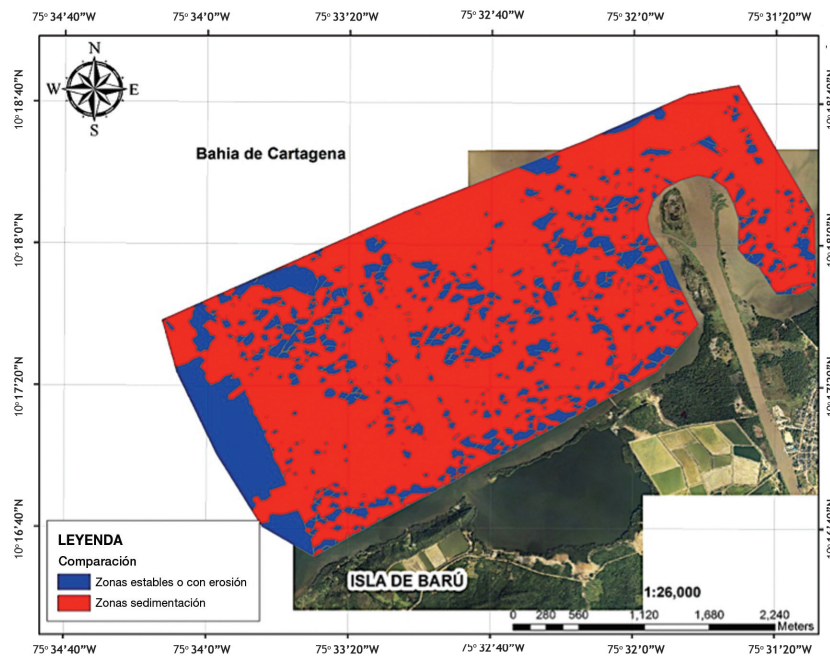


Figura 19. Vista en planta de la diferencia volumétrica entre las batimetrías del año 2003 vs 2004. El color rojo representa las zonas donde se presentaron incrementos (sedimentación) de volumen, el color azul representa las zonas donde se presentaron decrementos o invariabilidad (estable o erosión).

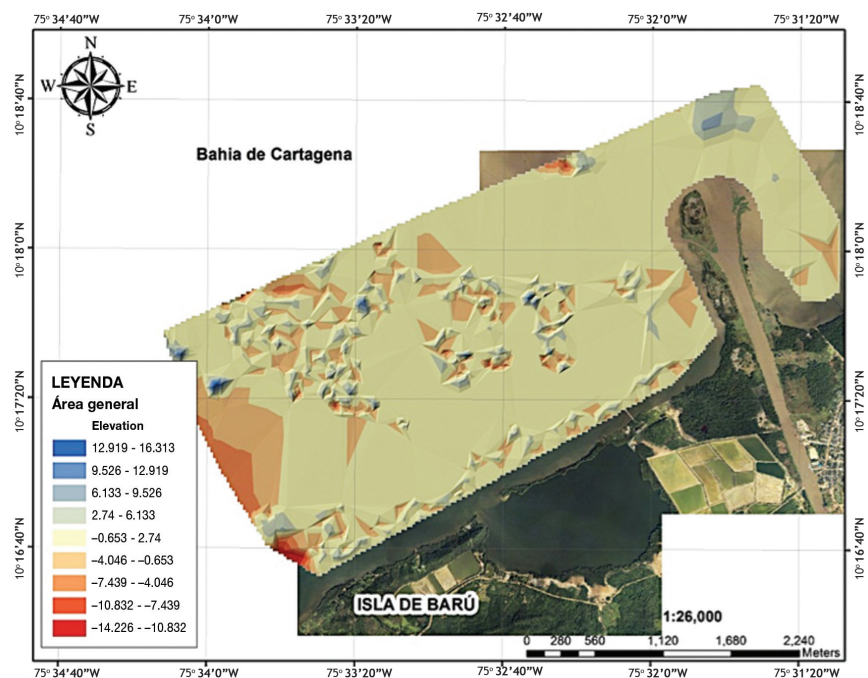


Figura 20. Vista en planta del resultado de la comparación numérica entre la batimetría del año 2003 vs 2004. Los valores positivos indican zonas de sedimentación (gammas de azules) y los valores negativos zonas de erosión (gammas de rojos).

