

DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO COSTERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG Y MÉTODOS MULTICRITERIO

DETERMINATION OF THE VULNERABILITY AND THE COASTAL RISK BY THE APPLICATION OF GIS TOOLS AND MULTICRITERIA METHODS

Nelson Guillermo Rangel-Buitrago y Blanca Oliva Posada-Posada

RESUMEN

Existe un consenso científico de que el clima global está afectado significativamente con cambios en los patrones de precipitación y aumento en el nivel del mar, entre otros. Aunque existe una gran incertidumbre asociada a las magnitudes de estos cambios, los análisis de la vulnerabilidad y riesgo a lo largo de los litorales son un primer paso dirigido a sentar bases para el desarrollo de un plan de adaptación ante el cambio climático. Con tal fin se seleccionó como área de estudio el litoral del distrito de Cartagena de Indias, en el Caribe colombiano, localizado entre las coordenadas 10°45'N-75°15'W y 10°10'N -75°45'W, con una longitud aproximada de 370 km. Se llevó a cabo una evaluación detallada de la vulnerabilidad y el riesgo por erosión a lo largo de este litoral desde el punto de vista físico, social, de la conservación y del patrimonio. El análisis se efectuó mediante una aproximación semicuantitativa, aplicando índices relativos como unidad geomorfológica, ancho, pendiente y tipo de playa, grado de exposición de la costa al oleaje, entre otros. Se contó con datos cuantitativos de retroceso costero y variables asociadas a usos del suelo, conservación y patrimonio. Como resultado se determinó que entre 1994-2011 las tasas de erosión alcanzaron valores mayores a 3 m año⁻¹ en sectores críticos (Playetas y Tierrabomba), afectando los usos del suelo y la economía local y regional. El 41 % de la línea de costa se clasificó como de riesgo bajo y muy bajo, el 32.15 % con riesgo moderado, mientras que 13.69 % y 13.27 % correspondieron a valores de riesgo alto y muy alto respectivamente. Bajo las condiciones de cambio climático, ascenso en el nivel del mar y desbalance sedimentario, a corto, mediano y largo plazo la erosión encontrada en la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias se intensificará con el retroceso de la misma. La adaptación debe ser una estrategia prioritaria a ser considerada, con alternativas de relocalización y protección sostenible, y estudios de detalle con el fin de zonificaciones para asentamientos, usos y aprovechamientos futuros del litoral.

PALABRAS CLAVE: Erosión costera, vulnerabilidad, riesgo, litoral, Cartagena de Indias, Colombia

ABSTRACT

A scientific consensus exists regarding the significant impact on the global climate, including changes in rainfall patterns and sea level rise, among others. Although the magnitudes of these changes still are not clear, the analyses of the vulnerability and risk along the littorals represent the first step to design an adaptation plan of the climate change. With this in mind, the selected study area was the District of Cartagena de Indias, Colombian Caribbean Coast. It is located in the coordinates 10°45'N-75°15'W and 10°10'N-75°45'W and its littoral has an approximate length of 370 km. A detailed evaluation of the vulnerability and the risk by erosion along this littoral was carried out, considering physical, social, conservational and heritage aspects. The analysis was made by semiquantitative approximation method, applying relative indexes: geomorphologic unit, width, the slope and type of beach, degree of exhibition of the coasts to the waves, between others. Initially, the available information was of shoreline retreat, land uses, conservation and heritage. The results showed erosion rates bigger than 3 m year⁻¹ in critical sectors (Playetas and Tierrabomba), between 1994 and 2011, and the land use and local and regional economy were affected. 41% of coastline was classified with low and very low risk, 32.15% with moderate risk, whereas 13.69% and 13.27% had values of high and very high risk respectively. Under climate change conditions, sea level rise and sediment imbalance, the

Dirección de los autores:

Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Polígono río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real, Cádiz, España. E-mail: nelson.rangelbuitrago@mail.uca.es (N.G.R-B). Programa de Geociencias Marinas, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), Cerro Punta Betín, Sociedad Portuaria de Santa Marta, Santa Marta, Magdalena. E-mail: boposada@gmail.com (B.O.P).



coastal erosion along of the District of Cartagena de Indias will be intensified by the shoreline retreat in a short, medium and long term. The adaptation must be a priority strategy, to being considered with alternatives of relocation, sustainable protection and littoral zoning to human settlement, land uses and future applications.

KEY WORDS: Coastal erosion, vulnerability, risk, Cartagena de Indias, Colombia

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el IPCC (2007) cerca de un 50 % de la población mundial vive en las zonas costeras. En lo que respecta a Colombia, los 28 municipios y distritos costeros albergan el 8.5 % de la población total del país (DANE, 2010). La alta concentración de la población en estas zonas afecta en gran medida unidades geomorfológicas como playas y acantilados, dentro de las cuales se han construido edificaciones e infraestructura que a menudo se encuentran amenazadas por la erosión del litoral. En consecuencia, el conflicto entre la ocupación antropogénica y la inestabilidad-desequilibrio inherente a estos litorales se ha convertido en un problema importante en el ámbito mundial (Moore y Griggs, 2002).

En diversos trabajos se pueden encontrar numerosos intentos por desarrollar métodos para evaluar de forma adecuada el comportamiento de una zona litoral ante diversos fenómenos naturales. Uno de ellos corresponde al diseño de índices de vulnerabilidad-riesgo (Malvarez et al., 2000; McLaughling et al., 2002), que han sido empleados por diversos autores para clasificar zonas costeras en función del tipo de respuesta frente a amenazas como el ascenso del nivel del mar (Gornitz, 1990), inundaciones asociadas a eventos extremos (Dal Cin y Simeoni, 1994; Simeoni et al., 2003) o la erosión costera debida a huracanes (Cambers, 1998).

En este trabajo se realiza una evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo a lo largo de la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias, ubicado en el Caribe colombiano. Se define como amenaza la probabilidad de ocurrencia de un evento dañino para el hombre, en este caso la erosión costera, ya sea de origen natural o humano. La vulnerabilidad, por otro lado, es el grado de pérdida o daños que cabe esperar si se produce una amenaza (la erosión) de una magnitud determinada. El riesgo sería la probabilidad de pérdida humana o material debido a la ocurrencia de un evento, y por lo tanto es el producto de la amenaza por la vulnerabilidad.

En algunos puntos de esta zona se han registrado tasas de erosión que superan los 3 m/año (Correa, 2005; Posada y Henao, 2008; Rangel et al., 2010). Estas altas tasas de erosión han traído consigo un incremento en los conflictos existentes entre los procesos naturales actuantes sobre playas - acantilados y las actividades antropogénicas desarrolladas en ellos. En este estudio se proponen índices de vulnerabilidad y riesgo relativos que tienen en cuenta variables sociales, de conservación y de patrimonio relacionadas con los procesos, factores y usos que se dan sobre la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias. El cálculo de los índices se basa en la evolución reciente de la línea de costa para el periodo 1994-2011 y observaciones realizadas en campo.

