

ARTÍCULO



CIOH
www.cioh.org.co

Cambios en la línea de costa del Cayo Serranilla entre 1944 y 2009, Archipiélago de San Andrés, Colombia

Fecha de recepción: 2011-05-12 / Fecha de aceptación: 2011-09-15

Jesús Andrés ZAMBRANO, jandresz@gmail.com
Buque Hidrográfico ARC "Quindío"
Carlos Alberto ANDRADE, candrade@costa.net.co
Grupo de Investigación en Oceanografía GIO, Escuela
Naval ALMIRANTE PADILLA, Isla Manzanillo,
Cartagena, Colombia

RESUMEN

La variabilidad de la línea de costa del Cayo de Serranilla fue determinada a partir de la comparación de líneas de costas extraídas de imágenes y aerofotografías con diferente resolución temporal en un período comprendido entre 1944 y 2009. Para ese fin se utilizó el módulo DSAS (Digital Shoreline Analysis System) aplicado al programa Arc GIS con el fin de determinar las variaciones. Se observó una disminución en las dimensiones: de 1.994 metros de perímetro en 1944 a 1.872 metros en 2009 y el área del cayo pasó de tener 157.720 m² en 1944 a 125.650 m² en 2009. La tendencia erosiva se incrementó en el período comprendido entre 2007 y 2009.

Palabras claves: Variación de línea de costa, DSAS, Cayo Serranilla, área emergida.

ABSTRACT

The Serranilla Key coastline variation was determined by the comparison of coastlines extracted from images and aerial photographs with different temporal resolution within a period comprised between 1944 and 2009. The Digital Shoreline Analysis System – DSAS module of ArcGIS was used to determine those variations. A reduction in the coastline perimeter from 1.994 m in 1944 to 1.872 m in 2009 was observed and the area of the Key increased from 157.720 m² in 1944 to 125.650 m². The erosive tendency was incremented in the period between 2007 and 2009.

Key words: Coastline variation, DSAS, Serranilla Cay, emerged area.

INTRODUCCIÓN

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, está situado al occidente de la "Región del Gran Caribe" con una extensión terrestre de 52.2 km², el archipiélago origina para Colombia una amplia zona de mar territorial en el Mar Caribe de 9.814,42 km², así como una zona económica exclusiva compuesta de islas (de formación volcánica, 1997) [1] y de cayos de reconocida importancia, que marcan las fronteras del territorio nacional, como hitos, de un mar territorial con alto potencial de riquezas del suelo y subsuelo marino (figura 1).

Esta investigación muestra los resultados de la recolección y procesamiento de datos oceanográficos, sobre la línea de costa del Cayo de Serranilla, que describen los procesos, efectos y resultados de fenómenos como el calentamiento global y el aumento en el nivel medio del mar en ese territorio.

El trabajo se centra en evidenciar el comportamiento de la línea de costa del Cayo Serranilla, de especial relevancia para los intereses marítimos de la Nación, por ser una fracción de tierra en el Mar Caribe, y servir como límite fronterizo es trascendente en la protección del territorio y la soberanía nacional. A partir del estudio de este Cayo de Serranilla, se pueden acometer acciones orientadas a la protección del litoral y de mitigación de efectos de erosión en este sitio tan estratégico para la Nación.

ASPECTOS FÍSICOS GENERALES

El área de San Andrés y Providencia se ubica en el Mar Caribe al noroeste de la Cuenca Colombiana (figura 2) en la parte oriental de la Depresión de Providencia sobre la plataforma insular del Archipiélago de San Andrés la cual es la continuación geológica y geomorfológica de la plataforma continental llamada Centro-americana pero separada de esta por profundidades de hasta 2400 m,

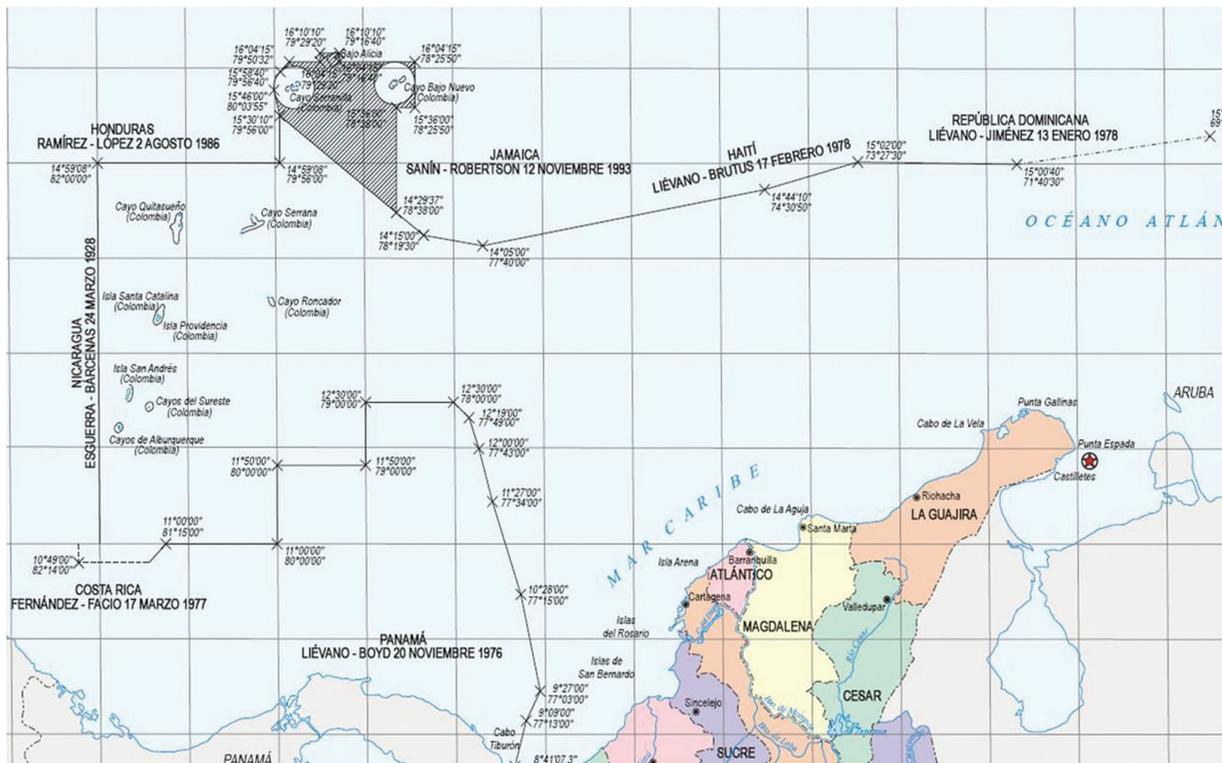


Figura 1. Mapa de Fronteras marítimas en el Caribe extraído del Mapa Oficial de la República de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

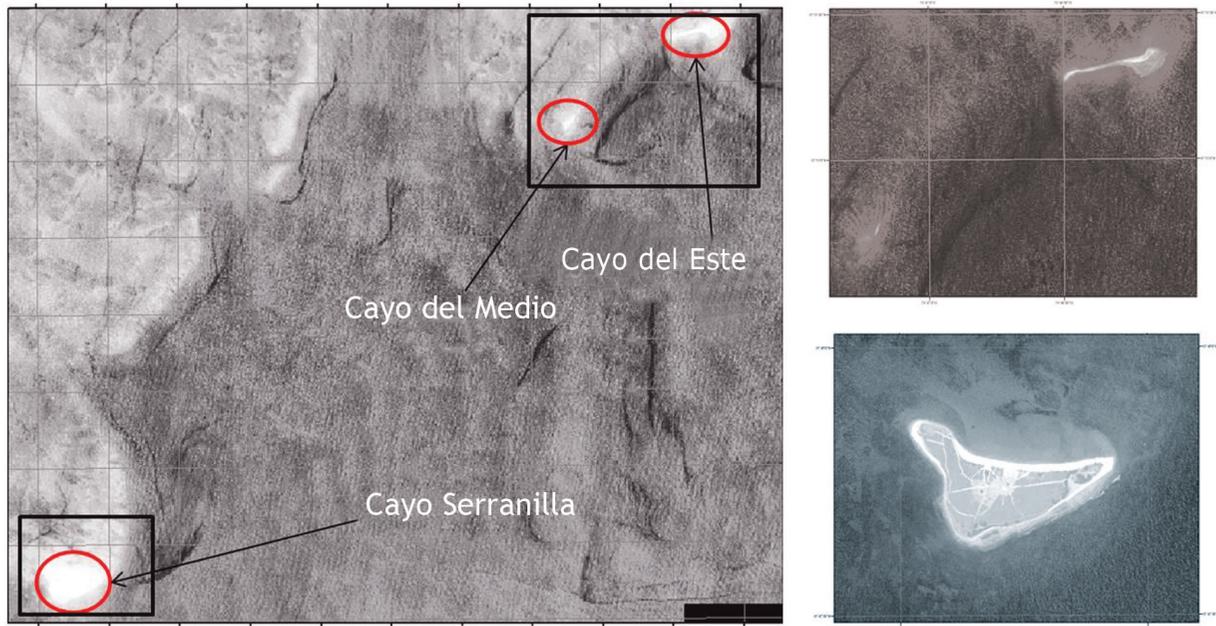


Figura 2. Área oriental del Banco Serranilla. (a) Área general. (b) Cayo del Medio y Cayo del Este. (c) Cayo Serranilla.

por lo cual las islas son oceánicas [2]. Hace parte de un área de plataforma de islas y bajos que comprenden un área de 3300 km² y emergen de una profundidad de 1500 m.

