



ARTÍCULO

## Efectos de la sobre-elevación del nivel del mar por el cambio climático en las playas de los cayos del Archipiélago de San Andrés

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

**Carlos Alberto ANDRADE**, candrade@costa.net.co  
**Víctor Manuel PINZÓN**, pinzonvm@hotmail.com  
Grupo de Investigaciones Oceanológicas,  
Escuela Naval Almirante Padilla,  
Isla Manzanillo, Cartagena, Colombia.

### RESUMEN

Se estudiaron los efectos de la sobre-elevación del nivel del mar que viene ocurriendo con ocasión del cambio climático en los cayos de Serranilla, Serrana, Roncador, del Este-Sudeste y Albuquerque. Para la caracterización se efectuaron dos campañas oceanográficas en 2009 y 2010 donde se midieron las características geo-morfo-dinámicas de cada uno. Las tendencias climáticas fueron extraídas con base en los datos horarios de 60 años del re-análisis de NCAR. Se calcularon el retroceso de las playas de los cayos por efecto del aumento de la cota de inundación, aumento del Hs12 y por el cambio de dirección del flujo medio de energía para los años 2025, 2055 y 2085. El cálculo establece que ocurrirá un retroceso de las playas de los cayos y que será de alrededor de uno a dos metros para el año 2025, de 3-7 metros para 2055 y hasta de 15 metros para 2085.

**Palabras claves:** Sobre-elevación del nivel del mar, cambio climático, cayos, Serrana, Serranilla.

### ABSTRACT

The effect of the sea-level rise that is occurring due to climate change was studied on the Cays of Serranilla, Serrana, Roncador, Este-Sudeste and Albuquerque. Two oceanographic campaigns were developed in 2009 and 2010 to characterize the geo-morphodynamics of each one of them. The climatic tendency was extracted based on the sixty-years hourly NCAR reanalysis. The backward movement of every coastline of the Cays was calculated due to the augmentation of the flooding level; increase of Hs12 and due to changes in the direction of the mean energy flux direction for the years 2025, 2055 and 2085. The calculation established that there will be a backward movement of the beaches of the Cays of about one to two meters for 2025, of 3-7 meters for 2055 and up to 15 meters for 2085.

**Key words:** Sea-level rise, climate change, cays, Serrana, Serranilla.

## INTRODUCCIÓN

Los Cayos de San Andrés son las partes de los Bancos que por razones geológicas están emergidas y se componen de los restos del arrecife, en forma de caracolejo y sobre todo de las arenas que viene de los arrecifes. Los cayos se encuentran en los atolones que componen la elevación centroamericana en el sector colombiano (figura 1). Los cayos más grandes se encuentran ocupados por personal de la Armada Nacional y son Serranilla, Serrana, Roncador, del Este-Sudeste y Alburquerque. En los arrecifes hay mucho más cayos pequeños, algunos apenas sobresalen como Bajo Nuevo y Quitasueño y en otros no hay terrenos emergidos como Bajo Alicia. Los cayos habitados son los que hacen parte del estudio a continuación.

Las playas de arena que bordean los Cayos de San Andrés se encuentran respondiendo al cambio climático y el conocimiento de esa respuesta es imprescindible porque componen la totalidad

de su litoral. Las playas de las áreas frente a las rompientes son abiertas, cortas con relativa poca arena y están sometidas a un transporte litoral de arenas continuo. Las playas de sotavento son un poco más amplias y tienen formas y amplitudes que modifican las tormentas y eventos de corto plazo.

En la metodología se describen las escalas espacio temporales de los procesos dinámicos que ocurren en las playas indicando cuales son las escalas a considerar a la hora de evaluar los posibles efectos del cambio climático. Se define Playa como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, y caracolejo) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en tempestad y pleamar viva (máxima marea) y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje. Queda claro pues, que la definición de playa no puede separarse de la hidrodinámica.

