
AMENAZAS NATURALES ASOCIADAS AL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR EN EL CARIBE COLOMBIANO

Kim Robertson*

Néstor Javier Martínez**

Omar Jaramillo***

* Ing. Geógrafo. Profesor Universidad Nacional de Colombia.

** Geólogo. Subdirección de Geomorfología y Suelos. IDEAM.

*** Geógrafo. Contratista Subdirección de Geomorfología y Suelos. IDEAM.

E-mail: kgrobertson@hotmail.com

RESUMEN

Se presentan los resultados de recientes investigaciones sobre el impacto del ascenso del nivel del mar en la Costa Caribe colombiana, bases para el primer informe de Colombia a la Convención Internacional de Cambio Climático, adelantado en convenio con el IDEAM. Con base en el estudio de las geoformas litorales, los procesos dinámicos asociados y su evolución reciente, se evaluó la amenaza por inundación y erosión asociada al actual ascenso del nivel del mar, proyectado por IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático) en un metro para el año 2100.

A partir de la interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas, apoyada en información secundaria y verificación de campo, se identificaron 15 unidades geomorfológicas básicas de origen estructural, fluvial y marino. Con base las características geomorfológicas y criterios de resiliencia frente a la acción del oleaje y la inundación litoral, se generó un modelo morfodinámico que pronostica el impacto del ascenso del nivel marino para el litoral Caribe colombiano. De acuerdo con este análisis, se estima que las unidades geomorfológicas recientes desarrolladas durante los últimos 2.500 años podrían ser reactivadas por el actual ascenso del nivel del mar, afectando numerosos centros urbanos tales como Cartagena, Santa Marta, Puerto Colombia y Turbo y actividades económicas de importancia como el comercio portuario y el turismo.

Para los 1.819 Km. de línea de costa del Caribe Colombiano, se estima que el 33.7% presenta alta susceptibilidad a la erosión marina, representado por geoformas que presentan gran fragilidad ante los procesos erosivos. En la línea de costa restante, 31,2% presenta susceptibilidad media y 35.1% susceptibilidad baja y muy baja, en una línea de costa caracterizada por geoformas con fragilidad y mecanismos de resiliencia variables. Por inundación, se pronostica que 1192 Km² de costa baja serán anegados, 2331 Km² sufrirán encharcamiento fuerte a inundación y 2336 Km² presentarán encharcamiento leve a moderado. Además de numerosos áreas urbanas, la erosión litoral y/o inundación progresiva afectarán potencialmente amplias zonas rurales y ecosistemas estratégicos como deltas, manglares y ciénagas.

Palabras claves: Ascenso del nivel del mar, amenazas naturales, litoral caribe, geomorfología, resiliencia costera, inundación litoral, erosión costera.

ABSTRACT

This paper presents the results of recent studies on the potential impact of sea level rise along the Caribbean coast of Colombia, bases for the first official Colombian report for the International Convention on Climate Change in conjunction with the Colombian weather bureau, IDEAM. Based on detailed study of landforms, associated processes and recent coastal evolution, the threat of coastal flooding and erosion are evaluated with respect to the projected sea level rise of one meter by the year 2100 as estimated by IPCC.

Coastal landform analysis, supported by satellite and aerial photo-interpretation, secondary information and field observations, produced a total of 15 geomorphic units of structural, fluvial and marine origin. Of special significance are the numerous marine terraces and exposed corral reefs, indicative a previous 2 meter high sea level during the upper Holocene and potentially susceptible to future erosion and flooding. Based on this geomorphic model as well as erosional and topographical criteria, future flooding and erosion are estimated along the total length of the Colombian Caribbean coast include major urban areas such as Cartagena, Santa Marta, Puerto Colombia and Turbo.

Along the 1,819 km Caribbean coast line, 33.7% is estimated to be highly susceptible to coastal erosion, while 31.2% and 35.1% presents moderate to low susceptibility respectively. Coastal flooding is estimated to affect severely 1192 Km² and a total of 2,331 Km² will suffer local flooding while approximately 2,336 Km² will be affected by pounding. In addition to major urban areas, coastal erosion or flooding will potentially affect significant areas of agricultural land and strategic coastal ecological systems such as deltas, mangroves and lagoons.

Key words: *Sea level rise, natural hazards, Caribbean coast, geomorphology, coastal resilience, coastal flooding, coastal erosion.*

INTRODUCCIÓN

En el marco de la elaboración del primer informe de Colombia a la convención internacional de cambio climático, entregado por el IDEAM (Alarcón *et al.*, 2001), se evaluó la vulnerabilidad de las zonas costeras colombianas al ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático. El presente informe es un resumen parcial de las investigaciones adelantadas en convenio entre el IDEAM y la Universidad Nacional y PNUD (1997, 1998 y 2001), las cuales proporcionaron una primera identificación de los impactos del ascenso acelerado del nivel del mar en Colombia, incorporando un desarrollo metodológico adaptado a las condiciones específicas del país.

El territorio nacional presenta una extensa área litoral, donde se localiza parte importante de la población del país y se llevan a cabo vitales actividades socioeconómicas que podrían verse seriamente afectadas por el ascenso del nivel del mar y los impactos asociados a este. El litoral caribe colombiano posee una línea de costa de 1.818 Km. de extensión entre la frontera con Venezuela y la frontera con Panamá, en la que se alternan zonas bajas y escarpadas intercaladas entre cabos, bahías y ensenadas; adyacente a la costa y junto con su línea litoral fueron evaluados 12.118 km² de zona costera (Mapa 1). En ella se encuentra una alta concentración de población y se presenta el desarrollo de áreas de interés turístico y portuario, que ha generado una significativa inversión en infraestructura especialmente en ciudades como Cartagena, Santa Marta, Barranquilla y Tolú. Recientes estudios (IDEAM-Universidad Nacional, 1998; Molina *et al.*, 1998) mostraron un retroceso generalizado de la costa que posiblemente está relacionado con el actual ascenso del nivel del mar.

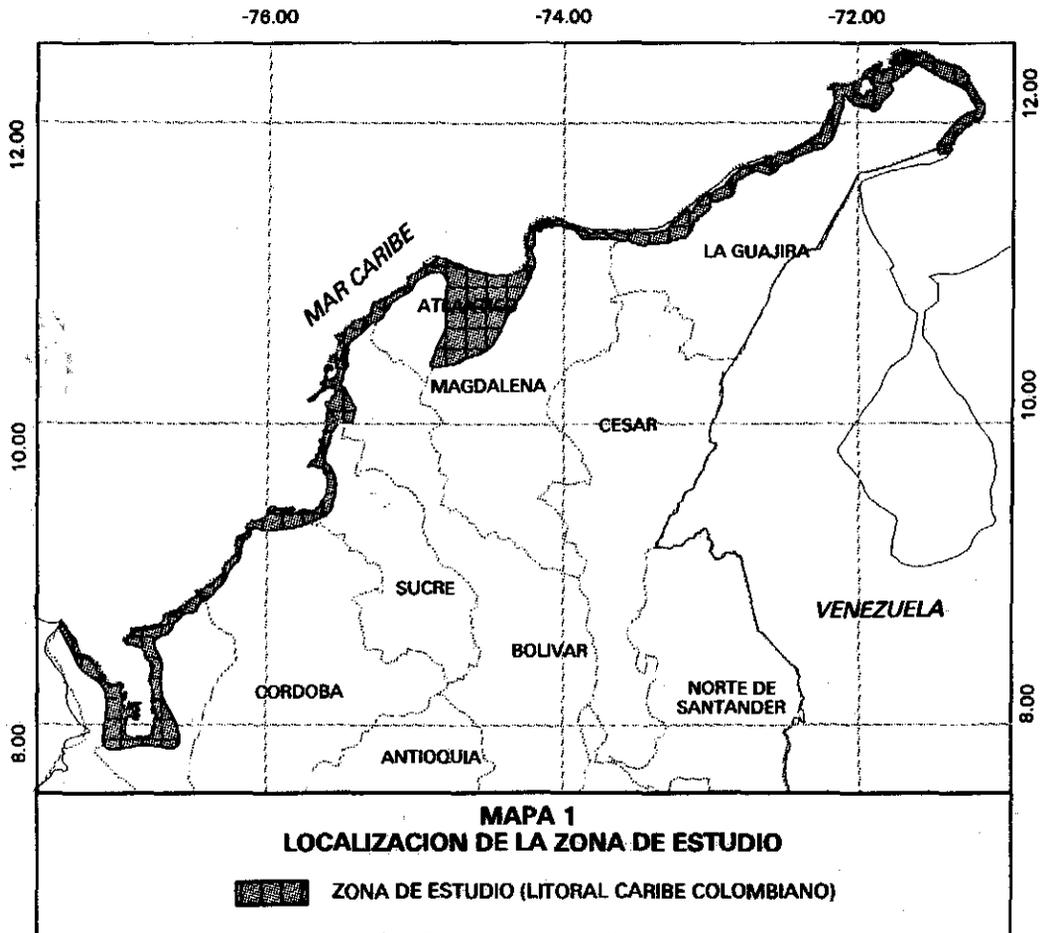
El ascenso del nivel del mar y el cambio climático

