



**CIOH**  
www.cioh.org.co

**ARTÍCULO**

## Variación de la línea de costa en Cayo Serrana y estrategias para su conservación ante las amenazas de origen natural

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

**José Andrés DÍAZ RUÍZ**, andresdipt@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

Con el propósito de definir y cuantificar la variación de la línea de costa los últimos 25 años en Cayo Serrana, se compararon sus líneas de costa de 1984, 2007 y 2009 respectivamente; a partir del análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas, evidenciando un aumento de la cobertura terrestre del cayo, y un avance neto de las playas hacia el este y el nor-este, permitiendo identificar una marcada erosión en la playa oeste, acrecimiento en el norte y poca variabilidad en la franja este.

**Palabras claves:** Línea de costa, cayo.

### ABSTRACT

The coastline of Serrana Cay of 1984, 2007 and 2009 extracted from available satellite images and aerial photography were compared with the purpose of defining and quantify its variation, showing an increase land cover of the Cay and a net advance of the beaches to the east and the north-east, allowing to identify a marked erosion of the beach west, accretion in the north and little variability in the east.

**Key words:** Coastline, Cay.

## INTRODUCCIÓN

Cayo Serrana hace parte del conjunto de cayos del norte del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Colombia). Se encuentra ubicado al occidente de la región del "Gran Caribe" y se localiza específicamente entre las latitudes 14.2896° N y 14.2841° N y las longitudes 80.3597° W y 80.3688° W, a una distancia de 365 millas náuticas (NM) de la costa continental colombiana, a 165 NM. de la costa nicaragüense, a 80 NM. de la Isla de Providencia, y a 130 NM de la Isla de San Andrés.

Para la evaluación de sus cambios se utilizó como herramienta la comparación de imágenes satelitales, fotografías aéreas y digitales disponibles de Serrana, pues estas permiten comprender la dinámica y evolución costera, gracias en parte, a la alta resolución que ofrecen. La toma de estas mismas imágenes en distintas fechas [1], constituyen una de las aplicaciones más valiosas en la valoración de dinámica litoral.

El estudio describió la configuración y evolución de la línea de costa, definiendo los tipos de línea de costa característica del cayo, mencionando los factores naturales que influyen en el modelamiento costero. Se evaluaron los perfiles de acreción y erosión que determinaron la tasa de erosión en sectores específicos. Se calcularon las áreas y perímetros del cayo, que permitieron cuantificar las porciones emergidas de acuerdo a las líneas de costa obtenidas. Se obtuvo además la topografía del cayo, basado en la fotointerpretación de imágenes aéreas oblicuas, sumados a los perfiles topográficos medidos, que está ligado a la dinámica que modela las alturas del cayo.

Finalmente, se plantean algunas estrategias para la conservación del cayo ante las amenazas naturales que enfrenta, tomando como base la pérdida de arena como el factor más preocupante de los efectos meteorológicos y oceanográficos en el mismo.

El área de estudio corresponde a una zona de alto valor geoestratégico para los intereses de la Nación por su ubicación geográfica y la riqueza de los recursos naturales inmersos en ella. De ahí la importancia de garantizar por lo menos desde el punto de vista oceanográfico, la facilitación de la mejor toma de decisiones, para la preservación, no solamente de este, sino de todo el conjunto de cayos que conforman el Archipiélago de San Andrés y Providencia.

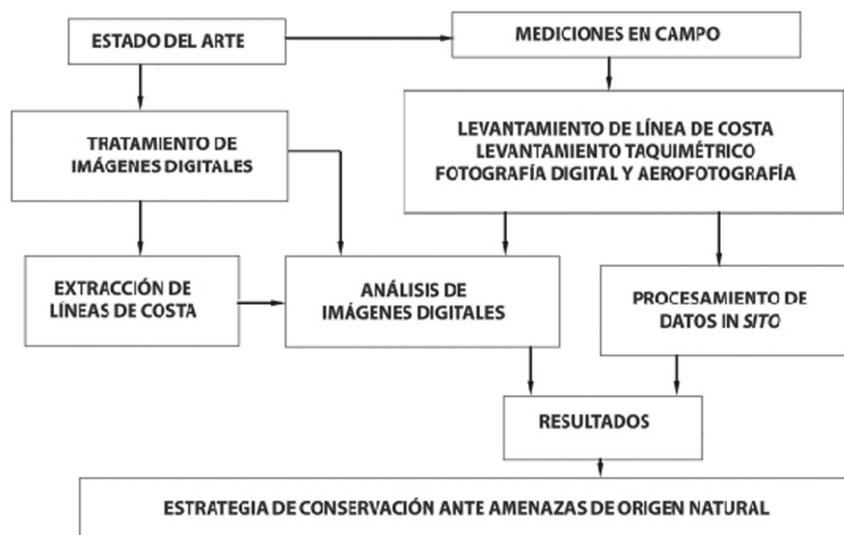
## MÉTODOS

En la figura 1 se puede observar un diagrama con la metodología aplicada de este estudio. Para el trazado de la línea de costa de 1984, se utilizó la copia de una fotografía aérea vertical del atolón perteneciente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, tomada el 20 de marzo de ese año. La imagen inicialmente fue digitalizada y georeferenciada en coordenadas planas (UTM), con el programa ARCGIS 9.2, a través de diferentes puntos comunes respecto de las imágenes satelitales IKONOS-2 de 2007; Posteriormente, se procedió a efectuar una clasificación no supervisada con el programa ERDAS IMAGINE 8.5 [2], la cual permitió entregar una imagen con una señal de radiancia favorable del límite tierra-agua, para el trazado y digitalización de la línea de costa. A su vez, se efectuó un tratamiento con el mismo software, basado en la aplicación de diferentes filtros raster a la imagen ya tratada.