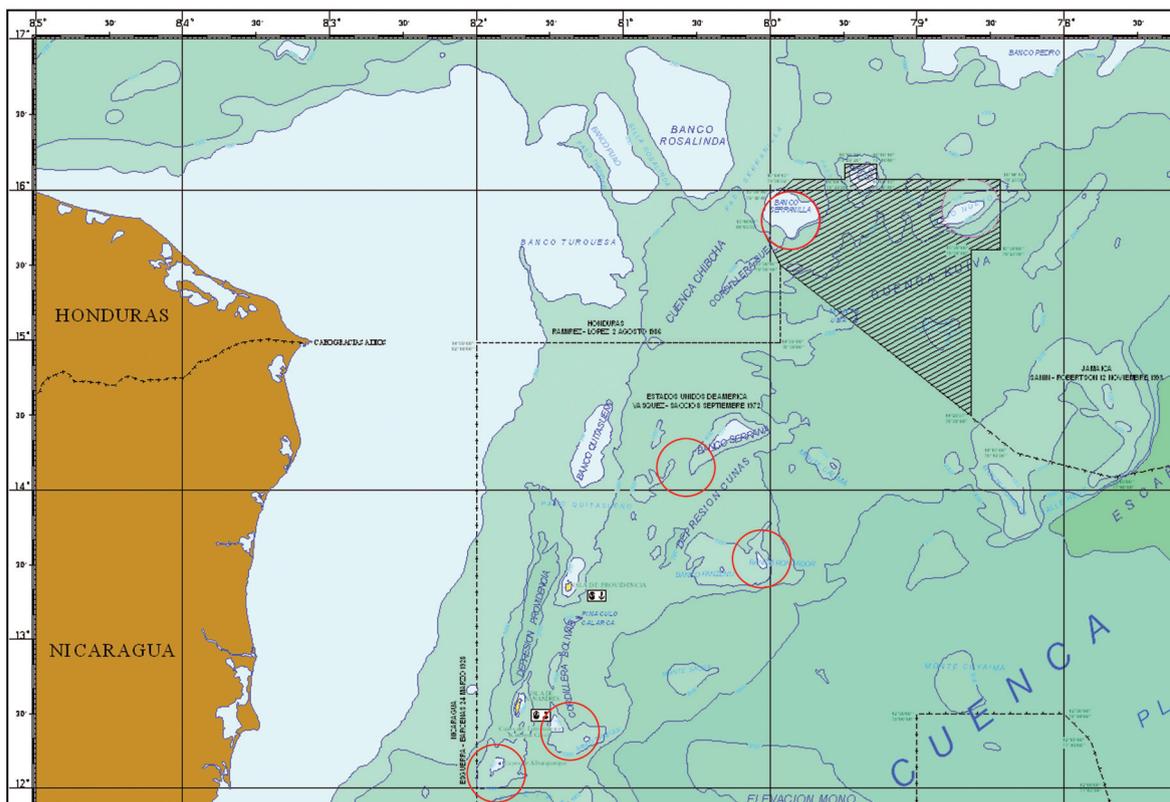


Figura 1. El área de estudio en el Caribe occidental.

Su desarrollo hacia tierra y hacia el mar depende por lo tanto de la tipología de la costa, de la plataforma continental, y del clima marítimo de la zona. En el caso de los cayos por ejemplo, se trata de una costa baja y arenosa, sometida a fuertes vientos, comprende el área dunar interior de la playa, cuya dinámica depende de la capacidad de aportación de arena desde la playa por parte del oleaje y de la acción de los vientos costeros.

En cuanto a la clasificación de las playas de los cayos están no tienen un solo carácter. Se podría decir que las playas de sotavento son disipativas pero no se aplica porque con frecuencia los frentes de onda producidos por frentes fríos u Ondas del Este [1] llegan de tal manera que reflejan la energía. Tampoco se puede decir que las playas de barlovento tienen un carácter solamente reflejante por lo que se considera que tienen un estado intermedio. Las playas intermedias poseen elementos de los estados disipativo y reflejante. Estos estados presentan morfologías muy complejas. Como, en general, las playas intermedias presentan diferentes estados en función de las condiciones del oleaje, la variabilidad total de estas playas es muy elevada [2].

Desde el punto de vista del tipo de equilibrio las playas de los cayos se encuentran en equilibrio dinámico. En este tipo de playas existe un transporte longitudinal no nulo, y por lo tanto, las variaciones en la tasa de transporte neto pueden acarrear grandes modificaciones en las playas. Por otro lado, cabe mencionar que las playas en desequilibrio muestran una gran variabilidad temporal en su morfología.

## OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo fue el de determinar las tendencias climáticas relacionadas con el cambio climático que está ocurriendo en el mundo en términos del aumento del nivel del mar y su repercusión en el retroceso de la línea de costa de los Cayos de San Andrés.

## METODOLOGÍA

### SOBRE EL TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE OLEAJE

El ambiente oceánico regional de cada uno de los cayos fue determinado. En él se establecieron

los parámetros la altura de ola significativa que es excedida doce horas al año  $H_{s12}$ , y la dirección del flujo medio de energía para cada profundidad objetivo en los cayos estudiados mediante el análisis de las bases de datos contenidas en el programa OLAS de la Dirección General Marítima de Colombia [3].

Para obtener las tendencias climáticas se utilizó la base de datos de re análisis de NCEP-NCAR que cuenta con todos los parámetros climáticos medidos desde 1948 hasta el 2008, con datos horarios, junto con los campos de presión que fueron evaluados. Con ellos se desarrollaron datos horarios de altura y dirección de oleaje. La altura de la marea astronómica fue calculada desde los datos de la misión TOPEX/POSEIDON así como la marea astronómica [4]. Con base en dichos datos se determinaron las tendencias locales, punto a punto de cada uno de los parámetros disponibles que caracterizan el clima oceánico involucrado en el proceso de la generación de oleaje y sobre elevación. En ese sentido se obtuvo la tendencia para  $H_{s12}$ , la tendencia para la dirección del flujo medio de energía, para el aumento del nivel del mar incluyendo todos los componentes (marea astronómica y marea meteorológica). Posteriormente se extrapolaron dichas tendencias para evaluar el cambio climático en tres fechas, los años 2025, 2055 y 2085.

### EL EQUILIBRIO A LARGO PLAZO DE LAS PLAYAS

El retroceso debido a la sobre elevación esperada en las tendencias encontradas para cada año escogido, fue calculado utilizando el  $H_{s12}$  esperado para cada cayo estudiado y la altura de la berma actual, medida durante las salidas de campo y la granulometría medida, utilizando el modelo de Bruun para tal fin [5].

El nivel de sobre elevación fue calculado y utilizado sobre los datos de oleaje observados en cada uno de los cayos en [4]. El retroceso de la línea de costa debido al cambio de dirección del flujo medio de energía fue calculado según [4].

Diversos autores han propuesto formulaciones empíricas al objeto de representar el perfil de equilibrio de una playa, de todas ellas la más comúnmente utilizada es la propuesta, inicialmente, por [6] y posteriormente por [7]. Esta forma de perfil, conocida como perfil parabólico, adopta la expresión:

$$h = Ax^{2/3} \quad (1)$$

Donde  $h$  = profundidad del agua,  $x$  = distancia desde la costa,  $A$  = parámetro de forma.

El parámetro de forma o factor de escala  $A$ , es función de la disipación de energía. Teniendo en cuenta que los sedimentos gruesos disipan más por unidad de volumen que los finos, las playas de sedimento grueso tendrán perfiles con mayor pendiente que las de los sedimentos finos, tal como se observa en la naturaleza.

