

MANIFIESTO DE PALMAS DEL MAR ¿QUÉ HACER SI EL MAR NO SE QUEDA QUIETO Y LAS COSTAS SIGUEN CAMBIANDO?

Ariel E. Lugo¹, Maritza Barreto Orta², Miguel Canals Silander³,
Ruperto Chaparro⁴, María Santos Corrada⁵, Ernesto Díaz⁶,
Juan G. González Lagoa⁷, Edwin A. Hernández Delgado⁸ y José Molinelli⁹.

¹ Instituto Internacional de Dasonomía Tropical, USDA Forest Service. 1201 calle Ceiba Jardín Botánico sur, Río Piedras, PR. 00926-1115.

² Escuela de Planificación de la Universidad de Puerto Rico, Río Piedras, PR.

³ Departamento de Ciencias de Ingeniería y Materiales y Departamento de Ciencias Marinas, Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez, Mayagüez PR.

⁴ Programa Sea Grant, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Mayagüez, PR. 00681-9000.

⁵ Escuela de Negocios y Empresarismo, Universidad Ana G. Méndez, Recinto de Gurabo, PR.

⁶ Programa del Manejo de la Zona Costanera, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, San Juan, PR.

⁷ Profesor Emérito de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Mayagüez, PR.

⁸ Centro Para la Ecología Tropical Aplicada y Conservación y Sociedad Ambiente Marino. Universidad de Puerto Rico, Río Piedras, PR.

⁹ Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Puerto Rico, Río Piedras, PR.

INTRODUCCIÓN

Palmas del Mar *Homeowners Association* auspició el Primer Simposio Sobre Erosión Costera durante los días 20 y 21 de enero del 2017. El objetivo del simposio era activar a las comunidades costeras para actuar en su protección ante el aumento en el nivel del mar, utilizando el conocimiento científico y adaptándolo a la experiencia mundial y a nuestras condiciones climáticas, ambientales, legales y económicas. Este artículo resume los puntos principales presentados durante el Simposio. La intención es compartir con otras comunidades costeras de Puerto Rico la información científica disponible y necesaria para entender la situación presente de las costas puer토리queñas. Con tal conocimiento las comunidades están en mejor posición para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación efectivas a su entorno costanero particular. Las ilustraciones y tablas utilizadas en este artículo provienen de distintas publicaciones

y las referencias están disponibles de los autores¹. Recomendamos *La Cartilla de la Zona Marítimo Terrestre* como documento complementario a este. La cartilla está disponible libre de costo en: <https://www.treeseearch.fs.fed.us/>. Al entrar a la página escriba *Acta Científica* en el encasillado marcado “title” y oprima el volúmen 18 cuando aparezca la lista de volúmenes de la revista.

El nivel del mar: pasado, presente y futuro

La historia geológica de Puerto Rico contiene momentos fascinantes desde sus comienzos en la costa oeste de Sur América y durante su paso hacia el Caribe por el istmo de Panamá antes de que éste desa-

¹ Playas-Maritza Barreto Orta, olas y oceanografía física-Miguel Canals Silander, zona costanera-Ruperto Chaparro o Ernesto Díaz, economía y empresarismo-María Santos Corrada, biología marina-Juan G. González Lagoa, arrecifes de coral-Edwin A. Hernández Delgado, geomorfología-José Molinelli, ecología-Ariel E. Lugo.

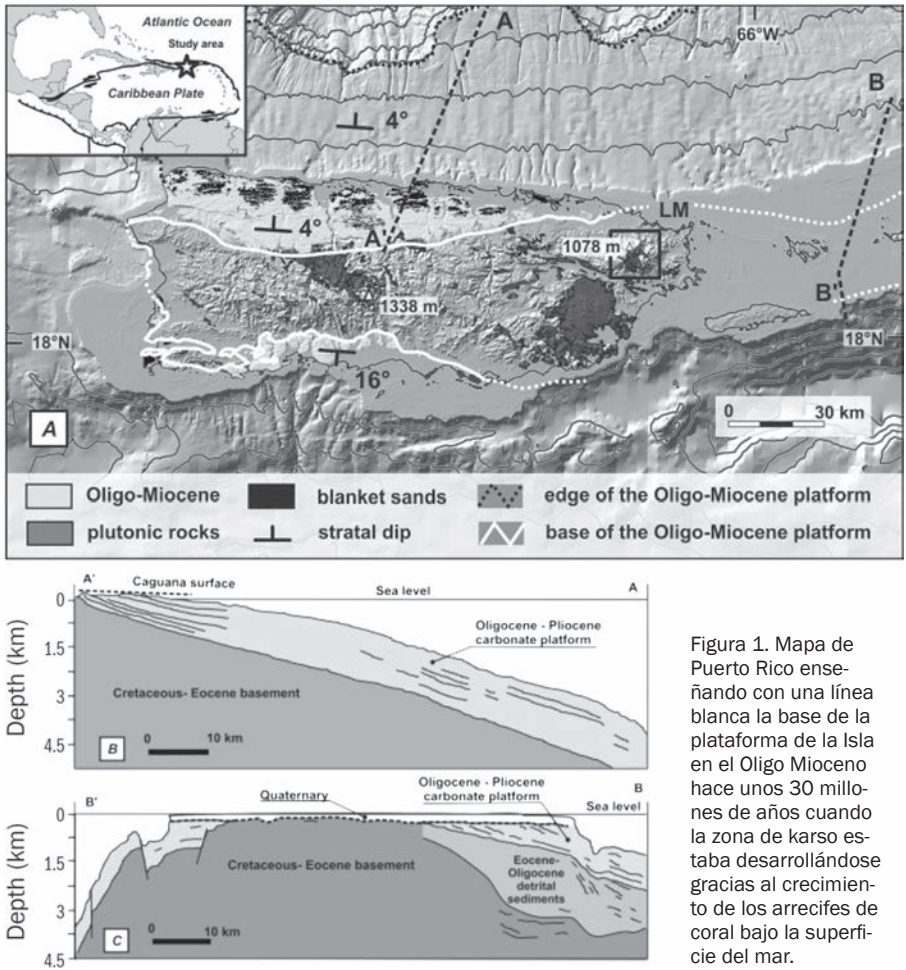


Figura 1. Mapa de Puerto Rico enseñando con una línea blanca la base de la plataforma de la Isla en el Oligo Mioceno hace unos 30 millones de años cuando la zona de karso estaba desarrollándose gracias al crecimiento de los arrecifes de coral bajo la superficie del mar.

pareciere permitiendo la conexión entre Norte y Sur América. La historia que enfatizamos aquí comienza entre 30 y 23 millones de años antes del presente cuando aproximadamente el 27 por ciento del área del Puerto Rico de hoy estaba sumergida bajo el mar. La isla era más pequeña y más estrecha que hoy (Fig. 1). En ese momento, las Montañas de Luquillo donde está El Yunque, era una de varias islas (Fig. 2) formadas por los picos más altos de la Cordillera Central.

Durante ese periodo cuando parte de Puerto Rico estuvo sumergido, arrecifes de coral crecían alrededor de la Isla. Con la retirada del mar, esos arrecifes de coral se expusieron a la atmósfera y comenzó la erosión que le dio forma a los mogotes, sumideros, cuevas y valles que hoy observamos en la zona del karso (Lugo et al. 2001).

Cuando el mar se retiró, su nivel se redujo tanto que se podía caminar de la costa este de Puerto Rico a las islas de Culebra y Vieques. Entonces, la Isla era más larga de oeste a este, pero más estrecha de norte a sur de lo que es hoy. Durante los últimos 8,000 a 12,00 años, el nivel del mar ha aumentado sobre 14 metros (Fig. 3). La velocidad en el aumento del nivel del mar inicialmente fue rápida (5.2 mm/año) y luego se redujo a 0.9 mm/año (Fig. 4). Estudios en los manglares caribeños demuestran que estos han mantenido su posición en la costa a pesar del incremento en el nivel

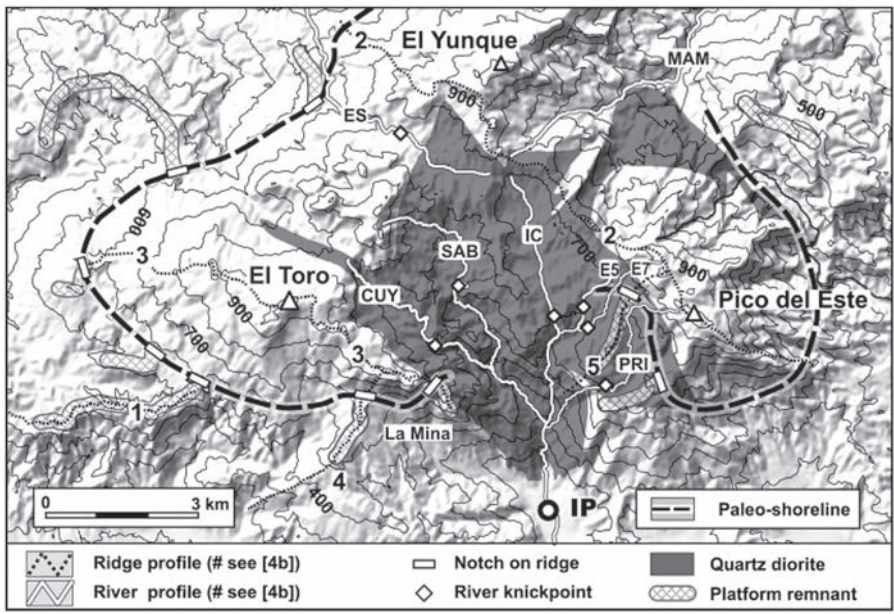


Figura 2. Mapa topográfico de las Montañas de Luquillo ilustrando con la línea entrecortada gruesa el nivel del mar alrededor de las Montañas hace unos 30 millones de años. Las Montañas de Luquillo eran una isla en ese momento.

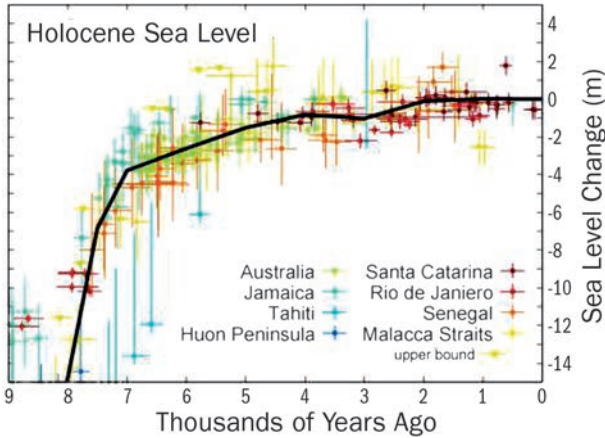


Figura 3. Aumento en el nivel del mar asociado al Holoceno. El Holoceno es la época geológica de los glaciales. Con la formación de glaciales el mar bajó en nivel y luego aumentó cuando los glaciales se derritieron. El Holoceno duró unos 10,000 a 12,000 años. Los datos en esta gráfica son de los últimos 8,000 años y representan medidas en todo el planeta.

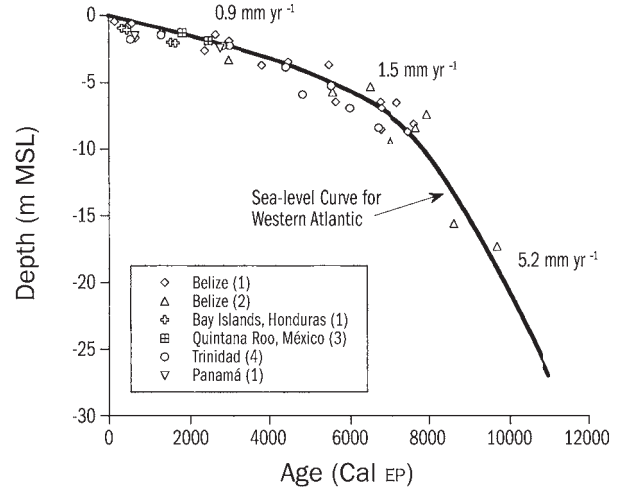


Figura 4. Posición del piso de los manglares del Caribe en relación con el nivel del mar durante los pasados 11,000 años (McKee, Cahoon y Feller 2007). El cero (0) corresponde al presente.

del mar. Para mantener su posición relativo al nivel del mar, los manglares producen y acumulan materia orgánica y atrapan sedimentos que los eleva a igual velocidad que el aumento en el nivel del mar.

Entre el 1956 y el presente, el nivel del mar continúa aumentando y recientemente se observó una aceleración en la velocidad de aumento (Fig. 5). Medidas en La Parguera y la Bahía de San Juan confirman un patrón de aumento en el nivel del mar en ambas costas de Puerto Rico. El aumento en el nivel del mar no solo ocurre en Puerto Rico, es un fenómeno global cuya tasa de aumento entre el 1993 y 2010 fue de 3.26 mm/año. Recientemente se han medido tasas de aumento en el nivel del mar de hasta 10 mm/año.

El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América proyectó para Puerto Rico un aumento en el nivel del mar de 3 metros para 2150 (Fig. 6). Sin embargo, con la aceleración reciente en la velocidad de subida del mar, algunos anticipan un aumento más rápido de 3.75 metros para el 2100. El profesor de oceanografía física del Recinto Universitario de

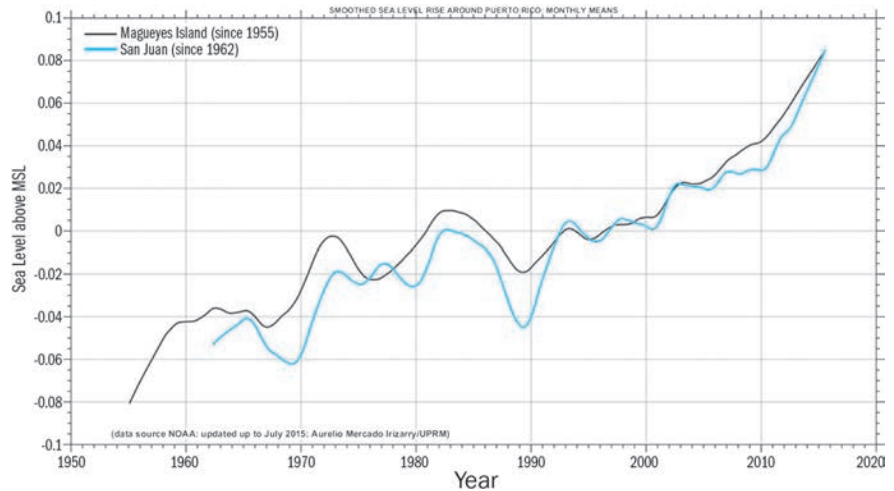


Figura 5. Datos empíricos del nivel del mar en La Parguera y la Bahía de San Juan tomados desde el 1956 al presente. La data fue analizada por el profesor Aurelio Mercado Irizarry del Recinto Universitario de Mayagüez.

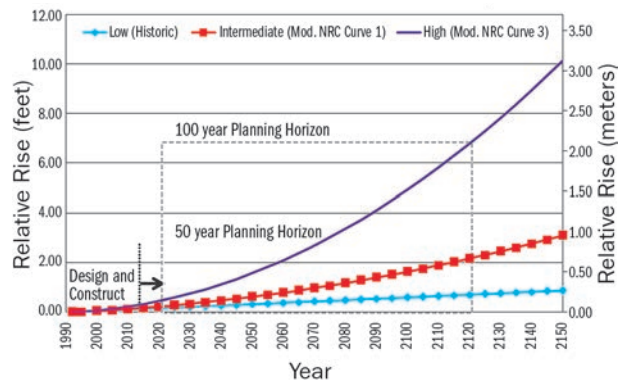


Figura 6. Predicciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América sobre el futuro nivel del mar en San Juan, Puerto Rico. Note el contraste entre la tendencia histórica (línea azul) y las proyecciones moderadas y altas. La caja que cubre 100 años debe servir de guía para diseños de construcción de infraestructura en la zona costanera.

Tabla 1. Predicciones sobre futuros niveles promedio del mar en metros (m) alrededor de Puerto Rico (basado en el análisis del profesor Aurelio Mercado Irizarry del Recinto Universitario de Mayagüez). Las predicciones son para el año 2100 y todas están basadas en premisas y modelos con rigurosidad científica.

Escenario	Rango en el Aumento de Nivel del Mar
Bajo (0.30 m)	0.33-0.36
Intermedio bajo (0.5 m)	0.45-0.502
Intermedio (1.0 m)	1.0-1.1
Intermedio alto (1.5 m)	1.95-2.1
Alto (2.0 m)	2.8-3.0
Extremo (2.5 m)	3.5-3.75

Mayagüez, Aurelio Mercado Irizarry, evaluó todas las predicciones recientes sobre el futuro cambio en el nivel del mar (Tabla 1).