El Cayo de Serranilla se encuentra ubicado en coordenadas 15°47'44.36" N 079°50'49.69" W [3] al sureste del banco del mismo nombre siendo la más grande de tres áreas emergidas junto con Cayo del Este y Cayo del Medio (figura 2). Las características del cayo son similares a las de otros más estudiados en el archipiélago: un fuerte talud que emerge de profundidades promedio de 1500 m, arrecifes y arenas coralinas [4]. Presenta esta una forma triangular con longitudes entre sus puntas medidas linealmente desde este y oeste, este y sur y oeste y sur de 712, 458 y 588 m respectivamente con un perímetro de 1863,5 m y un área emergida de 125.649,24 m².

El origen del Cayo de Serranilla es resultado de la conjunción de la acción de volcanismo del Terciario en territorio continental de Centroamérica y del crecimiento coralino, al igual que las demás formaciones del Archipiélago de San An-

drés y Providencia, bordeado por una formación coralina de basamento volcánico que tiene alrededor aguas profundas [5].

OCEANOGRAFÍA Y CLIMA

Las corrientes oceánicas superficiales en la Cuenca de Colombia en el área de Serranilla están dominadas por la Corriente del Caribe que fluye hacia el noroeste (figura 3) hacia el Mar Caimán. En temporada seca (diciembre –marzo) la corriente en el Caribe se orienta hacia el oeste con una velocidad promedio de 60-80 cm/s, mientras que en la estación húmeda disminuye su intensidad y se hace variable su dirección a causa del desplazamiento del eje del viento de chorro superficial (el "jet" bajo del Caribe) que se encuentra al este del cayo.

Las mareas en el Caribe se caracterizan por tener un rango promedio micromareal para la mayor parte de este, sin embargo existen no menos de seis diferentes rangos de mareas en el Caribe [6]. Para el caso del área de estudio no existen mediciones que permitan determinar

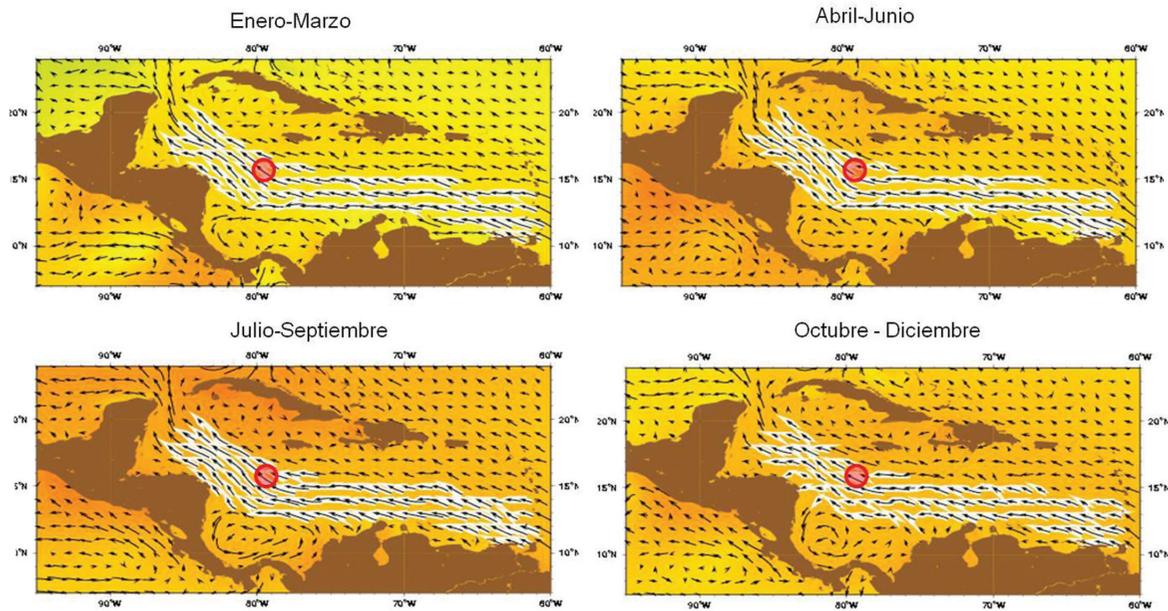


Figura 3. Corrientes superficiales del Caribe. Descargadas de <http://oceancurrents.rsmas.miami.edu>.

con exactitud el comportamiento de la marea, sin embargo a partir de series de tiempo de áreas cercanas como la Isla San Andrés [7] y Banco Rosalinda [6] coinciden en clasificarla como marea mixta, principalmente semidiurna (figura 4) aunque vale la pena resaltar que en la Cuenca de Colombia predomina la marea mixta principalmente diurna.

No se cuenta con un dato específico para el aumento de nivel del mar en el área del Archipiélago de San Andrés y Providencia debido a la ausencia y calidad de los datos existentes de estaciones mareográficas cercanas, sin embargo se considera que el comportamiento esperado en el aumento del nivel medio del mar sea de alrededor de 3.58 mm/año, calculado entre 1952 y

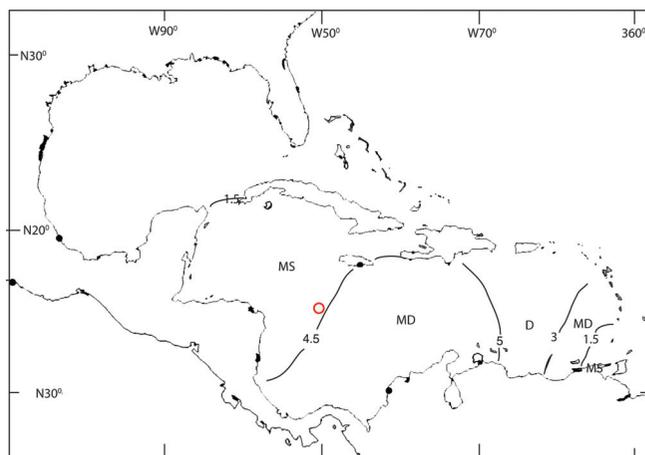


Figura 4. Tipos de Marea Caribe (KJERFVE, 1981) Se observa la distribución de las mareas de acuerdo al número de forma, MD (mixta predominante diurna), MS (mixta predominante semidiurna), D (diurna).

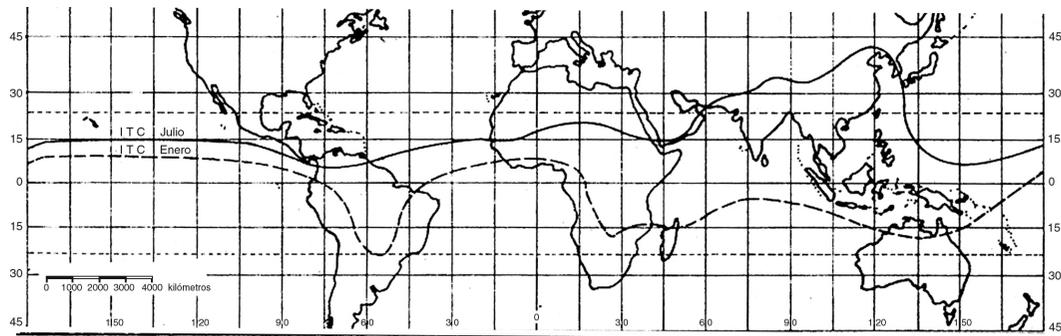


Figura 5. Desplazamiento de la ZCIT (National Weather Service).

1992 siendo este el escenario más probable en la cuenca del Caribe, [8], [9].

