

**UNIVERSIDAD METROPOLITANA
ESCUELA GRADUADA DE ASUNTOS AMBIENTALES
SAN JUAN, PUERTO RICO**

ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO DE LA EROSIÓN COSTERA EN ISLA VERDE

Requisito parcial para la obtención del
Grado de Maestría en Ciencias en Gerencia Ambiental
en Conservación y Manejo de Recursos Naturales

Por

María Teresa Laborde Medina

6 de mayo de 2010

DEDICATORIA

*En memoria de mi amada madre Cuca,
porque fuiste el ángel que tuve en la Tierra
y desde el cielo continúas guiando mis pasos
A mi padre Raúl, gracias por tu amor incondicional,
por enseñarme las cosas importantes de la vida
y por ser el mejor padre del mundo
A ustedes, les dedico este logro profesional*

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Asuntos Ambientales y al Proyecto PICCA de la Universidad Metropolitana por brindarme la oportunidad de comenzar mis estudios graduados. A todos mis profesores de la Escuela de Asuntos Ambientales por su dedicación, esfuerzo y compromiso hacia la educación y el medio ambiente.

A mi comité de tesis, especialmente a la Dra. Álida Ortiz Sotomayor, directora de este trabajo de investigación, por sus valiosas observaciones, recomendaciones, y correcciones, nadie mejor que usted para guiarme hacia el camino correcto. Admiro su entrega a la educación y a la investigación. A la Sra. Milka Miranda, porque llegaste en el momento justo, tu ayuda en la edición de este trabajo fue vital, eres un gran ser humano nunca olvidaré tu empeño y dedicación hacia este trabajo de investigación. Al profesor Miguel Martínez Yordán por su colaboración en el análisis del GIS, las fotografías aéreas y en el diseño de la metodología.

A Roxana, por su ayuda técnica en el análisis del GIS, la creación de los mapas y todos los extras. Gracias por tu interés, dedicación y esfuerzo, fuiste parte fundamental de este trabajo de investigación.

A mi familia, especialmente a mi padre por ser el mayor apoyo en mis estudios y logros académicos, gracias por tu persistencia y por confiar en mí, te amo mucho. A mi hermana Wandy, por tu paciencia y por el préstamo de la cámara digital, me salvaste de no tener que invertir en una cámara nueva. A mi muñequita linda, mi sobrina Tatiana Liz Miranda por entender que no podíamos compartir mucho porque estaba muy ocupada trabajando con mi investigación. A mi prima y hermana Paloma Díaz, por escuchar mis quejas y lloriqueos y por siempre tener consejos y palabras de apoyo que me mantuvieron firme en mis propósitos y no me dejaron caer en momentos de desesperación.

A mi gran amigo, Anthony porque dijiste presente desde Mayagüez y siempre tuviste la paciencia y las palabras adecuadas para calmar mi estrés, definitivamente eres el mejor. A Juanqui porque desde la distancia dijiste presente. Tus palabras de ánimo y alegría devolvían la confianza en mí, en momentos de desesperación. Gracias por siempre tener una respuesta a mis preguntas técnicas, eres mi "google man". A Rose, mi amiga de la vida por tu firmeza y por recordarme en cada momento que yo podía y que jamás me dejara vencer por los obstáculos. A Shakyra, por tu confianza en mí y por sacar de tu tiempo para acompañarme a tomar las fotografías en el área de estudio. A mis amigos y compañeros de clase en la universidad Ángel, Gerardo, María Isabel y Maura por brindarme su amistad incondicional y por su apoyo. Gracias por esos momentos inolvidables durante nuestra travesía estudiantil, recuerdos que guardo con mucho cariño. A mis amigos de la red social cibernética "Facebook", por su constante apoyo, palabras de ánimo y muestras de cariño, ustedes me dieron el positivismo y la energía para seguir adelante.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE APÉNDICES	ix
LISTA DE SÍMBOLOS O ABREVIATURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
Trasfondo del problema	1
Problema de estudio	5
Justificación del estudio	9
Preguntas de investigación	12
Meta	12
Objetivos	12
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	13
Trasfondo histórico	13
Geología y descripción de la costa	13
Alteraciones en el área de estudio	18
Investigaciones relacionadas a la costa a nivel regional	20
El desarrollo sustentable y el manejo integrado de la costa	25
Estructuras costeras de protección	28
Estudios de casos	31
Marco legal	35
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	52
Área de estudio	52
Descripción de la muestra	53
Período de estudio	53
Fuente de datos	53
Diseño metodológico	53
Análisis de datos	58
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
Conclusiones	68
Recomendaciones	70
Limitaciones	73
LITERATURA CITADA	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Medida del cambio en la posición de la línea de la costa y tasa de erosión media.....	81
Tabla 2.	Cambios en el área de la playa, según fotos aéreas del 1936 al 2007	82
Tabla 3.	Variación de la superficie de playa entre 1936-2007.....	83
Tabla 4.	Entradas y salidas de sedimentos a la zona litoral.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Área de estudio.....	86
Figura 2.	Regiones costeras de Puerto Rico.....	87
Figura 3.	Fotografía aérea del año 2007, mostrando los cambios en la posición de la línea de la costa del 1936-2007.....	88
Figura 4.	Fotografía aérea del año 2007, mostrando la variación de la superficie por tramos 1-6 del 1936-2007.....	89
Figura 5.	Fotografía aérea del año 1936.....	90
Figura 6.	Fotografía aérea del año 1951.....	91
Figura 7.	Fotografía aérea del año 1962.....	92
Figura 8.	Fotografía aérea del año 1974.....	93
Figura 9.	Fotografía aérea del año 1983.....	94
Figura 10.	Fotografía aérea del año 1994.....	95
Figura 11.	Fotografía aérea del año 2007.....	96
Figura 12.	Cuadrángulo topográfico 1940-1950.....	97
Figura 13.	Fotografía aérea del año 2007, acercamiento a la técnica de estabilización suave “NuShore”.....	98
Figura 14.	Mapa de trayectoria de huracanes que afectaron a Puerto Rico desde el 1928”.....	99

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1.	Zona entre Punta El Medio y Casa Cuba (Rompeolas, gaviones y revestimientos de rocas y escombros).....	101
Apéndice 2.	Zona de la carretera PR-187 (Revestimientos “riprap”).....	107
Apéndice 3.	Boca de Cangrejos (Espigones “jetties”).....	110
Apéndice 4.	Evento de marejadas 11 de febrero de 2010.....	112
Apéndice 5.	Evento de marejadas 12 de febrero de 2010.....	114
Apéndice 6.	Evento de marejadas 14 de febrero de 2010.....	117
Apéndice 7.	Revestimientos socavados.....	119
Apéndice 8.	Oleaje que sobrepasa la línea de revestimientos.....	122
Apéndice 9.	Balneario de Carolina (“Nushore”)	124

LISTA DE SÍMBOLOS O ABREVIATURAS

AILMM	Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín
BC	Balneario de Carolina
BECC	Beach Erosion Control Corporation
BDP	Bienes de Dominio Público Marítimo Terrestre
CPNPR	Compañía de Parques Nacionales de Puerto Rico
CYC	Cangrejos Yatch Club
CZMA	Coastal Zone Management Act
DÍA	Declaración de Impacto Ambiental
DRNA	Departamento de Recursos Naturales y Ambientales
DTOP	Departamento de Transportación y Obras Públicas
EA	Evaluación Ambiental
ELA	Estado Libre Asociado de Puerto Rico
GIS	Geographical Information System
JCA	Junta de Calidad Ambiental
JP	Junta de Planificación
MAC	Municipio Autónomo de Carolina
MIC	Manejo Integrado de la Costa
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PMZC	Programa de Manejo de la Zona Costanera
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
USCOE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey
ZMT	Zona Marítimo –Terrestre

RESUMEN

Realizamos la investigación en el Municipio Autónomo de Carolina en la zona del litoral costero de Isla Verde desde Punta el Medio hasta Boca de Cangrejos. La zona costera de Isla Verde posee importantes recursos naturales, es uno de los mayores atractivos turísticos de la isla de Puerto Rico y brinda otros servicios tales como: su proximidad al Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín, la gran cantidad de hospederías, las playas, las áreas recreativas, el balneario Bandera Azul y diversas actividades acuáticas, entre otros. En las últimas décadas la zona ha sido afectada por la proliferación de construcciones desmedidas a lo largo del litoral costero que han impedido el acceso al mar, así como la pérdida de dunas y otros impactos naturales que han provocado serios problemas de erosión, y han degradado su mayor atractivo, las playas. Los objetivos principales de esta investigación son evaluar el problema de erosión costera, analizar la efectividad de las técnicas de control de erosión aplicadas y recomendar estrategias o técnicas para el control de la erosión en la zona. Cuantificamos los cambios en la posición de la línea de la costa y la variación de la superficie del litoral costero en los últimos 71 años utilizando fotografías aéreas para los años 1936, 1951, 1962, 1974, 1983, 1994 y 2007. Para el proceso de montaje, rectificación y comparación utilizamos los programas "ArcGIS" 9.2 y 9.3. Los hallazgos revelaron que la tasa de erosión media de la zona es de -7.2 metros al año, lo que representa una erosión severa. Observamos que hacia el oeste de Boca de Cangrejos la erosión fue más marcada, mientras que al centro hubo una acreción de la playa. Luego del análisis físico-espacial, concluimos que dicha erosión ha sido provocada por factores naturales como tormentas, huracanes, inundaciones y otros fenómenos atmosféricos y a factores antropogénicos como por ejemplo: la remoción de humedales para la construcción del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín y el Cangrejos Yatch Club; la remoción de dunas de arena a lo largo del litoral costero; los dragados y rellenos realizados en la Laguna Torrecilla y a la instalación de técnicas fuertes de mitigación para el control de la erosión. Estos eventos, provocaron la alteración en la dinámica de la corriente del litoral y afectaron el ciclo de migración estacional de la playa lo que causó un desequilibrio o ausencia en el aporte de sedimentos y pérdidas de los ya existentes, provocando así, la erosión en la zona. Recomendamos que sea implementado un Manejo Integrado de la Costa, que el gobierno municipal, las entidades gubernamentales y no gubernamentales y la comunidad aledaña coordinen esfuerzos para manejar, conservar y proteger la zona del litoral costero de la siguiente manera: 1) que se hagan cumplir las legislaciones aplicables a la zona costera, 2) que haya un seguimiento del plan de conservación y manejo seleccionado, 3) que el futuro desarrollo de ésta área respete las zonificaciones y el deslinde de la zona marítimo-terrestre y 4) la aplicación de estrategias de estabilización suave como la colocación de arrecifes artificiales, la regeneración de dunas y la siembra de manglares y vegetación característica de la zona marítimo-terrestre.

ABSTRACT

This research was conducted in the Autonomous Municipality of Carolina coastline area from Punta El Medio to Boca de Cangrejos. The coastal area of Isla Verde has significant natural resources, is one of the greatest tourist attractions of Puerto Rico, and provides other services such as its proximity to the International Airport Luis Muñoz Marín, a large number of inns, beaches, recreational areas, Blue Flag beach, and water activities among others. In recent decades, the area has been affected by the excessive development of buildings along the coastline that have prevented access to the beach. The loss of dunes and other natural impacts have caused serious erosion problems and have degraded the most attractive beaches. The main objectives of this research were to assess the coastal erosion problem, analyze the effectiveness of erosion control techniques used, and recommend strategies or techniques to control erosion in the future. We quantified changes in the position of the coastline and the variation of the coastal area in the last 71 years using aerial photographs for the years 1936, 1951, 1962, 1974, 1983, 1994 and 2007. For the assembly process, we used the program "ArcGIS" 9.2 and 9.3 in order to create a photo montage that allowed for relevant comparisons and corrections. The findings revealed that the average erosion rate of the zone is -7.2 meters per year, representing severe erosion. We noted that to the west of Boca de Cangrejos, erosion was most marked, while the center had an accretion of the beach. After the physical-spatial analysis, we concluded that the erosion had been caused by natural factors such as storms, hurricanes, floods and other weather phenomena as well as man-made factors such as the removal of wetlands for the construction of the airport and Cangrejos Yacht Club, the removal of sand dunes along the coastline, dredging and filling in Torrecilla Lagoon, and the installation of strong mitigation techniques for erosion control. These events led to the change in the dynamics of the current coastline and affected the cycle of seasonal migration of the beach causing an imbalance or absence in the sediment supply and loss of existing ones, thus causing the erosion of the area. We strongly recommend an implementation of an integrated coastal management system where various governmental agencies, NGOs, as well as the surrounding community coordinate efforts to manage, conserve, and protect the coastal zone in the following ways: 1) enforcing the existing laws applicable to the coastal area, 2) monitoring the conservation and management plan selected, 3) ensuring that future development of this area comply with the zoning and the delimitation of the maritime-terrestrial zone, and 4) applying various soft stabilization strategies such as placing artificial reefs, regeneration of dunes, and the planting of mangroves and vegetation of the maritime-land area.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Trasfondo del problema

La playa es la franja de terreno localizada a lo largo de la costa y está constituida por la acumulación de sedimentos no consolidados que son transportados por las corrientes marinas, el oleaje y el viento (DRNA, 1984). En la costa los agentes naturales (los ríos, el viento, y el movimiento normal de la corteza terrestre) crean una energía en dirección al mar que se manifiesta a través del proceso de erosión (DRNA, 1988). La erosión costera es un proceso natural que ocurre por la interacción de múltiples factores físicos naturales (las olas, el viento, las mareas, las corrientes, las tormentas, etc.) que interactúan con el material suelto de fácil meteorización como los depósitos aluviales, las dunas, las playas y otros materiales particulares del área que no están consolidados (Barreto, 1997). Sin embargo, se torna en un problema ambiental complejo cuando el proceso es influenciado y alterado por las actividades humanas o antropogénicas conjuntamente a los factores asociados a los movimientos normales. Esto implica que la costa pierda más material de lo normal lo que provoca un sinnúmero de problemas en términos ambientales y de pérdida de infraestructura (NRC, 1990)

El problema de la erosión costera es uno reconocido a nivel mundial (Clark, 1996). Diversos países han llevado a cabo conferencias y estudios dirigidos a buscar alternativas para mitigar el problema de la erosión costera. Muchos países que enfrentan los problemas severos de erosión en sus costas se han visto en la necesidad de realizar estudios científicos cuantitativos y cualitativos para conocer la situación, buscar alternativas y diseñar planes de manejo y conservación. En el año 2008 en Cartagena, Colombia se llevó a cabo un foro para discutir el problema de la erosión costera en la región de América Latina y el Caribe.

El cambio climático y el aumento en el nivel del mar también son identificadas como algunas de las causas naturales que contribuyen al problema de la erosión costera. Asimismo otro factor, como el mal manejo del sistema costero es una de las principales causas de origen antropogénico (Tassara & García, 2005). Existen indicios de la influencia que han tenido las actividades antropogénicas en el calentamiento terrestre el cual está directamente relacionado con los cambios en el nivel del mar (Showstack, 2000; Warrick et al., 1995; en Gómez, 2003).

Puerto Rico es una isla pequeña que no está libre de los riesgos naturales, de las complicaciones y de los desafíos que se enfrentan referentes a la conservación, al manejo y planificación del recurso costero y sus ecosistemas. La zona costanera de la isla cuenta con más de 150 playas con una longitud total de 208 km o un 41% de la línea de costa (Morelock, Ramírez & Barreto, 2002). La economía del país depende en gran parte de sus áreas costeras, pues en ellas se llevan a cabo infinidad de actividades de carácter socio-económico, recreativo, turístico, educativo y ecológico. A pesar de que se reconoce la abundancia de las costas y la importancia de las mismas por su gran valor ecológico existen problemas costeros que aquejan en la isla.

Los principales problemas costeros están relacionados a la contaminación biológica por coliformes y química por descargas ilegales; los desperdicios sólidos; la privatización de los recursos públicos; la falta de acceso a las playas; la construcción de marinas; el desarrollo de canales, diques y rompeolas; la construcción en la zona marítimo terrestre; la pérdida de recursos pesqueros y la degradación de los ecosistemas entrelazados a la costa; el corte y relleno de las áreas de manglares; la presión urbana e industrial; la poca efectividad en la implantación de las leyes; el aumento de la vulnerabilidad ante los riesgos naturales; el desplazamiento de comunidades costeras tradicionales; las actividades de dragado; la extracción de

material de la corteza terrestre y, por ende, la erosión de playas, siendo éste el problema de mayor importancia identificado (Seguinot & Méndez, 2008).

La agencia responsable de la protección de los recursos naturales en Puerto Rico es el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) del Estado Libre Asociado de Puerto Rico (ELA). A partir del 12 de julio de 1978, con la adopción del Programa de Manejo de la Zona Costanera (PMZC) se estableció una guía para el proceso de planificación, conservación y desarrollo de las áreas y los recursos costeros. En los planes del gobierno sobre los usos de terrenos también se han reconocido las áreas costeras como parte importante e integral en la planificación de los recursos naturales como las playas, los humedales, los manglares, las lagunas costeras, los arrecifes de coral, entre otros (JP, 2004). Sin embargo, la zona costanera de la isla en los últimos años ha experimentado cambios acelerados ocasionados por la presión de desarrollo y la construcción de proyectos de viviendas, marinas, carreteras y otros usos relacionados a proyectos de interés turístico y/o recreativo (De Portu, 2007).

Se han llevado a cabo varias investigaciones relacionadas a los asuntos que afectan la zona costanera. Estudiosos e investigadores del tema mediante el análisis de fotografías aéreas de las costas han demostrado que las playas tienen un severo y un largo periodo de erosión. La construcción y otras actividades relacionadas a la extracción excesiva de arena en la orilla han agudizado el problema provocando inundaciones asociadas al mismo. Recomendándose así que el PMZC establezca un sistema de clasificación de riesgo para la costa como un alerta a inundaciones en estas áreas debido al problema de erosión asociado (Morelock, 1978).

Las costas de la isla han disminuido significativamente desde el año 1960. Los perfiles de playa documentan que la pérdida mayor de las costas ha sido identificada principalmente en el área norte. Barreto (1997) realizó estudios históricos sobre los cambios temporales de la costa en 29 playas de Puerto Rico, sus hallazgos

evidenciaron el problema de erosión existente en estas áreas. Las posibles causas correspondieron a los sistemas ciclónicos y a las diversas actividades humanas como la extracción de arena y dragados, siendo la tasa de erosión más acelerada en áreas manejadas por actividades antropogénicas.

Según Cicin-Sain & Knetch (1998), en las islas pequeñas, la zona costanera puede ser uno de los valores naturales con mayor potencial de desarrollo que éstas poseen. La conservación, el manejo y la planificación de estos recursos requieren máximo cuidado si lo que se persigue es la sustentabilidad. La planificación sirve como una herramienta fundamental para un desarrollo bien proyectado y para la elaboración de programas adecuados, tanto de conservación como de manejo de las costas y sus ecosistemas. No obstante, los factores antropogénicos están asociados al problema de la erosión costera ya que se construye sin distinción a lo largo de las mismas.

A pesar de las investigaciones para lidiar con el problema de las zonas costeras en la isla y de las recomendaciones dadas, la evidencia científica consultada indica que los problemas de erosión han aumentado. Es decir, las costas de la isla han estado y aún continúan amenazadas ante el desarrollo y la construcción de grandes proyectos en el litoral, así como de los pronósticos ante el cambio climático y el calentamiento global. El adecuado manejo, conservación y planificación de las costas en Puerto Rico es inexistente independientemente de que la agencia líder (el DRNA) en el PMZC (2008) se refiera al calentamiento global como uno de los factores antropogénicos de mayor importancia al problema de la erosión costera, debido al incremento en el nivel del mar y la frecuencia e intensidad de los eventos climatológicos. A estos efectos, entre sus objetivos está establecer estrategias y/o técnicas para la estabilización y control de la erosión que ayuden a la protección y a la conservación como parte de la administración y el manejo del recurso. Desde la década de los veinte las áreas costeras han sido estudiadas, analizadas y manejadas, y al presente los problemas de erosión no han

podido ser mitigados, la evidencia científica indica que la erosión ha seguido extendiéndose.

El problema existente en el área de estudio ha sido analizado a través de los años por parte de las agencias federales como el Servicio Geológico Federal (USGS, por sus siglas en inglés) en el año 1921 y el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USCOE, por sus siglas en inglés) en los años 1957, 1984 y 1991. Este último estudio realizado por el USCOE se llevó a cabo a petición del DRNA. El estudio más reciente fue llevado a cabo por la Corporación de Playas para el Control de la Erosión (Beach Erosion Control Corporation, BECC por sus siglas en inglés) en el año 2005, el cual propuso la instalación del método “NuShore” para controlar la erosión en el BC.

Como parte de este estudio trabajamos con el problema de la erosión costera en el área de Isla Verde. El propósito es evaluar el problema de la erosión costera a través de los años, analizar la efectividad de las técnicas de control de erosión aplicadas y recomendar técnicas para promover la conservación y la protección del litoral costero y de la playa.

Problema de estudio

La zona de estudio se localiza en el litoral costero de Isla Verde específicamente el área que está entre Punta el Medio y Boca de Cangrejos (Figura 1). En este sector se encuentra el Balneario de Carolina (BC), uno de los mayores atractivos de la zona. Este balneario ha sido galardonado por cinco años consecutivos por el Programa Bandera Azul. Este reconocimiento a nivel internacional se le otorga a las playas y marinas que cumplan cuatro grandes criterios: seguridad y servicios, manejo ambiental, calidad de aguas, e información y educación ambiental. El BC es administrado por el Municipio Autónomo de Carolina (MAC) y posee una superficie total de terreno de

aproximadamente 48 acres (4,047 metros² o 1.0296 cuerdas), 3,500 pies de zona costanera y alrededor de 2,265 espacios de estacionamiento para vehículos.

La costa de Isla Verde ha sido impactada a través de los años por el desarrollo de proyectos localizados a lo largo de la misma. El interés de los desarrolladores por el litoral costero es evidente para la conversión de grandes áreas de costas a desarrollos urbanos. En las últimas décadas, se han presentado propuestas de desarrollo como los casos del hotel Marriott en el BC y el proyecto Costa Serena en Piñones, entre otros. En el área costera de Isla Verde a través de los años se han permitido construcciones que han impedido el acceso al mar, así como la pérdida de las dunas y otros impactos ecológicos en el litoral norte de la isla. Demostrándose la poca o ninguna implantación de una política pública eficiente y rigurosa que propicie un desarrollo sustentable de estos recursos costeros.

