

ARTÍCULO

LiDAR, ortofotografía digital y SIG en análisis geomorfológicos del litoral Caribe colombiano

LIDAR, ortho-photography and GIS in geo-morphological analysis of Colombian Caribbean Littoral

Fecha recepción: 2009-06-16 Fecha aceptación: 2009-10-28



Fernando Afanador Franco, Fafanador@cioh.org.co
Andrés Felipe Carvajal Díaz, a.carvajal@cioh.org.co
Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH,
Cartagena de Indias, D. T. y C., Colombia

Resumen

En esta investigación se presentan los resultados de la utilización de ortofotografías digitales, datos altimétricos de un sensor, trabajos de campo y Sistema de Información Geográfica, en los litorales del departamento del Atlántico (entre el tajamar occidental del río Magdalena y Puerto Velero) y en la península de Barú (departamento de Bolívar) para la determinación y mapeo de las unidades y rasgos geomorfológicos. Los procedimientos básicos incluyeron la georeferenciación de fotografías aéreas antiguas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, fotointerpretación e identificación de las diferentes unidades y rasgos geomorfológicos, generación de modelos digitales del terreno, comparaciones entre fotografías antiguas y ortofotografías recientes (2005) y trabajos de verificación y toma de información complementaria en terreno. Como resultado, en la zona de estudio del departamento del Atlántico se identificaron y especializaron 11 unidades geomorfológicas (9 asociadas a costas bajas y 2 a costas altas); mientras que en la zona de Barú se identificaron 9 unidades (5 asociadas a costas bajas y 4 asociadas a costas altas). Los resultados ponen de manifiesto, en primer lugar, la utilidad y exactitud espacial de estas dos fuentes de teledetección y de los modelos digitales del terreno de alta resolución en el análisis geomorfológico costero, así como también, el potencial de las funciones de análisis espacial del Sistema de Información Geográfica como herramientas técnicas para el entendimiento del paisaje costero y su composición dentro de un marco de administración, control y preservación de estos ambientes.

Palabras claves: LiDAR, ortofotografía digital, SIG, geomorfología litoral, Caribe colombiano.

Abstract

In this research the results from using digital ortho-photography, altimetric data of sensor, field works and Geographic Information Systems at the littoral of the department of Atlantico (between western tajamar of Magdalena river and Puerto Velero) and the Barú peninsula (department of Bolívar) are shown for the establishment and mapping of the units and geo-morphological features. The basic procedures included georeferencing of old aerial photographs of the Instituto Geográfico Agustín Codazzi, photo-interpretation and

identification of the different units and geomorphological features, digital terrain model generation, comparisons between old photographs and present ortho-photographs (2005) and verification works and taking of complementary information in situ. At the study zone of the department of Atlantic 11 geo-morphological units (9 associated to low beaches and 2 to high beaches) were identified; while at the Barú zone 9 units (5 associated to low beaches and 4 to high beaches) were identified. The results show, first of all, the spatial usefulness and accuracy of these two remote sensing sources and of the high resolution Digital Terrain Models in the geomorphological coastal analysis, as well as, the potential of the spatial functions of the Geographic Information Systems as technical tools for the understanding of the coastal landscape and its composition within an administration, control and preservation framework of these environments.

Key words: LiDAR, digital ortho-photography, GIS, littoral geomorphology, Colombian Caribbean.

Introducción

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), cumpliendo con la misión de aportar conocimiento científico, desde 1995 a través del Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras (AMIZC) comenzó a realizar estudios tendientes a definir el límite de los bienes de uso público costeros y el límite de la Autoridad Marítima Nacional (DIMAR), utilizando diferentes técnicas cartográficas basados en la caracterización de las zonas costeras, pero fue sólo hasta el año 2005, con la adopción de un nuevo marco conceptual así como con la introducción de nuevos procedimientos y herramientas en el área de la Geomática, como el sensor aerotransportado LiDAR (Light Detection And Ranging) y la utilización de fotografía aérea digital, que se logró establecer una forma unificada y técnicamente sustentada, el límite de estos bienes de uso público y de la jurisdicción de la Autoridad Marítima Nacional con un nivel de exactitud aceptable y alto nivel de detalle.

Dado el nivel de detalle y exactitud posicional de estas herramientas tecnológicas, así como también la necesidad de efectuar análisis geomorfológicos que

permitieran la identificación de los terrenos desde el punto de vista de sus características físicas, que se encuentran bajo la jurisdicción de la Dirección General Marítima (DIMAR), se implementó la utilización de estas modernas tecnologías de teledetección, enfocadas hacia la realización de análisis geomorfológicos que identificaran unidades y rasgos geomorfológicos en dos zonas específicas del litoral Caribe colombiano.

En este sentido, debido a la necesidad de identificar de forma clara y exacta, el límite de los bienes de uso público que se encuentran bajo la jurisdicción de la DIMAR en los litorales colombianos, el problema a resolver fue la falta de información detallada sobre estos terrenos, su formación, sus procesos y su dinámica, de tal forma que se cuente con suficientes elementos técnicos y científicos que permitan sustentar la naturaleza y características de estos terrenos. Por estas razones, la solución propuesta fue la realización de análisis geomorfológicos de estas zonas, con base en información de sensores aerotransportados (LiDAR y ortofotografías digitales), tecnología SIG y trabajo de campo.

El resultado final de la investigación consistirá en una clasificación y espacialización al detalle, de las formas terrestres del litoral en las zonas de estudio, en términos de unidades y rasgos geomorfológicos de tal forma que se comprenda, desde un punto de vista técnico, su formación, procesos y dinámica.

Las áreas de estudio correspondieron, en primer lugar, a la península de Barú, en el departamento de Bolívar, Caribe colombiano, con una área de 7572.9 ha, y una extensión de línea de costa de 163.6 km. Se encuentra ubicada entre las coordenadas 10° 18' 15.1" latitud Norte y entre los 75° 42' 16" longitud Oeste del meridiano de Greenwich.

La segunda área de trabajo corresponde al litoral del departamento del Atlántico, Caribe colombiano, entre el tajamar occidental del río Magdalena y el sector conocido como Puerto Velero, con extensión de línea de costa de 54.8 km. Se encuentra ubicado entre las coordenadas 11° 06' 24" latitud Norte y entre los 75° 02' 53" longitud Oeste (figuras 1, 2 y 3).

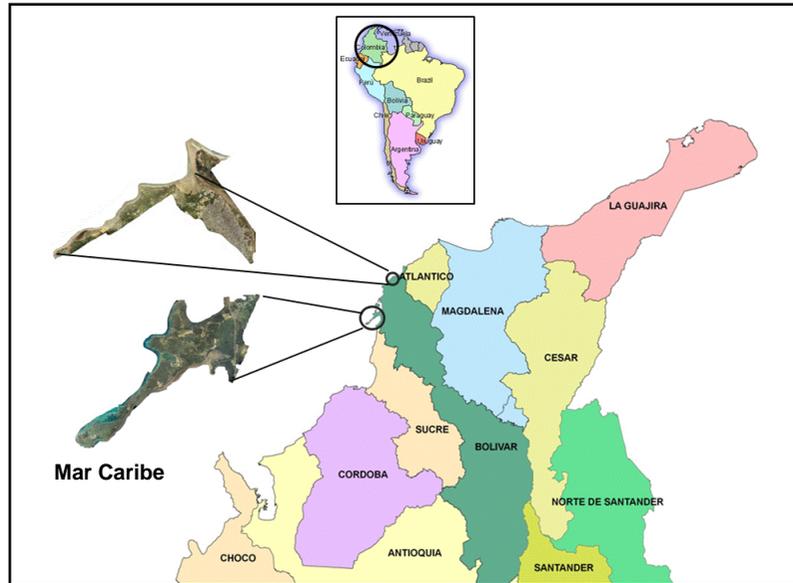


Figura 1. Localización continental y nacional de la península de Barú en el departamento de Bolívar y el litoral entre el tajamar occidental del río Magdalena y Puerto Velero, departamento del Atlántico, Caribe colombiano.

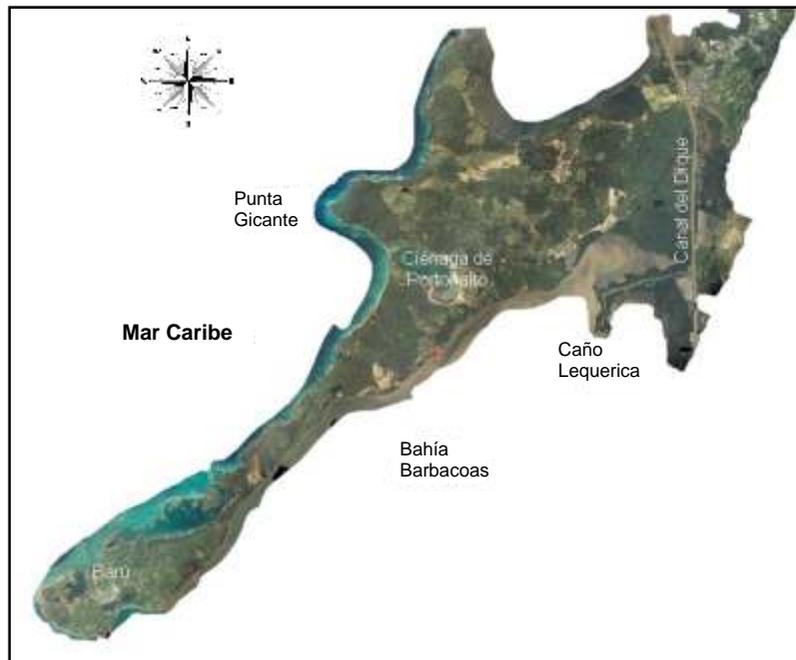


Figura 2. Ortofotomosaico DIMAR-CIOH del año 2005 correspondiente a la península de Barú.

