

Amenazas naturales en el litoral Pacífico colombiano asociadas al ascenso del nivel del mar

Néstor Javier Martínez Ardila¹
Omar Jaramillo Rodríguez²
Kim Robertson³

Resumen

Se evaluó el potencial impacto del ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático global sobre el litoral Pacífico colombiano, proyectado en un metro para el año 2100. 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. En el estudio se identificó que 617 Km² de costa baja serán anegados y 5 894 Km² sufrirán desde encharcamiento fuerte hasta inundación permanente, en tanto que el 8,9% de la línea de costa es altamente susceptible a la erosión, incluyéndose en esto sectores de ciudades como Buenaventura y Tumaco, así como numerosos poblados y caseríos menores distribuidos a lo largo de la costa.

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

Abstract

Natural hazards in the colombian Pacific coast associated with sea level rise

This paper analyses the potential impact of sea level rise associated with global climate change along the Colombian Pacific coast, estimated in one meter by the year 2100. Based on the study of coastal landforms, related dynamic processes and their recent evolution, this study evaluates the threat of coastal flooding and associated erosional processes related to sea level rise. In the study, it was determined that 617 Km² of coastal lowlands will suffer flooding, while 5 894 Km² will be affected by ponding and localized flooding, whereas 8,9% of the coastline is highly susceptible to erosion, including important urban sectors as Buenaventura and Tumaco, as well as many towns and villages distributed along the coast.

Keywords: Sea level rise, natural hazards, Pacific coast, geomorphology, coastal resilience, coastal flooding, coastal erosion.

1. Introducción

El territorio colombiano presenta una extensa franja de 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 Pacífico colombiano (Figura 1), con una longitud de 1495 Km de línea de costa, comprende una franja costera dominada por acantilados activos, llanuras deltaicas y extensos complejos de marismas de mangle, formados bajo un régimen macromareal.

La población asentada en el litoral se encuentra altamente concentrada en las tres ciudades más importantes del Pacífico colombiano: Buenaventura, Tumaco y Bahía Solano; en ellas se ubica el 92% de los habitantes de la región (IDEAM-Universidad Nacional 1997). Allí también se concentran las principales actividades portuarias y comerciales de la región, en tanto que la actividad turística es incipiente y se encuentra dedicada especialmente al ecoturismo y la recreación local. Anteriores estudios (IDEAM-Universidad Nacional 1997; González *et al.* 1998) mostraron la ocurrencia de procesos de retroceso de la línea de costa, que posiblemente están relacionado con el actual ascenso del nivel del mar.

1.1. El ascenso del nivel del mar y el cambio climático

El ascenso del nivel del mar es considerado una de las más ciertas consecuencias del cambio climático global, que provocará una intensificación de las presiones sobre las zonas costeras, y, especialmente, sobre áreas donde las actividades humanas han reducido la capacidad de adaptación natural y la población es vulnerable. IPCC (2001) reconoce que las emisiones de gases efecto invernadero producidas por influencia humana tienen el potencial para alterar el sistema climático, como se evidencia en el incremento de la temperatura media global ($0,6 \pm 0,2$ °C) desde finales del siglo XIX, calentamiento que ha contribuido significativamente al ascenso del nivel medio del mar en un rango de 1,0 a 2,0 mm/año durante el siglo XX.

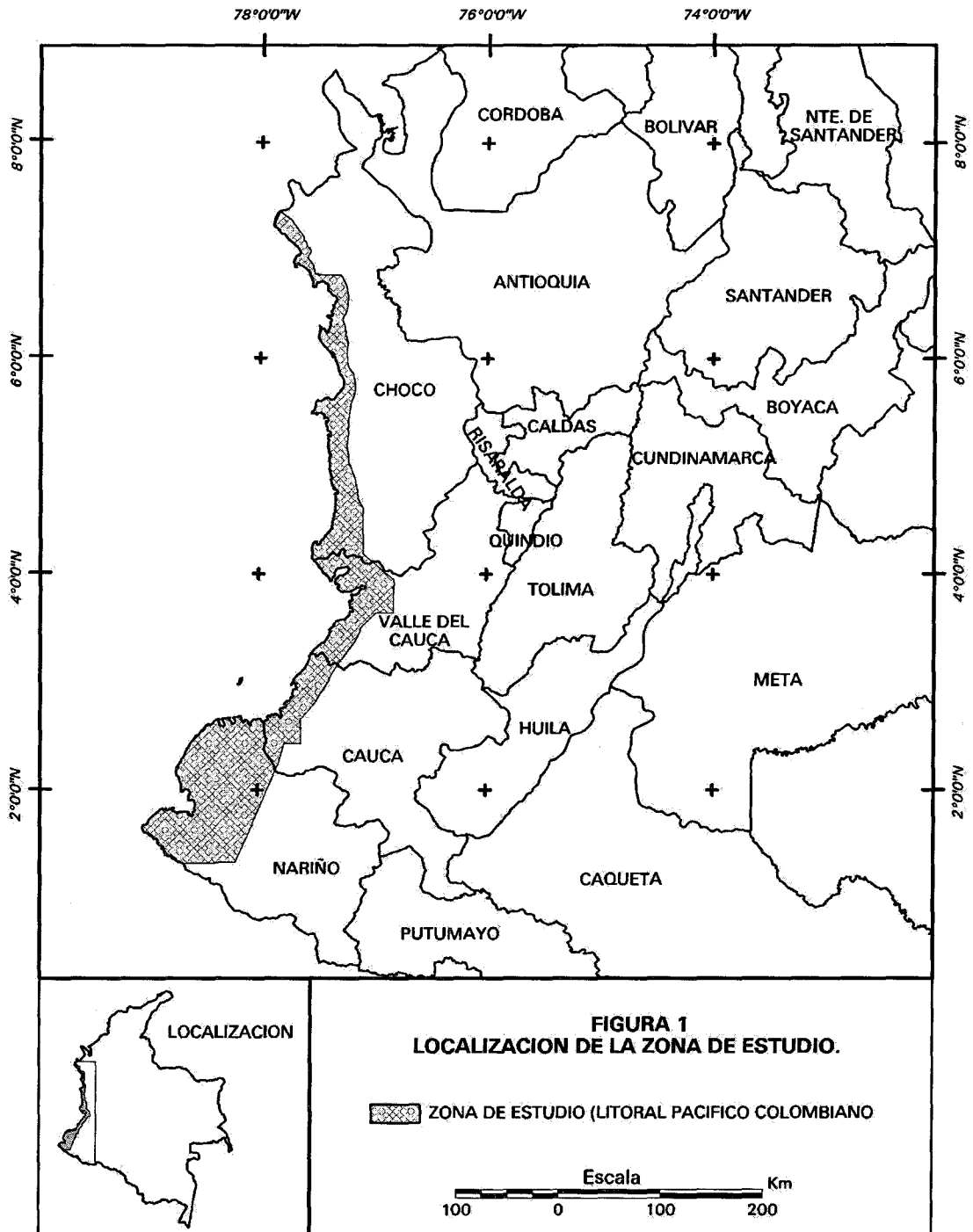
Con base en proyecciones de ascenso del nivel medio global del mar para el período 1990-2100, IPCC (2001) estima un incremento mínimo de 0,11 m y máximo de 0,77 m, siguiendo el escenario que incluye el efecto directo de las emisiones de aerosoles de sulfatos. Para el conjunto completo de escenarios, se proyecta que habrá un ascenso del nivel medio del mar de 0,09 hasta 0,88 para el período 1990 - 2100. Las dos estimaciones realizadas consideran elevaciones cercanas al metro, lo que implicaría graves consecuencias para la mayor parte de las ciudades del litoral y sus actividades. Para Colombia, el IDEAM (Alarcón *et al.* 2001) estimó para el litoral Pacífico un ascenso del nivel medio del mar de hasta 60 cm para el año 2060.