Los impactos ambientales a esta zona costera se han acumulado a través de las décadas. Según los datos presentados por Mercado (2008), en la costa norte de Puerto Rico el nivel del mar ha aumentado a una razón promedio de 1.43 milímetros por año entre los años 1962-1999 y en la costa sur a una razón de 1.24 milímetros por año entre los años 1955-1999. En el periodo que comprende los años 2000-2008 la costa norte arrojó un 6.8 milímetros por año y para la costa sur 7.3 milímetros por año. Estos datos son obtenidos de los mareógrafos localizados en San Juan y La Parguera evidenciándose el aumento en el nivel del mar cada vez. Según los expertos, un metro en el aumento del nivel del mar podría convertirse en un kilómetro que la orilla retroceda, situación que ha sido observada en Punta las Marías (Condado) donde la playa ha ido desapareciendo (Mercado, 2008).

El área de estudio de esta investigación, Isla Verde, está localizada en la costa norte de la isla en el MAC. En este municipio se encuentra una diversidad de recursos naturales de gran importancia. El litoral costero posee una variedad de ecosistemas,

así como de recursos naturales con sus yerbas marinas, arrecifes de coral, playas arenosas, dunas, humedales y manglares. Aledaños y vinculados a estos sistemas se encuentran también lagunas bioluminiscentes con islotes de manglares y sistemas de canales que conectan estos cuerpos de agua entre sí. El río más caudaloso de Puerto Rico, el Río Grande de Loíza, cruza el municipio de oeste a este. Desde la zona montañosa con alturas de 500 metros nace el complejo sistema pluvial que es parte de la cuenca del Río Grande de Loíza que desemboca en el Océano Atlántico. Los afluentes más importantes en el MAC son las quebradas Maracuto, Pastrana, Hoya Fría, Lagrimita, Cambute, Limones, Las Lajas, González, Los Sosa y el Río Canovanillas. Otros componentes de su sistema hidrográfico son la quebrada Blasina (que desemboca directamente al mar) y las lagunas de Piñones, San José, Los Corozos y La Torrecilla (Gobierno Municipal Autónomo de Carolina, DÍA-E, 2005).

El MAC cuenta con 45.3 millas cuadradas de territorio (31,487.62 cuerdas). Al norte colinda con el Océano Atlántico, cuyas costas se caracterizan por tener un sistema de playas de barrera y una plataforma continental ancha (Beatley, Brower & Scwab, 2002). Por el sur colinda con los municipios de Gurabo y Juncos, al noreste con el municipio de Loíza, al este con el municipio de Canóvanas, y al oeste con los municipios de Trujillo Alto y San Juan. En el centro de la costa del MAC está la punta El Medio, frente a la cual se encuentra la Isla Verde y su playa del mismo nombre. En lado este hacia Boca de Cangrejos se localiza una pequeña isla llamada La Cáncora. La Carretera PR-187 atraviesa la zona a distancias de la costa que oscilan entre los 5 a 1,500 pies. Con relación, al BC al este se encuentra limitado por Boca de Cangrejos, que conecta el Océano Atlántico con la Laguna Torrecilla, y al oeste hay aproximadamente 2,880 pies de desarrollos privados y comerciales que forman parte de la comunidad Biascochea.

En el área se ha identificado una rica variedad de vegetación en la que se destacan especies nativas y endémicas, algunas catalogadas como especies en peligro de extinción. Al norte del MAC en las áreas costeras y de humedales podemos encontrar cuatro especies de manglares: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicenia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botón). En cuanto a la fauna, se estima que aproximadamente setenta (70) especies de aves utilizan el manglar como habitáculo y constituyen un lugar importante para el anidaje de especies de aves nativas, migratorias, terrestres y marinas (Gobierno Municipal Autónomo de Carolina, DÍA-E, 2005).

Una de las regiones que ha recibido mayor impacto, tanto de origen natural como antropogénico, es la zona de Isla Verde entre Punta el Medio y Boca de Cangrejos. Esta zona padece de erosión severa y representa un ejemplo de problema de erosión en áreas de costa desarrolladas. Se evidencia notoriamente en el área de Casa Cuba donde prácticamente las estructuras están sentadas en la orilla de la playa. Las áreas del estacionamiento del BC también han cedido ante la erosión, así como parte de la cubierta vegetal y los postes del tendido eléctrico pueden verse prácticamente dentro de la playa. Además, en el área donde localiza un viejo club de yates cuyos remanentes de la rampa de botes también yacen dentro de las aguas. La tasa histórica de erosión para Isla Verde está entre 1 a 2 metros por año (Bush, Webb, González, Hyman & Neal, 1995; Gobierno Municipal Autónomo de Carolina, DÍA-E, 2005).

En marzo del 2008 una tormenta invernal estacionaria afectó significativamente la costa norte de Puerto Rico. Este fenómeno produjo olas de 10 a 15 pies de altura que dejaron a su paso grandes daños por toda la costa norte. Particularmente en la zona de Isla Verde la Carretera PR-187 tuvo que ser cerrada al público debido a que el mar entró en la misma. Dicha carretera consta de tan sólo dos carriles y es una muy

transitada diariamente especialmente los fines de semana. La misma es una muestra de la susceptibilidad que presenta la zona ante los embates naturales considerándose una vía que opera inadecuadamente (Plan Manejo Área Especial de Piñones, APEP, 1992).

La infraestructura y los recursos costeros localizados a lo largo del litoral de Isla Verde merecen urgentemente atención debido al acelerado desarrollo urbano propuesto para el área y a la inestabilidad de las estructuras existentes e inmediatas a la costa. Por lo tanto, para atender esta situación es necesario evaluar si las técnicas de estabilización y estrategias aplicadas contribuyen al manejo eficiente de la costa y sus recursos de acuerdo a las necesidades particulares detectadas en la misma y la adopción de política de conservación de los recursos.

Justificación del estudio

La zona costera de Isla Verde es uno de los atractivos turísticos principales de la isla, pues en esta área se encuentran un sinnúmero de hospederías, playas, balneario Bandera Azul, deportes acuáticos, restaurantes, excursionismo, acceso aéreo y marítimo, entre otras actividades. Para mantener esta actividad económica de forma progresiva, es necesaria la elaboración de planes y proyectos de conservación que ayuden a mantener los servicios que esta zona ofrece. Por tal razón, es de suma importancia manejar adecuadamente esta importante zona para poder seguir disfrutando de todos los beneficios que provee. Los problemas de erosión que aquejan la zona de Isla Verde ponen en peligro todo lo antes expuesto ya que no se han implantado con efectividad las técnicas aplicadas a través de los años para garantizar la disminución del problema de erosión existente en la costa.

En la zona costanera habitan alrededor de un 77% de la población y el 40% de los suelos urbanos se encuentran en los municipios costeros, así como de

infraestructura (Díaz, 2007). Además, las costas son el escenario de importantes procesos ecológicos, biogeoquímicos, sociales, económicos y culturales a diferentes escalas. Actualmente gran parte de la actividad económica de la isla se centra en la zona costanera, es aquí donde se encuentran las plantas de generación de energía, las instalaciones portuarias, los aeropuertos, las torres de transmisión, largos tramos de carreteras y plantas de tratamiento de aguas usadas (Díaz, 2007).

En los ecosistemas costeros se encuentran diversidad de hábitats como los manglares, las dunas, los arrecifes de coral, los acantilados, las lagunas costeras, las playas, las costas rocosas y los fondos marinos. Estos ecosistemas se integran en un área de gran dinamismo, por lo que exhiben cambios constantes en su forma. La interacción entre las mareas, las corrientes, el oleaje característico del lugar, los cambios estacionales, los huracanes, terremotos y maremotos pueden causar cambios lentos e instantáneos en esta zona, provocando que la posición de la línea de la costa pueda variar en respuesta a estos factores.

Las playas son un recurso natural de gran valor ecológico, educativo, social, económico y cultural. Estas son amortiguadores innatos de la naturaleza ya que protegen la costa del poder implacable de las olas y se protegen así mismas de la destrucción durante las tormentas (Bush et al.,1995) Además son un recurso natural muy valioso, pues proveen esparcimiento y recreación, sirven de hábitat a una variedad de especies de flora y fauna son de gran interés para la educación e investigación científica, sirven de zona de anidaje para especies en peligro de extinción, poseen ecosistemas vitales para mantener el equilibrio de la zona, sistemas de dunas que protegen la costa del oleaje, corrientes y tormentas. Las playas son el atractivo principal del turismo en Puerto Rico, ya que son el recurso natural más utilizado para la recreación al aire libre. Durante el año fiscal 2002-2003 casi tres millones de personas

visitaron los 12 balnearios administrados por la Compañía de Parques Nacionales de Puerto Rico (Nieves, 2005).

Debido a la presión constante de eventos naturales y antropogénicos que particulariza la zona, requiere que se lleven a cabo estudios y evaluaciones continuas e individualizadas. Jaramillo (2000) indicó que es imperativo realizar una gestión para la recuperación de la zona costanera. Esta gestión a la que se refiere debe venir por parte del gobierno, de las comunidades costeras, de grupos comunitarios, en fin tiene que involucrar a todos los que de alguna u otra forma están involucrados y se suplen de los beneficios que las costas proveen. El desplazamiento de la población hacia las áreas costeras, los proyectos de desarrollo, los usos recreativos no compatibles con la conservación de estos recursos y la apatía de la población a involucrarse en actividades de conservación de estos recursos, han puesto en peligro la integridad y estabilidad de nuestros recursos costeros.

Por lo tanto, urge tomar decisiones que fomenten el desarrollo de medidas enfocadas en la conservación y en el manejo en la zona costanera ya que gran parte de la población y de la infraestructura en la isla está ubicada en esta zona (Díaz, 2007). Debido a la fragilidad, vulnerabilidad y al alto dinamismo que existe en las costas, la creación y el seguimiento de un plan de manejo es vital. Este trabajo de investigación se realiza para cumplir con esa necesidad apremiante de mantener las áreas bien manejadas en constante seguimiento y así poder evaluar la efectividad de las estrategias aplicadas. Este estudio es necesario pues proveerá una descripción de las estrategias empleadas, una evaluación de la efectividad de las estrategias y recomendaciones en la implementación de nuevas estrategias que según la evidencia científica hayan probado ser efectivas.

Preguntas de investigación

¿Qué estrategias de manejo para el control de la erosión se han empleado en el litoral costero de Isla Verde entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos desde que se inició la atención al problema? ¿Cuán efectivas han sido las estrategias de manejo para el control de la erosión aplicadas en la zona de estudio?

Meta

Recomendar estrategias o técnicas para el control de la erosión en el litoral costero de Isla Verde desde Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos para promover la conservación y la protección de la zona.

Objetivos

1. Evaluar el problema de erosión costera en el área bajo estudio.
2. Analizar la efectividad de las técnicas de control de erosión aplicadas en el área bajo estudio.
3. Recomendar estrategias o técnicas para el control de erosión para el área bajo estudio.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

Trasfondo histórico

Geología y descripción de la costa

Puerto Rico está localizado en la latitud 18°15' norte longitud 66° 30' oeste. La composición geológica de la isla se originó por erupciones volcánicas y por la deposición de sedimentos (Khudoley & Meyerhoff, 1971 en Barreto, 1997).

La naturaleza de las rocas que forman la línea de costa forman parte integral del proceso de cambio de las costas (Barreto, 1997). Las costas de Puerto Rico están clasificadas en ocho sectores costaneros según lo establecido en el documento del PMZC, 1978. Éstas son las costas: norte, nordeste, sudeste, sur, sudoeste, oeste y noroeste localizados en la Isla Grande y el octavo sector costero, corresponde a las islas adyacentes (Figura 2).

La zona costera del norte enfrenta el oleaje más fuerte debido a la acción de los vientos alisios y a las fuertes aguas abiertas del Océano Atlántico (Bush et al., 1995). Está constituida principalmente de depósitos sedimentarios, excepto en el extremo noreste que contiene material volcánico (Barreto, 1997). En la costa norte son comunes los tipos de rocas calcáreas litificadas como la eolianita, que son dunas de arena cementada y la roca de playa "beach rock" que está formada por arena cementada bajo el agua (Gómez, 2003). Desde el extremo este de la isla hasta San Juan la costa norte es baja y arenosa, la mayor parte de la costa es playa de arena y las zonas de manglar al este de San Juan no forman la costa, pero se encuentran a varios cientos de metros detrás de las playas y de los sistemas de dunas (Morelock, 1978).

La conformación de las costas y la presencia o no de playas está determinada por el tipo de roca dominante. La arena se produce a través del proceso de

meteorización de las rocas que existen en la corteza terrestre y formándose la playa de esos depósitos de arena que han sido cargadas por las corrientes marinas, de ríos o quebradas. La arena que compone las playas de Puerto Rico puede ser de origen terrígeno y marino. Dependiendo del origen, se define el color y el tamaño de los granos. El color varía de tonalidades blancas (origen calcáreo o marino) a tonalidades marrón o negro (origen terrígeno) y el tamaño de los granos puede variar desde granos finos hasta cascajos o grava (Barreto, 1997; Ortiz, 2005).

Las dunas son montículos de arena acumulada en la orilla de la playa formadas por la acción de las corrientes del viento. Éstas constituyen parte fundamental e integral del ecosistema costero y sus funciones son de gran importancia porque representan la defensa inmediata de los suelos costeros contra la erosión, en especial si las costas no tienen protección frontal de arrecifes de coral. Su función como amortiguador natural de la costa ante los embates del mar, de las olas y de las corrientes ayuda a reducir las inundaciones costeras. Asimismo son una reserva de arena que sirve de hábitat para las diferentes especies de fauna y flora típicas del área (Ortiz, 2005). La existencia de flora en una duna le provee estabilización y anclaje. Entre alguna de esta flora típica podemos mencionar: *Sporobolus virginicus* (Matojo de playa), *Spartina patens* (Yerba de sal), *Ipomoea pes-caprae* (Bejuco de puerco), *Coccoloba uvifera* (Uva de playa), *Crysobalanus icaco* (Icaco) y *Caesalpinia bonduc* (Matojo de playa). Algunos crustáceos, reptiles y aves característicos que habitan en el entorno son: *Oxypode sp.* (Cangrejo fantasma), *Eretmochelys imbricata* (Carey de concha), *Dermochelys coriácea* (Tinglar) y *Nyctanassa violacea* (Yaboa común).

La morfología y la dinámica de la corriente litoral (movimiento de sedimentos en la zona litoral) están relacionadas a los factores naturales causantes de la erosión como el viento, las olas y las corrientes que distribuyen los sedimentos a lo largo de la línea de costa. Durante la época de verano entre los meses de mayo a septiembre, las olas

son pequeñas y separadas entre sí, la ola rompe y levanta la arena del fondo, llevándola hasta la orilla de la playa, permitiendo que ésta se deposite. En la época de invierno durante los meses de noviembre a enero, las olas son más grandes y más cercanas entre sí, lo que impide que la playa pueda absorber toda el agua y las olas se llevan la arena depositada, transportándola al fondo del mar cuando retrocede. Dicha situación provoca que en la época de invierno la playa erosione más, se estreche y forme bancos de arena frente a la porción sumergida. El proceso se revierte cuando regresa la época de verano ya que la arena depositada es devuelta por las olas a la playa mediante el ciclo de migración estacional de la playa (Ortiz, 2005).

La costa está expuesta a los factores climáticos y otros naturales que inciden en el problema de la erosión. Los hechos asociados a dichos factores deben ser considerados al momento de planificar y evaluar dicho problema (Bush et al., 1995).

- Dada la localización geográfica de la isla en el cinturón de huracanes del Caribe, las costas son vulnerables al embate de fenómenos atmosféricos como las depresiones tropicales, las tormentas tropicales y los huracanes. La temporada de estos fenómenos atmosféricos comienza el 1 de junio y se extiende hasta el 30 de noviembre. Los efectos pueden ser devastadores por las marejadas ciclónicas, fuertes vientos, intensas lluvias derrumbes e inundaciones. El efecto sobre las costas y el perfil de la playa es impredecible. En la mayoría de los casos producen un retroceso en la línea de la costa y contribuyen a la acreción o crecimiento de la playa debido al arrastre de sedimentos desde la plataforma insular hacia ésta (Gómez, 2003).
- En las latitudes altas del Océano Atlántico a distancias mayores de 1,000 millas de las costas, las tormentas extratropicales pueden originarse con gran alcance afectándose las costas con olas de alta energía. Éstas ocurren con más frecuencia que los huracanes y producen cambios abruptos en la

posición de la línea de la costa. (Gómez, 2003; MHR Research Associates Inc., 1992 en Gómez, 2003). Históricamente la isla se ha visto afectada por estas tormentas. A manera de ejemplo podemos mencionar las marejadas ocurridas en el mes de marzo del año 2008, que han sido consideradas el segundo evento más fuerte de marejadas de los últimos 10 años. Además en diciembre del año 2009 y en febrero y abril del año 2010 han ocurrido eventos de marejadas asociados a estos fenómenos.

- Por la condición insular, existe la posibilidad de que ocurran Tsunamis causados por un sismo submarino, erupciones volcánicas o derrumbes. Las grandes olas podrían viajar a más de 640 kilómetros por hora y causar gran destrucción. Este fenómeno natural es uno que no es considerado al momento de construir en las costas.
- El movimiento de la superficie del agua se relaciona directa o indirectamente con el viento. Cuando las olas rompen, transfieren la energía a la costa removiendo los sedimentos de la orilla. En la costa norte donde la plataforma es estrecha (menor de 3 kilómetros) el oleaje es relativamente uniforme y puede alcanzar una altura mayor de 6 metros en la época de invierno. Los vientos dominantes provienen del este y provocan que la dirección de las corrientes y deriva litoral tengan una dirección promedio de este a oeste (Morelock & Taggart, 1988, en Gómez, 2003).
- Las corrientes marinas constituyen el movimiento de las masas de agua en una dirección determinada. Aunque no influyen en el comportamiento ni en la distribución de la arena en la orilla de la playa, sí afectan su distribución en la plataforma adyacente.

- Las mareas son la subida y bajada periódica del nivel de las aguas del mar. En la costa norte la amplitud de la marea media es alrededor de 34 centímetros. Al igual que las corrientes marinas, las mareas no influyen en el comportamiento ni en la distribución de la arena de la playa aunque afectan la distribución de ésta en la plataforma adyacente.

Estos factores naturales conjuntamente a los de origen antropogénico afectan aún más la costa en términos de la erosión. Éstos juegan un papel importante como agentes modeladores de la morfología y los sistemas de las costas (Gómez, 2003). Durante las últimas tres décadas, la extracción de arena de las dunas ha causado un desequilibrio entre la demanda de arena y el abastecimiento debido al auge económico basado en la construcción. Como resultado de esta práctica se han alterado los patrones de drenaje provocando serios problemas de intrusión salina y erosión (Valeiras, 2007).

Según el mapa topográfico de 1940 en el litoral costero había una duna de diez metros de alto, para el 1969 esta altura se redujo a solo tres metros, a causa de la masiva extracción de arena. A estos efectos, el USCOE y DRNA realizaron obras para estabilizar la duna como la creación de un rompeolas utilizando chatarra para propiciar un arrecife artificial que disminuyera el oleaje y el depósito de arena en aquellas áreas más afectadas. Sin embargo, no hubo éxito ya que las técnicas utilizadas no surtieron el resultado esperado (JP, 1992).

Las construcciones desmedidas en la zona costera también han contribuido significativa y adversamente al problema de la erosión. Gómez (2003) indicó que la proximidad de estas edificaciones a la zona marítimo-terrestre hace que los cimientos de las edificaciones se afecten por el embate del mar. Esto implica la instalación de sistemas artificiales de protección contra la erosión como rompeolas, muros de cemento, gaviones, espolones y revestimientos. La eficiencia de estas intervenciones

han sido motivo de controversia a pesar de que el establecimiento de las mismas ha proliferado desde la década de los '70. Los efectos sobre el tramo de la línea de la costa de algunas de estas estructuras fueron analizados por Gómez (2003) en su tesis de maestría. Por ejemplo en la costa norte investigó los espigones de Arecibo y el rompeolas de Condado-San Juan.

Alteraciones en el área de estudio (Punta el Medio hasta Boca de Cangrejos)

Las modificaciones al área datan del siglo pasado cuando las autoridades españolas construían canales para enlazar el sistema de lagunas para facilitar el transporte de productos hacia y desde San Juan. El área de Boca de Cangrejos que conecta al Océano Atlántico con la Laguna Torrecilla fue modificada para propósitos de construcción. La Laguna Torrecilla es la segunda más grande en la isla con 626 cuerdas aproximadamente y en la década de los '50 la Laguna Torrecilla fue dragada y rellenada para la construcción del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (AILMM), que fue inaugurado en el año 1955 (JP, 1992).

Otros informes del USGS indican que los trabajos de dragado en la Laguna Torrecilla realizados entre la década de los '50 y '70 ayudaron a remover alrededor de 3.1 millones de metros cúbicos (m³) de material, aumentándose el volumen de la misma un 110% así como las corrientes de las mareas (Ellis, 1976 en USCOE, 1991).

En el año 1962, para la construcción de la urbanización Vistamar Marina y la ampliación del AILMM se llevaron a cabo otras actividades de dragado y relleno. Más tarde para los años 1968 y 1969 se volvió a dragar y a rellenar para la construcción de la Urbanización Vistamar y la ampliación del Cangrejos Yatch Club (CYC) para habilitar dos ensenadas con el fin de colocar más embarcaciones. En el año 1967, Boca de Cangrejos había sido descrita como una ensenada poco profunda cuya profundidad fluctuaba entre los 2 a 3'. Aunque no se cuenta con un historial de los trabajos de dragado, existe evidencia de permisos expedidos entre los años 1978-1982 y renovados

en el año 1979 con el fin de dragar el área para mantener una profundidad de siete pies por un período de 10 años (USCOE, 1991).

Es importante señalar que el Río Grande de Loíza y demás ríos drenan las aguas de inundación por Boca de Cangrejos dependiendo del nivel de la marea. En las inundaciones de los años '70 el área del litoral costero se inundó debido a que el río buscaba salida hacia el mar, atravesando una duna ganó acceso mediante una abertura de casi medio kilómetro de ancho en el sector conocido como Tres Palmitas (JP, 1992). Los dragados llevados a cabo en CYC en el pasado con el fin de ensanchar su entrada y colocar las numerosas embarcaciones pesqueras son responsables de gran parte del problema de erosión en la zona (Bush et al., 1995).