En la obtención y trazado de la línea de costa del año 2007, se utilizó una imagen del satélite IKONOS-2 pancromática, tomada el 18 de julio de 2007, previamente georeferenciada en coordenadas geográficas y proyectadas a coordenadas planas (UTM). Se efectuaron posteriormente, los dos procedimientos utilizados en la obtención de la línea de costa de 1984. Por último, se digitalizó la línea de costa de acuerdo con la imagen obtenida en ARCGIS 9.2. La cobertura de nubes sobre el cayo y algunos de sus alrededores afectó —en parte— la obtención de la línea de costa con clasificación no supervisada, mientras que el tratamiento con filtros, para este caso, fue mucho más confiable y preciso.

La línea de costa del año 2009 fue obtenida a partir del levantamiento efectuado durante el trabajo de campo en agosto de 2009, con GPS y antena diferencial marca TOPCON modelo 7020, bordeando los límites de pleamar del cayo. Posteriormente, se digitalizó de nuevo en ARCGIS 9.2, cambiando los puntos entregados por el GPS diferencial por líneas, para estandarizar las tres líneas de costa finales obtenidas.

En la determinación de los perfiles de acreción y erosión alrededor del cayo, se utilizó una extensión del software ARGIS 9.2, conocida como DSAS, por sus siglas en inglés (Digital Shorelines Analysis System) [3], el cual se configuró y predeterminó para obtener una distancia media por perfil de 50 metros, arrojando como resultado automáticamente 62 perfiles y dos columnas



**Figura 1.** Metodología aplicada en el estudio.

de tasa de punto final EPR (por sus siglas en inglés, end-point-rate), correspondientes a la rata de erosión o acreción final entre la línea de costa conocida más vieja y la más reciente, es decir, entre la línea de costa de 1984 y la de 2009, así como también, entre las dos más recientes, 2007 y 2009.

Fueron eliminados 5 perfiles en razón a que por la forma de la línea de costa entre los diferentes años, estos perfiles no eran perpendiculares. El porcentaje de confianza ingresado para el cálculo respectivo del software fue de 90%, es decir, que cada uno de los valores puede tener un margen de error de más o menos 0.1 mts.

El cálculo de los perímetros respectivos, al igual que el área total del cayo para los años analizados de cada línea de costa, se efectuó en ARCGIS 9.2, transformando las respectivas líneas, de multilíneas a polígonos, obteniendo cálculos automáticos de acuerdo con los polígonos correspondientes de área total de cada año.

También se efectuó una estimación de la topografía del cayo mediante la fotointerpretación de imágenes tomadas desde una plataforma aérea durante 2009, sumado al análisis de perfiles topográficos y mosaicos elaborados con fotografías digitales tomadas tanto en tierra como aire. Finalmente, se efectuó una grilla en ARCGIS 9.2 utilizando el método de interpolación Kriging y

se calcularon las principales modificaciones antrópicas, (la longitud total de los caminos dentro del cayo).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### CONFIGURACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

#### CLASIFICACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

La línea de costa de Cayo Serrana, de acuerdo a su composición, se encuentra definida en dos tipos específicos: Playa y Terrazas Pleistocénicas [4]. Allí se presentan playas de arena blanca de características similares a las de todo el conjunto de cayos e islas del Archipiélago de San Andrés y Providencia; principalmente arenas de tipo biot detrítico, producto de la erosión de los arrecifes coralinos y restos de organismos marinos como moluscos y macroalgas calcáreas [5].

La línea de costa medida, en agosto de 2009 tenía una longitud total 1.661 metros. (Línea roja de la figura 2). Para el caso de línea de costa con terrazas Pleistocénicas, se observan de manera continua en dos zonas bien demarcadas. La primera, corresponde a casi toda la franja este (línea negra de la figura 2), con un relieve plano que bordea la playa y que se encuentra bien conservado. La segunda, bordea toda la punta



**Figura 2.** Línea de costa de Cayo Serrana clasificada de acuerdo a su composición, en agosto de 2009.

sur-oeste del cayo (figura 5), Durante agosto de 2009 ambas zonas se encontraron bien drenadas, y especialmente en la segunda, se observaron abundantes fragmentos de calizas en superficie, producto de la erosión de las mismas debido al oleaje predominante. Las terrazas que conforman la línea de costa de la franja este, alcanzaron una longitud de 590 metros, mientras que las que bordean la punta sur-oeste alcanzaron 370 metros de longitud. Juntas sumaron 960 metros.

De acuerdo con su comportamiento, para la línea de costa más reciente se utilizaron los criterios de INGEOMINAS, [6] determinando las siguientes:

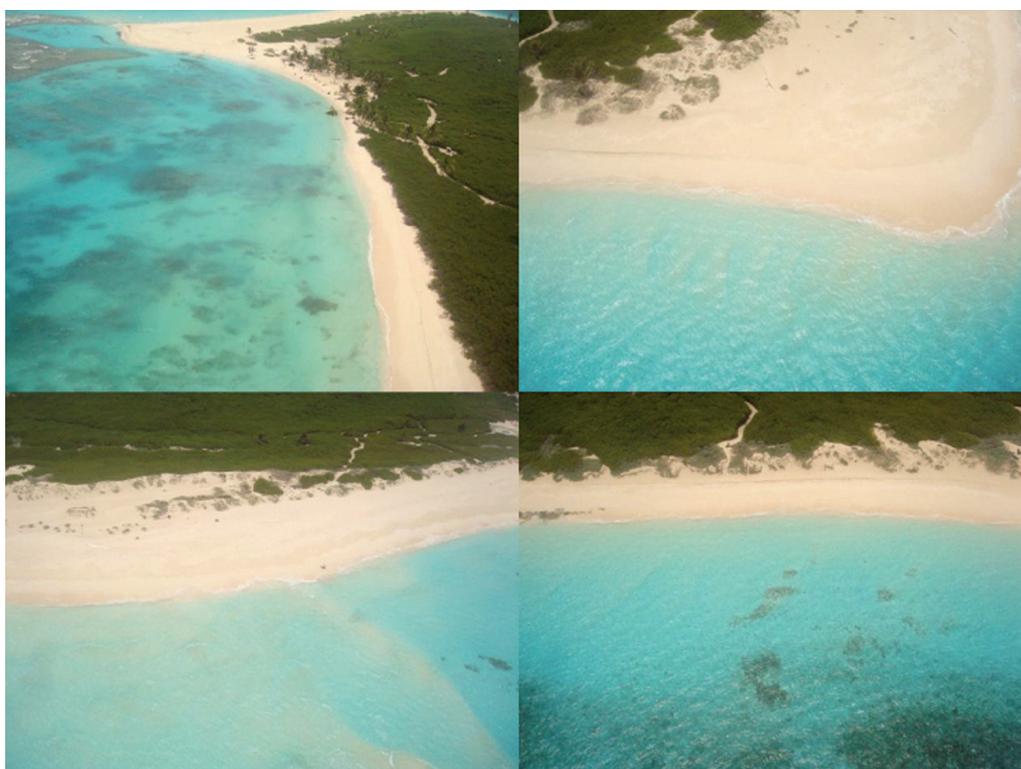
- Erosión en la mayor parte de la playa oeste del cayo (figura 3), al igual que la playa que se encuentra entre la punta sur-este y la punta sur, adyacente al inicio de la rompiente de arrecife, y así mismo, en la playa nor-este hasta el comienzo de la línea de costa con terrazas pleistocénicas (figuras 3 y 4).
- Acrecimiento en toda la playa norte del cayo y una línea de costa poco variable, y las conformadas con terrazas pleistocénicas ubicadas en la punta sur-oeste y en casi la totalidad de la franja este del cayo (figura 4).