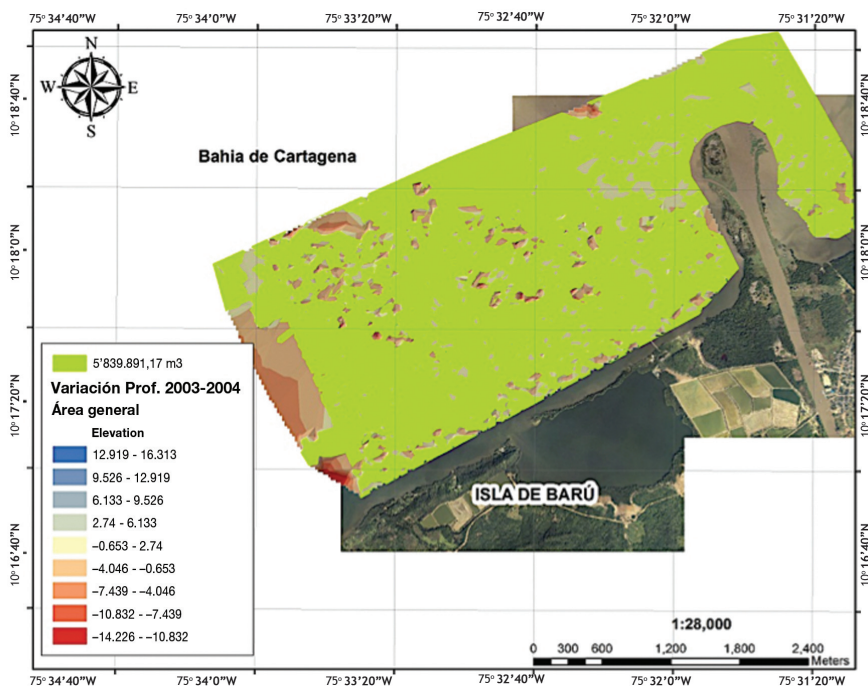


Figura 21. Vista en planta de la comparación de las batimetrías 2003 vs 2004, tanto volumétrica como numérica. En color verde se indican las zonas en donde se efectuó el cálculo de variación de volumen.

radicalmente la forma de la costa y al mismo tiempo generando erosión a cada costado de la desembocadura, con un aproximado de 16,796.16 m² de pérdida de material (figura 22).

Entre los años 1974 y 1987, la afectación en este sector fue menor, con un total aproximado de acumulación de sedimentos en la desembocadura de 99,326.21 m² y de pérdida de material de 10,482.41 m² aproximadamente (figura 23).

Al analizar las variaciones ocurridas entre los años 1987 y 2005, vemos que se produjo una acreción en la zona de la desembocadura que modificó la forma y longitud del canal haciéndolo ocupar mayor terreno de la bahía, con un valor aproximado de 357,204.19 m² de sedimentos depositados y con una pérdida de 20,466.66 m², mayormente al interior de éste (figura 24).

Finalmente, analizando los años 2005 y 2009, vemos que en un periodo de 4 años se presentó una significativa acumulación de sedimentos en la zona de la desembocadura y al interior del canal, cambian su forma y longitud con un total de 267,525.09 m² de sedimentos depositados y con una pérdida de 16,985.4 m² (figura 25).

Para cuantificar de manera general las variaciones ocurridas entre los años mas extremos del presente estudio, se realizó también la estimación de las áreas de acreción y erosión totales para el rango de 48 años entre 1961 y 2009, obteniendo que el total de sedimentos acumulados, mayormente en la zona de la desembocadura, fue de 1'025,386.67 m² aproximadamente, y el total de sedimentos perdidos fue de 5,264.85 m² (figura 26).