En el área de estudio se han aplicado diversas técnicas para controlar dicha situación ambiental. Algunas incluyen gaviones, espigones, revestimientos y el sistema "NuShore". A pesar de las técnicas implementadas, datos comparados de estudios realizados en el área a través de los años evidenciaron una erosión continua de 572,800 yardas cúbicas de material removido en un tramo de 7,185 pies entre los años 1946 y 1984. Lo que significa una pérdida a razón de 3 yardas cúbicas por cada pie de costa (USCOE, 1991).

El estudio que se llevó a cabo en el año 2005 por la BECC en el BC evidenció una erosión continua desde el año 1936. Un análisis de fotos aéreas presentó una erosión de .85 metros al año para el periodo de entre los años 1938 y 1951; de .75 metros al año para el periodo entre 1951-1962 y de 3.7 metros al año para la década de los '70 (periodo entre 1971 al 1977). En ese mismo año a través del MAC se presentó el Plan de Mitigación y Control de Erosión Costera del Balneario de Carolina.

Como parte de las recomendaciones dadas en el estudio realizado por la BECC fue considerar el sistema conocido como "NuShore" un tipo de estabilización suave que es colocado perpendicularmente a la costa. Esta tecnología utiliza las corrientes

marítimas a su favor para restaurar la playa con su propia arena y así devolverla a su estado natural sin la necesidad de emplear agentes peligrosos o contaminantes (Tiedeberg, 2005). El plan ejecutado comenzó en el año 2006 y se extendió hasta el año 2008. Se instalaron 1,500 tubos de acero inoxidable y de mallas plásticas amarradas a los tubos a lo largo del BC para permitir la filtración de la arena arrastrada por las corrientes marítimas, desplazándola hacia la costa. Este plan de mitigación tuvo un costo de \$4.2 millones. Mediante el sistema “NuShore” se esperaba recuperar la arena perdida y rescatar parte de la zona playera. Las proyecciones establecidas apuntaron a una recuperación de arena entre 25 y 56 mil yardas cúbicas, lo que representaría una ganancia de cerca de 100 pies de costa.

Según los informes en tan sólo dos meses de la implantación de las mallas ya se había recuperado 7,733.88 yardas cúbicas de arena superándose las expectativas y proyecciones. En el área del BC, donde se ubicó el demarcador, se recuperó un promedio de 18.21 pies de orilla. En la zona del Tropimar Convention Center se recuperó un promedio de 27.96 pies de orilla y en la colindancia del sector, que ostenta el distintivo Bandera Azul, se rescató un promedio de 14.27 pies de orilla.

Investigaciones relacionadas a las costas a nivel regional

Las investigaciones realizadas en los sistemas costeros tanto a nivel mundial como a nivel local han ido evolucionando a partir de la historia, los avances en la tecnología han permitido la inclusión de nuevas técnicas que permiten la obtención de datos más exactos y precisos. Como señalara Barreto (1997) en Puerto Rico y en la región del Caribe, las investigaciones han sido menos extensivas que en otras partes del mundo. La posición de la costa y los cambios en la misma son de gran importancia para un sector multidisciplinario como los ingenieros, los biólogos, los científicos, los administradores, los planificadores y otros involucrados en el manejo del recurso (National Research Council, 1990). Esta información provee datos útiles en los

procesos de planificación y en la preparación de programas enfocados en la conservación y en el manejo integrado de la costa (MIC).

Sin embargo, a través de los años en diferentes foros se han discutido medidas para trabajar los problemas asociados a las costas. Muchas estrategias presentadas por el gobierno no están dirigidas al manejo integral y sostenible del recurso. Algunos de estos estudios e iniciativas en torno al asunto de la erosión costera son presentados en orden de años (Barreto, 1997; Gómez, 2003; Grafals, 2003):

En la década de los cincuenta los primeros estudios descriptivos de la costa y sus cambios fueron realizados por Turner en el año 1956. En su estudio describió la playa en términos de sus características costeras, clasificó las costas de Puerto Rico en cuatro tipos y fue el primero en identificar zonas de gran potencial de erosión en la isla. Las costas del área norte y noroeste resultaron ser las que presentaron el mayor problema de erosión costera. Además identificó factores como: los cambios en el nivel del mar, el diastrofismo, las actividades humanas y la disolución y erosión de los arrecifes como las posibles causas de erosión en las costas. Más tarde Guillou y Glass en el año 1957 estudiaron la arena de las playas de Puerto Rico para propósitos económicos y Kaye en el año 1959 describió la costa en términos de su geomorfología costera y la variabilidad causada por eventos como las tormentas, olas, inundaciones etc.

Para la década de los sesenta, Briggs en el año 1961 investigó las causas de los cambios en la posición de la línea de la costa y la sedimentación en el puerto de Arecibo, concluyendo que los cambios estuvieron relacionados a la construcción del rompeolas en el 1940, que alteró el patrón de las corrientes. En el año 1968 McIntyre describió los efectos del alto oleaje en las playas del área metropolitana de San Juan y sugirió que algunas playas estaban tan afectadas que no era recomendable continuar las construcciones en esa zona. No fue hasta el 1968 que las Fuerzas Armadas de los

Estados Unidos, a través del USCOE condujeron un estudio histórico de la posición de la línea de la costa entre el 1900-1968. Sus resultados evidenciaron que el 98% de las principales playas contenidas en el estudio no mostró indicios de erosión o acreción. Otras playas como Jarealito en Arecibo, la zona de Punta Salinas al puerto de San Juan, El Tuque en Ponce y Mayagüez mostraron pérdida en la posición de la línea de la costa, la que fue atribuida a la ocurrencia de inundaciones y a las actividades humanas. Al concluir el estudio se indicó que el desarrollo costero para Puerto Rico antes del 1968 era relativamente bajo con alrededor de un 24%.

En la década de los setenta, Hernández-Ávila en el año 1970 llevó a cabo estudios en la Isla de Mona midiendo el perfil de la posición de la línea de la costa y las variables que afectaban esos perfiles. Además comparó estos perfiles con los de otras playas para analizar los cambios locales del régimen de las corrientes y el oleaje. Kattman en el año 1972 describió la granulometría y mineralogía de la arena de tres playas que se encontraban localizadas cerca de los principales ríos de la zona oeste de Puerto Rico, para determinar la fuente de sedimentos. En el 1975, Seguinot-Barbosa realizó una evaluación de los cambios en la zona costera basada en los usos de la tierra y las estructuras hechas por el hombre. Indicó que las zonas de Cataño y El Escambrón presentaban gran potencial de riesgo a la erosión costera. Además evidenció que la tasa de erosión estaba aumentando debido a prácticas utilizadas para la construcción de edificios y otros desarrollos como por ejemplo los métodos de mitigación como los revestimientos de rocas y la destrucción de mangles y pantanos. No fue hasta el año 1978 que Jack Morelock realizó la primera clasificación de playas de acuerdo al tamaño y composición de los sedimentos, identificó sectores con problemas severos de erosión y determinó algunos de los principales sedimentos que alimentan las playas de Puerto Rico. El estudio fue publicado por el PMZC en el texto "*Shoreline of Puerto Rico*."

Ya para la década de los ochenta se integran los estudios de costa a partir de fotografías aéreas. Trías investigó acerca de los parámetros físicos de las dunas de arena en Isabela en el año 1980. Ese mismo año Albino investigó acerca del movimiento de sedimentos a lo largo de algunas playas del área oeste. En el 1984 Morelock realizó los primeros estudios a partir de fotografías aéreas, muestras de sedimentos, estudios de campo y fotos de campo. Identificó a Cataño, Loíza y Mayagüez como las áreas más afectadas por la erosión, además describió el efecto de las construcciones en la zona costera. Más tarde en el año 1986 Morelock y otros analizaron la carga neta de sedimentos de la costa norte, utilizando indicadores geomórficos. Un estudio descriptivo de las estructuras de protección construidas por el hombre en San Juan, Mayagüez, Ponce, Fajardo y Arecibo fue llevado a cabo por Morelock y Taggart en el año 1988. A través del mismo evidenciaron que el aumento en los problemas de erosión habían sido provocados por la instalación de gaviones, muros de concreto, rompeolas y otros tipos de estructuras de estabilización fuertes y por la masiva extracción de arena que eliminó dunas de gran tamaño. En el año 1989 la zona de El Condado fue descrita por Webb y Velasco como una zona muy erosionada donde la pérdida de playa había incrementado durante la última década. Los investigadores llegaron a esta conclusión mediante el análisis de los cambios en el nivel del mar en San Juan. Durante ese mismo año Vicente y López describieron los efectos del huracán Hugo en la costa de Vieques y Wright realizó 230 perfiles de playas alrededor de la isla. Para su investigación escogió playas que tuvieran instaladas estructuras de estabilización paralelas a la costa para evaluar el efecto de las mismas. Al finalizar su estudio concluyó que el efecto de la estabilización con estructuras paralelas provoca la erosión y degradación de las playas.

En la década de los noventa los estudios de costa fueron más abarcadores. En el año 1991 Maritza Barreto, estudió los efectos del huracán Hugo, midió la erosión y

estudió las posibles causas de la misma en la playa Esperanza ubicada en la costa sur de Vieques. Para el mismo utilizó fotografías aéreas, perfiles de playa y balance de sedimentos. Al concluir su investigación evidenció que la pérdida de coral *Acropora palmata* era responsable de que una mayor cantidad de energía proveniente de las olas llegara a la costa, iniciando el proceso de erosión. Añadió que las causas de los procesos erosivos estaban relacionadas a la construcción de un muelle en la década de los setenta y al incremento en la frecuencia de sistemas ciclónicos. Bush estudió los efectos del huracán Hugo en las costas sureste, este y noreste de la isla en el año 1991. Concluyó que las estructuras impactadas por el efecto del oleaje estuvieron restringidas a las construcciones sobre la línea de la costa, como Punta las Marías y Punta el Medio en Carolina. Por otro lado áreas de erosión y deposición en diversas zonas costeras de Puerto Rico fueron identificadas por Thieler y Danforth en el año 1993. En el año 1995 Bush y otros en su libro *“Living with the Puerto Rico Shore”* realizaron una descripción general de los procesos costeros que ocurren en las costas de la isla y los efectos de la interacción entre la geomorfología, la oceanografía y las estructuras hechas por el hombre en la zona costera. Además clasificaron el riesgo de las costas por municipio de acuerdo a los eventos que las afectaron en el pasado y a las condiciones actuales de la zona. Ese mismo año Thieler estudió los cambios en la línea de la costa en el periodo entre 1944-1994 en el municipio de Rincón entre Punta Higüero y Punta Cadena. Concluyó que las altas tasas de erosión en Punta Ensenada eran producto de la instalación de unos rompeolas y de dragados para la construcción de una marina. Maritza Barreto realizó un estudio histórico sobre los cambios temporales de la costa en 29 playas de la isla en el año 1997. Entre sus conclusiones, encontró que la pérdida de sedimentos estuvo relacionada con la ocurrencia de sistemas ciclónicos. Mientras que en las playas donde se habían presenciado actividades humanas como la extracción de arena y dragados, la tasa de erosión fue

más acelerada y no presentó niveles de reducción. En el año 1998 los procesos costeros cerca de la desembocadura del Río Añasco fueron analizados por Grove. Al concluir su estudio clasificó el tramo de costa en cuatro sectores y evidenció que el aumento de material insoluble en ácido aumentaba de norte a sur.

Para el año 2000 Bush volvió a realizar los perfiles hechos por Wright en el 1989, el estudio corroboró que el ancho de playa seca es más angosto en aquellas playas que poseen algún tipo de estabilización artificial. Un estudio de las playas arenosas de Puerto Rico fue llevado a cabo por Cedar García en el año 2001. Mediante su investigación ilustró aspectos importantes de la ecología, rasgos característicos del ambiente físico y químico de la zona y examinó las adaptaciones de los organismos que viven en las playas. Durante ese mismo año la playa Larga de la Isla Caja de Muertos fue investigada por Soto Bayó. En su trabajo investigó los cambios en la playa e identificó las posibles causas de esos cambios. Más tarde en el año 2003 Morelock y Barreto cuantificaron la tasa de cambio en la línea de la costa de varias playas. Los investigadores indicaron que los procesos erosivos de la isla pueden atribuirse en gran parte a la erosión de barreras naturales, la pérdida de manglares y arrecifes y a la reducción del aporte de sedimentos por parte de los ríos. Además mencionaron que los sectores que presentan acreción o que no presentan erosión están generalmente frente a arrecifes asociados a bosques de mangle.

Todos los estudios descritos anteriormente han permitido ampliar los conocimientos en el aspecto costero de la isla de Puerto Rico. No obstante, la planificación del recurso costero es una inconsistente y carente de una visión ordenada ante los cambios, la fragilidad y susceptibilidad del recurso.

El desarrollo sustentable y el manejo integrado de la costa

A mediados de la década de los ochenta las Naciones Unidas ante la preocupación de los impactos que acontecían rápidamente sobre el medio ambiente y

los recursos naturales, decidió crear un Órgano Internacional Independiente para trabajar con estos asuntos. Se escogió a la ministra noruega Gro Harlem Brundtland, por su experiencia e interés en los problemas del medio ambiente, como Presidenta de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas. A través de la Comisión se presentó un nuevo paradigma enfocado en el desarrollo sustentable. La Comisión Brundtland (p. 24) definió el desarrollo sustentable como:

"un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Es el desarrollo que permite la continuidad de las actividades humanas y el desarrollo económico y social. Requiere la calidad y protección adecuada del medio natural y sus recursos, y la concienciación de la sociedad de que los recursos naturales son finitos".

A pesar de la definición generada en dicha Comisión, no existe una definición general aceptada del concepto y aún dentro de la propia comunidad científica hay discrepancias (Farrell & Hart, 1998).

En el año 1992 en la Cumbre de la Tierra mediante el documento generado, Agenda 21, es que se dan los primeros pasos de un logro hacia el desarrollo sustentable. Posteriormente, en el año 2002 se celebró la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo, Sur África. En la misma se resaltó una vez más la realidad de que los recursos son limitados para satisfacer las necesidades de todos los seres humanos. Puerto Rico participó en calidad de observador. Los participantes de los países del mundo se comprometieron a "construir una sociedad mundial humanitaria, equitativa y generosa, consciente de la necesidad de respetar la dignidad de todos los seres humanos" (Declaración Política adoptada por los participantes de la Cumbre).

El desarrollo sustentable ha adquirido una nueva conceptualización con un enfoque ético entre la sociedad y el medio ambiente, con un sentido de perdurabilidad a largo plazo y de responsabilidad de la generación actual y de las generaciones venideras (Jiménez, 2000). El problema fundamental de la crisis se encuentra en las actuales pautas económicas de producción-consumo-distribución que son ecológicamente insostenibles porque exceden la capacidad de carga de los ecosistemas. La concepción del desarrollo sustentable va dirigida a un proceso de cambio y transición hacia nuevas formas de producir, consumir y distribuir; además de nuevas formas de ser, estar y conocer el entorno desde un enfoque holístico - integral. La situación mundial ha empeorado, la degradación, el desequilibrio del medio ambiente natural y social, la reducción de la diversidad biológica, la sobreutilización de los recursos renovables (agua, bosques, peces, tierra) y el uso ineficiente de la energía, entre otros son los resultados evidentes de lo que está aconteciendo en el mundo (Jiménez, 2000).

La necesidad de un desarrollo sustentable es muy importante en Puerto Rico, ya que es una isla de 3,500 millas cuadradas, de poco menos de 4 millones de habitantes y por ende con una alta densidad poblacional (Frederique, 2004). Según Chaparro (2007 p. 2):

“desarrollar los recursos marinos y costeros sustentablemente representa una acción de gran impacto y trascendencia ante la necesidad incuestionable que constituye el dejar en herencia unos recursos naturales saludables y con capacidad de proveer oportunidades económicas y recreativas que garanticen la calidad de vida a las futuras generaciones”.

En el borrador del PMZC (2008) se incorporó el concepto del desarrollo sustentable y las tres dimensiones que lo componen la ecológica, la económica y la social. Según Frederique (2004), estas dimensiones deben integrarse durante el proceso de

formulación de planes estratégicos para la implantación de programas y proyectos de desarrollo.

El MIC es una herramienta que permite un desarrollo sustentable de este ecosistema y sus recursos. Cicin-Sain & Knecht (1998, p. 39), definieron el MIC como: “un proceso continuo y dinámico en el que la toma de decisiones se basa en el uso, desarrollo y protección sustentable de los recursos marinos y las áreas costeras”. La falta de coordinación y armonía entre las agencias de gobierno estatales y federales son el típico problema en la aplicación del MIC. Las metas del MIC deben estar dirigidas en lograr un desarrollo sustentable en la zona marítima costanera de manera tal que ayude a reducir la vulnerabilidad del sistema contra los peligros naturales a los que están expuestas las zonas costeras y los seres vivos que la habitan. De modo que se conserven los procesos ecológicos esenciales, los sistemas naturales de vida y la biodiversidad de la zona costera.

Estructuras costeras de protección

La costa es un lugar de alto riesgo para las construcciones debido a su susceptibilidad. Por lo que, cada proyecto de construcción en la zona del litoral afecta a los hábitats y la función del ecosistema natural (Clark, 1996). Las soluciones estructurales construidas para la protección de las propiedades y el control de la erosión suelen ser en muchos casos de carácter temporal y contraproducente, aparte de que son muy costosas (Clark, 1996; Bush et al., 1995). Ninguna técnica resulta adecuada si se carece de estudios pertinentes que garanticen en gran medida su eficiencia y el equilibrio de la zona costera, no solo del área involucrada en el proceso de recuperación sino también aguas arriba y debajo de la misma (Posada & Henao, 2008). La eficiencia de estas técnicas ha sido motivo de controversia desde la década de los '70, a pesar de que su establecimiento en la isla se ha hecho muy común (Gómez, 2003).

Bush et al., (1995), Clark (1996) y Posada & Henao, (2008), presentaron descripciones más amplias y detalladas de las estructuras construidas por el hombre para la protección y el control de la erosión costera. Existen tres alternativas básicas de manejo del problema de erosión costera:

(1) Estabilización fuerte la cual se clasifica en dos categorías:

- Estabilización fuerte paralela a la costa: protegen el área que se encuentra detrás, reduciendo el impacto directo de la ola. Contribuyen a aumentar la turbulencia y la pérdida de sedimentos, incluso pueden socavar sus propios cimientos. En esta categoría se incluye el grupo de los rompeolas (*seawalls*), estructuras como: los gaviones (*gabions*), los sacos de arena (*sandbags*), los revestimientos (*revetments*) y los mamparos (*bulkheads*), pertenecen a la familia de los rompeolas.
- Estabilización fuerte perpendicular a la costa: provocan la deposición de sedimentos porque obstruyen la deriva litoral, lo que induce erosión aguas abajo. En esta categoría se incluyen los espolones (*groins*) y espigones (*jetties*).

Estas estructuras de estabilización fuerte presentan más desventajas que ventajas. Entre sus ventajas podemos mencionar que las mismas proveen protección temporera y los costos de mantenimiento son bajos. La erosión o pérdida del espacio de playa, el bloqueo del suministro o flujo de sedimentos y la limitación al acceso de la playa son algunas de las desventajas. En los estados de Maine, New Jersey, Carolina del Norte y Carolina del Sur está prohibida la construcción de este tipo de estructuras a lo largo de sus costas (Balsillie, 1996; Griggs et al., 1991; Hall & Pikey, 1991 en Slomp, 1997).

(2) Estabilización suave: en esta categoría se incluyen la alimentación o relleno de playas (*beach nourishment*), los arrecifes artificiales, el drenaje de playas, el drenaje de acantilados, el perfilamiento de taludes, la protección de la base de acantilados, la

regeneración de dunas, la conservación y siembra de manglares, el “by-pass” de arena y la plantación o estabilización de vegetación.

Este tipo de estrategia presenta mayores ventajas que las de estabilización fuerte. Entre algunas de sus ventajas podemos mencionar que estas aumentan el espacio de la playa, no causan bloqueo en el suministro o flujo de sedimentos y protegen contra los fenómenos atmosféricos. Por otro lado algunas desventajas son los altos costos de instalación y mantenimiento y el posible daño a especies marinas, debido a la turbidez. Una de las técnicas que mas auge ha tomado a nivel mundial es la alimentación de playas con aporte artificial de arena (Soledispa, 2003). Aunque su efectividad ha sido probada en diferentes países, la misma presenta desventajas asociadas al periodo de mantenimiento (requieren enriquecimiento regularmente); altos costos; posibles daños a especies marinas debido a la turbidez causada por la arena depositada y la formación de playas con demasiada pendiente debido al tamaño inadecuado de los granos de arena depositados. Algunas de estas técnicas de estabilización suave, han sido poco utilizadas y su eficacia no ha logrado comprobarse hasta ahora, además existe suspicacia hacia ellas, lo que ha inducido a preferir las técnicas estructurales fuertes (Posada & Henao, 2008)

(3) Relocalización, reubicación o traslado: dependerá de la naturaleza del problema de erosión, usualmente resulta ser más económico y estético en comparación con otras alternativas; los costos de mover las edificaciones hacia atrás de la línea de la costa, aunque es elevado es una inversión de una sola vez, en cambio las alternativas fuertes y suaves requieren gastos constantes y repetitivos, que al final resultan ser más costosos que la relocalización. Algunas ventajas que provee esta técnica es que permite que los procesos naturales continúen, elimina los riesgos a las edificaciones y preservan la playa. Entre las desventajas que presenta podemos mencionar que el área debe contar con espacio para poder retroceder y requiere altos costos. En el 1987

el Programa Nacional de Seguro de Inundaciones (NFIP, por sus siglas en inglés) en una enmienda Upton-Jones señaló proveer hasta el 40% del valor asegurado de los edificios para los gastos de traslado, si el edificio se mueve antes de la inundación.

En el área de estudio las estructuras implementadas han consistido en técnicas de estabilización fuerte, como los gaviones, rompeolas, espigones, revestimientos, exceptuando el sistema “NuShore”, que es uno de estabilización suave.

Estudios de casos

La presión de uso que ha estado recibiendo la zona costanera debido al aumento poblacional, el mal manejo y la pobre planificación han provocado serios conflictos y desequilibrios que han afectado adversamente estos ecosistemas y sus recursos. A nivel mundial el asunto de la erosión costera es una de las problemáticas de mayor interés, la literatura consultada para este trabajo de investigación mostró evidencia de los estudios y análisis científicos que se están llevando a cabo en muchos países del mundo para atender la problemática de la erosión costera.