1.2. Diseño metodológico

Para la evaluación de las amenazas naturales del litoral Pacífico colombiano ante el ascenso del nivel del mar se consideraron los aspectos fundamentales establecidos por IPCC (1992), como son 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, en la que se incluyeron estudios temáticos previos, el uso de sensores remotos y control de campo, lo que permitió obtener un producto final presentado a escala 1:100 000.

La caracterización geomorfológica y morfodinámica, así como la evaluación de la susceptibilidad a los potenciales cambios debidos al ascenso del nivel del mar del litoral Pacífico, se basaron en los estudios geomorfológicos realizados por IDEAM-Universidad Nacional (1996 y 1997). El primero comprende un diagnóstico nacional de los sistemas morfogénicos sobre una escala 1:500 000, y el otro, más específico, comprende la caracterización morfodinámica del litoral Pacífico a escala 1:100 000.

La evaluación de 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. A partir de esta evaluación se realizó la zonificación de la amenaza por inundación del litoral.



De acuerdo con la definición de amenaza como “la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de magnitud determinada, en un lugar y período específico”, metodológicamente se definió el incremento del nivel del mar como el fenómeno amenazante; 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 técnica basada en 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.

2. Marco geológico general del litoral pacífico

El litoral Pacífico colombiano se extiende a lo largo de planicies fluvio-marinas de extensión variable en el sector sur y central, mientras que al norte se levanta la serranía del Baudó con acantilados prominentes. Al oriente, el litoral está limitado por el sistema montañoso de las cordilleras Occidental y Central, dominadas por rocas volcánicas y marinas, y por secuencias sedimentarias fluvio-marinas en la zona litoral. Esta diversidad de paisajes refleja el carácter activo de este margen continental convergente asociado con una zona de subducción frente a la costa.

La llanura litoral sur-central comprende abanicos fluviovolcánicos, deltas y terrazas marinas asociadas con los sistemas fluviales provenientes de las cordilleras al oriente. Los abanicos fluviovolcánicos corresponden a depósitos piroclásticos y de lahares aportados por los volcanes de las cordilleras Occidental y Central, a través de los sistemas fluviales Patía-Guaitara y Mira-Guiza (Robertson *et al.* 1996). Los deltas son depósitos recientes asociados con los ríos principales como el Mira,

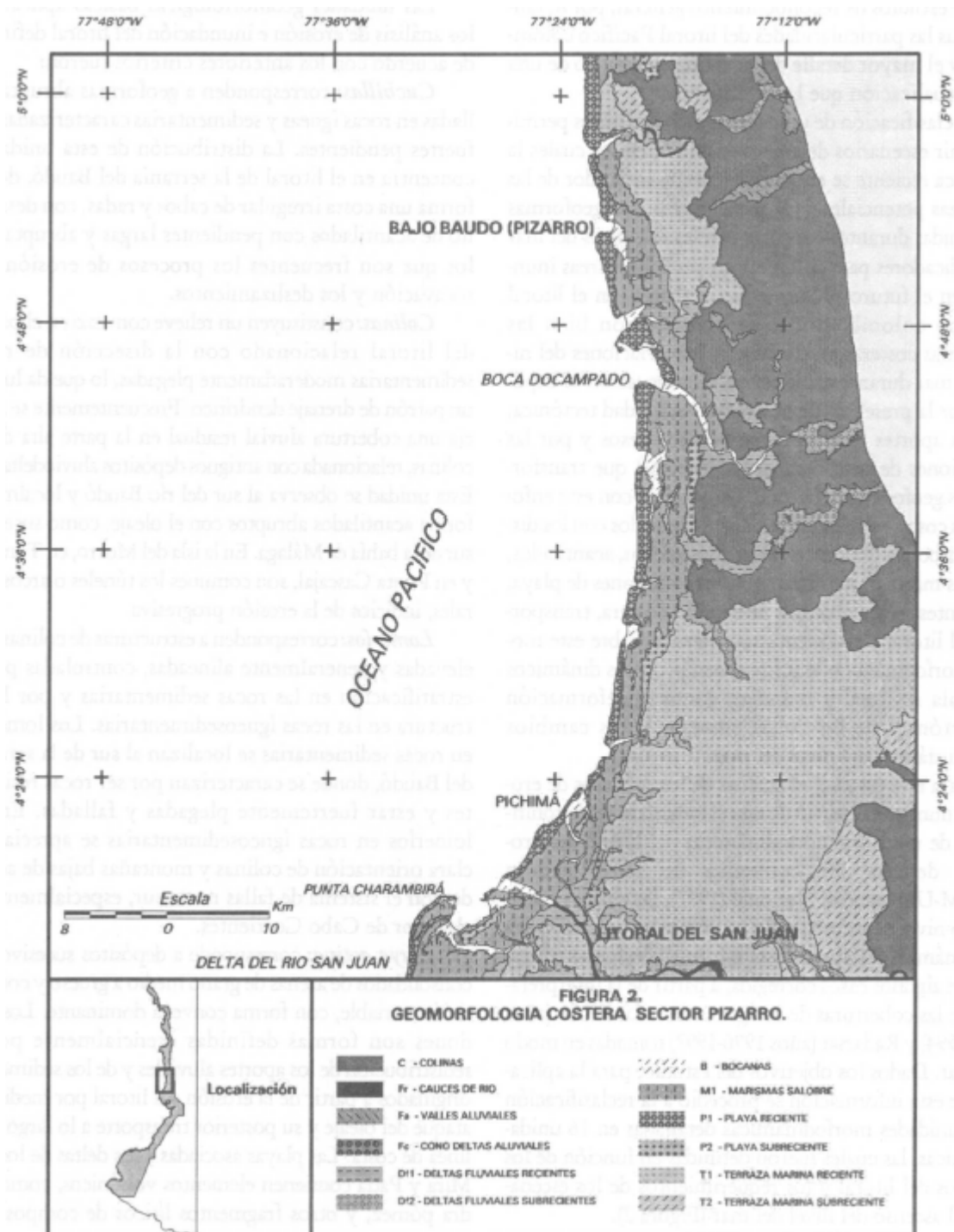
Patía, Micay, Naya y San Juan, que construyeron una planicie fluvio-marina. Las terrazas marinas son superficies planas entalladas en rocas terciarias y que actualmente se encuentran a considerable altura.