Este trabajo pretende realizar una catalogación y zonación de la línea de costa en función de su mayor o menor susceptibilidad a sufrir cambios asociados al proceso de erosión costera. Los resultados hacen parte del desarrollo de un plan de adaptación del distrito de Cartagena de Indias ante el cambio climático dentro de dos ejes específicos de trabajo que son parte de los productos INVEMAR, et al. (2012), a saber: a) la integración de los lineamientos de adaptación al cambio climático en la planificación territorial, y b) el desarrollo de los lineamientos al cambio climático y su socialización con los sectores económicos y actores sociales del distrito.

ÁREA DE ESTUDIO

La línea de costa del distrito de Cartagena de Indias tiene una longitud aproximada de 370 km y se localiza entre las coordenadas 10°45'N-75°15'W y 10°10'N-75°45'W (Figura 1). El aporte de sedimentos terrígenos en su gran mayoría proviene del río Magdalena y está determinado por la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), la cual controla las precipitaciones en todo el Caribe colombiano. Estas precipitaciones están distribuidas estacionalmente y se presentan en tres periodos de tiempo denominados: i) época seca (noviembre-marzo), ii) época de transición

(abril-agosto), y iii) época de lluvias (agosto-noviembre). Durante la época seca la corriente del Caribe, los vientos provenientes del NE y el oleaje asociado, producen una corriente litoral con dirección SW la cual permite el transporte de sedimentos. Durante la época de lluvias, cuando la contracorriente del Darién (proveniente del NE) es fuerte, el transporte de material sedimentario se reduce (Pujos et al., 1984). A su vez, durante este mismo periodo (época de lluvias) los huracanes, que tienen origen en depresiones tropicales, pueden ocasionalmente impactar el litoral del área de estudio produciendo un transporte de sedimento con dirección NE.



Figura 1. Área de estudio. Línea de costa del distrito de Cartagena de Indias, Caribe colombiano.

La interacción de procesos tectónicos, climáticos y oceanográficos ha dado como resultado una zona litoral que puede ser dividida desde el punto de vista geomorfológico en:

- i) Playas disipativas compuestas por arenas de origen terrígeno y carbonatado.
- ii) Terrazas marinas y zonas acantiladas formadas por areniscas terciarias.
- iii) Llanuras costeras asociadas con procesos sedimentarios marino-fluviales.
- iv) Lagunas costeras y pantanos de manglar.

El distrito de Cartagena de Indias, al igual que todo el Caribe colombiano, presenta un régimen micromareal con rangos máximos de cambio en el orden de los 50 cm (promedio 30 cm) e intervalos de tiempo entre mareas altas de 10 a 15 horas. En lo que concierne al oleaje, predominan olas provenientes del cuarto cuadrante con promedios de altura que oscilan entre 0.5-2 m y periodos de 2-29 segundos, con promedio de 9 segundos (Martínez, 2010).

METODOLOGÍA

El análisis de la evolución reciente de la línea de costa se realizó a partir de la comparación de fotografías aéreas tomadas entre los años 1994-2011 y procesadas en formato JPG y TIFF. En estos vuelos la línea de costa correspondiente al año 2011 fue la referencia base, y con respecto a esta se cotejaron las líneas de costa de los años anteriores. La comparación de las fotografías permitió identificar las tendencias de cambio en la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias, reflejando el predominio de la erosión o acumulación litoral para diversos sectores en particular. Todas las fotografías aéreas fueron georreferenciadas empleando el software ARCGIS utilizando como mínimo 10 puntos de control, que siguieron criterios de localización y distribución, lo que permitió ajustar las diferentes imágenes al sistema de coordenadas WGS 84, con un error medio cuadrático RMSE inferior a 1 m. Se usó una transformación polinómica de segundo orden para corregir la distorsión interna de las imágenes y se recalculó usando algoritmos de interpolación bilineal. Posterior a la georeferenciación se generó un archivo vector (Shapefile) de la línea de costa de cada año, según la fotografía aérea empleada. Una vez disponibles todas las líneas de costa se midieron las respectivas distancias entre ellas usando el software DSAS (Digital Shoreline Analysis System) y RMAP 3.0 (Regional Morphology Analysis Package). Ambos softwares calculan parámetros estadísticos que indican el estado y las tendencias evolutivas para periodos de tiempo específicos. Con DSAS se define una línea base fina paralela a las costas digitalizadas y que permite trazar en forma semiautomática transectos perpendiculares que indican la distancia entre la línea base y las costas de las distintas fechas. Dentro del trabajo se empleó el *End Point Rate (EPR)* que es la relación de la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente, y el lapso años entre ambas líneas, como medida principal (Thieler et al., 2005).

Para la determinación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por erosión costera, se diseñó una serie de

índices mediante la evaluación de los principales factores implicados en los procesos de erosión y acreción. Para ello se analizaron y compararon las características de tramos de costa segmentados según una cuadrícula de 500 m x 500 m, y se seleccionaron 17 variables fundamentales denominadas (a_n) las cuales se dividieron dentro de cuatro contextos: i) físico, ii) social, iii) de la conservación, y iv) del patrimonio (Tabla 1).

Las diez primeras variables corresponden a los factores que condicionan o determinan la erosión en la línea de costa y por ende su grado de amenaza. Las siguientes siete variables fueron divididas en 3 grupos (social, de conservación y del patrimonio) (Gomitz et al., 1994) lo que permitió calcular la vulnerabilidad y riesgo total dentro de cada uno de los contextos (Tabla 1). Toda esta información se almacenó en las tablas de atributos de los *shapefile* generados en la etapa anterior.

Cada una de las variables fue calificada conforme al grado de influencia en la amenaza y vulnerabilidad ante la erosión costera, asignando a cada una, una puntuación de 1 (menor rango) a 5 (mayor rango) (Tabla 1). Esta calificación fue llevada a cabo teniendo en cuenta las características intrínsecas del litoral del distrito de Cartagena de Indias, por lo cual los índices presentados en este capítulo son relativos y solo deben ser aplicados en la zona de estudio.

Todas las variables usadas fueron evaluadas y calificadas a partir de dos fuentes: i) la información contenida en la literatura existente sobre el área de estudio, y ii) la comprobación de la información y colecta de nueva información mediante salida de campo.