Una de las más ciertas consecuencias del cambio climático global es el ascenso del nivel del mar, el cual intensificará las presiones sobre las zonas costeras, particularmente aquellas donde las actividades humanas han disminuido la capacidad adaptativa natural y socioeconómica. Para IPCC (1995) existe una apreciable influencia humana en el clima global, como es el aumento de la temperatura media global (de entre 0.3 y 0.6 °C) desde finales del siglo XIX, el cual podría estar relacionado con el ascenso del nivel marino de 10 a 25 en los últimos 100 años.

Para Klein *et al.* (1998) los estimativos del futuro ascenso están en el rango de 20 a 86 cm para el año 2100, sin embargo, de acuerdo con Warrick *et al.* (1996) la proyección del ascenso del nivel global del mar en el período 1990-2100 considera en su estimación alta un ascenso de 96 cm., asumiendo que la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera en 1990 se mantiene constante. Sin embargo, si se consideran las reducciones en las emisiones de aerosoles que empezaron en 1990, la estimación del ascenso del nivel medio del mar podría llegar a 86 cm. Como se observa, aunque ambas estimaciones son menores pero cercanas a un metro, implican graves consecuencias para la mayor parte de las ciudades del litoral y sus actividades. Para Colombia, el IDEAM (Alarcón *et al.*, 2001) estima para el litoral Caribe un ascenso del nivel del mar de hasta 40 cm para el año 2060.

Diseño metodológico

En la evaluación de las amenazas naturales del caribe colombiano ante el ascenso del nivel del mar se consideraron los aspectos fundamentales establecidos por IPCC (1992), tales como la susceptibilidad del área costera a los cambios físicos impuestos por el ascenso del nivel del mar y la identificación de los potenciales efectos sobre el litoral. Se



estableció una base cartográfica en la cual se representaron los resultados, elaborada a partir de la compilación y análisis de información básica, que comprendió estudios temáticos previos, el uso de sensores remotos y control de campo, que permitió obtener un producto final que es presentado a escala 1:100,000.

La evaluación de la susceptibilidad y de los potenciales cambios debidos al ascenso del nivel del mar se basó en dos estudios geomorfológicos realizados por IDEAM-Universidad Nacional (1997 y 1998), donde el primero de ellos comprende un diagnóstico de los sistemas morfogénicos nacionales sobre una escala 1:500,000. El otro, más específico, comprende la caracterización morfodinámica del litoral Caribe a escala 1:100,000. Otros trabajos que fueron importantes en la base conceptual para el marco geomorfológico y el análisis de la amenaza fueron: Robertson y Martínez (1999), Chaparro y Jaramillo (2000) y Martínez (2001).

La susceptibilidad de la zona costera frente a la amenaza potencial del incremento del nivel del mar se abordó en dos escenarios complementarios: la susceptibilidad a la erosión de la línea de costa y la susceptibilidad a la inundación marina. La susceptibilidad de la línea de costa a la erosión marina se determinó mediante una matriz de decisión en la cual se calificó con valores de resistencia o comportamiento ante un proceso agresivo (estabilidad) cada unidad geomorfológica, así como un factor de resiliencia dado por los sistemas litorales a las unidades geomorfológicas, la cual depende principalmente de los aportes de sedimentos y la protección natural por la morfología. En este análisis la resiliencia se asumió como la capacidad que presentan los sistemas litorales para absorber o reducir los efectos de eventos dañinos como el cambio del nivel del mar (sensu Mimura, 1996). En la evaluación de la susceptibilidad a la inundación litoral se empleó un método empírico basado en el modelamiento

cuantitativo del medio físico, estableciéndose diferentes grados de susceptibilidad a la inundación para las geoformas que constituyen el litoral.

Teniendo en cuenta la definición de la amenaza como “la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de magnitud determinada, en un lugar y período específico”, se definió como fenómeno a evaluar el incremento del nivel del mar; la magnitud del fenómeno de 1 metro, el período de tiempo de 100 años, el efecto dañino la inundación, y el lugar específico las zonas costeras con diferentes grados de susceptibilidad. Debido a la carencia de información cartográfica detallada que permitiera trazar la cota de un metro sobre el nivel del mar, se utilizó una aproximación geomorfológica para delimitar la posible área afectada por un ascenso del nivel del mar de esta magnitud. Por las características del fenómeno amenazante, este es calificado como de acumulación lenta y de acción casi imperceptible. Con base en este escenario se estableció la zonificación de la amenaza por inundación marina a partir del mapa de susceptibilidad a la inundación de las geoformas.

CLASIFICACION GEOMORFOLOGICA DE LA ZONA LITORAL

Como base para el análisis espacial y lineal de las repercusiones del ANM se tomó como punto de partida la zonificación geomorfológica de la zona costera, cuyo marco conceptual y clasificación se explica a continuación.

Marco conceptual

Existen varias aproximaciones geomorfológicas para las costas, en las que se destacan en el contexto internacional las de IPCC (1992), Mimura (1996) y Nicholls *et al.* (1995). El IPCC propone un sistema sencillo de sólo 4 categorías básicas: costas arenosas, costas rocosas, costas acantiladas y estuarios; de otra parte, Nicholls *et al.* (1995) propone un sistema más complejo que consta de las siguientes 10 categorías: costas rocosas altas, costas rocosas bajas, acantilados erosionables, costas

arenosas, costas gravilosas, costas arcillosas, bajos pantanosos, marismas, manglares y arrecifes coralinos y cayos. Sin embargo, esta clasificación incluye algunos conceptos y categorías más aplicables a las latitudes medias y altas, que no están presentes en el ambiente tropical colombiano, y que están enfocadas para la realización de estudios de reconocimiento general.

Para este estudio, la base de análisis de los procesos de erosión e inundación partió de una caracterización y zonificación de unidades morfodinámicas litorales desarrolladas durante el convenio de investigación de IDEAM-Universidad Nacional (1997 y 1998), las cuales poseen un alto nivel de información geológica, geomorfológica y de dinámica litoral. Para la aplicación de esta información se procedió a la reclasificación de estas unidades morfodinámicas, que partió de un total de 72 unidades detalladas para dejar 15 unidades básicas, definidas en función de los procesos litorales y los requerimientos de los escenarios del ANM (Mapa 2).