Playa de Varadero, Cuba

López (2006) realizó un estudio en la playa de Varadero, considerada uno de los atractivos turísticos de mayor importancia del país. Hace alrededor de 40 años la playa ha sufrido una regresión costera de 1.2 metros/año. Dicho asunto pone en peligro la actividad turística de la zona. Al concluir la investigación identificaron tres áreas donde la erosión era muy severa, las causas que la produjeron e hicieron recomendaciones de técnicas de manejo para la mitigación de la erosión. Las técnicas sugeridas incluyeron el enriquecimiento o abastecimiento de la playa y la instalación de rompeolas. Se recomendó ampliar los estudios e investigaciones de otras variables que pudieran estar afectando la zona para así desarrollar un plan de manejo que ayude a prevenir que la erosión costera afecte la totalidad de la Península.

Municipio de Mar Chiquita, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Tassara y García (2005) analizaron la problemática de la erosión costera del sector entre la localidad Playa Dorada y el arroyo Los Cueros en el municipio de Mar Chiquita, en la provincia de Buenos Aires, Argentina. El objetivo principal fue interpretar y explicar la erosión costera, diagnosticar el grado de vulnerabilidad y evaluar los impactos antropogénicos. La zona de estudio abarcó dos tramos de costa con características distintas, una localizada al suroeste y la otra al noreste con aproximadamente nueve kilómetros de frente marítimo. La zona analizada presentó un retroceso promedio de la línea de la costa de 4.19 metros y una tasa erosiva de 0.21 metros/año. Recientemente la región incrementó su población de 199 habitantes en el año 1991 a 1,387 habitantes en el año 2001, un aumento del 700%. La carga demográfica de las décadas anteriores era de temporadas, en la actualidad la misma es de carácter permanente, situación que ha duplicado o triplicado la presión en la zona.

Los resultados encontrados constataron que las acciones antropogénicas representaron un aumento en la vulnerabilidad en la zona de estudio. Acciones como la construcción de bajadas, rampas y escaleras, la instalación de balnearios, la desembocadura de alcantarillados, la apertura de calles y sendas, el tránsito de vehículos, el pastoreo/pisoteo de animales, la construcción de terraplenes improvisados y la desembocadura de canales artificiales fueron considerados como aquellas acciones que aumentaron la vulnerabilidad.

Costa de Kangnan, Taiwán

Esta costa localizada al noroeste de Taiwán, ha sufrido problemas de erosión costera por más de 10 años, estos problemas surgieron a partir de la construcción de un muelle pesquero. Entre los años 1984-1990 la playa fue descrita como una gran playa con espacio recreativo y contaba con un parque que servía funciones ecológicas. Los graves problemas de erosión obligaron a cerrar la playa en el año 1991 y actualmente

muy pocas personas pueden disfrutar de la misma. Antes de 1988, era una playa en estado de acreción debido a la acumulación de montones de arena provenientes del Río Touchien. Después de la ampliación de los espigones para la construcción del muelle pesquero, los problemas de erosión comenzaron a manifestarse. Para mitigar el problema fueron colocados en la costa espigones porosos blindados con bloques de hormigón de ocho toneladas cada uno. Esta técnica solo protegió temporariamente la costa y trajo consigo más problemas de erosión.

Liou, Chang, Chen, & Liaw (2009), realizaron un estudio de la evolución costera y la variación batimétrica en la costa de Kangnan. El propósito de la investigación fue analizar la relación entre la construcción del muelle pesquero y la erosión de la playa. Los estudios evidenciaron que la presencia de los espigones eran los responsables de gran parte de la erosión al sur del muelle pesquero. Al concluir la investigación agencias concernientes se comprometieron a proveer fondos para investigación y sugirieron medidas preventivas como la instalación de cuatro rompeolas sumergidos en alta mar a una profundidad media del agua de unos 3-4 metros. Los bloques de los espigones originales fueron trasladados a la costa como rompeolas de materiales reciclados, así que los usuarios ya no verán bloques de hormigón sobre la costa.

Myrtle Beach, Carolina del Sur, EU

Hace dos décadas atrás Myrtle Beach sufría problemas de erosión tan severos que apenas contaba con espacio de costa cuando la marea subía. Los pronósticos anunciaban que la playa no soportaría el embate de otra tormenta y que los daños serían catastróficos debido a la pésima condición en la que se encontraba la playa. Preocupados por la situación la ciudad convocó un taller en el año 1980, al que fueron invitados expertos de otros estados para que ofrecieran sus recomendaciones. Algunas de las recomendaciones fueron la construcción de rompeolas más grandes y resistentes, la relocalización de estructuras, la colocación de viejos vagones de

ferrocarril para que amortiguaran el oleaje y el enriquecimiento o abastecimiento de la playa.

Durante esa época las autoridades no tenían una idea de cuanta arena por año estaba perdiendo la playa, que cantidad de arena sería necesaria para el enriquecimiento de la playa, si contaban con un área de obtención de arena adecuada y los costos de operación. En el año 1983 el USCOE llevó a cabo un estudio, pero ante la dilación en el asunto la ciudad decidió organizar un Comité presidido por el gobernador de la ciudad y crearon un proyecto local para sufragar los costos de la rehabilitación de la playa. Entre los años 1981-1987 se llevó a cabo el proyecto de abastecimiento o enriquecimiento de la playa a un costo de \$5.5 millones, el mismo fue financiado con bonos de mejoras capitales y otros ingresos derivados de nuevos impuestos.

Los trabajos de abastecimiento incrementaron el ancho de la playa en alrededor de 40 pies. Dicho proyecto ha sido considerado como unos de los enriquecimientos de playa más grandes de los Estados Unidos. El proyecto de rehabilitación final fue realizado en el año 1997 cuando el USCOE duplicó la cantidad de arena depositada en la el proyecto de rehabilitación local. A través de este proyecto se logró recuperar las dunas y casi un 100% del ancho de la playa aumentó, el costo total fue de \$15 millones. Al presente más del 70% de la arena depositada continúa presente en la playa. Los resultados obtenidos después de este proyecto de rehabilitación han sido exitosos, esto a pesar de haber recibido el embate de tormentas invernales en el año 1986, 1993 y el huracán Hugo en el 1989. En el evento del 1986 los daños fueron estimados en menos de \$0.5 millones por milla en comparación con otras áreas que registraron daños aproximados de \$2.5 millones por milla. En el caso del huracán Hugo la mitad de la arena depositada fue eliminada, pero en esta ocasión la Agencia Federal para el

Manejo de Emergencias (FEMA por sus siglas en inglés) aprobó el 100% de los costos para el enriquecimiento de emergencia de la playa.

Marco legal

El ELA de Puerto Rico cuenta con un sinnúmero de agencias de gobierno, reglamentos y leyes reguladoras del medio ambiente que van desde la esfera federal a la estatal y a la municipal. Según Seguinot (2000), aunque Puerto Rico no es propiamente un estado, sino un territorio de los Estados Unidos, desde el punto de vista de la legislación ambiental costanera actúa como si lo fuera.

Por un lado, la responsabilidad del manejo de las áreas costeras recae sobre las agencias federales y estatales. Las agencias federales son el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USCOE, por sus siglas inglés); la Agencia de Protección Ambiental Federal (USEPA, por sus siglas inglés); la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés); el Servicio Geológico Federal (USGS, por sus siglas en inglés); la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia (FEMA, por sus siglas inglés). Las agencias estatales son la Junta de Calidad Ambiental (JCA); la Junta de Planificación (JP); el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA); el Departamento de Transportación de Obras Públicas (DTOP); la Administración de Reglamentos y Permisos (ARPE); la Autoridad Portuaria (AP) y la Compañía de Turismo (CT). Por otro lado, Frederique (2004) indicó que Puerto Rico posee las leyes de derecho ambiental más amplias del mundo, a nivel federal, 60 leyes son administradas por el gobierno de los Estados Unidos de América en Puerto Rico y a nivel estatal administra 26 leyes y 37 reglamentos ambientales.

Ley de Aguas Española (3 de agosto de 1866)

Esta ley se remonta a los tiempos de España en el año 1866. Mediante esta ley se inician los conceptos legales en cuanto a la administración de los bienes de dominio

público marítimo terrestre (BDPMT). En su Artículo 1 se define playa como: “espacio que cubre las aguas en el movimiento de la marea hasta donde llegan las altas mareas o hasta donde llegan las aguas en las tormentas ordinarias”.

La Ley de Puertos (5 de febrero de 1886)

Mediante esta ley se define el concepto zona marítimo-terrestre (ZMT) como:

“el espacio de las costas o fronteras marítimas de la Isla de Puerto Rico y sus adyacentes que forman parte del territorio español, y que baña el mar en su flujo y reflujo, en donde son sensibles las mareas, y las mayores olas en los temporales en donde no lo sean. Esta se extiende también por los márgenes de los ríos hasta el sitio en que sean navegables o se hagan sensibles las mareas”.

En su Artículo 2 explicó los bienes de dominio público (BDP) como: “los terrenos que se unen a la zona marítimo-terrestre por las accesiones y aterramientos que ocasione el mar...” Mediante dicha ley se transfirió la jurisdicción sobre la ZMT en zonas portuarias a la Autoridad de Puertos, la cual era presidida por el Departamento de Transportación y Obras Públicas (DTOP). El DTOP administró la zona marítimo-terrestre hasta la creación del DRNA en el 1972.

Tratado de Paris Artículo VIII y la Ley Foraker (1900)

España cede a los Estados Unidos la isla de Puerto Rico y sus adyacentes, más tarde en el 1917 de acuerdo al Acta Orgánica, Estados Unidos le concede a Puerto Rico todos los BDP para ser administrados a beneficio del pueblo de Puerto Rico (DRNA, 1995).

Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico (1952)

Mediante la Constitución del ELA se estableció en su Artículo VI Sección 19 que “será política pública del Estado Libre Asociado la más eficaz conservación de sus recursos naturales, así como el mayor desarrollo y aprovechamiento de los mismos para el beneficio general de la comunidad”.

Nuevo Código Penal de Puerto Rico (CPPR) del 2004

El Artículo 242 describe el delito de contaminación ambiental y establece que toda persona que realice o provoque directa o indirectamente, emisiones, radiaciones o vertidos de cualquier naturaleza en el suelo, atmósfera, aguas terrestres superficiales, subterráneas o marítimas, en violación a la ley, y que ponga en grave peligro la salud de las personas o el equilibrio de los sistemas ecológicos o del medio ambiente.

En el Artículo 243 describe el delito de contaminación ambiental agravada, si es uno que se caracteriza como lo descrito en el Artículo 242 y es realizada por una persona jurídica sin el permiso correspondiente, endoso, certificación, franquicia o concesión ambiental, o clandestinamente, o no ha cumplido con lo dispuesto en las leyes para enmendar o eliminar el acto en violación de la ley.

Leyes y Reglamentos Estatales para el Manejo y la Gestión Costera

Ley Núm. 416 del 22 de septiembre de 2004, Ley Sobre Política Pública Ambiental de la Junta de Calidad Ambiental, (12 LPRA §§ 8001-8007f).

Constituye la ley más amplia establecida bajo la jurisdicción estatal (Seguinot, 2000). Establece que se estimule la armonía entre el hombre y su entorno. Además de que se fomenten los esfuerzos que impedirían o eliminarían los daños al ambiente, estimular la salud y el bienestar del común. Sus principios están basados en que cada generación tiene la responsabilidad de ser custodio del ambiente para el beneficio de las futuras generaciones. La ley establece lograr el balance entre la población y el uso de los recursos naturales de modo que permita una mejor calidad de vida así como mantener una calidad de los recursos renovables.

En el Artículo 4(b)(3) indica las responsabilidades del gobierno del ELA ordenándole a los departamentos, a las agencias, a los municipios, a las corporaciones gubernamentales y sus subdivisiones políticas que deben incluir en toda recomendación e informe una propuesta de legislación antes de efectuar cualquier acción o promulgar

cualquier decisión gubernamental se debe emitir una declaración escrita y detallada que incluya el impacto al ambiente de la legislación o de la acción propuesta, así como los efectos adversos al ambiente al implantarse la acción. Además, deberá presentar las alternativas a la acción o a la decisión gubernamental en cuestión y evaluar la relación entre los usos locales a corto plazo del ambiente, la conservación y el mejoramiento de la productividad a largo plazo como de cualquier compromiso irrevocable o irreparable de los recursos naturales.

Acorde con los procesos de planificación, se le requerirá por ley a toda persona o funcionario que proponga un desarrollo la preparación de un documento ambiental conocidos como: Evaluación Ambiental (EA) o Declaración de Impacto Ambiental (DIA), según aplique cada caso en particular y cuando así se determina que la acción propuesta tendrá un impacto ambiental significativo sobre los recursos naturales de las áreas costeras y su entorno.

Ley Núm. 23 del 20 de junio de 1972, Ley Orgánica del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (3 LPRA §§ 151-163).

Con la creación del DRNA mediante la Ley Orgánica del 1972 se designa al Departamento como la agencia del gobierno de Puerto Rico encargada de la protección y la administración relacionadas a la vigilancia y a la conservación de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos y la zona marítimo terrestre. Mediante esta ley, la agencia responsable de la implementación del PMZC a través de su División de Zona Costanera, es el DRNA. En su Artículo 5, Sección (h) le otorga facultades al Secretario para ejercer vigilancia y conservación de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo ésta y la zona marítimo-terrestre. En el Artículo 7, Sección (c) le transfiere al Secretario del DRNA las facultades y actividades en torno a la prevención de inundaciones y la conservación de ríos y playas que antes eran función del secretario del DTOP. Se establecen las facultades y los deberes del Secretario del Departamento

relacionadas a la vigilancia y a la conservación de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos y la zona marítimo-terrestre. Esta ley también le confiere al DRNA la responsabilidad, durante la fase operacional, de implantar la política pública del ELA dirigida hacia la más eficaz conservación de los recursos naturales así como el mayor desarrollo y aprovechamiento de los mismos para el beneficio general de la comunidad.

Ley Núm. 1 del 29 de junio de 1997, Ley de Vigilantes de Recursos Naturales del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, (12 LPRA §§ 1201-1210).

El Cuerpo de Vigilantes son los responsables de velar por la protección de los recursos naturales, vigilar por la observación de las leyes y reglamentos que protegen el ambiente y ejercer funciones de policía dentro de todas las áreas bajo la jurisdicción del DRNA.

Ley Núm. 129 del 12 de septiembre de 2001, Ley Orgánica de la Junta de Planificación de Puerto Rico (23 LPRA §§ 62m64h)

Fue creada para regir el desarrollo de manera integral y ordenada así como el uso eficiente de los suelos y de los recursos naturales, a través de la preparación e implementación del desarrollo que integre los aspectos sociales, económicos y físicos del país sin agotar los recursos naturales. La misión programática dirigir el desarrollo económico, social y físico del ELA.

Ley Núm. 81 de 30 de agosto de 1991, Ley de Municipios Autónomos (21 LPRA §§ 201-240)

Dicha ley requiere que todo municipio establezca un Plan de Ordenación Territorial (POT). El propósito es propiciar un uso juicioso y un aprovechamiento óptimo del territorio, promoviéndose un proceso de desarrollo ordenado, racional e integral de los mismos. El POT deberá cumplir con diversas metas enfocadas en la protección de los recursos de agua superficiales y subterráneos, y su cuenca inmediata, así como los sistemas ecológicos, hábitats de fauna y flora en peligro de extinción, y los sistemas y recursos naturales de valor ecológico.

Se refiere a los recursos de agua y a la zona costanera como elementos preciados que hay que salvaguardar, proteger y conservar. Pero, existen leyes y reglamentos específicos que van dirigidos exclusivamente para tratar los problemas ambientales y las condiciones naturales particulares de la región como el PMZC. El cual fue creado en año el 1978, en virtud de la Ley Federal de Manejo de Zonas Costeras del año 1972 (CZMA, por sus siglas en inglés). Este Programa administra la zona costanera del país, incluyendo algunos importantes recursos costaneros que se extienden tierra adentro.

Ley Núm. 550 de 3 de octubre de 2004, Ley del Plan de Uso de Terrenos del Estado Libre Asociado de Puerto Rico

Se crea la nueva política pública para organizar la Oficina del Plan de Uso de Terrenos (adscrita a la Junta de Planificación) y el Comité Interagencial de la Rama Ejecutiva para que disponga los requisitos procesales para la elaboración, aprobación e implantación de un plan a nivel isla. Mediante la misma se puede establecer el procedimiento de inventario de recursos, el procedimiento de Declaración de Áreas de Reserva a Perpetuidad así como las disposiciones relacionadas con los Reglamentos de Zonificación Especial y el proceso de transición hacia el plan, entre otros.

Se convirtió en una iniciativa para clasificar los suelos de acuerdo a su mejor uso con el propósito de respaldar el desarrollo sustentable. Esta ley expresa que la falta de planificación, el ritmo de degradación, la mala utilización y destrucción de los suelos se ha agravado significativamente durante las últimas cuatro décadas. Los recursos más impactados y los más sujetos a presiones de desarrollo son los recursos de agua, las cuencas hidrográficas, los terrenos agrícolas, las planicies y el litoral costero.

Ley Núm. 267 de 10 de septiembre de 2004, Ley sobre Política Pública de Desarrollo Sostenible de Puerto Rico

Dicha ley tiene como finalidad establecer la política pública ambiental y surge ante la necesidad de dirigir los esfuerzos de planificación hacia al desarrollo sostenible.

En el Artículo 2 expone que la política pública deberá armonizar los programas y las actividades del gobierno relacionadas a los aspectos socio-económicos y ambientales del desarrollo sostenible. Mediante la ley se permite establecer una Comisión para el Desarrollo Sostenible de Puerto Rico para lograr las políticas, los programas y las actividades gubernamentales en armonía.

Ley Núm. 6 de 29 de febrero de 1968, La Ley para crear un Área de Prevención de Inundaciones y de Conservación de Playas y Ríos del DRNA

Tiene la responsabilidad de estudiar y controlar las inundaciones así como la vigilancia, la conservación y la limpieza de las playas. Además el control de la extracción de arena y grava en las playas así como en las orillas de ríos, el control de la erosión, el deslinde, saneamiento de la ZMT y vigilancia de los recursos costeros como los manglares.

Ley Núm. 132 del 25 del julio de 1968, según enmendada, Ley de Arena, Grava y Piedra (28 LPRA §§ 206220f)

Esta ley se creó ante la necesidad de controlar la masiva extracción de arena ocurrida en la década de los sesenta para propósitos de construcción. Le otorga al DRNA jurisdicción sobre las actividades de extracción, remoción y dragado de materiales de la corteza terrestre (arena, grava, piedra, etc.) y cualquier otro componente de la tierra que no esté reglamentado como mineral económico en el Reglamento Núm. 2305 del 10 de octubre de 1997 del DRNA. El solicitante está obligado a restaurar el área cavada, una vez finalice la extracción.

Ley Núm. 173 del 12 de agosto de 2000, según enmendada, Programa para la Promoción, Protección y Conservación de las Playas de Puerto Rico Aspirantes a la Bandera Azul

Dicha ley está adscrita a la Junta Interagencial para el Manejo de las Playas en la isla. El propósito es que una organización sin fines de lucro, sea miembro de la Fundación Europea de Educación Ambiental y reconocida por su compromiso con la protección y conservación del ambiente y de los recursos naturales. Además de que

pueda administrar y manejar junto a la Compañía de Turismo el denominado Programa Bandera Azul.

Ley Núm. 250 de 15 de agosto de 1999, Ley para Institucionalizar el Programa “Adopte una Playa” del DRNA

Crea el Programa “Adopte una Playa” adscrito al DRNA, emulando el programa del mismo nombre instituido por el Programa Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico a los fines de contribuir a la calidad de vida de los ciudadanos, establecer un programa de limpieza y ornato de nuestras playas, promover la protección de nuestros recursos naturales y el ambiente. Se espera que la empresa privada pueda aportar a disminuir significativamente los problemas que aquejan a nuestras playas. La responsabilidad social y económica de estas empresas puede dirigirse a transformar una comunidad al ejercitar su liderazgo ayudando a dar un mayor mantenimiento y protección a nuestras playas.

Reglamento de Planificación Núm. 4, Reglamento de Zonificación de Puerto Rico

Constituye el mecanismo mediante el cual se establecerán o fijarán los usos adecuados para todos los terrenos del País e islas adyacentes que le pertenecen. Estipula que podrán formar parte también de los mapas de zonificación las aguas y el suelo oceánico o marítimo, los arrecifes, los islotes, cayos e islas adyacentes dentro de una distancia de tres (3) leguas marinas, que es la delimitación marítima de la zona costanera de Puerto Rico.

Reglamento de Planificación Núm. 13, Reglamento de Zonas Susceptibles a Inundaciones

Mediante este estatuto se establecen las medidas de seguridad para reglamentar las edificaciones y el desarrollo de terrenos en las áreas declaradas como de riesgo de inundación.

Reglamento de Planificación Núm. 17, Reglamento de Zonificación de la Zona Costanera y de Accesos a Playas y Costas de Puerto Rico

El objetivo principal es que todas las personas residentes y visitantes de Puerto Rico tengan igualdad de oportunidades por ley a disfrutar de las costas y especialmente de las playas de Puerto Rico.

Reglamento Núm. 6510 (junio 2002), Reglamento para el Proceso de Presentación, Evaluación y Trámite de Documentos Ambientales de la Junta de Calidad Ambiental

Define un documento ambiental como una declaración escrita y detallada sobre cualquier acción o actividad que pueda ocasionar algún impacto sobre el ambiente. Son instrumentos de planificación que preparan las agencias como parte de su proceso de toma de decisiones sobre las distintas acciones bajo su consideración. Este proceso de planificación facilita la toma de decisiones informadas por parte de los encargados de tomar decisiones gubernamentales.

Reglamento para el Control de la Erosión y Prevención de la Sedimentación en Puerto Rico de la Junta de Calidad Ambiental

Mecanismo legal para fiscalizar y prevenir aquellas actividades humanas causantes de la erosión así como la sedimentación y la contaminación de los cuerpos de agua en Puerto Rico.