El clima es modulado por la posición geográfica de la ZCIT (figura 5) y por la llegada del Sistema del Monzón Americano (el movimiento zonal de la estación lluviosa a lo largo del año) en los trópicos. La estacionalidad de la posición de la ZCIT corresponde a la estación seca (de vientos) de diciembre-abril y estación lluviosa entre agosto y octubre. El resto del año es de transición entre estas dos estaciones [10].

El clima dentro de la zona de estudio se ubica en los de bajas latitudes, las temperaturas son considerablemente uniformes a lo largo de todo el año sin embargo se ve afectado por el paso de ondas del este, ciclones tropicales y los efectos que frentes fríos del norte causan.

La temperatura media anual del aire es de 26.7 °C, con un rango de 1° en valores mensuales. Los vientos son principalmente del E-NE, con velocidades medias mensuales que varían desde 3,2 hasta 6,2 m/s. Es relativamente húmedo, la lluvia medida en las inmediaciones de San Andrés tiene un promedio de 175 cm/año [11]. Suponiendo que la temporada de lluvias coincide con la de la parte continental, la mayoría de la lluvia cae de junio a diciembre.

METODOLOGÍA

Las líneas de costa están sujetas a una amplio rango de procesos, geológicos y morfológicos, así como también de los efectos de los vientos, las olas, los cambios de nivel del mar, y las corrientes que afectan todas las costas generando pro-

cesos que varían en su intensidad y significativa relevancia dependiendo de la ubicación y de las condiciones reinantes [12].

El uso de fotografías aéreas seriadas, realizadas en distintos años, permite comparar cuantitativamente la evolución de la línea de costa en diferentes puntos, lo que aporta datos no sólo para establecer tendencias numéricas de avance/retroceso, sino también para medir procesos de refracción/difracción del oleaje, estimar direcciones de trasvase sedimentario, o evaluar las consecuencias de las actuaciones humanas sobre el litoral [13].

En este trabajo se pretende cuantificar las tendencias evolutivas recientes de la línea de costa del Cayo de Serranilla. Para su análisis se realizaron labores de levantamiento de línea de costa con la ayuda de sistemas de posicionamiento global diferencial (DGPS) de alta precisión, con el propósito de determinar cuál es la línea de costa actual, posteriormente se procedió al cálculo de tasas de retroceso/avance de la línea de costa mediante fotogrametría y tratamiento de imágenes digitales y finalizar con resultados estadísticos obtenidos del procesamiento de las líneas de costa procesadas.

OBTENCIÓN DE LÍNEA DE COSTA RECIENTE

Para la obtención de la línea de costa reciente del Cayo de Serranilla se utilizó un DGPS (Sistema de posicionamiento global diferencial), en levantamiento autónomo con un solo receptor operando en modo cinemático, caminando sobre la interface entre agua y mar en la línea de costa se obtuvo la forma del Cayo de Serranilla. Los datos obtenidos de este equipo consistente en puntos que contienen información de posición,

tiempo, dirección y altura con una exactitud de 5 centímetros en la horizontal, se tomaron cada segundo, estos fueron transformados mediante el software Arc GIS®, con el cual se convirtieron en un polígono sobre coordenadas planas UTM WGS 84.

OBTENCIÓN DE LÍNEA DE COSTA HISTÓRICA

Se logró a partir de consecución de aerofotografías e imágenes satelitales de años pasados. Inicialmente se obtuvo una imagen satelital IKONOS, de resolución 1 mt. en pancromática y 3 metros en multiespectral del 22 de abril de 2007, proyectada en UTM WGS 84, la cual fue prestada con propósitos académicos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-, esta imagen además de ser de alta resolución, se encuentra georeferenciada. Así mismo, se seleccionaron dos aerofotografías de las misiones aerofotográficas realizadas por el IGAC, R-214 del 01 de marzo de 1944 y de la misión C-2124 del 15 de marzo de 1984, las cuales fueron respectivamente escaneadas y geo-referenciadas en el programa Arc GIS, sin ser ortorectificadas, lo cual puede conllevar a error en las posiciones de elementos representados.

La georeferenciación de las aerofotografías se realizó con el uso del programa Arc GIS, por medio de la comparación con la imagen satelital. Para ambas imágenes el error fue inferior a 1 metro. A estas imágenes ya georeferenciadas, se les digitalizó las líneas de costa, mediante la creación manual de un polígono sobre la zona de interface costa-mar visible en ellas.

COMPARACIÓN Y ESTADÍSTICAS

El proceso de comparación de las diferentes líneas de costa y los datos estadísticos obtenidos se realizó a través de la aplicación del módulo DSAS Digital shoreline analysis system de USGS United States Geological Survey. Por ser fundamental para el trabajo haré una descripción minuciosa de la metodología seguida.

CREACIÓN DE LA GEODATABASE

Esta se realizó sobre la plataforma Arc Catalog, todos los datos de entrada al módulo DSAS se deben gestionar dentro de una geodatabase personal, que también sirve como lugar de archivo de los resultados y la estadística. La base

de datos geográficos no sólo sirve como un contenedor de almacenamiento para todos los datos utilizados y producidos por DSAS, sino que proporciona una estructura que permite la aplicación de la topología. DSAS también requiere que los datos estén en unidades de metros en un sistema de proyección, que para este caso, se utilizó el UTM WGS 84 zona 18N.

INTRODUCCIÓN DE LÍNEAS DE COSTA

Todos los datos de las líneas de costa deben residir en una clase de elemento único dentro de una geodatabase personal. Las líneas de costa fueron adicionadas como shapefiles, adicionadas a la Geodatabase y unificadas. Para efecto de unificar las posiciones de las líneas de costa se tomó como referencia el nivel más alto de la marea visible en todas las imágenes y aerofotografías, ya que, así mismo, se hizo con el levantamiento realizado con el DGPS. A las líneas de costa se les crearon unos atributos que son necesarios para que el sistema pueda realizar los cálculos respectivos como fecha e incertidumbre de posición, la cual se puso la que por defecto y de ayuda trae el módulo, que es de más o menos 4 m.

INTRODUCCIÓN DE LÍNEA BASE

La línea base es la referencia que utilizará el módulo para a partir de esta hacer las mediciones y comparaciones de las líneas de costa introducidas dado que a partir de ella se realizarán los respectivos transeptos que interceptarán las líneas de costa. Esta se creó también como un shapefile a partir de un buffer de 50 metros sobre la línea de costa digitalizada de la misión R-214, con el criterio de que esta se ajustaba mejor a la forma de las diferentes líneas de costas y sus formas no generaba ángulos muy agudos que dificultaran que los transeptos posteriormente dejaran de interceptar alguna línea de costa. Fue creada offshore de las líneas de costa. Esta también requirió de la creación de atributos específicos ya que necesita información necesaria para las DSAS sobre el orden paralelo a la costa de los transeptos, así como la ubicación de la línea base con respecto a las líneas de costa que para este caso fue mar adentro. Esta información se incorpora en los cálculos de manera que las estadísticas de la velocidad de cambio adecuadamente se den como negativo y la acumulación como algo positivo.

AJUSTE DE PARÁMETROS

El módulo DSAS requiere del ajuste de parámetros, estos se definen en la forma en que se van a distribuir los transeptos lanzados desde la línea base, donde se definió la ubicación mar adentro, espaciado cada 50 metros y longitud de los mismos de 120 metros. Posteriormente, se hace la introducción de la información necesaria para los metadatos.

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Con el propósito de conocer cómo es el comportamiento de la línea de costa del Cayo de Serranilla se realizaron montajes de las líneas de costa y de las áreas de generadas por estas.

ÁREAS Y PERÍMETROS. Para la realización de estos cálculos se utilizó el software Arc GIS, plataforma sobre la cual se extrajeron los datos a través de la digitalización de las aerofotografías, como lo mencioné anteriormente.

El cálculo de los perímetros y las áreas lo realiza el software automáticamente a través de la herramienta cálculo de geometría. En este punto vale la pena resaltar que no se observa un comportamiento homogéneo (figura

6) con relación a la variación del perímetro de la línea de costa y el área durante el período observado. Al retirar los valores obtenidos para el año 1984 se observa una clara tendencia negativa con un aumento de esta entre el período 2007 y 2009.

Podemos ver sobre el comportamiento de la variación de las áreas que hay una clara disminución de esta con relación al año 2009, sin embargo, para el caso de 1984, a pesar de tener la menor medición de perímetro, el área es mayor que en 2009 (figura 7).