Por su parte, con la aplicación de la extensión de ArcGIS llamada *DSAS*, con la que se generaron un total de 84 transectos perpendiculares a una línea base, establecida ésta como una copia paralela a 50 metros de la línea del años 1961, se obtuvieron las distancias el cálculo estadístico *EPR* para cada uno de los pares de años comparados por cada transecto. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

Para visualizar, comparar y analizar de una mejor manera los resultados obtenidos del cálculo de *EPR*, se generó una gráfica, en la que el eje Y muestra la tasa positiva para zonas de acreción y negativa para erosión, y el eje X muestra los transectos generados (figura 27).

En ella se puede observar que entre los años 1961 y 1974 se presentó una marcada acreción a razón de 10.50 m/año en las zonas cercanas a la desembocadura del canal y en las zonas aledañas a ésta, se presentó una baja erosión con una tasa de 1.05 m/año. Por el contrario, entre los años 1974 y 1987, la zona tuvo una evolución significativamente menor mostrando un comportamiento estable en la desembocadura, con una acreción a razón de 2.10 m/año en promedio y una baja erosión en los extremos, con una pérdida de material a una tasa de 0.067 m/año.

Entre los años 1987 y 2005 la tasa de acreción es mucho mayor que en los años anteriores, debido a la acumulación de sedimentos en la desembocadura del canal dando a este su actual conformación, con un crecimiento a razón de 5.33 m/año, y con una baja erosión a los costados del canal de 0.17 m/año. Por su parte, la comparación entre los dos pares de años finales, 2005 y 2009 se observa que el crecimiento por acumulación de material es de aproximadamente de 8.39 m/año, mientras que la erosión es de aproximadamente 1.67 m/año.

Si se analiza directamente el cambio sufrido entre 1961 y 2009, es decir los dos años más extremos, se encuentra un fenómeno de acreción concentrado en la desembocadura del canal a razón de 4.17 m/año, y una erosión ubicada en la zona costera de los costados del canal de 0.22 m/año

DISCUSIÓN

En general, los resultados obtenidos muestran que al balancear los procesos erosivo-acresivos, en el área de la desembocadura del Canal del Dique, se encuentra que la tendencia evolutiva a través del tiempo en este sector ha sido de acreción, principalmente, en la desembocadura como tal, donde la conformación morfológica ha tomado figuras de lengüetas, que han sido crecientes constantes, con un tasa de 4,17 m/año, que es un valor muy alto, respecto de las escalas espaciales y temporales de los procesos que han dado formación a esta acreción.

En el presente artículo se corroboran los resultados presentados por otros autores en estudios previos, por ejemplo en el 2004, [5] planteó que la mayor sedimentación en la desembocadura del Canal del Dique ocurre durante la época seca, cuando los caudales son bajos, sugiriendo la coincidencia entre los mayores procesos de sedimentación y la dirección de los vientos en

Tabla 2. Distancias y tasas obtenidas entre los transectos 1 y 38.