Clasificación geomorfológica

De acuerdo con estos criterios, las unidades geomorfológicas básicas aplicables a los análisis de erosión e inundación litoral incluyen: cuchillas; colinas; terrazas fluvio-marinas bajas; terrazas fluvio-marinas altas; terraza marina calcárea; playa activa; playa inactiva; arrecife coralino; marismas activos bajos; marismas transicionales; llanura aluvial; ciénagas litorales; delta activo; delta inactivo bajo; y delta inactivo alto.

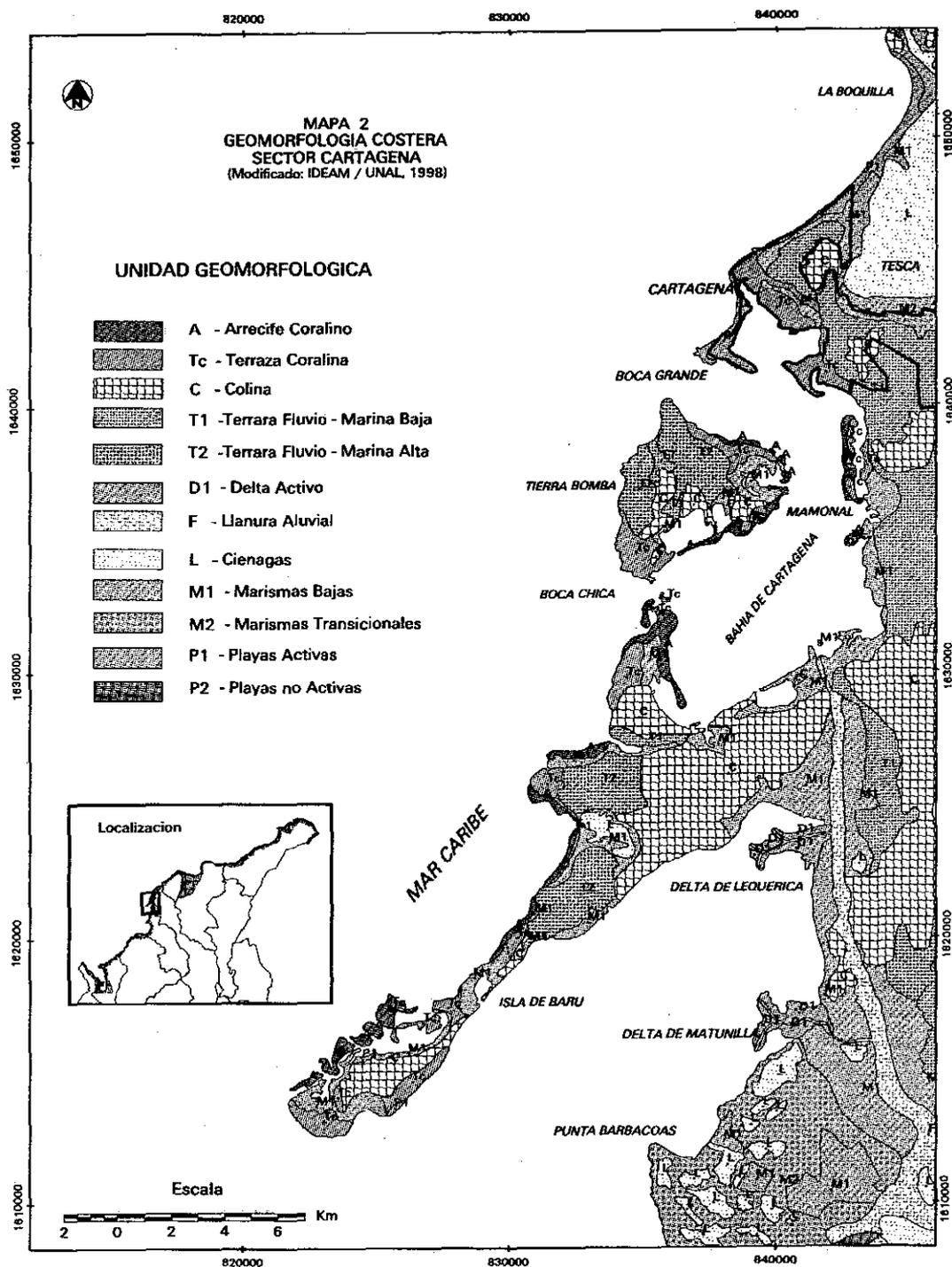
Cuchillas: Son geoformas abruptas caracterizadas por fuertes pendientes, las cuales están relacionadas con dureza relativa del sustrato rocoso. A nivel regional, las cuchillas están constituidas por rocas ígneas, metamórficas y localmente rocas sedimentarias compactas. La distribución de esta unidad se concentra en las zonas montañosas de la costa caribe, principalmente en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta y en la Serranía del Darién. Comúnmente, las laderas sobre la zona

costera constituyen acantilados abruptos a veces con procesos erosivos activos por socavación.

Colinas: Las colinas constituyen un relieve convexo en el paisaje litoral asociado a bloques sedimentarios plegados y disectados de las serranías de Macuira, San Jacinto y Las Palomas. En general, constituyen un relieve que no sobrepasa los 100 metros por encima del nivel actual del mar, en algunos casos, relacionado con un antiguo nivel de abrasión marino del Cuaternario. Ejemplos de esta morfología también pueden apreciarse en el control litoral de la bahía de Cartagena y la isla de Barú (Mapa 2).

Terrazas fluvio-marinas bajas: Corresponden a superficies levemente elevadas sobre el nivel de base regional y parcialmente disectadas, asociadas con niveles recientes de origen fluvial y marino. Los niveles más bajos constan de sedimentos cuaternarios no consolidados y poco resistentes que recubren rocas sedimentarias subyacentes de mayor resistencia. Parches de coral asociados con esta unidad han sido fechados entre los 2.400 y 2.600 años A.P., lo cual señala un nivel subreciente del mar aproximadamente 2 metros superior al nivel actual. Áreas con un desarrollo mayor de esta unidad se localizan próximas a las poblaciones de Ciénaga, Cartagena, San Bernardo del Vieito y Mulatos.

Terrazas fluvio-marinas altas: Las terrazas fluvio-marinas altas se distinguen de las terrazas fluvio-marinas bajas por su ubicación altitudinal mayor y su origen más antiguo, probablemente relacionada con antiguos niveles eustáticos. Aunque presentan una morfología y litología similar al nivel inferior de terrazas, ellas muestran una disección incipiente a moderada, que sugiere una edad mayor. Esta unidad se encuentra dispersa en la zona litoral en la forma de terrazas y abanicos disectados desde La Alta Guajira hasta Cartagena y Turbo.



Terraza marina calcárea: Son geoformas coralinas locales, aproximadamente planas, en posición elevada, resultado de la construcción sucesiva de arrecifes asociados con distintos niveles del mar. La altura de estas terrazas coralinas está relacionada con variaciones eustáticas recientes del mar y en algunos casos bajo la influencia de actividad tectónica leve de tipo regional. Estas terrazas están conformadas por estructuras coralinas in situ, es decir, corales en posición de crecimiento y detritos calcáreos incluyendo en ocasiones conchas, en general han sido fechados en 2.400 y 2.600 años AP. Las zonas donde están reportadas estas unidades incluyen Cartagena-Barú, Coveñas y la costa del Darién (Mapa 2).

Playa activa: Esta unidad corresponde a depósitos no consolidados de arenas de grano medio a grueso, localmente gravillosas, con forma convexa dominante, resultado de la acumulación litoral bajo la influencia del oleaje. Las acumulaciones arenosas provenientes de la redistribución de los aportes aluviales y la erosión litoral y su posterior transporte a lo largo de la línea de costa, pueden generar cordones sucesivos de playas. En general, los mayores cordones de playa están asociados con deltas activos tales como los próximos a las bocas de los ríos Magdalena y Sinú. Sin embargo, gran parte de los sedimentos pueden ser retransportados a lo largo de la costa por la deriva litoral, ayudando a la conformación de playas en sitios alejados de la fuente de sedimentos, como el caso de las playas de Cartagena.