PERFILES DE ACRECIÓN Y EROSIÓN. Una vez ya tenido en cuenta que ha habido cambios en el tamaño del perímetro del cayo y el área del mismo, en este punto nos centraremos en verificar cómo han sido los comportamientos de erosión y acreción, por medio de la superposición de las áreas obtenidas para ser estas comparadas con el área actual (2009) y de esta forma, poder conocer en cuales se presenta cada uno de los indicadores anteriormente mencionados y dimensionarlo. Para un fácil entendimiento de las figuras, vale la pena decir que las imágenes usadas en cada una corresponden al año comparado con el 2009.

Para el período 2007-2009 observamos, mediante la comparación procesos de erosión en

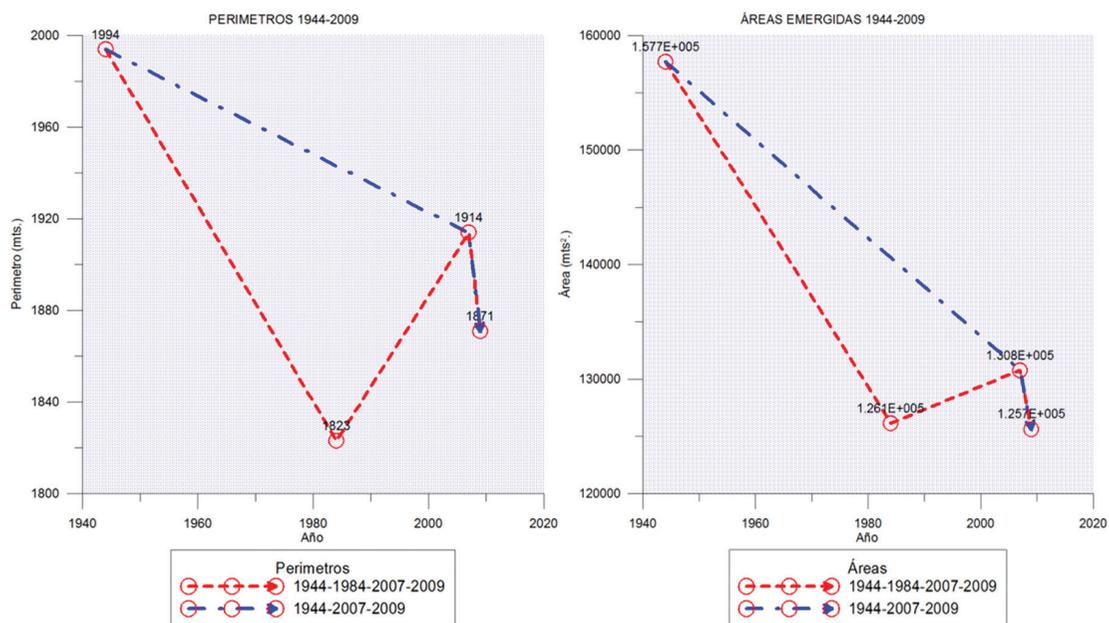


Figura 6. Tendencias, perímetros y áreas.

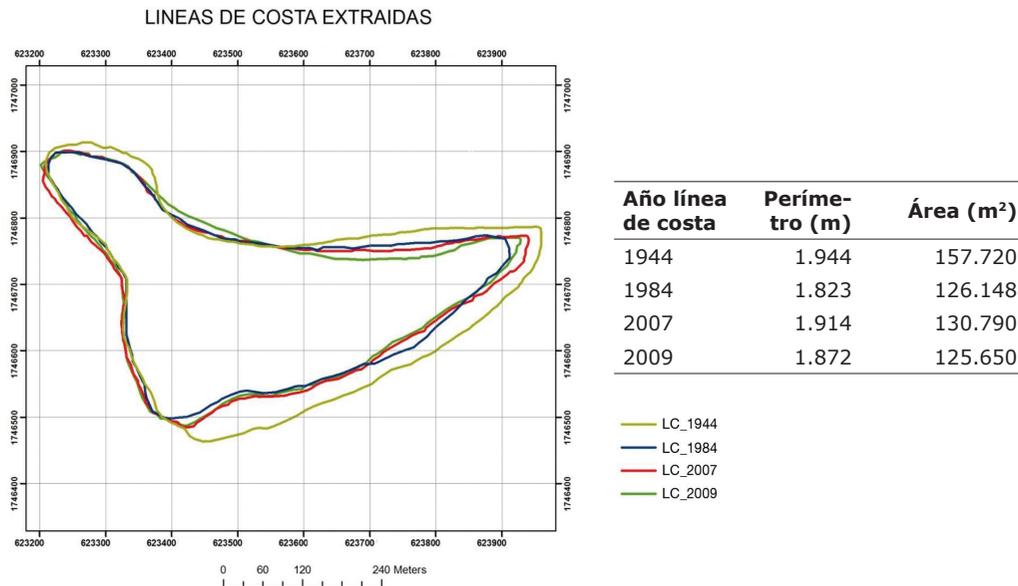


Figura 7. Comparativo líneas de costa y áreas.

toda la playa sur, sector oriental de la playa norte y sector norte de la playa este, con un área calculada de erosión en este período de 7589 m². Por otra parte, en el sector occidental de la playa norte y en la punta noreste del cay, se observa sectores de acreción, los cuales arrojan valores de área emergida ganada de 2449 m² (figura 8) arrojando esto un balance negativo de 5140 m².

Para el período de 1984-2009, observamos (figura 9), que predomina la acreción, la cual se manifiesta en la playa sur, en el sector occidental principalmente, y en la punta oriental, en la playa norte en el sector occidental y en la playa este, con un área emergida ganada de 607 m². En contraste, la erosión se concentra en el costado oeste del cay, tanto en la playa sur como norte sin contar únicamente con el sector de la punta oriental del mismo, con un área erosionada de 6505 m², lo cual nos arroja un balance negativo de 498 m².

Por último, para el período comparado de 1944-2009, se observan (figura 10) los mayores valores de erosión, la cual predomina en los sectores oriental de la playa norte y sur y en la punta noroccidental del cay, así mismo, vemos como se presenta acreción en el sector oriental de la playa norte. Los valores, para este período comparativo arrojan una pérdida de área emergida de 32.070 m².

ESTADÍSTICA. Cada método utilizado para calcular las tasas de cambio de la costa se basan en medir las diferencias entre las posiciones de la costa a través del tiempo sobre los transectos (figura 11). Cuando los cálculos de las tasas de cambio seleccionadas se han terminado de procesar, DSAS combina los cálculos del módulo individual, y la salida se pone a disposición en forma de tabla en ArcMap. Las tasas de cambio reportadas se expresan en metros por año a lo largo de los transectos.

CAMBIO TOTAL DE LA LÍNEA DE COSTA. Este indicador es una distancia que nos permite evidenciar el cambio total en el movimiento de la línea de costa. No se tiene en cuenta las fechas de las líneas de costa sino, que se obtiene a partir de la medición desde la línea de costa más cercana a la más lejana desde la línea base (figura 12). Esta nos indica que las mayores variaciones se presentan en la playa norte y sur, específicamente en los transectos 24 y 38 respectivamente, con valores de 59 y 57 metros respectivamente, contrastando con las menores variaciones en el transecto 15 y 41. Por otro lado, en la playa oeste predominan los más bajos valores de variación.

TAZA DE CAMBIO FINAL. La tasa de cambio final es el denominador de la variación de la

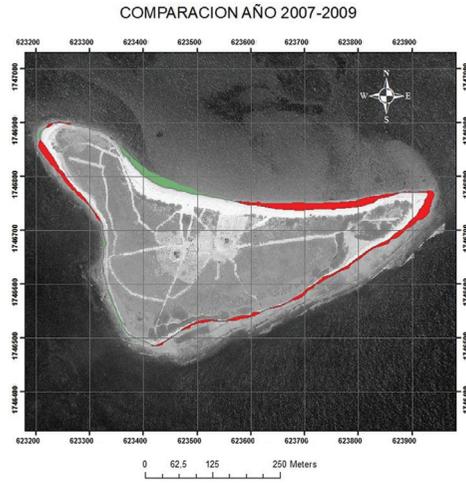


Figura 8. Comparativo área emergida período 2007-2009. Fuente PEGCSAP.

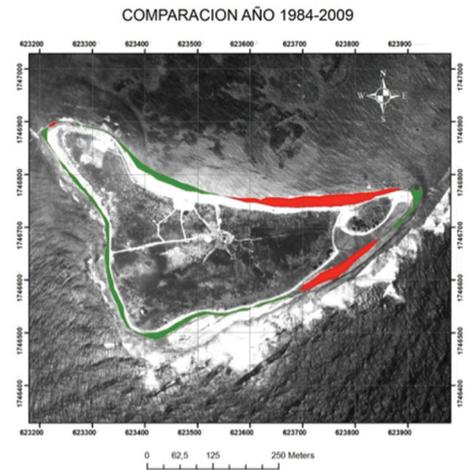


Figura 9. Comparativo área emergida período 1984-2009. Fuente PEGCSAP.