Tras la calificación de las diferentes variables, se optó por realizar una ponderación de las mismas según el método de Gornitz et al., (1994), con el objetivo de eliminar la subestimación de las variables más relevantes localmente, así como las sobrestimación de las menos determinantes. Para ello se emplearon factores de corrección (f_n) entre 1 y 0.6, en función de la importancia relativa de cada variable a la hora de determinar la vulnerabilidad y posterior riesgo de la línea de costa del área de estudio ante la erosión costera. De esta forma, las variables se clasificaron en tres tipos a los que se asignaron diferentes factores de ponderación (Tabla 1):

- i) Determinante f_n : 1
- ii) Indirecta f_n : 0.8
- iii) Secundaria f_n : 0.6

Así, la *Vulnerabilidad Absoluta* (V_{abs}) se calculó para cada segmento mediante la suma de los valores de las variables ponderadas mediante la ecuación:

$$V_{abs} = \sum a_n f_n \quad (1)$$

Posteriormente, se normalizaron los resultados con respecto a los valores máximos y mínimo teóricos del índice, con el fin de obtener un *Índice de Vulnerabilidad Relativa* (V_r) más realista. Este índice fue calculado mediante las ecuaciones:

$$MaxRangoVab = \max V_{abs} - \min V_{abs} \quad (2)$$

$$V_r = [(V_{abs} - \min V_{abs}) / \max V_{abs}] * 100 \quad (3)$$

Este cálculo se efectuó para cada conjunto de variables, pudiéndose determinar la amenaza por erosión costera (PHVI) y la vulnerabilidades desde el punto de vista social (SOVI) de la conservación (COVI) y del patrimonio (HEVI).

Como un último paso se efectuó la combinación de la amenaza por erosión costera (PHVI) y las diferentes vulnerabilidades para obtener el riesgo. Esta combinación se realizó mediante el cálculo de promedios ponderados debido a que de esta forma se obtiene un valor de riesgo real, el cual está asociado directamente al número de variables empleadas para el cálculo de cada una de las vulnerabilidades. Los riesgos calculados se denominaron CVSI y se expresan según su contexto ya sea social (CVSI_{social}), de la conservación (CVSI_{conservacion}) y del patrimonio (CVSI_{patrimonio}). El riesgo total (CSVI) es el cálculo del promedio ponderado de los tres riesgos previamente mencionados.

Los mapas resultado se procesaron en ArcGis atendiendo a los parámetros explicados y contenidos en las respectivas tablas de atributos.

Tabla 1. Clasificación de las variables que integran los índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Amenaza por Erosión Costera - PHVI

N°	VARIABLE	RANGOS					FACTOR
		Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)	
1	Geomorfología	Acantilados altos de rocas ígneas	Acantilados medios rocas metamórficas	Acantilados bajos Plataformas de abrasión Terrazas marinas Colinas y montañas	Llanuras aluviales Lagunas costeras	Playa Campos de dunas Espigas Pantanos de manglar Playones	1
2	Erosión	Acumulación	Estabilidad	Erosión baja (menos de 0,5 m/año)	Erosión media (0,5 - 1 m/año)	Erosión alta (más de 1 m / año)	1
3	Ancho de playa	Más de 50 m	Entre 50 -25 m	Entre 25 - 10 m	Menos de 10 m	Sin playa	1
4	Pendiente de playa (intermareal)	Más de 8°	Entre 6° y 8°	Entre 4° y 6°	Entre 2° y 4°	Entre 0° y 2°	0.8
5	Grado de exposición oleaje	Con obstáculos - oleaje indirecto	x	Medianamente resguardada	x	Sin obstáculos - Oleaje directo	0.8
6	Estado morfodinámico	Reflectivo	x	Intermedio	x	Disipativo	0.8
7	Presencia de rasgos geomorfológicos	Sin rasgos	x	1 - 2 rasgos	x	2 rasgos o más	0,6
8	Rango mareal	Micromareal	x	Mesomareal	x	Macromareal	0.6
9	Altura de ola	Entre 0 y 1 m	x	Entre 1 y 2 m	x	Mayor de 2 m	0.6
10	Aumento del nivel del mar	Descenso 1 mm/año	Estabilidad relativa	Aumento de hasta 0.5 mm/año	Aumento entre 0.5 - 1 mm/año	Aumento mayor de 1 mm/año	0.6
11	Usos de suelo	Arbustos y matorrales	Mosaico pastos Pastos arbolados Pastos enmalezados Pastos limpios	Bosque de mangle Marismas costeras Lagunas - Lagos Zonas Pantanosas Bosque de galería	Estanques agricultura Mosaico cultivos Pastos cultivos	Instalaciones recreativas Aeropuertos Zonas industriales - comerciales Tejido urbano Zonas de extracción minera	1
12	Índice K - estructuras	No estructuras (K = 0)	Mínimo (k = 0.0001-0.1)	Promedio (K = 0.11-0.5)	Máximo (K = 0.51-1)	Extremo (K mayor de 1)	1
13	Porcentaje de área desarrollada	Desarrollo menor del 20 %	Desarrollo entre 20-40 %	Desarrollo entre 40-60 %	Desarrollo entre 60-80 %	Desarrollo mayor al 80 %	1



Tabla 1. Continuación.

N°	VARIABLE	RANGOS					FACTOR
		Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)	
14	Infraestructura de servicios	Desarrollo menor del 20 %	Desarrollo entre 20-40 %	Desarrollo entre 40-60 %	Desarrollo entre 60-80 %	Desarrollo mayor al 80 %	1
15	Cobertura	Arbustos y matorrales	Mosaico pastos	x	Estanques agricultura Mosaico cultivos Pastos cultivivos Bosque de mangle	Instalaciones recreativas Aeropuertos Zonas industriales - comerciales Tejido urbano Zonas de extracción minera Bosque de mangle Marismas costeras Lagunas - Lagos Zonas pantanosas Bosque de galería	1
16	Sitios prioritarios	Área excluida	Área no seleccionada	x	Sitio prioritario de conservación	Área conservada	0,8
17	Patrimonio histórico-artístico	No presente	x	x	x	Monumento Resto arqueológico Comunidad formada por minorías étnicas	0,6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación se obtuvieron durante el desarrollo del proyecto “Integración de la Adaptación al Cambio Climático en la Planificación Territorial y Gestión Sectorial de Cartagena de Indias: Documento base para lineamientos de adaptación al cambio climático de Cartagena de Indias”, realizado en convenio entre INVEMAR-MADS-Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias-CDKN (Invemar et al., 2012).

fueron útiles a la hora de demostrar la variabilidad de los cambios en diferentes puntos de la línea de costa del área de estudio, permitiendo establecer posibles patrones de erosión y/o acreción. De igual forma, el conjunto de datos obtenidos confirmó lo previamente presentado por Correa, 2005; Posada y Henao, 2008; Rangel et al., 2010 quienes al reconstruir la evolución reciente de áreas puntuales ubicadas dentro de la línea de costa evaluada determinaron retrocesos superiores a los 3 m/año.