El parámetro de forma  $A$  fue ajustado por [8] en función de la velocidad de caída del grano,  $w$  (m/s).

$$A = K\omega^{0.44} \quad (2)$$

con  $K = 0.51$

Dean mostró que los valores de  $A$  varían suavemente a lo largo de grandes distancias en una misma costa y que son razonablemente constantes en el tiempo.

En los estudios de largo plazo de estabilidad de playas es usual utilizar la denominada "profundidad de cierre" como un límite de aplicación del perfil de equilibrio. Esta profundidad está relacionada con el transporte de sedimentos y se aplica a la posición mar adentro en la cual las variaciones verticales del perfil a lo largo del tiempo son tan reducidas que no son distinguibles de los errores de medida, Birkemeier [9], utilizando datos de medidas de perfiles de playa obtuvo una expresión para la profundidad de cierre,  $h^*$ :

$$h = 1.75H_{s12} - 57,9\left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2}\right) \quad (3)$$

Donde  $H_{s12}$  = altura de ola significativa que es excedida doce horas al año, medida en la playa a una profundidad  $h$ , tal que  $h_* < h < 2h^*$  (m).

$TS$  = período de pico asociado a  $H_{s12}$ , (s).

Por otro lado, si se adopta un valor medio de  $T_s = 5.7\sqrt{H_s}$  [10] el valor de la profundidad de cierre puede expresarse como:

$$h_* \cong 1.75H_{s12} \quad (4)$$

De acuerdo con esta expresión, la profundidad de cierre en las diferentes playas de interés definidas se presenta en la tabla 1.

Estos valores pueden servir como primera aproximación del valor de  $h^*$  en playas abiertas en las que el valor de la altura de ola significativa en aguas profundas y la altura de ola significativa local sean análogas.

#### EFFECTO DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN EL PERFIL DE PLAYA

La respuesta que puedan presentar las diferentes playas del litoral frente el aumento del nivel medio inducido por el cambio climático, puede ser cuantificado haciendo uso de la conocida Regla de Bruun, que establece que un ascenso del nivel medio del mar,  $\Delta\eta$ , Provocará un retroceso del perfil de playa.

$$\frac{RE}{\Delta\eta} = \frac{(1.57H_{s12})^{1.5}}{(0.51W^{0.44})^{1.5}(1.57H_{s12} + B)} \quad (5)$$

Esta relación pone de manifiesto que en las playas más reflejantes, es decir, las que están

**Tabla 1.** La profundidad de cierre estimada para cada uno de los cayos estudiados.

Playas	$H_{s12}$	$Tp12$	$h^*$
Serranilla	3.5	11.9	5.5
Bajo Nuevo	3.7	12.7	6.0
Serrana	3.4	13.0	5.6
Roncador	3.5	13.3	5.8
Albuquerque	4.4	14.5	7.2
Este-sudeste	3.6	13.4	5.9

constituidas por arenas gruesas, el retroceso adimensional será menor que en las playas disipativas. Por otro lado, el efecto de la altura de la berma será tal que cuanto mayor sea la altura de la berma menor será el retroceso de la playa ante una determinada variación en el nivel de mar.

### EVALUACIÓN DE LAS TENDENCIAS CLIMÁTICAS

La extracción de datos del modelo hemisférico en [4] entregó las siguientes tendencias del clima para el área de los Cayos de San Andrés: A manera de ejemplo, el modelo efectúa los cálculos del nivel medio del mar anual, en el cual se puede observar la respuesta a los cambios estacionales en la región (e.g. [1]). En el área de San Andrés el nivel del mar medio anual tiene un rango de alrededor de 37 cm; es relativamente bajo durante la estación seca, o de vientos, de enero a abril, siendo el mínimo en marzo. Sube de nuevo durante la época de transición mayo a julio, en agosto baja debido a la llegada del fenómeno conocido como Veranillo y luego vuelve a subir durante la época de lluvias alcanzando su máximo nivel en noviembre y diciembre (figura 2).

A manera de ilustración se presenta los valores calculados de  $H_{s12}$  calculados con la base de datos reanalizados durante los 60 años de datos y con el se desarrollaron los cálculos de tendencias (figura 3).

Posteriormente se extrapolaron las tendencias a tres años objetivo, el 2025, el 2055 y finalmente el 2085 (figura 4). Entendiéndose que la tendencia encontrada es muchísimo mejor valor que las estimaciones generalizadas que se hacen para estos fines como las del Panel Internacional para el Cambio Climático, cuyos valores son de carácter global.

Así mismo, hay que tener presente que dichos valores son mejores estimativos para los años objetivos más próximos y más inciertos para los más lejanos, lo que implica una evaluación posterior para mejorar dichas estimaciones, como aparece en la tabla 2.

Los cálculos hechos para los Cayos de San Andrés por esta metodología arrojan los siguientes resultados para el parámetro  $H_{s12}$ , como aparece en la tabla 3.

### EFFECTOS EN LAS PLAYAS DE LOS CAYOS DE SAN ANDRÉS

Los efectos más importantes que el cambio climático puede suponer en las playas se reduce básicamente a una variación en la cota de inundación y a un posible retroceso, o en su caso avance, de la línea de costa.