El litoral norte, que bordea la serranía del Baudó, se caracteriza por la presencia de costas acantiladas labradas en rocas máficas y ultramáficas, y por pequeñas bahías y ensenadas con presencia de pequeños cordones litorales y terrazas fluvio-marinas. Evidencias geomorfológicas (IDEAM-Universidad Nacional 1997) y sísmicas (Restrepo 1970; Ramírez 1971) señalan procesos activos de levantamiento en este bloque, producidos principalmente por procesos tectónicos compresivos. Numerosas terrazas marinas evidencian los movimientos verticales de decenas de metros durante el cuaternario superior (IDEAM-Universidad Nacional 1997).

El occidente colombiano es una zona de alta actividad sísmica. Tanto la costa como la parte interior de los departamentos de Chocó, Valle, Valle del Cauca y Nariño han sido afectadas en el pasado y en épocas históricas por terremotos de considerable magnitud (ver, p.e., Escobar 1987; Ramírez 1975). Toda la costa es considerada como de riesgo sísmico alto por su localización en una zona activa de límite de placas (zona de subducción) y de encuentro de innumerables fallas con desplazamientos horizontales y verticales, lo que configura una zona sismogénicamente activa, productora de sismos de notable capacidad destructora. Por su proximidad a la zona de subducción del Pacífico, este litoral ha sido escenario de desastres naturales ocasionados por el arribo de tsunamis que han causado devastación, especialmente en la zona sur de la costa.

3. Caracterización geomorfológica del litoral

Varias aproximaciones geomorfológicas para las costas son utilizadas en los análisis de amenazas, entre las que se destacan en el contexto internacional las de IPCC (1992), Mimura (1996) y Nicholls *et al.* (1995). Estas clasificaciones incluyen conceptos y categorías desarrollados principalmente para ser aplicables a litorales situados en latitudes medias y altas, y para la realiza-



ción de estudios de reconocimiento general; por lo tanto, dadas las particularidades del litoral Pacífico colombiano y el mayor detalle del trabajo, se requirió de una conceptualización que las considerara.

La clasificación de unidades morfodinámicas permite definir escenarios de amenaza futura, en los cuales la dinámica reciente se entiende como un indicador de las amenazas potenciales de la zona costera. Las geoformas construidas durante recientes niveles más altos del mar son indicadores para delimitar las probables áreas inundadas en el futuro próximo. Sin embargo, en el litoral Pacífico colombiano no se conservaron bien las geoformas costeras asociadas con las variaciones del nivel del mar durante el holoceno. Esta situación es explicada por la presencia de una mayor actividad tectónica, por los aportes fluviodeltaicos voluminosos y por las condiciones de macromarea (4-5 metros) que transforman las geoformas del litoral. De acuerdo con este enfoque, las costas presentan elementos asociados con los distintos procesos dinámicos, tales como deltas, acantilados, terrazas marinas, marisma litorales y cordones de playa, resultantes de los procesos de erosión costera, transporte en el litoral y sedimentación marina. Sobre este modelo morfodinámico se sobreponen procesos dinámicos de escala regional y mundial, como la deformación neotectónica de las zonas costeras y los cambios glacioeustáticos del nivel del mar.

Para este estudio, el análisis de los procesos de erosión e inundación partió de una caracterización y zonificación de unidades morfodinámicas del litoral desarrolladas dentro del convenio de investigación IDEAM-Universidad Nacional (1997), las cuales poseen un alto nivel de información geológica, geomorfológica y de dinámica del litoral. Esta información fue actualizada, y en algunos casos corregida, a partir de la interpretación de las coberturas de imágenes de radar ERS1 (años 1993-1994) y Radarsat (años 1996-1997) tomadas en modo estándar. Dados los objetivos del estudio, para la aplicación de esta información se procedió a la reclasificación de 31 unidades morfodinámicas detalladas en 16 unidades básicas, las cuales fueron definidas en función de los procesos del litoral y los requerimientos de los escenarios del ascenso del nivel del mar (Figura 2).

Las unidades geomorfológicas básicas aplicadas a los análisis de erosión e inundación del litoral definidas de acuerdo con los anteriores criterios fueron:

Cuchillas: corresponden a geoformas abruptas talladas en rocas ígneas y sedimentarias caracterizadas por fuertes pendientes. La distribución de esta unidad se concentra en el litoral de la serranía del Baudó, donde forma una costa irregular de cabos y radas, con desarrollo de acantilados con pendientes largas y abruptas, en los que son frecuentes los procesos de erosión por socavación y los deslizamientos.