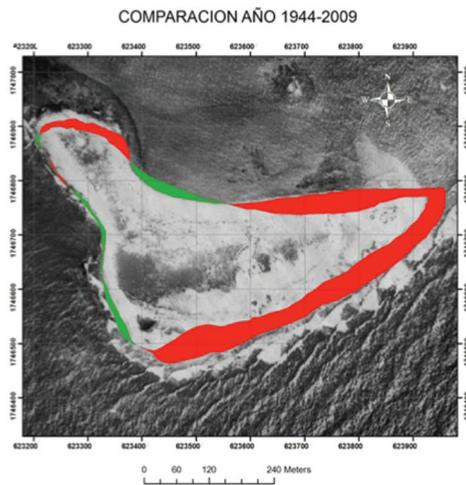


Figura 10. Comparativo área emergida período 1944-2009. Fuente PEGCSAP.

distancia en el tiempo, por el número de años transcurridos (figura 13). Respecto a esta tasa, la playa sur presenta mayor variación negativa, siendo la característica predominante en toda su extensión y, específicamente, en el sector del transepto 37 con una tasa de 0,8 metros/año, mientras que la playa norte en su gran mayoría se muestra con tendencia negativa en el sector entre los transeptos 13 y 14 la tendencia es positiva encontrándose la más alta de todo el cayo en transepto 13 con 0,3 metros/año. La playa oeste muestra mayoritariamente tasas de cambio positivas con valores máximos de 0,1 metros/año, con excepción de los transeptos 2 y 3, donde es negativa. En dos sectores específicamente observamos que no se presenta variación; estos son los transeptos 12 y 41 y son lugares específicos donde se ve un cambio en la tendencia de variación negativa a positiva o viceversa.

REGRESIÓN LINEAL. La regresión lineal, es el cambio que puede ser determinado por el ajuste de una recta de regresión por mínimos cuadrados para todos los puntos de la costa de un transepto en particular. La tasa de regresión lineal es la pendiente de la línea. El método de regresión lineal incluye las siguientes características: Todos los datos

se utilizan, independientemente de los cambios en la tendencia o la exactitud, El método es puramente computacional. El cálculo se basa en conceptos estadísticos aceptados, y el método es fácil de utilizar. Para este indicador, observamos un comportamiento muy similar al de la tasa de cambio final (figura 14). Sin embargo, los valores son menores, predominando la mayor tasa negativa en la playa sur y la mayor tasa positiva en la playa norte, donde predominan las tendencias negativas, y en la playa oeste, predominando las tasas positivas con las menores tasas (figura 15).

GRANULOMETRÍA. El tamaño de grano es la propiedad más fundamental de las partículas de sedimento, que afectan a su arrastre, transporte y deposición. El análisis del tamaño de grano por lo tanto proporciona pistas importantes sobre la procedencia de sedimentos, la historia y condiciones de transporte de depósito. Las diversas técnicas empleadas en la determinación del tamaño de grano describen aspectos muy diferentes de 'tamaño', como el diámetro máximo calibre, el diámetro del tamiz y el equivalente esférico de diámetro, y son en mayor o menor influencia de las variaciones en la forma del grano, densidad y propiedades ópticas. Todas las técnicas implican

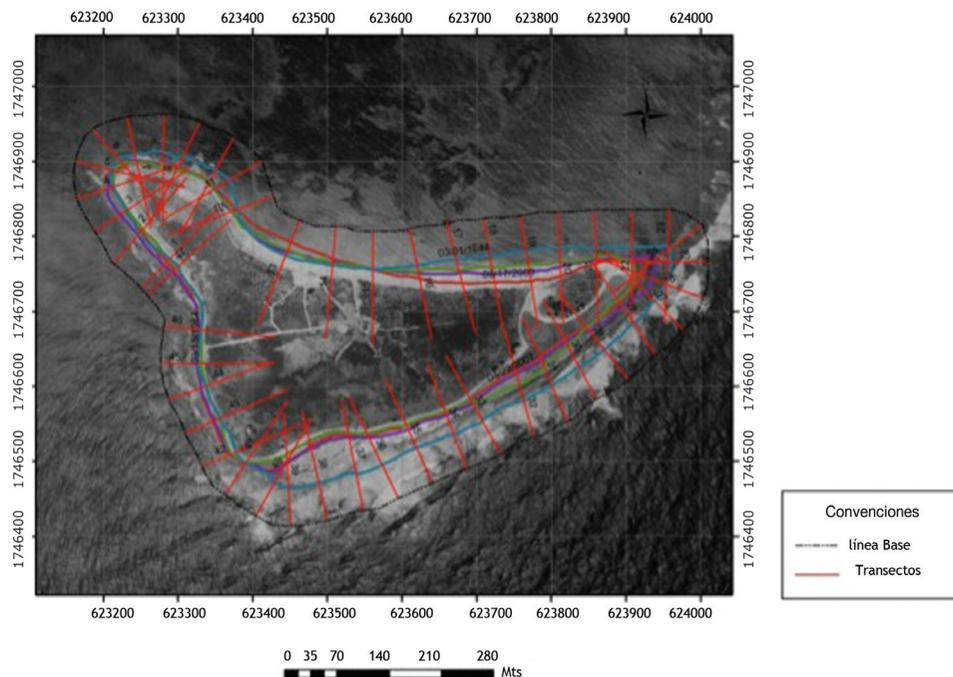


Figura 11. Distribución de transeptos. Vemos como se trazaron los transeptos (numerados), sobre una línea base exterior, que permite realizar los cálculos de variación y ratas de cambio. Fuente PE-GCSAP.

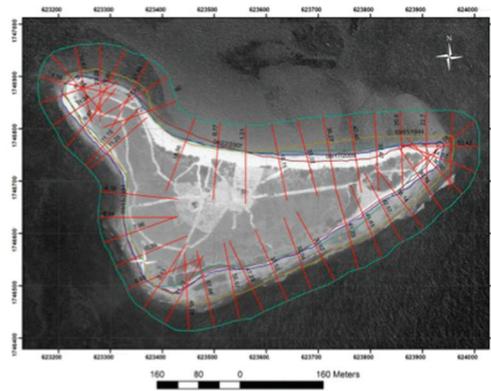


Figura 12. Cambio total de línea de costa. Observamos cómo son los valores por cada transepto. Fuente PEGCSAP.

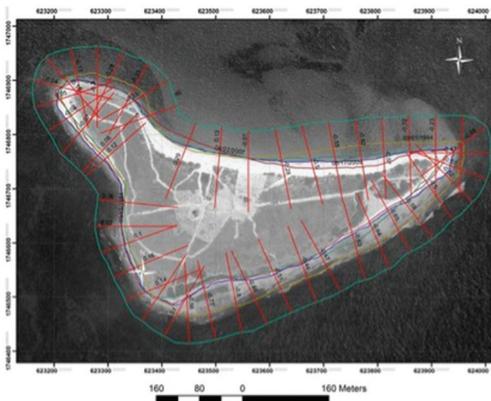


Figura 13. Tasa de cambio final. Observamos cómo son las tasas de cambio por cada transepto. Fuente PEGCSAP.

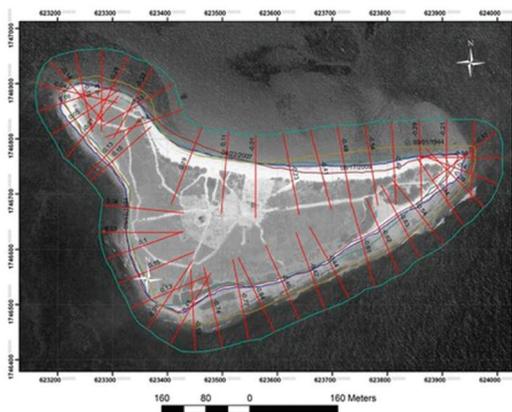


Figura 14. Taza regresión lineal. Observamos cómo son las tasas calculadas por regresión lineal en cada punto. Fuente PEGCSAP.