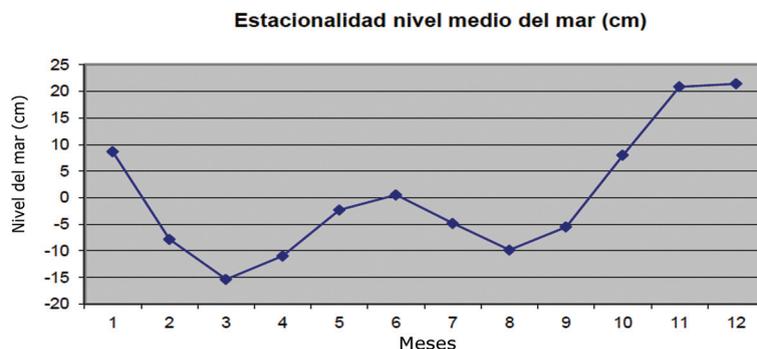
En el caso de la cota de inundación, este parámetro como se dijo en la metodología, aplicando el método de las perturbaciones a la siguiente formulación y asumiendo que en un futuro se pueda producir un aumento del nivel medio se obtiene la siguiente expresión que permite calcular la posible variación adimensional de la cota de inundación:

Basados en la observación y cálculos hechos en [4] de los 60 años de re análisis para todo el globo, los valores de cota de inundación para el área de los cayos son de 46.099706 mm para el año 2025, de 152.93079 mm para el 2055 y de 279.27076 mm para el año 2085. Estos valores se comparan bien con los expuestos por otros trabajos e.g. [11, 12].

Con objeto de reflejar la importancia de los posibles cambios en la cota de inundación en los

**Tabla 2.** Valores de las tendencias climáticas.

	Fecha			
	2010	2025	2055	2085
$H_{s12}$ Tendencia (m)	0.0000	0.137336	0.412008	0.686680
$H_{s12}$	4.5180	0.000000	0.000000	0.000000
DirFME Tendencia (°)	0.0000	-1.919877	-5.759631	-9.599385
DirFEM (°)	N80,31°E	0.000000	0.000000	0.000000
SLR Tendencia (mm)	0.0000	46.099706	152.930790	279.270760



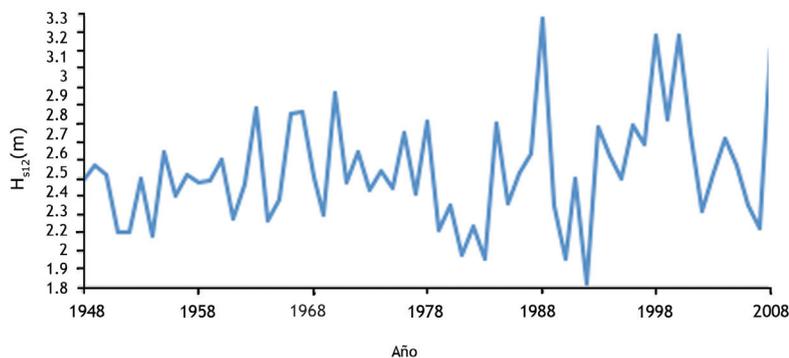
**Figura 2.** El nivel medio mensual multianual de 60 años muestra la respuesta del nivel del mar a la presencia de vientos más fuertes durante la época seca (enero a marzo) y durante el verano en agosto.

Cayos de San Andrés, se ha evaluado con los datos obtenidos en el análisis realizado en [13], la variación adimensional que experimentará la cota de inundación para un escenario de cambio climático, considerando variables extremas de la altura de ola significativa y de la marea meteorológica con un período de retorno de 50 años.

El escenario de cambio climático considerado corresponde a aquel en el que se producen los cambios medios estimados en el análisis realizado en [13] y se ha asumido que el nivel medio aumenta a una tasa de 0,004 m/año, que corresponde a la tendencia media obtenida por el panel Intergubernamental del Cambio Climático (PICC). Dado que la incertidumbre a la hora de cuantificar esta tendencia es muy elevada, los valores obtenidos en el cálculo realizado deben entenderse como valores orientativos del orden de magnitud del cambio. Por otro lado cabe des-

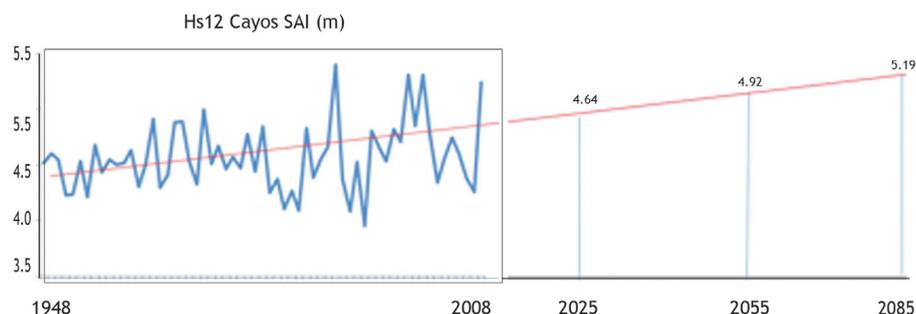
acar que el nivel de la marea astronómica se ha considerado igual a la pleamar media viva equinoccial en los cayos. En la figura 6 se muestra la variación adimensional de la cota de inundación a lo largo de los Cayos de San Andrés.

Como puede observarse en la misma, para el escenario considerado de cambio climático, se obtiene un aumento total de la cota de inundación, que es inducida principalmente por el aumento del nivel medio del mar. No obstante, en Albuquerque el aumento es mayor que en el resto del litoral ya que en estas zonas se produce un aumento significativo de la altura de ola significativa con un período de retorno de 50 años. Por otro lado, la variación de la marea meteorológica a lo largo de todo el litoral contrarresta parcialmente el aumento de la cota de inundación producido por la variación del nivel medio y de la altura de ola significativa (ver tabla 2).



**Figura 3.** La altura de ola significativa excedida por 12 horas al año ( $H_{s12}$ ) en los Cayos de San Andrés durante los últimos 60 años.

## Resultados tendencia climática para los cayos de San Andrés



**Figura 4.** Esquema del cálculo de extrapolación de tendencias realizado en este caso es Hs12 para el área de los Cayos de San Andrés.