Evolución litoral

El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) permitió la determinación de los cambios en la línea de costa para el periodo 1994-2011. Los datos obtenidos

A lo largo del área de estudio, los procesos de acreción fueron observados hacia la zona norte (La Boquilla, Punta Corralito) de menor intervención antropogénica. Los procesos de erosión se localizaron en la zona central (Cartagena de Indias, Tierrabomba) asociados con



áreas densamente pobladas y altamente intervenidas. Las diferentes unidades geomorfológicas se han visto afectadas, en gran medida, porque la intervención humana y sus estructuras asociadas, como la excesiva construcción de obras de defensa sobre la costa muchas veces inservibles, han afectado claramente la circulación de sedimento, lo que favorece la intensificación de los procesos de erosión.

Los procesos de erosión más significativos se encontraron en los siguientes sectores (Figura 2):

- **Playetas:** La evolución reciente de la línea de costa dentro de este sector ha estado marcada por una fuerte tendencia erosiva que la convierte, quizás, en uno de los ejemplos más trágicos de erosión y pérdida de terrenos (junto con sus estructuras asociadas) a lo largo del área estudiada y del litoral Caribe colombiano. El inventario de cambios en la línea de costa pone de manifiesto retrocesos que alcanzan magnitudes de -295 metros (-25 m en promedio), con valores máximos de retroceso del orden de -12.81 m/año, estando el promedio general en -1.85 m/año.
- **Tierrabomba:** Las comparaciones entre fotografías aéreas de los años de 1994-2005-2007-2011 evidencian una condición evolutiva reciente de tipo erosiva, principalmente en la zona W que coincide con la zona donde se da el principal asentamiento urbano de esta isla. La erosión calculada a partir de las fotografías

aéreas registra cambios de hasta -45.5 m registrados principalmente en el periodo 1994-2005. Los valores de cambio en la línea de costa para los 17 años estudiados son netamente por erosión, encontrándose una tasa promedio de erosión máxima de -3 m/año con un promedio de 0.63 m/año a lo largo de toda la cara norte de esta isla.

- **Cartagena de Indias (casco urbano):** La comparación de las fotografías aéreas de los años 1994-2006-2011 evidencia un predominio general del retroceso de la línea de costa a lo largo de toda la línea de costa en la ciudad, con magnitudes máximas de hasta -56 m en sectores como El Laguito, Centro Histórico, Las Tenazas y Crespo. Para el extremo sur, (El Laguito) se calcularon tasas de desplazamiento de hasta -1.58 m/año, equivalentes a un retroceso en la línea de costa de 27 metros. En el sector Centro Histórico la erosión ha producido la pérdida total de la playa estando la línea de costa actual asociada al enrocado que se extiende por 1.6 km y que rodea buena parte de la muralla de la ciudad. De igual forma, en el área de Las Tenazas (área cerrada al público debido a la fuerza del oleaje) se registraron tasas de erosión promedio de -0.25 m/año, encontrándose una tasa máxima de -1.25 m/año. De manera general el casco urbano de Cartagena de Indias presenta un valor promedio de erosión de -0.37 m/año, con tasas máximas de retroceso de -6.40 m/año registradas en la zona de Marbella.

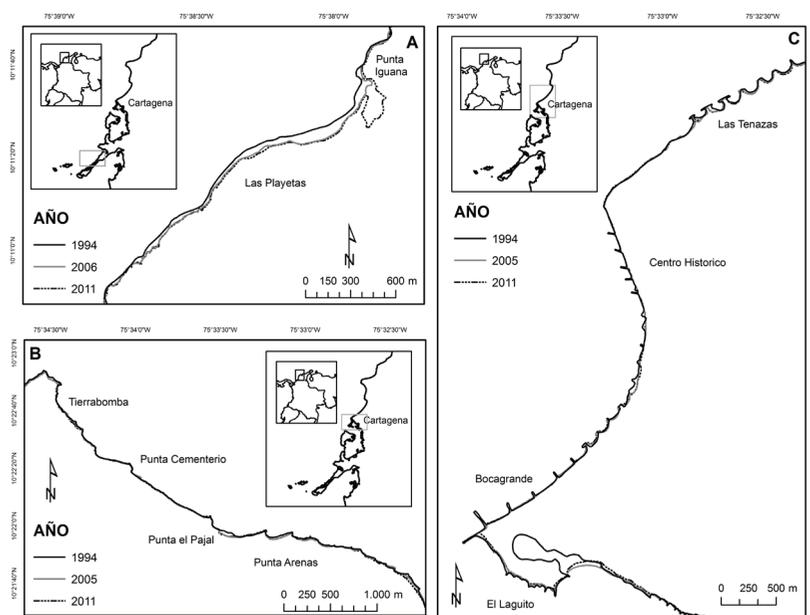


Figura 2. Mapa de cambios en la línea de costa en los sectores de a) Playetas, b) Tierrabomba y c) Cartagena de Indias.

A su vez, las zonas más estables o con procesos de acumulación manifiesta fueron (Figura 3):

- **La Boquilla:** Este sector es el más estable a lo largo de toda la línea de costa evaluada. A lo largo de este se calcularon acumulaciones de hasta 531 m lineales de playa en el sector sur de Punta Canoas, asociadas al crecimiento de la espiga litoral del mismo nombre. Correa (1990), determinó que el predominio de la sedimentación litoral en este tramo se inició en algún momento entre 1947 y 1961, acumulación que trajo consigo la formación de playones arenosos que evolucionaron ente 1974 y 1984 a una espiga litoral con un área de aproximadamente 1.5 km², incluida el área correspondiente a una laguna interior somera. Este mismo autor señala avances netos con valores máximos de hasta 800 m en la parte más amplia de la espiga, a los que se asocian tasas de acreción de 15 m/año. Estos datos, más los calculados en este trabajo (para los últimos 17 años), confirman la tendencia acumulativa de este sector.
- **Sector norte:** Estudios realizados por Correa (1990), determinaron que entre 1935 y 1947 las modificaciones principales reflejaron la formación de un tómbolo con vértice en el sector de Bajo Seco, y un avance generalizado del contorno costero en la mitad E del sector que incluyó desplazamientos máximos de hasta 500 m medidos directamente al sur

de la isla Cascajo. Entre 1947 y 1953, la línea de costa ubicada al SE del Bajo Seco conservó esencialmente su posición, mientras que hacia al NE se registraron avances del orden de 500 m. En el periodo 1954-1990, las modificaciones identificadas reflejaron la continuación general del avance de la línea de costa. Entre 1994 y 2009, los valores de acumulación han alcanzado hasta 391 m lineales de playa equivalentes a tasas máximas de erosión de 26 m/año. El valor promedio de cambio o tendencia de esta línea de costa para este último periodo de tiempo es de 3.96 m/año.