Tran- secto	Dis- tancia 1961 - 1974	Tasa 1961 - 1974	Dis- tancia 1974 - 1987	Tasa 1974- 1987	Dis- tancia 1987 - 2005	Tasa 1987 - 2005	Dis- tancia 2005- 2009	Tasa 2005- 2009	Dis- tancia 1961 - 2009	Tasa 1961 - 2009
1	24.72	1.90	-2.37	-0.18	12.41	0.69	-5.24	-1.31	29.52	0.62
2	7.35	0.57	1.51	0.12	2.22	0.12	0.55	0.14	11.08	0.23
3	-16.53	-1.27	9.04	0.70	2.98	0.17	6.54	1.64	-14.69	-0.31
4	-27.10	-2.08	1.78	0.14	27.10	1.51	12.41	3.10	-7.83	-0.16
5	-15.24	-1.17	-6.51	-0.50	4.03	0.22	9.89	2.47	-6.54	-0.14
6	-16.02	-1.23	-4.15	-0.32	16.02	0.89	15.65	3.91	-11.51	-0.24
7	-17.90	-1.38	-6.95	-0.53	1.92	0.11	11.42	2.86	-10.80	-0.23
8	-16.40	-1.26	-5.98	-0.46	16.40	0.91	18.47	4.62	-19.85	-0.41
9	-15.56	-1.20	-20.62	-1.59	15.56	0.86	28.34	7.08	-15.47	-0.32
10	-8.61	-0.66	-19.58	-1.51	8.61	0.48	28.78	7.20	9.34	0.19
11	-2.06	-0.16	-14.60	-1.12	11.71	0.65	14.29	3.57	7.17	0.15
12	2.67	0.21	-15.26	-1.17	2.67	0.15	24.32	6.08	-7.27	-0.15
13	-10.99	-0.85	-11.76	-0.90	0.48	0.03	15.48	3.87	10.96	0.23
14	-11.41	-0.88	-8.17	-0.63	11.41	0.63	19.58	4.89	19.48	0.41
15	-3.17	-0.24	-13.01	-1.00	11.26	0.63	15.87	3.97	52.34	1.09
16	6.11	0.47	-9.57	-0.74	6.11	0.34	22.95	5.74	118.59	2.47
17	22.27	1.71	-14.36	-1.10	18.27	1.01	26.16	6.54	174.70	3.64
18	33.13	2.55	-1.03	-0.08	42.12	2.34	43.34	10.84	236.25	4.92
19	44.02	3.39	6.54	0.50	103.39	5.74	20.75	5.19	125.36	2.61
20	51.46	3.96	59.92	4.61	90.93	5.05	33.94	8.48	127.57	2.66
21	55.08	4.24	106.27	8.17	84.25	4.68	-4.68	-1.17	149.18	3.11
22	101.58	7.81	22.96	1.77	101.58	5.64	-5.64	-1.41	134.91	2.81
23	105.57	8.12	21.14	1.63	105.57	5.87	-5.87	-1.47	144.46	3.01
24	127.68	9.82	16.17	1.24	127.68	7.09	-7.09	-1.77	152.41	3.18
25	134.91	10.38	21.09	1.62	134.91	7.49	-7.49	-1.87	153.24	3.19
26	144.46	11.11	16.17	1.24	144.46	8.03	-8.03	-2.01	156.93	3.27
27	160.36	12.34	8.14	0.63	160.36	8.91	-8.91	-2.23	165.14	3.44
28	173.86	13.37	1.36	0.10	173.86	9.66	-9.66	-2.41	159.23	3.32
29	179.35	13.80	-4.42	-0.34	179.35	9.96	-9.96	-2.49	159.69	3.33
30	187.41	14.42	-3.32	-0.26	187.41	10.41	-10.41	-2.60	144.19	3.00
31	183.34	14.10	-6.46	-0.50	183.34	10.19	-10.19	-2.55	155.18	3.23
32	181.99	14.00	-0.95	-0.07	181.99	10.11	-10.11	-2.53	135.52	2.82
33	166.24	12.79	3.77	0.29	166.24	9.24	-9.24	-2.31	87.54	1.82
34	184.70	14.21	3.33	0.26	184.70	10.26	-10.26	-2.57	61.66	1.28
35	159.82	12.29	1.07	0.08	159.82	8.88	-8.88	-2.22	45.34	0.94
36	113.87	8.76	4.74	0.36	113.87	6.33	-6.33	-1.58	7.16	0.15
37	92.30	7.10	0.88	0.07	92.30	5.13	-5.13	-1.28	12.68	0.26
38	83.01	6.39	4.01	0.31	83.01	4.61	-4.61	-1.15	11.94	0.25



Figura 22. Vista en planta de las áreas de erosión-acreción entre los años 1961 y 1974.



Figura 23. Vista en planta de las áreas de erosión-acreción entre los años 1974 y 1987.



Figura 24. Vista en planta de las áreas de erosión-acreción entre los años 1987 y 2005.



Figura 25. Vista en planta de las áreas de erosión-acreción entre los años 2005 y 2009.

Tabla 3. Distancias y epr obtenidas entre los transectos 39 y 84.