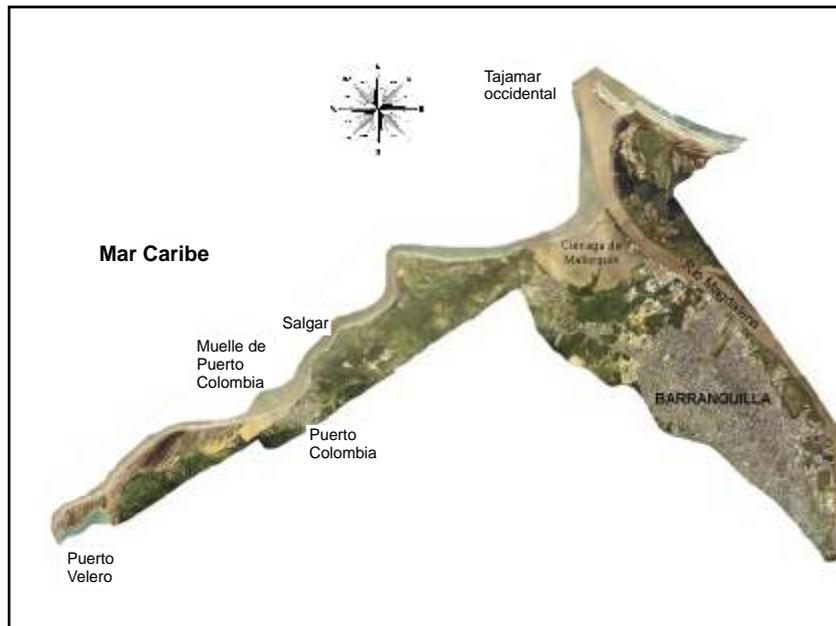


Figura 3. Ortofotomosaico DIMAR-CIOH del litoral entre el tajamar occidental del río Magdalena y Puerto Velero, departamento del Atlántico, Caribe colombiano.

En términos generales, la geomorfología consiste en el estudio de las características que conforman la superficie terrestre y sus relaciones fundamentales con la Geología. En el ámbito costero, el análisis geomorfológico debe proporcionar una visión espacial de los procesos costeros y del comportamiento potencial del sistema costero, más desde el punto de vista cualitativo que cuantitativo [1].

El análisis y clasificación de las formas terrestres es básico para el estudio del terreno debido a que éstas pueden ser definidas como características formadas por procesos naturales con una composición definida y un rango de características físicas y visuales, de tal forma que los procesos naturales, las rocas, los suelos, el agua y la vegetación, ejercen influencia sobre cada una para formar un equilibrio natural particular [2].

Tradicionalmente, en los estudios de geomorfología de los litorales se han utilizado las técnicas topográficas y de GPS para el levantamiento de los datos geométricos con sus correspondientes limitaciones, especialmente en lo relacionado con el dinamismo de los sistemas litorales [3]. Una de las múltiples técnicas utilizadas en la clasificación y análisis geomorfológicos de terrenos a escala pequeña

y regional, es la fotografía aérea con claves fotográficas (*photographic keys*). Esta técnica se basa en el principio de que los mismos atributos del terreno se presentan de forma similar bajo condiciones ambientales aproximadamente iguales, dando como resultado, una rápida interpretación y clasificación del terreno.

No obstante lo anterior, con el auge del desarrollo tecnológico, se han incorporado nuevas fuentes de información que posibilitan la realización de análisis cuantitativos y la modelación de algunos procesos clave de la geomorfología litoral, resultando fundamental para el desarrollo de estas labores, los modelos digitales del terreno y los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) [4].

Como consecuencia de lo anterior, se ha generalizado el uso complementario de fuentes de información como las fotografías aéreas tradicionales y las imágenes de satélite. Sin embargo, dado que los procesos costeros ocurren en un espacio tridimensional, se hace necesario que las fuentes proporcionen este tipo de información. En este sentido, el descenso en los precios de los programas de fotogrametría digital y la aparición de sensores aerotransportados tipo LiDAR, ponen a disposición

fuentes de datos en tres dimensiones del mayor interés en geomorfología, y especialmente en geomorfología litoral [4].

El LiDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) o escaneo láser, es un sistema de sensoramiento activo, que permite efectuar mediciones a distancia sobre la superficie terrestre, a partir de un sensor dispuesto en el interior de una aeronave. El sensor obtiene puntos tridimensionales (x, y, z), a partir de los cuales se pueden generar Modelos Digitales de Elevación (DEM). La tecnología se basa en el principio LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), que amplifica la luz por simulación de emisión y radiación.

Por otra parte, la fotografía aérea empleando cámaras digitales, ha sido una técnica relativamente reciente, que ha encontrado en la información obtenida con el sensor LiDAR, un buen nivel de complementación, especialmente para la modelación y análisis de terrenos. Sin embargo, la principal ventaja de la fotografía aérea digital es la representación pictórica de grandes extensiones del terreno, lo que facilita en gran medida, las labores de fotointerpretación y análisis del terreno por parte de los técnicos y profesionales de diversas áreas del conocimiento.

De forma complementaria, la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite unir información de bases de datos espaciales y tabulares con la cartografía, permitiendo a los usuarios visualizar patrones, relaciones y tendencias, proporcionando de esta manera, una nueva perspectiva para el análisis de datos que no pueden ser vistos en una tabla o en una lista.

Materiales y métodos

El desarrollo de la investigación comprendió la ejecución de las siguientes etapas:

- Conformación de la base cartográfica digital consistente en las ortofotografías digitales del año 2005 con resolución espacial de 25 cm para las zonas de estudio. De manera complementaria, para los datos de alturas del terreno y generación de los modelos digitales del terreno y mapas de pendientes, se contó con los datos LiDAR en las zonas de estudio a una densidad aproximada de 25 puntos/m².

- Georeferenciación de fotografías aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) de años anteriores a 2005 (tabla 1). Estas fotografías fueron georeferenciadas tomando como base las coordenadas de puntos de detalles de las ortofotografías digitales (figuras 4 y 5).
- Fotointerpretación de unidades y rasgos geomorfológicos sobre las ortofotografías digitales y las fotografías aéreas antiguas del IGAC complementada con el análisis de 14 modelos digitales del terreno y los respectivos mapas de pendientes. La fotointerpretación, especialmente sobre las fotografías del IGAC permitió, en algunos casos, identificar claramente el estado inicial o de poca intervención (tanto natural como antrópica) de algunas unidades y rasgos que al año 2005 (fecha de las ortofotografías) se encontraban con un alto grado de intervención, especialmente de tipo antrópica y, adicionalmente permitió también identificar la evolución de la línea de costa en el lapso de tiempo de acuerdo con la información disponible a la fecha. Como resultado de esta etapa, se identificaron principalmente las macrounidades geomorfológicas y se detectaron los cambios experimentados por algunas unidades, identificadas en las fotografías aéreas.
- El trabajo de campo consistió en la verificación de las unidades y rasgos fotointerpretados y la toma de información fotográfica (fotografías terrestres) complementaria y descriptiva de éstas. Posteriormente se efectuó el ajuste sobre la base cartográfica digital de las unidades y rasgos geomorfológicos identificados.

Resultados

Para el litoral del departamento del Atlántico, entre el tajamar occidental del río Magdalena y el sector conocido como Puerto Velero, se identificaron once unidades geomorfológicas, a través de la fotointerpretación del ortofotomosaico del año 2005, los modelos digitales del terreno, los mapas de pendientes obtenidos de los datos LiDAR y el trabajo de campo correspondiente (figura 6). Para la península de Barú se identificaron nueve unidades geomorfológicas, igualmente, a través de la fotointerpretación de ortofotografías del año 2005, fotos aéreas del IGAC y los modelos digitales de terreno (figura 7).

Tabla 1. Relación de las fotografías aéreas del IGAC utilizadas para la fotointerpretación geomorfológica.

No. Vuelo	Año	Escala	No. Fotografías	Sector
C-2287	1987	1:7800	296, 297, 298, 299	Puerto Velero – Puerto Colombia
C-986	1961	1:10000	216, 217, 218, 219, 220	Punta Sabanilla – Ciénaga de Mallorquín (figura 4)
C-2590	1996	1:10700	01, 02, 031, 032, 033	Puerto Colombia – Pradomar
C-2586	1996	1:30000	059, 063	Puerto Colombia – Pradomar
C-987	1961	1:20000	138, 139, 140, 141, 142, 153, 155, 156	Isla de Barú
C-1483	1974	1:10000	124, 125, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133	Isla de Barú (figura 5)
C-1845	1978	1:58000	80, 811, 821	Isla de Barú
C-2304	1987	1:27400	091, 101, 131, 141, 151, 161	Isla de Barú

Considerando la relación continente-océano y la relación de altura de estos dos ambientes, se identificaron dos tipos básicos de costas: bajas y altas. Las costas bajas corresponden a zonas que se encuentran a escasa o nula altura sobre el nivel del mar; mientras que las costas altas corresponden a las áreas en donde las mesetas o montañas tienen contacto con el océano.

