

## Morfología, morfodinámica y evolución reciente en la Península de la Guajira, Caribe Colombiano

Nelson Rangel-Buitrago<sup>1</sup> & Giorgio Anfuso Melfi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nelson Rangel-Buitrago, BSc. Geología, MSc. Ciencias de la Tierra. Cand. Doctor en Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz (España), Correo electrónico: [nelson.rangelbuitrago@mail.uca.es](mailto:nelson.rangelbuitrago@mail.uca.es)

<sup>2</sup> Giorgio Anfuso, Bsc. Geología, Doctor en Ciencias del Mar, Docente Universidad de Cádiz (España), Correo electrónico: [giorgio.anfuso@uca.es](mailto:giorgio.anfuso@uca.es)

### RESUMEN

Se presenta en este artículo el estudio morfológico, morfodinámico y evolutivo de tres segmentos de costa ubicados en la península de La Guajira sobre el mar Caribe colombiano. Las tres zonas abarcan aproximadamente 10 Km de línea de costa e incluyen unidades geomorfológicas como playas, llanuras costeras, dunas y salares. Para la realización de este trabajo de investigación fueron realizadas dos salidas de campo en los meses de mayo y diciembre del año 2005 dentro de las cuales se efectuaron levantamientos geomorfológicos, perfiles de playa y muestreos sedimentológicos. Pudo determinarse que las playas corresponden a tipos morfodinámicos intermedios y disipativos, que varían a lo largo del año dependiendo principalmente de la pendiente del perfil y de los cambios en el tamaño de grano de los sedimentos de las playas. De igual forma el análisis histórico de las líneas de costa mostró tendencias erosivas significativas de hasta 2 m/año. Estas tendencias erosivas afectan diferentes elementos que conforman el litoral como: estructuras de protección costera, obras civiles y una amplia variedad de ecosistemas ubicados a lo largo de la zona.

**PALABRAS CLAVE:** Morfología, Playas, Erosión costera, La Guajira.

### ABSTRACT

*This work deals with the morphological characteristics and the morphodynamic evolution of three coastal sectors located in the peninsula of La Guajira in the Caribbean Sea of Colombia. The three areas cover approximately 10 Km of coastline, and include morphologic units such as beaches, tidal flats, dunes and salt pools. For the realization of this research were carried out two field trips during the year 2005 within which were conducted morphologic surveys, beach profiling and sedimentological sampling. It was observed as the beaches range from intermediate to dissipative morphodynamic states that vary throughout the year depending mainly on beach profile slope and changes in grain size. Likewise, the historical analysis of the coastline showed significant erosive trends (>2 m/year). Littoral retreat affects different elements such as coastal protection structures, recreational activities and uses, national protected areas and a wide variety of ecosystems.*

**KEYWORDS:** Morphology, Beach, Coastal erosion, La Guajira.

## 1. INTRODUCCIÓN

El litoral constituye un medio de gran interés ambiental y socioeconómico en donde ocurren cambios morfológicos asociados, tanto a causas naturales como al desarrollo de diversas actividades antrópicas. En la actualidad casi dos terceras partes de la población mundial viven y dependen de las zonas litorales, lo que ha suscitado en los últimos años el creciente interés hacia éstas zonas (Anfuso, 2002). Mundialmente las altas concentraciones humanas han generado desequilibrios importantes y el significativo aumento de la explotación de las zonas litorales con fines recreativos, mineros y pesqueros, dejando atrás, el interés por la conservación de los ambientes y ecosistemas asociados.

En los últimos años la península de La Guajira, ubicada en el norte de Colombia, ha sido considerada como una zona de gran interés desde el punto de vista socioeconómico, dados los beneficios significativos derivados de la explotación minera, turismo y la pesca artesanal e industrial. Estudios realizados a lo largo de esta península (Maza y Zarate, 2001; Barrios y Bastidas, 2002; Delgado, 2002; Ordóñez, 2002; INVEMAR, 2003, 2005) indican en los últimos 50 años la ocurrencia de cambios morfológicos y tendencias erosivas significativas asociadas a causas antrópicas y naturales que ponen en riesgo el correcto desarrollo de esta región.

Un problema generalizado a lo largo de todas las costas de Colombia y en especial dentro de la península de La Guajira, consiste en la forma en que sus habitantes se enfrentan a la erosión. Por lo general esta amenaza es contrarrestada con la construcción “empírica” de obras de defensa sin ningún conocimiento previo de las características hidrodinámicas, lo cual, en la mayoría de los casos, tiende a multiplicar el problema erosivo, trayendo consigo pérdidas significativas dentro del entorno y dejando en evidencia la falta de una gestión integrada de la zona litoral.

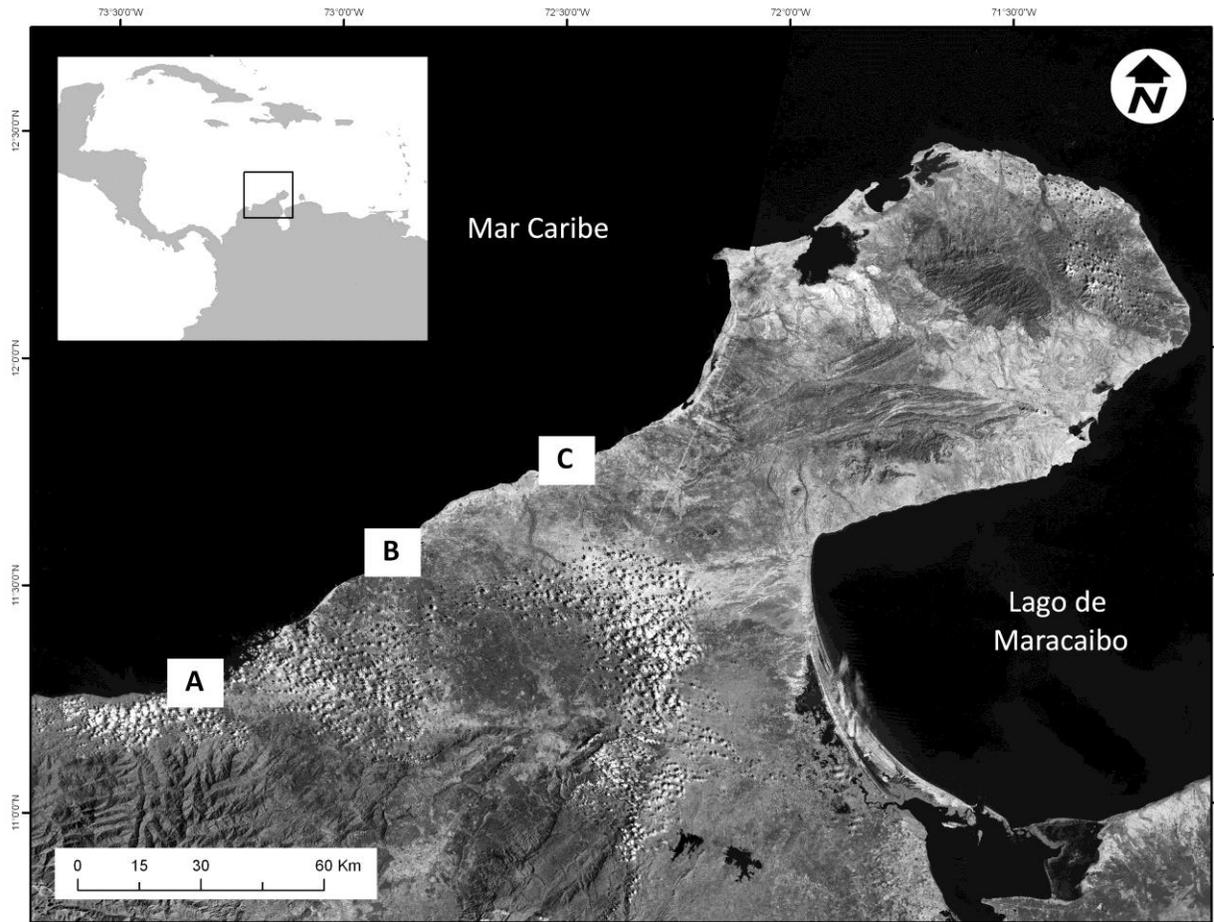
Para solventar dicho problema, se requiere de una planificación sobre bases sólidas que incluyen, en primera medida, el conocimiento de las características físicas del litoral. Dentro de este marco de referencia, se encuentra este trabajo de investigación, el cual profundiza en el conocimiento de las características morfológicas, morfodinámicas y tendencias erosivas de tres segmentos de costa en la península de La Guajira, primer paso en la comprensión de los procesos costeros asociados y herramienta útil, además de necesaria para el manejo adecuado de la zona costera.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