Playa inactiva: Las playas inactivas se diferencian de las activas por estar localizadas en posiciones alejadas de la actual línea de costa, cubiertas por vegetación local, y en general, caracterizar por presentar una mayor altura, en general 2 a 3 metros por encima del nivel del mar actual. La formación de estas playas se relaciona con niveles más altos del mar, concordando su génesis en gran parte de ellos con los óptimos térmicos del Holoceno, ocurridos hace 3000 y 6000 años A.P. (Davis, 1996). Casos sobresalientes de estos depósitos se encuentran

próximos a Manaure, Santa Marta, Tolú, San Bernardo del Viento y Mulatos.

Arrecife coralino: Son estructuras arrecifales en forma de barrera o parches irregulares, las cuales están compuestas por corales vivos, muertos y sus detritos que están sumergidos en áreas poco profundas y expuestos a la luz del sol, la cual condiciona el crecimiento de estos ecosistemas simbióticos. Como esta unidad se encuentra semi-sumergida frente a la línea de costa, juega un papel destacado en la reducción de la erosión litoral, al amortiguar el impacto del oleaje sobre la línea de costa e incrementar el aporte de sedimentos calcáreos a las playas. Sectores donde se desarrolla este comportamiento incluye las bahías de Tairona, Tierrabomba, Barú (Mapa 1), Rincón-Tolú y el sector norte del Darién, próximo a la frontera con Panamá.

Marismas activos bajos: Estas unidades corresponden a zonas bajas mal drenadas cercanas al actual nivel del mar, en las cuales existe la mezcla de aguas saladas y aguas dulces y que se caracterizadas por estar compuestas de sedimentos aluvio-marinos no consolidados. Estas características especiales condicionan el desarrollo de diferentes formas de vida adaptadas para vivir en ambientes salobres, en especial los manglares en el trópico. Por estas características, esta unidad es especialmente susceptible a los procesos erosivos costeros relacionados con el oleaje y a la inundación litoral frente al ascenso del nivel del mar.

Marismas transicionales: Esta unidad se diferencia de las marismas activas porque poseen una mayor altura respecto al nivel del mar, debido a una génesis más antigua asociada con niveles del mar más altos, posiblemente relacionado con los óptimos térmicos del 3000 y 6000 AP. Aunque esta unidad se encuentra poco expuesta a la energía marina, es potencialmente susceptible a erosión de acuerdo a las observaciones de campo.

Ciénagas litorales: Son cuerpos de agua, generalmente salobres, localizados en zonas bajas

cercanas al nivel del mar actual. Las ciénagas se encuentran de forma regular asociadas a ambientes deltaicos bajo la influencia de los desbordes de los ríos y las mareas litorales. Por corresponder a unidades acuáticas, el concepto de erosión no se aplicó pero sus condiciones ambientales podrían ser afectadas por un incremento de su profundidad media. Algunas de las ciénagas que se incluyen en esta categoría son Camarones en La Guajira, ciénaga Grande de Santa Marta, la Caimanera en Tolú, y la ciénaga de Unguía en el delta del Atrato.

Llanura aluvial: Esta unidad corresponde a los depósitos aluviales formados en las zonas próximas a los deltas costeros, cuya génesis general está ligada a la dinámica de los ríos. Como se encuentra una gran diversidad de microgeoformas fluviales de composición similar, estas unidades se agrupan en forma conveniente en una sola unidad con similar comportamiento. Sin embargo, por su poco contacto con el ambiente marino, posición en general bien protegida por los deltas activos e inactivos, son unidades poco expuestas a la erosión litoral.

Delta Activo: Son acumulaciones fluvio-marinas no consolidadas, los cuales se configuran a partir del aporte de los sedimentos aluviales en la desembocadura de los ríos bajo la influencia del oleaje y la marea. En la actualidad, los procesos deltaicos activos evolucionan de forma diferencial, en función de los aportes de sedimentos, los procesos marinos y la intervención del hombre, presentando desde pérdidas sustanciales como en el caso del área de influencia del delta del Magdalena, hasta la de ganancias sustanciales, caso de los deltas de Tinajones, en el río Sinú, y de Matunilla, en la desembocadura del Canal del Dique (Mapa 1). De acuerdo con estas características, esta unidad se considera altamente susceptible a la erosión costera y las inundaciones litorales.

Delta inactivo bajo: Aunque los deltas inactivos bajos presentan características sedimentológicas y topográficas similares a las de los deltas activos,

estas geoformas corresponden a una génesis relacionada con el óptimo térmico de 3000 años AP. Por este aspecto, estos deltas subrecientes no se encuentran comúnmente expuestos al ataque de las olas de la zona litoral actual. Sin embargo, dada su poca altura con respecto al nivel del mar, si serán susceptibles a los procesos de inundación marina.

Delta inactivo alto: Estos deltas, al igual que los anteriores, representan geoformas inactivas que tuvieron su génesis durante periodos de los óptimos térmicos del Holoceno con un nivel del mar ligeramente superior al actual. En general, no se encuentran expuestos a los procesos erosivos de la zona costera y son parcialmente afectados por los fenómenos de inundación del río. Áreas importante con este tipo de comportamiento incluyen las fases deltaicas antiguas de los ríos Ranchería, Magdalena y Sinú.

EROSIÓN DE LA LINEA DE COSTA

El ascenso del nivel del mar causará sobre las zonas costeras diferentes efectos físicos, entre los cuales se destaca la erosión costera (Mimura, 1996), pues ella representa la remoción física de sedimentos por acción del oleaje y la deriva litoral, que producirá la pérdida de tierra y afectará la morfología litoral. En este estudio, la erosión marina fue evaluada a partir de la susceptibilidad de la línea de costa a sufrir retroceso por el desgaste que produce el oleaje, la cual se determinó teniendo en cuenta la resistencia o comportamiento frente a la abrasión (estabilidad) de cada unidad geomorfológica, la composición litológica y la resiliencia a la erosión que tiene cada sector del litoral.

Susceptibilidad a la erosión de la línea de costa

La susceptibilidad a la erosión costera se definió como el grado de propensión de un segmento de la línea de costa al desgaste debido a la ocurrencia de un evento amenazante (como el ascenso del nivel del mar), el cual depende de la fragilidad de sus

geoformas y de la capacidad del sistema natural para absorber o reducir los impactos (resiliencia). Las geoformas presentarán una respuesta diferencial a los procesos erosivos ocasionados por el ascenso del nivel del mar, la cual dependerá del grado de propensión a sufrir erosión y de su interacción con la dinámica litoral.

Para la evaluación de la susceptibilidad de la línea de costa se utilizó como herramienta el modelamiento morfodinámico, siguiendo las consideraciones de Capobianco *et al.* (1999), Vargas (1999) y Nicholls *et al.* (1995), donde el criterio de juzgamiento y las reglas de acción son progresivamente construidas de la experiencia y aplicadas a los datos y la información disponibles, con criterios subjetivos.

En el modelamiento morfodinámico se asume que el ascenso relativo del nivel del mar producirá erosión sobre las geoformas que componen la línea de costa, efecto que puede ser minimizado o completamente amortiguado por la resiliencia de los sistemas costeros. Dos tipos básicos de resiliencia fueron considerados: los aportes de sedimentos por fuentes fluviales y deriva litoral; y la protección natural que proporciona la morfología al crear posiciones de resguardo frente a los procesos erosivos del mar. Metodológicamente se asume como sustrato del modelo morfodinámico la cobertura geomorfológica, sobre la cual actúan los factores de resiliencia y protección.