Tran- secto	Dis- tancia 1961 - 1974	Tasa 1961 - 1974	Dis- tancia 1974 - 1987	Tasa 1974 - 1987	Dis- tancia 1987 - 2005	Tasa 1987 - 2005	Dis- tancia 2005- 2009	Tasa 2005- 2009	Dis- tancia 1961 - 2009	Tasa 1961 - 2005
39	34.55	2.66	9.39	0.72	34.55	1.92	-1.92	-0.48	41.80	0.87
40	35.35	2.72	2.51	0.19	35.35	1.96	-1.96	-0.49	36.47	0.76
41	33.43	2.57	5.61	0.43	33.43	1.86	-1.86	-0.46	97.05	2.02
42	58.73	4.52	5.23	0.40	58.73	3.26	-3.26	-0.82	114.96	2.40
43	57.87	4.45	9.07	0.70	57.87	3.22	49.41	12.35	130.18	2.71
44	23.08	1.78	5.71	0.44	23.08	1.28	49.81	12.45	138.47	2.88
83	0.000	0.000	0.00	0.00	1407.53	78.20	470.37	117.59	1551.86	32.33
84	0.000	0.000	0.00	0.00	1163.82	64.66	72.10	18.03	2582.16	53.80
45	41.21	3.17	4.59	0.35	41.21	2.29	39.05	9.76	227.17	4.73
46	60.57	4.66	8.99	0.69	60.57	3.36	50.68	12.67	341.06	7.11
47	72.85	5.60	20.34	1.56	72.85	4.05	58.34	14.58	354.61	7.39
48	83.58	6.43	24.19	1.86	83.58	4.64	48.44	12.11	336.19	7.00
49	143.01	11.00	5.75	0.44	9.29	0.52	32.49	8.12	283.10	5.90
50	223.83	17.22	35.72	2.75	223.83	12.43	61.26	15.31	271.33	5.65
51	245.65	18.90	29.45	2.27	245.65	13.65	52.59	13.15	279.78	5.83
52	235.38	18.11	39.31	3.02	235.38	13.08	57.85	14.46	283.60	5.91
53	175.28	13.48	34.56	2.66	11.30	0.63	34.30	8.58	253.84	5.29
54	200.50	15.42	38.25	2.94	16.67	0.93	27.85	6.96	342.18	7.13
55	188.54	14.50	30.40	2.34	8.25	0.46	1.24	0.31	286.04	5.96
56	187.03	14.39	29.36	2.26	8.39	0.47	0.97	0.24	293.99	6.12
57	195.84	15.06	18.16	1.40	32.90	1.83	1.13	0.28	313.85	6.54
58	288.01	22.15	13.52	1.04	42.86	2.38	0.19	0.05	315.73	6.58
59	239.13	18.39	10.03	0.77	39.84	2.21	0.68	0.17	369.97	7.71

(Continuación tabla 3)

Tran- secto	Dis- tancia 1961 - 1974	Tasa 1961 - 1974	Dis- tancia 1974 - 1987	Tasa 1974 - 1987	Dis- tancia 1987 - 2005	Tasa 1987 - 2005	Dis- tancia 2005- 2009	Tasa 2005- 2009	Dis- tancia 1961 - 2009	Tasa 1961 - 2005
60	254.62	19.59	15.29	1.18	33.38	1.85	-3.60	-0.90	404.74	8.43
61	265.59	20.43	12.84	0.99	29.33	1.63	13.05	3.26	420.59	8.76
62	267.58	20.58	10.44	0.80	35.42	1.97	15.12	3.78	493.60	10.28
63	311.23	23.94	15.46	1.19	38.88	2.16	31.50	7.88	536.33	11.17
64	344.43	26.49	16.44	1.26	41.31	2.30	44.60	11.15	328.92	6.85
65	345.74	26.60	27.95	2.15	30.23	1.68	12.48	3.12	75.96	1.58
66	379.00	29.15	9.96	0.77	28.76	1.60	50.67	12.67	22.25	0.46
67	35.08	2.70	308.13	23.70	15.40	0.86	21.15	5.29	11.77	0.25
68	14.39	1.11	194.07	14.93	60.04	3.34	22.25	5.56	5.22	0.11
69	12.63	0.97	26.48	2.04	193.12	10.73	20.68	5.17	11.34	0.24
70	-19.46	-1.50	3.43	0.26	84.18	4.68	26.21	6.55	12.17	0.25
71	-26.29	-2.02	-7.29	-0.56	13.93	0.77	22.49	5.62	-4.14	-0.09
72	-6.59	-0.51	-2.90	-0.22	7.76	0.43	24.48	6.12	4.38	0.09
73	-11.14	-0.86	-7.10	-0.55	17.83	0.99	20.70	5.18	26.44	0.55
74	-12.31	-0.95	-6.43	-0.49	8.19	0.46	29.76	7.44	60.92	1.27
75	-20.27	-1.56	-4.57	-0.35	13.68	0.76	47.69	11.92	59.28	1.23
76	-15.10	-1.16	-10.27	-0.79	5.69	0.32	25.86	6.46	71.78	1.50
77	-17.43	-1.34	-3.82	-0.29	-2.36	-0.13	21.25	5.31	69.74	1.45
78	-10.29	-0.79	13.43	1.03	-1.61	-0.09	6.72	1.68	59.12	1.23
79	-11.65	-0.90	48.68	3.74	13.81	0.77	12.31	3.08	49.88	1.04
80	-7.32	-0.56	67.44	5.19	3.22	0.18	19.41	4.85	42.52	0.89
81	-2.77	-0.21	2.77	0.21	-7.75	-0.43	24.20	6.05	23.83	0.50
82	-18.71	-1.44	44.89	3.45	-0.66	-0.04	24.20	6.05	11.08	0.23