En la parte más septentrional de Suramérica, al norte de Colombia, se encuentra la península de La Guajira la cual cuenta con una superficie de 20.840 km<sup>2</sup> y representa el 1.8% del área total del país. Para este trabajo fueron seleccionados tres segmentos de línea de costa pertenecientes a los municipios de Palomino, Riohacha y Manaure, los cuales se caracterizan por presentar un alto grado de erosión y por haber tenido algún tipo de intervención antrópica en los últimos 50 años (Figura 1).

Los segmentos miden aproximadamente 10 Km totales de línea de costa e incluyen unidades geomorfológicas como playas, llanuras costeras, montañas, dunas y salares (Figura 1). Las playas presentan variaciones significativas en cuanto a composición y tamaño del sedimento encontrándose arenas finas hasta gruesas de origen terrígeno como biogénico, cuya selección varía de moderada a pobre. Como principal fuente de material terrígeno se tiene la vertiente norte de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), que tributa a través de las desembocaduras de los ríos

Palomino, San Salvador y Ranchería localizados dentro de las zonas de estudio y en menor proporción el material producido por la erosión de los acantilados cercanos.



**Figura 1.** Localización de las zonas de estudio. A. Palomino, B. Riohacha, C. Manaure.

Las tres áreas y en general la península de La Guajira, cuentan con un rango mareal semidiurno de tipo micromareal, con amplitudes que alcanzan máximo hasta un metro de altura e intervalos de oscilación de pleamares entre 10 y 14 horas, con mayor frecuencia cada 11.5 horas (Ingeominas, 1996; Andrade, 2000, 2002). Por su posición geográfica las tres zonas son afectadas por vientos provenientes del NE, que generan alturas de ola entre los 1,5 y 2,5 m. La corriente litoral tiende a ser paralela a la línea de costa desplazándose en un sentido general NE-SO.

### 3. METODOLOGÍA

Se realizaron dos salidas de campo durante la época húmeda (mayo) y seca (diciembre) del año 2005. En cada una de ellas y mediante un nivel de precisión, teodolito y ecosonda mono haz de 200 khz, se efectuó el levantamiento de perfiles desde la playa trasera hasta una profundidad máxima de 11 m. El tratamiento de los datos topo batimétricos permitió el cálculo de las pendientes de playa y la determinación de la morfología dominante. También se colectaron en cada perfil muestras de sedimento las cuales fueron tamizadas en el laboratorio usando una torre de tamices

dividida en intervalos de 1 Phi ( $\Phi$ ). Posterior al tamizado, se determinaron parámetros granulométricos de acuerdo con la metodología de Folk y Ward (1957).

La información del clima marítimo se obtuvo de las bases de datos *ICOADS*, *ERS-1*, *ERS-2*, *ET QUIKSCAT* y *TOPEX-POSEIDON* pertenecientes al atlas desarrollado por INVEMAR (2006a, 2006b) denominado “Climatología Marina Para Las Aguas Territoriales Bajo Jurisdicción Colombiana 8°- 19° N y 69° - 84° O”.

Para la determinación de los estados morfodinámicos de las zonas de estudio se definieron algunas variables, con base en las características de la playa, los sedimentos y el oleaje, como son: pendiente de la zona mesomaral o “*Beach FACE*” ( $\tan \beta$ ), velocidad de caída del sedimento ( $W_s$ ), altura de ola ( $H_b$ ), periodo de oleaje ( $T$ ), longitud de ola en aguas abiertas ( $L_o$ ). A partir de éstas se realizaron los cálculos del Parámetro de Similaridad del Oleaje (*Surf Similarity Parameter* – Battjes, 1974) y el Número de Dean (*Dean Number* – Dean, 1973).

El Parámetro de Similaridad del Oleaje (*Surf Similarity Parameter*  $\xi$ ), está definido por la fórmula:

$$\xi = \tan \beta / (H_b/L_o)^{0.5}$$

Puntualizando el tipo de rompiente del oleaje y clasificándola en: rompiente ondulada (Surging  $\xi > 2$ ), rompiente en voluta (Plunging  $0.4 < \xi < 2$ ), y rompiente en derrame (Spilling  $\xi < 0.4$ ) (Fredsoe y Deigaard, 1992).

El número de Dean (Dean’s Number  $\Omega$ ) es un parámetro adimensional propuesto por Gourlay (1968) y Dean (1973), el cual relaciona la altura de oleaje con las características granulométricas del sedimento. Está dado por la fórmula:

$$\Omega = H_b / W_s T$$

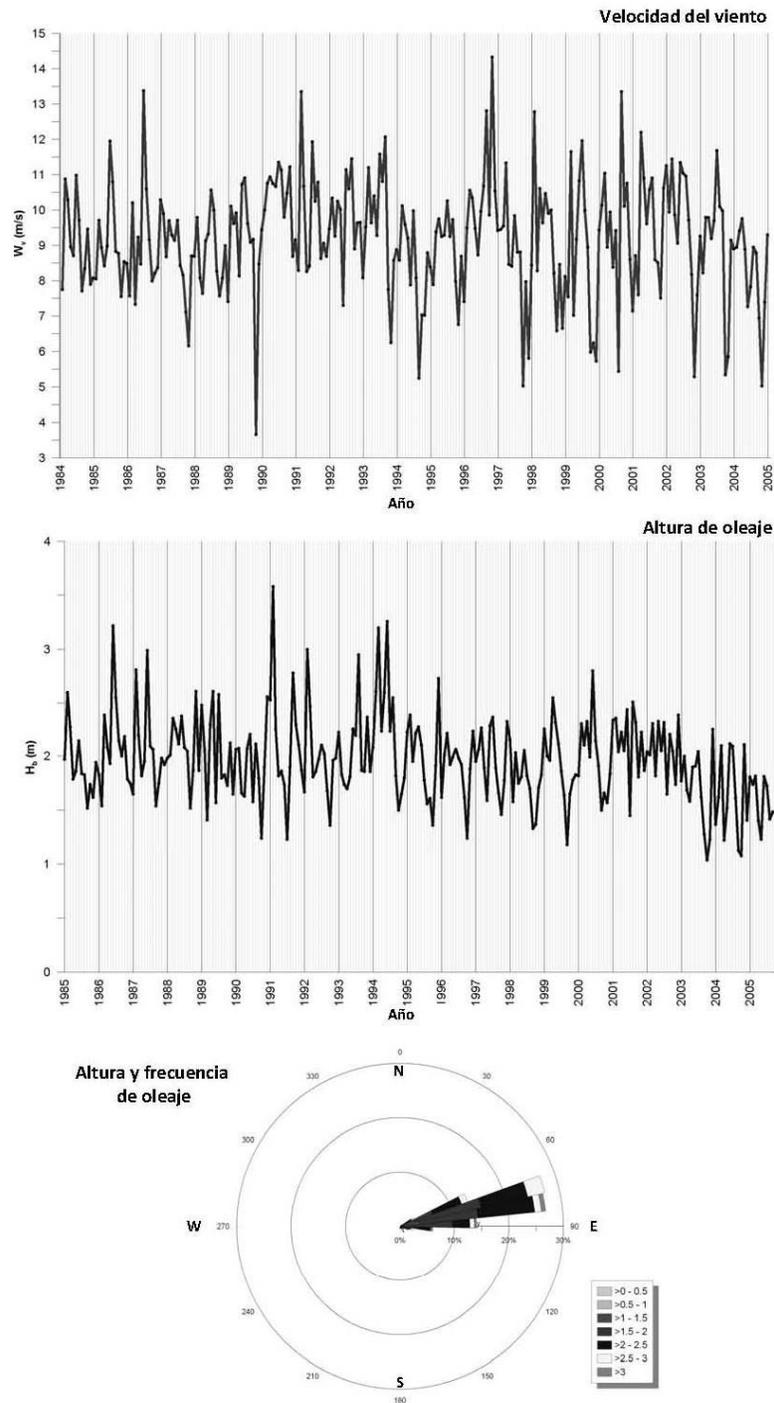
En donde  $W_s$  es la velocidad de caída de sedimento. Este parámetro define el estado morfodinámico de una playa dividiéndolas en: reflectivas ( $\Omega < 1.5$ ), con terraza de marea baja ( $\Omega \approx 2$ ), barra transversal y ondulada ( $\Omega \approx 3$ ), playa y barras rítmicas ( $\Omega \approx 4$ ), barra longitudinal a través de la playa ( $\Omega \approx 5$ ), disipativas ( $\Omega > 5.5$ ) (Wright y Short, 1984).

Para identificar las variaciones históricas en los tres segmentos de costa fueron usadas fotos aéreas de los años 1944, 1947, 1971 y 2003 georeferenciadas en un SIG a partir de puntos de control tomados en campo mediante un GPS diferencial. Una vez georeferenciadas las imágenes se generaron vectores que marcaron la línea de costa para los diferentes vuelos encontrados. Entre líneas de costa se midió la distancia de separación utilizando la aplicación del ArcGIS denominada *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) la cual permitió determinar el cambio exacto de la línea de costa y su tasa de erosión/acreción en metros por año (m/año).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CLIMA MARÍTIMO

El análisis de la información climática (1985-2005) permitió distinguir variaciones significativas de carácter estacional para la dirección del viento, altura y periodo de oleaje en la península de La Guajira. Estas tres variables se encuentran distribuidas a lo largo del año en un primer máximo de finales de diciembre hasta principios de marzo, un máximo relativo entre junio y agosto, y un mínimo de septiembre a diciembre. (Figura 2).



**Figura 2.** Valores medios mensuales correspondientes a la velocidad del viento (arriba), altura (medio) y frecuencia de oleaje (abajo) para la península de La Guajira, Caribe colombiano. Los datos corresponden a una serie de tiempo entre 1985 – 2006.

Durante el primer máximo (diciembre-marzo) la velocidad media del viento alcanza valores de hasta 10 m/s y el oleaje registra alturas de 2.4 m con periodos de 10.2 s. Entre junio y agosto (segundo máximo) los valores medios de velocidad del viento están entre los 6,8 y 8,5 m/s, las alturas de ola no sobrepasan los 2,3 m y el periodo es inferior a 10 s. Durante este mismo periodo de tiempo se registran velocidades de 14,3 m/s y alturas de ola de hasta 3 m asociadas con la época de huracanes que afecta el mar Caribe. En el periodo de valores mínimos la velocidad del viento disminuye hasta alcanzar los 6,9 m/s, las alturas de ola están entre los 1,4 – 2,2 m y los periodos decrecen hasta alcanzar valores de 4 y 5 s.

La rosa de vientos muestra que el oleaje proviene del E-NE en un 48% de los casos, del NE en un 37% y del E el 12%, el resto de las direcciones no supera el 3%, convirtiéndose las tres primeras direcciones en el patrón dominante a lo largo de toda la península de La Guajira (Figura 2). De igual forma, el análisis de la base datos indica que la mayor parte del tiempo (aproximadamente un 70% de las veces) la altura de la ola presenta valores entre 1,5 y 2,5m.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

**Palomino:** corresponde a un área con una topografía plana a levemente ondulada, limitada hacia el E por el río Palomino, al O por el río San Salvador y al S por las montañas pertenecientes al macizo montañoso SNSM. La unidad morfológica dominante corresponde a franjas alargadas de manglar paralelas a la línea de costa, se extienden desde la desembocadura del río Palomino por aproximadamente 1,5 km hacia el E. El manglar predominante es el *Rhizophora mangle* con raíces de hasta 2 m de altura y en estado activo de erosión. También se encuentra dentro de esta área una extensa llanura costera cuyo origen está asociado a procesos fluvio-marinos de erosión y sedimentación.

Las playas en Palomino tienen una amplitud menor a los 25 m. A lo largo de esta geoforma se observaron cambios uniformes, siendo la zona supralitoral, la parte del perfil que más variaciones presentó (Figura 3). Todos los perfiles realizados durante el mes de mayo revelaron en la zona supralitoral una berma bien desarrollada que en algunos casos era seguida hacia tierra por un escarpe (P1, P5). Durante este mismo periodo de tiempo en la zona mesolitoral de los perfiles P1, P2, P5 se presentaron surcos y barras hacia los 1,5 m de profundidad. Para el mes de diciembre se dio un aumento significativo en la altura y tamaño de la berma además de la desaparición de la barra en cuatro de los cinco perfiles. Los perfiles de la época húmeda como de la época seca muestran pendientes altas, registrando valores que alcanzaron los 5°. Los sedimentos encontrados registraron características similares en las dos épocas, predominando las arenas medias y gruesas con selección moderada a pobre y composición litoclástica con presencia importante de fragmentos líticos