Reglamento 4860 del 29 de diciembre de 1992 del DRNA, Reglamento para el Aprovechamiento, Vigilancia, Conservación y Administración de las Aguas Territoriales, los Terrenos Sumergidos sobre ésta y la Zona Marítimo-Terrestre

En este reglamento se define la ZMT, definición que aparece además en los Reglamentos de Planificación Núm. 4, 13 y 17. Dicha definición del Artículo 2.108 dice así:

“zona marítimo-terrestre significa e incluye el espacio de las costas del Estado Libre Asociado de Puerto Rico que baña al mar en su flujo y reflujos, en donde son sensibles las mareas, y las mayores olas en los temporales, en donde las mareas no son sensibles, e incluye los terrenos ganados al mar, las acciones

y aterramientos que ocasiona el mismo y los márgenes de los ríos hasta el sitio en que sean navegables o se hagan sensibles las mareas”.

Este reglamento además esboza las tareas del DRNA para la protección de la ZMT.

Reglamento Núm. 6767 del 11 de febrero de 2004 del DRNA, Reglamento para Implantar el Programa “Adopte una Playa”

Establece los principios rectores que constituirán la Política Pública de ornato, mantenimiento, restauración de playas y los procedimientos administrativos a tenor con el Artículo 4(a) de la Ley Núm. 250. Las normas que se crean van dirigidas a proteger los recursos costeros y los BDP, determinar el alcance y tipo de responsabilidades que serán compartidas por los participantes y velar por la seguridad.

Reglamento Núm. 6916 del 17 de diciembre de 2004 del DRNA, Reglamento para regir la extracción, excavación, remoción y dragado de los componentes de la corteza terrestre

Para reglamentar la extracción, excavación, remoción y dragado de los componentes de la corteza terrestre llamados arena, grava, piedra, tierra, sílice, calcita, arcilla y cualquier otro componente similar de la corteza terrestre que no esté reglamentado como mineral económico, en terrenos públicos y privados, dentro de los límites geográficos del ELA.

Leyes Federales Relacionadas al Manejo y Gestión de la Zona Costanera

National Environmental Policy Act (NEPA)

Es la ley más amplia que rige el medio ambiente en los Estados Unidos y sus territorios. Esta establece la política general de manejo de los recursos naturales y da las directrices a los estados de cómo deben preservarse y manejarse los recursos del medio ambiente, particularmente en las tierras pertenecientes al gobierno federal. Los instrumentos de gestión ambiental que se establecen bajo esta ley son la EIA y la DIA. La NEPA es administrada por la Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), (Seguinot & Méndez, 2008).

Coastal Zone Management Act 1972, (CZMA), 16 U.S.C. §§ 1451-1464

Creada por el Congreso de los Estados Unidos para promover la preservación, protección, desarrollo, restauración y mejoramiento de esta zona y para asistir a los estados en el desarrollo de sus Programas de Zona Costanera en la protección de sus recursos naturales tales como humedales, valles aluviales, estuarios, playas, dunas, corales y arrecifes, entre otros (Seguinot & Méndez, 2008).

El término “zona costanera” según el CZMA incluye la franja de costa que se extiende mil metros (1000) tierra adentro desde el litoral. Bajo esta ley le corresponde a cada estado establecer un PMZC. El programa está diseñado para promover las actividades de protección y conservación de los ecosistemas costeros, así como regular el desarrollo de actividades humanas que tengan un impacto sobre el ambiente costero. La ley introduce el concepto de manejo activo para tomar acciones remediativas de forma inmediata en áreas críticas mediante la creación de zonas de planificación especial para desarrollar reservas y parques naturales. También define regiones y áreas para la investigación científica dentro del marco de la colaboración institucional y académica. Se requerirá un permiso federal o una licencia para cualquier actividad relacionada a la extracción de arena de las dunas, construcción de carreteras en cuencas hidrográficas, descargas, la planificación, modificación de estructuras en la franja litoral, la utilización de los recursos de aguas costeros, el relleno y dragado que afecte las aguas costeras, entre otras (Seguinot & Méndez, 2008).

Clean Water Act 1972, (CWA), 33 U.S.C. §§ 1251-138

Es administrada por la USEPA, creada con el fin de proteger la calidad del agua de la superficie. El objetivo más amplio es la restauración y el mantenimiento de la química, física e integridad biológica de las aguas para apoyar la protección de la vida silvestre mediante la reproducción de las especies acuáticas, etc. Dicha ley cuenta con una variedad de herramientas para la regulación para reducir los vertidos directos de

contaminantes en cursos de agua, financiar las instalaciones municipales de tratamiento de aguas residuales y la gestión de la escorrentía contaminada.

Coastal Barrier Resources Act, (CBA), 1982, 16 U.S.C. §§ 3501-3510

Es administrada por el United States Fish and Wildlife Service (USFWS) fue aprobado en el 1982 con la idea de intensificar la protección de los recursos costeros que estaban siendo afectados por el desarrollo de áreas turísticas y urbana. Le proveyó mas alcance al CZMA para la protección de estuarios, arrecifes, lagunas, playas y toda barrera producto de la deposición en ambientes litorales (Seguinot, & Méndez, 2008).

Emergency Planning and Community Right-to-Know Act, (EPCRA), 42 U.S.C. §§ 11001-11050

Proclamada en 1986 como enmienda a la Ley CERCLA. Hace mandatorio la presentación de informes por las instalaciones industriales de las emisiones de productos químicos peligrosos para el medio ambiente, así como la planificación local para responder en caso de significativa, las emisiones accidentales.

Endangered Species Act, 1972, (ESA), 16 U.S.C. §§ 1531-1544

Para la conservación de especies amenazadas y en peligro de extinción, incluyendo su hábitat.

Marine Protection Research and Sanctuaries Act, 1972 (MPRSA or Ocean Dumping Act), 33 U.S.C. §§ 1401-1445

Sus dos objetivos básicos son: regular la disposición de materiales en los océanos a nivel internacional, y autorizar las investigaciones relacionadas.

Oil Pollution Act, 1990, (OPA), 33 U.S.C. §§ 2701-2761

Para las prevención, respuesta y pago de los incidentes de contaminación de petróleo en aguas navegables de los Estados Unidos. Ha aumentado considerablemente la supervisión federal de transporte marítimo de petróleo.

Agencias Estatales que Intervienen en el Manejo y Conservación y Desarrollo de la Zona Costanera

Administración de Reglamentos y Permisos (ARPE)

Su obligación es velar el cumplimiento de las leyes, los reglamentos u ordenanzas establecidos que regulen el uso y el desarrollo de los terrenos, la construcción o alteración de edificios o estructuras, entre otras.

Compañía de Turismo (CT)

Está adscrita al Departamento de Desarrollo Económico y Comercio. En su programa del Desarrollo de Facilidades Físicas Turísticas se encargan de gestionar y estimular el desarrollo de la infraestructura de terrenos y facilidades físicas con potencial en la industria turística.

Departamento de Agricultura (DA)

Maneja los asuntos agrícolas del país, fomenta e impulsa el desarrollo de los terrenos agrícolas incluyendo los de las áreas costeras.

Departamento de Recreación y Deportes (DRD) y Compañía de Parques Nacionales de Puerto Rico (CPNPR)

Tiene la responsabilidad de diseñar e implantar el Plan Nacional para la Recreación y el Deporte que plasma el plan de acción nacional para el desarrollo de la recreación y el deporte en conjunto con las entidades u organismos que participan en las gestiones de los ámbitos deportivos y recreativos del País. La CPNPR fue adscrita al DRD a través de la Ley Núm. 8 del 8 de enero de 2004. Desde entonces el DRD tiene como componente operacional a la CPNPR.

La CPNPR tiene la función de administrar, proteger y cuidar espacios de alto valor ecológico como parques, balnearios y centros vacacionales para el uso y disfrute de todos, tiene la misión de llevar un mensaje educativo para crear conciencia sobre la protección del medio ambiente.

Departamento de Recursos Naturales (DRNA)

Fue creado en 1972 y reorganizado en 1993. Está a cargo de la implantación y formulación de la política pública ambiental y de la protección y conservación de los recursos naturales, ambientales y energéticos. Encargada de proteger, conservar y administrar los recursos naturales y ambientales del Puerto Rico de forma balanceada, para garantizar a las próximas generaciones su disfrute y estimular una mejor calidad de vida. Además propicia un ambiente sano y saludable promoviendo el uso sostenible de los recursos naturales y la ordenación de la gestión ambiental. Mediante la educación fomenta la transformación de los puertorriqueños hacia un enfoque ambiental basado en la conservación y en la participación ciudadana.

A través de su División de Zona Costanera, creada en 1978 y en virtud de la Ley Federal de Manejo de Zonas Costeras de 1972 (CZMA por sus siglas en inglés), el DRNA administra la zona costanera del país, incluyendo algunos importantes recursos costaneros que se extienden tierra adentro. La Junta de Planificación (JP) es responsable de su aprobación a nivel estatal y de administrar el proceso de Certificación de Compatibilidad Federal.

Departamento de Transportación y Obras Públicas (DTOP)

Tiene adscritas varias agencias como la Autoridad de los Puertos (AP) y la Autoridad de Transporte Marítimo de Puerto Rico (ATM). Administran los terrenos marinos y la transportación marítima.

Instituto de Cultura Puertorriqueña (ICP)

Se encarga de contribuir a la conservación, promoción, divulgación y enriquecimiento de los valores culturales para lograr el un conocimiento y valoración de los mismos. Asesoran a la JP en la reglamentación de la construcción en zonas de valor histórico, los cuales podrían incluir los terrenos sumergidos bajo las aguas territoriales.

Junta de Calidad Ambiental (JCA)

Tiene la función principal es proteger y conservar el ambiente, utilizando sabia y juiciosamente los recursos naturales necesarios. De este modo, impide los daños que afecten y mantienen un balance entre el desarrollo económico y el ambiente. Los objetivos de la agencia están encaminados en la investigación e identificación de aquellas condiciones y tendencias en el ambiente a nivel isla. Cuando así se le requiera, hace recomendaciones específicas al Gobernador sobre la protección del ambiente y el desarrollo sostenible. La fase operacional de la JP se realiza a través de las Áreas de Calidad de Agua y Calidad de Aire, el Programa de Control de Contaminación de Terrenos, el Área de Control de Ruidos y el Área de Asesoramiento Científico.

Junta de Planificación (JP)

Algunas de las funciones de la Junta son: preparar, adoptar y recomendar al Gobernador y a la Asamblea Legislativa el Plan de Desarrollo Integral. Además, adoptará y aprobará los mapas de zonificación y las enmiendas a éstos. Asimismo podrá dispensar del cumplimiento de algunos requisitos reglamentarios con el propósito de conseguir agilizar el uso óptimo de los terrenos. Su deber también es preparar y adoptar los Planes de Usos de Terrenos (PUT).

Municipios costeros

En aquellos municipios que sean autónomos serán responsables de administrar y planificar la propiedad así como velar por la conservación y manejo adecuado de los recursos naturales, especialmente las ZMT.

Agencias Federales que Intervienen en el Manejo y Conservación y Desarrollo de la Zona Costanera

Federal Emergency Management Administration (FEMA)

Encargada de construir, mantener y mejorar la capacidad para preparar, proteger, responder, recuperarse y mitigar todos los riesgos ocasionados por algún desastre. Cuenta con programas que trabajan con los riesgos de inundaciones, del medio ambiente y de preservación histórica

Fish and Wildlife Services (USFWS)

Responsable de la conservación, protección y el manejo de las especies de flora y fauna, en especial aquellas especies que son vulnerables o están en peligro de extinción. En el Programa Costero se encarga de proveer la asistencia técnica y financiera necesaria para el manejo y la conservación de los hábitats y de las zonas costeras.

National Marine Fisheries (NMF)

Adscrita a la NOAA, se encarga de administrar los recursos marinos vivos basados en la conservación, manejo y promoción de los ecosistemas saludables

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Proveen pronósticos meteorológicos diarios, avisos de tormentas severas y de vigilancia del clima, gestión pesquera, restauración costera y apoya el comercio marítimo. Asiste a los estados y territorios costeros en la creación de programas de manejo de la zona costanera.

National Park Services (NPS)

Adscrita al Departamento del Interior de los Estado Unidos, está a cargo del cuidado de los parques nacionales, recursos hídricos y áreas costeras. Maneja áreas como: parques nacionales, monumentos, campos de batalla, parques militares, parques

históricos, sitios históricos, costas, áreas de recreación, ríos y senderos pintorescos, y la Casa Blanca

U.S. Coast Guard (USCG)

Protegen los intereses marítimos, la economía marítima y el medio ambiente. En el Programa de Seguridad Marina, Ciencia y Protección del Ambiente se encargan de proteger las aguas costaneras contra derrames o vertidos de sustancias peligrosas, rescates marinos, permisos de navegación, y programas de protección ambiental.

U.S. Army Corps of Engineers (USCOE)

Especializados en la planificación, ingeniería, construcción, y administración de grandes proyectos de infraestructura. Su misión consiste en ayudar a reducir daños provocados por inundaciones, administrar fuentes de agua, navegación, protección y restauración de las costas, restauración del medio ambiente, ofrecer soluciones a problemas de naturaleza peligrosa, tóxica y radioactiva, apoyo militar y respuesta y manejo apropiado de emergencias. En Puerto Rico administra los proyectos de construcción a nivel isla, reglamenta y otorga permisos relacionados con la Ley de Agua Limpia y Ley de Ríos y Puertos y es responsable de otorgar permisos para las actividades de dragado y relleno en las aguas costaneras.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

Establecida en el 1970. Se creó proteger la salud humana y salvaguardar el medio ambiente natural del aire, el agua y la tierra sobre la que depende la vida.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Nuestra investigación se llevó a cabo en el área que comprende el litoral costero norte localizado en la zona conocida como Isla Verde en Carolina, específicamente la zona entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos (Figura 1). A través de este estudio llevamos a cabo un análisis físico-espacial para medir el cambio en la posición de la línea de la costa, investigamos las diferentes estrategias de mitigación aplicadas para el control de la erosión y evaluamos estas técnicas con el fin de recomendar otras que según la literatura revisada hayan probado ser eficaces.

Área de Estudio

El área de estudio se encuentra localizada en Isla Verde específicamente entre Punta el Medio y Boca de Cangrejos en el MAC al norte de la isla de Puerto Rico (Figura 1). La zona posee una diversidad de recursos naturales de gran importancia (yerbas marinas, arrecifes de coral, playas arenosas, dunas, humedales y manglares). Aledaños y vinculados a estos sistemas, existen islotes de manglares y sistemas de canales que conectan estos cuerpos de agua entre sí. El Río Grande de Loíza cruza el municipio de oeste a este, que nace en la zona montañosa a través de un complejo sistema pluvial que es parte de la cuenca y desemboca al Océano Atlántico (Gobierno Municipal Autónomo de Carolina, DÍA-E, 2005).

El MAC cuenta con 45.3 millas cuadradas de territorio (31,487.62 cuerdas) y al norte colinda con el Océano Atlántico. La costa del área norte se caracteriza por tener un sistema de playas de barrera y una plataforma continental ancha (Beatley et al., 2002). Además ha sido descrita como el litoral más expuesto al mar abierto debido a que las corrientes marinas son más fuertes, las aguas son más profundas y menos

claras (PMZC, 2008). En el centro de la costa del municipio está la Punta El Medio, frente a la cual se encuentra la Isla Verde y su playa del mismo nombre. Hacia el este y llegando a Boca de Cangrejos, se localiza una pequeña isla, La Cáncora.

Descripción de la muestra

Seleccionamos la zona de Isla Verde en Carolina ya que constituye uno de los mayores atractivos turísticos y hacen del lugar uno de gran valor para la economía local. Este recurso debe ser manejado de una forma sustentable debido a su proximidad al Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín y por la gran cantidad de hospederías, playas, áreas recreativas, balneario Bandera Azul, actividades acuáticas, entre otros. En las últimas décadas la zona ha sido afectada por la proliferación de construcciones desmedidas en el litoral costero lo que ha provocado problemas severos de erosión que han degradado su mayor atractivo: las playas.

Período de estudio

El estudio tendrá una duración de 6 a 12 meses.

Fuente de datos

Realizamos un análisis físico-espacial mediante el uso del sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) del cual obtuvimos datos primarios a partir de la comparación de fotografías aéreas para los años 1936, 1951, 1962, 1974, 1983, 1994 y 2007.

Diseño metodológico

Para el logro y ejecución de cada uno de los objetivos propuestos, hemos elaborado el siguiente diseño metodológico:

Evaluar el problema de erosión costera en el área bajo estudio

Basamos el procedimiento en el uso de fotografías aéreas para medir el cambio en la línea de la costa del área bajo estudio. Utilizamos las fotografías aéreas que

obtuvimos del archivo de fotos de la Oficina de Fotogrametría del DTOP para los años 1936, 1951, 1962, 1974, 1983, 1994 y 2007, esto comprende una totalidad de 71 años. La escala de las fotos es relativa dado a que están en formato digital y se pueden presentar y utilizar a la escala que más convenga. Las fotografías originales fueron tomadas a una altura aproximada de 10,000 pies, lo cual provee una escala de 1:20,000 en términos de su reproducción impresa. Para llevar a cabo el proceso del análisis físico-espacial las fotografías fueron digitalizadas utilizando un scanner fotogramétrico de rollo marca LEICA, modelo DWS-600 a una resolución de entre 50 a 12.5 micrones (500 y 2,000 dpi, respectivamente). Una vez digitalizadas fueron georeferenciadas utilizando una escala de 1:1,000. Georeferenciamos las fotos utilizando como base las fotografías tomadas por el USGS en el 2007. Esto se hizo con el programa "ArcGIS" 9.3 de la compañía ESRI, en su versión de "ArcInfo". Se trabajaron en la interfase "ArcMap" con la herramienta de "Georeferencing", utilizando parámetros de transformación de primer orden polinomial. La georeferenciación es el proceso por medio del cual las columnas y filas de una imagen digitalizada son alineadas con el norte y el este de un sistema de coordenadas particular (Wolf et al., 2000 en Gómez, 2003).

Para el proceso de montaje, rectificación y comparación utilizamos el programa "ArcGIS" 9.2. Demarcamos la posición de la línea de la costa en cada fotografía siguiendo el límite del flujo y reflujos del agua, ya que esta área la observamos a simple vista al digitalizarla. Ésta es el área que se observa en las fotografías aéreas y es marcado por un cambio de color o tonalidad sobre la arena. El trazado de la línea de la costa posee cierto grado de incertidumbre en su localización y va a depender de la calidad del revelado, la escala y el estado en que se encuentre la foto (Crowell et al., 1991; Fenster et al., 1993 en Gómez, 2003). Realizamos la demarcación del límite de la

costa generando archivos de línea “shapefiles” en “ArcGiS” 9.2 para cada una de las fotografías disponibles.

Para obtener la tasa de erosión media, primero calculamos la diferencia en erosión entre el año final y el año inicial, esa diferencia la dividimos entre la cantidad de años del estudio. Utilizamos la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa de erosión media} = \Delta \text{ línea costa año final} - \Delta \text{ línea costa año inicial} / n$$

Donde:

$$n = \text{cantidad de años del estudio}$$

Luego de haber calculado la tasa de erosión media comparamos el resultado obtenido con el modelo de las categorías del cambio en la línea de la costa del USCOE. Según este modelo zonas que presentan tasas de erosión media en metros/año de $>.1$ recaen en la categoría de acreción; de 0.1 a -0.1 erosión estable; -0.1 a -0.3 erosión baja; -0.3 a -0.7 erosión moderada; -0.7 a -1.2 erosión alta; -1.21 a -2.0 erosión muy alta y >-2.0 erosión severa.

Para calcular la variación en la superficie de la playa, utilizamos la herramienta del “ArcGIS” 9.2 Utilizamos como base la fotografía del año 1936 y la del año 2007, dividimos ésta en seis tramos y analizamos la acreción y erosión del área de la playa (Adaptado de Alonso, Cabrera, Jiménez, Valdemoro, Sánchez, 2007).

Analizar la efectividad de las técnicas de control de erosión aplicadas en el área bajo estudio

Analizamos los resultados obtenidos y observamos los cambios en la línea de la costa antes, durante y después de la aplicación de las técnicas de manejo. Realizamos visitas periódicas a la zona de estudio, tomamos fotografías de los efectos directos del oleaje en diferentes condiciones del mar y llevamos a cabo un análisis de la efectividad de las técnicas aplicadas en la zona bajo estudio.

A continuación, describimos las técnicas para el control de la erosión que han sido implementadas en nuestra zona de estudio. Utilizamos como referencia, el libro de texto "*Living with the Puerto Rico Shore*" (Bush et al., 1995) y el capítulo el "*Manejo de la erosión costera*" (Posada & Henao, 2008). Según la reglamentación vigente, para la construcción de este tipo de estructuras se requiere una evaluación concurrente del USCOE, la JP y el DRNA, mediante una solicitud de evaluación de compatibilidad federal con el PMZC (Ortiz, 2007).

- Gaviones: instalados en las década de los sesenta. Es un tipo de estabilización fuerte paralela a la costa. Consisten en cajas hechas de metal, madera o concreto que se llenan de rocas. Se colocan en el área que se quiere proteger hasta formar un muro simple o escalonado. Su objetivo es separar las áreas de océano y tierra, con el propósito de proteger la tierra y edificios detrás de la zona que es impactada por las olas, para evitar la socavación o los deslizamientos.
- Espigones: instalados en el año 1954. Es un tipo de estabilización fuerte perpendicular a la costa. Este tipo de estructura no está diseñado para proteger la costa ni las propiedades aledañas. El propósito es mantener las entradas de las marinas y la profundidad del canal. Los espigones son una barrera parcial o total al transporte litoral, limitan el flujo en el canal y bloquean el transporte de sedimentos, minimizando así la necesidad de dragado. Debido al bloqueo causado, el suministro de arena deriva abajo del espigón queda reducido, trayendo como resultado el retroceso de la línea costera.
- Rompeolas: instalados en la década de los sesenta. Es un tipo de estabilización fuerte paralelo a la costa, aunque pueden ser colocados de forma perpendicular. Están diseñados para bloquear la energía de las olas y así poder proteger la línea de la costa que queda detrás de la estructura.