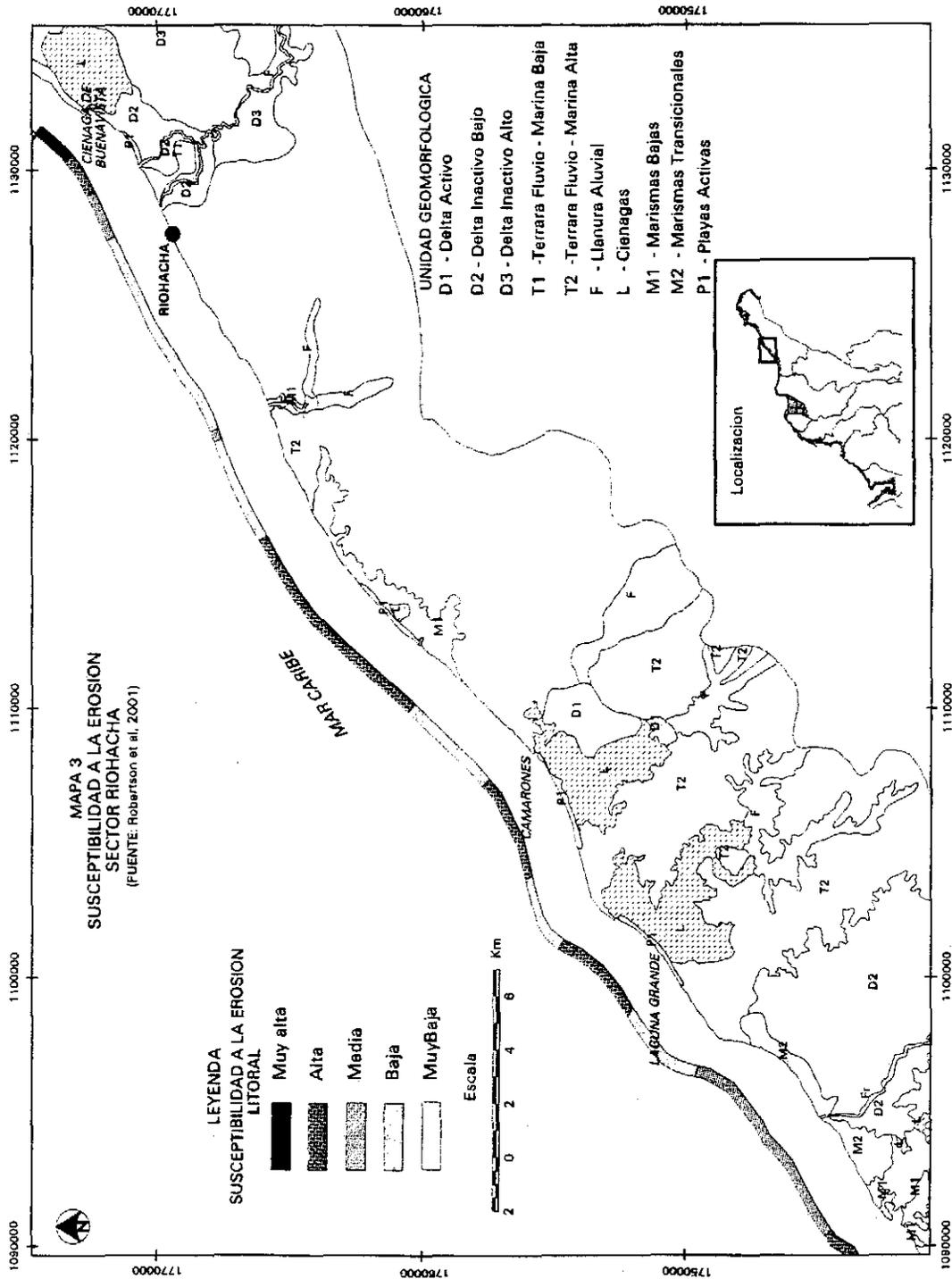
Mediante un método cualitativo se establecieron los rangos y ponderaciones de las variables y se construyó la matriz de operación. Para la evaluación de la susceptibilidad de la línea de costa se seleccionaron como variables morfodinámicas la susceptibilidad potencial, los aportes de sedimentos y la protección natural. Como resultado final se obtuvieron 5 categorías de susceptibilidad, que se resumen en la tabla 1 y se aprecia en el Mapa 3.

TABLA 1. SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DEL LITORAL CARIBE

Categoría	Litoral Caribe	
	Extensión (Km)	%
Muy baja	173.7	9.6
Baja	462.2	25.4
Media	569.5	31.2
Alta	504.7	27.8
Muy alta	108.4	6.0
<i>Total</i>	<i>1818.5</i>	<i>100</i>

Zonificación de la susceptibilidad a la erosión

Del análisis de susceptibilidad a la erosión marina se determinó que de los 1.818 Km. de línea de costa del litoral Caribe, el 9.6% está compuesto por geoformas con muy baja susceptibilidad a la erosión, 25.4% con baja susceptibilidad y 31.2% con moderada susceptibilidad. Estas geoformas corresponden a colinas y terrazas que se caracterizan por presentar fragilidad intermedia y posiciones en el litoral donde los mecanismos de resiliencia contribuyen a protegerlas del ataque del oleaje. De la línea de costa restante, el 27.8% está compuesto por geoformas altamente susceptibles y 6.0% presentan muy alta susceptibilidad. Las geoformas de la línea de costa con alta y muy alta susceptibilidad a la erosión se caracterizan por ser geoformas frágiles, compuestas principalmente por playas activas y marismas de mangles, unidades geomorfológicas que constituyen el 50.4% de la franja litoral.



Es de resaltar que las playas son la geoforma más representativa en las categorías de susceptibilidad muy alta y alta, alcanzando 436,9 Km de extensión del total del Caribe. Estas constituyen la geoforma con mayor extensión sobre la zona costera y poseen además gran valor económico y paisajístico para la sociedad, debido al desarrollo preferencial de las actividades turísticas. Bird (1993) señala que gran parte de las playas construidas durante el Holoceno Superior serán afectada y superada por el ANM, situación que parece darse en estos momentos en muchas de las playas del litoral colombiano, en especial en aquellas que presentan déficit de sedimentos como es el caso especial de: Mallorquín, en el costado occidental de los tajamares de Bocas de Ceniza; en la zona al norte de Riohacha, en el departamento de La Guajira; Coveñas, y Tolú en el departamento de Sucre, Arboletes y Turbo, en el Urabá antioqueño y la zona de la Boquilla en Cartagena.

INUNDACIÓN DEL LITORAL

Una de las principales implicaciones morfológicas del ascenso del nivel del mar es la inundación de pantanos y tierras bajas costeras, la cual podría comprender el permanente sumergimiento de planos litorales y el desplazamiento hacia el continente de las zonas pantanosas asociadas, además de otros posibles efectos como el incremento de los desbordamientos en los sistemas fluviales, la salinización de suelos y acuíferos y el ascenso del nivel freático. La evaluación de la amenaza por inundación en el litoral Caribe colombiano por el ascenso del nivel del mar se basó en un modelo físico geomorfológico que utiliza como método de aproximación la reconstrucción morfodinámica de una costa con un nivel mas alto del mar, que también permitió identificar los potenciales efectos sobre la morfología litoral y la dinámica por el ascenso del nivel marino.

Las geoformas y la dinámica litoral

La configuración actual del litoral es el resultado de las geoformas construidas durante los últimos 6000 años (Davis, 1996; Bird, 1993) y que son producto de la interacción de la deriva litoral, la marea, el oleaje, los aportes continentales, la geología, la tectónica y los cambios del nivel del mar principalmente. Algunas terrazas marinas datadas mediante C14 (Aguirre, 1994; Vernette, 1985; Page, 1982; Burel y Vernette, 1981) fueron analizadas por Robertson y Martínez (1999) e IDEAM-Universidad Nacional (1998), quienes interpretaron una línea de costa en el Caribe colombiano, construida durante un nivel del mar 2 a 3 metros mas alto que el actual hace aproximadamente 2500 años (figuras 1, 2 y 3). Para el Caribe Colombiano, la escasa actividad tectónica de la zona (IDEAM-Universidad Nacional, 1997; Caicedo *et al.*, 1996; Carvajal, 1996 y Ramírez, 1975) permite considerar que esta antigua línea de costa se relaciona principalmente con variaciones eustáticas del nivel del mar principalmente.