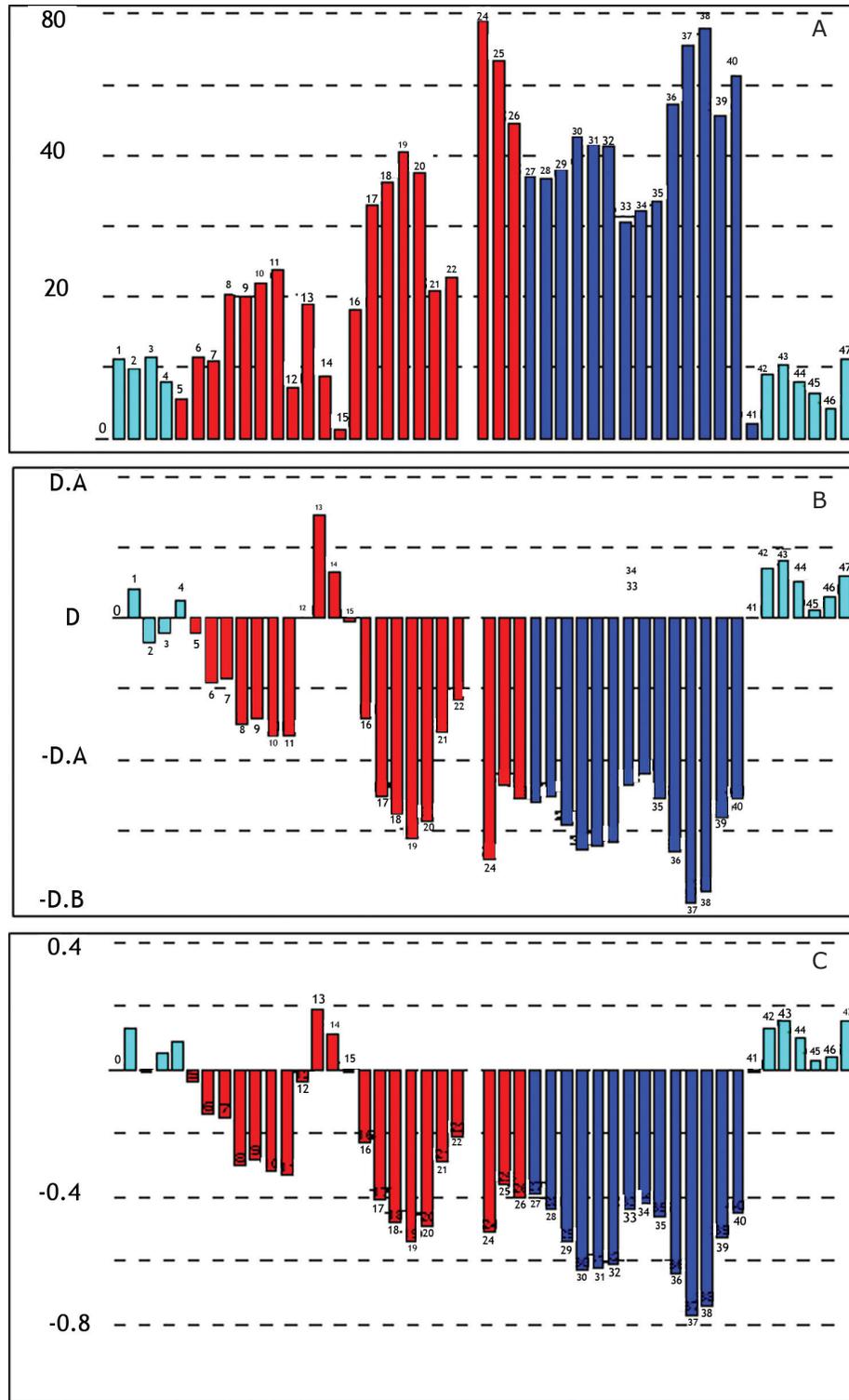


Figura 15. Comportamiento por playas. Cambio total de la línea de costa, (a.) tasa de cambio final (b.) y regresión lineal. (c.) Las barras rojas muestran el comportamiento en la playa norte, las azules en la playa sur y las cian en la playa oeste. Los números sobre las barras indican el transecto sobre el cual se hacen los cálculos. Fuente PEGCSAP.

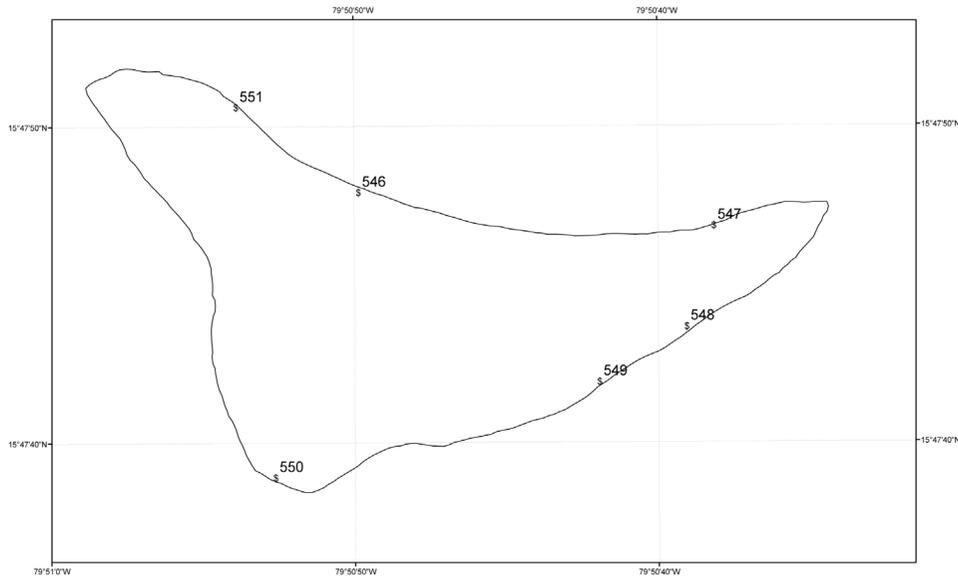


Figura 16. Ubicación de muestras de arena recolectadas por cada playa. La secuencia numérica parte de la georreferenciación del GPS.

la división de la muestra de sedimento en una serie de fracciones de tamaño, lo que permite una distribución de tamaño de grano que se construirá a partir del porcentaje de peso o el volumen de sedimentos en cada fracción de tamaño. En la figura 16 se pueden observar los puntos donde se tomaron muestras de arena, las cuales fueron secadas, tamizadas y pesadas en el laboratorio del CIOH, y sus resultados procesados por el programa GRADISTAT v7.

Para el sector de la playa norte se recolectaron las muestras número 546, 547 y 551, en estas, según el análisis, las muestras indican que el sedimento recogido es del tipo arena, haciéndose presente también, en muy poca proporción, grava en las muestra del sector central y oriental de esta playa. Para la playa sur la muestra 548 arrojó que esta es de tipo arena gruesa y la muestra 549 indicó que es del tipo arena gruesa con muy poca grava fina. Por último para la playa oeste se tomó una sola muestra en el sector sur de la misma, la cual se clasificó como grava de arena muy fina (figura 17).

DISCUSIÓN

Se observó una disminución en las dimensiones de perímetro y área del cayo durante el período de observación, 1944-2009, el cual muestra un incremento en la tendencia en el período entre 2007 y 2009.

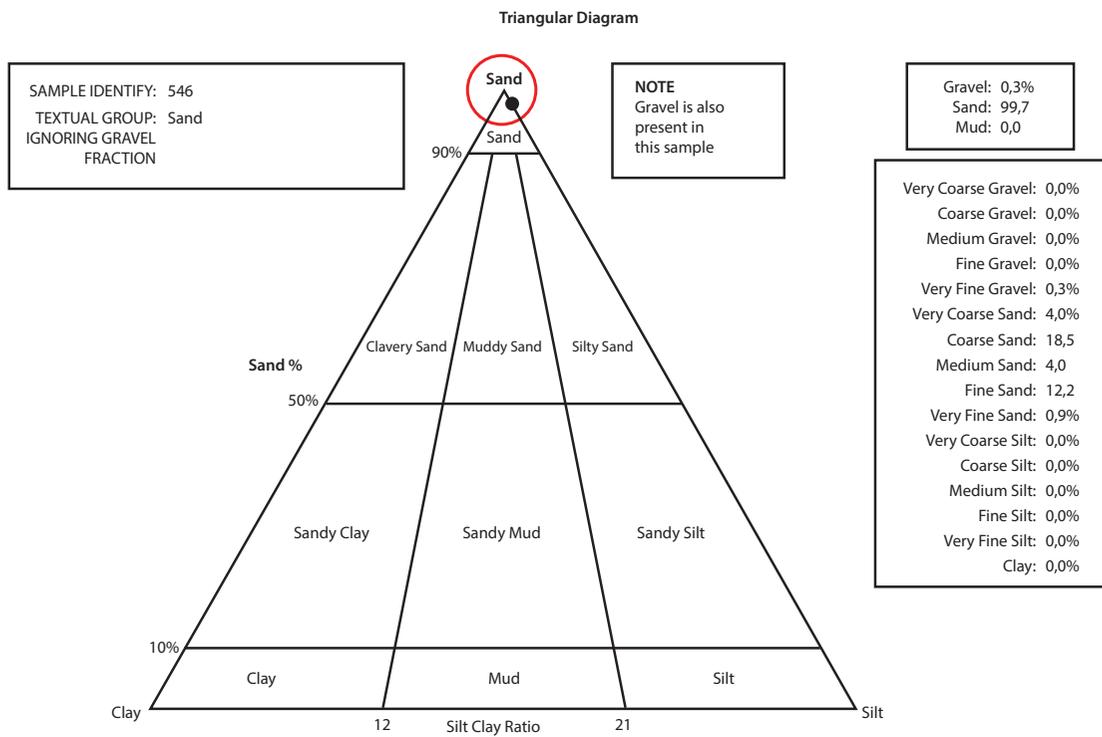
Es importante rescatar que el comportamiento observado de la configuración de la línea de costa muestra que la playa sur y el costado oriental de la playa norte se comportan como playas erosivas, mientras que el costado occidental de la playa norte se muestra como una playa en acreción, la playa oeste aparece como una playa más estable.