Unidades geomorfológicas asociadas a costas bajas. Las unidades geomorfológicas asociadas a costas bajas que se identificaron para el litoral del departamento del Atlántico fueron: espiga, barras litorales, playas, zonas de manglar, lagunas costeras, ciénagas, planicie aluvial, llanura costera y cuerpos de agua.

Por otra parte, en la península de Barú, se identificaron cinco unidades geomorfológicas asociadas a costas

bajas: playón antiguo, lagunas costeras, zonas de manglar, planos aluviales y playas.

Zonas de manglar. En la zona de estudio del litoral del departamento del Atlántico, se encontró una amplia zona de manglar desarrollándose más en los sectores de la ciénaga de Mallorquín, ciénaga los Manatíes, ciénaga de Balboa y el sector de Puerto Velero. También se encontraron zonas de manglar en cercanías al municipio de Puerto Colombia y Salgar, debido a la presencia de canales de aguas dulces y la interacción de agua salada, la cual ha desarrollado este tipo de vegetación. En general, estos ecosistemas presentan acumulaciones de materia orgánica y sirven de protección a la zona costera.

Gran parte de este manglar, como en el caso de las ciénagas los Manatíes y Mallorquín, ha sido fuertemente intervenido hasta el punto de desaparecer del todo por las construcciones que se han desarrollado en estas zonas (figura 8).



Figura 4. Fotografías aéreas IGAC vuelo C-986 del año 1961 comparadas con el ortofotomosaico del año 2005 para el sector de Punta Sabanilla hasta la Ciénaga de Mallorca, departamento del Atlántico.

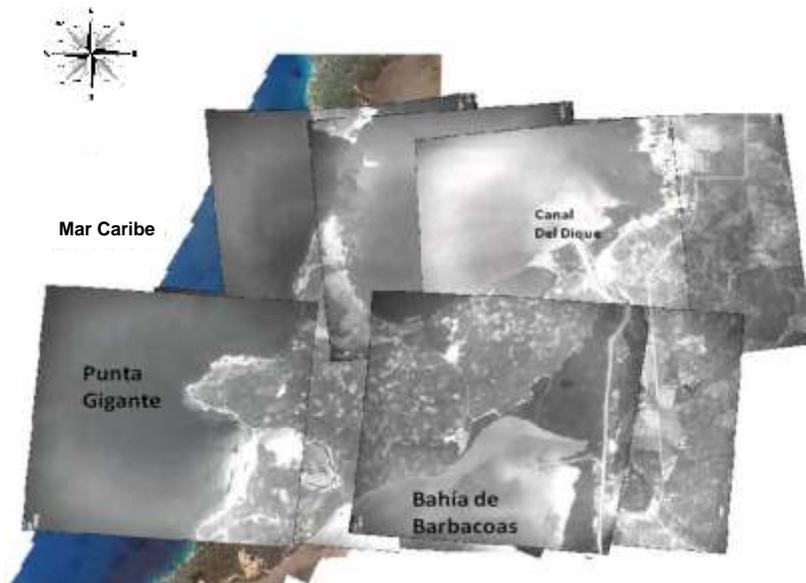


Figura 5. Fotografías aéreas IGAC vuelo C-1483 del año 1974 comparadas con el ortofotomosaico del año 2005 para la isla de Barú, departamento de Bolívar.

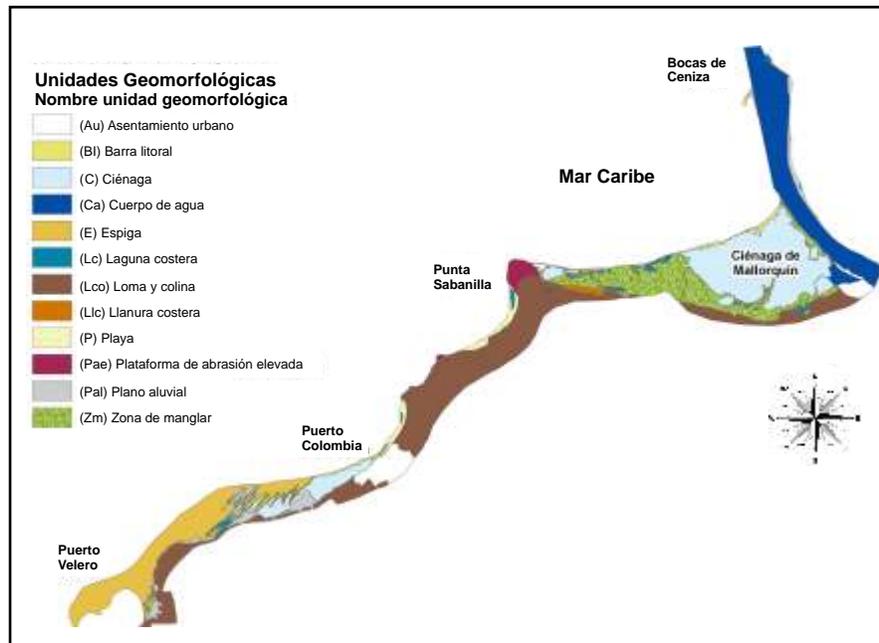


Figura 6. Unidades geomorfológicas identificadas para el litoral del departamento del Atlántico, sector comprendido entre el tajamar occidental del río Magdalena y el sector de Puerto Velero.

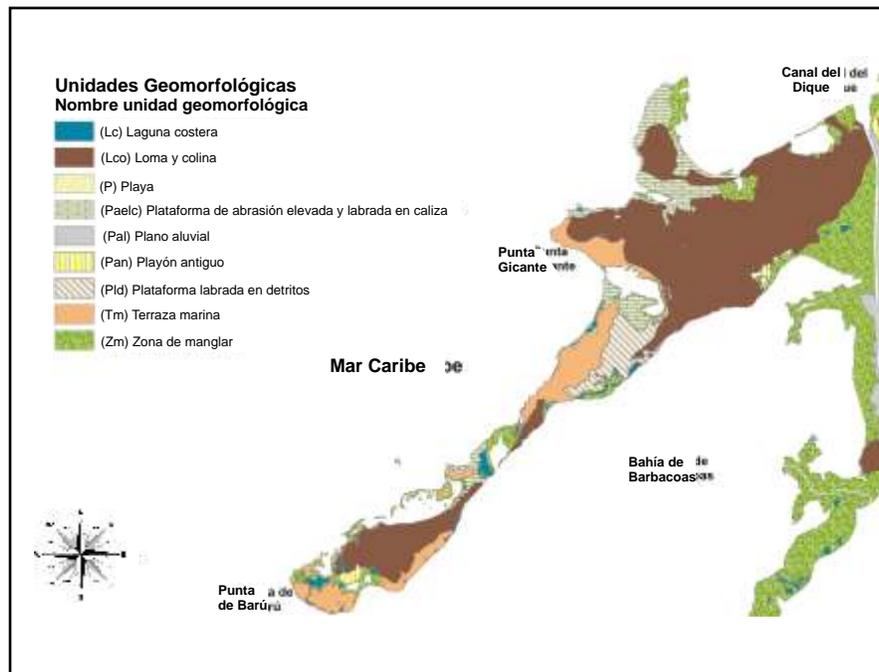


Figura 7. Unidades geomorfológicas identificadas para la península de Barú, departamento de Bolívar.



Figura 8. Zona de manglar en la ciénaga los Manatíes (polígonos de color verde). Nótese que la fuerte intervención antrópica del sector ha deteriorado, en gran proporción, el sistema de manglar de la ciénaga.

En la península de Barú se identificaron las zonas de manglar que se muestran en la figura 9. Es de resaltar que el manglar de la ciénaga de Portonaito crece bordeando la ciénaga. Se define claramente la sucesión existente entre mangle negro (*Avicenia germinans*) y mangle rojo (*Rhizophora mangle*), en donde este último forma una delgada franja. Detrás de la anterior franja y hacia los costados nororiental y

suroriental de la ciénaga, se encuentran grandes playones salinos que en algunos casos tienen mangle negro en forma de parches. El estado de los manglares en general, para esta ciénaga, no presenta grandes problemas a excepción de algunos sitios en los cuales se aprecian talas. El tamaño o altura de estos árboles oscila entre 2 y 6 m aproximadamente.