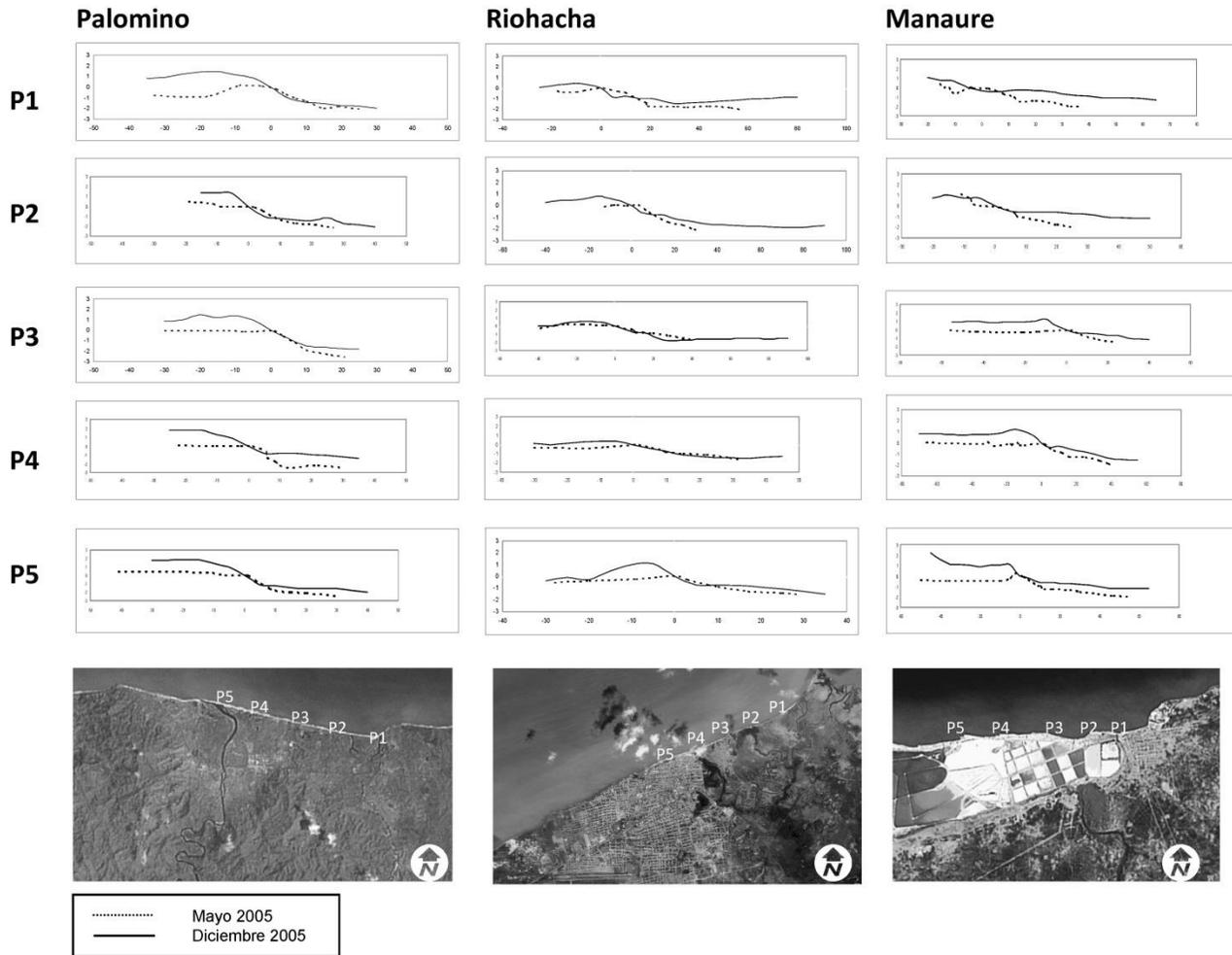
La plataforma contigua se caracterizó por ser homogénea y plana con una pendiente de hasta 6°, se mantuvo constante hasta los 10 m de profundidad. Los sedimentos asociados correspondieron al tamaño arenas muy finas, moderadamente bien seleccionadas, pertenecientes al grupo textural de las arenas lodosas. Este marcado cambio en la granulometría y composición de los sedimentos de las playas y la plataforma contigua sugiere fuentes diferentes de aportes de material (playas: erosión de acantilados / plataforma: aporte fluvial).

**Riohacha:** área ubicada dentro del denominado Valle de los Cangrejos entre la boca Calancala y la Ciénaga de Buenavista. Corresponde a la parte N-NE del río Ranchería y se caracteriza por un relieve plano con esporádicas ondulaciones asociadas a dunas, que han transgredido la zona litoral para depositarse sobre el plano deltaico. En esta área las unidades

geomorfologías muestran el dominio de procesos tanto fluviales como eólicos. El sistema deltaico del río Ranchería corresponde a una superficie plana a suavemente deprimida e inclinada hacia el mar, originada por procesos de sedimentación aluvial, que han estado acompañados por las fluctuaciones de los diferentes cauces y por procesos de origen marino. Asociados a este sistema fluvial se encuentran pantanos de manglar, que debido a la alta dinámica del sector han variado su distribución en los últimos 50 años.

En el norte de la zona se encuentra la laguna costera denominada Ciénaga de Buenavista. Este cuerpo de agua tiene un área de aproximadamente 6,4 Km<sup>2</sup> y está limitada hacia el mar por una espiga cuyo tamaño y crecimiento, a lo largo de todo el año, es favorecido por una corriente de deriva hacia el SO. Esta misma corriente puede llegar a clausurar por completo la comunicación de esta unidad con el mar produciendo hipersalinización del agua debido a los altos valores de evaporación del lugar.

Los perfiles de playa mostraron aumentos significativos de sedimento principalmente en la zona supralitoral (Figura 3). En mayo el frente de la playa se caracterizó por la presencia de una berma de hasta 1 m de altura que esporádicamente presentaba un pequeño escarpe, mientras que durante el mes de diciembre la berma aumentó de tamaño y fue notoria la formación de surcos en la zona mesomareal. Durante ambos muestreos el ancho de la playa se mantuvo constante (10 m en la zona norte hasta 30-35 m en la zona central), las pendientes registraron valores de hasta 3°, y gracias a corrientes de retorno locales se dio la formación de barras litorales en media luna constituidas principalmente por restos de conchas. Durante el primer muestreo realizado en el mes de mayo predominaron las arenas medias y finas, pobremente seleccionadas, de composición bioclástica y biolitoclástica; mientras que para el mes de diciembre éstas disminuyeron en tamaño encontrándose desde arenas muy finas hasta medias, moderadamente seleccionadas y de composición litoclástica - litobioclástica.



**Figura 3.** Perfiles de playa levantados en las área de Palomino, Riohacha y Manaure que muestran las variaciones morfológicas en las playas.

La plataforma contigua (hacia el NO) muestra en sus primeros 400 m de distancia, pendientes de hasta 4°, con ondulaciones suaves asociadas a depósitos de material calcáreo, probablemente sirven como fuente de material sedimentario. Después de esta distancia la plataforma se aplana hasta aproximadamente los 9 m de profundidad en donde vuelve a cambiar para dar paso a una serie de montículos orientados en la misma dirección (NE - SO) de la línea de costa. Los sedimentos encontrados sobre esta plataforma son finos y medios, moderadamente seleccionados de composición bioclástica y biolitoclástica.

**Manaure:** Este segmento de costa presenta la topografía más plana de las tres zonas estudiadas dentro de este trabajo de investigación. Corresponde a una línea de costa orientada E-O en donde predominan playas, dunas, salares y una extensa llanura costera.

Las salinas de Manaure son depresiones someras susceptibles a la inundación marina y se encuentran adyacentes a la línea de costa. Esta unidad se extiende de forma alargada y continua por un espacio aproximado de 3 Km limitando hacia tierra con llanuras costeras y algunas veces planos aluviales. Mediante este estudio se pudo determinar que la evolución de esta unidad geomorfológica

ha estado estrechamente ligada a un fenómeno expansivo de origen antrópico desarrollado en el sector en los últimos 50 años. Detrás de esta unidad se encuentra una llanura costera, se extiende hacia el S de forma continua por un espacio de aproximadamente 150 Km donde es interrumpida por colinas y montañas asociadas a las serranías de Cosinas, Simarua, Jarara, Macuira y Carpintero.