Otro efecto en las playas es el posible retroceso de la línea de costa. Este puede ser inducido por un aumento en el nivel medio, que hace que el perfil activo de la playa tenga que ascender para llegar al equilibrio dinámico con esta nueva condición de nivel medio. Para ello, es necesario cubrir el déficit de arena que se produce en el perfil activo y este se hará a expensas de la arena de la playa seca y de la berma, produciendo un retroceso de la línea de pleamar. Este efecto puede ser cuantificado haciendo uso de la regla de Bruun, que propone la siguiente expresión para el retroceso de la playa:

$$RE = \frac{\Delta n \cdot W^*}{h^* + B} = \Delta n \frac{(1.57 H_{s12})^{1.5}}{(0.51 w^{0.44})^{1.5} (1.57 H_{s12} + B)} \quad (6)$$

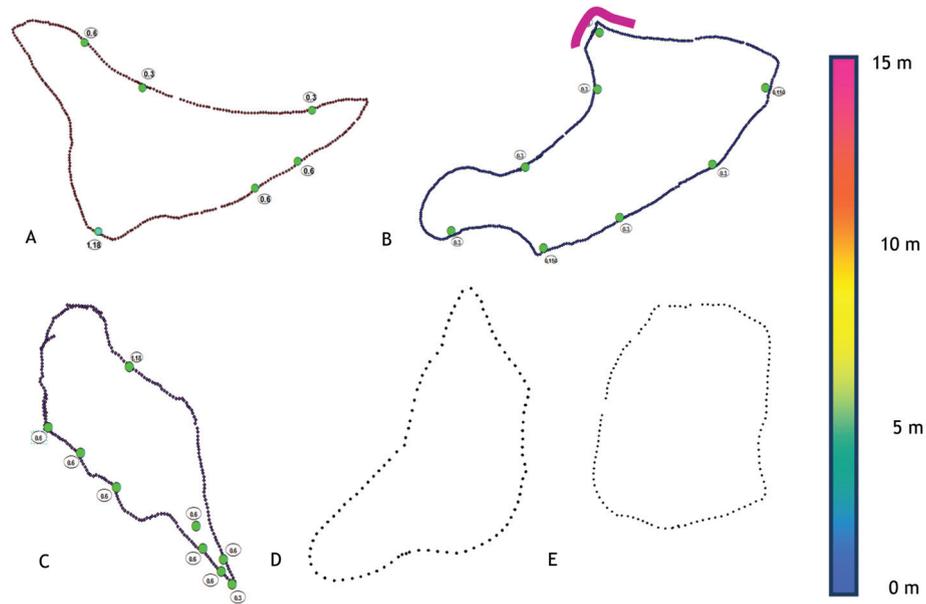
Donde  $RE$  = retroceso de la playa (m),  $W$  = velocidad de caída del grano (m/s),  $H_{s12}$  = altura de ola significativa excedida 12 horas al año (m),  $B$  = altura de la berma (m),  $W^*$  = extensión del perfil activo de la playa (m),  $h^*$  = profundidad de corte de la playa (m).

Según esta expresión, las playas constituidas por arenas más finas y mayores profundidades de corte, es decir, las más disipativas, serán aquellas que experimenten el mayor retroceso. Este retroceso será mitigado en las playas con grandes alturas de berma. A continuación se presentan en las figuras 5 A-E, el valor estimado para el retroceso a lo largo de los Cayos de San Andrés, para el año 2025, en las figuras 6 A-E, el retroceso estimado para el año 2055 y en las figuras 7 A-E el retroceso estimado para el año 2085.

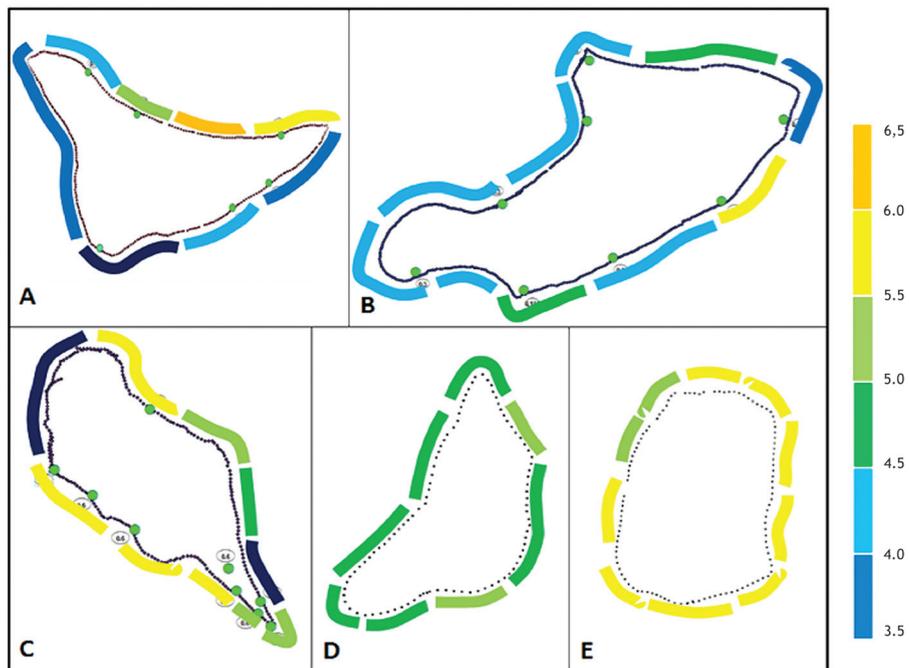
El cálculo fue realizado considerando las playas tipo con un tamaño de grano representativo de cada perfil, que aparece en puntos verdes a lo largo de las costas, una berma medida en cada perfil, donde la profundidad de corte viene determinada por la Hs12 calculada en la Fase de Caracterización y considerando la misma tasa de aumento para el nivel medio mencionada anteriormente, siendo el año objetivo el 2055. Se debe advertir que los cálculos al año 2085 se consideran aproximados, hasta no tener más observaciones que permitan corregir cualquier cambio de la tendencia de las variables estudiadas.