Colinas: constituyen un relieve convexo en el paisaje del litoral relacionado con la disección de rocas sedimentarias moderadamente plegadas, lo que da lugar a un patrón de drenaje dendrítico. Frecuentemente se aprecia una cobertura aluvial residual en la parte alta de las colinas, relacionada con antiguos depósitos aluviodeltaicos. Esta unidad se observa al sur del río Baudó y localmente forma acantilados abruptos con el oleaje, como sucede al sur de la bahía de Málaga. En la isla del Morro, en Tumaco, y en Punta Cascajal, son comunes los túneles o arcos litorales, indicios de la erosión progresiva.

Lomeríos: corresponden a estructuras de colinas más elevadas y generalmente alineadas, controladas por la estratificación en las rocas sedimentarias y por la estructura en las rocas ígneosedimentarias. Los lomeríos en rocas sedimentarias se localizan al sur de la serranía del Baudó, donde se caracterizan por ser rocas resistentes y estar fuertemente plegadas y falladas. En los lomeríos en rocas ígneosedimentarias se aprecia una clara orientación de colinas y montañas bajas de acuerdo con el sistema de fallas norte-sur, especialmente en el sector de Cabo Corrientes.

Playa activa: corresponde a depósitos sucesivos no consolidados de arenas de grano medio a grueso y composición variable, con forma convexa dominante. Los cordones son formas definidas esencialmente por la redistribución de los aportes aluviales y de los sedimentos originados a partir de la erosión del litoral por medio del ataque del oleaje y su posterior transporte a lo largo de la línea de costa. Las playas asociadas a los deltas de los ríos Mira y Patía contienen elementos volcánicos, como piedra pómez, y otros fragmentos líticos de composición

volcánica, y, en menor grado, metamórfica. Sobre la costa central constan de arenas cuarcíticas, con un alto contenido de minerales máficos pesados. Esta segunda característica es aún más predominante en las playas menores localizadas en las bahías y radas menores a lo largo de la serranía del Baudó, también de color oscuro.

Playa no activa: es un depósito de playa localizado en un sitio alejado de la actual línea de costa, que presenta una altura superior al actual nivel del mar y que puede presentar una cobertura vegetal. Su formación está asociada a niveles más altos del mar, posiblemente concordantes con los óptimos térmicos del holoceno. Fueron observadas en el sector del delta del río Patía, así como en zonas traseras de marismas en el Chocó.

Marisma activa: es un depósito formado en zonas bajas mal drenadas, compuesto por sedimentos fluvio-marinos no consolidados, que se encuentra a nivel con el mar. Estas características especiales condicionan el desarrollo de diferentes formas de vida adaptadas a estos ambientes, en especial los bosques de mangle. La unidad se distribuye a lo largo de la costa como una franja que bordea el litoral al sur de Cabo Corrientes.

Bocana: corresponde a canales en las zonas de desembocadura de un drenaje o río en el océano. En las bocanas se presentan diferentes direcciones del flujo de agua de acuerdo con el nivel de las mareas, de manera que se incrementa el nivel durante la pleamar. Debido al régimen macromareal que caracteriza el litoral Pacífico colombiano, las bocanas pueden alcanzar gran longitud, y la influencia marina sobre ellas puede llegar al límite interno continental de las mismas marismas de mangle.

Terraza fluvio-marina baja: Corresponde a una plataforma subhorizontal parcialmente disectada que se encuentra levemente levantada sobre el nivel de base regional, y que posiblemente está asociada con antiguos niveles de origen fluvial y marino. Los niveles más bajos son de formación más reciente y constan de sedimentos cuaternarios no consolidados y poco resistentes que recubren rocas sedimentarias subyacentes de mayor resistencia. Se encuentran localizadas frente a la costa entre la ensenada de Catripe al norte y la bahía de Buenaventura al sur. Las terrazas marinas se caracteri-

zan por una cobertura aluviodeltaica que incluye desde arenas y gravillas con estratificación cruzada de dominio fluvial, hasta sedimentos arenosos bien seleccionados de playas. Estas acumulaciones superficiales, que localmente alcanzan espesores de hasta diez metros, descansan discordantemente sobre rocas sedimentarias suavemente plegadas del mioceno-plioceno.

Terraza fluvio-marina alta: está constituida por geoformas de origen marino y fluvial localizadas en una posición más elevada y que presentan un grado de disección más fuerte. Su origen es más antiguo y probablemente relacionado con los niveles del mar durante el cuaternario, o con levantamiento tectónico. Dada su posición elevada, de hasta 100 metros por encima del nivel del mar actual, su génesis debe relacionarse más bien con un levantamiento tectónico de la zona costera y de las estribaciones sureñas de la Serranía del Baudó.

Delta fluvio-marino: corresponde a las geoformas acumuladas en las áreas aluviales inferiores de los ríos que están bajo la influencia de la marea, pero que presentan predominio de agua dulce. Estas zonas se caracterizan por múltiples brazos deltaicos con caudales importantes y frecuentes desbordamientos durante gran parte del año. Los ejemplos más sobresalientes de deltas se relacionan con los ríos mayores de la región, tales como el San Juan, Patía y Mira. En menor extensión, esta unidad también se desarrolla en los ríos intermedios como el Naya, Cajambre, Dagua y Anchicayá.

Cono fluviovolcánicos de Nariño: es una acumulación fluviovolcánica de gran extensión proveniente de los volcanes de la Cordillera Occidental, localizada en el piedemonte costero de Nariño. Presenta pendientes cóncavas y más suaves hacia el mar, y una composición que varía desde capas piroclásticas con lavas andesíticas intercaladas en la zona proximal, hasta lahares y depósitos fluviovolcánicos.

Terraza aluvial: Aunque es poco extensa, los niveles típicamente aluviales se localizan preferentemente a lo largo de los ríos provenientes de la Cordillera Occidental. En general, corresponde a acumulaciones delgadas de arenas y gravillas aluviales en forma de terrazas que bordean los cauces principales y secundarios, como los ríos Micay, Naya, Anchicayá, Dagua y Calima.