Manaure muestra un claro ejemplo de una playa altamente intervenida, con rellenos y adecuaciones realizadas con el fin de instalar piscinas de sal hacia el O, seguida hacia el E por una playa de forma dentada, producto de la acumulación y erosión generada por el campo de espolones construido en el área urbana de la ciudad (Figura 3). Generalmente las playas exhiben anchos que oscilan de 25 m en la zona E (campo de espolones) hasta 100 m en la zona central. Durante el mes de mayo los perfiles mostraron dunas en la playa trasera y una berma desarrollada, limitada hacia el mar por un pequeño escalón; hacia la zona infralitoral se observa en los perfiles P1, P2, P4 y P5 un incipiente surco a 1 m de profundidad. En diciembre se pierde el surco encontrado zona infralitoral y se da un aumento en la altura de las bermas y dunas, observándose algunas veces migración hasta la parte interior de las primeras piscinas. Las pendientes de playa mostraron durante el mes de mayo una tendencia a disminuir desde el O hacia el E alcanzando valores máximos de hasta 5°; en el mes de diciembre los valores de pendiente fueron siempre homogéneos estando por debajo de los 2°. Se encontró durante el mes de mayo playas compuestas de arenas muy finas a medias con selecciones pobres en la zona mesolitoral - supralitoral y moderadamente buenas en la zona infralitoral. En diciembre a lo largo del perfil predominaron las arenas finas con una selección moderadamente buena.

La información batimétrica muestra una plataforma relativamente homogénea, interrumpida hacia los -6 m de profundidad por un bajo calcáreo que se eleva hasta los -4 m. Sobre esta plataforma se encontraron facies de arenas medias y arenas lodosas de composición predominantemente bioclastica.

### 4.3 CARACTERÍSTICAS MORFODINÁMICAS

El rango mareal a lo largo de las tres zonas de estudio no presenta cambios significativos, lo que permitió catalogar todas las playas dentro de los estados intermedios y disipativos según la clasificación de Masselink y Short (1993). Los valores medios de pendiente, número de Dean y parámetro de similaridad de oleaje para las diferentes playas son presentados en la Tabla 1.

En Palomino el número de Dean mostró variaciones en el estado morfodinámico de las playas entre los meses de mayo y noviembre. Durante la primera salida las playas se encontraban en un estado intermedio, que pasó, de playa con barras rítmicas en la parte O, a playa con terraza baja hacia el E. El parámetro de similaridad del oleaje presentó a lo largo del año valores bajos, muy cercanos al límite entre rompientes en derrame y voluta.

Para el mes de mayo en Riohacha las playas se encontraron en estado morfodinámico intermedio con barras y surcos longitudinales/transversales y barras litorales rítmicas con crestas en donde se acumulaba material biogénico (conchas). En noviembre, al igual que en Palomino, prevaleció un estado disipativo. El oleaje a lo largo del año no mostró variaciones, caracterizándose por tener una rompiente de ola en derrame.

El estado disipativo fue el común denominador de las playas de Manaure durante las dos salidas de campo, nunca se observaron cambios significativos en el número de Dean. De igual forma prevalecieron condiciones de oleaje que generaban rompientes en derrame.

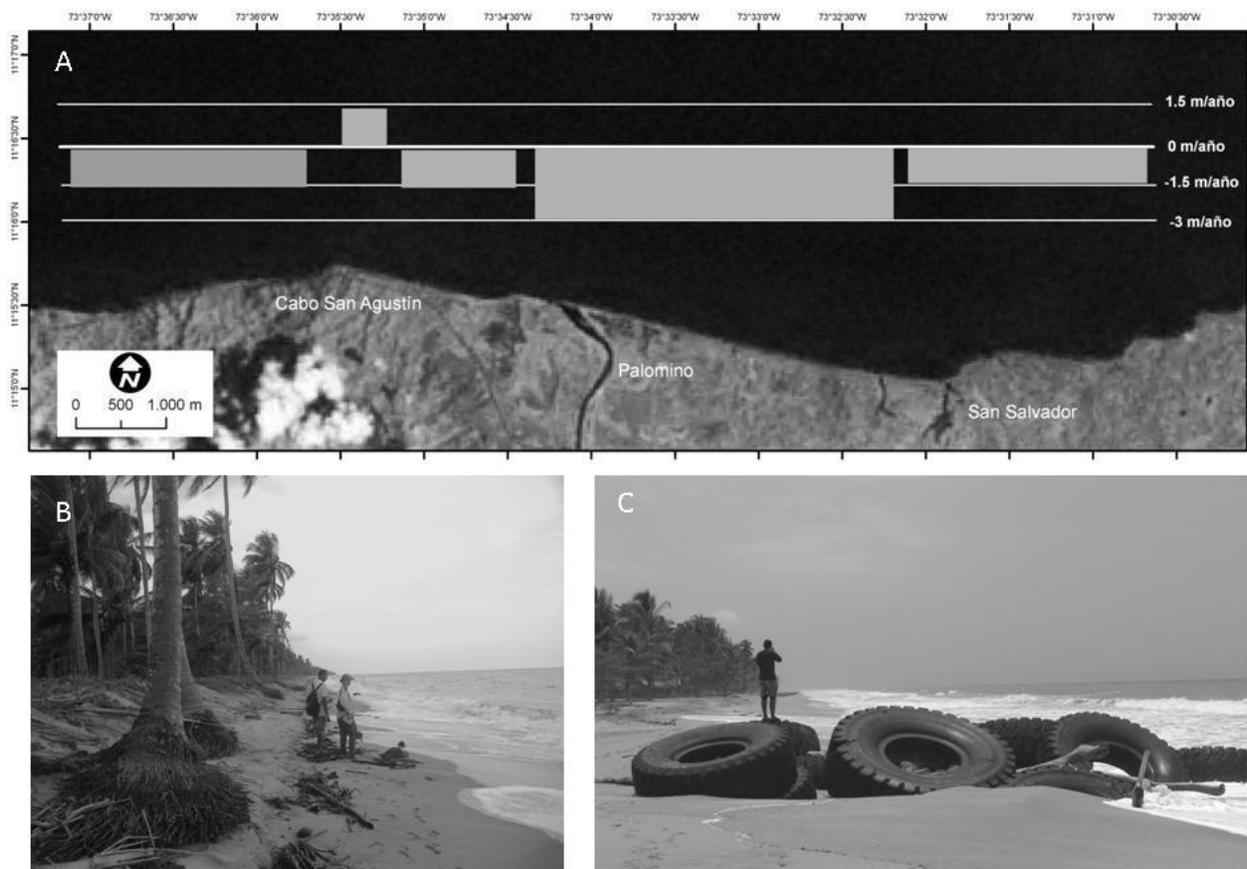
**Tabla 1.** Valores de pendiente de playa (**B**), altura de ola (**H<sub>b</sub>**), periodo de oleaje (**T**), velocidad de caída del sedimento (**W<sub>s</sub>**), Número de Dean (**Ω**), Parámetro de Similaridad del Oleaje (**ξ**).