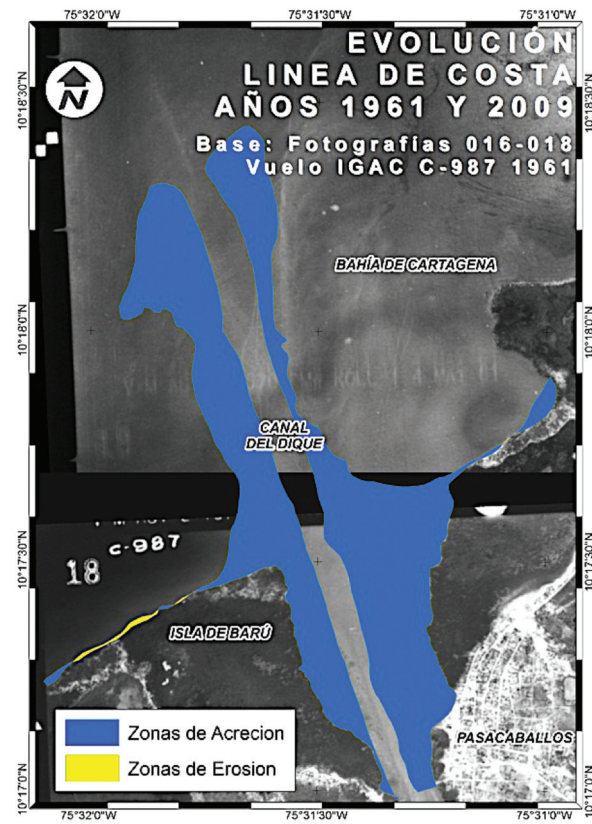


Figura 26. Vista en planta de las áreas de erosión-acreción entre los años 1961 y 2009.