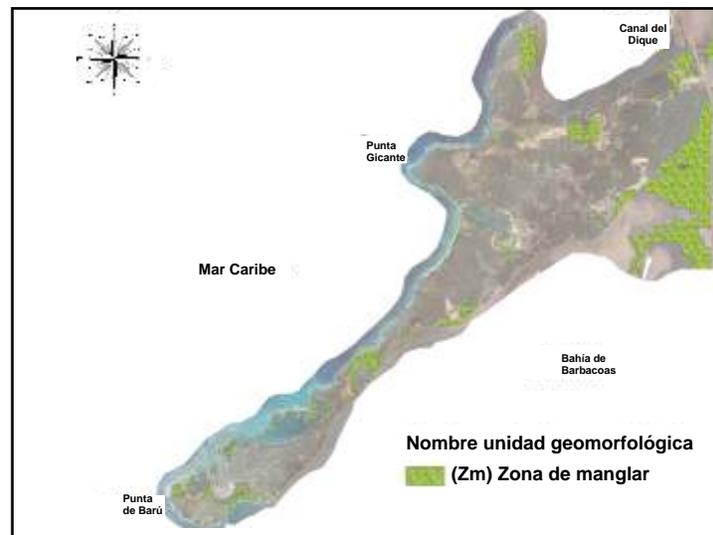


Figura 9. Zonas con desarrollo de manglar (polígonos de color verde) en el sector de la península de Barú.

Lagunas costeras y cuerpos de agua. Las lagunas costeras están desarrolladas básicamente en el sector de Puerto Colombia, Salgar y Puerto Velero debido a la gran espiga que atrapa las aguas de estas lagunas. De acuerdo con las épocas del año, éstas se encuentran totalmente inundadas o secas.

La ciénaga de Mallorquín con aproximadamente 800 hectáreas (figura 10), funciona como una laguna costera después de que en 1935, con la construcción de los tajamares, se modificara el régimen estuarino dada su conexión y dependencia permanente del río Magdalena. Con esta circunstancia, comenzaron los problemas para el cuerpo de agua, pues el intercambio necesario de aguas para el equilibrio, se rompió causando graves consecuencias a la vida acuática que alberga y la acumulación de contaminantes en niveles

no aceptables y procesos de sedimentación importantes.

Sin embargo, ese hecho no constituyó el único factor de intervención sobre el ecosistema lagunar que haya influido de manera negativa en su estabilidad. El sector de las Flores fue utilizado como descarga de residuos sólidos de la ciudad de Barranquilla, funcionando así como un botadero de estas sustancias.

La ciénaga los Manatíes al igual que la ciénaga de Mallorquín, se encuentran en un periodo de deterioro debido al retroceso de su zona de manglar producto de la actividad humana en el sector. Posee un área aproximada de 25 hectáreas y se encuentra retenida por una gran barra litoral.

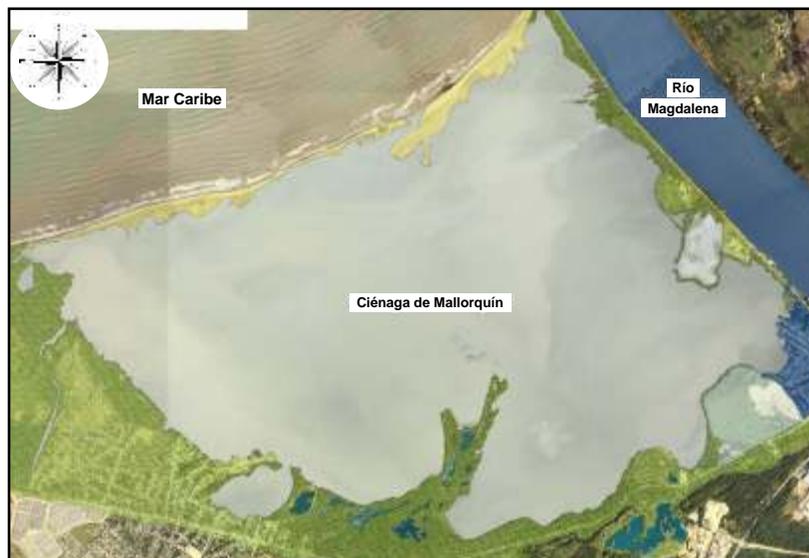


Figura 10. Ciénaga de Mallorquín (polígono en color azul claro) con base en el ortofotomosaico del año 2005.

La ciénaga de Balboa se encuentra ubicada en inmediaciones del municipio de Puerto Colombia, con una extensión aproximada de 181 hectáreas. Se encuentra retenida por una gran barra litoral y presenta una zona de manglar ampliamente desarrollada.

De forma similar, en la península de Barú, la delimitación de estas unidades se llevó a cabo con base en el ortofotomosaico del año 2005 (figura 11). En el área de la península de Barú, se encuentran las ciénagas Honda, Coquito, Vásquez y Portonaito. La ciénaga Honda, localizada en el costado oeste la población de Pasacaballos, muestra una forma alargada en dirección E-W, con una extensión aproximada de 1400 m. Está separada de la bahía de Cartagena por un cordón o barra arrecifal de 1250 m de longitud aproximadamente, colonizada por manglar.

Al oeste de la anterior, se localiza la ciénaga de Coquito, con una forma alargada y amplitud promedio de 600 m, que se encuentra rodeada por manglar y se comunica con la Bahía de Cartagena a través de una boca ubicada al oeste. En la parte más septentrional de la península se encuentra la ciénaga de Los Vásquez, enmarcada por terrazas marinas y ligeramente

bordeada por una faja estrecha de manglar. Presenta forma alargada, en dirección noroeste en una longitud de 1250 m y amplitud de 250 m aproximadamente.

En la parte sureste de la península, se encuentra la ciénaga de Portonaito, con una extensión de 2500 m y una amplitud de 1250 m aproximadamente. Su comunicación con el mar se efectúa a través de una pequeña boca, actualmente controlada por espolones. Al igual que la anterior, se encuentra enmarcada por terrazas marinas y rodeada, en algunos sectores por manglar.

Por otra parte, las ciénagas interiores del sector de Playa Blanca se encuentran en pésimas condiciones, principalmente la ciénaga localizada hacia el sur del sector, que se encuentra convertida en un basurero, en proceso de colmatación y putrefacción que hacen que las aguas adquieran un color café. En esta misma zona, las ubicadas más hacia el norte, algunas presentan terraplenes, mientras que otras fueron rellenadas y posteriormente construyeron viviendas sobre ellas. Hacia la parte central de la península, se encuentra la ciénaga el Mohán, con comunicación con la bahía de Barbacoas y rodeada en su totalidad por una amplia zona de manglar.

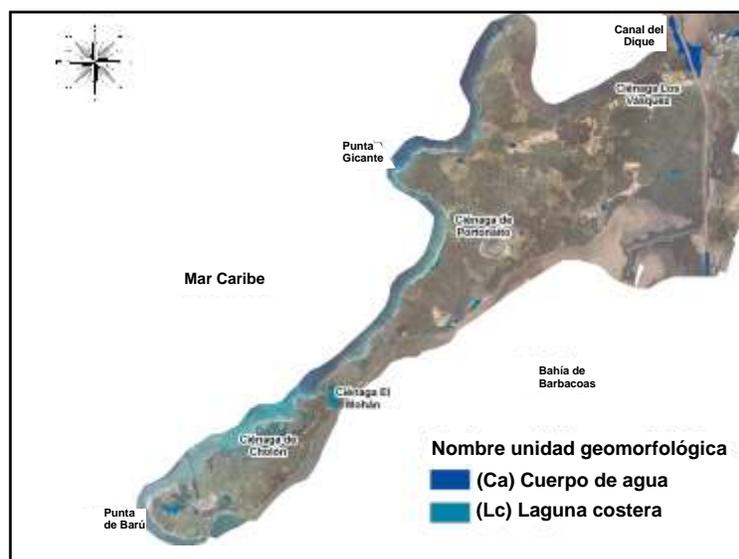


Figura 11. Lagunas costeras y cuerpos de agua (polígonos en color azul) con base en el ortofotomosaico del año 2005.

La ciénaga más extensa en esta zona es la de Cholón, con una longitud de 3000 m y una amplitud de 1000 m aproximadamente [5]. Se encuentra enmarcada por terrazas coralinas de 1 m de altura y rodeada casi en su totalidad por una franja de manglar. Está separada del mar por una zona de terrazas en forma de espiga, actualmente intervenida con la construcción de viviendas.

En la parte sur de la península, se encuentra la ciénaga de Barú, la cual presenta comunicación con la ciénaga del Pelao. Se encuentra rodeada por parches de terrazas y zonas de manglar. En términos generales se observaron una serie de ciénagas menores, de poca extensión y forma irregular, algunas de ellas con comunicación directa con el mar y rodeadas de manglar; distribuidas principalmente hacia el costado este de la península. Finalmente, a lo largo del Canal del Dique y sur de la bahía de Barbacoas, las ciénagas se encuentran como cuerpos aislados de forma irregular, con longitudes variables entre 750 y 2500 m, igualmente bordeadas por franjas de manglar.

Espiga, barra litoral. Este tipo de unidad corresponde a la gran espiga que se desarrolla en el sector de Puerto Velero, en el litoral del departamento del Atlántico (figura 12), así como las grandes barras litorales que se desarrollan en el municipio de Puerto Colombia, sector ciénaga de Los Manatíes y las barras que se encuentran en inmediaciones de la ciénaga de Mallorca. En la zona cercana al tajamar occidental se encontró la formación de una isla barrera la cual está creciendo por los sedimentos que aporta el río Magdalena.

Playas. El litoral del departamento del Atlántico posee franjas de playa que van hasta los 200 metros; se trata de playas de arenas medias, algunas con minerales tales como cuarzo feldespato y con fragmentos de material calcáreo que ha sido transportado por las corrientes.