Amenaza por erosión costera

La erosión costera puede llegar a ser un proceso irreversible que causa la pérdida de terrenos y pone en peligro recursos, tanto económicos como naturales, dentro de una zona litoral. A lo largo del distrito de Cartagena de Indias se han identificado procesos erosivos costeros (cambio climático, ascenso en el nivel del mar, modificaciones en sedimentación, intervenciones antropogénicas) que están provocando cambios rápidos en la morfología litoral. Lo previamente mencionado, junto con los resultados obtenidos al determinar la evolución reciente de la línea de costa, permite deducir que un alto porcentaje del litoral se encuentra en estado activo de erosión.

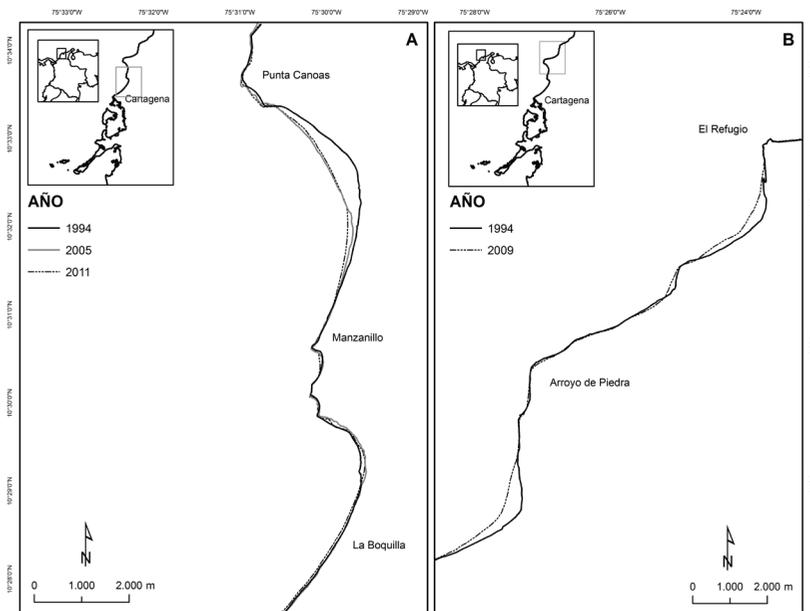


Figura 3. Mapa de cambios en la línea de costa en los sectores de a) La Boquilla y b) Sector norte del área de estudio.

El mapa de amenaza por erosión costera revela que el 15.14 % de la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias puede ser catalogada dentro de un rango de amenaza muy baja o baja, el 25.10 % dentro de un rango de amenaza moderada y el restante 59.74 % dentro de valores de amenaza alta y muy alta (Figura 4). Las zonas más susceptibles a la erosión corresponden a las islas de Tierrabomba y Grande, junto con los sectores de Playa Blanca, Playetas, Barú (costado sur), El Laguito, Bocagrande, Centro Histórico y Punta Canoas. Estas áreas, además de registrar un alto grado de amenaza por erosión costera, presentan un desarrollo urbanístico intermedio a alto, lo que las convierte en áreas mucho más vulnerables ante este fenómeno.

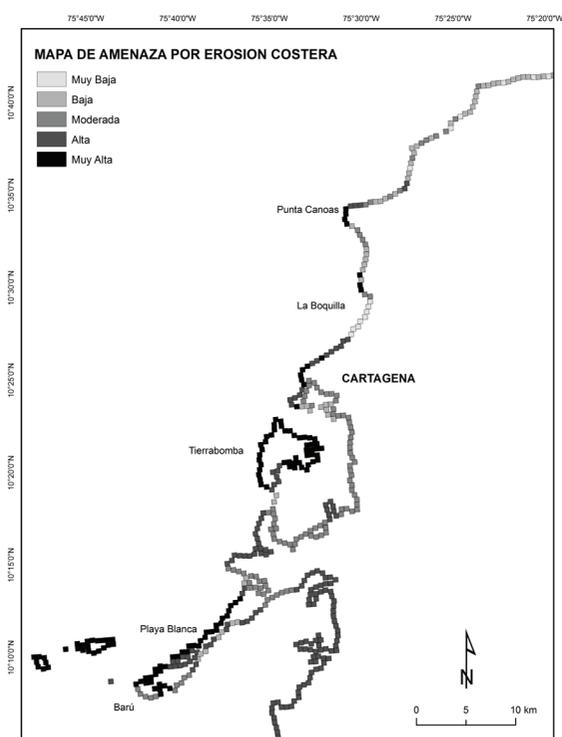


Figura 4. Mapa de amenaza por erosión costera en el área de estudio (Tomado de INVEMAR-MADS, et al., 2012).

Vulnerabilidad por erosión costera

La vulnerabilidad social (SOVI) es el grado de susceptibilidad que tienen variables como los usos del suelo, el grado de intervención humana, el porcentaje de área desarrollada y la infraestructura de servicios ante la ocurrencia de la erosión costera. Los datos

obtenidos reflejan que el 26.48 % del área de estudio se encuentra dentro de un rango de vulnerabilidad muy alta y alta, coincidiendo las zonas más vulnerables con las zonas de mayor intervención antropogénica ubicadas principalmente en el centro de la zona de estudio (ciudad de Cartagena de Indias, zona industrial de Mamonal, Tierrabomba, y parte de La Boquilla; Figura 5a). Las áreas menos vulnerables, que alcanzan un 56.41 % del total evaluado, se encuentran ubicadas hacia los extremos N y S, donde las intervenciones antropogénicas son menores y los procesos erosivos no menores.

El grado de susceptibilidad que presentan variables de tipo ecológico, como son la cobertura y el tipo de sitio prioritario de conservación ante la erosión costera, se denominó dentro de este trabajo como vulnerabilidad de la conservación (COVI). Para la línea de costa evaluada se calcularon porcentajes para esta vulnerabilidad que varían de muy bajos a bajos en un 19.28 % del área, moderados en un 27.37 %, y altos - muy altos en el 53.29 % del área (Figura 5b). Los sitios más vulnerables se localizan muy cerca de las zonas de riqueza ecológica como el Parque Natural Corales del Rosario y San Bernardo, o dentro de aquellos sitios denominados como prioritarios para su conservación (Punta Las Playas, Punta Barbacoas, Playa Blanca, Cascajal y Morro de la Venta). Estos a su vez coinciden con zonas de menor desarrollo antropogénico, aunque están registrando en los últimos años intervenciones (a menor escala) asociadas al turismo de sol y playa.

Debido al carácter de ciudad “Patrimonio Histórico y Cultural de la Humanidad” de Cartagena de Indias, se pudo realizar un mapa de vulnerabilidad por erosión costera asociada al patrimonio. Para esto se combinaron los mapas de amenaza por erosión costera y un mapa de variables asociadas a la riqueza histórica de la ciudad (presencia de alguna comunidad formada por una minoría étnica o presencia de algún monumento o resto arqueológico). El cruce de estos mapas permitió identificar que el 5 % del la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias se encuentra vulnerable ante la erosión costera desde el punto de vista del patrimonio, lo cual pone de manifiesto que el fenómeno erosivo afecta sectores prioritarios con valor cultural, como son las murallas de Bocachica y el Centro Histórico, así como asentamientos de negritudes como Barú, Tierrabomba y La Boquilla (Figura 5c).