La reconstrucción morfodinámica permitió concluir que durante este período elevado del mar se formaron depósitos de marismas, pantanos y terrazas marinas, sobre las cuales se desarrollaron zonas inundadas, pantanosas y áreas secas, en una distribución controlada principalmente por la pendiente, la topografía, la posición altitudinal de la geoforma y sus propiedades texturales. Igualmente, las evidencias geomorfológicas mostraron que los efectos hidrodinámicos asociados con un nivel del mar dado estuvieron activos en el pasado y siguen activos en el presente.

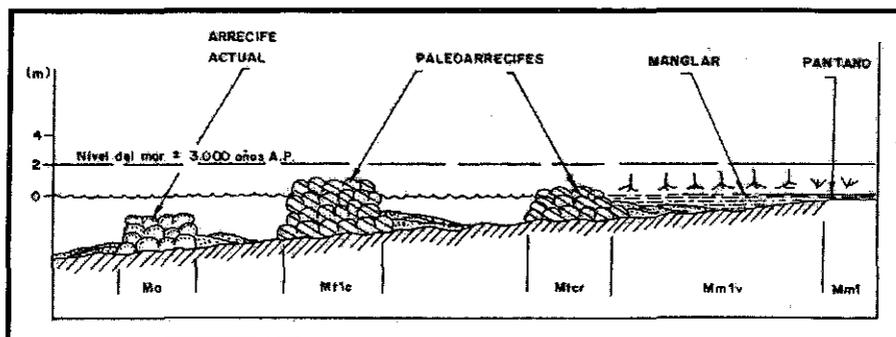


Figura 1. Perfil esquemático de la evolución reciente del litoral coralino, Sector Isla de Barú, Bolívar.

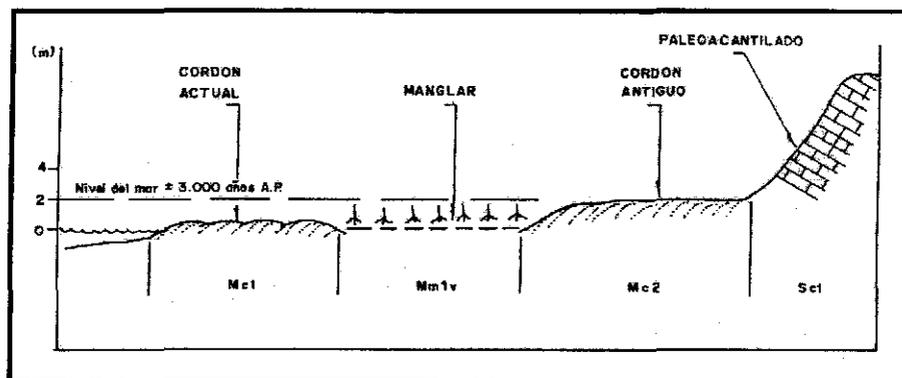


Figura 2. Perfil esquemático de la evolución reciente del litoral arenoso, sector Mallorquín, Atlántico.

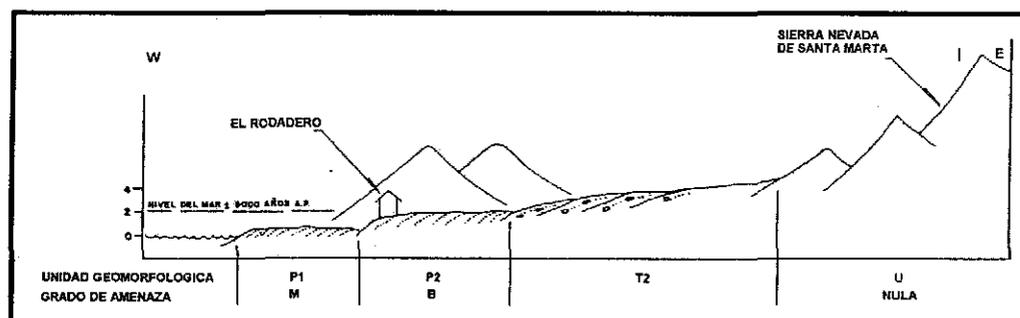


Figura 3. Perfil esquemático de la evolución reciente de litoral acantilado-arenoso, Sector El Rodadero, Magdalena.

Los efectos considerados en el estudio (de acuerdo con Warrick *et al.*, 1996; Bijlsma *et al.*, 1996; Nicholls *et al.*, 1995; y Bird, 1993) son: a) mayor sumergimiento de zonas anegadas, b) inundación permanente de áreas muy bajas y pantanosas, c) encharcamiento de áreas adyacentes y, d) aumento de los desbordes e inundaciones estacionales en las desembocaduras de ríos. Para el análisis se asume que las geoformas no han sido modificadas estructuralmente y que los efectos previstos podrían presentarse siempre que las condiciones naturales no hayan sido alteradas. Otros procesos asociados al cambio climático y que pueden causar cambios en el litoral no fueron evaluados en este estudio.

Susceptibilidad de las geoformas a la inundación

Las geoformas, constituyentes de los paisajes del Litoral Caribe, presentan una susceptibilidad intrínseca a la inundación marina. Ella es definida como el grado de propensión del terreno a presentar efectos de inundación y/o encharcamiento, efectos entendidos como fenómenos potencialmente dañinos. Para la definición y zonificación de la susceptibilidad se empleó un método empírico basado en el modelamiento cualitativo del medio físico, estableciéndose 5 grados de susceptibilidad de acuerdo con la posición altitudinal de las geoformas, las características texturales y geométricas y su relación con la dinámica marina (Mapa 4). Las categorías definidas para calificar la susceptibilidad se resumen en la tabla 2.

La amenaza por inundación del litoral

La amenaza por el ascenso del nivel del mar se define como un ascenso relativo del nivel del mar de 1 metro respecto al nivel actual, como un proceso gradual que puede ocurrir en los próximos 100 años (IPCC, 1995). Los posibles impactos de inundación que pueden generarse, se desencadenarán como función de los distintos niveles de susceptibilidad de las geoformas a la inundación marina. Para la zonificación de la

amenaza se consideraron los siguientes grados: a) amenaza alta: inundación permanente; b) amenaza media: encharcamiento fuerte a inundación; c) amenaza baja: encharcamiento moderado a leve; y d) amenaza nula.

Amenaza alta: la amenaza alta está representada por la probable inundación permanente de las geoformas bajas, calificadas con alta susceptibilidad. De acuerdo con este análisis, se considera probable la inundación permanente de 1192 km² del litoral caribe, principalmente áreas de marismas activas, manglares, salares y salinas, donde se presentará la progresiva inundación de los terrenos ante el ascenso del nivel marino dentro de los próximos 100 años.

Se verán afectadas importantes áreas de Cartagena localizadas al sur de la bahía de Tesca, donde se asientan barrios marginales sobre zonas de marisma. Caso similar ocurre en la ciudad de Turbo, donde parte de su casco urbano ha sido levantado sobre una marisma de mangle. Igualmente se verán afectadas importantes instalaciones industriales y portuarias ubicadas en antiguas marismas de mangle y plataformas coralinas como ocurre en los sectores bajos de Cartagena (Fig. 1).