		<b>B</b>	<b>H<sub>b</sub></b>	<b>T</b>	<b>W<sub>s</sub></b>	<b>Ω</b>		<b>ξ</b>	
PALOMINO	P1-1	0.03	1.9	5.4	0.09	4.13	disipativa	0.13	derrame
	P1-2	0.06	2.1	7.1	0.04	7.19	disipativa	0.36	derrame
	P2-1	0.06	1.9	5.4	0.08	4.68	disipativa	0.31	derrame
	P2-2	0.07	2.1	7.1	0.04	8.19	intermedia	0.41	voluta
	P3-3	0.06	1.9	5.4	0.11	3.32	disipativa	0.28	derrame
	P3-3	0.07	2.1	7.1	0.04	8.19	intermedia	0.42	voluta
	P4-4	0.07	1.9	5.4	0.07	5.15	disipativa	0.32	derrame
	P4-4	0.06	2.1	7.1	0.04	7.37	disipativa	0.37	derrame
	P5-5	0.05	1.9	5.4	0.18	1.93	disipativa	0.24	derrame
	P5-5	0.06	2.1	7.1	0.04	8.19	disipativa	0.37	derrame
RIOHACHA	P1-1	0.03	1.9	5.4	0.07	4.83	disipativa	0.14	derrame
	P1-2	0.01	2	7.1	0.05	5.97	disipativa	0.09	derrame
	P2-1	0.06	1.9	5.4	0.06	6.11	disipativa	0.27	derrame
	P2-2	0.02	2	7.1	0.02	18.25	disipativa	0.14	derrame
	P3-3	0.02	1.9	5.4	0.10	3.38	disipativa	0.12	derrame
	P3-3	0.02	2	7.1	0.02	16.47	disipativa	0.12	derrame
	P4-4	0.02	1.9	5.4	0.06	5.90	disipativa	0.10	derrame
	P4-4	0.03	2	7.1	0.01	24.08	disipativa	0.17	derrame
	P5-5	0.02	1.9	5.4	0.03	11.23	disipativa	0.08	derrame
	P5-5	0.03	2	7.1	0.01	24.08	disipativa	0.16	derrame
MANAURE	P1-1	0.04	1.9	5.4	0.02	19.33	disipativa	0.21	derrame
	P1-2	0.02	2	7.1	0.02	16.10	disipativa	0.15	derrame
	P2-1	0.08	1.9	5.4	0.01	34.80	disipativa	0.40	derrame
	P2-2	0.03	2	7.1	0.04	7.35	disipativa	0.20	derrame
	P3-3	0.01	1.9	5.4	0.02	18.32	disipativa	0.06	derrame
	P3-3	0.03	2	7.1	0.12	2.45	disipativa	0.16	derrame
	P4-4	0.02	1.9	5.4	0.01	29.00	disipativa	0.11	derrame
	P4-4	0.02	2	7.1	0.02	13.64	disipativa	0.14	derrame
	P5-5	0.02	1.9	5.4	0.02	21.75	disipativa	0.10	derrame
	P5-5	2.04	2	7.1	0.14	23.87	disipativa	0.18	derrame

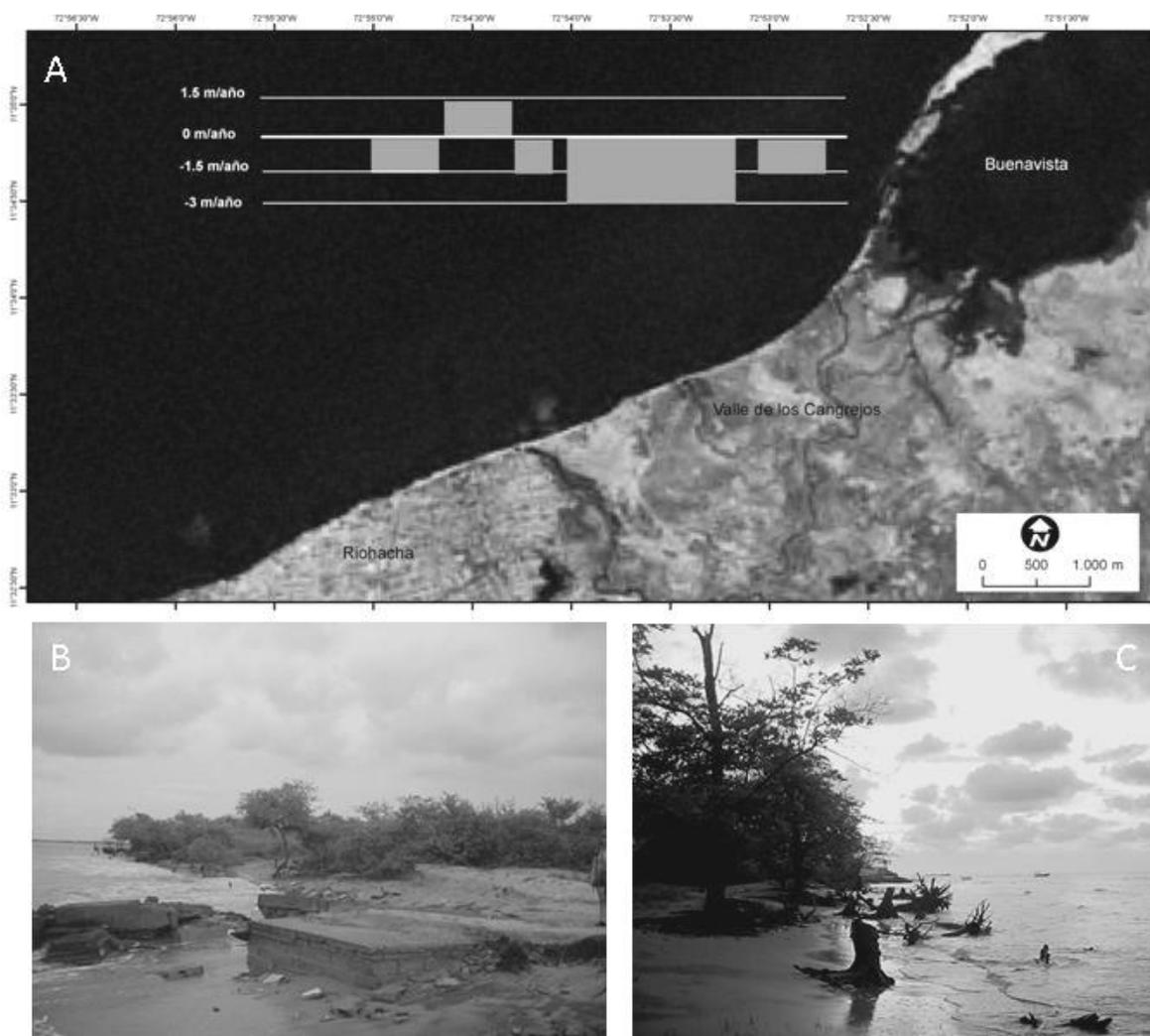
#### 4.4 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COSTA

En Palomino el análisis se hizo con base en fotografías aéreas de los años de 1944 y 2003. A lo largo de la línea de costa fueron medidos cambios de hasta -111.5 m que en un periodo de 59 años, equivale a retrocesos de 1,9 m/año (Figura 4). Consultas con los habitantes del sector permiten indicar que las tendencias erosivas aumentaron significativamente en los últimos 25 años gracias a factores ligados a la intervención antrópica, tales como modificación de cuencas, construcción inadecuada de obras de defensa y cambios drásticos en el uso del suelo.

Por estar Palomino en las laderas de la SNSM depende estrechamente de los procesos fluviales de este macizo. Las modificaciones cuenca arriba en cuanto a cobertura y uso del suelo de los ríos Palomino y San Salvador (que nacen en la SNSM), están generando desequilibrios significativos en los aportes sedimentarios favoreciendo así el incremento de la erosión litoral. De igual forma modificaciones al manglar y al bosque seco realizadas para dar paso a asentamientos humanos y cultivos asociados, han contribuido en el desarrollo de este negativo proceso. En los últimos años, y para tratar de contrarrestar los efectos de la erosión litoral, se han venido construyendo una serie de espolones (sin ningún tipo de estudio previo), que impiden el tránsito del poco sedimento proveniente de las descargas fluviales y de la erosión de acantilados cercanos (Figura 4).



**Figura 4.** Evolución litoral en el área de Palomino. A. Tasas de erosión calculadas para Palomino entre 1944-2003. B. Destrucción de árboles y playa erosionada. C. Espolón construido con llantas de camión con el fin de contrarrestar la erosión litoral.



**Figura 5.** Evolución litoral en Riohacha. A. Tasas de erosión calculadas para Riohacha entre 1947-2003. B. Destrucción de viviendas y manglar en playa erosionada. C. Destrucción de manglar cerca de la desembocadura del río Ranchería.