### **FACTORES NATURALES QUE INFLUYEN EN EL MODELAMIENTO COSTERO DE SERRANA**

Por su ubicación geográfica, Serrana es un cayo muy vulnerable, especialmente a fenómenos meteorológicos de escala sinóptica e intraestacional, que permiten el desarrollo de considerables y fuertes oleajes que afectan de forma significativa la configuración de su línea de costa.

El cayo está sujeto con frecuencia a la acción de los frentes fríos que viajan hacia el este originados en Norteamérica y que invaden el Caribe en general con periodos de 10-14 días. Estos son especialmente fuertes durante el invierno boreal [7]. También se encuentra sujeto a la acción de las ondas del este de siete días, que dominan el campo de presión de todo el Caribe y que lo afectan con frecuentes tormentas esporádicas con vientos fuertes del oeste y nor-oeste en la segunda mitad del año, precisamente por corresponder este periodo a la temporada de huracanes del Atlántico.

La interacción entre estas dos oscilaciones afecta el campo de velocidad, y subsecuentemente, produce efectos en la precipitación y el estrés del viento en el área [7], que a su vez genera mar de leva, que altera la línea de costa.



**Figura 3.** Fotografías aéreas de las playas de cayo Serrana. Superior izquierda, playa oeste. Superior derecha, punta nor-oeste. Inferior izquierda, playa norte. Inferior derecha, playa nor-oeste.

### PERFILES DE ACRECIÓN Y EROSIÓN

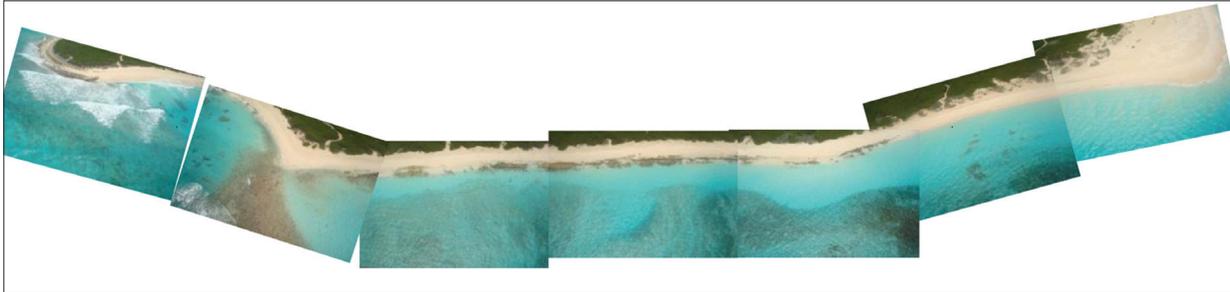
Los perfiles efectuados en el centro-nor-oeste de la isla se observan en la figura 6 y sus valores corresponden a los números 46 al 53 en la tabla 1. Estos datos en promedio, desde 1984 a 2009, muestran una rata de erosión de 1.845 m/año, siendo la más alta la que corresponde al perfil 52 con 2.65 m/año. Entre 2007 y 2009 hubo una rata de erosión promedio de 1.13 m/año, siendo la más alta la del perfil 51 con 3.85 m/año, lo cual evidencia que en estos últimos dos años el proceso erosivo, en este sector específico, ha sido menos intenso con respecto al cálculo de los últimos 23 años. Nótese que la zona más vulnerable a la erosión, de acuerdo al cálculo en todo este costado, se ubica específicamente entre los perfiles 50 y 52, con los valores de erosión más altos.

De acuerdo a los resultados anteriores, se puede evidenciar que la playa en este sector se ve expuesta a fuertes procesos dinámicos litorales, producto de fenómenos meteorológicos intraestacionales y de escala sinóptica que generan oleajes como los ya descritos anteriormente;

estos procesos permiten la traslación de considerables volúmenes de arena en el entorno. Sumado a esto, y debido a que su constitución es exclusivamente de arena, la playa se moldea con facilidad, permitiendo su degradación o erosión.

Se observó que los sedimentos son transportados por acción del oleaje, especialmente cuando vienen del oeste, producto de los efectos de los frentes fríos que arriban de Norteamérica, y de las ondas del este que afectan el campo de presión, facilitan un aumento en la intensidad y un cambio en la dirección del viento y por ende, del oleaje, tal como se explicó anteriormente. La deriva litoral y las corrientes de resaca se orientan hacia las planicies de arena sumergidas en los alrededores de la playa, y otra parte considerable, hacia la playa norte de la isla, convirtiéndose esta última, en una zona de permanente acreción y erosión alternativa.