Amenaza media: la amenaza media considera posible un efecto de encharcamiento fuerte a inundación sobre las geoformas calificadas con moderada susceptibilidad, en un impacto cuya magnitud variará de acuerdo con las diferencias altitudinales menores del terreno, su cercanía a la línea de costa y la morfodinámica litoral local. Comprende un área potencial afectada de 2331 km², representada en playas recientes y deltas fluviomarinos que sufrirán una inundación parcial de su superficie y procesos de retroceso por erosión. Debe destacarse que este nivel de amenaza afecta importantes centros urbanos de la costa, que incluyen sectores de Tolú, Turbo, Cartagena y Santa Marta, Puerto Colombia, entre otras ciudades (Fig. 2).

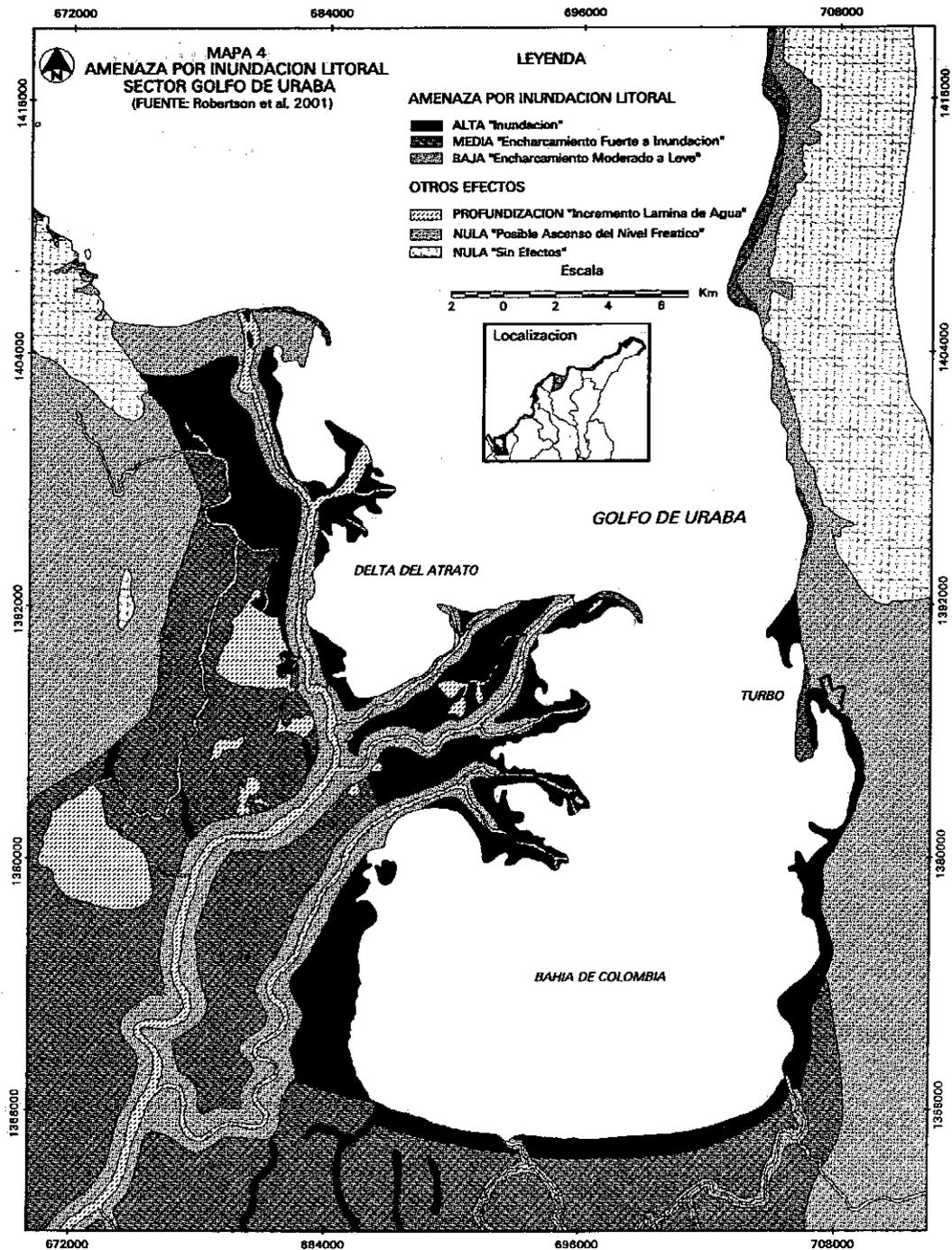


TABLA 2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS GEOFORMAS A LA INUNDACIÓN MARINA

Grado de Susceptibilidad		Leyenda	Ejemplo de geoformas incluidas
5	Muy alta	Geoformas permanentemente sumergidas (<0 msnm) con exposición directa total a la dinámica litoral.	Complejo de corales, ciénaga litoral
4	Alta	Geoformas a nivel del mar (± 0 msnm) que pueden estar temporalmente sumergidas o emergidas, generalmente expuestas a la dinámica litoral que puede afectar toda la unidad.	Marisma de mangle reciente, marisma con salares
3	Moderada	Geoformas muy bajas (0-1 msnm), expuestas a la dinámica marina, con efectos directos en la mayor parte de la unidad.	Cordón litoral reciente, marisma de mangle subreciente
2	Baja	Geoformas bajas (1-3 msnm) no expuestas y con efectos indirectos en la mayor parte de la unidad.	Cordón litoral subreciente, terraza marina reciente
1	Muy baja	Geoformas altas (3-5 msnm) no expuestas y con efectos indirectos en algunas partes menores de la unidad.	Terraza marina subreciente
0	Nula	Geoformas muy altas (>5 msnm) no expuestas y sin efectos hidrodinámicos aparentes.	Terraza marina antigua

Amenaza baja: la amenaza baja está representada por un potencial proceso de encharcamiento moderado a leve de las geoformas calificadas con baja susceptibilidad. Los potenciales efectos se presentarán sobre 2336 km² de litoral, sobre una reducida pero sensible área para el desarrollo del litoral y los centros de población: las playas inactivas y las terrazas bajas. Las áreas más importantes incluyen zonas planas de Urabá, con extensos cultivos de banano y zonas deltaicas, que sirven como áreas de asentamientos menores en los sistemas fluviales del Atrato, Sinú, Magdalena y Ranchería. En esta zona también se encuentran sectores urbanos de poblaciones importantes como Cartagena, Barranquilla, Tolú, y Santa Marta, zonas especialmente sensibles al ascenso del nivel freático (Fig. 3).

Amenaza nula: La amenaza nula considera improbable la inundación por efecto del ascenso del nivel del mar previsto. Comprende los terrenos constituidos por geoformas que superan los cinco metros de altura, buen drenaje superficial y pendientes moderadas a fuertes, representadas por terrazas alta y colinas. Poblaciones localizadas en terrenos con estas características incluyen las zonas urbanas altas de Santa Marta, Barranquilla y Cartagena (Fig. 3).

Otros efectos amenazantes

Asociados con el proceso de inundación marina por el ascenso del nivel del mar, se presentarían también otros efectos que pueden ser considerados indirectos pero que están conectados con este fenómeno. Estos otros impactos que se observarían sobre el litoral son: profundización de los cuerpos de agua y ascenso del nivel freático.

Profundización: esta zona corresponde a áreas actualmente inundadas o sumergidas donde se presentará un aumento en el espesor de agua ante el cambio del nivel marino. Debido a su alta susceptibilidad a la inundación marina se consideró la potencial ocurrencia del incremento en la inundación o profundización frente al ANM, que puede afectar la productividad de los ecosistemas arrecifales y lagunares, de los corales y de algunas poblaciones menores que viven en las ciénagas litorales sobre palafitos.