En la zona de estudio se pueden apreciar bermas de playa discontinuas y de poca altura (barra litoral formada en inmediaciones de la ciénaga los Manatíes, ciénaga de Balboa y espiga de Puerto Velero), que son rebasadas por mareas muy altas o durante tormentas. En general, gran parte de las playas han sido afectadas por procesos de una alta erosión litoral y sólo en

algunos sectores, la construcción de una serie de espolones distribuidos de forma irregular, ha disminuido un poco el retroceso de la línea de costa.

Las playas desarrolladas en el sector de Puerto Velero se encuentran asociadas a los procesos de formación y desarrollo de la gran espiga, la cual fue descrita en el ítem anterior. El aporte de sedimentos de estas playas es producto de la alta sedimentación proveniente del río Magdalena. Se trata de amplias playas de material grueso y presencia de cuarzo y feldespato.

Entre tanto, las playas desarrolladas en el sector de la ciénaga de Balboa se encuentran asociadas a la formación y existencia de la barra litoral que retiene las aguas de dicha ciénaga.

En el sector de las ciénagas los Manatíes y la ciénaga de Mallorca, las playas también se encuentran asociadas a la formación y existencia de la barra litoral que retiene las aguas de dichas ciénagas. Se trata de playas de arenas medias con rastros de retroceso de línea de costa debido a la acción del oleaje.

Las playas que se encuentran en el sector de Salgar son de arenas medias con pendientes fuertes, con minerales como cuarzo feldespato y que han sido erosionadas a través del tiempo debido al fuerte oleaje del sector. A pesar de que presenta la construcción de espolones, éstos no han sido muy eficaces. Los análisis de fotointerpretación y de los modelos digitales del terreno, permitieron establecer claramente el sitio en donde se presenta el cambio en la forma fisiográfica, lo que se constituye en un elemento indicador de la extensión de estas playas hacia el continente (figuras 13 y 14).

La playa que se encuentran en el sector del municipio de Puerto Colombia, está compuesta de arenas medias con pendientes fuertes y minerales como cuarzo feldespato. Han presentado una fuerte erosión a través del tiempo debido al fuerte oleaje del sector. Por esta razón, se presenta la construcción de espolones y un malecón. Los análisis de fotointerpretación, modelos digitales del terreno y mapa de pendientes de esta zona, permitieron establecer claramente el cambio fisiográfico, también como elemento indicador de su extensión hacia el continente (figuras 15 y 16).

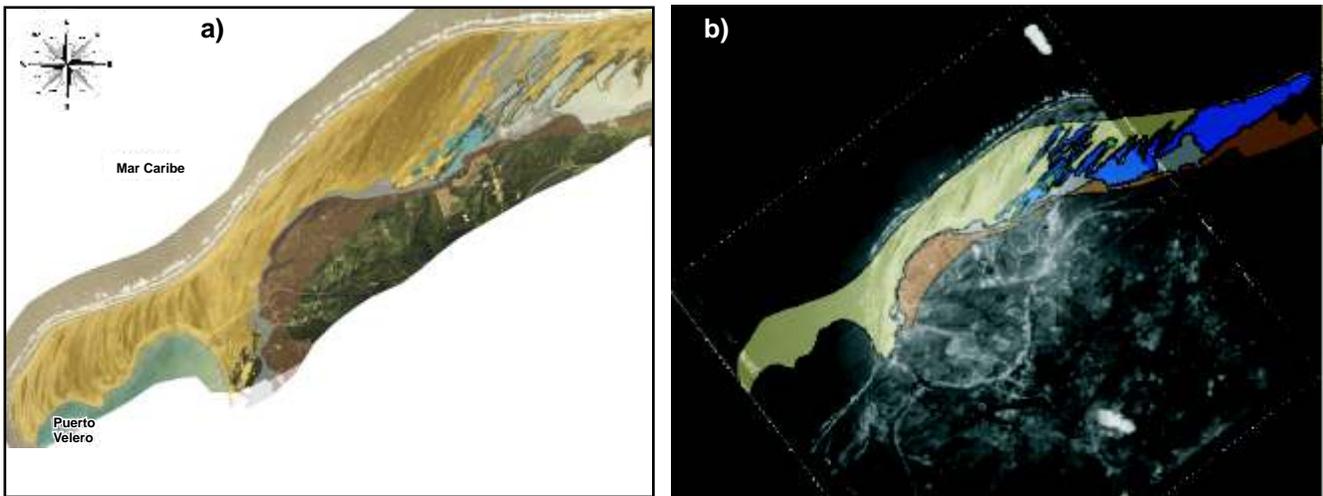


Figura 12. a. Gran espiga del sector Puerto Velero con base en el ortofotomosaico del año 2005. b. De acuerdo con la fotointerpretación de las fotografías áreas del IGAC del vuelo C-2287 del año 1987, se observa claramente cómo ha sido el proceso de formación de la espiga. Durante los trabajos de campo, se observaron los antiguos cordones de antiguas líneas de costa que ha presentado la espiga.

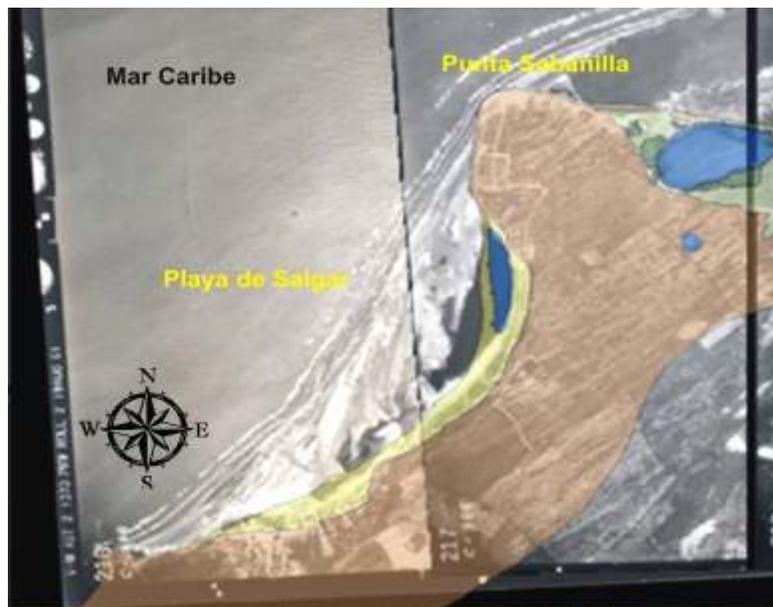


Figura 13. Fotografías aéreas del IGAC del año 1961 comparadas con el ortofotomosaico del año 2005. Se observa claramente la gran erosión y transformación de la playa (polígono de color amarillo) durante un periodo de 44 años (0.8 km de retroceso).

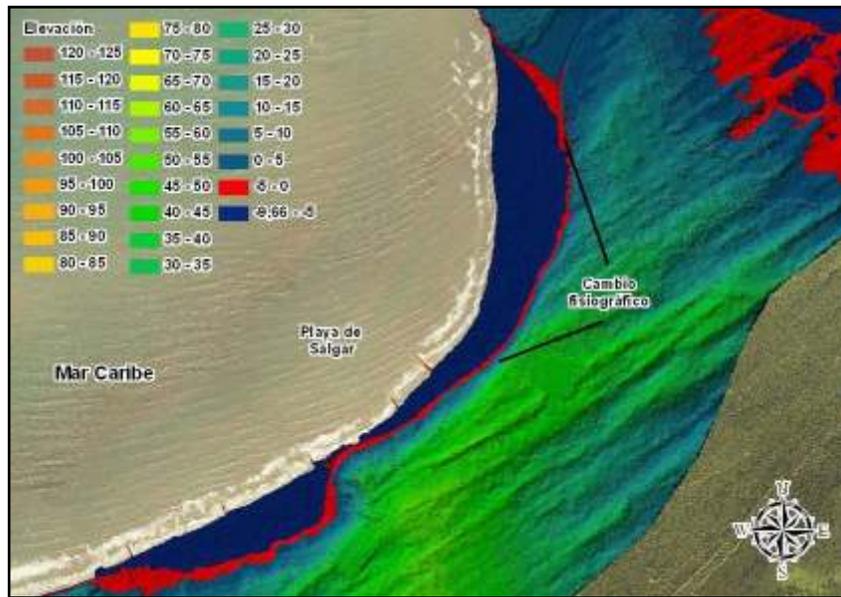


Figura 14. Modelo digital del terreno y rangos de altura con base en datos LIDAR, los cuales permitieron establecer el cambio en la forma fitográfica para la zona de Salgar (altura elipsoidal -5 m).



Figura 15. Fotografías aéreas del IGAC del año 1991 comparadas con el ortofotomosaico del año 2005 para el sector de Puerto Colombia en donde se muestra la gran erosión y transformación de la playa (polígono de color amarillo) durante 14 años.