- Revestimientos: instalados en el año 1957, fueron extendidos en el año 1981. Es un tipo de estabilización fuerte paralelo a la costa. Coberturas protectoras que son colocados sobre playas o taludes inclinados. El objetivo es absorber la energía de oleajes menores, aunque pueden dejar pasar agua y sedimentos. Estas estructuras son construidas con hormigón o bloques de piedra, que son colocadas superpuestas entre sí, las más grandes en el tope para proveer un aspecto más natural y mejor permeabilidad. Los revestimientos tienen los mismos efectos adversos que los gaviones, aunque en menor intensidad.
- Sistema "NuShore": es un tipo de estabilización suave que es colocado perpendicularmente a la costa. Fueron colocados en el BC, desde marzo de 2006 hasta el año 2008. El mismo consistió en la instalación de 1,500 tubos de acero inoxidable con mallas plásticas amarradas a los tubos, que permitían la filtración de la arena arrastrada por las corrientes marítimas, desplazándola hacia la costa. Este emplea corrientes marítimas a su favor, para restaurar la playa con su propia arena y devolverla a su estado natural, sin necesidad de emplear agentes peligrosos o contaminantes (Tiedeberg, 2005).

Recomendar estrategias o técnicas para el control de erosión para el área bajo estudio.

Analizamos fotografías periódicas en diferentes condiciones del mar de la zona de estudio. Luego, recomendamos técnicas que han sido aplicadas con éxito en otros países y lugares parecidos a Puerto Rico.

Estrategia	Clasificación		Categoría	
	Fuerte	Suave	Paralelo	Perpendicular
1) Gaviones	✓		✓	
2) Espigones	✓			✓
3) Rompeolas	✓		✓	✓
4) Revestimientos	✓		✓	
5) "NuShore"		✓		✓

Estrategia	Función	Limitaciones	Recomendaciones
1) Gaviones	Protegen el área contra socavación o deslizamientos.	Vida útil corta, debido a que el oleaje los deteriora con facilidad.	Utilizarse a lo largo de ríos.
2) Espigones	Mantienen las entradas de las marinas y la profundidad del canal.	Bloquean el flujo de sedimentos, causando erosión aguas abajo.	No utilizarse en áreas con déficit en el suministro de sedimentos.
3) Rompeolas	Absorben la energía del oleaje, reflejándolo o difractándolo.	Acumulan el flujo sedimentario detrás de ellos, provocando erosión.	Llevar a cabo estudios técnicos para alcanzar el objetivo propuesto.
4) Revestimientos	Absorben la energía del oleaje, aunque pueden dejar pasar agua y sedimentos.	Provocan que la energía del oleaje choque contra la estructura y arrastre aguas adentro los sedimentos.	Su diseño y construcción debe contener materiales resistentes a la fuerza del oleaje.
5) "NuShore"	Filtran la arena arrastrada por las corrientes marinas y la desplazan hacia la costa.	Los tubos y mallas se deterioran con facilidad.	Llevar a cabo análisis exhaustivo de la zona donde será construido.

Análisis de datos

El uso de la herramienta de programas de computadoras, fotos aéreas digitalizadas y georeferenciadas, fotografías periódicas de la zona en diferentes condiciones del mar y cálculos mediante aplicación de la fórmula matemática para determinar la tasa de erosión media.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo presentamos los datos obtenidos luego del análisis físico-espacial. Los hallazgos revelaron que en el período de estudio de 71 años, del 1936 al 2007 hubo una variación en la línea de la costa (Figura 3). El cambio en la medida de la línea de la costa fue de -513.47 metros y la tasa de erosión media fue de -7.2 metros al año (Tabla 1), lo que representa una erosión severa según el modelo de las categorías del cambio en la línea de la costa del USCOE. En términos del área de la playa, observamos una acreción en la parte central de la zona, con una variación total de 51028.2 m². Si comparamos el cambio en área entre la fotografía del año 1936 y la del año 2007, podemos evidenciar dicha acreción con un resultado de 124,287.44 m² para el año 1936 y 175,315.64 m² para el año 2007 (Tabla 2). Según la Figura 4 y la Tabla 4, observamos que la zona presentó áreas de erosión y acreción, las áreas sometidas a erosión fueron los tramos 1, 3, 5 y 6, mientras que los tramos 2 y 4 presentaron acreción. A continuación haremos una descripción más detallada de los cambios morfológicos de la zona por año basado en las fotografías aéreas (Figuras 5 a 11).

Evaluar el problema de erosión costera en el área bajo estudio.

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos - 1936

Esta fotografía fue utilizada como base para la investigación, por ser la más antigua disponible. Para esta época observamos al sur y al este de la zona una amplia extensión de humedal, región que es ocupada hoy en día por el AILMM y el CYC respectivamente. La línea de la costa para este período era de 3,803.78 metros y un área de playa de 124,287.44 m². Observamos en la punta este de Boca de Cangrejos

el puente de la PR-187 a una distancia de 76.45 metros de la línea de la costa. Además, la carretera PR-187 ya existía como camino de arena desde principios de siglo (Figura 5).

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos – 1951

Durante el período del 1936 al 1951, se evidenció un cambio en la línea de la costa de 3,803.78 metros a 3,667.18 metros y un área de playa de 124,287.44 m² a 67,560.95 m². Esto representó una erosión o retroceso, que podríamos atribuir a los trabajos de dragado y relleno que se llevaron a cabo en la Laguna Torrecilla en la década de los 50's para la construcción del AILMM y CYC. Observamos además, una marcada erosión al este, en la zona de Boca de Cangrejos, cerca de la desembocadura del Río Grande de Loíza y al oeste se perdió prácticamente toda la zona de playa.

Es evidente al sur de la zona la presencia de la carretera PR-187. Si utilizamos como base el cuadrángulo topográfico del USGS de los años 1949 y 1950 (Figura 12), corroboramos que para ese entonces dicha carretera ya estaba instituida como una vía principal, siendo ésta el único acceso a la zona de Piñones. En relación al puente de la PR-187, este se encontraba a una distancia de 56.23 metros de la línea de la costa (Figura 6).

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos - 1962

Entre los años 1951 al 1962, evidenciamos el período de mayor erosión con una disminución en la línea de la costa de 3,667.18 metros a 3,436.53 metros, sin embargo en el área de playa se evidenció una acreción bastante significativa de 67,560.95 m² a 120,747.78 m². Podemos observar en la foto aérea de este periodo, un cambio en el área de la PR-187 específicamente en la zona del puente. El mismo se encontraba a una distancia de 42.06 metros de la línea de la costa. El área del litoral costero perdió la barrera natural, dejando expuesta el área del puente. También se puede observar en

el área CYC, las instalaciones en uso para embarcaciones. Dentro de este período del estudio, se llevaron a cabo más trabajos de dragado y relleno para la construcción del CYC el cual se inauguró en el 1952. En el año 1954 fueron instalados los espigones en el CYC. Además, se realizó la construcción de la Urbanización Vistamar Marina y la ampliación del AILMM. Adicional a esto en el año 1957 fueron instalados los revestimientos o gaviones para proteger y estabilizar el suelo bajo la carretera PR-187. Su función es separar las áreas de océano y tierra, y proteger la tierra y edificios detrás de la zona que es impactada por las olas para evitar la socavación o los deslizamientos.

El propósito de los espigones es mantener las entradas de las marinas y la profundidad del canal. Estos son una barrera física que limitan el flujo en el canal y bloquean el transporte de sedimentos, minimizando así la necesidad de dragado. Atribuimos a la instalación de los espigones y a los trabajos realizados en la Laguna Torrecilla, el aumento de las corrientes de las mareas y la eventual desviación de los sedimentos que causaron la erosión en un área de la playa y la acreción en el otro lado (Figura 7).

Punta el Medio hasta Boca de Cangrejos - 1974

Durante el período de 1962 al 1974, continuamos observando el patrón erosivo con una disminución en la línea de la costa de 3,436.53 metros a 3,402.33 metros y un área de playa de 120,747.78 m² a 84,557.45 m². Durante la década de los sesenta, previa a esta fotografía, en Puerto Rico hubo una masiva extracción de arena, la cual era utilizada para propósitos de construcción. Esta práctica destruyó la mayoría de las dunas de arena que había en la costa norte de la isla. No fue hasta el 1968, con la creación de la Ley #132, que la extracción de arena fue controlada.

En nuestra zona de estudio, entre el 1950 al 1974, los dragados en la Laguna Torrecilla habían removido alrededor de 3.1 millones de metros cúbicos de material, lo que aumentó el volumen de la laguna en un 110%. Esto, provocó un aumento en los

flujos de la marea, lo que a su vez acrecentó la capacidad de la ensenada para atrapar los sedimentos. Durante los años 1968-1969 se llevaron a cabo más dragados y rellenos para la construcción de la Urbanización Vistamar y la habilitación de dos ensenadas para colocar más embarcaciones en el CYC. Dicha información fue corroborada con la foto aérea del 1974. Observamos además los límites este y oeste donde se perdió el área de playa en su totalidad, especialmente la zona de Boca de Cangrejos. En relación al puente de la PR-187, observamos que seguía acercándose aun más a la línea de la costa con una distancia de 42 metros para este año (Figura 8).

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos - 1983

En el período de 1974 al 1983, el patrón de erosión se mantuvo en aumento con un cambio en la línea de la costa de 3,402.33 metros a 3,392.25 metros. Sin embargo, al igual que en el período del 1951 al 1962 observamos una acreción en el área de playa de 84,557.45 m² a 98,999.45 m². Dicha acreción puede deberse al efecto directo de los trabajos de dragado y a la instalación de los espigones y gaviones, que como habíamos indicado anteriormente interrumpen la corriente litoral y desvían el flujo de sedimentos aguas abajo. Adicional a esto en el año 1981, los revestimientos de la PR-187 fueron extendidos para proteger un total de 700 pies de largo. También se puede observar que el puente de la PR-187 quedó expuesto casi en su totalidad al oleaje, a una distancia de 42 metros de la línea de la costa (Figura 9).

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos - 1994

Durante el período de 1983 al 1994, observamos nuevamente que el patrón de erosión se mantuvo en aumento con un cambio en la línea de la costa de 3,392.25 metros a 3,332.28 metros. Sin embargo, al igual que en el período del 1951-1962 y 1974-1983 observamos una acreción en el área de playa de 98,999.45 m² a 131,086.30 m². Tanto al este como al oeste de la zona de estudio, observamos una disminución en la línea de la costa con una pérdida total del largo de playa. Es notable la marcada

acreción del área de playa que observamos en el centro de la zona de estudio. Atribuimos dicha acreción, al efecto directo de la instalación de los espigones y gaviones que como anteriormente habíamos indicado, tienen un efecto directo en la desviación del flujo de sedimentos.

Es meritorio señalar que del 17-18 de septiembre de 1989, la isla sufrió el embate del Huracán Hugo, de categoría 4, con vientos máximos sostenidos de 140 mph. Este huracán tuvo una trayectoria sureste noroeste, y su ojo pasó sobre la isla de Vieques (Figura 14). El lado oeste de la pared del ojo se movió sobre tierra bordeando los municipios de Ceiba, Fajardo y Luquillo quedando sobre el agua el lado este del ojo. El huracán pasó por la punta norte de la isla con vientos sostenidos de 125 mph (Mújica, s.f.). El puente de la PR-87 fue destruido y no fue hasta el 1994 que el mismo fue restaurado por uno de mayor capacidad y altura. Si lo corroboramos con la foto de este año observamos que el puente quedó totalmente expuesto al mar a una distancia de 30.06 metros. En adición la continuidad de la carretera PR-187 hacia el BC (lado oeste) también fue afectada ya que quedó sin protección natural alguna. En dicha foto observamos la técnica de los gaviones instalados paralelos a la línea de la carretera PR-187 para su estabilidad (Figura 10).

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos - 2007

Este último período del estudio abarca los años del 1994 al 2007. Observamos un cambio en la línea de la costa de 3,332.28 metros a 3,290.31 metros, lo que nos indica un patrón erosivo constante y en aumento. En el caso del área de playa, observamos una acreción de 131,086.30 m² a 175,315.64 m². Específicamente en el área de Boca de Cangrejos, la erosión y el cambio en la línea de costa, se extendió más hacia el oeste. En la porción oeste y central de la zona de estudio, observamos acreción en el área de playa. Durante este período fue instalado el sistema “NuShore”, una técnica de estabilización suave, utilizada para mitigar la erosión que fue descrita

anteriormente en este trabajo. Si corroboramos en la foto aérea de este año (Figuras 11 y 13), observamos dicha estructura. Adicional a esto es meritorio señalar que del 21-22 de septiembre de 1998, la isla sufrió el embate del Huracán Georges, de categoría 3, con vientos máximos sostenidos de 115 mph (Figura 14). Este huracán entró a la isla por el sureste entre Yabucoa y Humacao como a 25 millas al sureste del AMSJ y salió por Cabo Rojo al oeste, afectando a todo Puerto Rico (Mújica, s.f.). En relación al puente de la PR-187, este se encontraba a una distancia de 27 metros de la línea de la costa.

Analizar la efectividad de las técnicas de control de erosión aplicadas en la zona de estudio.

La mayoría de las técnicas para el control de la erosión implementadas en nuestra zona de estudio han sido de estabilización fuerte, con excepción del sistema “NuShore” que es una técnica de estabilización suave. A continuación un desglose de las técnicas para el control de la erosión implementadas dentro de la zona de estudio y su efectividad basado en el análisis de las fotografías aéreas: (Adaptado de Ortiz, 2007):

Punta El Medio hasta Boca de Cangrejos

- Punta El Medio y Casa Cuba: técnicas de estabilización fuerte paralelos a la costa como: gaviones, rompeolas y revestimientos de rocas y escombros. Fueron instalados desde la época de los sesenta. Los gaviones, consisten en cajas hechas de metal, madera o concreto que se llenan de rocas. Se colocan en el área que se quiere proteger hasta formar un muro simple o escalonado. Su objetivo es separar las áreas de océano y tierra, con el propósito de proteger la tierra y edificios detrás de la zona que es impactada por las olas, para evitar la socavación o los deslizamientos. Los rompeolas, están diseñados para bloquear la energía de las olas y así poder proteger la línea de la costa que queda detrás

de la estructura. Observamos que estas estructuras han protegido las construcciones localizadas en la parte posterior a estas, pero no han disminuido el proceso erosivo en la zona. Esto se debe a que este tipo de estructura está diseñado para atrapar sedimentos, así que no son ideales en lugares donde existe un déficit de los mismos. Los hallazgos de esta investigación y las observaciones de campo, evidenciaron que la playa que existía al frente de estas estructuras ha disminuido en amplitud (Apéndice 1).

- Balneario de Carolina: sistema de estabilización suave perpendicular a la costa conocido como “NuShore”. Fue aplicado desde marzo del 2006 hasta el año 2008. El sistema consistió en la instalación de 1,500 tubos de acero inoxidable con mallas plásticas amarradas a los tubos. Permitían la filtración de la arena arrastrada por las corrientes marítimas, desplazándola hacia la costa. Según los hallazgos del análisis de las fotografías aéreas, en la fotografía del año 2007 ya esta técnica había sido aplicada y observamos una acreción en el área de playa. No podemos atribuir dicha acreción a la efectividad de la técnica, debido a que en períodos anteriores ya habíamos observado acreción en este sector de la playa. Esto nos lleva a concluir que los efectos de las técnicas de estabilización fuertes, aplicadas previas al “NuShore” ya estaban desplazando los sedimentos hacia esta zona del BC, cabe señalar que por naturaleza en la costa norte de la isla los sedimentos son transportados de este a oeste (Figura 13 y Apéndice 9).
- Carretera PR-187: técnica de estabilización fuerte paralelo a la costa, revestimientos. Fueron instalados en el año 1957, para cubrir un espacio de 400 pies de largo, más tarde en el 1981 fueron extendidos para cubrir un total de 700 pies de largo. Actualmente se extienden a lo largo de todo el segmento de costa del BC hasta el puente de Boca de Cangrejos. Los revestimientos son contruidos en hormigón o bloques de piedra, y son colocadas superpuestas

entre sí, las más grandes en el tope para proveer un aspecto más natural y mejor permeabilidad. El objetivo es absorber la energía de oleajes menores, aunque pueden dejar pasar agua y sedimentos. El efecto de esta técnica provoca que el oleaje rompa contra la estructura y arrastre o transporte los sedimentos en dirección hacia el mar, lo que incurre en la pérdida de sedimentos y por ende en la pérdida de playa. Según los hallazgos del análisis de las fotografías aéreas, es evidente la ineffectividad de dicha técnica, pues específicamente el área donde fueron instalados es una en las que mayor erosión ha ocurrido, además en el año 1981 se hizo necesario la extensión de los revestimientos para estabilizar la zona bajo la carretera PR- 187 (Apéndice 2).

- Boca de Cangrejos: técnica de estabilización fuerte perpendicular a la costa, espigones. Instalados en el año 1954, estos se extendieron alrededor de 600 yardas (1,800 pies) desde el puente hacia el océano. Los espigones mantienen las entradas de las marinas, la profundidad del canal y son una barrera física. Además limitan el flujo en el canal y bloquean el transporte de sedimentos, minimizando así la necesidad de dragado. Según los hallazgos del análisis de las fotografías aéreas, en años posteriores a la instalación de los espigones la erosión al oeste fue mayor. Podemos concluir que se debió al efecto de la barrera causada, que alteró el patrón del flujo de sedimentos aguas abajo, provocando erosión al oeste. Esto a su vez hizo necesario la extensión de los revestimientos al oeste de la zona adyacente a los espigones (Apéndice 3).

Los métodos empleados en nuestra zona de estudio proveyeron un alivio temporero, pero no fueron efectivos en el control de la erosión y en la prevención de daños a la carretera PR-187 y por consiguiente a la propiedad aledaña a la zona.

Recomendar estrategias o técnicas para el control de erosión para el área bajo estudio.

Luego de la revisión de literatura, el análisis físico-espacial, el análisis de la efectividad de las técnicas de manejo aplicadas y de los estudios de casos en y fuera de Puerto Rico, discutiremos los hallazgos observados a partir de las fotografías tomadas periódicamente en diferentes condiciones del mar en la zona de estudio y haremos unas recomendaciones para promover la conservación de la zona de estudio.

Durante nuestras visitas periódicas a la zona de estudio, pudimos evidenciar los efectos directos del oleaje en diferentes condiciones del mar. Obtuvimos fotos en eventos de marejadas, antes, durante y después del episodio, específicamente en la zona donde se ubican los revestimientos a través de la carretera PR-187. Durante los días 27-29 de diciembre del año 2009 y los días 11-12 de febrero del año 2010, evidenciamos episodios de marejadas, que trajeron consigo olas rompientes de aproximadamente 15-25 pies en toda la costa norte de la isla. En las todas las ocasiones, observamos olas de gran altura, que en algunos casos sobrepasaban la zona de los revestimientos; nos salpicaba el agua desde la zona donde nos encontrábamos tomando las fotografías y cuando las olas rompían arrastraban aguas adentro gran parte de la arena y las rocas de menor tamaño del revestimiento. En términos de la cantidad de arena en la orilla, no pudimos evidenciar este hallazgo, debido a que en la zona que tomamos las fotografías no hay espacio de costa, el mismo está ocupado por los revestimientos. Lo que si observamos fue agua acumulada en el área frente al parquecito y áreas del revestimiento que están deslizándose o socavando (Apéndices 4 al 8).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos luego del análisis físico-espacial, el análisis de la efectividad de las técnicas de mitigación aplicadas y el análisis de las fotografías periódicas en diferentes condiciones del mar en la zona de estudio, llegamos a unas conclusiones y desarrollamos unas recomendaciones.

Conclusiones

Mediante el análisis físico-espacial, evidenciamos el problema de erosión que presenta nuestra zona de estudio. Los hallazgos revelaron que en el período de estudio de 71 años, del 1936 al 2007 la tasa de erosión media de la zona fue de -7.2 metros al año (Tabla 1), lo que representa una erosión severa de acuerdo al modelo de las categorías del cambio en la línea de la costa del USCOE. En términos del área de la playa observamos una acreción en la parte central de la zona, con una variación total de 51028.2 m². Además la zona presentó áreas de erosión y acreción, las áreas sometidas a erosión fueron los tramos 1, 3, 5 y 6, mientras que los tramos 2 y 4 presentaron acreción (Figura 4 y Tabla 4).

Atribuimos dicha erosión a las diferentes alteraciones llevadas a cabo en la zona, como por ejemplo: la remoción de humedales para la construcción del AILMM y CYC; la remoción de dunas de arena a lo largo del litoral costero; los dragados y rellenos en la Laguna Torrecilla y a la aplicación de técnicas fuertes de mitigación para el control de la erosión. Estos eventos junto a los de carácter natural como el oleaje, los fenómenos atmosféricos, las corrientes entre otros, provocaron la alteración en la dinámica de la corriente del litoral y afectaron el ciclo de migración estacional de la

playa. Esto causó un desequilibrio o ausencia en el aporte de sedimentos y pérdidas de los ya existentes, provocando así, la erosión en la zona.

El extremo oeste de nuestra zona de estudio, presentó evidencia de épocas de erosión y acreción durante todo el período del estudio. Si comparamos las fotografías del año 1936 y 2007 (Figuras 5 y 11), observamos que en el extremo oeste, se perdió una gran parte del espacio de playa en la zona entre Punta El Medio y Casa Cuba, donde están ubicados los revestimientos, los rompeolas de rocas y escombros y los gaviones (Apéndice 1).

En el extremo este observamos una erosión constante y en aumento durante todo el período del estudio. Esta erosión fue mayor en la zona de Boca de Cangrejos, donde están ubicados los espigones y los revestimientos de rocas. Se pudo evidenciar la exposición al oleaje de la carretera PR-187 y el puente cuya distancia de la línea de la costa en el año 1936 era de 76.45 metros y para el año 2007 fue de 27 metros.

Por otro lado en el extremo central de la zona, la erosión fue menor y pudimos evidenciar una acreción en la playa. Debido al bloqueo y desviación del transporte de sedimentos, provocado por las estrategias de estabilización fuertes y los eventos mencionados anteriormente, el espacio de la playa en esta porción central, aumentó en esa área. En otras palabras, nuestra zona de estudio ha estado perdiendo longitud (más pequeña) y ganando en área (más ancha en su porción central).

Podemos concluir, que las técnicas de mitigación aplicadas a través de los 71 años comprendidos en este estudio, han probado ser ineficientes, de corta duración, han carecido de un plan de manejo adecuado que permita el seguimiento de las mismas y han sido las responsables del bloqueo y desviación del aporte de sedimentos. Todo lo expuesto anteriormente, son los causales de la erosión severa que sufre nuestra zona de estudio.