Llanura aluvial de inundación: es un depósito acumulado en zonas pantanosas localizadas a nivel del río, asociado a conjuntos de lagunas, generalmente con desarrollo de vegetación típica de humedal y turberas. Se localiza principalmente sobre la parte inferior del valle aluvial del río Patía, que se constituye en el único río del litoral Pacífico con una llanura de inundación amplia, que podría evidenciar condiciones locales de subsidencia.

Vega de divagación baja: corresponde a las áreas de acumulación y erosión de los fondos de cauces inestables relacionados con una dinámica fluvial trenzada y una alta carga de sedimentos. Esta unidad está presente en la mayoría de los ríos de la región, alcanzando mayor desarrollo en los ríos principales como el Baudó, San Juan, Anchicayá, Naya, Patía y Mira. Localmente se aprecian paleocauces y meandros abandonados sobre la llanura aluvial, evidencia del poder de migración lateral de estos cauces.

Vega de divagación alta: Esta unidad corresponde al tramo alto de las vegas aluviales de divagación provenientes de la cordillera, en general fuera del alcance de la marea y los efectos del ascenso del nivel del mar. Se presentan cauces inestables con una carga alta de sedimentos y tendencias trenzadas e inundaciones frecuentes de tipo fluvial, mas no de influencia del litoral. Esta unidad alcanza su mayor desarrollo en los ríos principales como el Baudó, San Juan, Anchicayá, Naya, Patía y Mira.

Cono aluviotorrencial: Localmente, sobre los márgenes de los bloques tectónicos de la costa se desarrollan pequeños conos aluviotorrencial, a veces con influencia marina en cercanías de la costa. Los casos más destacados se encuentran sobre la parte inferior de los ríos del sur de la serranía del Baudó, como en el río Virudó. También se presentan conos sobre el río Sabaletas, afluente de río Anchicayá, al igual que sobre el río El Valle, próximo a la población del Valle (Chocó).

Valle aluvial menor: Sobre la costa acantilada de Chocó se destacan numerosos valles aluviales de tamaño menor que drenan las vertientes y desembocan sobre las playas menores de la costa Pacífica. En general, estos valles corresponden a cuencas pequeñas con menos de 15 km de longitud, pero de pendiente fuerte, en algunos casos llegando al divisorio de aguas de la Serranía del Baudó.

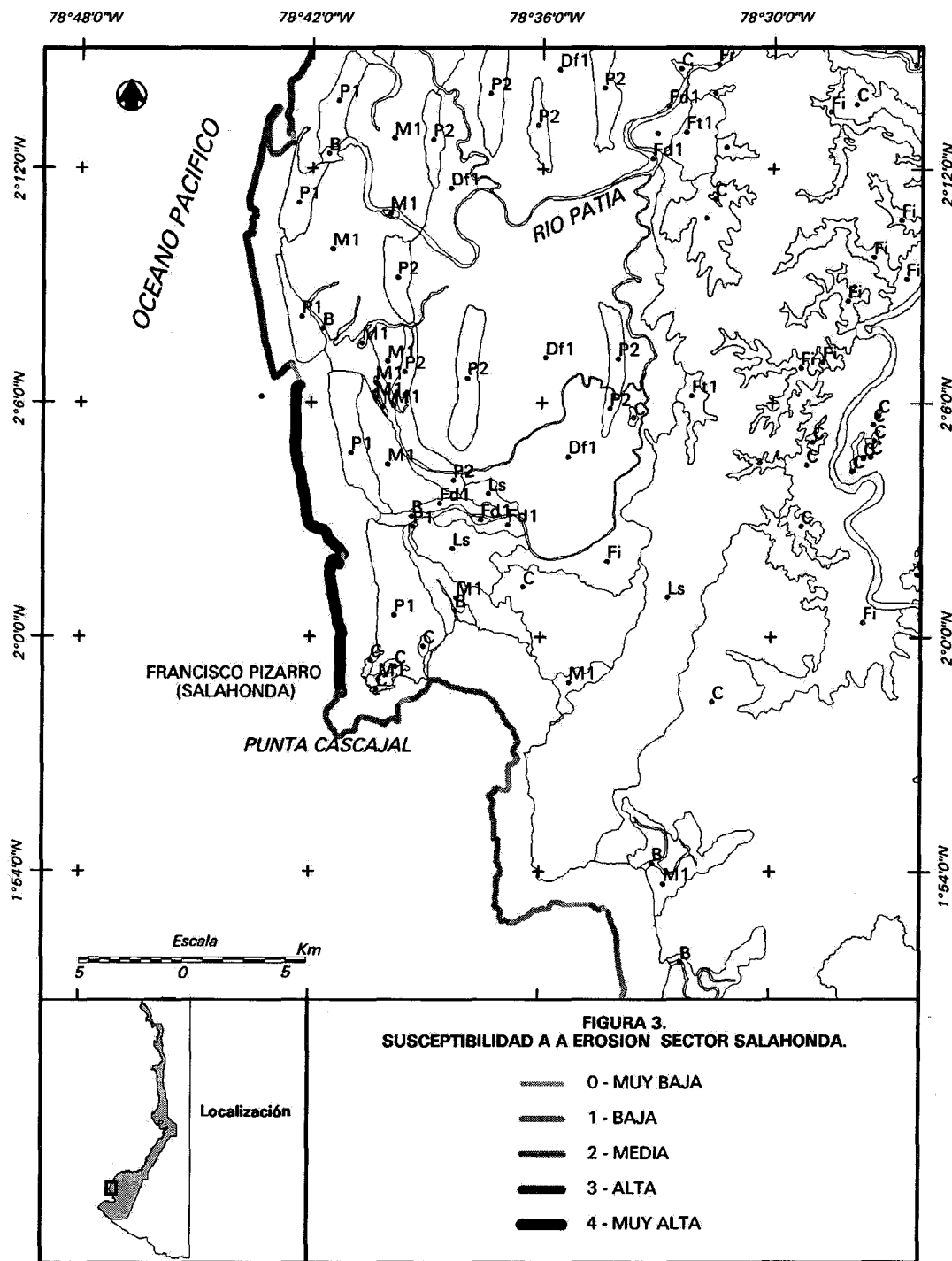
4. Erosión de la línea de costa

La erosión costera se define como la remoción física de sedimentos por acción del oleaje y la deriva del litoral, que produce la pérdida de tierra y modificación de la morfología del litoral (Mimura 1996). Es uno de los efectos físicos más destacados sobre las zonas costeras relacionados con el ascenso del nivel del mar. En este análisis, la erosión fue evaluada a partir de la propensión de la línea de costa del Pacífico a sufrir retroceso por el desgaste que produce el oleaje y la deriva del litoral.