Para Riohacha se encontraron tendencias erosivas en el orden de los 105,2 m en 57 años que equivalen a tasas de erosión de 1,8 m/año (Figura 5). A pesar de no contar con vuelos intermedios (años '80 y '90) que permitieran una mayor exactitud a la hora de determinar el comportamiento de la costa, se pudo establecer por medio de encuestas, que a partir de la década de los '80 han aumentado los procesos de erosión. Debido a la posición de esta zona, como parte de una desembocadura de un río, es de esperarse que dentro de esta se den cambios asociados a la misma evolución del sistema. La comparación de las fotografías aéreas muestra cambios típicos de zonas deltaicas y ambientes eólicos, como la formación de espigas y migración de dunas a lo largo de la costa. Sin embargo, la tendencia erosiva en los últimos años, ha generado importantes desequilibrios, manifestándose con la transgresión de unidades geomorfológicas desde el mar hacia la tierra. Es así como en la zona intermareal se pueden encontrar manglares remanentes de zonas cenagosas al igual que la invasión de arenas en zonas de manglar.

La alta erosión al parecer está asociada a factores climáticos de índole regional que influyen significativamente de forma local en este sector de costa. Datos meteorológicos, muestran que la incidencia de fenómenos temporales ha aumentado en los últimos años y asociados a estos se han dado retrocesos significativos en la línea de costa. Reviste igual importancia el represamiento cuenca arriba del río Ranchería para tomas de acueducto y riegos el cual trae consigo pérdida del material sedimentario capaz de formar playas, favoreciendo así la pérdida de terreno en el sector.

El análisis de la evolución histórica para Manaure mostró acrecimiento de las playas de 33,7 m en 32 años que equivale a tasas de +1 m/año (Figura 6). Se ha podido determinar que la evolución de los salares en Manaure está ligada a un fenómeno de asentamiento antrópico ocurrido en el sector. En los inicios del municipio, la sal comenzó a explotarse de forma artesanal en lo que hoy se conoce como Manaure Viejo (antes cabecera municipal); con el paso de los años la explotación fue tecnificándose, convirtiendo al sector en una gran salina dividida por piscinas que fueron otorgadas dependiendo de la concesión. Este desarrollo y expansión trajo consigo el traslado del municipio al lugar donde se encuentra actualmente. El mayor auge de las salinas se vivió durante los '80 cuando Manaure se convirtió en el eje de las exportaciones de sal en el país; hacia los '90 la demanda disminuyó lo que condujo a un estancamiento y decaimiento en la producción. En la actualidad el municipio tiene como objetivo principal reactivar la minería de sal y pasar de producir 391.856 ton a 1.019.075 en 2012 (IFI Concesión Salinas 2005).



**Figura 6.** Evolución litoral en Manaure. A. Tasas de erosiones calculadas para Manaure entre 1971-2003. B y C. Destrucción de salinas a causa de la erosión. Se observan algunas llantas de camiones utilizadas como medida de protección.

## 5. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

La investigación adelantada durante los meses de mayo y diciembre del año 2005 permitió dar una aproximación a la caracterización morfológica, morfodinámicas y evolutivas recientes de tres sectores de costa ubicados en la península de La Guajira. Desde el punto de vista geomorfológico se encontró en las tres áreas un predominio significativo de unidades de costa baja representadas principalmente por playas, pantanos de manglar, campos de dunas, salares y llanuras costeras. Estas unidades han sufrido, en los últimos años, procesos evolutivos y tendencias erosivas marcadas por una cercana y significativa influencia antrópica.

El cálculo del número de Dean refleja de forma muy cercana el comportamiento morfodinámico de las playas para los tres sectores estudiados. En cuanto a las variaciones estacionales es notorio el paso de un estado intermedio observado durante el mes de mayo (época de transición climática) a un estado disipativo en diciembre correspondiente a una época climática de valores mínimos. De igual forma el parámetro de similaridad del oleaje, el cual refleja un predominio de olas en derrame, se acerca al comportamiento morfodinámico de las playas estudiadas.

La relación de estos dos parámetros morfodinámicos permitió definir, que éstos dependen principalmente de la pendiente de la playa y en menor proporción del tamaño de sedimento, mostrando así cambios asociados a las fluctuaciones estacionales de estas dos variables.

Los resultados obtenidos en esta investigación deben ser tomados como un primer acercamiento en el conocimiento de los estados morfodinámicos de estas tres zonas litorales. Son necesarios estudios más detallados en el orden de poder reconstruir con precisión el comportamiento de las playas, la distribución de celdas litorales que definen el transporte de sedimentos, las relaciones con la batimetría de fondo y ante todo mayor exactitud en lo referente a variaciones espacio-temporales.

Los cambios en la línea de costa son resultado de la interacción de diferentes procesos naturales y antrópicos que se dan en periodos de corta o larga duración. Cuando la mayoría de las variables actúan en una misma dirección, ya sea erosionando o acumulando, sus efectos son resaltados y claramente perceptibles. Este es probablemente el panorama para las tres zonas estudiadas, donde las diferentes variables actúan en una misma dirección acarreado consigo una tendencia erosiva general.

Una de las causas asociada al fenómeno erosivo observado es la variación en los balances sedimentarios. El río Palomino drena el sector N de la SNSM y los depósitos de sus propias terrazas y llanuras aluviales. El deterioro de su cuenca debido a la presión ejercida sobre ella por la tala de bosques y la ampliación de la frontera forestal, ha favorecido la erosión de sus suelos y con ellos puesto a disposición cantidades considerables de sedimentos, sin embargo, no son arrastrados continuamente hasta el mar debido a la disminución del caudal del río en varios cientos de metros cúbicos como consecuencia de estas mismas actividades, más la toma de agua para riego y cultivos. Durante los periodos de invierno, cuando el caudal aumenta, la descarga de sedimentos hacia el mar se hace efectiva, sin embargo, no se logra mantener el equilibrio de las playas debido al tamaño fino de los sedimentos, y a que en gran parte son arrastrados hacia la plataforma y el resto llevados por la corriente de deriva hacia el SO de esta localidad.

La situación del río Ranchería (Riohacha) es aún más compleja, aunque es una cuenca mucho más grande y el río de mayor caudal aparente, la intervención sobre el río ha sido igualmente mucho mayor. El caudal que actualmente llega a la desembocadura no alcanza a transportar los sedimentos necesarios para mantener el equilibrio de las playas. Aguas arriba el río es varias veces

represado para tomar sus aguas; en este proceso también quedan atrapados los sedimentos tamaño arena y sólo el material fino siguen su curso. Durante el invierno el caudal del río se duplica, pero éste debe recorrer una amplia llanura de inundación donde van quedando sedimentadas la gran mayoría de las arenas, antes de llegar hacia el mar. La situación anterior muestra cómo los aportes terrígenos provenientes de los ríos son realmente escasos en la zona, situación confirmada por los análisis composicionales de los sedimentos, y podrían llegar a ser mucho menores a medida que se realice una mayor intervención sobre las cuencas, cuya consecuencia sobre el litoral es el retroceso de la línea de costa.

La erosión de acantilados y otras geoformas costeras es otra forma de aporte sedimentario. Por las características texturales encontradas se ha estimado que la erosión de los acantilados podría representar un 5 a 10% de los sedimentos que llegan a la costa, por lo cual en ninguna de las zonas sería suficiente para lograr el equilibrio entre los aportes y las pérdidas, de manera que pueda mantenerse estable la zona litoral. Logró determinarse, dentro de las muestras colectadas, variaciones en las características físicas y composicionales del sedimento asociadas a áreas fuentes cercanas a la zona final de acumulación y que a su vez coinciden con zonas cercanas a acantilados que están siendo erosionados por el embate directo del oleaje.