Los estimados intermedios de su análisis predicen un aumento en el nivel del mar en Puerto Rico de 1.0 a 1.1 metros para el 2100. Debemos entender que hay predicciones que llegan a 3.75 metros. Todas las posibilidades (máximas y mínimas) de los distintos modelos que se utilizan para anticipar el futuro nivel del mar están en la Fig. 7. Comenta el profesor Mercado Iriza-

rry que todas estas proyecciones son dinámicas y no podemos aferrarnos a una u otra ya que la situación cambia continuamente. Hay que estar informado y preparado para lo peor, celebrando si no ocurre.

¿Por qué es tan inquieto el mar?

El nivel del mar siempre esta cambiando debido a múltiples fuerzas que lo impulsan ya sea para aumentar como para disminuir su nivel. El resultado es que el nivel del mar nunca permanece estático. Seis factores que afectan el nivel del mar son:

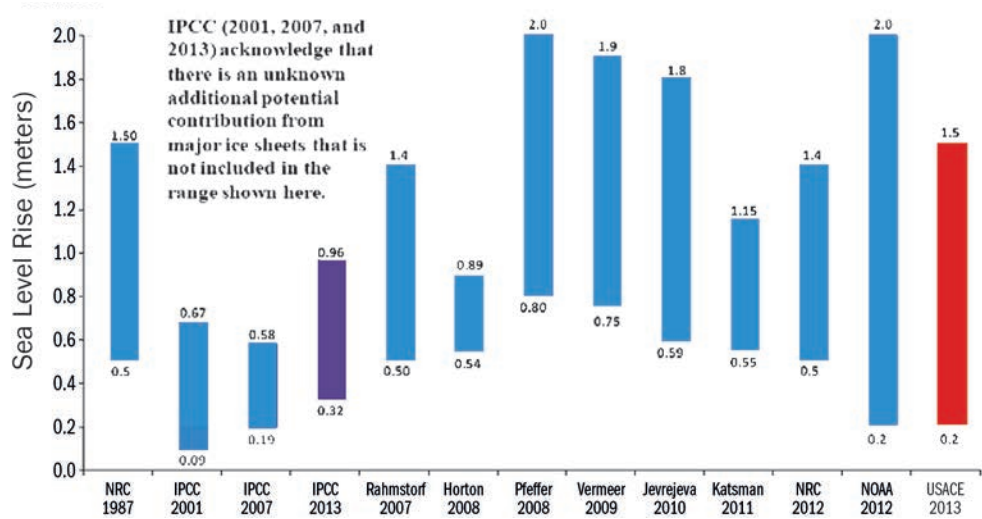


Figura 7. Predicciones de los niveles del mar alrededor de Puerto Rico para el año 2100. Cada barra ilustra el nivel máximo y mínimo esperado (basado en el análisis del profesor Aurelio Mercado Irizarry del Recinto Universitario de Mayagüez). La barra roja corresponde al análisis del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América.

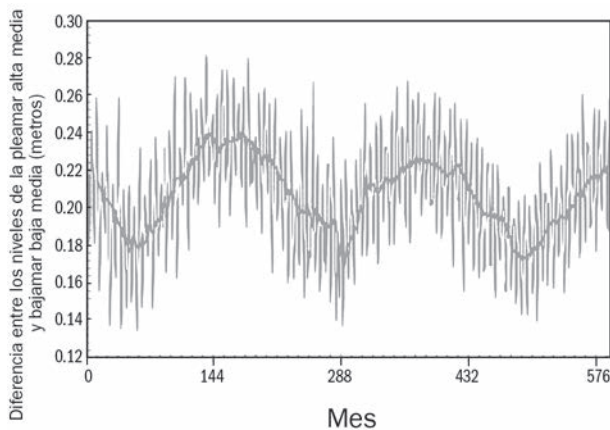


Figura 8. El ciclo metónico de la marea en La Parguera, Puerto Rico. La línea ennegrecida es el promedio corrido basado en 10 años y refleja dos ciclos metónicos en el periodo ilustrado.

1. La fuerza de atracción de la luna y el sol sobre las partículas del agua del mar. Esta fuerza de atracción más el efecto de la rotación del planeta y las posiciones relativas entre la luna, el sol y la tierra, son las causas principales para los ciclos de marea (alta y baja) que ocurren a diario en todas las costas del planeta. Se describen 13 tipos de marea que se manifiestan en innumerables ciclos que se pueden agrupar en el ciclo mareal (diario), ciclo sinódico (mensual) y ciclo metónico. El ciclo metónico se extiende por 18.6 años (Fig. 8).

2. La fuerza del viento puede levantar el nivel del mar cuando sopla constantemente en la misma dirección.
3. La temperatura del agua causa su expansión o contracción. El agua fría se contrae y se torna más densa, hundiéndose. El agua caliente se expande y tiende a flotar sobre el agua fría. El agua en la superficie de mar refleja la temperatura de las corrientes marinas y la temperatura de la atmósfera. Con el calentamiento de la atmósfera, el agua de mar también se calienta, se expande, ocupa más espacio y levanta el nivel del mar.
4. El derretimiento del hielo de los polos y los glaciales a causa del calentamiento de la atmósfera, aumenta la cantidad de agua fresca que llega al mar y por consecuencia aumenta el nivel del mar.
5. Eventos climáticos extremos como tormentas y huracanes revuelcan el mar e incrementan su nivel. Un huracán puede levantar el nivel del mar 15 metros o más. Tal aumento es sobre el nivel promedio del mar. Como ese nivel promedio esta aumentando, el levantamiento del mar por causa de tormentas y huracanes será cada vez más alto. Más aún, sobre el tope de este levantamiento es que se mueven las olas, por lo que éstas cada vez se moverán a niveles más altos que facilitan incursiones más profundas (tierra adentro) en la zona costanera.
6. Movimientos tectónicos de la corteza terrestre (temblores de tierra) en zonas profundas del mar causan pulsos de energía que levantan el nivel del mar y promueven la formación de las olas más grandes del planeta, los tsunamis. Estas olas son las que más tierra adentro incursionan y sobre las cuales hay que estar alerta cuando ocurran. En el 1918, una ola de un tsunami llegó hasta la Plaza Colón de Mayagüez.

¿Cuáles son las consecuencias del aumento en el nivel del mar?

El movimiento del mar en **sinergia** con fenómenos terrestres afecta la dinámica de la costa y la convierte en un ambiente inestable que los seres humanos tratan de estabilizar, generalmente con poco éxito. Cuando el nivel del mar aumenta, el agua de mar inunda permanentemente las tierras bajas de la zona marítimo terrestre en la zona costanera. El agua de mar también penetra como una cuña de agua salada por los ríos y quebradas que desembocan en el mar y se extiende aguas arriba tan lejos como la impulse las fuerzas de la marea. La descarga de agua fresca por estos cuerpos de agua contrarresta el movimiento de la cuña de agua salada por ríos y quebradas. Finalmente, el agua de mar también entra a los acuíferos costeros y se mezcla con el agua fresca de éstos. Más aún, con el aumento en el nivel del mar, aumentará también la altura y la energía de las olas (Fig. 9). Las olas y las aguas de las mareas altas podrán penetrar más distancia tierra adentro en la zona costanera. Igualmente las olas gigantescas de marejadas y tsunamis también in-

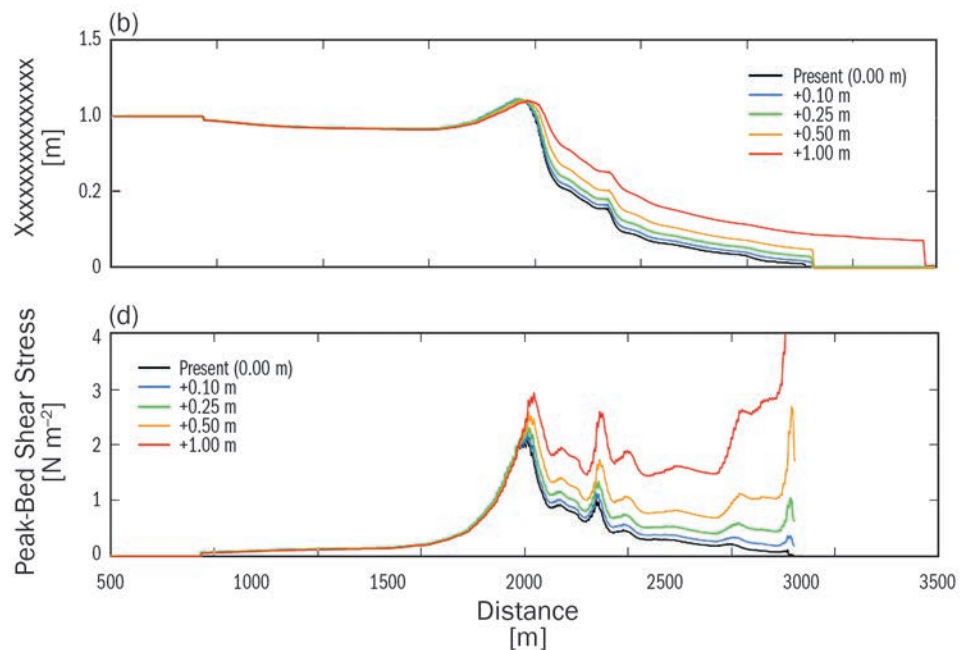


Figura 9. Transecto costero (ver Fig.10) ilustrando cambios anticipados en la altura de las olas (b) y el efecto de éstas sobre el piso del mar (d; shear stress). El transecto comienza 500 metros mar afuera (izquierda) y la línea de costa está a los 3,000 metros.

cursorarán más distancia tierra adentro. En fin, con el aumento en el nivel del mar la influencia del mar en la zona marítimo terrestre y el resto de la zona costanera aumentará y es casi imposible detenerlo. Esos cambios en el nivel del mar a su vez aumentan la tasa de erosión costera, aumentan la peligrosidad del mar en la costa, los efectos de los huracanes serán mayores y habrá más desplazamiento de sedimentos costeros (Fig. 10).

Los Ecosistemas Costaneros de la Zona Marítimo Terrestre

La zona marítimo terrestre es la parte de la zona costanera donde las aguas del mar incursionan normalmente. Esta zona es un bien no patrimonial que le pertenece a todos los puertorriqueños en general y a nadie en particular. No puede comercializarse y es administrada por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. Dentro de esta zona se encuentran los siguientes tipos de ecosistemas que por su afiliación al mar son también bienes no patrimoniales del pueblo de Puerto Rico: humedales mareales y estuarinos como los manglares, lagunas costeras, salitrales o marismas, lodazales, bosques y matorrales de uva de playa, dunas de arena, playas, acantilados, sistemas inter-mareales

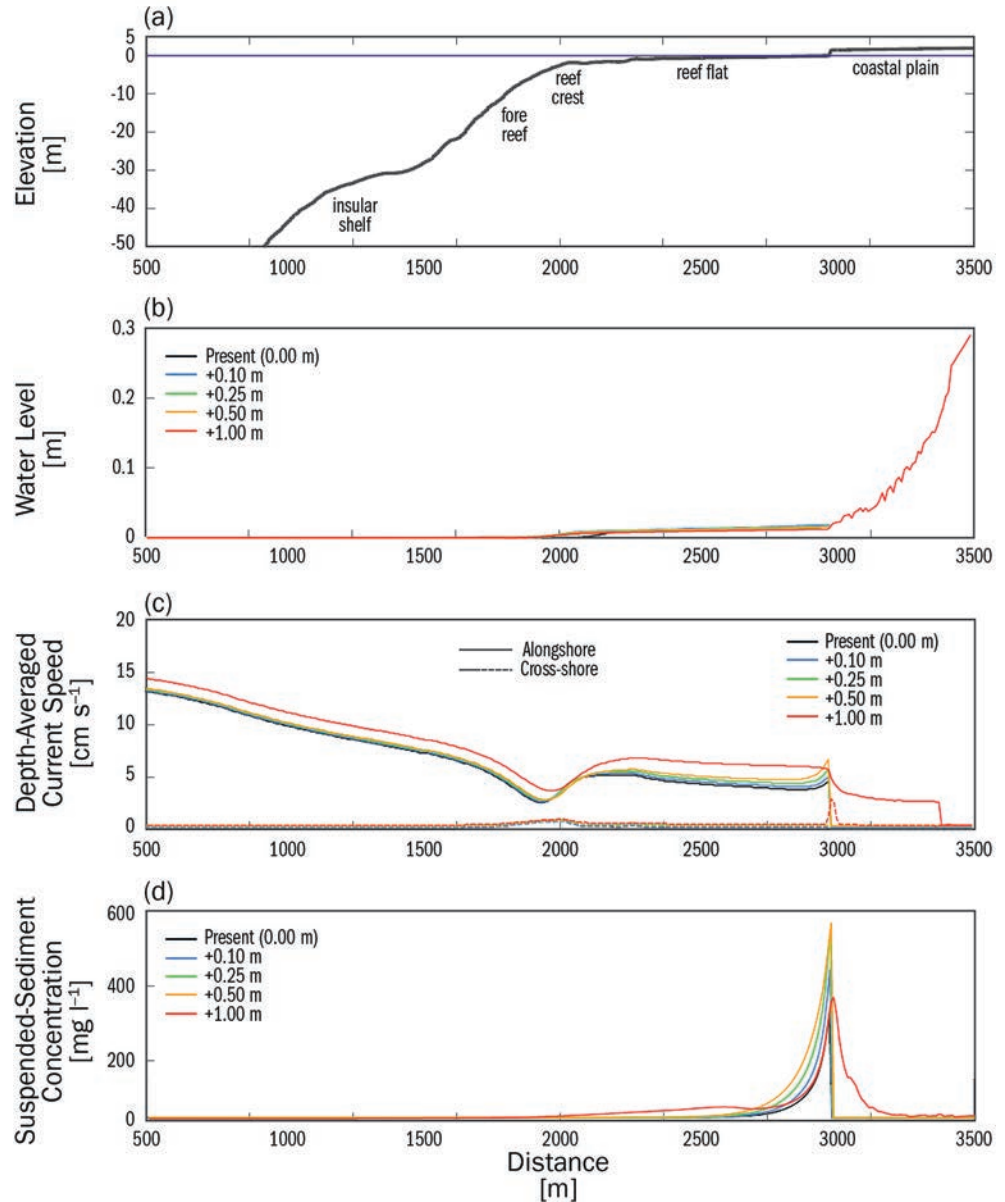


Figura 10. Transecto de la costa hasta las aguas profundas frente a los arrecifes de coral (a). Se ilustran cambios anticipados en el nivel del mar (b), la velocidad de las corrientes (c) y la concentración de sedimentos en suspensión (d).

rocosos, bahías, hierbas marinas y arrecifes de coral. La Cartilla de la Zona Marítimo Terrestre describe estos ecosistemas.

Los ecosistemas de la zona marítimo terrestre en conjunto protegen las costas de Puerto Rico ya que todos absorben y amortiguan la energía que disipan las olas, mareas y marejadas. Esta protección es uno de los más importantes servicios ecológicos que ofrecen estos sistemas a la sociedad. La barrera ecológica que forman comienza con los arrecifes de coral que

son la primera línea de defensa de las playas contra el embate del mar y termina con las comunidades más lejanas al mar como algunos manglares y lagunas costeras. Los arrecifes de coral son rompeolas naturales (Fig. 11). Las praderas de yerbas marinas también amortiguan la fuerza del oleaje y protegen la costa (Fig. 12). En las costas con oleajes más fuertes como la costa norte de Puerto Rico, las dunas de arena y acantilados funcionan como los amortiguadores contra los embates del mar.



Figura 11. Ejemplo de la distribución de arrecifes de coral frente a una playa. Su presencia amortigua la energía de olas y mareas que normalmente afectan la playa.

Todos estos sistemas costaneros de la zona marítimo terrestre albergan una proporción importante de

la biodiversidad de Puerto Rico y todos almacenan carbono atmosférico lo que ayuda a mitigar el calentamiento global.

Algunos, como los arrecifes, son fuentes medicinales ya que diversas especies de invertebrados poseen compuestos naturales bioactivos contra el cáncer y otras condiciones. Además, estos sistemas son fuentes de alimentos, particularmente de proteínas en muchas islas tropicales.