Esto explica las altas diferencias y la poca coherencia entre los perfiles de acreción y erosión del 54 al 62 y de número 1 al 6 que corresponden a toda la playa norte del cayo que, sumados



**Figura 4.** Fotomosaico aéreo de la línea de costa Este de Cayo Serrana.



**Figura 5.** Fotografías de la línea de costa con terrazas pleistocenas en la punta Sur-Oeste de Cayo Serrana.

**Tabla 1.** Rata de acreción o erosión según sea el caso por perfil.

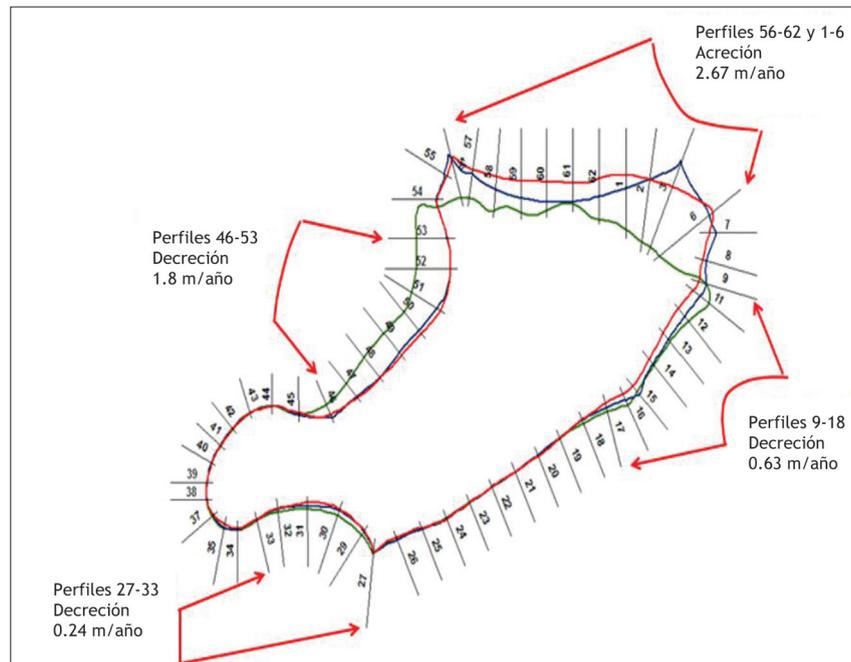
De 1984 a 2009		De 1984 a 2009		De 2007 a 2009		De 2007 a 2009	
TransectId	EPR	TransectId	EPR	TransectId	EPR	TransectId	EPR
1	3.26	34	-0.11	1	-9.447968489	34	1.525405827
2	3.76	35	-0.26	2	0.401073586	35	2.453342970
3	3.99	37	-0.14	3	19.775250100	37	0.553510522
6	4.84	38	-0.02	6	-4.166418863	38	-0.034978506
7	-5.93	39	0.02	7	5.932964299	39	0.086646004
8	-3.60	40	0.02	8	3.607765524	40	0.599093076
9	-0.59	41	0.03	9	7.493143065	41	0.312157851
11	-1.43	42	0.05	11	7.853531300	42	0.274346860
12	-1.10	43	0.00	12	8.227513167	43	0.572859785
13	-0.71	44	-0.03	13	6.780104229	44	-0.068234085
14	-0.51	45	0.08	14	4.789488784	45	-1.443829397
15	-0.47	46	-0.67	15	8.577830779	46	-2.736559558
16	-0.76	47	-1.20	16	5.188554779	47	0.955232845
17	-0.53	48	-1.74	17	3.206756463	48	0.703183258
18	-0.25	49	-1.86	18	0.611490322	49	2.567498094
19	-0.03	50	-1.87	19	0.091432549	50	3.270729815
20	0.06	51	-2.42	20	-0.639641131	51	3.857031650
21	-0.01	52	-2.65	21	0.215248390	52	0.257516401
22	-0.04	53	-2.35	22	0.166848599	53	0.172130821
23	0.01	54	-0.57	23	0.406071607	54	0.566602918
24	0.09	55	-2.24	24	-0.110414451	55	2.245717228
25	0.00	56	2.37	25	0.667219356	56	1.436303334
26	0.03	57	1.74	26	1.694845806	57	-3.235996083
27	0.00	58	2.05	27	0.426199312	58	-9.429036123
29	-0.35	59	1.91	29	0.884646400	59	-12.140408290
30	-0.42	60	1.71	30	1.019130483	60	-14.302182000
31	-0.38	61	1.24	31	2.239410303	61	-13.528046100
32	-0.22	62	2.49	32	0.581527896	62	-13.271461920
33	-0.08			33	0.216593387		

los resultados de acreción y erosión en promedio, muestran una rata de acreción desde 1984 a 2009 de 2.67 m/año, siendo los valores más altos los correspondiente a los perfiles 3 y 6, con valores de 4 m/año y 4.84m/año, respectivamente. No se tuvieron en cuenta los valores de los perfiles 54 – 55 y 7 – 8 debido a que en 1984 no existía playa en los perfiles mencionados.

Entre 2007 y 2009 la conformación de la línea de costa de ambos años para la zona comprendida

en estos perfiles fue muy similar. Entre los perfiles 55 y 56 se observó un desplazamiento de la línea costera de alrededor siete metros hacia el este y entre los perfiles 7 y 8 un desplazamiento de la línea de costa de 12 metros hacia el oeste. La conformación de toda la línea de costa de la zona norte del cayo corresponde a playa.

Entre los perfiles 9 al 18 se estimó una erosión promedio de 0.63 m/año, a pesar de que la configuración de la línea de costa sea diferente



**Figura 6.** Perfiles de acreción y erosión. La línea verde corresponde a la línea de costa de 1984, la azul a 2007 y, la roja a la del año 2009.

a partir del perfil 14, encontrando ya terrazas pleistocénicas allí. La acción del oleaje, predominante del este-nor-este, produce un transporte de sedimentos que favorece la acreción de parte de la playa norte y otra que se deposita en las dunas costeras a los largo del sector, y que por el contrario, facilita el retroceso de la línea de costa de forma leve.