Ascenso del nivel freático: Este efecto se prevé para las terrazas bajas, con posición altitudinal entre los tres y cinco metros sobre el nivel del mar actual, y muy baja susceptibilidad a la inundación. Las unidades serán potencialmente afectadas por un cambio en el nivel freático que localmente provocará problemas de encharcamiento leve de acuerdo con las condiciones topográficas locales. Como poblaciones afectadas, en forma parcial, se incluyen a las ciudades de Riohacha y Cartagena.

CONCLUSIONES

La evaluación de las amenazas naturales del litoral caribe colombiano frente al potencial ascenso del nivel del mar proyectado en un metro para dentro de 100 años, permitió tener una visión general del grado de afectación por inundación y erosión que tendrá el litoral. Para este estudio en particular, la geomorfología costera constituyó la base fundamental para conocer la evolución reciente y potencial de la costa por los cambios del nivel del mar, y específicamente, con los procesos de erosión e inundación. Este análisis permitió generar un modelo morfodinámico de la zona litoral capaz de estimar la influencia del cambio climático y el ascenso del nivel del mar estimado por el IPCC en 1 metro para los próximos 100 años.

La zonificación de la amenaza por inundación marina en el Litoral Caribe mostró que de los 12.188,4 Km² del área de estudio, se encuentra en amenaza alta el 9.8% de la zona, con inundación permanente de marismas activas, manglares, salares

y salinas. La amenaza media alcanza el 19.1% del área analizada, con encharcamiento fuerte hasta la inundación permanente en los cordones de playas y deltas activos. Las terrazas litorales comprendidas entre 1 y 3 metros de altura presentan una amenaza baja con encharcamiento leve a moderado en el 19.2% del área de estudio. También se presentan fenómenos de profundización y el ascenso del nivel freático en la zona litoral con el 11.0% y el 16.7% del área analizada respectivamente. Finalmente, el 24.2% del área de estudio del Caribe comprende geoformas consideradas sin amenaza tales como las terrazas altas, colinas y cuchillas, todas fuera del alcance del proyectado ascenso del nivel del mar.

El análisis y la zonificación de la susceptibilidad a la erosión en el Litoral Caribe permitió identificar que está compuesta en un 9.6% por geoformas con muy baja susceptibilidad, 25.5% con baja susceptibilidad y 31.2% con moderada susceptibilidad. Estas geoformas corresponden a colinas y terrazas que se caracterizan por presentar fragilidad variable y posiciones en el litoral donde los mecanismos de resiliencia contribuyen a protegerlas del ataque del oleaje. De la línea de costa restante, el 27.8% está compuesta por geoformas altamente susceptibles y 5.9% presentan muy alta susceptibilidad. Las geoformas de la línea de costa con alta y muy alta susceptibilidad a la erosión se caracterizan por ser geoformas frágiles son principalmente playas activas y marismas de mangle, unidades que comprenden el 50.4% de la zona litoral. Estas terrenos coinciden frecuentemente con centros urbanos turismo y ecosistemas estratégicos como los deltas y manglares, lo cual los hacen altamente vulnerables al ANM.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, N., (1994). Análisis Morfodinámico de la Cuenca Hidrográfica Norte del Río Sinú. Revista SIG-PAFC, N. 4:68-85, Bogotá.

ALARCÓN H., J. C., et al., (2001). Colombia. Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de

las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Medio Ambiente – IDEAM- PNUD. Bogotá, 307 pp.

BIJLSMA, L. et al., (1996). Coastal Zones and Small Islands. En: Watson, R.T., Zinyowera, M.C. and Moss, R.H. (eds.). *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific - Technical Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 289-324.

BIRD, E.C.F., (1993). *Submerging Coasts: The Effects of a Rising Sea Level on Coastal Environments*. Chichester: Jhon Wiley and Sons. 184 pp.

BUREL, T. & G. Vernet. (1981). Evidencias de Cambios en el Nivel del Mar en el Cuaternario de la Región de Cartagena Bolívar. EN: *Revista CIAF* 6(1-3):77-92.

CAICEDO, J.H.; Meyer, H.; Steer, R. y Martinelli, B., (1996). Efecto de Tsunami del Mar Caribe en la Costa de Colombia. En: SEMINARIO NACIONAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DEL MAR. (10º: Bogotá). *Memorias del X Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Bogotá: CCO. 1 v.

CAPOBLANCO, M. et al., (1999). Coastal Area Impact and Vulnerability Assessment: The Point of View of a Morphodynamic Modeller. En: *Journal of Coastal Research*, 15(3):701-716

CARVAJAL, J.H., (1996). Amenazas Geológicas en las Zonas Urbanizadas de Cartagena de Indias, Colombia. En: CONGRESO COLOMBIANO DE GEOLOGIA. (7º: Bogotá). *Memorias del VII Congreso Colombiano DE GEOLOGÍA*. BOGOTÁ: INGEOMINAS. P. 96-110.

CHAPARRO, J. y Jaramillo, O., (2000). Impactos socio-ambientales del ascenso del nivel de mar en la Isla de San Andrés. Trabajo de grado (Departamento de Geografía), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1-127.

DAVIS, RA., (1996). *Coasts*. Prentice may, New Jersey, 274 pp.

IDEAM-Universidad Nacional, (1998). *Geomorfología del Litoral Caribe. Morfodinámica y Amenazas Naturales*. Convenio IDEAM-Universidad Nacional, Bogotá, 187 pp.

IDEAM-Universidad Nacional, (1997). *Morfodinámica, Población y Amenazas Naturales en el Litoral Caribe Colombiano (Valle del Sinú-Morrosquillo-Canal del Dique)*. Convenio IDEAM-Universidad Nacional, Bogotá, 155 pp.

IPCC, (1995). *Cambio Climático, Segunda Evaluación. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático*. OMM-PNUMA, Ginebra, 71 pp.

IPCC, (1992). *A Common Methodology for Assessing Vulnerability to Sea Level Rise*. 2nd Revision. En: IPCC CZMS. *Global Climate and The Rising Challenge of The Sea*. The Hague: Ministry of Transport, Public Works and Water Management of The Netherlands. Appendix C, 27 pp.

KLEIN, R.J. et al., (1998). Coastal Zones. En: Feenstra, J.F. et al., (eds). *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*. Amsterdam: UNEP. p. 7-1 to 7-34.

MARTÍNEZ A., N.J., (2001). *La Dinámica Fluvial y Litoral del Delta del Magdalena. Bases para un Manejo Sostenible Frente al Ascenso del Nivel del Mar*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1-115

MIMURA, N. (ed.), (1996). *Data Book of Sea-level Rise*. Center for Global Environmental Research, Tokio, 88 pp.

MOLINA, L.E. et al., (1998). Geomorfología y Aspectos Erosivos del Litoral Caribe Colombiano. En: *Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS*. No. 21: 1-74.

NICHOLLS, R.J. et al., (1995). Impacts and responses to sea-level rise: qualitative and quantitative assessments. En: *Journal of Coastal Research Special Issue*. No.14: 26-43.

PAGE, W. (1982). *Deformación Tectónica de la Costa Caribe al Noroeste de Colombia*. IV Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.

RAMÍREZ, J., (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. IGAC, Bogotá, 250 pp.

ROBERTSON, K. y Martínez A., N.J., (1999). *Cambios del Nivel del Mar durante el Holoceno en el*

Litoral Caribe Colombiano. En: Cuadernos de Geografía, 8(1): 168-198. Bogotá.

VARGAS C., G., (1999). Guía Técnica para La Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza por Movimientos en Masa. Proyecto Río Guatiquía-GTZ, Villavicencio, 197 pp.

VERNETTE G., (1985). La Plate-forme Continentale Caraïbe de Colombie (du Débouché du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du Diapirisme Argileux sur la Morphologie et la Sedimentation. These, Université de Bordeaux, France, 1-378.

WARRICK, R.A. et al., (1996). Changes in Sea Level. En: Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G. And Callander, B.A. (eds.). Climate Change 1995 - The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 359-406.