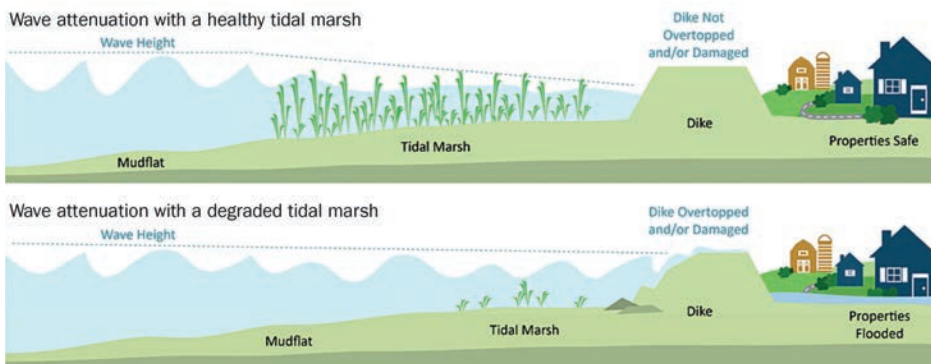


Figura 12. Efecto de lodazales y pantanos sobre las marejadas y oleajes en una costa de la zona templada con diques para proteger la infraestructura humana. Los ecosistemas amortiguan la fuerza y altura del agua, lo que protege el dique. Sin los sistemas ecológicos, el agua puede sobrepasar el dique a la vez que le causa daño.

Más aún, los ecosistemas de la zona marítimo terrestre tienen valor turístico y son fuentes de esparcimiento, recreación y de divisas. Tienen también valor cultural ya que generaciones de personas dependen de ellos. Recientemente, el valor educativo de estos sistemas se ha hecho patente ya que se utilizan como laboratorios naturales para estudiar y aprender.

La vulnerabilidad de estos sistemas a la actividad humana se ilustra con el efecto sobre los arrecifes de coral (Fig. 13). Un arrecife saludable es más efecti-

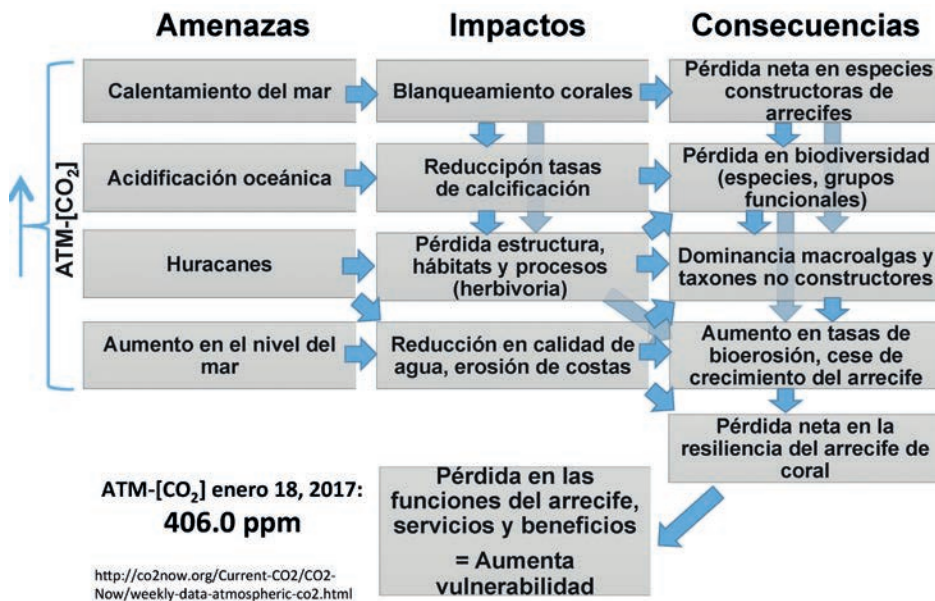


Figura 13. Amenazas, efectos y consecuencias de una concentración de bióxido de carbono en la atmósfera superior a las 400 partes por millón.

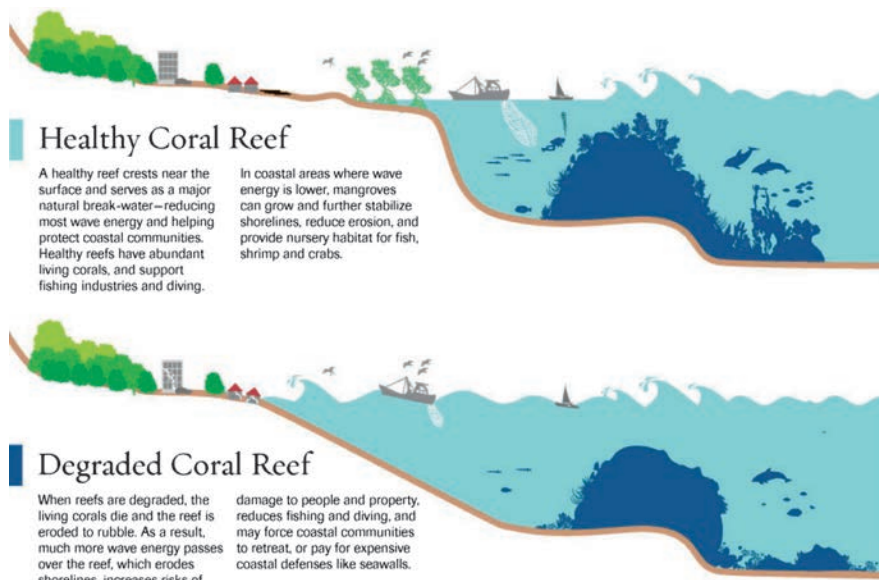


Figura 14. Contraste de las consecuencias a las costas y playas cuando los arrecifes de coral están en buenas condiciones vs. cuando se degradan.



Figura 15. El sistema de observación del mar costero del Caribe alrededor de Puerto Rico.

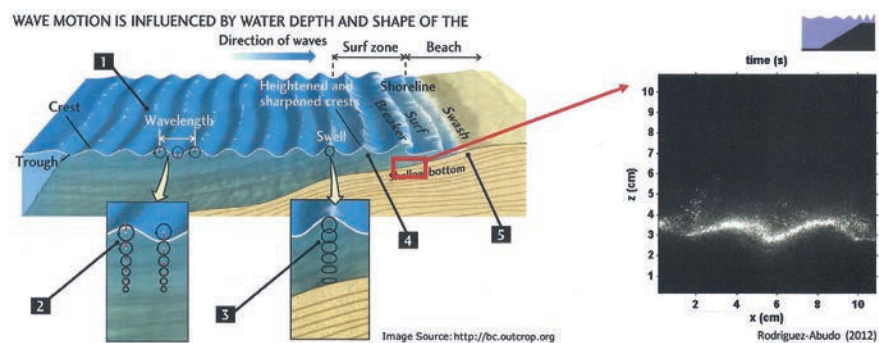


Figura 16. Ilustración de lo que son las olas y el oleaje. Se ilustran las características de olas y oleajes tanto en el plano vertical como el horizontal, incluyendo sus cambios desde las aguas profundas a la izquierda y las playas donde rompen (a la derecha).

Una mirada a las olas

Los tipos de oleajes que llegan a nuestras costas varían en la altura de las olas, su frecuencia de rompimiento y la energía que disipan en su trayectoria hacia la playa. La variación se ilustra y extiende en intensidad desde las olas placidas a los tsunamis. Antes del 2008 no existía en Puerto Rico un sistema de observación de oleajes para facilitar el entendimiento y manejo de las condiciones marítimas en las costas del país. La Fig. 15 ilustra el sistema de observación que en el presente provee los datos necesarios para entender los oleajes de Puerto Rico e islas adyacentes. El movimiento de las olas está influenciado por el viento, la profundidad del agua y la forma de la costa (Fig. 16). Los sistemas de vientos que determinan el clima de Puerto Rico también ejercen influencia sobre el sistema de oleaje de la Isla (Fig. 17). Estos “climas del oleaje” incluyen los oleajes asociados a frentes de frío, tormentas del Atlántico norte y los vientos alisios. Cada sistema de vientos tiene influencia sobre distintos sectores de costa del país.

El pasaje del huracán Mathew al sur de Puerto Rico, afectó las costas del país sin haber tocado tierra en la Isla (Fig. 18). Mathew comenzó su vida como una depresión el 25 de septiembre del 2016, se convirtió en temporal el 28 de septiembre, huracán el 29 y llegó a huracán categoría 5 el 30 de septiembre. El huracán Mathew pasó lejos y al sur de Puerto Rico y cruzó entre Haití y Cuba en su paso a las Baha-

vo protegiendo la costa que uno degradado (Fig. 14). Los arrecifes de coral pueden reducir el 84 por ciento de la altura de una ola y el 97 por ciento de su energía.

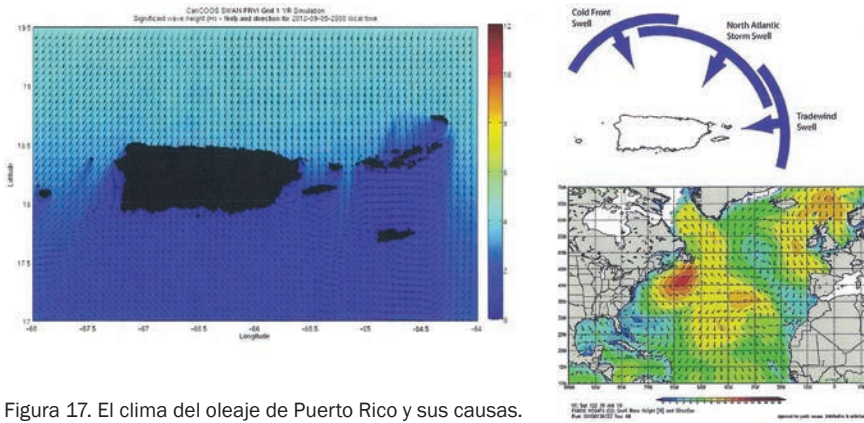


Figura 17. El clima del oleaje de Puerto Rico y sus causas.

ejemplo dramático de este fenómeno fue el efecto del evento de El Niño del 2015-2016 sobre las playas de California según estudiado por un grupo de científicos dirigidos por Patrick L. Barnard del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América. Los oleajes asociados a este evento excedieron todos los records históricos y causaron niveles de erosión costera nunca vistos en esa región inclusive llegando tierra adentro donde no se esperaban efectos del mar. Erosión costera se define como un déficit de sedimentos a una escala de tiempo particular (día, estación, año).

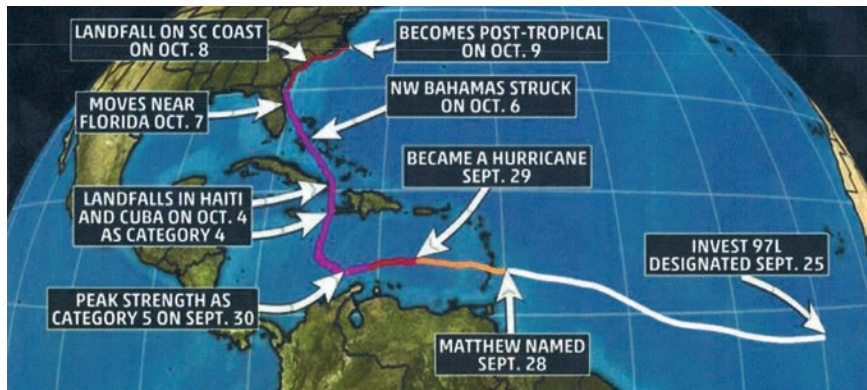


Figura 18. La trayectoria y desarrollo del huracán Mathew por el Caribe y Atlántico desde su comienzo como una depresión tropical el 25 de septiembre del 2016 hasta que se disipó el 9 de octubre del 2016.

Una boya ubicada al sur de Ponce capturó el oleaje del huracán Mathew del 27 al 29 de septiembre, el cual llegó a casi 5 metros o 26 pies de altura (Fig. 19). A pesar de la distancia de Mathew al sur de Puerto Rico,

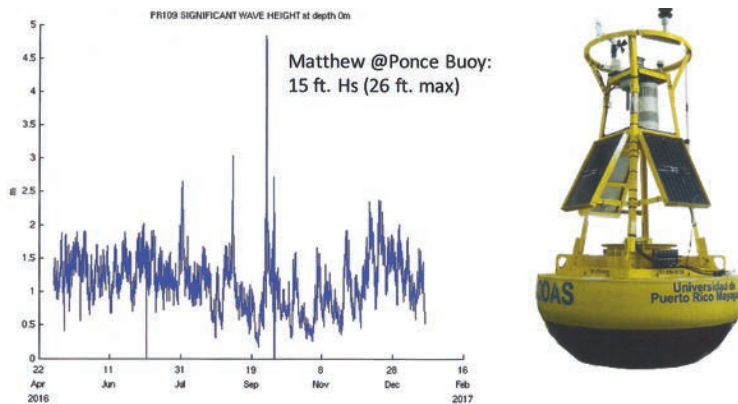


Figura 19. La boya de la Universidad de Puerto Rico ubicada al sur de Ponce (derecha) y los oleajes que registró entre abril y diciembre del 2016. El pico de septiembre 27-29 corresponde al paso del huracán Mathew al sur de Puerto Rico.

su efecto en el oleaje en la costa sur fue significativo (Fig. 20). Durante el 4 y 6 de octubre, Mathew estaba ubicado al suroeste de Puerto Rico y generaba oleajes con periodicidades de 12 a 13 segundos y alturas de 6 a 8 pies (Fig. 21), afectando principalmente la costa entre Guánica y Mayagüez (Fig. 22). Entre octubre 10 y 12, Mathew afectó toda la costa norte y oeste de Puerto Rico (Fig. 23). La costa en Rincón experimentó grandes cambios durante este evento (Fig. 24).

mas y Florida. Murió el 9 de octubre del 2016 al norte de Carolina del Sur. El recuento de lo que pasó en las costas de Puerto Rico a consecuencia de este huracán ilustra claramente la complejidad de los factores que afectan nuestras costas y el hecho de que las costas responden tanto a las actividades de los humanos como a eventos que ocurren a distancias lejanas. Un

El oleaje, al igual que los huracanes, presentan retos enormes a las estructuras en la zona costanera y ameritan atención inmediata irrespectivo al cambio climático. Con los efectos “normales” del oleaje tenemos las manos llenas para sobreponernos a sus efectos. La fuerza que ejerce una ola sobre las playas y las estructuras allí ubicadas se mide en unidades de energía. La potencia de las olas es proporcional a su

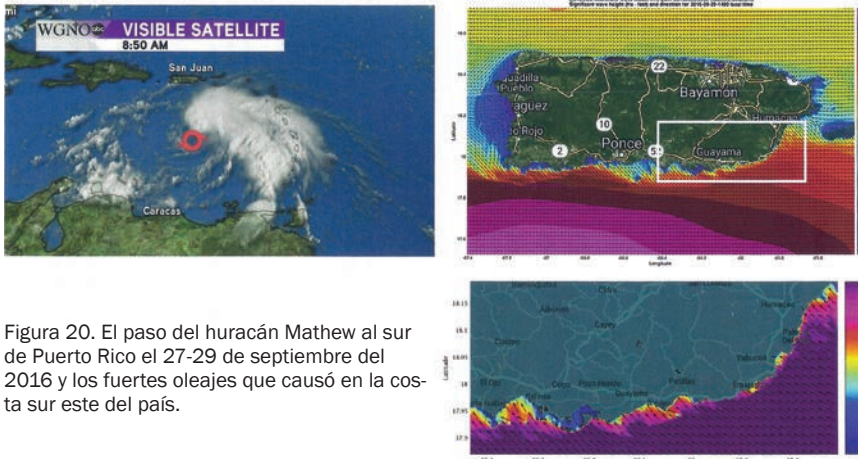


Figura 20. El paso del huracán Mathew al sur de Puerto Rico el 27-29 de septiembre del 2016 y los fuertes oleajes que causó en la costa sur este del país.

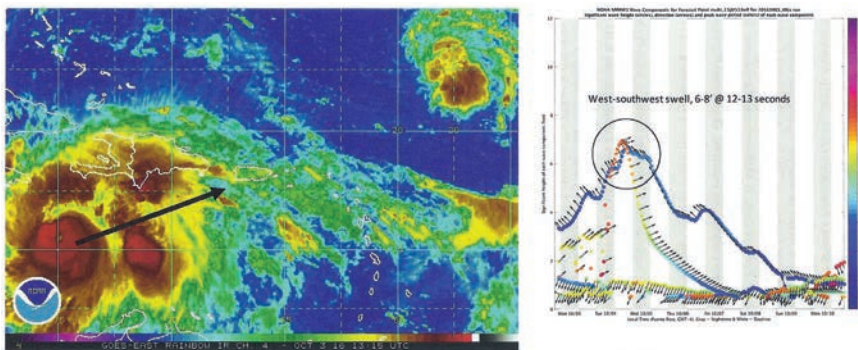


Figura 21. Ubicación del huracán Mathew relativo a Puerto Rico en octubre 4-6 2016 y el desarrollo de oleajes del oeste al suroeste de hasta 8 pies en respuesta al huracán.