Entre los perfiles del 18 al 27, se evidenció una línea de costa muy poco variable, y cuyos pequeños cambios obedecerían a variaciones de tipo estacional. Los valores promedio arrojados de la suma de estos perfiles, muestran una alta coherencia, encontrando una tasa de erosión total de 0.02 m/año que muestra una línea de costa estable tanto en el corto, como en el mediano plazo. Estos perfiles se encuentran ubicados dentro la laguna arrecifal, que la protege de la fuerte acción de oleaje que viene de los trenes de olas del este.

Los perfiles 27 a 33, corresponden a la playa sur del cayo, conformada exclusivamente por arena, pero ya por fuera de la laguna arrecifal, sin protección de la barrera coralina, que en promedio muestran una tasa de erosión leve de 0.24 m/año.

De acuerdo con los valores de los perfiles 34 a 45, se evidencia una línea de costa bastante estable, al encontrar una tasa de erosión promedio de 0.032 m/ año. El resultado de este valor se podría explicar por la configuración de esta línea de costa, que también corresponde a terrazas pleistocénicas erosionadas, principalmente en combinación con arena, que la hace bastante resistente frente a la acción del oleaje, y por ende, difícil de modificar. Su muy poca modificación obedecería también, a una variación de tipo estacional. La pequeña franja de línea de costa de 2009, entre los perfiles 34 y 37, que es la que presentó mayor cambio por un fuerte oleaje reciente que precedió a la visita al cayo en agosto de 2009.

#### CÁLCULO DE ÁREAS Y PERÍMETROS

Se efectuó un cálculo de los perímetros respectivos de cada línea de costa analizada, al igual que el área total del cayo, por los años analizados de cada línea de costa, obteniendo los siguientes resultados:

De acuerdo con la tabla 2, la cobertura total de tierra emergida del cayo principal del Banco

**Tabla 2.** Cálculo de áreas y perímetros de cada año de línea de costa analizada.

Año	Área total (m <sup>2</sup> )	Perímetro total
1984	260972.54	2457.26
2007	268748.48	2697.40
2009	268154.93	2620.82

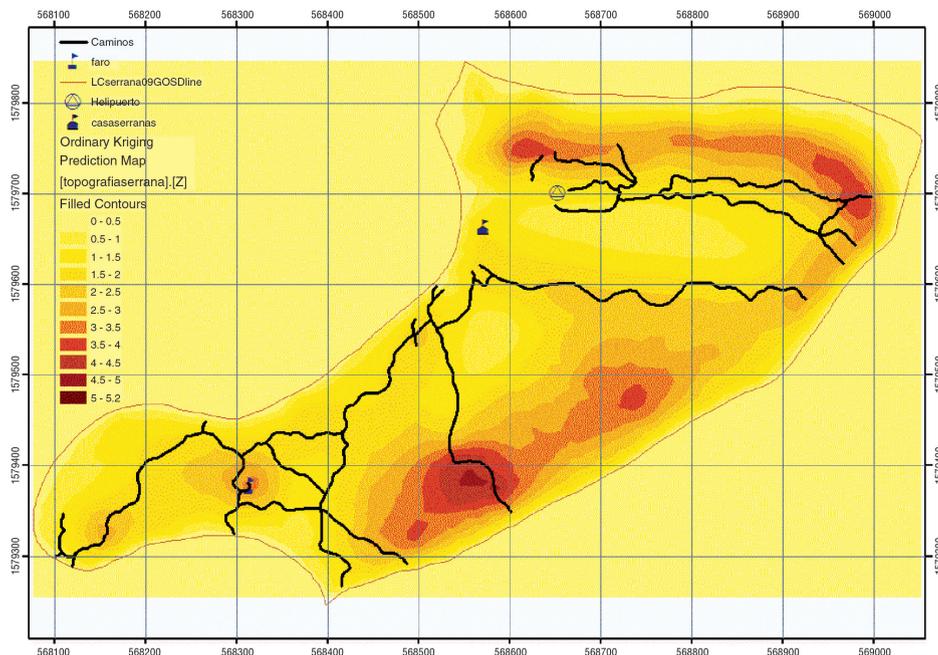
de Serrana, entre 2007 y 2009, prácticamente se ha mantenido estable. La mínima diferencia de 593 m<sup>2</sup> corresponde a un porcentaje de tan solo 0.22% y podría obedecer a los márgenes de error en la medida de las líneas de costa obtenidas; también podría justificarse en una variación de tipo interanual, ya que las fechas de toma de la imagen de 2007 y el levantamiento de la línea de costa de 2009, corresponden a un mismo periodo con una diferencia de 29 días únicamente, por lo tanto, se puede considerar que existió un equilibrio de transporte de sedimentos entre estos años.

Al hacer una evaluación del cambio del área del cayo en los 23 años transcurridos entre 1984 y 2007, la situación es distinta, encontrando un aumento de 7.776 mts<sup>2</sup>. Esto corresponde a un porcentaje de aumento del 2.9%.

### TOPOGRAFÍA

De acuerdo con la información y la evidencia física recolectada en los trabajos de campo de agosto de 2009 [8], Cayo Serrana posee las mayores alturas de todos los cayos que hacen parte del Archipiélago de San Andrés y Providencia, encontrando alturas sobre el nivel medio del mar que no sobrepasan los seis metros.