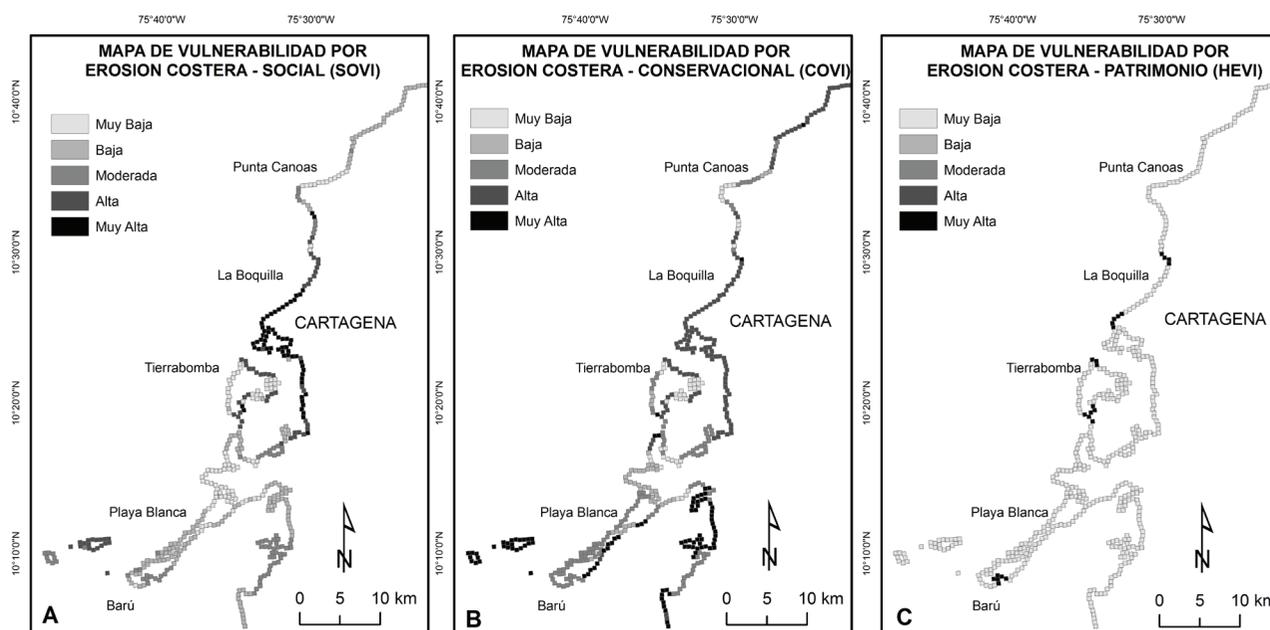


Figura 5. Mapas de vulnerabilidad por erosión costera para la línea de costa del área de estudio. a) Vulnerabilidad social (SOVI), b) Vulnerabilidad de la conservación (COVI), Vulnerabilidad del patrimonio (HEVI) (Tomado de INVEMAR-MADS, et al., 2012).

Riesgo por erosión costera

El riesgo medido desde el punto de vista social (SOVI), mostró que las áreas en mayor peligro se encuentran ubicadas en la cabecera municipal de Cartagena de Indias, y en las cabeceras de los corregimientos de Tierrabomba, Caño de Oro, Bocachica, Isla grande y al norte de La Boquilla. De manera general, el riesgo social está distribuido a lo largo de la línea de costa de la siguiente manera: riesgo muy bajo – bajo en un 49.57 % del área, riesgo moderado en un 18.87 % del área, y el riesgo alto –muy alto en el 31.53 % del área de estudio (Figura 6a). Los datos antes mencionados nos indican una fuerte correlación entre la erosión costera, la vulnerabilidad encontrada y los patrones de asentamiento antropogénicos.

Desde el punto de vista de la conservación, el riesgo representa la probabilidad de pérdidas en las coberturas por uso del suelo y en sitios prioritarios de conservación. A lo largo del área de estudio se logró determinar que el 28.41 % de la línea de costa se encuentra dentro de la categoría de riesgo muy bajo o bajo, el 26.55 % presenta riesgo moderado, y el 45 % está catalogada como de riesgo alto y muy alto (Figura 6b).

El mapa de riesgo del patrimonio muestra cómo las áreas de mayor riesgo están ubicadas en las inmediaciones de Playa Blanca, Playetas, la isla de Tierrabomba, parte de la ciudad de Cartagena de Indias, Manzanillo y Punta Canoas. Estas áreas corresponden a un 60.16 % de la totalidad de la línea de costa analizada. El 24.84 % y 14.93 % restantes corresponden a zonas de riesgo moderado y bajo o muy bajo, respectivamente (Figura 6c).

La sumatoria de los mapas anteriormente explicados, da como resultado el mapa de riesgo total para la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias. Dentro de este mapa se identificaron las áreas de Bocachica, Caño del Oro, Tierrabomba, El Laguito, Centro histórico, y parte de Crespo y La Boquilla norte como las más propensas a sufrir pérdidas, ya sean humanas o materiales (principalmente estas últimas), debido a la ocurrencia de la erosión costera. De manera general se determinó que el 18.04 % del área puede ser catalogada como de riesgo muy bajo, el 22.82 % de riesgo bajo, 32.15 % riesgo moderado, 13.69 % riesgo alto, y 13.27 % dentro del riesgo muy alto (Figura 7).