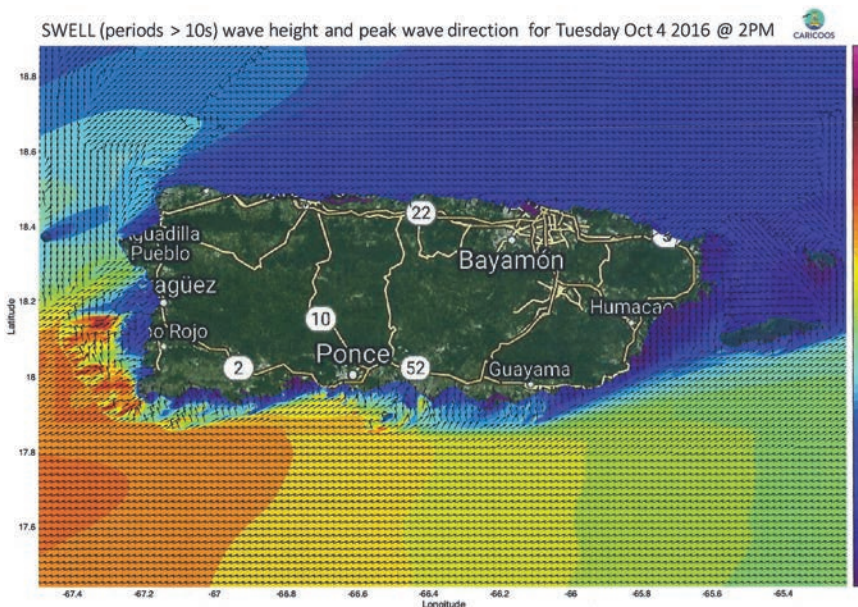


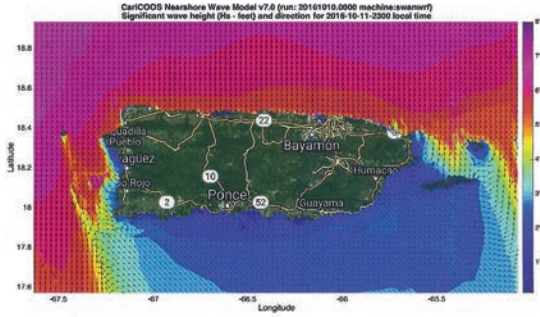
Figura 22. Los oleajes del 4 de octubre del 2016 sobre la costa suroeste de Puerto Rico a causa del paso del huracán Mathew.

tegoría 4. Las olas son mil veces más potentes que los vientos del huracán, y sabemos que los efectos de esos vientos sobre bosques y estructuras pueden ser devastadores. Esa diferencia en la potencia de las olas sobre los vientos huracanados explica los catastróficos efectos de los oleajes sobre la propiedad e infraestructura costanera expuestas a sus embates.

Dado a la complejidad del clima del oleaje y sus cambios con eventos como los huracanes, es muy difícil anticipar los cambios adicionales al oleaje en Puerto Rico inducidos por el cambio climático. Sin embargo, no es necesario conocer los cambios en oleajes con el cambio climático para llamar la atención a la importancia del oleaje en el manejo de la zona costanera. Sabemos que si aumenta el nivel del mar, la propagación de las olas va a cambiar aunque su intensidad se mantenga igual a la del presente. Un mar más alto proporcionalmente sostendrá oleajes más altos y estos oleajes incursionarán a más distancia tierra adentro (Fig. 26) donde tendrán efectos visibles sobre la infraestructura y los ecosistemas de la zona marítimo terrestre. En la Figura 26a se ilustra un mar más alto por el cambio climático con las olas corriendo sobre el nivel promedio. En la Figura 26b la alzada del mar se ilustra con una marejada sobre el nivel promedio del mar y las olas se mueven sobre la marejada. Las marejadas siempre ocurrirán, pero con el aumento en el nivel promedio del mar, las olas correrán sobre un nivel de mar cada vez más alto.

altura y frecuencia. En general las olas son más potentes que los vientos. La Fig. 25 compara la potencia de olas de varios tamaños con vientos de un huracán ca-

jadas siempre ocurrirán, pero con el aumento en el nivel promedio del mar, las olas correrán sobre un nivel de mar cada vez más alto.



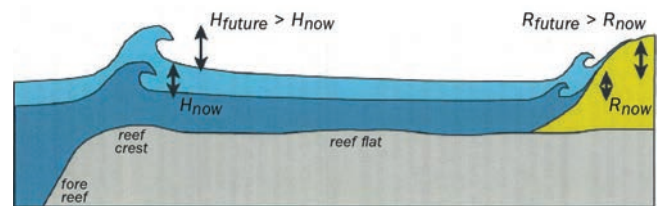
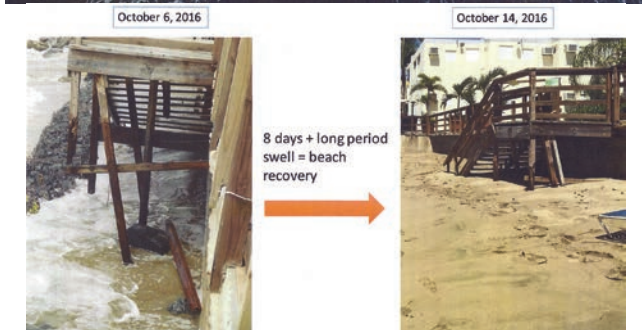
Las costas y playas de Puerto Rico

Las playas son parte de la zona marítimo terrestre localizadas entre los límites marinos y terrestres de la zona costanera de Puerto Rico (Fig. 27). La zona costanera es un bien de Puerto Rico con múltiples usos y valores (Caja 1). La zona marítimo terrestre es

mucho más amplia que las playas y la zona costanera es más amplia que la zona marítimo terrestre.

¿Cuántos tipos de costas tenemos?

Puerto Rico cuenta con cuatro tipos de costa, cada una con sus variantes y definidas por su aspecto incluyendo costas con vegetación, costas arenosas, costas rocosas y costas con estructuras antropogénicas (Fig. 28). Las playas ocurren sobre una longitud de costa de aproximadamente 1,285 km (700 mi). La



- = Atoll islet
- = Present sea level
- = Atoll carbonate platform
- = Future elevated sea level

<http://walrus.wr.usgs.gov/climate-change/atolls/background.html>

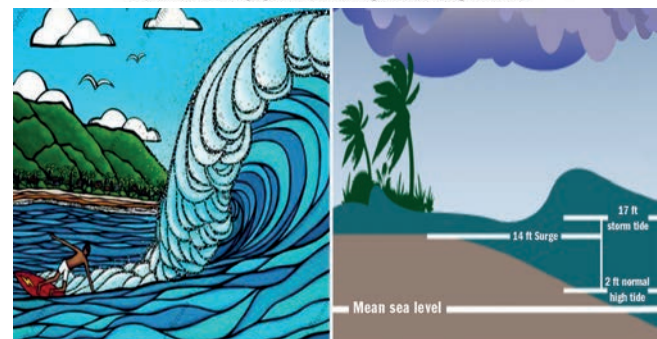


Figura 26. Ilustración del movimiento de olas sobre un nivel promedio del mar más alto que en el presente (a) y sobre una marejada (b). La marejada esta asociada a un nivel del mar superior al nivel del mar promedio al igual que la marea alta, cuando el nivel del mar es sobre el promedio pero debajo del nivel de la marejada. En ambos casos la incursión de las olas tierra adentro es mayor.

Figura 24. Los efectos de los oleajes asociados al huracán Mathew sobre la costa de Rincón. Las estructuras humanas sufrieron daño (a), mientras que la playa primero perdió pero luego ganó arena (b). La playa exhibió resiliencia pero la pared estática no resistió.

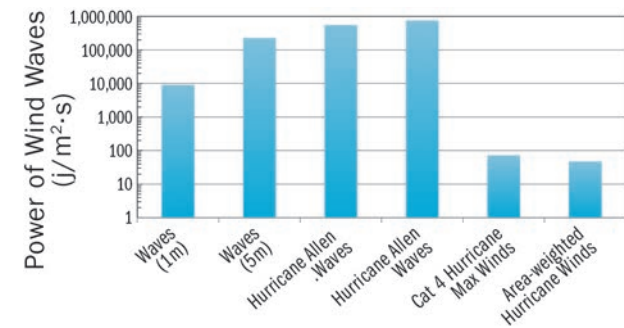


Figura 25. La potencia de las olas comparada con la potencia de vientos huracanados. La escala de potencia es logarítmica indicando que cada línea horizontal de potencia es diez veces superior a la anterior.

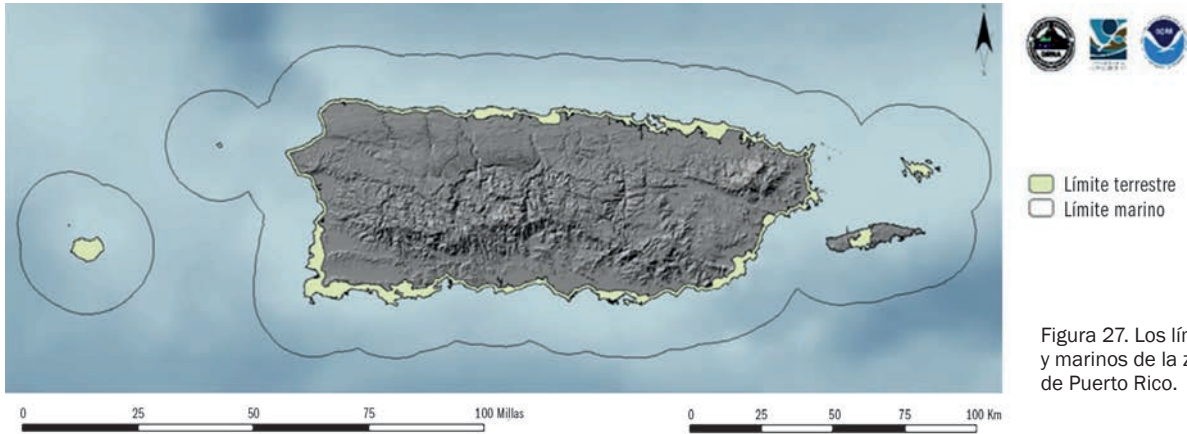


Figura 27. Los límites terrestres y marinos de la zona costanera de Puerto Rico.

Caja 1. Usos y valores económicos de la zona costanera de Puerto Rico

- ▷ Población costera: 2.3 million (61 por ciento de la población de PR)
- ▷ Zona costanera: ≥ 1 km inland (Área = 368.3 mi²)
- ▷ Aguas territoriales: 9 nmi (A=5,078.9 mi²)
- ▷ La costa: 799 mi / 1,225 playas
- ▷ Por ciento construido de la costa: 24
- ▷ Municipios costeros: 44
- ▷ Producto Doméstico Bruto (GDP): ~\$65 billion/yr
- ▷ Aeropuertos: 11
- ▷ Puertos: 12
- ▷ Millas de carreteras primarias: 17,387 mi / 27,982 km
- ▷ Sistemas de generación de energía: 7 (5 públicos y 2 privados)
- ▷ Infraestructura sanitaria: 1,080 mi
- ▷ Plantas de tratamiento de aguas usadas: 28
- ▷ Parques industriales: 81
- ▷ Áreas protegidas terrestres: 16 por ciento de PR
- ▷ Áreas protegidas marinas: 27.2 por ciento
- ▷ Arrecifes de coral y comunidades marinas asociadas en aguas llanas designados para protección: 49 por ciento

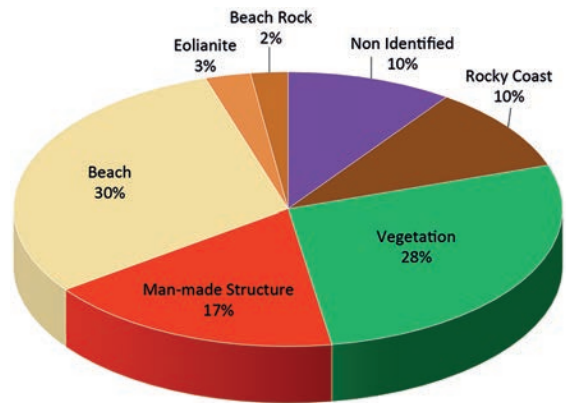


Figura 28. Distribución de los tipos de costas de Puerto Rico. Las actividades del ser humano son responsables de que el 17 por ciento de las playas requieran una clasificación que no existía en la pre-historia.

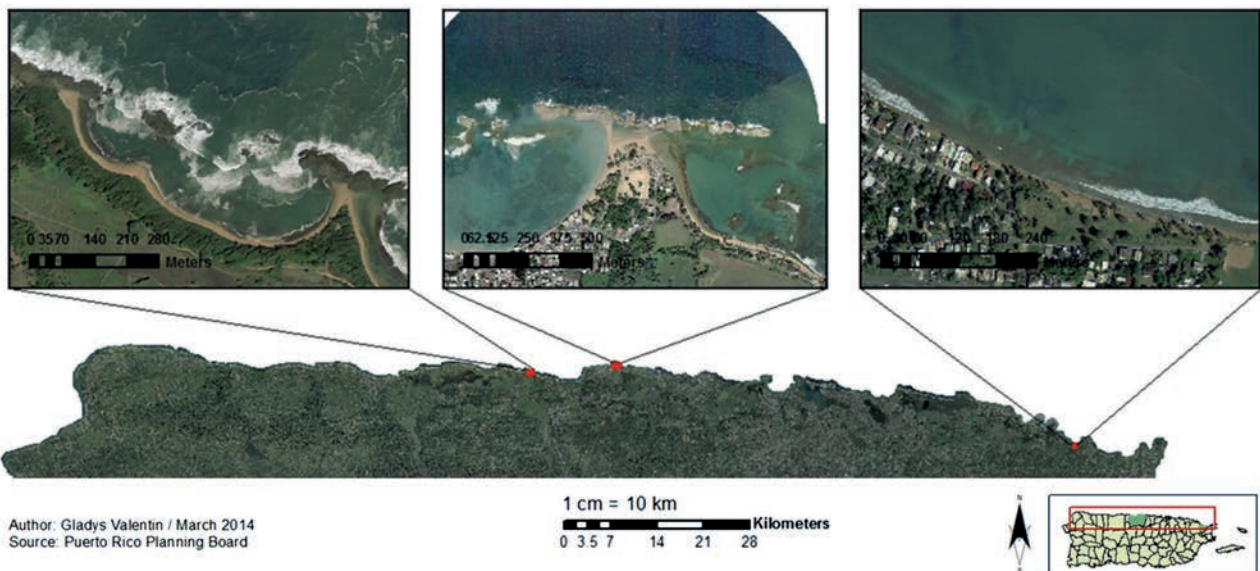


Figura 29. Ejemplos de la endentación de costas y playas en la costa norte de Puerto Rico.



Figura 30. Ejemplo de los tipos de arena en las playas de Puerto Rico.

costa en si es endentada formando playas rectas, en forma de luna, semilunar y otras (Fig. 29). La playa es parte de la plataforma insular de Puerto Rico, la cual también es heterogénea.

¿Cuántos tipos de playa tenemos?

Los tipos de playas que tenemos son muy diversos debido a las variaciones en oleajes, tipos de arena (Fig. 30), contexto geomorfológico y orientación hacia el mar.

Tabla 2. Distribución de las 1,225 playas de Puerto Rico.

Región	Número de Playas
Norte (Isabela a Luquillo)	246
Este (Fajardo a Yabucoa)	176
Sur (Maunabo a Lajas)	252
Oeste (Cabo Rojo a Aguadilla)	256
Vieques	172
Culebra	111
Caja de Muertos	12

¿Cuántas playas tenemos?

Puerto Rico cuenta con 1,225 playas (Tabla 2). Los municipios de Vieques, Culebra, Rincón, Cabo Rojo y Ceiba son los que tienen más playas y Vieques, Loíza, Isabela y Arecibo tienen más área de playa (Fig. 31).