Presenta mayores alturas en toda la franja norte, este y sureste, que corresponden a las dunas costeras (figura 7). Allí se presentan alturas medias de 3.5 metros y máximos entre 5 y 6 metros. Las diferencias de altura se pueden explicar en razón a que los vientos predominantes en la zona (alisios del norte), llegan durante casi todo el año viajando del nor-este y desplazan una cantidad importante de arena suspendida en



**Figura 7.** Topografía de Cayo Serrana con sus puntos más característicos.

el aire; ésta a su vez, fragmenta el arrecife en este sector, permitiendo que pequeñas partículas fraccionadas, producto de la fuerte rotura de la ola que al chocar bruscamente con la rompiente de arrecife, queden fuera del agua y terminen atrapadas, por acción del viento, en las dunas de arena. Se puede afirmar entonces, que el viento predominante, en este caso, es un factor importante en la configuración topográfica del cayo en toda la zona este y norte del mismo.

Las zonas por debajo del metro de altura corresponden, en su mayoría, a las primeras márgenes de playa alrededor de todo el cayo, y a partir de allí, inicia un aumento progresivo, especialmente en todo el margen este y oeste de la isla. Se observaron dos zonas muy marcadas de bajas alturas diferentes a las playas, que no superan el metro (ver figuras 7 y 8); estas zonas van disminuyendo progresivamente, justo detrás de las dunas costeras de las playas del norte – nor-este y este – sur-este del cayo.

En la zona oeste se encuentran alturas muy homogéneas que rodean los dos metros de altura y se extienden hasta la mitad del cayo y hacia el centro del mismo. Esta zona se ubica justo al norte del faro de la isla, hasta donde termina una espesa vegetación, aproximadamente a 130 metros al sur-oeste del alojamiento del personal del Puesto Naval Avanzado de la Armada Nacional (PNA), sobre todo el borde de la línea de cobertura de vegetación.

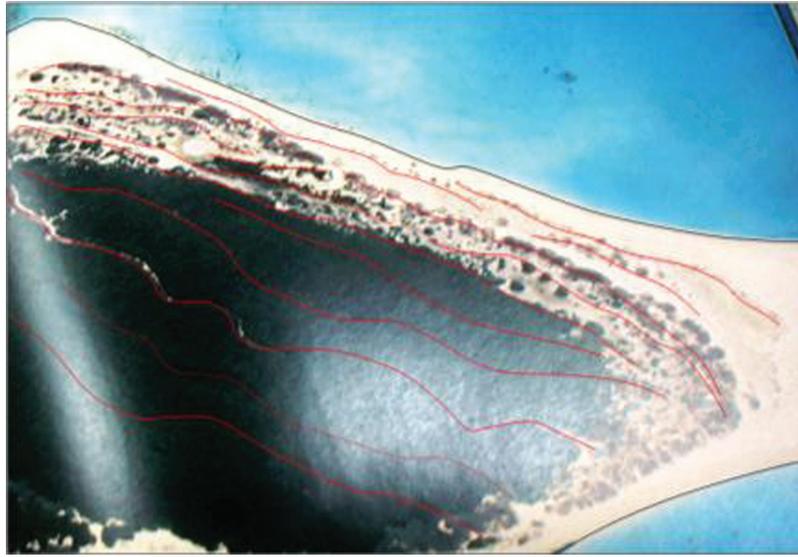
Analizando la línea de costa desde imágenes aéreas, se puede observar que el cayo tiene, sobre todo, dos grandes acumulaciones de arena al norte y al nor-este y, estas acumulaciones están rodeadas por terrazas arrecifales de corales vivos (figura 9).

Estos arrecifes se pueden observar alrededor de la isla, porque sobresalen de las capas de arena que están "atrapando" y se acercan a la superficie interactuando con el oleaje (figura 10). De esta forma, tanto la rompiente que rodea el cayo por el sur, como los bajos fondos arrecifales que lo rodean, son los que están dando forma a las playas de arena de Serrana.

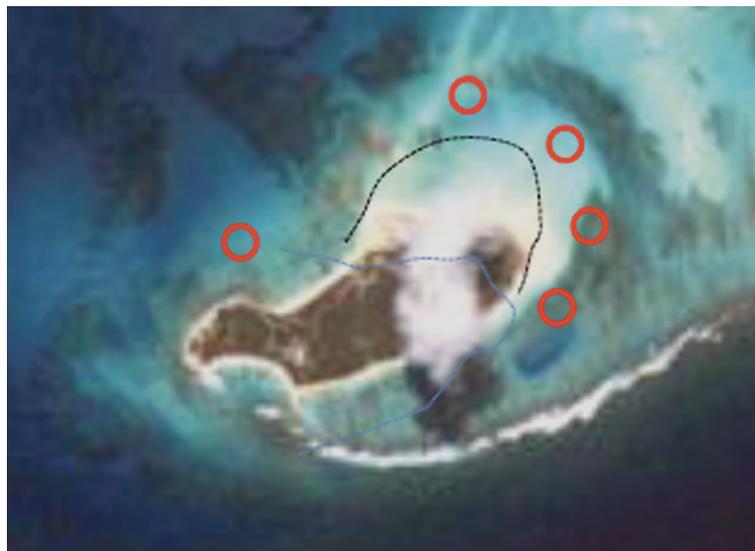
Una interpretación del sistema de la deriva litoral presente en el cayo se muestra en la figura 11. Las puntas que abruptamente cambian el sentido de la línea de costa del cayo marcan un sentido de la dinámica del oleaje, de tal forma, que puede "inferirse" dónde están los focos que generan la difracción y consecuente proceso litoral que modela las playas. Como se puede observar, por la forma se advierte que son los arrecifes en frente de estas, los que están modificando la playa, y que el efecto neto de esta interacción es el de un avance de las playas de Serrana hacia el este y el noreste, desde hace varias décadas, a juzgar por la serie de dunas que crecen en el frente de esta playa (figura 9).