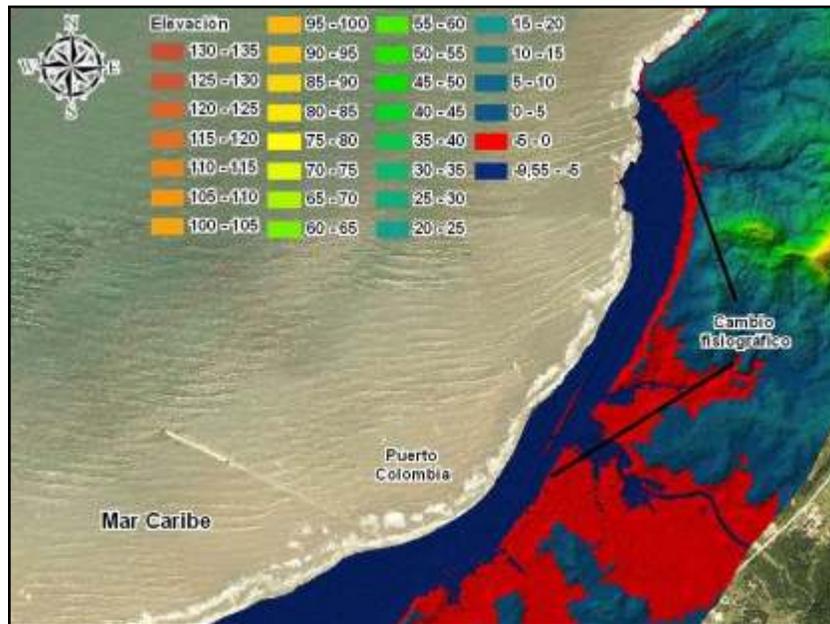


Figura 16. Modelo digital del terreno y rangos de altura con base en datos LiDAR, los cuales permitieron establecer el cambio en la forma fisiográfica para la zona de playa del municipio de Puerto Colombia (altura elipsoidal de -5m).

En el área de la península de Barú, la identificación y delimitación de las playas se realizó con base en la fotointerpretación de fotografías aéreas del IGAC del año 1961 y del ortofotomosaico del año 2005 (figura 17).

En el extremo noroeste de la isla Barú, sobre la bahía de Cartagena se observa una zona incipiente de playas, que limita con las zonas de manglar y terrazas marinas. En el sector oeste de la península, en las zonas del Varadero y Punta Gigante, se presentan playas incipientes en contacto con las terrazas marinas.

Por otra parte, entre la ciénaga de Portonaito y Playa Blanca se encuentran las playas más desarrolladas y amplias de la isla. Presentan longitud de 3.5 km, amplitud promedio de 20 m y una pendiente del frente de playa de 9° aproximadamente. Estas playas se han convertido en una zona turística por excelencia; sin

embargo se encuentran muy intervenidas por la construcción de abundantes kioscos sin ninguna planificación, presentando acumulaciones de basuras en su parte trasera, donde están limitando con zonas inundables ocupadas por lagunas interiores, zonas de manglar y dunas semivegetadas de 0.8 m de altura [5].

En proximidades a la entrada de la ciénaga de Portonaito, las playas están controladas por espolones en piedra y entibados en madera que contribuyen a la estabilidad de las mismas. Como rasgos erosivos se aprecian escarpes en la berma del orden de 0.8 m, raíces descubiertas y árboles derribados en el frente de la playa.

Para el sector de Punta Iguana se encontró una franja de playa con inclinación fuerte, por lo que el material de arenas es medio a grueso con minerales claros como cuarzo. Las playas en esta zona se han formado también por la desintegración de las terrazas

arrecifales. Estos cuerpos arenosos aparecen a manera de parches en contacto con la ciénaga el Mohán, Punta Mojaculos, ciénaga de Cholón, Punta Barú y Punta Platanal, esta última en la bahía Barbacoas, donde se presentan como franjas relativamente angostas, con amplitudes entre 2 y 8 m y pendiente del frente de playa de 9°.

En la parte donde la península hace contacto con la bahía de Barbacoas, se desarrollan pequeñas franjas de playas con materiales de arenas medias y finas, algunas de ellas presentan construcción de espolones para generar mayor franja de playa.

Llanura costera. La llanura costera del sector de la ciénaga de Los Manatíes comienza con un escarpe de 2 a 4 m de altura, el cual va perdiendo altura a medida

que se acerca a la orientación de la línea de costa, extendiéndose hasta las estribaciones de las lomas y colinas presentes en el área de estudio. De esta forma, el desarrollo de esta unidad se debe principalmente a los aportes de material proveniente de las lomas y colinas y a las contribuciones de material producto del deterioro de la ciénaga junto con su manglar.

Planicie aluvial. Son superficies horizontales o ligeramente inclinadas en dirección a la corriente baja del río adyacente, su formación se debe a procesos fluviales de corrientes continuas o torrenciales que bajan por las colinas. Su formación parece estar relacionada con la gran cantidad de pequeñas corrientes que bajan desde las lomas y colinas y dejan una zona de inundación.

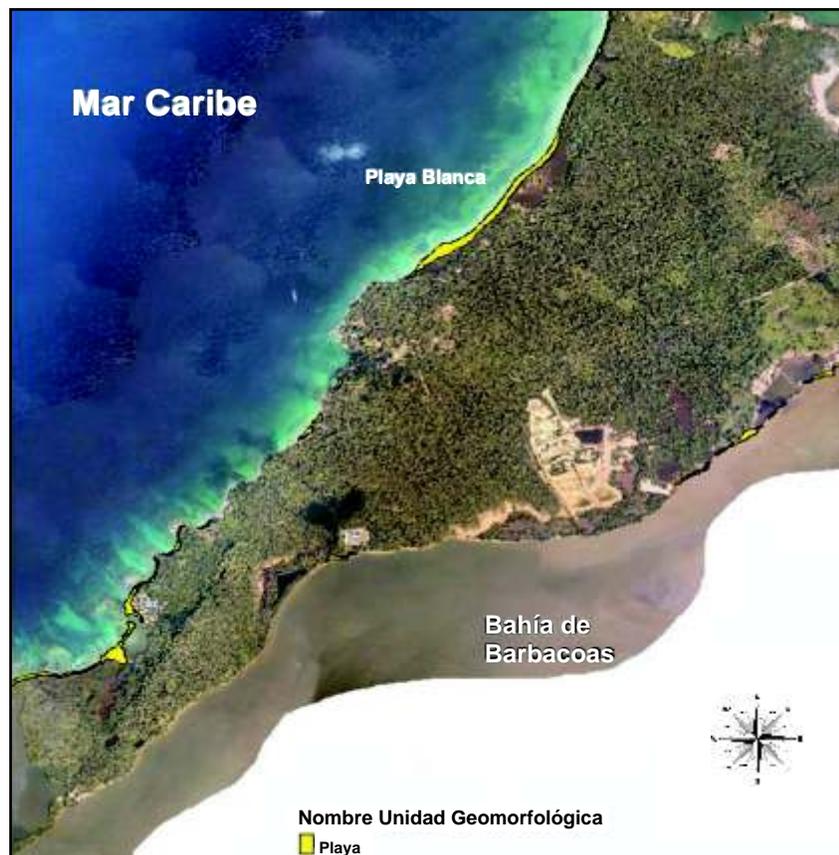


Figura 17. Pequeñas playas (áreas en color amarillo) identificadas sobre el ortofotomosaico del año 2005 en la península de Barú, sector Playa Blanca.

Para el caso de la península de Barú, la delimitación de esta unidad se llevó a cabo con base en el ortofotomosaico del año 2005, verificándola con las respectivas alturas proporcionadas por el modelo digital del terreno. En el sector del Canal del Dique, estas superficies se presentan muy planas o levemente inclinadas a favor de la corriente como producto de la depositación fluvial de material arcilloso arenoso aportado por el Canal del Dique. De esta manera, se encuentran en el canal en forma aterrazada, con alturas entre 1 y 1,5 m y a través de los caños Lequerica y Matunilla, conformados por superficies planas y

pantanosas cubiertas por manglar, comportándose como zonas inundables (figura 18).

Playón antiguo. La delimitación de esta unidad es el resultado de la utilización de los modelos digitales del terreno, debido a que su expresión topográfica es baja y están limitados por las lomas y colinas circundantes (figura 19). Esta expresión de topografía baja, se presenta en el corregimiento de Barú y está rodeada de lomas y colinas en su parte trasera y por manglar en sus alrededores.



Figura 18. Plano aluvial del Canal del Dique (polígono en color gris claro) identificado con base en ortofotografías del año 2005.



Figura 19. Delimitación del playón antiguo (polígono en color verde) en el corregimiento de Barú con base en los modelos digitales del terreno.

Unidades geomorfológicas asociadas a costas altas.

Para la zona de estudio del litoral del departamento del Atlántico entre el tajamar occidental y Puerto Velero, se identificaron dos unidades geomorfológicas asociadas a costas altas: lomas y colinas y plataforma de abrasión elevada. Por su parte, para el sector de la península de Barú, se identificaron cuatro unidades geomorfológicas asociada a costas altas: lomas y colinas, plataforma labrada en detritos, plataforma de abrasión elevada y labrada en caliza y terraza marina.

Lomas y colinas. Para el litoral del departamento del Atlántico, se encuentran estas expresiones topográficas con alturas inferiores a 125 m sobre el nivel del mar, cuya morfología ondulada o abrupta se debe a la acción de procesos internos tales como litología, fallas y plegamientos y también externos como el clima y los procesos erosivos.