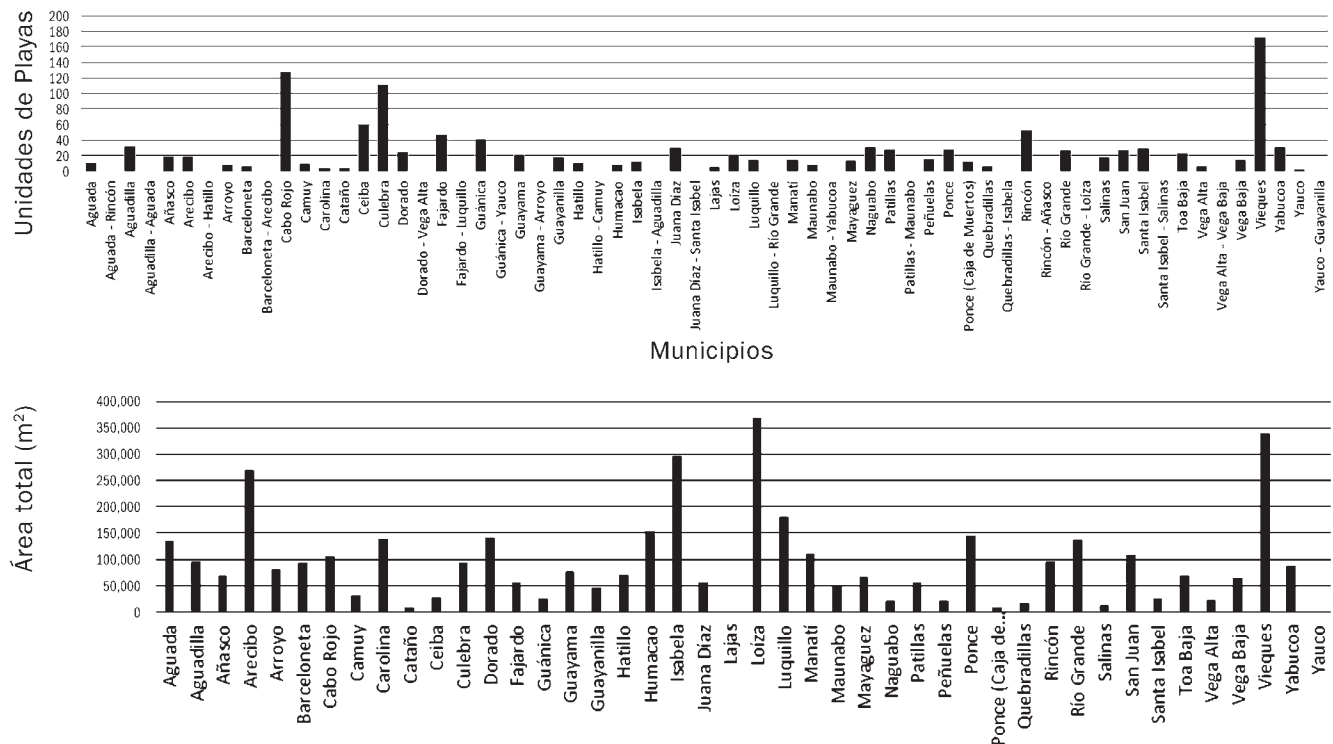


Figura 31. Número de playas (tope) y su área (abajo) por municipio de Puerto Rico.



Figura 32. Las playas más largas de Puerto Rico: Piñones-Loíza (tope), Isabela-Aguadilla (medio) y Mameyal en Dorado (abajo).

Tabla 3. Cambios históricos en las playas (1964 al 1987).

Intervalo de Tiempo	Eventos Predominantes
1936-1962	Erosión y acreción
1962-1971	Evento de erosión en las mayorías de las playas
1971-1977	Reduce la erosión en la mayoría de las playas
1977-1987	Sigue reduciendo la erosión en la mayoría de las playas estudiadas, hay excepciones.
1987-1997	Exposición de roca de playa en la línea de costa (nuevo equilibrio).
2010	Erosión y acreción. Erosión importante en Loíza, Aguada y Rincón,

Las playas más largas (Fig. 32) son las de Piñones-Loíza (7,621 metros), Isabela-Aguadilla (5,398 metros) y la playa Mameyal de Dorado (4,555 metros).

¿Cómo cambian las playas?

Las playas siempre están cambiando. Estudios demuestran que hay épocas cuando aumentan en tamaño, disminuyen en tamaño o se quedan iguales

en tamaño (Tabla 3). Sin embargo, cada playa responde a sus condiciones particulares y al observar como cambiaron las playas durante distintos intervalos de tiempo se observa la variabilidad en las respuestas (Fig. 33). Por ejemplo, a pesar de que el huracán María afectó significativamente la altura de varias playas en Puerto Rico, no todas perdieron altura y algunas aumentaron en altura (Barreto Orta et al. 2019).

¿Porque cambian las playas?

Hay muchas razones por las cuales el área de las playas cambia de un momento a otro. La Caja 2 contiene una lista de las causales. Cómo hay tantos factores que influyen sobre el estado de una playa y cómo esos fac-

Caja 2. Posibles causales de los cambios observados en el tamaño de las playas

- Marejadas
- Localización y Orientación costera
- Corrientes Marinas
- Ocurrencia de sistemas ciclónicos
- Ancho de la plataforma insular
- Inclinação de la plataforma
- Ausencia y/o deterioro de barreras naturales
- Debilitamiento de barreras naturales
- Efectos sobre los arrecifes de coral
- Modificaciones de cuencas hidrográficas y su efecto en la descarga de agua y sedimentos.
- Actividades humanas (represas, extracción de arena)
- Posicionamiento de infraestructuras en zonas costeras incorrectas
- Aumento de nivel del mar
- Cambio de cobertura y uso de terreno
- Presencia de cañones submarinos

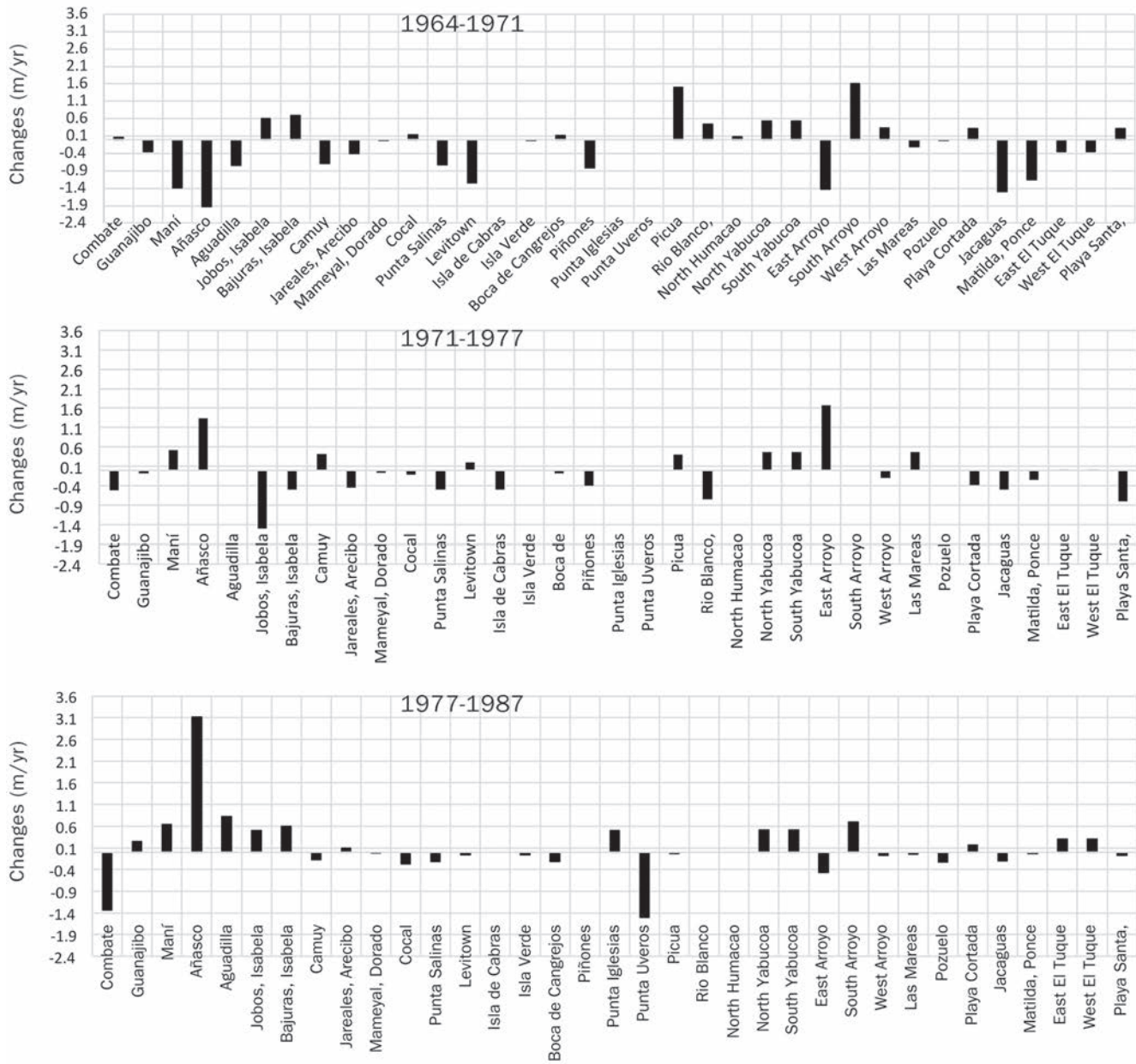


Figura 33. Cambio en el ancho de varias playas en Puerto Rico estudiadas durante tres intervalos de tiempo basados en fotografías aéreas.

tores son a su vez dinámicos, el resultado es que cada playa es única y dinámica.

El ciclo de arena de una playa se ilustra en la Fig 34. La arena de una playa no solo incluye la arena sobre el nivel del mar en un momento dado, sino también la arena en la parte submarina de la playa (i.e., la playa submarina). Existe un intercambio de arena entre la playa y la playa submarina. Las olas son responsables del movimiento de la arena entre las dos playas. En ciertos periodos las olas ayudan a depositar arena de origen submarino so-

bre el nivel del mar, mientras que en otra ocasiones las olas remueven arena de la playa visible y la transportan a la playa submarina. La vegetación terrestre ayuda a conservar la arena de la playa visible y de las dunas mientras que el mucílago orgánico la conserva en la playa submarina. Las fuentes de arena de playa se origina con la erosión de terrenos en la montaña y su transporte a la costa por los ríos y las quebradas. Corrientes marinas laterales a la costa (la corriente del litoral) transportan arena de un lugar a otro a lo largo de la costa. El viento transporta

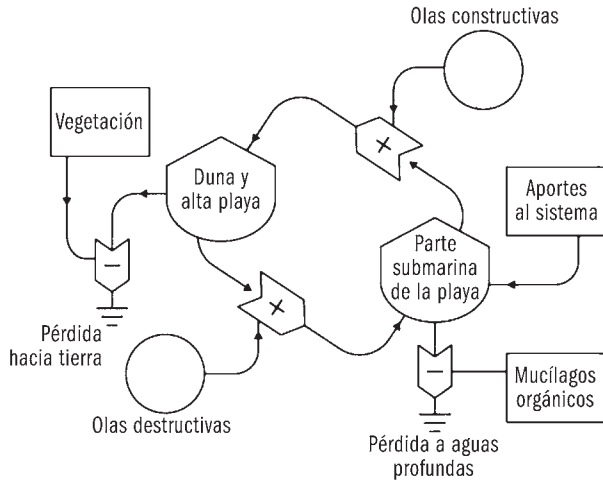


Figura 34. El ciclo de arena de una playa. El texto y La Cartilla de la Zona Marítimo Terrestre describen la interacción entre los componentes del ciclo.

sivas entonces se pone en peligro la presencia de las playas y dunas. En el caso de las dunas, extracciones excesivas las han eliminado de muchos sectores del litoral costero según mencionamos más adelante en el caso de las dunas de Piñones y como ha ocurrido con las dunas de Isabela. Frecuentemente, la construcción de espolones, muelles u otras estructuras en el agua interrumpen el transporte de arena por la corriente litoral lo que causa que se acumule arena en un lugar y se pierda la playa en otro. El ser humano también acelera la erosión de la playa cuando elimina la vegetación o cuando cambia el perfil de la playa y de la costa con dragados o arrastre de equipo.

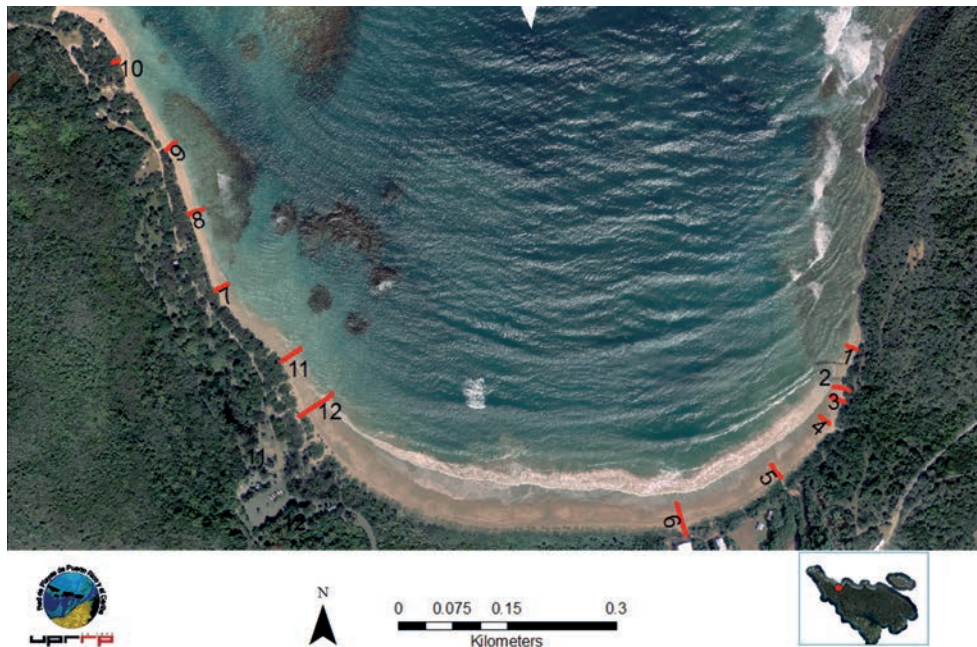


Figura 35. La playa de Flamenco en Culebra ilustrando la ubicación de las estaciones donde se estudiaron los perfiles de la playa. Note el ángulo del oleaje cuando llega a las distintas estaciones de la playa.

Por todo lo anterior, es importante entender que cuando se observa un cambio en una playa o sector de costa, no se puede llegar a conclusiones sobre lo que esta ocurriendo sin antes conocer las circunstancias que afectan al dinámica del sector costero. Los cambios en el estado de las playas pueden deberse a algún fenómeno natural, a un cambio estacional, al efecto de una estructura costera mal diseñada, a la intervención humana, la interrupción de la fuente de sedimentos

arena de las playas a las dunas de arena y a otros ecosistemas de la zona marítimo terrestre. Cuando la arena submarina se pierde a las aguas profundas, es difícil recuperarla e incorporarla al ciclo de área de las playas.

La actividad humana ejerce influencia sobre todos los aspectos del ciclo de arena. Por ejemplo, las extracciones de arena de las playas, dunas, ríos o de depósitos submarinos afectan la cantidad de arena disponible para mantener el estado normal de las playas y las dunas. Si las extracciones de arena son exce-

o cambios hidrodinámicos como cambio en el nivel del mar o en el patrón de oleaje. De igual manera y paradójicamente, olas gigantescas con enorme cantidad de energía automáticamente no implican mayor erosión costera si las playa donde rompen ya están balanceadas hidrodinámicamente. Por lo tanto, entender y poder manipular la dinámica costera es un asunto complicado que requiere interpretación técnica. Aún más, requiere investigación científica porque los procesos costeros tropicales no han

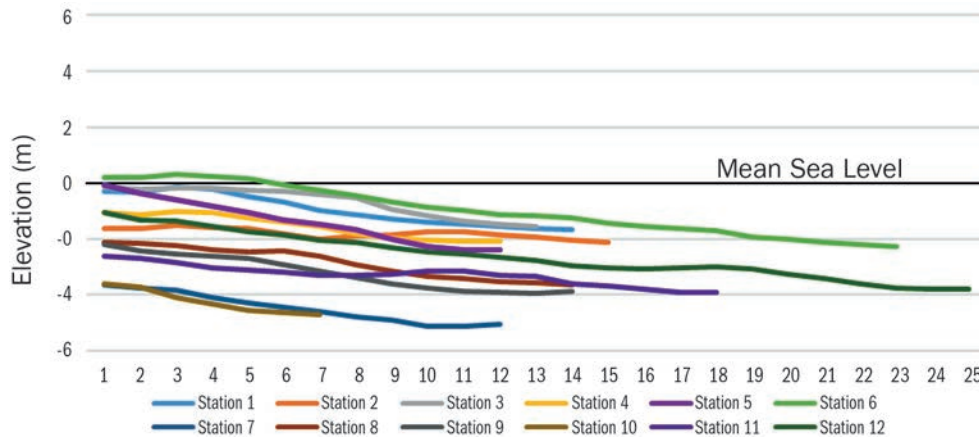


Figura 36. Perfiles de la playa Flamenco en Culebra el 29 de noviembre del 2016. La línea horizontal negra representa el nivel promedio del mar. En casi todas de las 12 estaciones estudiadas las playas estaban sumergidas.

de un año de estudio. Varios sectores de esta playa ahora están bajo el nivel del mar (Fig. 38).

Manatí

Las playas aledañas La Boca en Barceloneta y Machuca en Manatí (Fig. 39), exhiben anchuras contrastantes e incluso cambios contrastantes a través del tiempo (Fig. 40).

sido suficientemente estudiados y ante los cambios globales que los afectan el comportamiento de las costas tomará giros no anticipados que representan serios retos a la ingeniosidad humana.