**Figura 8.** Fotografía aérea de Cayo Serrana vista desde el nor-este, donde se puede apreciar la topografía del cayo.



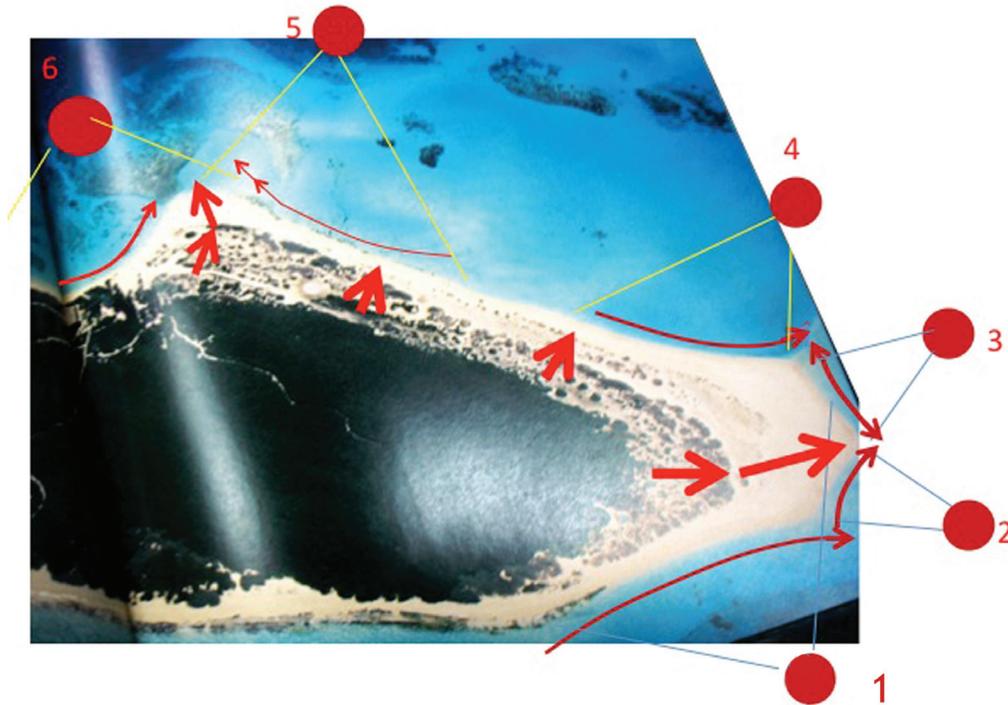
**Figura 9.** El crecimiento de Cayo Serrana viene en sentido nor-este desde hace muchos años, como se puede observar en la posición de las dunas que se encuentran fijas por la vegetación y las más recientes con poca vegetación. Tomado de: El Archipiélago de San Andrés en fotos, Editorial Planeta.



**Figura 10.** Imagen aérea de Cayo Serrana, donde se observa el relieve submarino circundante. La parte sur está dominada por la rompiente del banco que remata en una esquina del cayó. El costado este es más somero que el de oeste y donde se encuentran varios arrecifes de coral (señalados en rojo) que "alivian" el oleaje, formando una gran "piscina" de arena que alimenta las playas del nor-este hacia donde crece el cayó.



**Figura 11.** Los bajos fondos del Este y Norte que moldean las playas de Cayo Serrana al funcionar como diques.



**Figura 12.** Esquema de los focos difractivos que modelan las playas al noreste de Serrana. El efecto neto es el de avance (crecimiento) del cayo en las direcciones señaladas.



**Figura 13.** Vistas del bajo del Norte y su función sobre la playa Nor-oeste de Cayo Serrana al funcionar como dique.

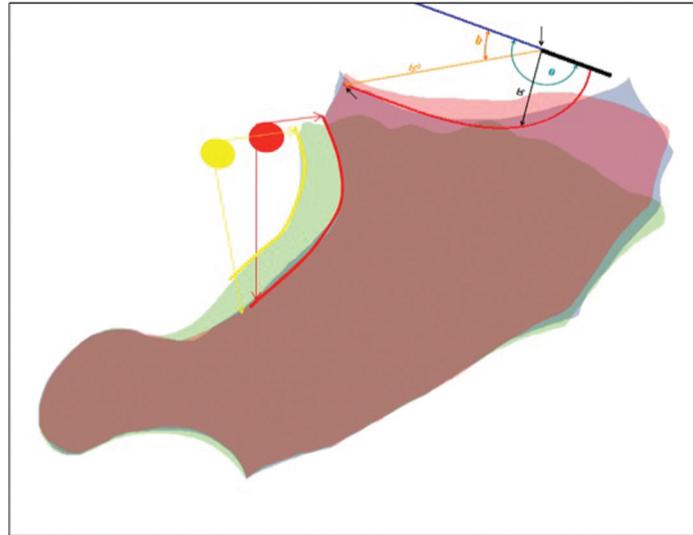
En el caso de la playa nor-oeste, se aprecia claramente como la playa se ha ido moviendo y acercando una protuberancia de arena hacia el arrecife que se encuentra a su costado nor-oeste y que es el foco de modelación de dicha playa (figura 12).

Al observar la anterior línea de costa, se puede ver que esta playa tenía un foco de difracción que debió ser un arrecife que se encuentra más al oeste (figura 13). Por esa razón, si se quiere volver al equilibrio inicial, se debe investigar la manera de levantar el bajo fondo que existió anteriormente. Además, es importante anotar que estas modificaciones son de corto plazo, ya que la línea de costa se encuentra respondiendo a eventos meteorológicos recientes, que tienen normalmente un carácter estacional. La campaña oceanográfica se llevó a cabo durante la época de tormentas, lo que hizo que se encontrara la línea de costa modificada por fuertes oleajes recientes, pero el efecto de largo plazo es el que interesa.

La playa nor-oeste de Serrana ha tomado una nueva orientación, debido al bajo coralino que se encuentra al norte y que estabiliza la playa, de tal forma que empieza a comprometer la infraestructura de los infantes de marina. Hace dos décadas, esa playa se apoyaba en la difracción que debía ejercer otro arrecife coralino que se encuentra más al oeste, pero que aparentemente ha perdido altura, por motivos que aún no están claros (probablemente por mortalidad de estos).

Es importante medir con precisión la profundidad del arrecife al rededor del faro, así las corrientes que se producen entre la rompiente y el cayo. Con esas mediciones se podría considerar la posibilidad de generar una trampa de arena que pudiera aumentar la defensa del cayo al embate de las olas, especialmente en condiciones meteo-marinas extremas.