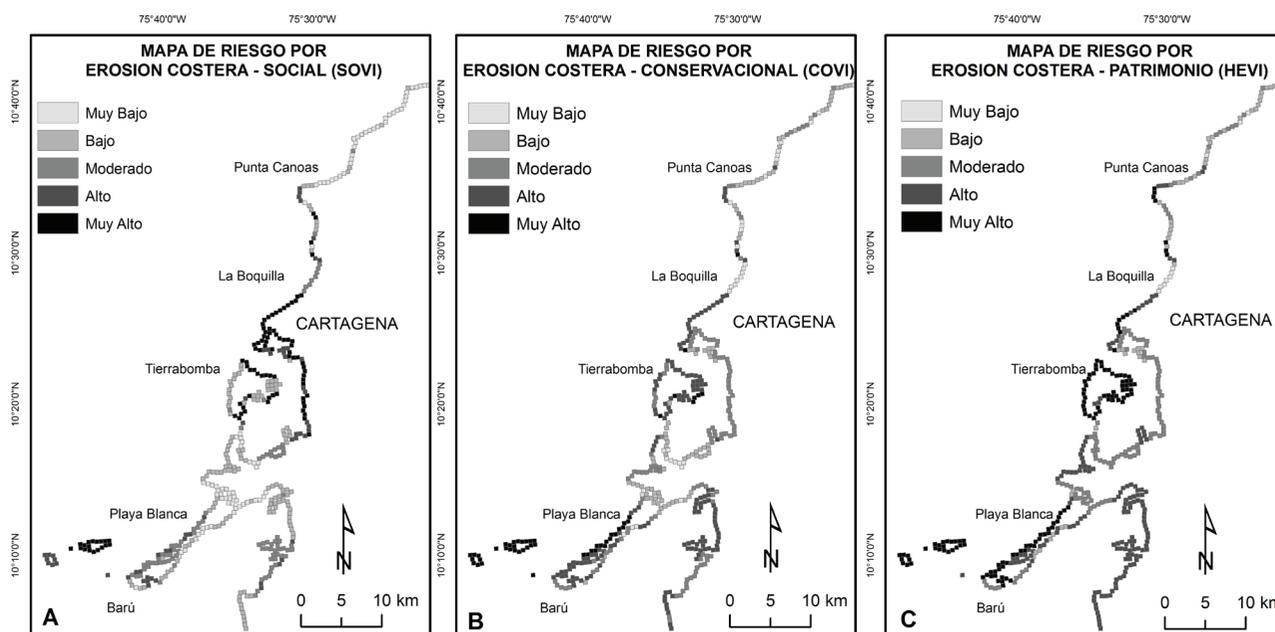


Figura 6. Mapas de riesgo por erosión costera para la línea de costa del área de estudio. a) Riesgo Social (SOVI), b) Riesgo de la conservación (COVI), Riesgo del Patrimonio (HEVI) (Tomado de INVEMAR-MADS, et al., 2012).

Consideraciones para el manejo costero

La idea de vulnerabilidad costera frente a la erosión deriva del concepto de riesgo, considerado este no solo porque la erosión costera amenaza estructuras antrópicas, sino también porque la erosión de las playas reduce su capacidad de carga turística-recreativa.

La caracterización de la vulnerabilidad y el riesgo se realizó con base en las tasas de retroceso/avance de la línea de costa, para el periodo 1994-2011, combinadas con los tipos de usos de la costa desde tres puntos de vista: el social, de la conservación y del patrimonio. De este modo se obtuvieron cinco tipos de vulnerabilidad y riesgo: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja.

Los resultados obtenidos muestran que más del 30 % de la línea de costa evaluada se encuentra en situación de riesgo. Los valores altos de vulnerabilidad y riesgo están asociados principalmente a la combinación de altas tasas de retroceso y una fuerte ocupación costera. En general, los tramos con vulnerabilidad y riesgo alto a moderado son producto de tasas de erosión moderadas a fuertes que intervienen sobre usos urbano y/o agrícola. Las zonas de vulnerabilidad y riesgo muy bajo a bajo son el resultado de poca o nula ocupación antropogénica en sectores relativamente estables.

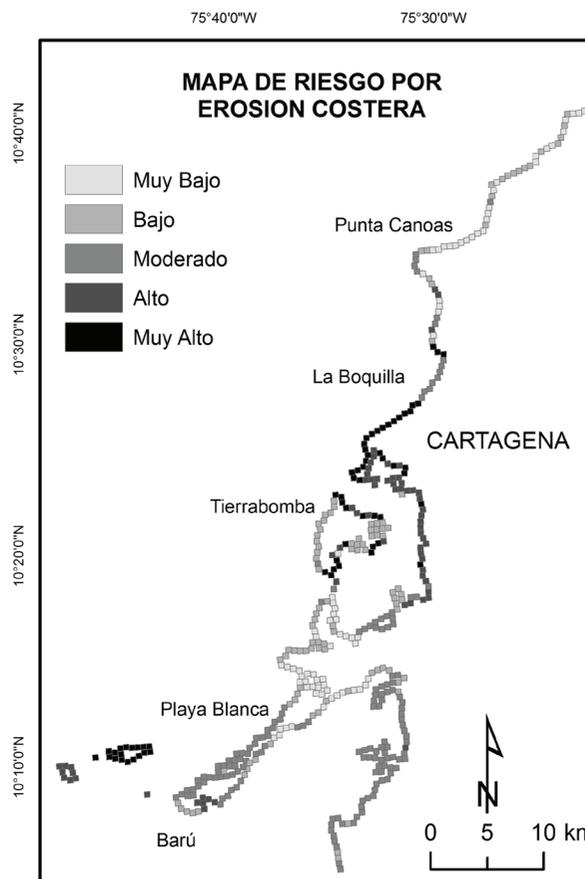


Figura 7. Mapa de riesgo por erosión costera para la línea de costa del área de estudio (Tomado de INVEMAR-MADS, et al., 2012).



Por otro lado, los resultados obtenidos permiten identificar “zonas de colapso inminente” (ZCI). Según Crowell et al., (1999). La ZCI está definida como la zona litoral a partir de la línea de costa actual, con una anchura equivalente a cinco veces la tasa media anual de retroceso costero. Con las tasas de retrocesos calculadas (que alcanzan los 12 m/año) la ZCI se localizaría por debajo de los 60m de la línea de costa, dejando de manifiesto que un porcentaje considerable de la zona litoral del área de estudio se encuentra emplazado dentro de la ZCI (El Laguito, Bocagrande o Tierrabomba).

Este estudio muestra que la ciudad de Cartagena de Indias presenta un litoral muy vulnerable y en alto riesgo asociado al retroceso costero. Esta alta vulnerabilidad y riesgo se deben, no solo a las altas tasas de erosión registradas (relacionadas con la orientación de dicho sector y el alto grado de exposición a eventos extremos e inundaciones, así como con la disminución de aportes sedimentarios provenientes del río Magdalena a causa de las obras de defensa), sino especialmente a la ocupación antropogénica centralizada que hace aumentar considerablemente las pérdidas económicas potenciales ligadas a la erosión. La delimitación del área bajo el análisis de la evolución reciente del litoral refleja la ubicación de urbanizaciones, centros turísticos y otro tipo de asentamientos en claras zonas de riesgo.

Esta situación erosiva se manifiesta en la actualidad, de tal modo que ha sido necesaria la actuación de la alcaldía del distrito de Cartagena de Indias y su Secretaría de Planeación junto con la autoridad marítima para llevar a cabo obras de protección y defensa en distintos tramos de costa (especialmente en la ciudad). La mayoría de obras de defensa no han resultado muy eficaces y han desencadenado erosión en sus inmediaciones. Probablemente, las mejores soluciones para estos problemas de erosión serían el abandono o reubicación de estructuras y asentamientos amenazados por la erosión costera (caso Tierrabomba). Sin duda, la mejor medida de defensa costera consiste en mantener playas con suficiente volumen de sedimento, por lo que sería preferible recurrir a obras de regeneración de playas, acompañadas o no de pequeñas estructuras de retención de arena. La existencia de playas amplias se constituiría en una importante fuente de ingresos económicos mediante su uso recreativo, especialmente en la ciudad de Cartagena de Indias.