Palmas del Mar

La playa Palmas del Mar sur he experimentado dramáticos cambios en altura con respecto al mar entre el 1977 y 2010 (Fig. 41). Algunos sectores han

Ejemplos de diversos sectores de costa de Puerto Rico

Isla de Culebra

La playa Flamenco en Culebra tiene distintas orientaciones al mar (Fig. 35) y dependiendo de estas orientaciones varía el ancho y elevación del sector de playa (Fig. 36)



Loíza

La playa de Parcelas Suarez en Loíza (Fig. 37) ha perdido elevación en relación con el nivel del mar durante el transcurso



Figura 37. Los efectos del embate del mar sobre estructuras en la playa de las Parcelas Suarez de Loíza.

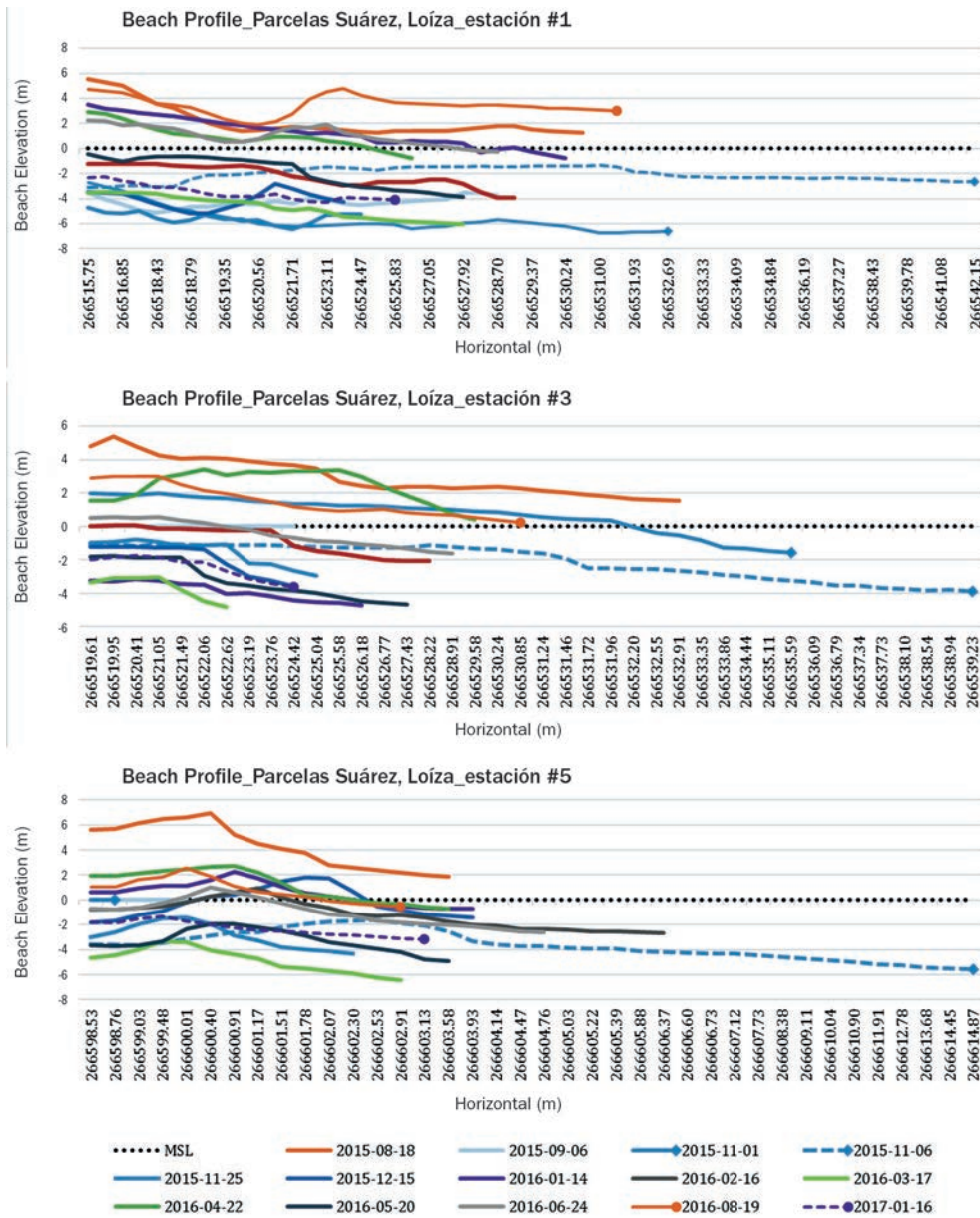


Figura 38. Cambio en los perfiles de las playas en las Parcelas Suarez de Loíza durante varios meses entre el 2015 y 2017. La línea entrecortada representa el nivel promedio del mar. A veces las playas están sobre el nivel del mar y en otros momentos están sumergidas.

ganado altura mientras otros han perdido. Tanto las ganancias como las pérdidas han sido sustanciales en los distintos sectores de playa estudiados.

Rincón

La línea de costa en Rincón ha variado notablemente entre el 1936 y el 2005 (Fig. 42).

Desafiando el mar

Cuando vemos el mar acercarse a nuestras propiedades o infraestructura, la reacción inmediata es hacer algo para detener el avance, o sea desafiar el mar. Los que estén al tanto de los eventos en el área de Piñones donde el mar incursiona sobre la carretera PR 187 recordarán la siguiente secuencia de esfuerzos de parte de las autoridades: remover la arena depositada por el mar (fase inicial tratando de ignorar le problema); instalar desperdicios sólidos, incluyendo automóviles viejos para detener el mar; utilizando piedras e incrementando el tamaño de éstas para detener el mar; pedir ayuda al gobierno federal. El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América respondió al pedido elevando la carretera y llevando a cabo obras a un costo aproximado a 30 millones de dólares. Durante un huracán reciente, el mar sobrepasó la obra

federal y depositó enormes cantidades de arena en el extremo sur de la carretera (Fig. 43). En el presente, las autoridades continúan removiendo arena luego de marejadas, tal como la hacían al principio. Sin embargo, las predicciones al futuro sugieren que durante este siglo la PR 187 será intransitable por ser arropada por el mar. El problema original no fue el mar. Las autoridades habían removido la duna protectora de la carretera

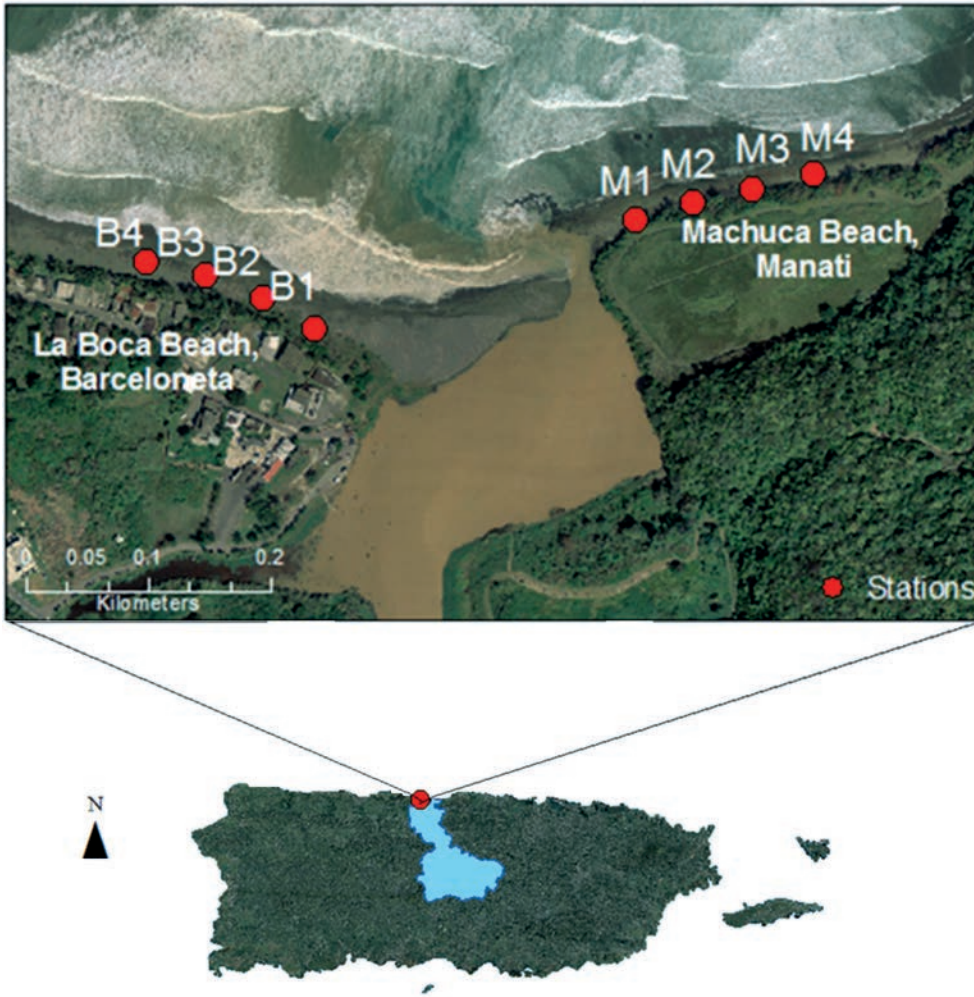


Figura 39. Ubicación de las playas La Boca y Machuca de Barceloneta y de las estaciones donde se estudió la dinámica de las playas. El oleaje llega a cada playas en un ángulo distinto. También se ilustra la cuenca hidrográfica que desemboca en las playas.

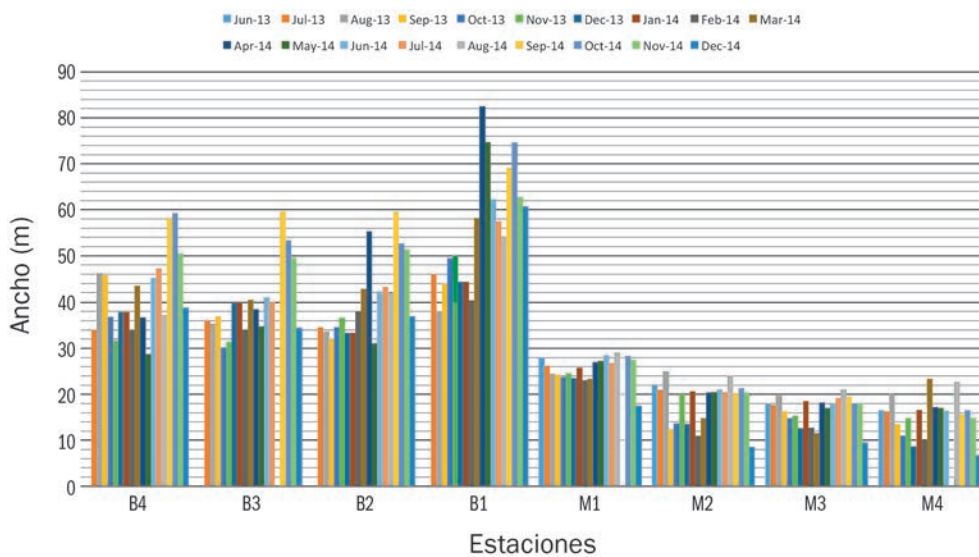


Figura 40. Cambios en el ancho de las playas La Boca y Machuca de Barceloneta según fueron medidos periódicamente en ocho estaciones en el 2013 y 2014.

para rellenar el manglar donde ubicaron el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín. Cuando el mar arrojó la PR 187, también arrojó el Aeropuerto Internacional (Fig. 44).

Puerto Rico tiene muchos ejemplos de los resultados que obtiene al desafiar el mar. En el Apéndice I incluimos fotografías de situaciones por todas las costas de la Isla. Además, incluimos fotos históricas y fotos en secuencia de tiempo para ilustrar la dinámica de nuestras costas. Es difícil y costoso construir estructuras que resistan la fuerza de los oleajes continuos. El problema con el mar es que es eterno, nunca descansa y siempre impone su fuerza. Hemos aprendido, y estudios lo confirman (Jackson et al. 2006), que los gaviones no representan alternativas viables para contrarrestar los efectos del mar. No duran mucho tiempo y al desmenuzarse se convierten en un problema de salud y seguridad pues se desparraman las piedras y los alambres oxidados. Las piedras tienen sus limitaciones también pues su éxito depende de su tamaño y donde las ubicamos con referencia al

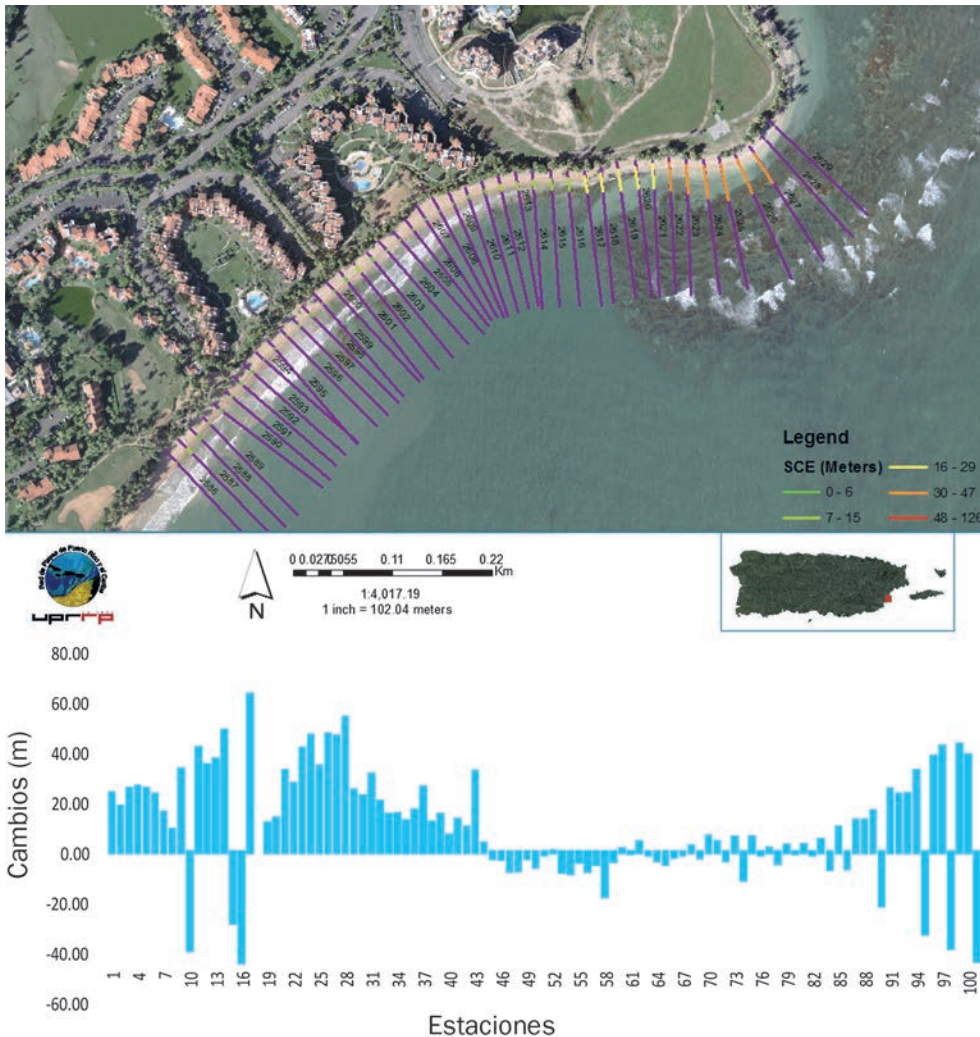


Figura 41. Cambios en el ancho de la playa de Palmas del Mar sur entre el 1977 y 2010 en cien transectos ilustrados en la foto.

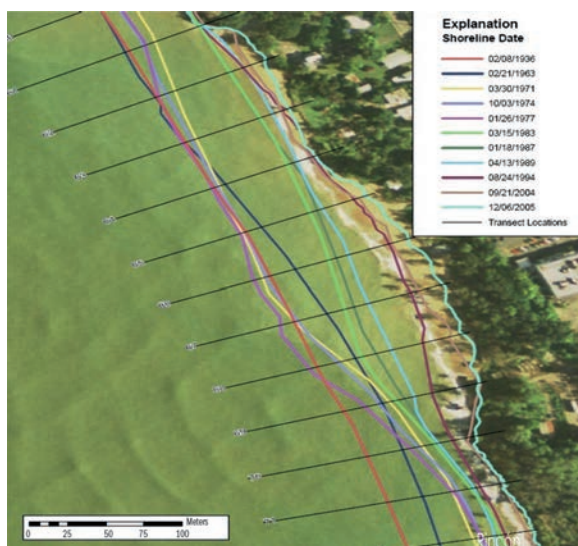


Figura 42. La playa de Rincón ilustrando como ha cambiado la ubicación de la orilla de playa desde el 1936 al presente.

mar. Los rompeolas pueden funcionar si se ubican y diseñan correctamente. Por otro lado, tanto las piedras como los rompeolas pueden causar efectos no anticipados y negativos cuando se utilizan incorrectamente. Es instructivo entender que los arrecifes de coral sufren enormes efectos estructurales antes los oleajes y marejadas huracanadas y es común ver amontonamientos de corales desprendidos sobre las playas después de esos eventos. Pero contrario a nuestras estructuras, los corales crecen rápidamente después de cada evento y re-establecen su función amortiguadora de energía. La lección aprendida es que ni tan siquiera los ecosistemas más resistentes a los oleajes desafían el mar y el resto de los ecosistemas de la zona marítimo terrestre tienen límites en su tolerancia a los embates de las olas.