En el costado nor-oeste también se puede observar, mediante la superposición de las líneas de costa, que dicha playa se encuentra en equilibrio



**Figura 14.** Distintas líneas de costa de Cayo Serrana, que muestra la tendencia de las playas del norte al equilibrio en largo plazo, apoyadas en arrecifes vecinos que hacen de dique y foco de difracción para el oleaje.

con respecto del bajo fondo que hace las veces de dique. La línea de costa de 2007 se acomoda bien, respecto de una planta típica (figura 14). Si bien la playa nor-oeste muestra una importante regresión, hoy esta playa parece encontrarse en un equilibrio de largo plazo, muy bien ajustado al arrecife que le ofrece de difractor. Para todos los efectos, parecería más aconsejable adaptar la infraestructura del puesto de la Armada a la nueva posición de la playa, en lugar de lo contrario.

Cayo Serrana se presenta como un sitio en crecimiento, aparentemente el único de los cayos del archipiélago en ese proceso. Ayudar a ese crecimiento sería de vital interés para aprender las estrategias de adaptación que deben seguirse en los años venideros. Para ello, se requiere del cuidado de la salud de los arrecifes circundantes, de su equilibrio ecosistémico cuyos diversos aspectos pasan por el control de la pesca, la salud del coral y el manejo de las basuras; factores de los cuales depende la defensa de la isla, que se materializa en la cantidad de arena de sus playas.

## CONCLUSIONES

Contrario a lo que se creía, en los últimos 25 años ha habido un aumento de la cobertura terrestre de Cayo Serrana de aproximadamente  $7.776 \text{ m}^2$ , lo cual muestra un balance positivo en el transporte de sedimentos entre estos años. La

cobertura total de tierra emergida del cayo, entre 2007 y 2009, técnicamente se ha mantenido estable.

De acuerdo a su composición, la línea de costa de Cayo Serrana se encuentra definida en dos tipos que corresponden a playas y a terrazas pleistocénicas o, arrecifes costeros emergidos. De acuerdo a su comportamiento actual, se identificaron tres tipos de líneas de costa en el cayo:

- Con erosión: la mayor parte de la playa oeste del cayo con una rata de erosión promedio de  $1.845 \text{ m/año}$ , al igual que la playa que se encuentra entre la punta sureste y la punta sur, adyacente al inicio de la rompiente de arrecife con una rata de erosión leve de  $0.24 \text{ m/año}$ , así mismo, la playa noreste hasta donde se presentan terrazas pleistocénicas con  $0.63 \text{ m/año}$  de rata de erosión.
- Con acrecimiento: toda la playa norte con una rata de acreción promedio de  $2.67 \text{ m/año}$ .
- Poco variable: corresponden específicamente a las conformadas con terrazas pleistocénicas, ubicadas en la punta suroeste y en casi la totalidad de la franja este del cayo. Estas variaciones de este tipo de línea de costa obedecen a pequeñas variaciones de tipo estacional.

Se puede observar que el cayo tiene dos grandes acumulaciones de arena al norte y al nor-este. Estas acumulaciones están rodeadas

por terrazas arrecifales de corales vivos. Dichos arrecifes se pueden observar alrededor de la isla, porque sobresalen de las capas de arena que están "atrapando" y se acercan a la superficie interactuando con el oleaje. De esta forma, tanto la rompiente que rodea el cayó por el sur, como los bajos fondos arrecifales que rodean el cayó, son los que están dando forma a las playas de arena de Cayo Serrana.

Las puntas que abruptamente cambian el sentido de la línea de costa del cayó, marcan un sentido de la dinámica del oleaje, mostrando los focos que generan la difracción y consecuente proceso litoral que modela las playas. Por la forma, se advierte que son los arrecifes en frente de estas, y que el efecto neto de esta interacción, es el de un avance de las playas de Serrana hacia el este y el nor-este desde hace varias décadas, a decir, por la serie de dunas que crecen en el frente de esta playa.

La playa nor-oeste de Serrana ha tomado una nueva orientación, debido al bajo coralino que se encuentra al norte y que estabiliza la playa, de tal forma que empieza a comprometer la infraestructura de los infantiles de marina. Hace dos décadas, esa playa se apoyaba en la difracción que debía ejercer otro arrecife coralino que se encuentra más al oeste, pero que aparentemente ha disminuido su altura.

Cayo Serrana se presenta como un sitio en crecimiento, aparentemente el único de los cayos del archipiélago en ese proceso. Ayudar a ese crecimiento sería de vital interés para aprender las estrategias de adaptación que debe seguirse en los años venideros. Para ello se requiere del cuidado de la salud de los arrecifes circundantes, de su equilibrio ecosistémico cuyos diversos aspectos pasan por el control de la pesca, la salud del coral y el manejo de las basuras, factores, todos estos, de los cuales depende la defensa de la isla, que se materializa en la cantidad de arena de sus playas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RODRÍGUEZ L, GRACIA J. Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa. Actas de Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras". Cádiz 2008. p. 12.
- [2] ERDAS INC, ERDAS Macro Language Reference Manual versión 8.5. Atlanta Georgia. 000. en: <http://www.erdas.com>.
- [3] THIELER R, et.al. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versión 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008. Disponible en: <http://woods-hole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version7>.
- [4] CANO Marcela, VALDERRAMA Jairo. Archipiélagos del Caribe Colombiano. Banco de Occidente. Santiago de Cali, 1996. p. 144.
- [5] GARCÍA Marta, et. al., Caribbean Archipelago Biosphere Reserve: Regional Marine Protected Area System. Coralina. San Andrés Islas, 2003. p. 116.
- [6] INGEOMINAS. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Pacífico colombiano. Publicación especial No 21. Bogotá, 1998.
- [7] ANDRADE, Carlos. The Circulation and Variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea, School of Ocean Sciences, University of Wales, Wales cit, y 2000.