4.1. Susceptibilidad a la erosión de la línea de costa

Las geoformas presentarán una respuesta diferencial a los procesos erosivos ocasionados por el ascenso del nivel del mar, la cual dependerá de su estabilidad y de su interacción con la dinámica del litoral. Para el presente análisis, la susceptibilidad a la erosión del litoral se definió como el grado de propensión de un segmento de la línea de costa a desarrollar un proceso de 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). La evaluación se realizó mediante el modelamiento morfodinámico y siguiendo un análisis cualitativo en el cual los criterios de juzgamiento son progresivamente construidos de la experiencia y aplicados a la información disponible con criterios subjetivos (Capobianco *et al.* 1999; Vargas 1999; Nicholls *et al.* 1995).

La susceptibilidad de la línea de costa a la erosión marina se determinó mediante una matriz de decisión en la cual se calificó la resistencia (estabilidad) de cada unidad geomorfológica ante los procesos agresivos del mar, incorporando un factor de resiliencia al proceso de desgaste marino debido a los mecanismos intrínsecos de los sistemas litorales naturales, y que dependen principalmente de los aportes de sedimentos por lo ríos y la deriva, la acción fijadora de los manglares 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). El análisis 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. Metodológicamente se asumió como sustrato del modelo morfodinámico la cobertura geomorfológica (Capobianco *et al.* 1999), 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 cinco categorías de susceptibilidad, que se resumen en la Tabla 1.

Categoría	Litoral Pacífico	
	Extensión (Km)	%
Muy baja	194,5	13,0
Baja	677,2	45,3
Media	569,5	25,1
Alta	504,7	5,8
Muy alta	108,4	3,1
No aplica	114,8	7,7
Total	1495,1	100

Tabla 1. Susceptibilidad a la erosión de la línea de costa del litoral Pacífico.

4.2. Zonificación de la susceptibilidad a la erosión

Para la costa Pacífica, se estableció que los 1495 km de línea de costa están compuestos en un 13,0% por geoformas con muy baja susceptibilidad, y en un 45,3%, por geoformas de baja susceptibilidad; están constituidos por línea de costa de terrazas y formas estructurales de montaña poco propensas a sufrir erosión por el mar. En la línea de costa restante, el 25,1% está compuesto por geoformas con moderada susceptibilidad, el 5,8% por geoformas altamente susceptibles, y el 3,1% por geoformas con muy alta susceptibilidad (Figura 3). Las geoformas de la línea de costa con moderada, alta y muy alta susceptibilidad a la erosión se caracterizan por presentar gran fragi-

lidad ante los procesos erosivos del mar, por tener exposición directa al oleaje, y por presentar moderada capacidad para reducir los efectos de la erosión. Estas geoformas son principalmente playas activas y marismas, unidades con alta predisposición a ser desgastadas por el oleaje.

Las playas, con 81,9 Km de extensión, constituyen la geoforma más susceptible a la erosión del litoral, donde los sectores que experimentan las tasas más fuertes de erosión coinciden con áreas con déficit de aportes fluviales en zonas deltaicas recientemente abandonadas como es el caso del delta reciente del Patía, situación agravada por el actual ascenso del nivel del mar. No obstante, muchas de las playas en mención se encuentren semi-protegidas por resguardo del litoral, o reciben pequeños aportes de sedimentos, los cuales no son suficientes para mantenerlas estables. Aunque algunas playas de la zona sur del Patía reciben pequeños aportes de sedimentos provenientes del desgaste del frente deltaico más al norte, dichos aportes probablemente no serán suficientes para contrarrestar los procesos erosivos que se producirán en este sector ante el ascenso del nivel del mar.

Las marismas de mangle del litoral Pacífico calificadas con muy alta y alta susceptibilidad, cubren una extensión de 51,4 Km de línea de costa y se encuentran generalmente ubicadas detrás de las playas activas y en zonas de resguardo, lo cual le proporciona a esta geoforma un grado de protección importante. Además, el litoral cuenta con grandes aportes de sedimento por parte de ríos de gran tamaño que alimentan la línea de costa. Localmente, se encuentran marismas de mangle expuestas directamente al oleaje, especial en zonas deltaicas abandonadas, como es el caso del delta reciente del Patía. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los mecanismos de resiliencia no parecen suficientes para mantener este tipo de costa ante el ascenso del nivel del mar, como ya se ve en los severos procesos erosivos observados en los sectores próximos a Caballos, en Nariño, y Sivirú, en el Chocó.

5. Inundación del litoral

La evaluación de la amenaza por inundación en el litoral Pacífico 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 más alto del mar. Este modelo también permitió identificar los potenciales efectos sobre la morfología del litoral y la dinámica por el ascenso del nivel marino. 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 y el ascenso del nivel freático.

Los efectos considerados en el estudio (de acuerdo con Warrick *et al.* 1996; Bijlsma *et al.* 1996; Nicholls *et al.* 1995; 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 desbordamientos e inundaciones estacionales en las desembocaduras de los 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 hubiesen sido alteradas. Otros procesos aso-

ciados al cambio climático y que pueden causar cambios en el litoral no fueron evaluados en este estudio.