Estrategias para lidiar con el mar

Tenemos tres opciones para lidiar con el aumento en el nivel del mar. Podemos elegir el enfrentamiento al mar, la retirada de la costa o no hacer nada. Cada una tiene consecuencias que se pueden anticipar. Quizás la mejor estrategia es una combinación de las tres opciones entendiendo que cada una tiene su lugar y ninguna resuelve el problema por si sola. Utilizando múltiples estrategias debemos asegurar que cada acción es la más correcta para cada situación particular. La lista de herramientas para estas estrategias incluye:

Uso de estructuras antropogénicas

- › Acorazando la costa
- › Geotextiles/Geotubos
- › Arrecifes artificiales
- › Reforzando estructuras existentes

Protección con sistemas no-antropogénicos

- › Importando arena a la playa
- › Restauración de dunas
- › Uso de vegetación costera
- › Arrecifes artificiales

Retirada planificada

- › Utilizando conceptos de planificación
 - › Acatando los límites de uso permisibles dentro de la zona marítimo terrestre
 - › Considerando los eventos extremos
- Irrespectivo de la estrategia seleccionada, su plani-



Figura 43. Fotografía de los efectos de vientos y marea huracanada sobre un bosque de pino australiano en la zona de Piñones de Carolina, Puerto Rico. El viento afectó la estructura del bosque y la marea-ja transportó arena de la playa sobre la carretera PR 187, afectando el bosque. Foto de A.E. Lugo.

ficación y ejecución debe incluir un análisis holístico de la situación. Es necesario comenzar con un diagnóstico de las playas y basado en este entendimiento proceder con un enfoque que busque la resiliencia de

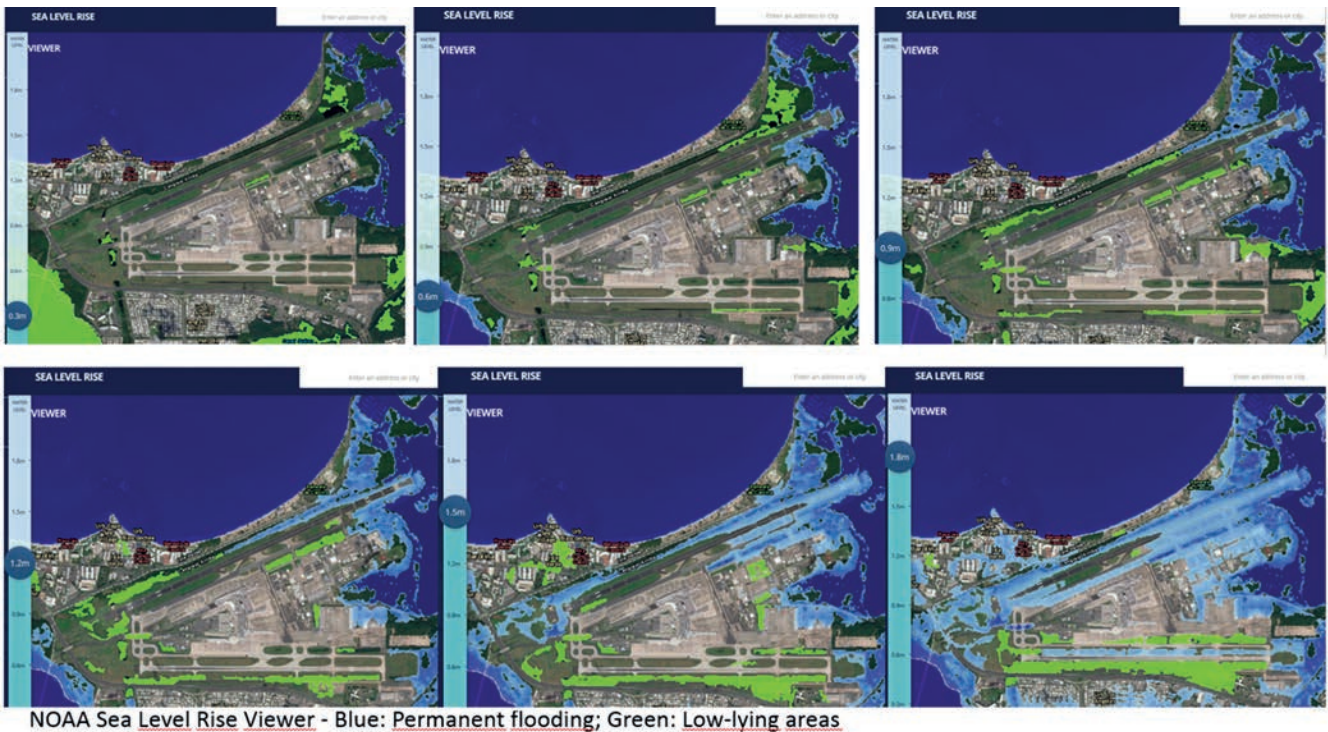


Figura 44. Inundación progresiva y permanente del mar en la región del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín en Carolina, PR. Cada panel corresponde a una elevación en el nivel del mar anticipada para el 2100.

Caja 3. Enfoque necesarios para combatir y manejar la erosión costera. Requiere de la colaboración entre todos los sectores incluyendo el federal, insular, municipal, privado y comunidades

- Determinar las tasas de erosión costeras presentes y proyectar las futuras a nivel insular.
- Hacer estudios puntuales de erosión costera al momento de tomar acciones específicas.
- Manejar los sedimentos a niveles regionales y locales.
- Desarrollar y adoptar standards de compatibilidad de sedimentos.
- Identificar mecanismos de financiación sustentables para lidiar con los problemas de erosión.
- Integrar mecanismos de mantenimiento a los proyectos de manejo de erosión e infraestructura.
- Fortalecer la colaboración entre las organizaciones con aportaciones significativas en asuntos relacionados al manejo de la costa incluyendo la Universidad de Puerto Rico, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, El Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera, y la Asociación Americana para la Preservación de la Playa y el Litoral.
- Modificar regulaciones, códigos de construcción y enfoques tradicionales de ingeniería para lidiar con los problemas costaneros.
- Desarrollar guías sobre las mejores prácticas de ingeniería costanera.

las playas. Resiliencia es la habilidad de prepararse antes del evento, planificar para absorber y recobrar-se de eventos extremos y adaptarse a los eventos más adversos que puedan afectar a las playas.

Los pasos para seguir un enfoque holístico serían:

- Identificar la condición de la playa.
- Identificar la causa de este comportamiento.
- Elegir estrategias que solucionen el problema a partir del escenario local enfocado en el concepto de resiliencia.
- Atacar el problema de erosión desde múltiples puntos de vista y a distintas escalas de análisis y acción (Caja 3).

Como país, necesitamos apoyar este enfoque holístico con un esfuerzo que considere todos los sistemas de playas y oleajes que tenemos. Tenemos que fomentar la preparación de órdenes ejecutivas, proyectos de ley, ordenanzas municipales y otras

directivas bajo el principio de costas resilientes y el escenario de cambio climático. Tal esfuerzo debe insertar activamente a las comunidades en los procesos de política pública costera (ciencia ciudadana).

Tácticas para lidiar con las playas, la Zona Marítimo Terrestre y el mar

La táctica menos costosa y efectiva es la zonificación de la zona costanera de acuerdo a las oportunidades y vulnerabilidades de sus distintos sectores. En Puerto Rico tenemos una larga tradición en el uso de la zonificación como herramienta principal para guiar el desarrollo sustentable de la economía. Lamentablemente el uso de esta herramienta no ha sido tan eficiente y efectiva como pudiese ser debido a la corrupción en la aplicación de los procesos.

Las restauraciones de sistemas no antropogénicos y estructuras afectadas por usos incorrectos de los terrenos es otra táctica disponible para el futuro. En este documento ilustramos cómo se pueden restaurar los arrecifes de coral (Apéndice 2) del país.

El diseño y construcción de estructuras que resistan inundaciones u olas de baja energía representan tácticas

Tabla 4. Costos de construcción o de mantenimiento significativo de rompeolas en los trópicos. Los proyectos con un largo de un metro reflejan que el reporte original reportó el costo por metro lineal solamente.

Sitio	Largo (m)	Año	Costo Original (\$)	Costo en 2012 (\$)	Costo por Metro Lineal (\$)
Sri Lanka	16,000	1994	13,400,000	20,759,511	1,297
Maldives	1	1997	10,000	14,305	14,305
Haleiwa, Hawaii	58	1975	150,000	640,132	11,037
Hilo, Hawaii	3,073	1946	1,500,000	17,661,077	5,747
Kalaupapa, Hawaii	35	1967	95,000	653,037	18,658
Kawaihae, Hawaii	808	1973	6,000,000	31,026,216	38,399
Manele, Hawaii	143	1965	742,850	5,414,410	37,863
Nawiliwi, Hawaii	152	1959	1,000,000	7,889,828	51,907
Pohoiki, Hawaii	27	1979	335,500	1,061,003	39,296
Auasi, American Samoa	206	1981	1,166,300	2,945,825	14,300
Anuu, American Samoa	27	1981	2,018,400	5,098,048	188,817
Tau, American Samoa	88	1981	2,020,400	5,103,099	57,990
Agana, Guam	221	1977	1,220,550	4,624,273	20,924
Sungai, Malaysia	1	2008	428	456	456
Korea	3,000	2010	124,000,000	130,561,214	43,520
Nakohon Si Thammarat, Thailand	40	2012	180,950	180,950	4,524

Tabla 5. Costo de proyectos de restauración de arrecifes de coral utilizando distintas técnicas de restauración.

Sitio	Año	Costo Original (\$/m ²)	Costo en 2012 (\$/m ²)	Costo por Metro Lineal (\$)
Maldives	1994	40	62	620
Maldives	1994	103	159	1,590
Maldives	1994	151	233	2,330
Maldives	1994	328	508	5,080
Florida	1991	550*	927	927
Florida	1994	10,000*	15,500	155,000
Indonesia	2005	5	6	60
Varios	2005	40	47	470
Varios	2005	70	82	820
Varios	2005	1.6-110	2-110	20-1,290

* Incluyeron estructuras en concreto.

donde decidimos no alejarnos del mar. En muchas ciudades la infraestructura inundada por el mar se ha restaurado elevándola sobre los niveles del mar anticipados. Aunque costosas, estas estrategias ya se discuten y se ponen a prueba soluciones alternas a la retirada de la costa.

Aspectos económicos de la situación actual de las playas

Actividades marinas son costosas debido a los efectos corrosivos del mar y los altos niveles de energía ante los cuales tienen que operar. Un ejemplo es el alto costo de la construcción y mantenimiento de rompeolas en el trópico (Tabla 4). Sin embargo, los costos de desarrollo y mantenimiento de arrecifes de coral artificiales son bajos en comparación (Tabla 5). Las estrategias de restauración de corales se ilustran con fotografías en el Apéndice 2 según se han utilizado en diversos lugares de Puerto Rico. Las lecciones aprendidas se resumen en la Caja 4.

La *Revista Ambiental Marejada* en su número 2 del volumen 16 del 2018 (disponible gratuita-

Caja 4. Lecciones aprendidas con la restauración de arrecifes de coral

- El cultivo de corales y la rehabilitación de arrecifes de coral se han convertido en herramientas de manejo con múltiples objetivos:
- ▷ Restauración poblacional de especies amenazadas.
 - ▷ Rehabilitación de las funciones ecológicas de la comunidad béntica arrecifal (hábitat esencial de peces, sumidero de CO₂, protección de la costa).
 - ▷ Reconstrucción paisajista (mosaico de habitats, turismo).
 - ▷ Rehabilitación de la comunidad de peces (biodiversidad).
 - ▷ Restauración de la redundancia funcional (corales – crecimiento del arrecife; peces – herbivoría).
 - ▷ Reestructuración de la condición trófica y productividad del arrecife (pesca).
 - ▷ Fomentar la integración y participación comunitaria en el manejo del recurso.
 - ▷ La conservación y rehabilitación de los arrecifes de coral es fundamental para la conservación de las playas.
 - ▷ El cultivo de corales y la rehabilitación de arrecifes de coral deben **integrarse** a las estrategias de protección de la costa.
 - ▷ Solo un **arrecife saludable y productivo** puede brindar una protección efectiva.

mente del Programa Sea Grant en el Recinto de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico) contiene artículos sobre la restauración de playas en Puerto Rico. Las actividades de restauración no solo ayudan en la protección de la costa, sino que tienen efectos económicos multiplicadores en la sociedad (Fig. 45).

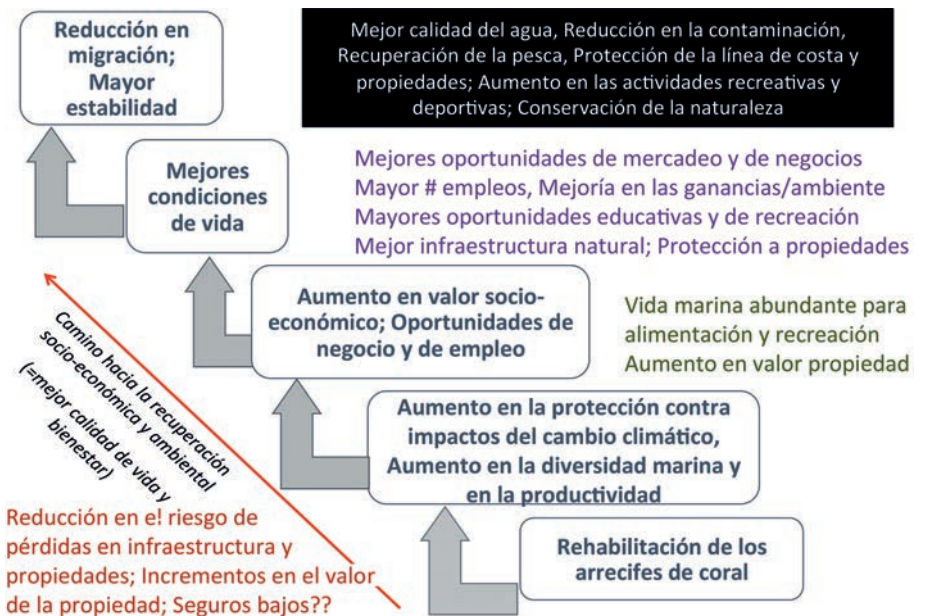


Figura 45. Cadena de eventos y consecuencias ambientales asociados a la restauración de arrecifes de coral.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es producto de una colaboración de los autores con los residentes y oficiales de Palmas del Mar y la Universidad de Puerto Rico. Apreciamos especialmente la ayuda de la Dra. Sandra Gracia López y la Sra. Rita Molinelli Freytes.