De igual forma en la tendencia erosiva observada influyen las condiciones climáticas. El oleaje en los últimos años ha presentado aumentos significativos en la altura asociados al incremento de huracanes y tormentas tropicales en el Caribe, cuyos coletazos se han sentido en la península de La Guajira, por ser ésta la porción de costa Colombiana más septentrional. Los datos meteorológicos indican que en los años 80-90 se destacaron los “coletazos” del huracán Joan, registrado en octubre 1988, la tormenta tropical Iris en septiembre 1989 y el huracán Cesar en julio de 1996, que hicieron su desplazamiento por el Norte de la península de La Guajira y causaron retrocesos significativos en la costa y daños en diferentes infraestructuras en las zonas de Riohacha y Manaure.

A pesar de que los verdaderos efectos del ascenso en el nivel del mar no puedan ser estimados por la poca información con que se cuenta (en general para todo el Caribe colombiano), puede estar influyendo en el fenómeno erosivo presente no sólo a nivel de la península de La Guajira, sino de las costas colombianas y del mundo en general. Los datos acerca de las variaciones en el nivel del mar en el Caribe colombiano, muestran ascensos del orden de 6 mm/año (Restrepo y López, 2008). Estos cálculos para áreas planas a nivel del mar, e incluso muchas de ellas un poco deprimidas, significan la pérdida paulatina de grandes áreas de terreno y la extensión de las inundaciones ocurridas durante periodos de temporales.

Se considera finalmente la intervención antrópica, la cual juega un papel fundamental en la aparición e incremento del fenómeno erosivo. La principal acción realizada por el hombre es la construcción de estructuras, sean casas u obras de defensa muy cerca o sobre la zona de playa, bermas, dunas y en ocasiones hasta dentro de zonas deltaicas. Estas construcciones obstaculizan la circulación natural de material sedimentario transportado por el viento, olas, corrientes y marea propiciando desequilibrios importantes que desencadenan aumentos considerables en la erosión.

Teniendo presente todos los procesos antes mencionados, debe aclararse que las tendencias erosivas-acumulativas y variaciones en la costa se dan tanto a corto como a largo plazo. Estévez et al.(2002) consideran que muchas de las variaciones dadas dentro de la costa a corto plazo pueden ser superpuestas a tendencias que actúan a largo plazo, enmascarando de esta forma la verdadera tendencia que presenta el sector de costa estudiado cuando son analizados pocos datos. En un intervalo corto de tiempo (días, semanas, meses y pocos años) las consecuencias de eventos a corto plazo tienden a ser fácilmente observables mientras que tendencias a largo plazo no podrían ser

evidentes, a no ser que las tasas de cambio sean extremadamente altas y se establezca un detallado programa de monitoreo.

## REFERENCIAS

Andrade, C. A. 2000. Circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. Tesis Ph.D. Philosophy Univ. Wales, Menai Bridge –Wales. 248 p.

Andrade, C. 2002. El cambio relativo en el nivel del mar. 72-76. En: INVEMAR (Ed.). Definición de la vulnerabilidad de los sistemas biogeofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. Santa Marta, Colombia. 102 p.

Anfuso, G. 2002. Morfología y dinámica sedimentaria del litoral gaditano entre Chipiona y Rota. Tesis Ph.D. Univ. Cadiz, Cadiz, España. 383 p.

Barrios, O. y L. Bastidas. 2002. Hidrología y dinámica del delta del río Ranchería y posibles efectos sobre el manglar del Riño y Valle de los Cangrejos, Caribe Colombiano. Tesis de grado, Univ. de La Guajira, Riohacha, Colombia. 99 p.

Battjes, J. A. 1974. Surf similarity. 466-480. En: Proc. 14th. Int. Conf. Coastal Eng. Am. Soc. Civil Eng. Copenhagen, Dinamarca. 2099 p.

Dean, R. D. 1973. Heuristics models of sand transport in the surf zone. 208-214. En: Proc. of 1st Aus. Conf. of Coastal Eng. Sydney, Australia. 525 p.

Delgado, R. 2002. Evaluación de la estabilidad de la franja costera del departamento del Magdalena en términos de erosión y sedimentación. Tesis Geol., Univ. Nacional de Colombia, Bogotá. 121 p.

Esteves, L. S., E. E. Toldo, S. R. Dillenburg y L. J. Tomazelli. 2002. Long- and short-term coastal erosion in Southern Brazil. ICS 2002 Proc. Journal of Coastal Research, 36: 273 –282.

Folk, R. L. y W. C. Ward. 1957. Brazos River bar. A study in the significance of grain size parameters. J. Sedim. Petrol., 27: 3-26.

Fredsoe, J. y R. Deigaard. 1992. Mechanics of coastal sediment transport. Advanced series in Ocean Engineering, Vol 3. World Scientific Publishers. Copenhagen, Dinamarca. 367 p.

Gourlay, M. R. 1968. Beach and dune erosion tests. Delft Hydraulics Laboratory, Reporte M935/M936, Delf, Holanda. 135 p.

IFI – Concesión de Salinas. 2005. Salinas marítimas de Manaure-Sama, Estructura Modelo. Manaure, La Guajira, Colombia. 25 p.

Ingeominas. 1996. Atlas geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe Colombiano. Instituto de Investigaciones Geológicas, Mineras, Ambientales y Nucleares. Publicación Geol. Especial N° 21. Cartagena de Indias, Colombia. 98 p.

INVEMAR. 2003. Programa Holandés de asistencia para estudios en cambio climático: Colombia. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Santa Marta. 104 p.

INVEMAR. 2005. Caracterización de la zona costera del departamento de La Guajira. Una aproximación para su manejo integrado. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Santa Marta. 124 p.

INVEMAR. 2006. Climatologie de la vitesse et la direction des vents pour la mer territoriale sous juridiction colombienne 8° a 19° N – 69° a 84° W. Atlas ERS 1 et 2 et Quikscat, Colombie. CNRS – UMRS 8591, Laboratoire de Géographie Physique – Programa Geociencias. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Santa Marta. 128 p.

INVEMAR. 2006. Climatologie des vagues. Données ICOADS. Atlas Houle COADS Colombie. Laboratoire de Géographie Physique – UMR 8591, Laboratoire de Géographie Physique – Programa Geociencias, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Santa Marta. 94 p.

Masselink, G. y A. D. Short. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *J. Coast. Res.* 9: 785-800.

Maza E. y A Zarate. 2001. Hidroclimatología en el delta del río Ranchería, posibles efectos sobre la estructura del manglar en el brazo Riíto y valle de los Cangrejos, Caribe Colombiano. Tesis de grado, Univ. de La Guajira, Riohacha, Colombia. 89 p.

Ordóñez, C. 2002. Dinámica de la línea de costa por erosión y sedimentación, del tramo entre playa de los holandeses y punta Chuchupa, departamento de La Guajira. Trabajo de Grado, Univ. Nacional de Colombia, Bogotá. 140 p.

Restrepo J.D., López S. 2008. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South American. *Journal of South American Earth Sciences*, 25:1-21.

Wright, L. D. y Short A. D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a síntesis. *Mar Geol.* 56: 93-118.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la Corporación Autónoma de La Guajira (CORPOGUAJIRA) y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) dentro del Proyecto de investigación titulado: “Caracterización de la zona costera del departamento de La Guajira: Una aproximación para su manejo integrado”.