5.1. Susceptibilidad de las geoformas a la inundación

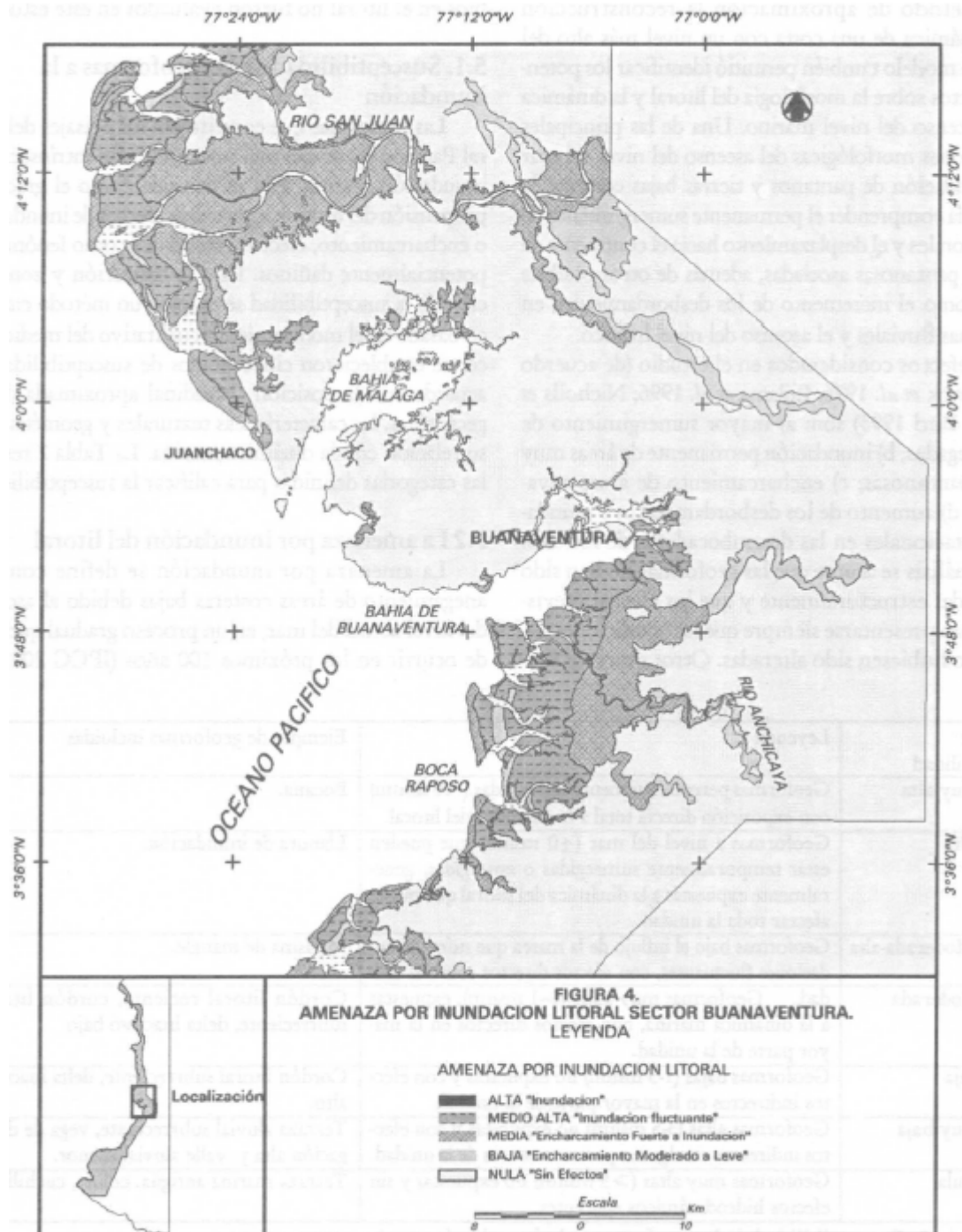
Las geoformas que constituyen los paisajes del litoral Pacífico presentan una susceptibilidad intrínseca a la inundación marina. Ella es definida como el grado de propensión del terreno a presentar efectos de inundación o encharcamiento, efectos entendidos como fenómenos potencialmente dañinos. Para la definición y zonificación de la susceptibilidad se empleó un método empírico basado en el modelamiento cualitativo del medio físico; se establecieron cinco grados de susceptibilidad de acuerdo con la posición altitudinal aproximada de las geoformas, las características texturales y geométricas y su relación con la dinámica marina. La Tabla 2 resume las categorías definidas para calificar la susceptibilidad.

5.2 La amenaza por inundación del litoral

La amenaza por inundación se define como el anegamiento de áreas costeras bajas debido al ascenso del nivel actual del mar, en un proceso gradual que puede ocurrir en los próximos 100 años (IPCC 2001) en

Grado de susceptibilidad	Leyenda	Ejemplo de geoformas incluidas
6	Muy alta	Geoformas permanentemente sumergidas (<0 msnm) con exposición directa total a la dinámica del litoral.
5	Alta	Geoformas a nivel del mar (± 0 msnm) que pueden estar temporalmente sumergidas o emergidas, generalmente expuestas a la dinámica del litoral que puede afectar toda la unidad.
4	Moderada-alta	Geoformas bajo el influjo de la marea que sufren inundaciones fluctuantes, con efectos directos sobre la unidad.
3	Moderada	Geoformas muy bajas (0-1 msnm), expuestas a la dinámica marina, con efectos directos en la mayor parte de la unidad.
2	Baja	Geoformas bajas (1-3 msnm) no expuestas y con efectos indirectos en la mayor parte de la unidad.
1	Muy baja	Geoformas altas (3-5 msnm) no expuestas y con efectos indirectos en algunas partes menores de la unidad.
0	Nula	Geoformas muy altas (>5 msnm) no expuestas y sin efectos hidrodinámicos aparentes.

Tabla 2. Susceptibilidad de las geoformas a la inundación marina.



una magnitud aproximada a 1 metro. Los posibles impactos de inundación que pueden generarse se desencadenarán de acuerdo con los distintos niveles de susceptibilidad de las geoformas a la inundación marina. Para la zonificación de la amenaza en el litoral Pacífico colombiano se evaluaron 26 494 km² de zona costera (Figura 4), y se obtuvieron los siguientes resultados:

Amenaza alta: está representada por la probable inundación permanente de las geoformas bajas con alta susceptibilidad. De acuerdo con este análisis, se considera probable la inundación permanente de 617,7 km² del litoral Pacífico, principalmente representado por las llanuras de inundación, donde se presentará la progresiva inundación de los terrenos ante el ascenso del nivel marino dentro de los próximos 100 años. Se verán afectados por inundación permanente extensos terrenos del valle fluvial y anegadizo del río Patía, así como su zona deltaica baja.