Estas figuras indican que las playas más susceptibles al aumento del nivel medio del mar, son las que se encuentran en los sectores al norte de los Cayos Serranilla y Serrana y al oeste en Roncador, Albuquerque y Este-Sudeste, obteniéndose en estas zonas retrocesos mayores que los que al mismo tiempo se obtendrán en las playas cuyas bermas son más altas y que se encuentran en los costados occidentales de Serranilla y Serrana, Este-Sudeste y Albuquerque y el de Cayo Roncador.

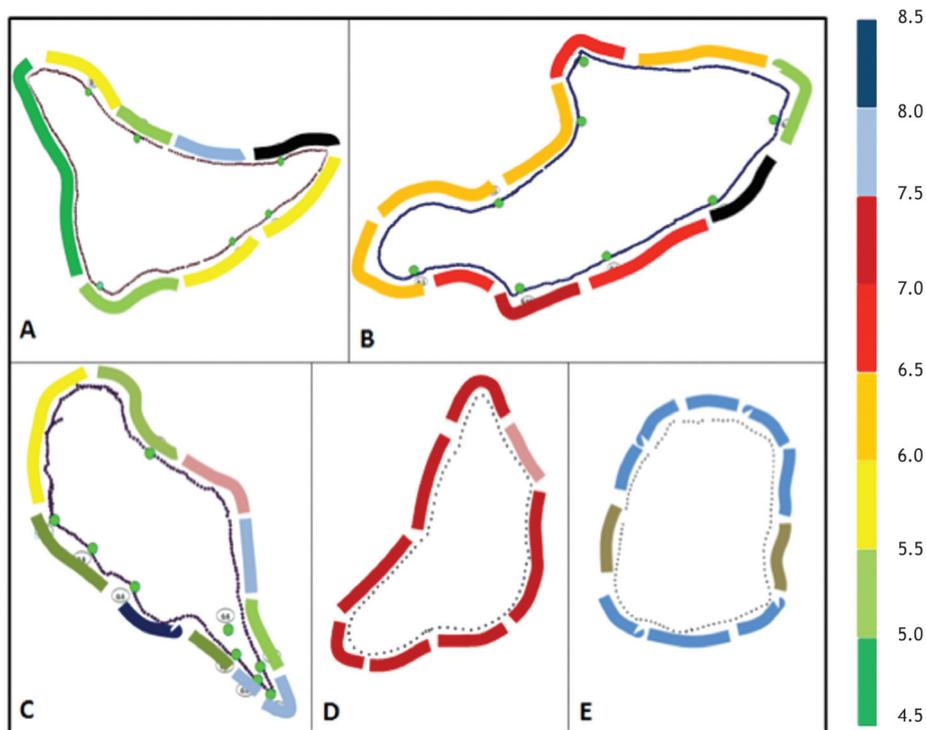
El estudio muestra que las tendencias de variación del ascenso del nivel del mar debido al cambio climático producirán un retroceso de las playas que será de alrededor de uno y dos metros para el año 2025, de 3-7 metros para el 2055 y hasta de 15 metros para el 2085. El retroceso será mayor en las playas de pendientes más suaves. En la zona del área expuesta a las rompientes de cada caso el retroceso será menor ya que la extensión del perfil activo de las playas es menor.



**Figura 5.** El retraso de línea de costa estimado para el 2025 en (A) Serranilla, (B) Serrana, (C) Roncador, (D) Este-Sudeste y (E) Alburquerque.



**Figura 6.** El retraso de línea de costa estimado para 2025 en (A) Serranilla, (B) Serrana, (C) Roncador, (D) Este-Sudeste y (E) Alburquerque.



**Figura 7.** El retraso de línea de costa estimado para 2025 en (A) Serranilla, (B) Serrana, (C) Roncador, (D) Este-Sudeste y (E) Alburquerque.

Otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía. Tal como se ha indicado en la metodología, dicho retroceso es altamente dependiente del tipo de playa que se considere, así como de la propagación que el oleaje sufra desde profundidades indefinidas hasta la playa en concreto. Considerando una playa rectilínea no colmatada de arena, una variación en la dirección en las proximidades de la playa, generaría un retroceso en la mitad de la playa y un avance en la otra mitad. La expresión que en este caso permite estimar el cambio es la siguiente:

$$RE_{max} = \frac{L}{2} \operatorname{tg}(\Delta\beta) \quad (7)$$

Donde  $L$  = longitud de la playa (m),  $\Delta\beta$  = Variación en la dirección del flujo medio de energía ( $^\circ$ ).