Dado que las líneas de costas están sujetas a un amplio rango de procesos, geológicos y morfológicos, efectos de los vientos, las olas, los cambios de nivel del mar, y las corrientes, en buena parte estos no pueden ser analizados por la ausencia de datos, esto se traduce en errores en la determinación de la línea de costa por eventos como mareas.

Debe existir una alta influencia derivada de fenómenos meteorológicos. Como la ZCIT (figura 6) y por la llegada del Sistema del Monzón Americano (el movimiento zonal de la estación lluviosa a lo largo del año) en los trópicos. Las líneas de 1984, 1944 y 2007 son producto de imágenes adquiridas en los meses de marzo y abril. Todas se incluyen dentro del mismo período seco donde predominan los vientos y, por ende, las condiciones de oleaje son más energéticas, mientras que los datos del 2009 fueron adquiridos en agosto en estación lluviosa.

El comportamiento de eventos ENSO (El Niño South Oscillation) para los años en los cuales contamos con datos debe tener una gran afec-

a.



b.

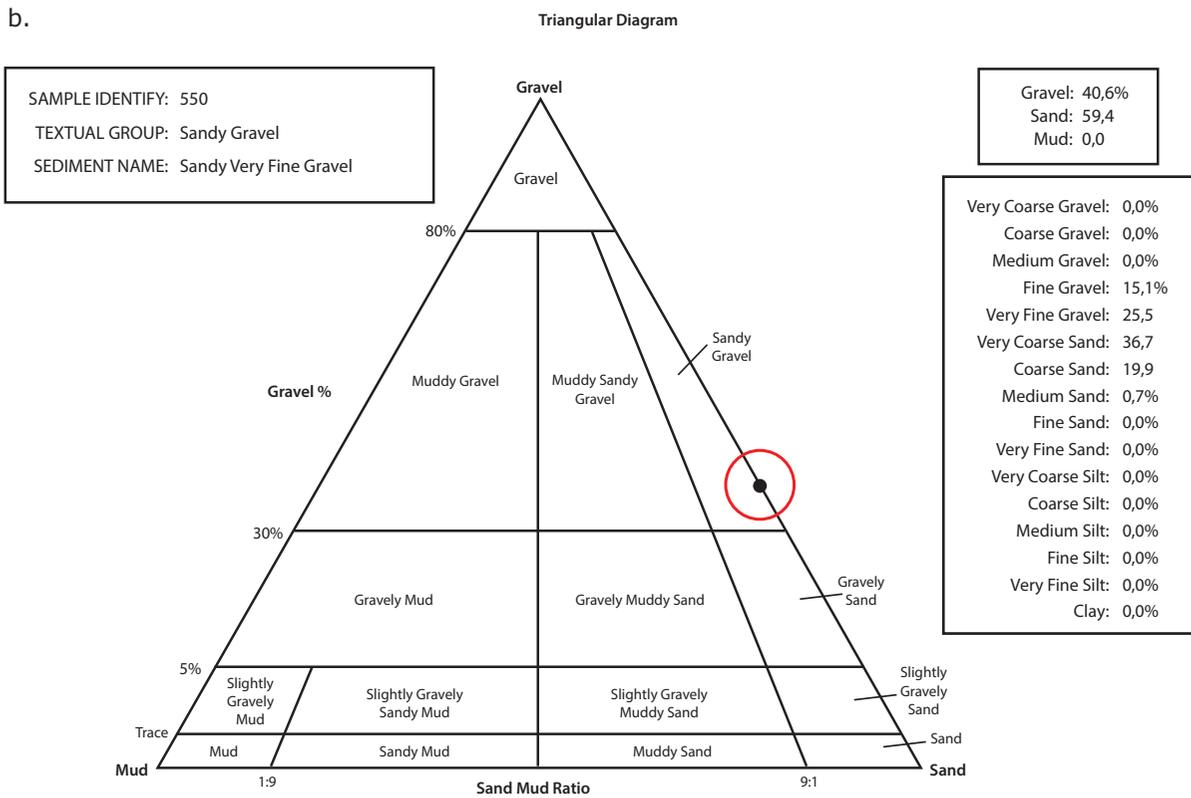


Figura 17. Triángulos de sedimentos. Diagramas triangulares de los sedimentos de las playas norte (a) y oeste, (b) arrojados por el programa GRADISTAT v7. Fuente PEGCSAP.

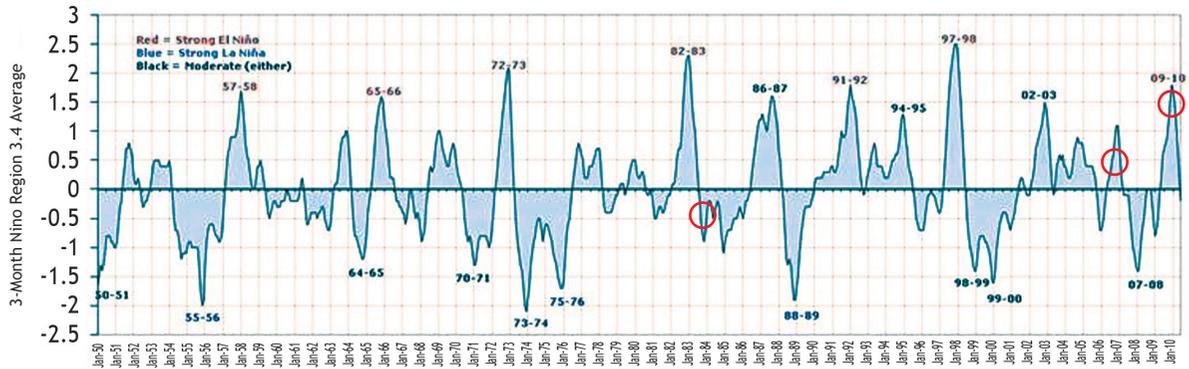


Figura 18. Índice Oceánico del fenómeno del Niño. Este nos muestra cómo para los años 1984 y 2007 los valores son muy pequeños (no Niño), mientras que en 2009 los valores del índice son mayores (Niño débil). Fuente: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.