Amenaza media-alta: comprende las áreas con susceptibilidad media-alta localizadas en la zona intermareal del litoral Pacífico, donde ocurren rangos de marea cercanos a los cinco metros. Esta categoría de amenaza corresponde a las marismas de mangle, y comprende 3121,0 km² del litoral que serán afectados por una inundación fluctuante, ocasionada por el avance y retroceso periódico de la marea, la cual frente al ascenso del nivel del mar causará una mayor inundación de sus planicies mareales. Se incluyen en esta amenaza sectores de barrios marginales de las ciudades de Buenaventura, Tumaco y Satinga, levantados sobre palafitos.

Amenaza media: en esta área se considera posible un efecto que irá desde encharcamiento fuerte hasta inundación sobre las geoformas calificadas como de moderada susceptibilidad, en un impacto cuya magnitud variará de acuerdo con las diferencias altitudinales menores del terreno, la cercanía a la línea de costa y la morfodinámica del litoral local. Comprende un área potencial afectada de 2 772,9 km², representada en playas recientes y deltas fluviomarinos activos que sufrirán una inundación parcial de su superficie y procesos de retroceso por erosión. Bajo esta amenaza se encuentran numerosos caseríos distribuidos a lo largo del litoral, así como algunas zonas turísticas de Tumaco, Buenaventura y Nuquí.

Amenaza baja: comprenden terrenos que serán afectados por un potencial proceso de encharcamiento desde leve hasta moderado de las geoformas calificadas como de baja susceptibilidad, las cuales corresponden a grandes extensiones de terreno asociadas con las vegas de divagación de los grandes ríos. Los potenciales efectos se presentarán sobre 2 301,4 km² del litoral.

Amenaza nula: en estas áreas se 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, con buen drenaje superficial y pendientes moderadas a fuertes, representadas por terrazas bajas y altas, colinas y cuchillas. Entre las poblaciones localizadas en terrenos con estas características se incluye la zona urbana alta de Bahía Solano.

6. Conclusiones

La evaluación de las amenazas naturales del litoral Pacífico 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 los efectos adversos 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, por los procesos de erosión e inundación.

Reconocimientos

El presente informe parcial resume los resultados obtenidos en trabajos que sobre el tema del cambio climático y la vulnerabilidad de las zonas costeras colombianas los autores han venido realizando en diferentes proyectos de investigación adelantados por el IDEAM, algunos de ellos como parte del primer informe de Colombia a la convención internacional de cambio climático (Alarcón *et al.* 2001), en el cual se evaluó el potencial impacto del ascenso del nivel del mar en las costas colombianas, con financiación del Global Environmental Facility (GEF).

Notas

¹ Geólogo, MSc en Medio Ambiente y Desarrollo, profesional Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental del IDEAM

² Geógrafo, profesional Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM

³ Ing. Geógrafo, MSc en Ciencias de la Tierra, Profesor Asistente, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Obras citadas

- Alarcón, H., C. Juan *et al.* 2001. *Colombia. Primera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente/ IDEAM/PNUD.
- Bijlsma, L. *et al.* 1996. Coastal Zones and Small Islands. En *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analysis*, 289-324. Eds. R. T. Watson, M.C. Zinyowera y R.H. Moss. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bird, E.C.F. 1993. *Submerging Coasts: The Effects of a Rising Sea Level on Coastal Environments*. Chichester: John Wiley and Sons.
- Capobianco, M. *et al.* 1999. Coastal Area Impact and Vulnerability Assessment: The Point of View of a Morphodynamic Modeller. *Journal of Coastal Research* 15 (3):701-716.
- Escobar, W. 1987. Breve recuento de los principales sismos de la costa del Pacífico de Cauca y Nariño. En Espinosa, A., ed.: *Pladicop* 1:5-26.
- González, Juan L., Liliana C. Marín, Jaime O. Martínez y José H. Carvajal. 1998. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Pacífico colombiano. *Publicaciones geológicas especiales (Ingeominas)* 21: 75-111.
- IDEAM-Universidad Nacional. 1996. *Sistemas morfogénicos del territorio colombiano*. Bogotá: Convenio IDEAM-Universidad Nacional.
- IDEAM-Universidad Nacional. 1997. *Morfodinámica, población y amenazas naturales en la costa Pacífica colombiana*. Bogotá: Convenio IDEAM-Universidad Nacional.
- IPCC. 1992. A Common Methodology for Assessing Vulnerability to Sea Level Rise (2nd revision). En *Global Climate and the Rising Challenge of the Sea*, Appendix C. IPCC CZMS. The Hague: Ministry of Transport, Public Works and Water Management of The Netherlands.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report; A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. R.T. Watson and the Core Writing Team. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mimura, N., ed. 1996. *Data Book of Sea-Level Rise*. Tokio: Center for Global Environmental Research.
- Nicholls, R.J. *et al.* 1995. Impacts and Responses to Sea-Level Rise: Qualitative and Quantitative Assessments. *Journal of Coastal Research* (special issue) 14: 26-43.
- Ramírez, J. 1971. The Destruction of Bahía Solano, Colombia, on September 26, 1970, and the Rejuvenation of a Fault. *Seismological Society of America Bulletin* 61(4): 1041-1049.
- Ramírez, J. 1975. *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Documentación Geográfica IGAC.
- Restrepo, H. 1970. *Zona de falla de Puerto Mutis en Bahía Solano, departamento del Chocó*. Carta Técnica 0021. Bogotá: Ingeominas.
- Robertson, K., J. L. Ceballos y J. Thomas. 1996. Morfodinámica deltaica del río Patía y la costa nariñense. Colombia. X Sem. Nal. de Ciencias y Tecnologías del Mar. Mem. Bogotá.
- Vargas C., G. 1999. *Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa*. Villavicencio: Proyecto Río Guatiquía-GTZ.
- Warrick, R.A. *et al.* 1996. Changes in Sea Level. En: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, 359-406. Eds. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho y B.A. Callander. Cambridge: Cambridge University Press.