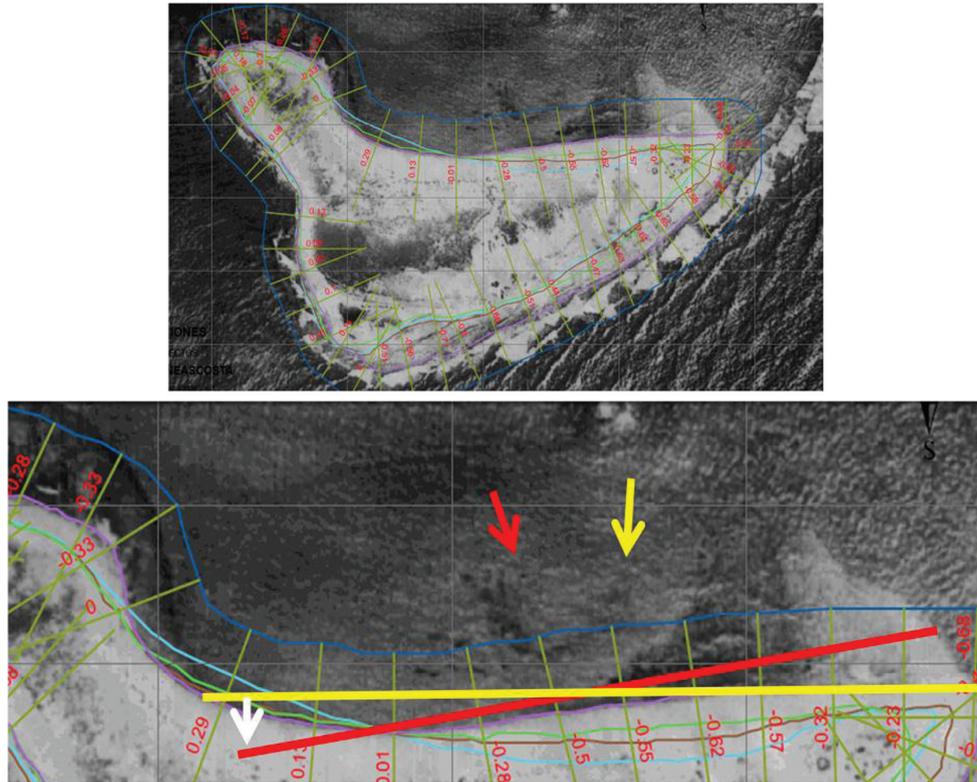
Para poder generalizar este calculo teniendo en cuenta las tendencias calculadas en los tres años

objetivo, en la tabla 4, se presentan de acuerdo con la longitud del sector recto de la playa.

En el caso de la playa norte de Serranilla, con alrededor de 200m de longitud, la variación de la dirección del flujo medio de energía le significa un retroceso de 25 mts en la esquina occidental para el 2085, figura 8. De manera análoga, la playa noroeste del Cayo Serrana que tiene una longitud similar sufrirá un retroceso análogo. Además del ya calculado por la elevación del nivel medio, figura 9.

En la figura se muestra el retroceso máximo esperado para el año 2055, en la que se ha considerado que la variación de la dirección del flujo medio de energía corresponde a la variación media calculada en la Fase de Caracterización, y se ha aplicado la ley de Snell para calcular la variación del flujo medio a 10 mts de profundidad.

Obsérvese que las playas más susceptibles a este tipo de retroceso corresponden a las playas de la zona norte de cada cayo sobre todo en Serrana y Serranilla, siendo de especial relevancia



**Figura 8.** Representación del retroceso de la línea de costa por el cambio en la dirección del flujo medio de energía en la playa norte de Cayo Serranilla. En amarillo la representación de la posición de la línea de costa y del flujo medio de energía actual. En rojo la posición que tomará la línea de costa con la rotación anti horaria del flujo medio de energía en ese lugar.

el efecto en las playas del noreste de Serrana. Y también en la punta de arena de Roncador. En estas zonas el retroceso puede alcanzar hasta 50 mts ya que la variación de la dirección flujo medio de energía supera en ocasiones los  $90^\circ$ . En el resto del litoral este hecho tampoco puede ser depreciado observando valores del retroceso del orden de 20 mts.

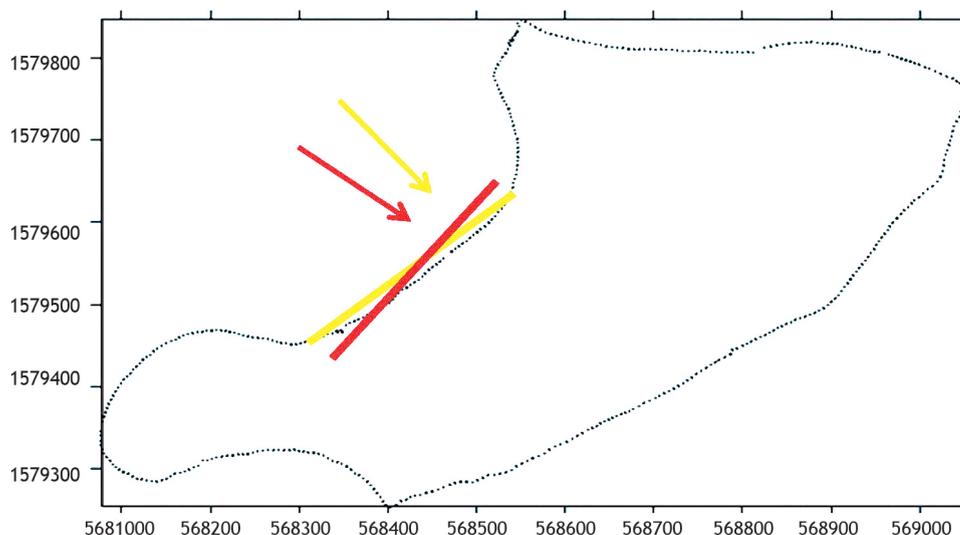
Por último cabe mencionar que los posibles efectos del cambio climático en las playas son altamente dependientes de las características de la playa que se considere y de la propagación del oleaje hasta la misma, siendo imposible establecer valores globales a los cambios mencionados. Por ello, para cada playa en particular, es esencial aplicar las formulaciones obtenidas en esta sección y en su caso los ábacos correspondientes. Por otro lado, ya que el cambio climático también puede tener un efecto en el estado morfodinámico modal de la playa así como los cambios con

respecto a esa forma modal, es necesario que a la hora de analizar cada playa en concreto, se consideren dichos efectos.