Las lomas conforman un relieve suavemente ondulado con alturas entre 10 y 40 msnm. Las colinas con alturas entre 40 y 125 msnm hacia la línea de costa, se extienden en forma alargada en sentido noreste, limitando con el mar en forma de acantilados

casi verticales. Estas geoformas asociadas a fenómenos tectónicos [6] podrían ser a escala regional las causantes de los eventos de erosión y sedimentación en esta región del Caribe colombiano [7].

Según los modelos digitales de terrenos obtenidos del sensor LiDAR se pueden obtener alturas de los remanentes rocosos que conforman esta unidad geomorfológica (figura 20). Para el sector del Castillo de Salgar hasta Pradomar, estas lomas están siendo erosionadas y labradas por el mar, lo cual constituyen un rasgo geomorfológico de interés.

En el caso de la península de Barú, se utilizaron los modelos digitales del terreno para clasificar la zona en elevaciones y pendientes. En general, estos promontorios rocosos presentan alturas desde los 10 hasta los 68 m sobre el nivel del mar con pendientes superiores al 15%. Se localizan a todo lo largo de la península de Barú como cuerpos aislados. Las que ocupan mayor extensión corresponden a las Lomas del Mohán al norte de la isla donde se encuentran las poblaciones Ararca y Santa Ana, mostrando un relieve

ondulado e irregular. Generalmente se presentan como paleoacantilados. La loma de los Monos ubicada al sur, tiene forma de cuña, desarrollando su mínima amplitud en cercanías a la ciénaga el Mohán donde irrumpe hacia el mar en forma acantilada. En cercanías a Punta Gigante, se presentan lomas y colinas que superan los 65 m de altura, especialmente detrás de la ciénaga de Portonaito. Esta unidad se presenta hasta las inmediaciones de la población de Barú a manera de paleoacantilados [5].

En el área del Canal del Dique, las expresiones topográficas de mayor extensión se localizan en su costado este. Estas geoformas se presentan en forma de saliente, hacia la parte central del tramo del canal que delimita la bahía.

Plataforma de abrasión elevada. Esta unidad corresponde a superficies planas con ligeras inclinaciones, labradas por la acción del mar en el pasado sobre formaciones rocosas. Afloran en sitios específicos: al norte del área, en Punta Sabanilla y el Castillo labradas sobre rocas calcáreas de la Formación La Popa (Qpp); según Martínez, 1993, se presenta ligeramente basculada 14° hacia el Noreste.

Plataforma labrada en detritos. Los límites de esta unidad se determinaron por cambios de alturas y observaciones de campo que permitieron establecer el cambio en la composición de la plataforma (figura 21). Hacia la bahía de Barbacoas, la plataforma de abrasión está labrada en detritos y aparece en contacto con lagunas y zonas de manglar.

Terraza marina. En la península de Barú, la determinación de los límites de esta unidad se llevó a cabo a través del análisis de los modelos digitales de terreno (figura 22). En el sector oeste de la península, las terrazas afloran también como cuerpos aislados, mostrando sus mayores alturas al norte, principalmente al este de la ciénaga de Los Vásquez y en Punta Gigante con escarpes verticales de 4 y 5 m, los cuales han sufrido los efectos de la erosión marina que han provocado el desarrollo de cavernas, árboles derribados y con raíces expuestas, caída de bloques hasta de 2 m de diámetro, pináculos de 5 m de altura separado de la línea de costa actual una distancia de aproximadamente 6 m, como es el caso de Punta Gigante. Están compuestas por una mezcla de restos

coralinos (cabezas de coral) y material detrítico (*porites-porites*) cementados en una matriz arenosa.

Se aprecian además otros cuerpos correspondientes a terrazas coralinas aisladas, con escarpes entre 1 y 2 m de altura y características similares a las anteriormente descritas, localizadas en el Varadero al norte de la isla, en la parte central enmarcando la Ciénaga de Portonaito y al oeste de Estancia Vieja, en donde la erosión se manifiesta por árboles derribados y en el frente de playa [5].

Igualmente, también se observan terrazas de menor altura entre 0.3 m y 0.5 m localizadas al sur, en cercanías a Punta Barú; constituidas solamente por el material detrítico, en las cuales, la erosión se manifiesta por árboles derribados en el frente de playa. Se aprecian además otros cuerpos de terrazas coralinas, con escarpes entre 1 y 2 m de altura en Punta Mojaculos y en los alrededores de la ciénaga de Cholón.

Algunas de las terrazas limitan hacia el mar con zonas de manglar como ocurre en Cholón y Barú, mientras que en otros sitios, las terrazas limitan con playas como es el caso de Punta Platanal y Punta Barú.

Actualmente como una medida para controlar la erosión y deterioro de estas terrazas por efecto de la acción marina, se han construido en algunos sitios, muros de piedra, de cemento, estacados en madera y llantas con el fin de amortiguar los efectos del fuerte oleaje.

Plataforma elevada y labrada en caliza. Los límites de esta unidad fueron establecidos igualmente, con base en las alturas de los modelos digitales del terreno, así como también, en el análisis del comportamiento del material y su evolución (figura 23).

En el sector central de la isla de Barú entre las ciénagas de Portonaito y el Mohán, se encuentra la plataforma de abrasión que cubre mayor área, se extiende en una longitud de 4 km en sentido noreste y una amplitud promedio de 2 km. Hacia el oeste, está labrada sobre calizas conformando la loma Estancia Vieja, donde se presenta formando paleoacantilados en los sectores de Ciénaga de Portonaito y Playa Blanca, donde están en contacto con terrazas, zonas de manglar y playas, respectivamente.

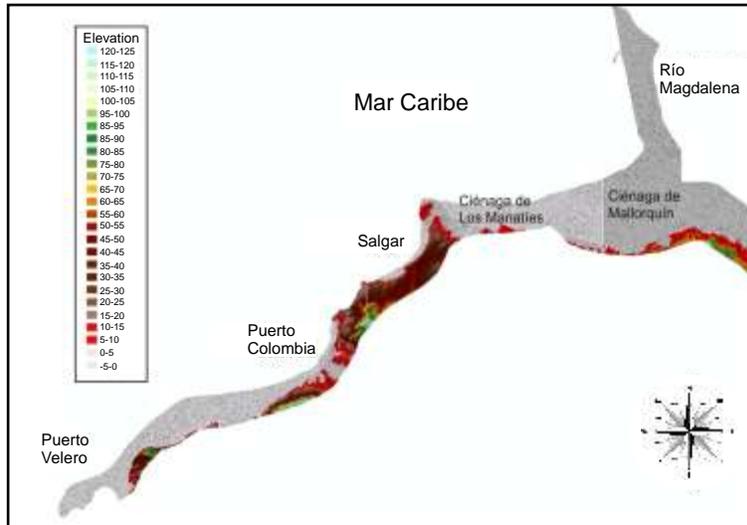


Figura 20. Modelo digital del terreno y rangos de alturas con base en datos LiDAR para el litoral del departamento del Atlántico desde el tajamar occidental hasta Puerto Velero.

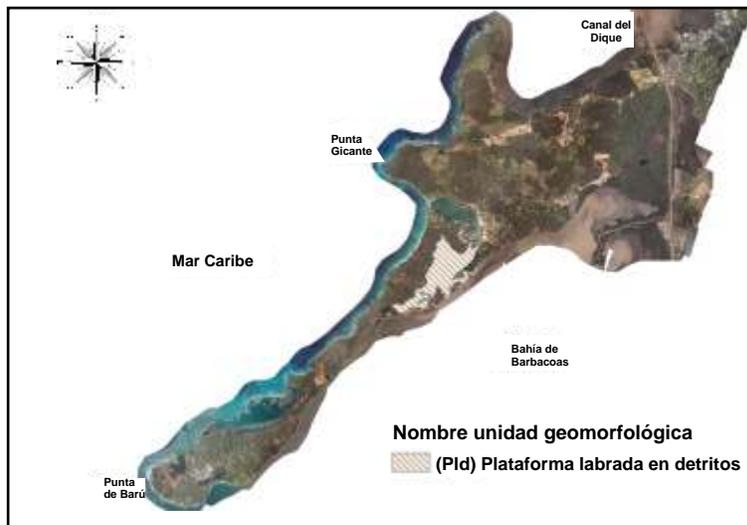


Figura 21. Límites de la plataforma labrada en detritos (polígono en color violeta) para la península de Barú con base en los modelos digitales del terreno (datos LiDAR) del año 2005.

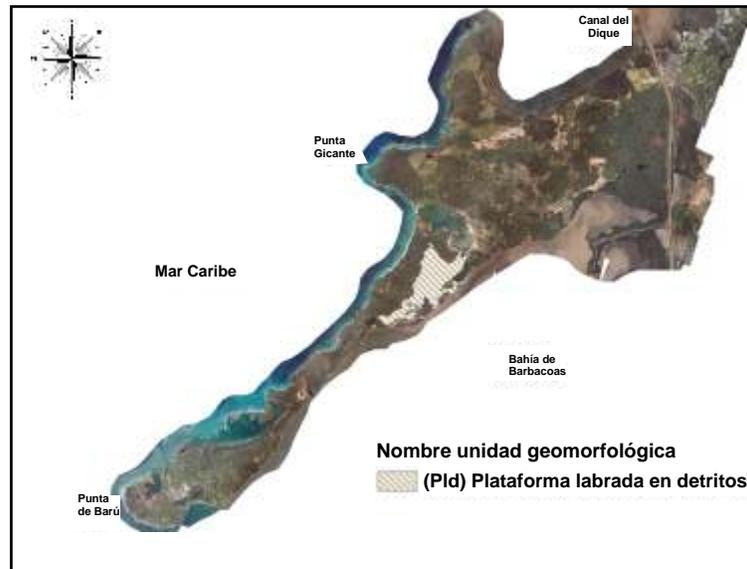


Figura 22. Límites de las terrazas marinas para la península de Barú establecidos con base en las alturas del terreno y superpuestas al ortofotomosaico del año 2005.