CONCLUSIONES

El riesgo de erosión de la línea de costa del distrito de Cartagena de Indias, viene determinado por un gran número de factores que pueden ser divididos desde el punto de vista social, de la conservación y del patrimonio.

Como una aproximación preliminar, el uso del índice normalizado para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo ante la erosión costera proporciona una estimación semicuantitativa de las distintas variables que se encuentran implicadas en un fenómeno como es la erosión, y facilita la comparación directa de la vulnerabilidad de la línea de costa.

Los resultados obtenidos permiten determinar que el 40 % de la línea de costa se encuentra en un estado de erosión moderado a bajo, mientras que el 60 % se encuentra en estado de erosión alto o muy alto. En cuanto al riesgo, se encontró que los valores bajos y muy bajos correspondieron al 41 % de la línea de costa, mientras que el 13.69 % y 13.27 % correspondieron a valores de riesgo alto y muy alto, respectivamente.

Bajo las condiciones de cambio climático, ascenso en el nivel del mar y desbalance sedimentario, a corto, mediano y largo plazo la erosión detectada se intensificará llevando al retroceso de la línea de costa, por lo cual la adaptación debe ser una estrategia prioritaria a ser considerada. La magnitud de este problema sugiere la necesidad de dar importancia de primer orden al estudio de las medidas de adaptación. En este contexto, se recomienda profundizar en alternativas como la relocalización y protección sostenible, teniendo en cuenta que hay sitios que podrían ser usados para la aplicación de estas estrategias. De igual forma, este estudio sugiere la necesidad de ahondar en detalle acerca de las posibles zonificaciones para asentamientos, usos y aprovechamientos a lo largo del litoral, considerando, además de la erosión costera analizada en esta investigación, otras amenazas (como las inundaciones, deslizamientos, etc.), vulnerabilidades y riesgos además de los usos actuales y futuros previstos.

AGRADECIMIENTOS

Este documento es el resultado del proyecto PRY-GEZ-007-011/CDKN-INV-001 llevado a cabo por el

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR-, cofinanciado por el Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido (DFID por sus siglas en inglés) y la Dirección General de Cooperación Internacional (DGIS) de los Países Bajos en beneficio de los países en desarrollo. No obstante, las opiniones expresadas y la información incluida en el mismo no reflejan necesariamente los puntos de vista o no son las aprobadas por el DFID o la DGIS o las entidades que gestionan la aplicación de la Alianza Clima y Desarrollo (CDKN), que no asumirán la responsabilidad de dichas opiniones ni de la integridad y exactitud de la información. Los autores agradecen la oportunidad de publicar los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Cambers, G. 1998. Coping with beach erosion. UNESCO Publishing, París, 120 p.
- Correa I. D., J. Alcántara-Carrió y R. González. 2005. Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean coast. *Journal of Coastal Research* 49(1): 52-57.
- Correa, I.D. 1990. Inventario de erosión y acreción litoral (1793-1990) entre Los Morros y Galerazamba, Departamento de Bolívar, Colombia. pp 129-142. En: Hermelin, M. (Ed.) *Environmental Geology and Natural hazards of the Andean Region*, AGID Report 13, Universidad Eafit, Medellín, 593 p.
- Crowell, M., H. Leikin, M. Buckley. 1999. Evaluation of coastal erosion hazards study: an overview. *Journal of Coastal Research* SI(28): 2-9.
- Dal Cin, R. y U. Simeoni. 1994. A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy). *Journal of Coastal Research* 10(1): 18-29.
- DANE. 2010. Colombia. Proyecciones de población departamentales por área. 2005-2020. Información estadística.
- Gornitz, V.M. 1990. Vulnerability of the East coast, USA to future sea level rise. *Journal of Coastal Research* SI(9): 201-237.
- Gornitz, V.M., R.C. Daniels, T.W. White y K.R. Birdwell, K. 1994. The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research* SI(12): 327-338.
- INVEMAR-MADS-Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias-CDKN. 2012. Lineamientos para la adaptación al cambio climático de Cartagena de Indias. Proyecto Integración de la Adaptación al Cambio Climático en la Planificación Territorial y Gestión Sectorial de Cartagena de Indias. Editores: Rojas, G. X., J. Blanco y F. Navarrete. Cartagena. Serie de documentos especiales del Invemar N° 55, Invemar, Santa Marta, 40p.
- Malvarez, G., J. Pollard, y R. Domínguez. 2000. Origins, management and measurement of stress on the coast of Southern Spain. *Coastal Management* 28: 215-234.
- Martínez C., J.C. 2010. Propuesta metodológica para la estimación de la cota de inundación en la zona costera del Caribe colombiano. Tesis de Maestría en Ingeniería en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 168 p.
- McLaughlin, S., J. McKenna. y J.A.G. Cooper. 2002. Socioeconomic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research* SI(36): 487-497.
- Mimura, N., L. Nurse, R.F. McLean, J. Agard, L. Briguglio, P. Lefale, R. Payet y G. Sem. 2007. Small Islands. pp 687-716. En: Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (Eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 976 p.
- Moore, L.J. y G.B. Griggs. 2002. Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology* 181: 265-283.
- Posada, B.O y W. Henao. 2008. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Serie Publicaciones Especiales No. 13, Invemar, Santa Marta. 200 p.
- Pujos, J.L., R. Pagliardini, R. Steer, G. Vernet y O. Weber. 1984. Influence du contre-courant côtier nord-colombien sur la circulation des eaux du plateau continental: son action sur la dispersion des rejets en suspension du rio Magdalena. *Bulletin de l'institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine* 35: 77-85.
- Rangel-Buitrago, N., G. Anfuso G., I. Correa y M. Stancheva. 2010. Evaluación preliminar de impactos de defensas costeras en algunos sectores del litoral Caribe colombiano. pp 399-404. En: INVEMAR-ACIMAR (Eds.). Libro de resúmenes extendidos XIV Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (SENALMAR). Serie de Publicaciones Especiales, Invemar, Santa Marta. 578 p.



Simeoni, U., U. Tessari, G. Gabbianelli y C. Schiavi. 2003. Sea storm risk assessment in the Ravenna littoral (Adriatic Sea, Northern Italy). pp 2223-2234. En: Özhan, E. (Ed). Proceedings of the 6th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST 03, Volumen 3, Ravenna, 2374 p.

Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichichi, y T.L. Miller. 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.

Fecha de Recepción: 11/12/2012

Fecha de Aceptación: 26/04/2013

Para citar este artículo: Rangel-Buitrago, N. y B.O. Posada-Posada. 2013. Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio en la línea de costa, Caribe colombiano Revista Intrópica 8: 29 - 42