## CONCLUSIONES

Basados en cálculos realizados con la base de datos del re-análisis de NCAR, la intensificación de los vientos debido a la mayor cantidad de días de tormenta que pasarán por la zona, aumentan el mayor oleaje esperado ( $H_{s12}$ ) en 0.13mts al 2025, 0.41mts al 2055 y 0.68mts en 2085.

Las tendencias del aumento del nivel del mar debidas al cambio climático en el área de los Cayos de San Andrés serán de 46mm para el año 2025, 152 mm para 2055 y de 279mm para 2085. Con esas tendencias queda claro que los cayos visitados no se encuentran en un peligro inmediato de quedar sumergidos o de perderse



**Figura 9.** Esquema del retroceso en la playa noroeste debido al cambio en la dirección del flujo medio de energía en el Cayo Serrana.

en su totalidad. El retroceso debido al cambio climático va a continuar y será paulatino, pero las bermas actuales de los cayos son suficientemente altas para hacer que los cayos no se encuentren en alto riesgo.

Dichas tendencias de variación del ascenso del nivel del mar debido al cambio climático producirán un retroceso de las playas que será de alrededor de uno y dos metros para el año 2025, de 3-7 metros para el 2055 y hasta de 15 metros para el 2085. Se establecieron las consecuencias para cada playa de los cayos emergidos estudiados.

La dirección del flujo medio de energía en el área de los Cayos de San Andrés es de

N80.31° E y cambiará en el sentido contrario a las manecillas del reloj con una tendencia de 1.91° en el 2025, 5.75° en el 2055 y 9.59° para el 2085.

Debido al cambio de dirección del flujo medio de energía, las playas de arena del sector norte de Serranilla y Serrana tendrán un retroceso adicional en su costado oeste de alrededor de 6mts para el año 2025, de 20 metros para el 2055 y hasta de 33 metros para el 2085. Este retroceso de la esquina en dicha playa significa un "basculamiento" de la misma que implica un avance similar en la esquina oriental. Dicho movimiento puede comprometer la infraestructura del personal de guardia en los cayos.

**Tabla 3.** Estimación del retroceso de las playas rectilíneas en los Cayos. La coordenada vertical se refiere a la mitad de la longitud de la playa (L/2).

(L/2)	2025	2055	2085
100	3.350372	10.08130	16.90389
150	5.025557	15.12195	25.35584
200	6.700743	20.16261	33.80779
250	8.375929	25.20326	42.25973
300	10.05111	30.24391	50.71168

Las playas del este de Cayo Serrana se encuentran en proceso de crecimiento debido a la configuración de los bajos vecinos y a la abundancia de arena. Este factor debe ser aprovechado para coadyuvar al esfuerzo de fijar mas dunas en las playas mediante métodos naturales sin impacto negativo al ambiente.

### AGRADECIMIENTOS

Estamos especialmente agradecidos con el Dr. Raul Medina y el Dr. Mauricio Gonzales del Instituto Hidráulico de Cantabria en Santander, por habernos proporcionado el acceso a los resultados del proyecto C3A en el área del Caribe Occidental con los que realizamos el presente trabajo. Así mismo, con los oficiales y tripulación de los buques ARC "Independiente" y ARC "Quindío" por su amable colaboración durante el trabajo de campo. Así mismo, con el personal de la Facultad de Oceanografía Física y del Grupo de Oceanología de la Escuela Naval por su apoyo y ayuda. Este manuscrito hace parte del proyecto sobre la Estabilización Geomorfológica de los Cayos de San Andrés, con financiación de Colciencias No.1126-425-20164 y de la Escuela Naval "Almirante Padilla".

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Andrade, C.A. y E.D. Barton, Eddy development and motion in the Caribbean Sea (Desarrollo y movimiento de remolinos en el mar Caribe), *Journal of Geophysical Research*, Nov 2000;105, (C11.), 26,191-26,201.
- [2] Geister, J. y J.M. Diaz, () Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia), con guía de campo. Instituto Colombiano de geología y minas INGEOMINAS; 2009;114pp.
- [3] Tejada, C. Desarrollo de un modelo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. *Boletín Científico CCCP* 2002;9, 9-66.
- [4] Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe – Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL Naciones Unidas, LC/W.447, 2011;265pp.
- [5] Bruun, P., (). Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers, 1962;(88)117.
- [6] Bruun, P., Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. U.S. Army Beach Erosion Board U.S. Army Corps of Engr. Waterways Exp. Station, Vicksburg, Mississippi. 1954; Tech.Mem.44.
- [7] Dean, R. G. Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts. Dept. of Civil Eng., Ocean Eng. Univ. of Delaware. 1977;Tech. Rep. 124.
- [8] Dean, R. G., Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions. *Proceedings, Coastal Sediments*, ASCE. 1987;1-24.
- [9] Birkemeier, W.A., Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engr.* 1985;111;3.
- [10] R.O.M. 03-91 Recomendaciones para Obras Marítimas. Ministerio de Obras Públicas y Transporte- Dirección General de Puertos - Madrid, España1992.
- [11] Andrade, C. A., El cambio relativo del nivel del mar. En INVEMAR (Ed.). Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socio-económicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costeras colombianas (Caribe y Pacifico) y medidas para su adaptación. Informe final y Atlas digital. 2003; Inf. Téc. 1, 62-77 [CD ROM].
- [12] 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, 2008;101-121.
- [13] Andrade, C.A., J.A. Zambrano, A. Diaz, V. Pinzon, E. Martin, G. Mayo,. Estabilización geomorfológica de los Cayos de San Andrés, Mar Caribe, Colombia, GIO, Escuela Naval "Almirante Padilla", proyecto Colciencias 2010, Inf. Final 368pp.