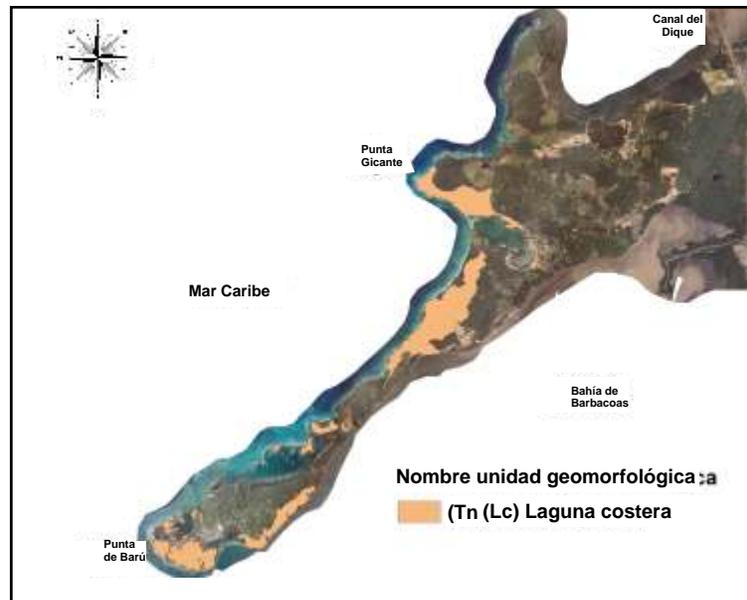


Figura 23. Límites de la plataforma de abrasión elevada y labrada en caliza (polígonos de color crema) en la península de Barú con base en los rangos de alturas de los modelos digitales del terreno.

Hacia el este, la plataforma está labrada sobre rocas de la unidad detrítica de La Popa (arena arcillosa de color café), que se presenta ligeramente basculada al sureste. Al noroeste de la ciénaga el Mohán, se aprecia una plataforma que se prolonga en forma alargada en sentido noreste en una longitud de 1 km y una amplitud de 250 m; con escarpes de 2 a 3 m de altura, en contacto con la terraza marina de Mojaculos [5].

Rasgos geomorfológicos

Acantilados. En el litoral del departamento del Atlántico entre el tajamar occidental y Puerto Velero, se presentan a lo largo de toda la plataforma de abrasión entre el Castillo de Salgar y Pradomar, y también en el sector de Punta Sabanilla, los cuales presentan signos de erosión presentándose los llamados stacks en algunos puntos de Sabanilla. El fuerte embate de las olas en estos acantilados ha generado una erosión del mismo. Estos acantilados poseen alturas que van desde los 5 a los 10 m sobre el nivel del mar y están compuestos principalmente, por rocas sedimentarias.

Discusión

Es notorio que la incorporación de nuevas fuentes de información y el potencial de las herramientas de análisis espacial en geomorfología litoral se ha incrementado exponencialmente durante los últimos años [8], [9]. Los resultados de la presente investigación permitieron demostrar la eficacia y la eficiencia del empleo de la tecnología de ortofotografía digital, sensor LiDAR y Sistema de Información Geográfica en análisis geomorfológicos, especialmente en la identificación y espacialización de las unidades y rasgos geomorfológicos del litoral Caribe colombiano.

Una de las ventajas de la utilización de estas tecnologías de sensoramiento remoto y de los Sistemas de Información Geográfica es la de que no se limita a una toma de datos punto a punto en áreas pequeñas o ámbitos espaciales reducidos, sino que por el contrario, se toman una gran cantidad de datos (puntos LiDAR y fotografías aéreas a color) de una extensa región de interés, como es el caso de las dos zonas de trabajo de la presente investigación.

La carencia de material fotográfico de referencia de años anteriores, lo suficientemente antiguo (40 ó más años) en algunos sectores de las áreas de estudio, se consideró como una limitante para el desarrollo de la presente investigación, ya que dado el alto grado de intervención antrópica de los litorales en ciertos sectores, no fue posible observarlos en un estado inicial o de escasa intervención con el fin de compararlos con el estado actual observado en las ortofotografías.

En relación con aplicaciones similares de estas tecnologías, se tiene que en Taiwán se llevó a cabo una utilización exitosa de datos LiDAR combinados con datos convencionales como fotografías aéreas y observaciones de campo, para caracterizar y reconocer las características activas del terreno e interpretarlas en el segmento nor-oriental del sistema de fallas de Chelungpu con el fin de mitigar los daños ocasionados por sismos. Dado que en general, la actividad de las fallas jóvenes involucra pequeños cambios en la topografía del terreno, se requerían datos de elevación del terreno de alta exactitud y precisión para delinear la actividad más reciente de la falla [10].

Por otra parte, en el Sureste de Idaho, Estados Unidos, se utilizaron datos LiDAR y trabajo de campo para analizar la morfología superficial de los deslizamientos en el cañón Sinking a través de la interpretación visual y el análisis numérico. Como resultado, se demostró que la alta resolución espacial de los datos LiDAR, permite diferenciar los componentes morfológicos en un deslizamiento, el tipo de material y la actividad del deslizamiento, facilitando con ello, el entendimiento de la dependencia espacio-tiempo de los procesos que se manifiestan en la morfología del deslizamiento [11].

Durante los años 2003 y 2004, el U. S. Army Corps of Engineers, desarrolló una investigación en el desierto de Mojave, sur-este de California, relacionada con el establecimiento de un método cuantitativo para delinear, de forma precisa, características morfológicas de tipo fluvial y de playas, utilizando el sensor LiDAR y aprovechando la ventaja de este sensor de proporcionar información de alturas del terreno [12].

Por último, los resultados concretos de esta investigación fueron empleados como información de soporte técnico para la Autoridad Marítima Nacional (DIMAR), dentro del desarrollo de sus funciones de control, administración y preservación de estos espacios litorales que pertenecen a la Nación y cuyo uso y goce corresponde a todos los ciudadanos del país, es decir los bienes de uso público costeros.

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos al personal militar y civil del Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras del CIOH, por su valioso y decidido apoyo para el buen término de la presente investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] Coastal Wiki. Geomorphological Analysis. [Online]. 2009 [cited 2009 Aug 04]; Available from: URL: http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Geomorphological_analysis.
- [2] Van Zuidan R. Aerial Photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping. The Hague: Smits Publishers; 1999.
- [3] Anfuso G, Del Río L. Cuantificación de las variaciones volumétricas y evolución del litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz) durante el periodo (1996-1998). *Revista C&G* 2003; 17 (3-4).
- [4] Ojeda J, Vallejo I, Hernández L, Álvarez J. Fotogrametría digital y LIDAR como fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la A.G.E.* 2007; 44: 215-233.
- [5] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique. Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera comprendida entre Galerazamba y bahía Barbacoas. Cartagena de Indias: 1998.
- [6] Pelgrain, A. Rasgos tectónicos y estilo estructural de la margen activa norte colombiana, desde el golfo de Morrosquillo hasta el delta del río Magdalena. Cartagena de Indias: Informe Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas; 1990.
- [7] Correa, I.D., 1990. Inventario de erosión y acreción litoral (1793-1990) entre los Morros y Galerazamba, departamento de Bolívar, Colombia. AGID Report No. 13: Environmental Geology and Natural Hazards of the Andes Region. M. Hermelin Editor. Universidad EAFIT Medellín 1990: 129-142.

[8] Stephenson J, Brander R. Coastal geomorphology into the twenty-first century. *Progress in Physical Geography* 2003; 27, 4: 607-623.

[9] Brown D, Arbogast A. Digital Photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan. Michigan: Department of Geography. Michigan State University; 1999.

[10] Chang Chan Y, Cheng Lee J, Huang C, Hsieh ML, Hu JC, Shih T-Y. Precise landform characterization of the 1999 (Mw=7.6) Taiwan Chi-Chi earthquake fault using Airborne LIDAR data. *International Conference in Commemoration of 5th anniversary of the 1999 Chi-Chi earthquake; 2004 Sep 8-9.*

[11] Glenn N, Sterutker D, Chadwick D, Thackray G, Dorsch S. Analysis of LIDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* 2006; 73: 131-148.

[12] Lihcvar R, Finnegan D. Airborne Laser Altimetry (LIDAR) support of floodplain hydrologic and geomorphic indicators (2003-2004) [Online]. 2005 [cited 2009 Jul 12]. Available from: URL:http://www.crrel.usace.army.mil/rsgisc/b1_04/web_lidar2.htm.