Recomendaciones

Nos parece imperante que el gobierno municipal, las entidades gubernamentales y no gubernamentales y la comunidad coordinen esfuerzos conjuntos para manejar, conservar y proteger la zona del litoral costero analizado en este estudio. Para poder alcanzar esta meta, es necesario que se hagan cumplir las legislaciones aplicables a la zona costera, el seguimiento del plan de conservación y manejo seleccionado, la implementación de un MIC y que el futuro desarrollo de ésta área respete las zonificaciones y el deslinde de la zona marítimo-terrestre, de forma tal que se enmarque en las proyecciones establecidas por los expertos en el cambio climático y a futuras situaciones de riesgo en la costa, además recomendamos la implementación de la técnica de relocalización. Como sociedad debemos delinear los planes de conservación y manejo que nos permitan cumplir con las metas del desarrollo sustentable.

Coincidimos con Posada & Henao (2008) y debemos tomar en consideración el concepto de resiliencia costera al momento de llevar a cabo planes de manejo, conservación y planificación de las áreas costaneras. El concepto resiliencia costera se define como: “la habilidad inherente del sistema costero para acomodarse, mientras mantiene sus funciones a largo plazo, a cambios inducidos por el aumento en el nivel del mar, eventos extremos e impactos humanos ocasionales” (Posada & Henao 2008, p.79). La resiliencia debe ser incrementada en la manera que sea posible, utilizando medidas de manejo y conservación que respondan a la estabilidad de la línea de la costa, además va a depender del tipo de costa y debe apuntar a la restauración del balance sedimentario. Este balance garantizará la disponibilidad requerida y mantendrá el equilibrio en la playa. Para el logro de la misma, se han de identificar las fuentes de sedimentos, la redistribución o transporte de los mismos y las pérdidas debido a eventos naturales o antropogénicos (Tabla 4).

Previo a la ejecución de un programa de manejo y conservación, es imperante que se disponga de una información detallada de la zona a ser manejada para lograr una adecuada mitigación de la erosión costera. El problema de erosión debe estar claramente planteado y debe incluir un análisis completo de los siguientes requisitos: los antecedentes del problema de erosión; las técnicas de mitigación existentes; la efectividad e impactos ambientales causados por la técnicas de mitigación aplicadas; una caracterización geográfica de la zona; la identificación de amenazas naturales; la identificación de la fuente de sedimentos; el análisis del aporte de sedimentos; el análisis histórico del cambio o variación en la línea de la costa; perfiles de playa antes, durante y después de la aplicación de técnicas de mitigación; perfiles batimétricos; muestreo de sedimentos; mediciones de la corriente de deriva litoral; cálculos del transporte sedimentario y registros del aumento en el nivel del mar, entre algunos factores importantes.

Tomando en consideración la resiliencia costera, la aplicación y ejecución de un MIC y los requisitos necesarios previos al manejo, recomendamos lo siguiente:

- Monitoreo constante de la playa y la costa utilizando técnicas como: el levantamiento de perfiles de playa. La información recopilada en dichos perfiles proveerá a las agencias concernientes, datos reales de los cambios y del impacto que se han producido a lo largo de los años.
- La relocalización que consiste en mover las edificaciones a una zona segura detrás de la línea de la costa.
- La planificación de futuros desarrollos a una distancia segura detrás de la playa. Esto evitará la necesidad de la implementación de medidas para el control de la

erosión que al final resultan ser costosas, temporeras, inefectivas y en muchas ocasiones agravan el problema de la erosión.

- Que el Plan de Ordenamiento Territorial del MAC contemple planes de manejo, conservación y monitoreo para atender el problema de erosión costera que existe en nuestra área de investigación. El POT en la página 31, solo menciona que el sector investigado en este estudio padece de erosión severa y que la misma ha ido acelerando debido a las edificaciones realizadas en la línea de la costa y a la pérdida de arrecifes de coral y bancos de arena al norte de Boca de Cangrejos.
- La aplicación de técnicas estructurales de mitigación suaves, que devuelvan a la zona los sistemas naturales que se han perdido a través de los años debido a alteraciones naturales y antropogénicas:
 - ✓ Arrecifes artificiales: requiere un análisis de la zona para estudiar posibles áreas donde puedan ser colocados. Este tipo de estructura provee defensa costera debido a que absorben la energía proveniente de las olas, además de proporcionar un hábitat natural para la biodiversidad de la zona.
 - ✓ Regeneración de dunas: requiere un monitoreo de la zona para escoger el método de regeneración adecuado. Podría aplicarse la técnica de verjas de acumulación de arena que consiste en barras porosas que reducen la velocidad del viento y permiten la acumulación de los granos de arena.
 - ✓ Siembra de manglares o vegetación característica de la región costera del Caribe: analizar la zona y hacer estudios de áreas donde podrían ser sembrados. Los manglares tienen funciones y valores muy importantes,

entre las cuales podríamos destacar: que controlan la erosión y reducen el efecto de las inundaciones.

Limitaciones

Algunos factores limitantes durante la revisión de literatura fueron la dispersión de la información y en algunos casos información incompleta. Debido a que nuestra investigación estuvo basada en el análisis físico-espacial de fotografías aéreas, debemos indicar que el trazado de la línea de la costa posee cierto grado de incertidumbre en su localización y va a depender de la calidad del revelado, la escala y el estado en que se encuentre la foto. Adicional a esto se conoce que las fotos fueron tomadas aproximadamente en la misma época del año, pero no hay seguridad de que hayan sido tomadas a la misma hora. La hora es un factor que hemos de considerar, debido a que los efectos de las corrientes, el oleaje y las mareas pueden cambiar con esta. Otro factor importante es la estabilidad del vuelo en el cual fueron tomadas las fotografías.

LITERATURA CITADA

- Alonso, I., Cabrera, L., Jiménez, J., Valdemoro, H. & Sánchez, I. (2007). *Aplicación de la fotogrametría a estudios de erosión costera*. Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mar de Plata, Argentina.
- Barreto, M. (1997). *Shoreline changes in Puerto Rico (1936-1993)*. (Doctoral dissertation). Available from ProQuest Dissertations and Theses database. (UMI No. 9806857).
- Beatley, T., Brower, D., & Scwab, A. (2002). *An introduction to coastal zone management* (p. 15). Island Press, Washington.
- Bush, D., Webb, R., González, J., Hyman, L., & Neal, W. (1995). *Living with the Puerto Rico shore*. Editorial de la Universidad de Puerto Rico, San Juan.
- Central Intelligence Agency. (2009). *The world factbook*, Puerto Rico., <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/rq.html>
- Chaparro, R. (2007). Mensaje del director. *Marejada v. 1 no. 1 p. 2* <http://www.seagrantpr.org/catalog/files/marejada/1.pdf>
- Cicin-Sain, B. & Knetch, R. (1998). *Integrated coastal and ocean management: concepts and practices*. Island Press.
- Clark, J. (1996). *Coastal zone management - handbook*. Lewis Publishers, Washington, DC, United States of America.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1968). *Ley de arena, grava y piedra*. Ley Núm. 132 de 25 de junio de 1968.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1972). *Ley orgánica del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales*. Ley 23 de 20 de junio de 1972.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1976). *Ley para la conservación, el desarrollo y uso de los recursos de agua de Puerto Rico*. Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976.

- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1978). Programa de manejo de la zona costanera.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1984). *Las Playas*. Hoja informativa del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. San Juan, Puerto Rico. Auspiciado por el Programa de Manejo Zona Costanera.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1985). *Zona marítimo terrestre*. Hoja informativa del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. San Juan, Puerto Rico. Auspiciado por el Programa de Manejo Zona Costanera.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1988). *Rasgos costaneros de Puerto Rico*. Hoja informativa del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. San Juan, Puerto Rico. Auspiciado por el Programa de Manejo Zona Costanera.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1992). *Reglamento para el aprovechamiento, vigilancia, conservación y administración de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo ésta y la zona marítimo-terrestre*. Reglamento de Núm. 4860.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (1999). *Nueva ley de vida silvestre de Puerto Rico*. Ley 241 del 15 de agosto de 1999.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2004a). *Reglamento para regir las especies vulnerables y en peligro de extinción en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico*. Reglamento Núm. 6766.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2004b). *Reglamento para regir la conservación y el manejo de las especies de vida silvestre, las especies exóticas y la caza*. Reglamento 6765.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2008). *Programa de Manejo de la Zona Costanera*. Documento de revisión y actualización.
- De Portu, A. (2007). Frentes urbanos costeros. *Programa de manejo de la zona costanera: Los primeros 25 años*. Edición especial. p. 3-4.
- Díaz, E. (2007). Retos y riesgos en el manejo de áreas costeras. *Programa de Manejo de la Zona Costanera: Los Primeros 25 años*. Edición especial. pp. 26-29.

- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1930). *Código Civil de Puerto Rico*. Artículo 254.
- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1952). *Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico*. 6 de febrero de 1952.
- Farrell, A., & Hart, M. (1998). What does sustainability really mean? The search for meaningful indicators. *Environment*, 40(9): 4-7, pp. 26-31.
- Frederique, E. (2004). Turismo, medio ambiente y áreas naturales protegidas en Puerto Rico: perspectivas y retos para alcanzar el desarrollo sostenible en este sector en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico, *Foro Internacional "Tourisme Et Développement Durable" Schoelcher*. Recuperado de http://coalicionventanasverraco.org/files/Turismo_Medio_Ambiente_y_Areas_Naturales_en_Puerto_Rico.pdf.
- Gómez, J. (2003). *Efecto de las estructuras construidas por el hombre sobre tramos de la línea de la costa al norte, oeste y sur de Puerto Rico*. (Master's thesis). Available from ProQuest Dissertations and Theses database. (UMI No. 1421994).
- Gobierno Municipal Autónomo de Carolina. (2005). *Declaración de impacto ambiental preliminar de la revisión integral del plan territorial DIA-E*.
- Grafals, R. (2003). *Cambios geomórficos y sus implicaciones en las guías para un desarrollo sostenible en Cayo Caribe, Guayama, Puerto Rico (1936-2003)* (Master's dissertation, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras). Recuperado de http://ctp.uprm.edu/jobos/investigacion/proyectos/Roxana_Grafals.pdf.
- Jaramillo, C. (2000). Gestión y conservación de la fachada litoral en el ámbito del ordenamiento integrado en zonas costeras. *Ingeniería y Competitividad*, 2(2), 7-17.
- Jiménez, L. (2000). *Desarrollo sostenible: transición hacia la coevolución global*. Ediciones Pirámide, España, 296 p.
- Junta de Calidad Ambiental. (2004). *Ley Sobre Política Pública Ambiental*. Ley Núm. 416 de 2004.

- Junta de Planificación de Puerto Rico (1983). *Reglamento de zonificación de la zona costanera y de accesos a las playas y costas de Puerto Rico*. Reglamento de Planificación Núm. 17.
- Junta de Planificación de Puerto Rico. (1992). *Plan de Manejo del Área de Planificación Especial de Piñones*.
- Junta de Planificación de Puerto Rico. (2004). *Ley para el plan de uso de terrenos del Estado Libre Asociado de Puerto Rico*. Ley Núm. 550 de 3 de octubre de 2004.
- Junta de Planificación de Puerto Rico. (2005). *Reglamento sobre áreas especiales de riesgo a inundación*. Reglamento de Planificación Núm. 13.
- Junta de Calidad Ambiental (1997). *Reglamento para el control de la erosión y prevención de la sedimentación*.
- Junta de Planificación de Puerto Rico. (2000). *Reglamento de zonificación de Puerto Rico*. Reglamento de Planificación Núm. 4.
- Kana, T. (2006). Myrtle beach a success story?. *Business & Economic Review*, pp.19-22.
- Liou, J., Chang, H., Chen, W., & Liaw, S. (2009). Beach erosion and preventive countermeasure at Kangnan coast, Taiwan. *Journal of Coastal Research*, 25(2), pp. 405-416.
- Ley de Aguas Española. 3 de agosto de 1866.
- Ley sobre Política Pública de Desarrollo Sostenible. Ley Núm. 267 de 10 de septiembre de 2004.
- Ley de Puertos Española. 5 de febrero de 1886.
- López, L. (2006). Diferentes alternativas de rehabilitación de la zona más erosionada de la playa de Varadero, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 27(1), pp. 42-49.
- Mercado, A. (2008, febrero 1). SOS desaparecen las playas. *El Nuevo Día, Edición Especial*. p. desconocida.

- Morelock, J. (1978). *Shoreline of Puerto Rico*. Coastal Zone Management Program, Department of Natural Resources of Puerto Rico.
- Morelock, J., Ramírez, W., & Barreto, M. (2002). *The world's coasts: online Puerto Rico*. <http://geology.uprm.edu/Morelock/wcpr.htm>.
- Mújica, F. (s.f.). *Huracanes y tormentas tropicales que han afectado a Puerto Rico*. Agencia Estatal para el Manejo de Emergencias y Administración de Desastres. http://www.gobierno.pr/NR/rdonlyres/49EA64D0-305B-4881-8B85-04B518004BD5/0/Ciclones_en_PR.pdf
- National Research Council. (1990). *Managing coastal erosion*. Washington, DC National Academy Press, 182p.
- Nieves, R. (2005). La playa como recurso de infraestructura verde: Perspectiva de la Compañía de Parques Nacionales. *Infraestructura verde y nuestros parques*. pp. 94-95.
- Oficina del Comisionado de Asuntos Municipales. (1991). *Ley de Municipios Autónomos*. Ley 81 del 30 de agosto de 1991.
- Ortiz, A. (2005). *La playa...valioso recurso natural Guía del educador*. Compañía de Turismo. San Juan, P.R.
- Ortiz, C. (2007). *Inventario de estructuras de estabilización en la línea de la costa: Punta Las Marías hasta Boca de Cangrejos*. Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. Programa de Manejo de la Zona Costanera, San Juan, P.R.
- Posada, B., & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. *Manejo de la erosión costera*. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta, pp. 79-96.
- Seguinot, J. (2000). Gestión ambiental y protección de áreas naturales costeras y marinas en los Estados Unidos de Norteamérica y Puerto Rico. *Revista Jurídica LexJuris de Puerto Rico*, 1 (1) <http://www.lexjuris.com/revista/opcion1/2000/leambientalseguinot.htm>
- Seguinot, J. & Méndez P. (2008). Gestión del litoral y política pública en Puerto Rico: Un diagnóstico. *Revista Jurídica LexJuris de Puerto Rico*, 13(2). Recuperado de <http://www.lexjuris.com/revista/opcion1/2008/Gestion%20litoral%20y%20politica.htm>

- Slomp, L. (1997). *Evaluation of shore protection measures applied to eroding beaches in Florida*. (Master's thesis). Available from ProQuest Dissertations and Theses database. (UMI No. 13867200).
- Soledispa, B., (2003). La acelerada erosión de la playa del balneario de Jambelí (varios métodos para su regeneración). *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 12(1), pp. 169-176.
- Taller sobre la erosión costera en la región de América Latina y el Caribe. (2008). *Informe de la Reunión*. <http://www.cco.gov.co/anterior/Taller%20erosion%20costera/cuarto%20dia/INFORME%20TALLER%20EROSION%20COSTERA.pdf>
- Tassara, D., & García, M. (2005). Erosión marina, vulnerabilidad e impactos antrópicos en el sudeste Bonaerense. *Tiempo y espacio*, 12(15), 113-126.
- Tiedeberg, J. (2005). *Pre-Installation study of Balneario de Carolina*. NuShore LLC.
- United Nations. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. <http://www.worldinbalance.net/pdf/1987-brundtland.pdf>.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1991). *Detailed project report Boca de Cangrejos, Puerto Rico, Isla Verde Beach*.
- Valeiras, E. (2007). Extracción de arena en el área de planificación especial de Isabela. *Programa de Manejo de la Zona Costanera: Los Primeros 25 años*. Edición especial. pp. 8-9.

TABLAS

Tabla 1.

Medida del cambio en la posición de la línea de la costa y tasa de erosión media.

Año	Medida de la línea de la costa (metros)	Tasa de erosión media (metros/año)
1936	3803.78	.00
1951	3667.18	-1.92
1962	3436.53	-3.24
1974	3402.33	-0.48
1983	3392.25	-0.14
1994	3332.28	-0.84
2007	3290.31	-0.59
Total	-513.47	-7.2

Tabla 2.

Cambios en el área de la playa, según fotos aéreas del 1936 al 2007.

Años	Cambios en área (m ²)
1936	124287.44
1951	67560.95
1962	120747.78
1974	84557.45
1983	98999.45
1994	131086.30
2007	175315.64
Total	51028.2

Tabla 3.

Variación de la superficie de la playa entre 1936-2007

Tramos	Comportamiento	Δ área (m ²)
1	Erosión	-9,355.05
2	Acreción	+80,449.93
3	Erosión	-39.17
4	Acreción	+578.6
5	Erosión	-20,801.39
6	Erosión	-22,329.05

Tabla 4.

Entradas y salidas de sedimentos a la zona litoral. (Tomado de Posada & Henao, 2008, modificado de Rangel, 2005)

Entradas	Salidas
Transporte fluvial	Transporte por deriva
Transporte por deriva	Transporte hacia la plataforma
Erosión de acantilados y playas	Transporte eólico
Depósitos biogénicos	Extracción de sedimentos
Transporte eólico	Rellenos antrópicos en zonas bajas cenagosas o intermareal
Transporte por mareas	Obras de protección costera (espigones, rompeolas etc.)
Transporte por olas de tormenta	Construcción de represas en ríos
Deforestación de cuencas	Reforestación de cuencas
Uso intensivo del suelo de la cuenca	

FIGURAS

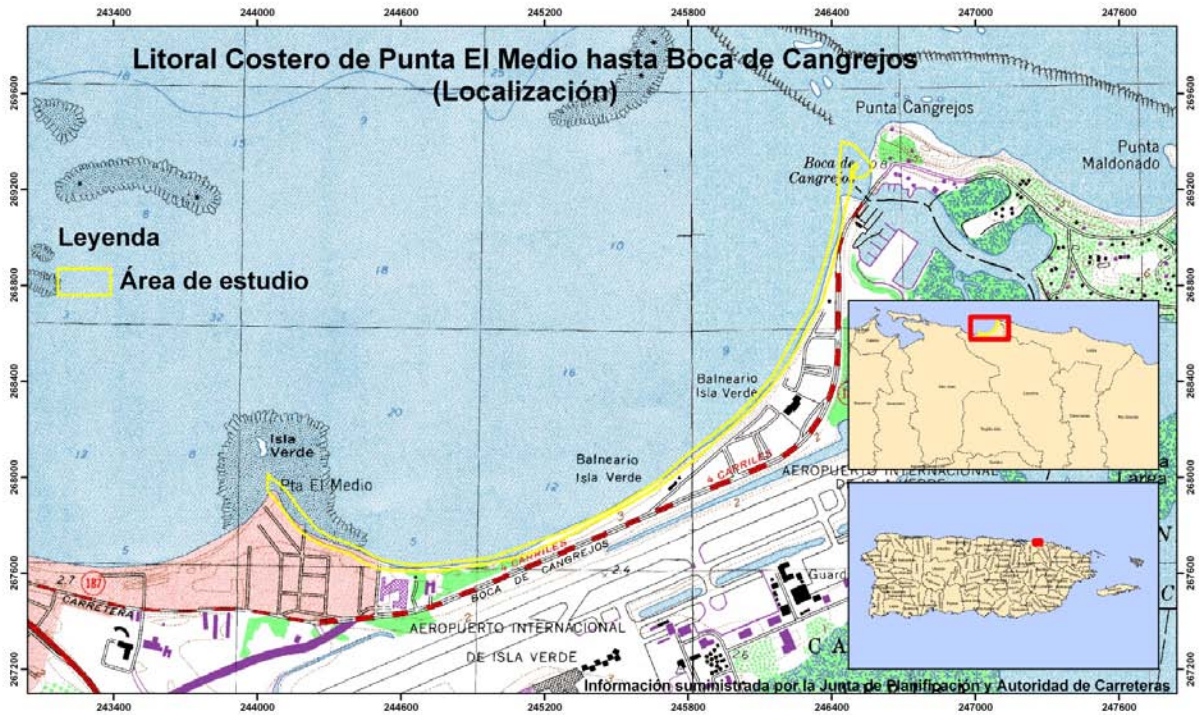


Figura 1. Área de estudio.

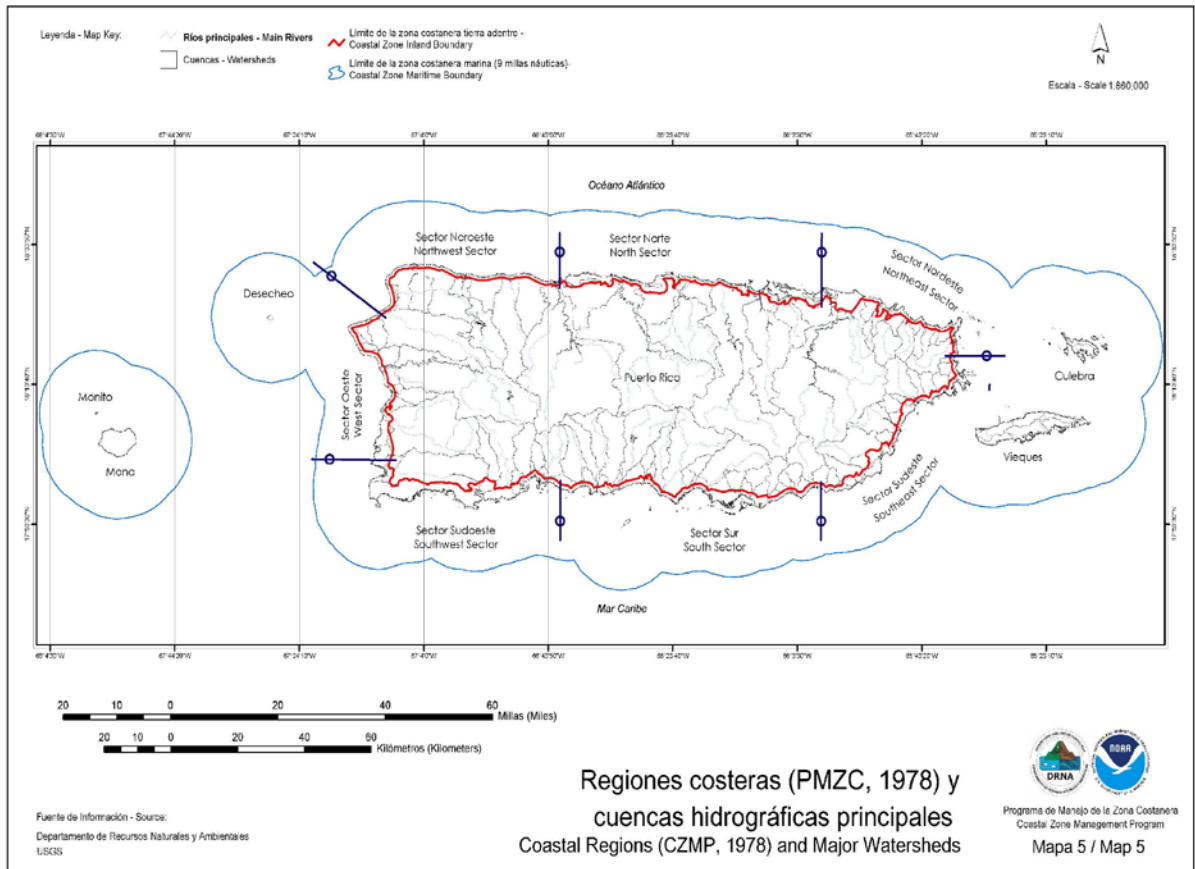


Figura 2. Regiones costeras de Puerto Rico. Obtenido del documento en revisión y actualización del Programa de Manejo de la Zona Costanera de Puerto Rico (2008).