REFERENCIAS

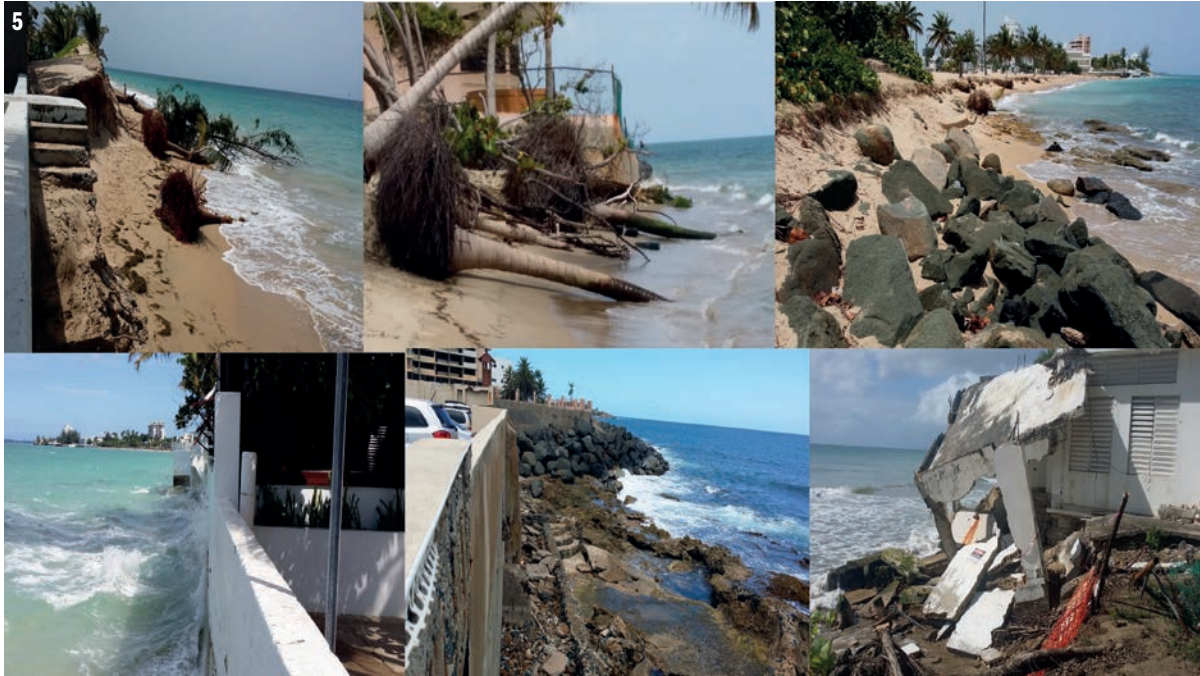
- Barnard, P. L., D. Hoover, D. M. Hubbard, A. Snyder, B. C. Ludka, J. Alllan, G. M. Kaminsky, P. Ruggiero, T. W. Gallien, L. Gabel, D. McCandless, H. M. Weiner, N. Cohn, D. L. Anderson y K. A. Serafin. 2017. Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015-2016 El Niño. *Nature* DOI:10.1038/ncomms14365:8.
- Barreto Orta, M., R. Méndez Tejada, E. Rodríguez, N. Cabrera, E. Díaz, and K. Pérez. 2019. State of the beaches in Puerto Rico after Hurricane Maria (2017). *Shore & Beach* 87:16-23.
- Ferrario, F., M. W. Beck, C. D. Storlazzi, F. Micheli, C. C. Shepard, and L. Airoidi. 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications* 5:Article number: 3794.
- Jackson Jr., C. W., D. W. Bush, and W. J. Neal. 2006. Gabions, a poor design for shore hardening: the Puerto Rico experience. *Journal of Coastal Research* SI 39:852-857.
- Lugo, A. E., A. Ramos Álvarez, A. Mercado, D. L. L. Feliciano, G. Cintrón, L. Márquez D'Acunti, R. Chaparro, J. Fernández Porto, S. J. Peisch y J. Rivera Santana. 2004. Cartilla de la zona marítimo-terrestre. *Acta Científica* 18:1-148.
- Lugo, A. E., L. Miranda Castro, A. Vale, T. del M. López, E. Hernández Prieto, A. García Martínó, A. R. Puente Rolón, A. G. Tossas, D. A. McFarlane, T. Miller, A. Rodríguez, J. Lundberg, J. Thomlinson, J. Colón, J. H. Schellekens, O. Ramos y E. Helmer. 2001. Puerto Rican karst - A vital resource. USDA Forest Service, General Technical Report WO-65, Washington, DC.
- McKee, K. L., D. R. Cahoon, y I. C. Feller. 2007. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation. *Global Ecology and Biogeography* 16:545-556.
- Mercado Irizarry, A. 2017. Sea level rise around Puerto Rico; a projection. University of Puerto Rico at [Mayagüez](#), Mayagüez, PR.
- Nicholls, R. J. y A. Cazenave. 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* 318:1517-1520.
- Stocking, J. B., J. P. Rippe, and M. A. Reidenbach. 2016. Structure and dynamics of turbulent boundary layer flow over healthy and algae-covered corals. *Coral Reefs* 35:1047-1059.
- Storlazzi, C. D., E. Elias, M. E. Field, and M. K. Presto. 2011. Numerical modeling of the impact of sea-level rise on fringing coral reef hydrodynamics and sediment transport. *Coral Reefs* 30 (Supplement 1):83-96.
- Yi, S., W. Sun, K. Heki, y A. Quian. 2015. An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010. *Geophysical Research Letters* 42:3998-4006.

Apéndice 1

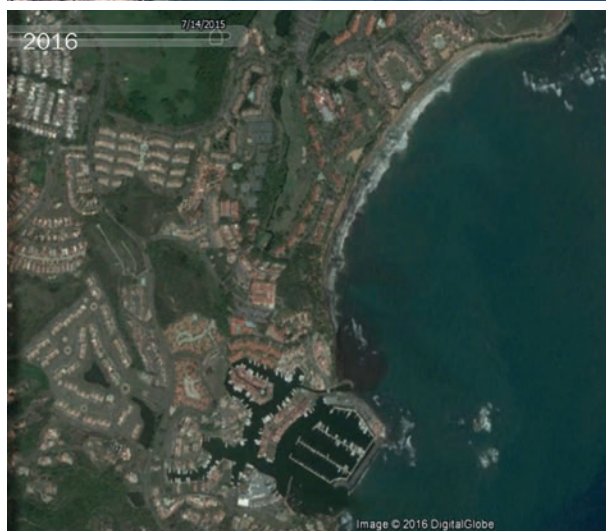
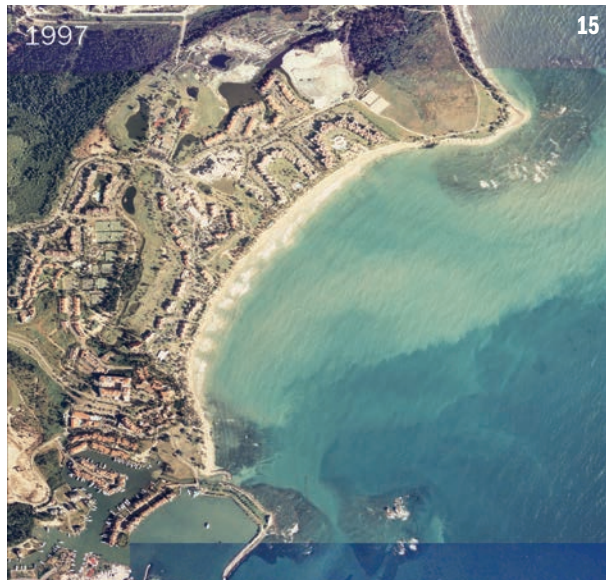
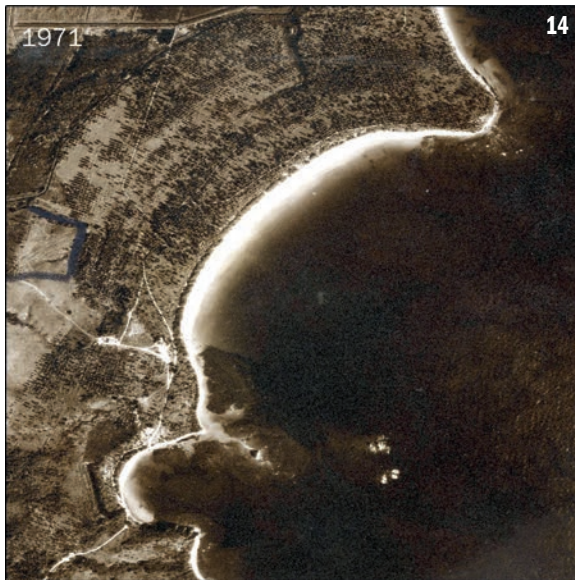
Fotos ilustrativas de la situación en Puerto Rico referente a la subida del nivel del mar y las estructuras e infraestructura vulnerable a los embates del mar. Utilizando el número de la diapositiva, se ilustran las siguientes situaciones. Arrecifes de coral antes y después del paso del huracán María (1). Varios ejemplos de como quedaron las estructuras y playas después del huracán y las marejadas (2-5). Entrada del mar sobre la playa y duna en la zona del último trolley en San Juan (6). La variación histórica de la orilla de la playa (líneas en colores) en Punta

las Marías, zona metropolitana de San Juan (7-9). Variación histórica de las playas en el Barrio Candeleiro, Palmas del Mar, Humacao (10-17). Las famosas playas de Rincón después de huracanes y marejadas (18-40). La inefectividad de gaviones se ilustra en las fotos 30 y 31. La secuencia 32 a 35 ilustra un lugar específico donde el uso de maquinarias no pudo salvar la playa ni las estructuras. A pesar de todo, continua la construcción en estos lugares (40).

















Apéndice 2

Fotos ilustrativas de técnicas para la restauración de arrecifes de coral en Puerto Rico. El número de signos de dólares representa la magni-

tud del costo estimado con \$ representando el menor costo y \$\$\$\$ el mayor.

Estrategias de cultivo de corales - \$

Unidades de alambre revestido (Culebra-SAM)

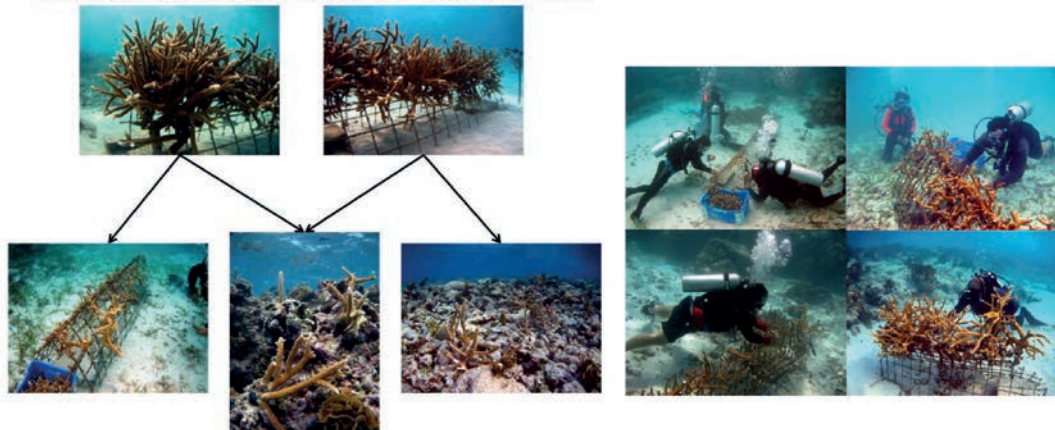


Unidades de "árboles"-NOAA



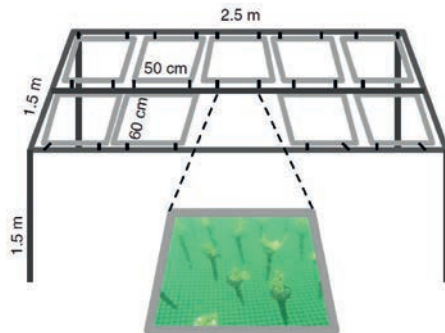
Estrategias de cultivo de corales - \$

Unidades de alambre "A-frames" (Culebra-SAM)



Estrategias de cultivo de corales - \$

Mesas y mallas (Bongiorni et al., 2011)



Cultivo de corales en clavos plásticos (Horoszowski-Fridman et al., 2015)



Estrategias de cultivo de corales - \$

Armazones de PVC



Estrategias de cultivo de corales - \$

Unidades de cuerdas



Estrategias de cultivo de corales - \$\$

Unidades de bloques de concreto (Florida)



Unidades de plataformas de concreto



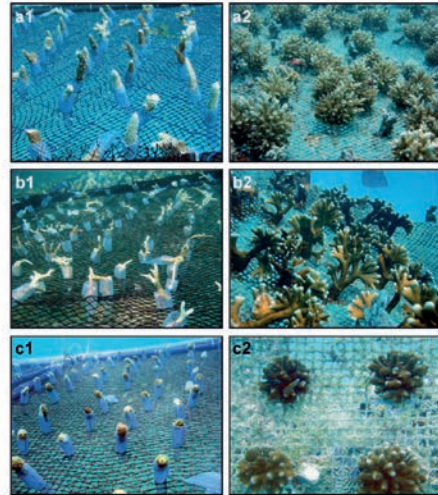
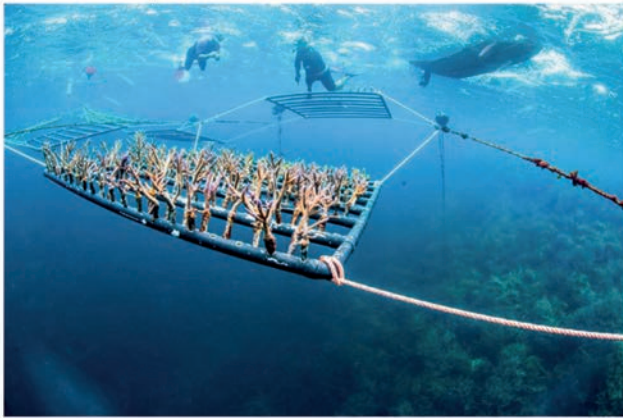
Estrategias de cultivo de corales - \$\$

Mesas de cultivo de corales – Indo-Pacífico



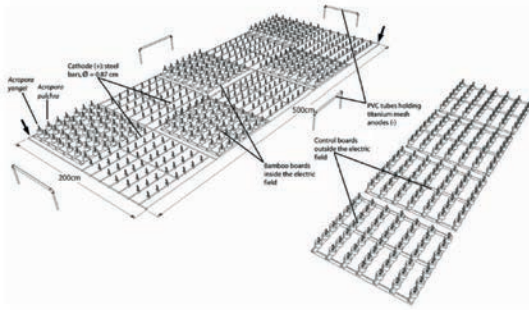
Estrategias de cultivo de corales - \$\$

Mesas y redes flotantes

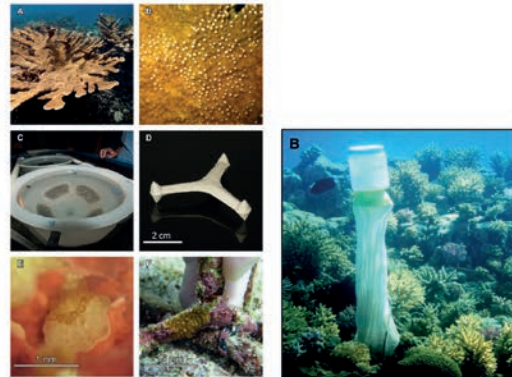


Estrategias de cultivo de corales - \$\$\$\$\$

Matriz de alambre de cátodo – campo eléctrico (Borell et al., 2010)

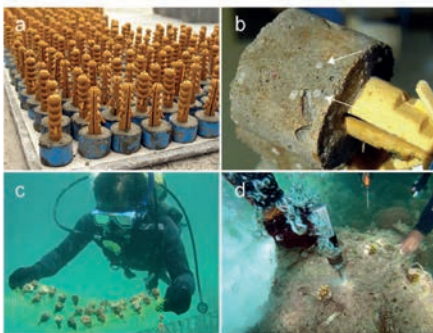


Coleccion de gametos, fecundación *in vitro* y cultivo de larvas (Chamberland et al., 2015)



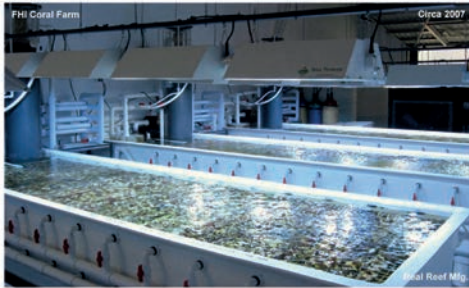
Estrategias de cultivo de corales - \$\$\$\$\$

Coleccion de gametos, fecundación y asentamiento de larvas *in vitro* y trasplantes (Guest et al., 2014)



Estrategias de cultivo de corales - \$\$\$\$\$

Cultivo *ex situ* de corales



Estrategias de restauracion de arrecifes- \$

Trasplantes directo al arrecife



Estrategias de restauracion de arrecifes- \$

Trasplantes directo al arrecife



Montículos de carricoche



"Floreros" de concreto



Paneles de "galletas"

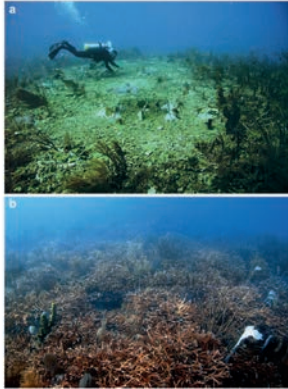
Estrategias de restauracion - \$\$

Crecimiento de corales en unidades modulares



Estrategias de restauracion - \$\$\$

Construcción de parches (Griffin et al., 2015)



Construcción de sustratos artificiales



Estrategias de restauracion - \$\$\$

Sustratos artificiales de Armorflex (Clark & Edwards, 1995)



Sustratos artificiales rocosos (Fox & Pet, 2001)



Culebra – Programa Comunitario de Acuicultura de Corales y Rehabilitación de Arrecifes