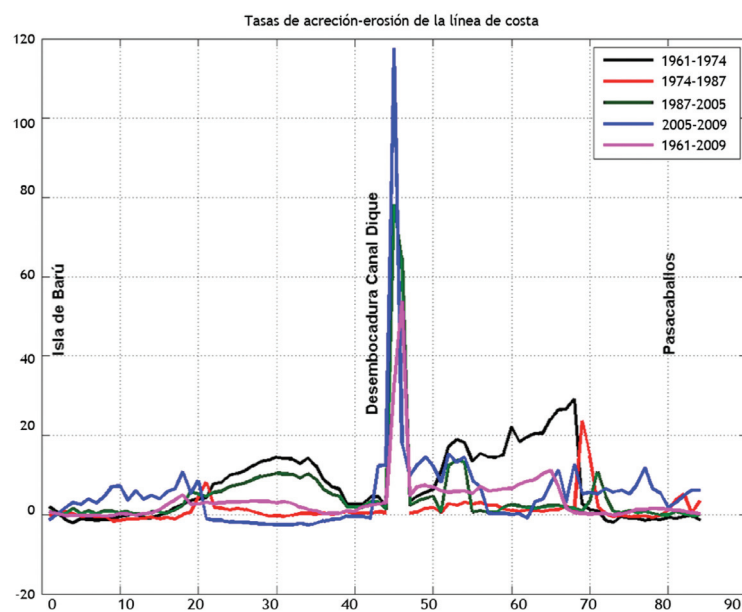


Figura 27. Gráfico de comparación de tasas anuales de evolución de línea de costa.

esa misma época[5]. Por su parte, Andrade, *Et Al*, estimó un volumen de 26,8 millones de m³ de sedimentos finos transportados por el Canal del Dique entre 1977 y 2004 [6], lo cual contrasta dramáticamente con los 18'101.701,7 m³, de cálculo de sedimentos depositados en el sector exterior, inmediatamente adyacente a la desembocadura del Canal del Dique, 1996 y 2003.

Es posible que la tasa de acreción calculada para la desembocadura del Canal del Dique, esté principalmente afectada por el resultado de actuaciones antrópicas, al haberse tomado como zonas de depósitos de los diferentes dragados que se han realizado al interior del Canal del Dique.

Lo anterior se ratifica, si se considera que entre 1981 y 1984, el número de curvas del Canal del Dique, entre Calamar y Pasacaballo fue reducido de 93 a 50 y el radio mínimo ampliado de 500 a 1000 m; el ancho de fondo se llevó de 45 a 65 m y la profundidad mínima a 2,5 m. El número de metros cúbicos dragados fue el doble de los ejecutados en 1951. El consorcio encargado de estos dragados se denominó *Layne Dredging y Sanz & Cobe Ltda*, alcanzó a dragar 18'800.000 m³ [7]. Cifra muy parecida a la hallada en el cálculo de sedimentos depositados en el sector exterior inmediatamente adyacente a la desembocadura del Canal del Dique entre 1996 y 2003.

El presente artículo pudo evidenciar la gran potencialidad de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica para obtener cálculos y resultados precisos respecto de datos distribuidos tanto espacial, como temporalmente, constituyéndose en elemento vital para la generación de productos que soporten la toma de decisiones en el nivel de gestión departamental, evaluación de riesgos y administración del litoral.

Las perspectivas futuras de este tipo de análisis, podrían incluir la combinación de técnicas de modelación numérica con la potencialidad de los sistemas de información geográfica, con el fin de obtener resultados de detalle y con alta precisión científica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Departamento Nacional de Planeación, Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3594 – Importancia estratégica del proyecto "Sistema ambiental y de navegación del Canal del Dique. 2009.
- [2] Sitio Web: webhelp.esri.com. Environmental System Research Institute, Inc. – ESRI. ArcGIS Desktop 9.3 Help.
- [3] José Ojeda Zújar. Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, Tendencias y propuesta. Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla. Boletín de la A.G.E No. 30 – 2000 p. 103-118.
- [4] USGS, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Digital Shoreline Analysis Sistem (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating shoreline change. Installation Instruction and User Guide. Update for version 4.2. 2009.
- [5] Serguei LONIN, Carlos PARRA, Carlos ANDRADE, Yves-François THOMAS. Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. Boletín Científico CIOH No. 22, ISSN 0120-0542, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 77-89, diciembre de 2004.
- [6] Carlos ANDRADE, Yves-François THOMAS, Serguei LONIN, Carlos PARRA, Loic MENANTEAU, Marcella CESARACCIO, Stephane KUNESCH, Ana ANDREAU, Shirley VELASCO, Cristina PIÑERES. Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. Boletín Científico CIOH No. 22, ISSN 0120-0542, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 90-104, diciembre de 2004.
- [7] UNINORTE, CORMAGDALENA, ARMADA NACIONAL DE COLOMBIA. Canal del Dique – Plan de restauracion ambiental (Primera Etapa). ISBN 958-9105-95-5, Bogotá, Colombia, pp. 49-61, 2001.