Figura 3. Fotografía aérea del año 2007 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos mostrando los cambios en la línea de la costa del 1936-2007.



Figura 4. Fotografía aérea del año 2007 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos mostrando la variación de la superficie por tramos 1-6 del 1936-2007.

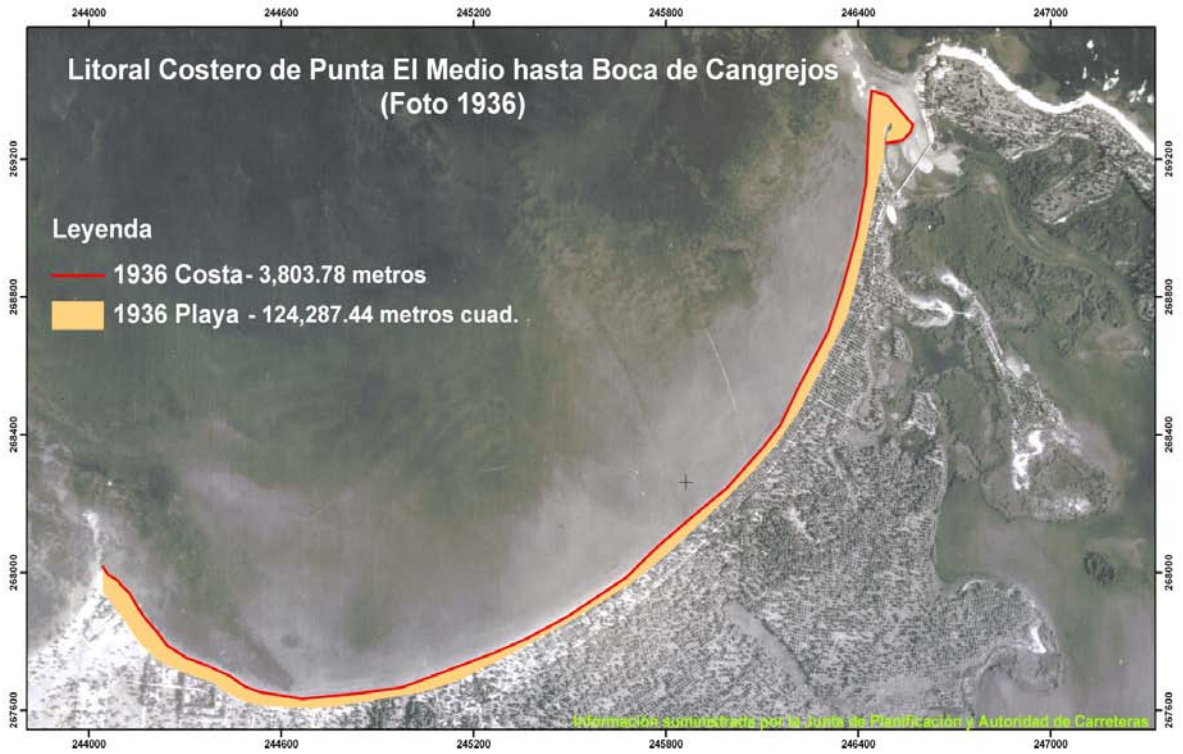


Figura 5. Fotografía aérea del año 1936 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.

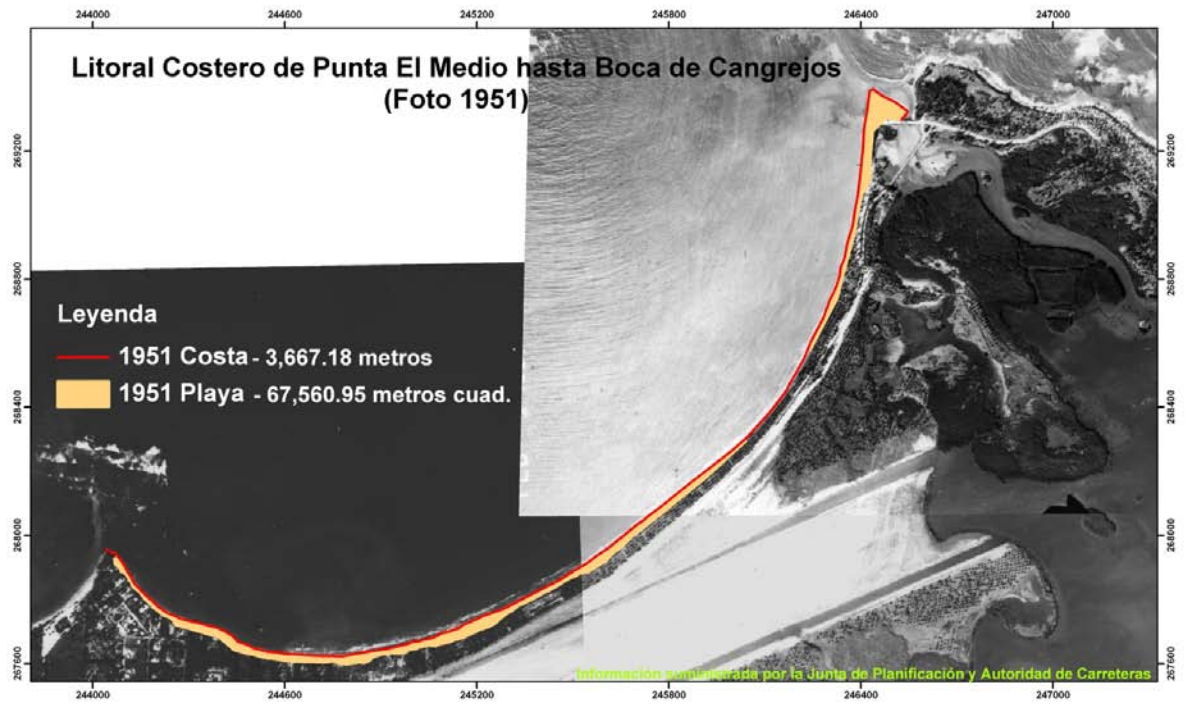


Figura 6. Fotografía aérea del año 1951 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.

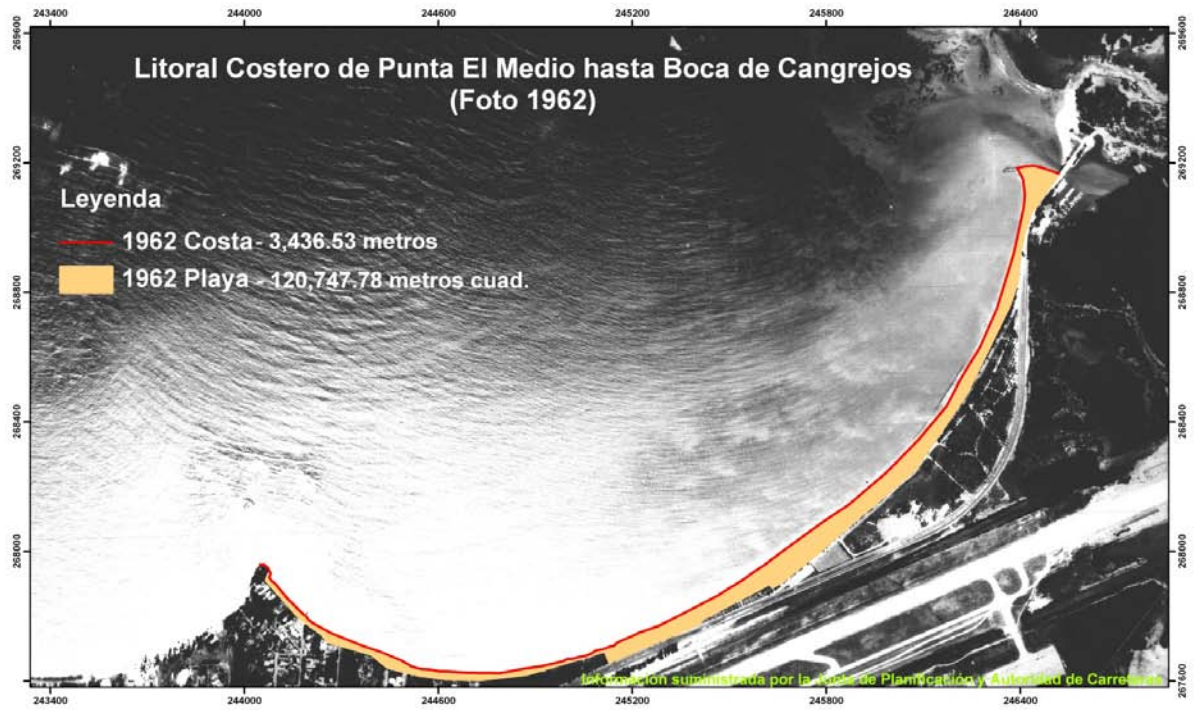


Figura 7. Fotografía aérea del año 1962 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.

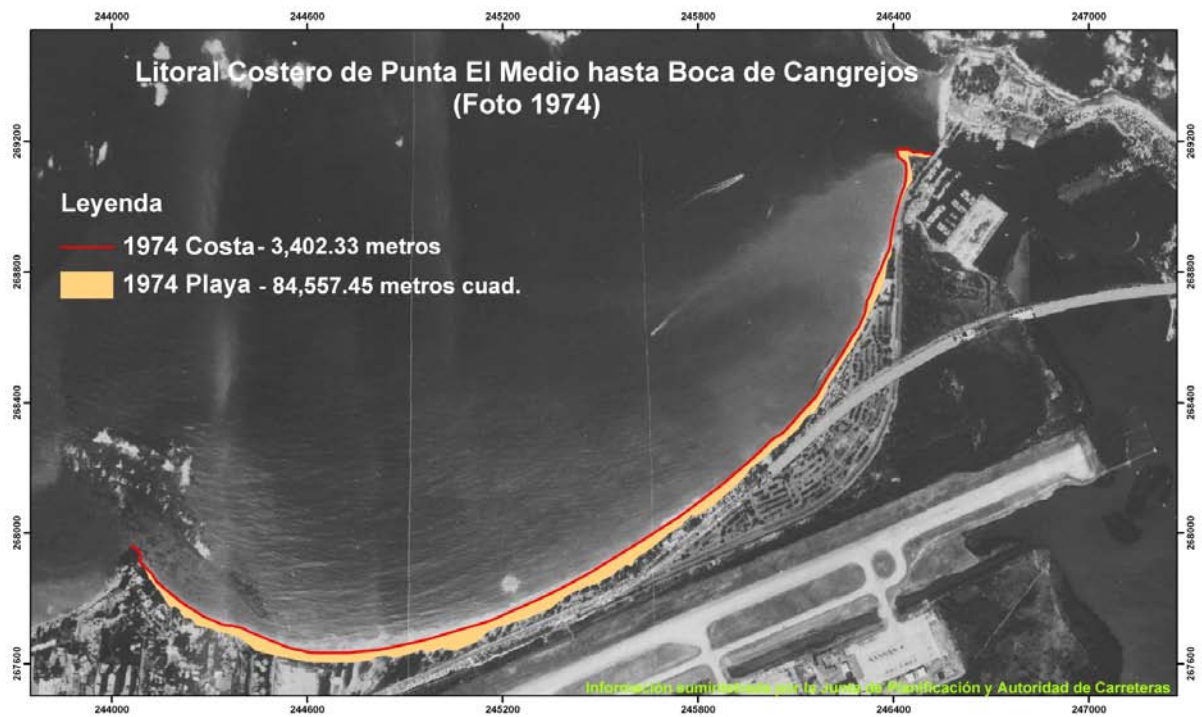


Figura 8. Fotografía aérea del año 1974 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.

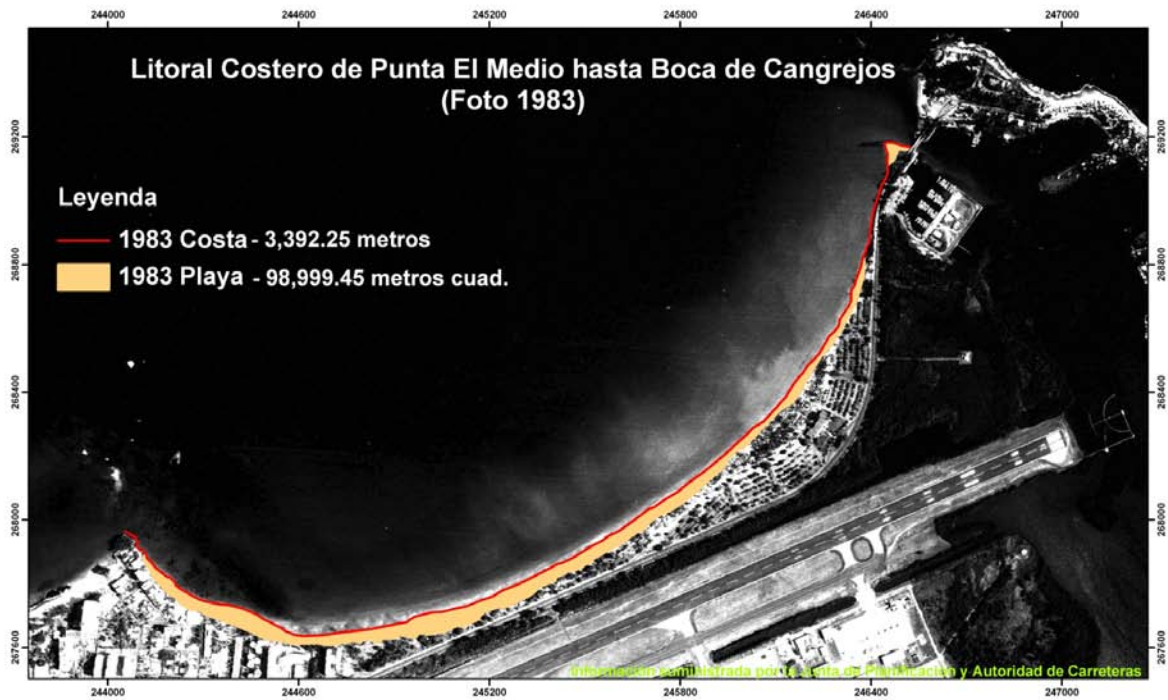


Figura 9. Fotografía aérea del año 1983 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.



Figura 10. Fotografía aérea del año 1994 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.



Figura 11. Fotografía aérea del año 2007 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos.

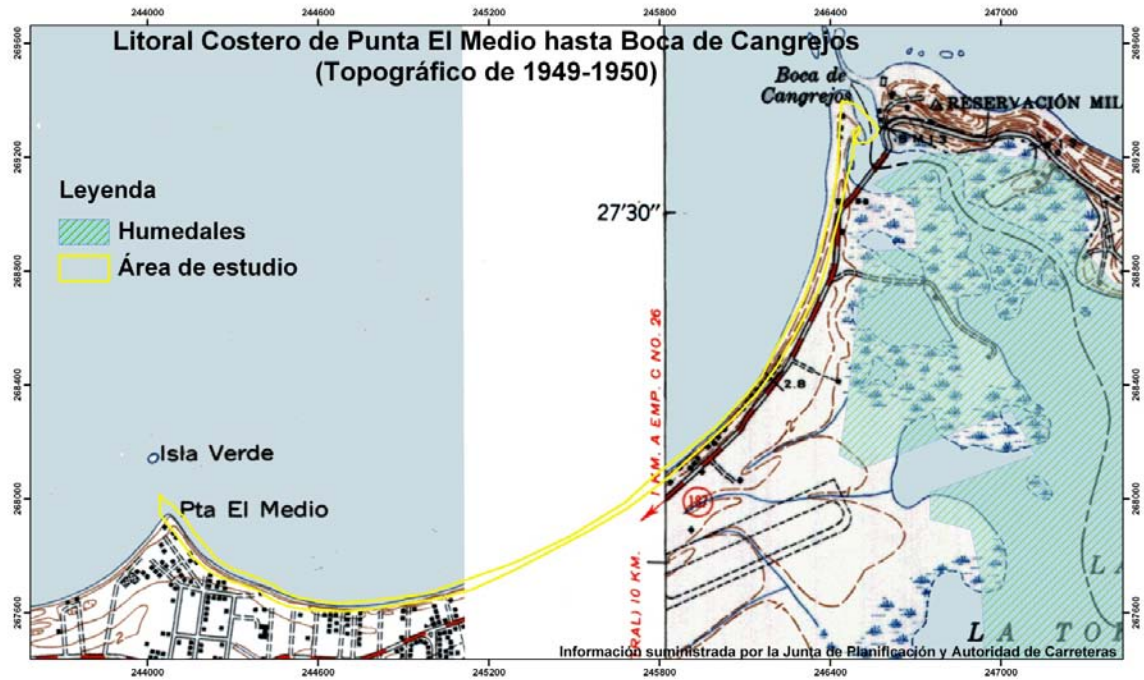


Figura 12. Cuadrángulo topográfico del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos 1940-1950.



Figura 13. Fotografía aérea del año 2007 del litoral costero entre Punta El Medio y Boca de Cangrejos, acercamiento a la técnica de estabilización suave “NuShore”.

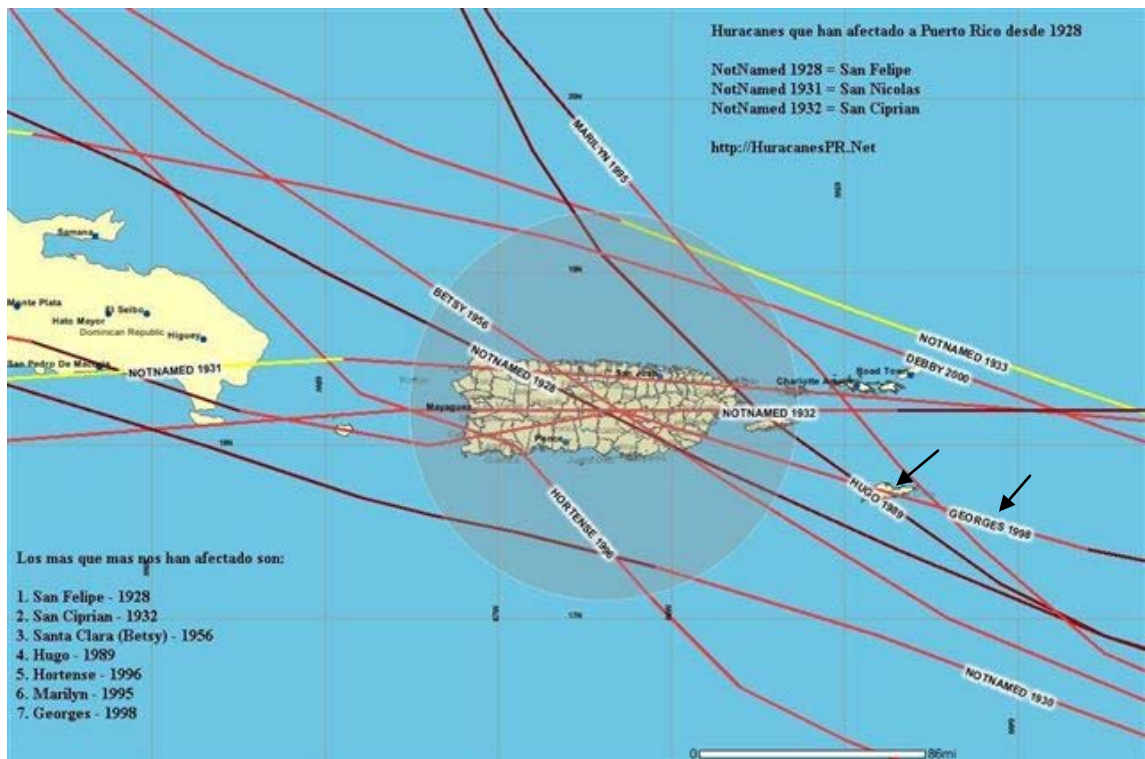


Figura 14. Trayectoria de huracanes que han afectado a Puerto Rico desde 1928. Obtenido de <http://www.flickr.com/photos/29967863@N00/388461526/sizes/o/>.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

Zona entre Punta El Medio y Casa Cuba

(Rompeolas, gaviones y revestimientos de rocas y escombros)











APÉNDICE 2
Zona de la carretera PR-187
(Revestimientos “riprap”)





APÉNDICE 3
Boca de Cangrejos
(Espigones “jetties”)



APÉNDICE 4

Evento de marejadas

Zona de la carretera PR-187 donde se ubican los revestimientos

11 de febrero de 2010

(antes del evento)



APÉNDICE 5

Evento de marejadas

Zona de la carretera PR-187 donde se ubican los revestimientos

12 de febrero de 2010

(durante el evento)





APÉNDICE 6

Evento de marejadas

Zona de la carretera PR-187 donde se ubican los revestimientos

14 de febrero de 2010

(después el evento)



APÉNDICE 7

Zona de la carretera PR-187 donde se ubican los revestimientos

Revestimientos socavados





APÉNDICE 8

**Zona de la carretera PR-187 donde se ubican los revestimientos
(oleaje que sobrepasa la línea de revestimientos)**



APÉNDICE 9
Balneario de Carolina
(técnica “NuShore”)



Julio 2007



Enero 2008