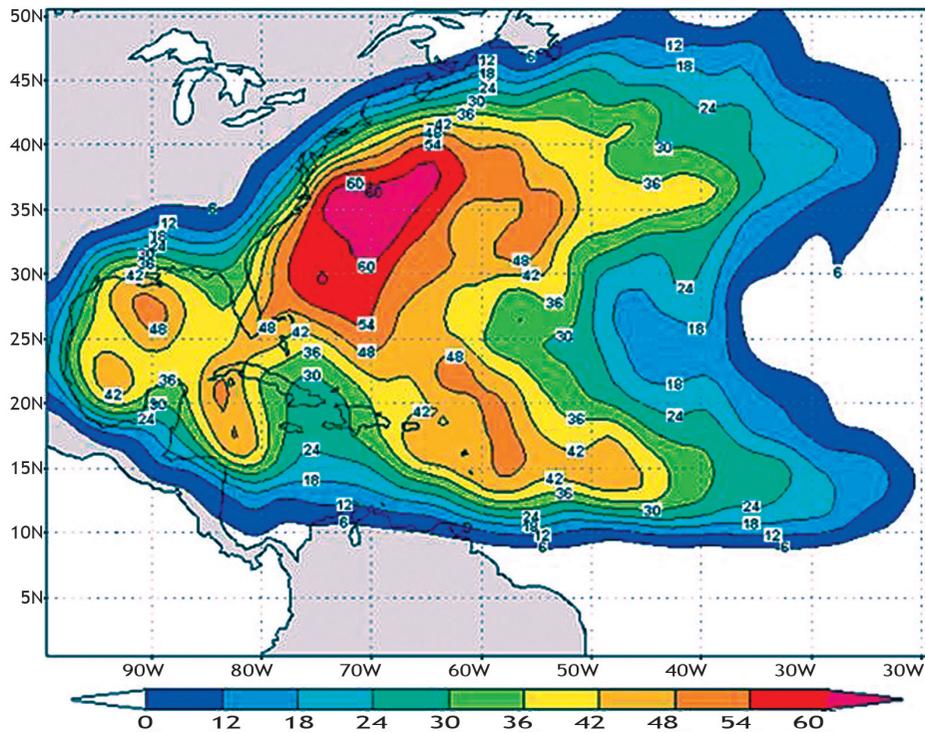


Figura 19. Probabilidad afectación por tormentas y huracanes. Esta imagen representa la probabilidad de que una tormenta tropical o huracán afecte la zona en algún momento durante la temporada de huracanes en el Atlántico (1 junio-30 noviembre). Con base en el análisis de los años 1944 a 1999 y cuando una tormenta o un huracán fue a menos de 100 millas (165 km) (Las cifras por Todd Kimberlain). Fuente http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/tropics/tc_atlclimo_pct.htm.

tación también. Según análisis de la NOAA ONI (Oceanic Niño Index) (figura 19) desde el año 1950 hasta el 2010, se ve como 1984 y 2007 se encuentran dentro del rango de normalidad y el año 2009 se manifiesta como un año Niño, mostrando un índice de 0.7 y 0.8 lo cual lo pone en el nivel de un evento niño débil. Esto significaría que las consecuencias podrían llevar a una variación en la posición de la ZCIT y, se reflejarían sobre la intensidad del viento, lo cual se hace muy difícil de estimar, debido que no se cuenta con datos precisos sobre las condiciones meteorológicas en el cayo, con buena resolución durante este período de 65 años.

La ubicación del Cayo de Serranilla lo hace altamente susceptible a los efectos de huracanes y tormentas tropicales, según estudio de la NOAA, se encuentra con una probabilidad de entre el 24% y 30% de recibir la influencia de estos, los cuales afectarían la conformación de la línea de costa.

Las tendencias obtenidas del comportamiento de las playas nos mostraron una permanente variación de la forma del cayo, mientras que las principales variaciones se han medido en la playa norte, las mayores tendencias de cambio se dan en la playa sur. La playa oeste se comporta como la de menor variación.

CONCLUSIONES

El estado morfodinámico del cayo en general está en constante variación dado que predominan en sus playas los estados intermedios. Esto indica que presentara una afectación por estacionalidad y por efecto de fenómenos meteorológicos; de ahí se desprende una alta influencia derivada de la posición de la ZCIT y, por la llegada del Sistema del Monzón Americano en los trópicos, el comportamiento de eventos ENSO (El Niño South Oscillation), así como también, los efectos de huracanes y tormentas tropicales.

Se observó una disminución en las dimensiones de 1944 metros de perímetro de 1.994 a 1.872 metros en el 2009 y el área del cayo pasó de tener 157.720 m² en 1944, a 125.650 m² en 2009, año en el cual hubo un incremento en la tendencia erosiva en el período entre 2007 y 2009.

Es importante rescatar que el comportamiento observado de la configuración de la línea de costa muestra que la playa sur y el costado oriental de

la playa norte se comportan como playas erosivas, mientras que el costado occidental de la playa norte se muestra como una playa en acreción, la playa oeste aparece como una playa más estable, esto debido a que según el estado morfodinámico entregado, se presenta como reflejante.

Dado que las líneas de costas se encuentran sujetas a un amplio rango de procesos, geológicos y morfológicos, efectos de los vientos, las olas, los cambios de nivel del mar, y las corrientes, en buena parte estos no pueden ser analizados por la ausencia de datos; esto se traduce en errores en la determinación de la línea de costa por eventos como mareas.

Las tendencias obtenidas del comportamiento de las playas nos mostraron una permanente variación de la forma del cayo, mientras que las principales variaciones se han medido en la playa norte, las mayores tendencias de cambio se dan en la playa sur; en contraste, la playa oeste se comporta como la de menor variación.

RECOMENDACIONES

Es necesario el incremento de toma de datos en cuanto a las condiciones del oleaje y la marea en esta zona del Caribe colombiano, con el fin de poder establecer con mayor precisión las condiciones reales, y así, medir su afectación en los procesos costeros.

Se recomienda estudiar la viabilidad de contar con una estación meteorológica que permita registrar las condiciones reinantes en esta zona del Caribe Colombiano.

Se recomienda considerar incluir en futuros estudios realizados con sensores remotos a Cayo Serranilla, con el fin de contar con datos de alta resolución de los niveles del cayo y, poder conocer con precisión su topografía.

Se recomienda la utilización de los datos de línea de costa obtenidos para el fin de este proyecto con el propósito de que sean validados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional, con el fin de que sean utilizados para la actualización de la cartografía pertinente.

Se deben considerar proyectos de estabilización geomorfológica del cayo, ya que se observó en las comparaciones del área emergida del mis-

mo una importante disminución en el período de 65 años.

Se deben continuar efectuando cruceros oceanográficos orientados a obtener, con equipos de alta precisión batimetrías de alta resolución que permitan que los productos arrojados de modelación sean de la mayor precisión.

Se recomienda el aprovechamiento de plataformas de la FAC y ARC, con el fin de obtener productos de alta resolución que posteriormente puedan acompañar los resultados productos de este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Sr. Capitán de Navío Walter Asdrúbal Villegas Gonzales, Comandante del ARC Independiente, a los oficiales y tripulación que nos colaboró significativamente durante el trabajo de campo.

Este trabajo se desarrolló dentro de la Línea Oceanografía Costera, como parte del "Proyecto de Estabilización Geomorfológica de los Cayos del Archipiélago de San Andrés y Providencia, que recibió financiación de la Armada Nacional, la Escuela Naval ALMIRANTE PADILLA y de Ciencias, Código 1126-425-20164.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INVEMAR. (2003). Programa Holandés de asistencia para Estudios en Cambio Climático: Colombia. Informe Técnico No. 2 Inventario y caracterización. Santa Marta: INVEMAR.
- [2] MOLARES, R. (diciembre de 2004). Aspectos oceanográficos de las aguas sobre la Depresión Providencia en mayo 2004. Boletín Científico CIOH (22), 11-25. Cartagena de Indias, Colombia.
- [3] CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS. (31 de diciembre de 1999). Punto Geodésico Faro Serranilla. Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia.
- [4] ANDRADE AMAYA, C. A. (diciembre de 1996). Nota sobre circulación de las Aguas en Bajo Alicia y el sector de San Andrés Islas. Boletín Científico CIOH, 17. Cartagena, Colombia.
- [5] CORREA CANO, M., VALDERRAMA BARCO, J., & MONTES VIERA, S. (1999). Archipiélagos del Caribe Colombiano. Cali: Banco de Occidente.
- [6] KJERFVE, B. (1981). Tides of the Caribbean sea. Journal of Geophysical Research , 86 , 4243-4247.
- [7] MOLARES B, R. (s.f.). Clasificación e identificación de las componentes de marea en el Caribe colombiano. Cartagena: CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS.
- [8] ANDRADE C. A. (02 de Febrero de 2000). Circulación y Variabilidad de la Cuenca de Colombia en el Mar Caribe. Cardiff, Gales, Inglaterra: Universidad de Gales.
- [9] TORRES PARRA, R. R. (2006). Variación del nivel medio del mar en el Caribe Colombiano. Boletín Científico CIOH (24) , 64-72. Cartagena de Indias: CIOH.
- [10] ANDRADE, C.A., Cambios recientes del nivel del mar en Colombia, en: Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global, J.D. Restrepo (editor), ISBN 978-958-720-020-1, Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS, pp. 101-121, 2008.
- [11] PARSONS, J. (1985). San Andrés y Providencia una geografía histórica de las islas colombianas del Caribe. Ancora editores. 20-21.
- [12] COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. (1998). "Engineering and Design – Coastal Engineering Manual, Part III (Chapters 2: Longshore Sediment Transport , 3: Cross-shore Sediment Transport Processes)". Department of the Army,U.S. Army Corps of Engineers (nº EC 1110-2-292).
- [13] SHALLOWITZ, A. (1964). Shoreline and sea boundaries (Vol. VI). Washington D.C: Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey.