Universidad de Puerto Rico
Recinto Universitario de Mayagüez,
P.O. BOX 9000
Mayagüez PR 00681-9000
Tel: (787) 832-4040

Reconocimiento de la Erosión Costera en el Municipio de Rincón, P.R. y su Futuro Efecto Sobre la Infraestructura del Lugar

Rubén A. García[1], Carolina Rodríguez[2]
Departamento de Ingeniería de Civil[1], Departamento de Geología[2]

Abstracto

Durante las pasadas décadas el Planeta Tierra ha experimentado un aumento gradual en su temperatura promedio anual. Como efecto directo, el aumento de la temperatura promedio ha provocado un aumento en el nivel de mar. Un aumento en el nivel de mar coloca en una posición de vulnerabilidad la estabilidad las zonas costeras. Aunque con variaciones por regiones, todas las costas a nivel Mundial han experimentado una pérdida de extensión debido al problema de erosión. En Puerto Rico son evidentes los efectos que ha tenido este fenómeno sobre nuestras costas e infraestructura. Estudios previos han mostrado que el municipio de Rincón es uno de los más afectados por este fenómeno. Como interés de estudio, se cuantificó la pérdida de línea de costa para dos regiones en Rincón, P.R. durante las últimas 6 décadas. Las zonas de estudio son: Bahía Tres Palmas y Playa Córcega. Además se determinó una proyección de dónde podría estar la línea de costa para el año 1965 de continuar el actual ritmo de pérdida. Finalmente se evaluó el comportamiento de expansión urbana durante el mismo periodo de tiempo para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura actual del lugar. Para realizar este estudio se obtuvieron dos fotografías aéreas de la región para los años 1950 y 1987, así como una imagen del sensor IKONOS del 2010. Las fotografías y la imagen se procesaron y analizar utilizando herramientas del programa de procesamiento de imágenes ENVI.

Palabras claves: ENVI, Erosión de Costas, Puerto Rico, Calentamiento Global

1. Introducción

Desde la Revolución Industrial la humanidad ha explotado las reservas de petróleo alrededor del Mundo. El petróleo ha sido un recurso indispensable para el desarrollo de países durante el último siglo, en especial para los países que pasaron por el proceso de desarrollo. La quema de petróleo para producir energía eléctrica y para el funcionamiento de los vehículos de motor libera CO_2 a la atmósfera. El CO_2 es conocido como un agente de efecto invernadero, es decir, este gas retiene la radiación proveniente de la Tierra y ayuda a mantener más caliente la temperatura del Planeta. Sin embargo, la cantidad de CO_2 que se ha liberado durante las últimas décadas ha provocado un aumento excesivo en la temperatura promedio de la Tierra. Esta radiación adicional que está siendo atrapada por nuestra atmosfera ha ayudado a aumentar la temperatura del océano.

Este aumento en la temperatura del océano ha provocado un aumento en el nivel promedio del Mar por dos razones principales. La primera razón es la característica del agua a expandirse según se aumenta su temperatura. El océano se ha ido calentando y por ende también expandiendo en volumen, esto provoca un aumento en el nivel del Mar. La segunda razón, y la más influyente, es que los glaciares alrededor del mundo se están derritiendo. Estos glaciares contienen aproximadamente un 2% del agua en el Planeta, equivalentes a 5 millones de millas cubicas de hielo. De derretirse todo el hielo en la Tierra, el nivel del mar aumentaría unos 216 pies. Afortunadamente faltarían unos 5,000 años para que esto suceda. Aun así, se estima que el nivel del mar ha aumentado a una razón de 3 mm por año. Se estima que por cada 1 mm de aumento en el nivel del mar, se pierden 1 pies de línea de costa.

Aunque con algunas variaciones en magnitud, la pérdida de costa debido al aumento en el nivel del Mar es un fenómeno que se está dando a nivel mundial. Esto ha

puesto en riesgo la infraestructura civil costera de muchos países. Infraestructura se define como el *"comportamiento de elementos o servicios que se consideran necesarios para el funcionamiento de una organización o para el desarrollo de una actividad".* En este estudio el término de infraestructura civil se refiere al desarrollo urbano de edificios, residencias, carreteras, servicios y cualquier edificación necesaria para el funcionamiento de una sociedad.

Puerto Rico no es la exención a este fenómeno, y se ha podido evidenciar la existencia del problema en diferentes municipios costeros de la Isla. Este tema se ha convertido en uno de mucho debate debido a los efectos adversos que puede tener sobre la economía local y la seguridad de los ciudadanos. Uno de los municipios más afectados por el aumento del Mar es Rincón. Con intenciones de medir la magnitud del impacto, se decidió estudiar la evolución de línea de costa durante los últimos 60 años en un sector del municipio antes mencionado. El sector seleccionado para estudio es la Bahía Tres Palmas y la Playa Córcega. Esta región fue seleccionada debido a que es la zona adyacente a donde se encuentra la mayoría de la zona urbana del lugar.

Para este estudio se utilizaron tres fotografías aéreas del 1950, 1987 y 2010. Estas fotografías fueron suministradas por el Departamento de Recursos Naturales de Puerto Rico y el Profesor Fernando Gilbes (Catedrático de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez). Además se utilizó una imagen del sensor IKONOS del 2010. IKONOS es un sensor de alta resolución operado por "DigitalGlobe". Sus capacidades incluyen la captura de una multiespectral de 3.2 m de infrarojo cercano y de 0.82 m de resolución pancromática. El sensor lleva operando más de siete años y toma imágenes cada tres días del mismo lugar. Cada 24 horas da 14.7 vueltas a la Tierra. Tiene en total 5 bandas (pancromática, visible, infrarrojo cercano). Su órbita está a 681 km de altitud y contiene 11 bits por pixel.

Estas fotografías e imágenes se procesaron utilizando el programa de procesamiento de imágenes ENVI. Las herramientas de ENVI permiten delimitar la línea de costa para cada fotografía e imagen y comparar la evolución durante el tiempo. Con el promedio de pérdida de costa durante este periodo, se puede estimar cuánto más se perderá durante los próximos años. Las imágenes permiten evaluar la evolución de la expansión urbana. Con esta información se pueden realizar recomendaciones de cómo mitigar los efectos adversos en la región.

2. Metodología

2.1 Archivos y Data

Se obtuvieron sobre 50 fotografías aéreas de la costa noroeste de Puerto Rico durante los años entre 1936 hasta el 1987. Las imágenes del 1936 tenían poca resolución y no pudieron ser utilizadas para el estudio. Por tal razón se decidió utilizar una fotografía del 1950 como punto de referencia inicial (ver imagen 1). La pérdida de costa es un proceso lento, por lo cual es necesario tener un lapso largo de tiempo para poder identificar cambios significativos. Por esto se decidió elegir una fotografía del 1987 (ver imagen 2), que proveía un lapso de 37 años. Además, se utilizó una fotografía aérea del 2010 como referencia final, esta proveía un lapso de 23 años (ver imagen 3). La imagen de IKONOS del 2001 se utilizó para ser comparada con la fotografía aérea del 2010 con propósitos de identificar patrones de expansión urbana en la región de interés.

Imagen 1: Fotografía aérea cruda de 1950. Costa noroeste de Puerto Rico.

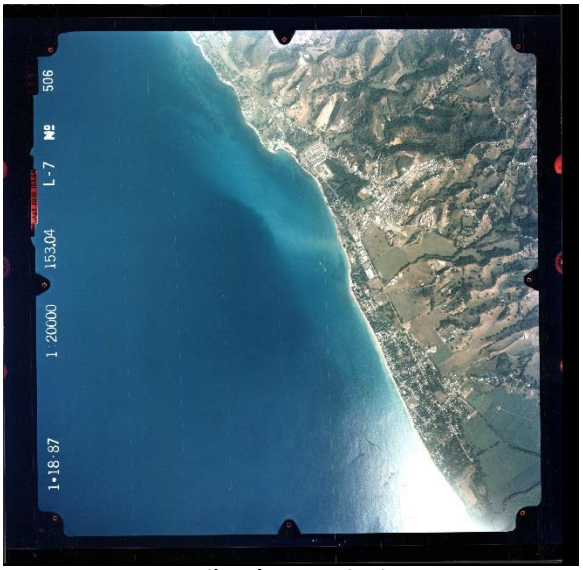

Imagen 2: Fotografía aérea cruda de 1987. Costa noroeste de Puerto Rico.

Imagen 3: Fotografía aérea cruda de 2010. Costa noroeste de Puerto Rico.

2.2 Procesamiento en ENVI

Las tres fotografías aéreas se abrieron en el programa ENVI. Las fotografías del 1950 y 1987 no estaban georeferenciadas. Para georeferenciarlas, se utilizó la fotografía georeferenciada del 2010 (UTM zona 19 N). Para esto se usó la herramienta de "Registration Image to Image" utilizando "Ground Control Points". Se seleccionaron un total de 9 "Ground Control Points" para georeferenciar la fotografía del 1950. Para la fotografía del 1987 se utilizaron un total de 12 "Ground Control Points". Para validar los resultados se hizo un "link display" para todas las fotografías. Una vez georeferenciadas las fotografías, se realizó un corte espacial hacia la región de interés. Para esto se utilizó la herramienta de "Spatial Subset".

La herramienta de "ROI" permitió marcar la línea de costa para todas las fotografías e imágenes. Para la fotografía del 1950 la línea de costa se determinó basado en la diferencia de color blanco/negro en la costa. Las fotografías del 1987 y 2010 tenían mayor resolución en comparación con la del 1950, esto permitió poder delimitar la línea de costa basándose en la línea seco/mojado de la arena.

Una vez delimitada la línea de costa para cada fotografía, se exportó cada "ROI" como

un “EVF” y cada archivo fue abierto en la fotografía del 2010. Esto permitió comparar las variaciones de la línea de costa durante el periodo de estudio.

Al comparar las variaciones de costa se pudo identificar dos regiones con patrones distintos. Se decidió estudiar cada región por separado. Para esto se realizó otro corte espacial a cada fotografía, uno enfocado en la Bahía Tres Palmas y otro en la Playa Córcega.

Utilizando la herramienta de “Measurement Tool” se midió la diferencia lineal de la línea de costa con el tiempo. Para ello se seleccionaron varios puntos a lo largo de la costa y se obtuvo un valor promedio de pérdida de costa por año. Estos valores fueron utilizados para estimar cual sería la línea de costa para el año 2065.

Por último, para poder comparar la evolución de expansión urbana en la región, se realizó un corte espacial cerca del área urbana en la imagen de IKONOS de 2001 y la fotografía aérea de 2010.

3. Resultados

A continuación se muestra cada fotografía aérea con sus respectivos “ROI”, que delimitan la línea de costa.

Imagen 4: Delimitación de línea de costa para el año 1950.

Imagen 5: Delimitación de línea de costa para el año 1987.

Imagen 6: Delimitación de línea de costa para el año 2010.

La imagen 7 muestra todos los “ROI” de las fotografías aéreas sobrepuestas en la fotografía del 2010.

Imagen 7: Variación de Línea de Costa para los 1950, 1987, 2010 en Rincón, PR.

La siguiente imagen muestra el corte que se realizó a la Bahía Tres Palmas, con los “ROI” que delimitan la variación de la línea de costa sobrepuestos en la fotografía del 2010.

Imagen 8: Bahía Tres Palmas Rincón, PR. con la variación de línea de costa por año.

La siguiente tabla muestra la perdida lineal de costa por periodo en la Bahía Tres Palmas, Rincón, PR.

Período	Pérdida de Playa Promedio(ft)	Pérdida de costa por año (ft/año)
1950-1987	41	1.1
1987-2010	19.8	0.9
1950-2010	60.8	1

Tabla 1: Pérdida de Costa durante el periodo 1950 al 2010 en la Bahía Tres Palmas, Rincón, PR.

Se estima que a un ritmo de 1 pies/año, para el 2065 pierdan 50 pies de costa adicionales. La siguiente imagen muestra una proyección de lo que sería la línea de costa para el año 2065.

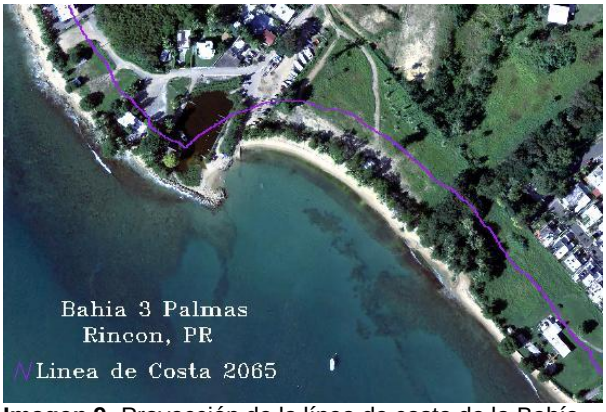

Imagen 9: Proyección de la línea de costa de la Bahía Tres Palmas para el 2065.

La siguiente imagen muestra el corte que se realizó a la Playa Córcega, con los "ROI" que delimitan la variación de la línea de costa sobrepuestos en la fotografía del 2010.

Imagen 10: Playa Córcega mostrando las variaciones de línea de costa en los años 1950, 1987, 2010.

La siguiente tabla muestra la perdida lineal de costa por periodo en la Bahía Tres Palmas, Rincón, PR.

Período	Pérdida de Playa Promedio (ft)	Pérdida de costa por año (ft/año)
1950-1987	150.1	4.1
1987-2010	86.1	3.7
1950-2010	236.6	3.9

Tabla 2: Pérdida de Costa durante el periodo 1950 al 2010 en la Playa Córcega, Rincón, PR.

A un ritmo de 3.9 pies/año, para el 2065 se estima que se pierdan 195 pies de costa adicionales en la Playa de Córcega. La siguiente imagen muestra una proyección de lo que sería la línea de costa para el 2065, está representada por una línea de color violeta.

Imagen 11: Proyección de la línea de costa de la Bahía Tres Palmas para el 2065.

Las siguientes dos imágenes muestran un ejemplo la evolución de la expansión urbana cercano a la Bahía Tres Palmas durante el periodo de 2001-2010. Es evidente ver cómo en tan sólo 9 años se han desarrollado un sin número de proyectos cerca de la costa. Según el estimado de la línea de costa para el 2065, mucha de esta infraestructura quedará bajo el agua.

Imagen 12: Imagen de IKONOS del 2001. Región cercana a la Bahía Tres Palmas.

Imagen 13: Fotografía aérea del 2010. Región cercana a la Bahía Tres Palmas.

Luego de haber notado una diferencia en el ritmo de pérdida de costa entre la Bahía Tres Palmas y la Playa Córcega, se decidió buscar explicaciones a este fenómeno.

Mirando las imágenes y fotografías aéreas de la región, podemos identificar la presencia de arrecifes de corales cercanos a la costa de la Bahía Tres Palmas. Por otro lado la Playa Córcega carece de arrecifes de corales cerca de la costa. Se presume que puede haber una relación directa entre la presencia de arrecifes de corales y la reducción en pérdida de costa.

Por otro lado se decidió evaluar las características de las corrientes marinas en la región. Para esto se utilizaron datos del "Caribbean Coastal Ocean Observing System", mejor conocido como CariCOOS.

La imagen 14 muestra la dirección del oleaje y corrientes en la región noroeste de Puerto Rico. Cuando nos acercamos a la zona de interés (ver imagen 15), notamos que las corrientes y el oleaje son más fuerte cerca de la Playa Córcega (flecha verde) en comparación con el oleaje y corrientes en la Bahía Tres Palmas (flecha roja). Este comportamiento está atado a la geografía del lugar y la presencia de sistemas naturales como los arrecifes de coral. Se presume una relación directa entre la intensidad del oleaje y corrientes con la perdida de costa en el lugar.

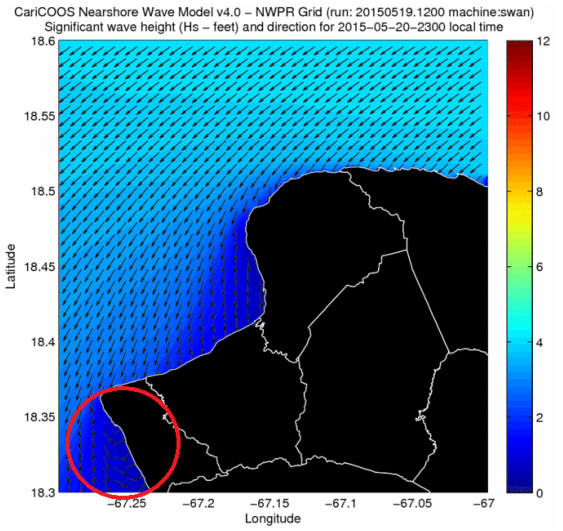

Imagen 14: Imagen del modelo de corriente marina de CariCOOS para la región noroeste de Puerto Rico.

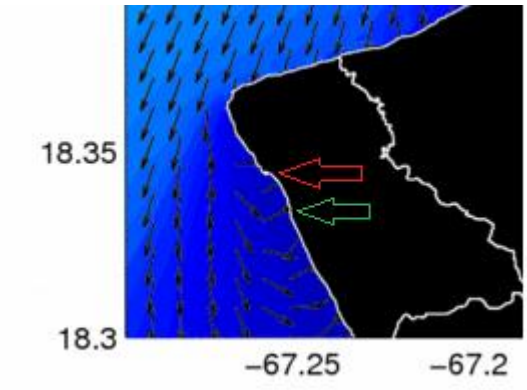

Imagen 15: Imagen agrandada del modelo de corriente marina de CariCOOS para la región de interés.

4. Conclusión

Es evidente la pérdida de costa que ha habido en la zona de Rincón, P.R. durante las últimas seis décadas. A pesar del riesgo que representa este fenómeno para la zona, se siguen construyendo nuevos proyectos en el área cercana a la costa. Muchas de estas obras de construcción se han realizado dentro de lo que se identificó como la zona en riesgo a estar bajo agua para el 2065. Es indispensable tener un plan de acción para evitar nuevos proyectos de construcción en la zona.

El ritmo de pérdida de costa anual parece tener un comportamiento constante durante los pasados 60 años, sin embargo se nota un ritmo de perdida de costa mayor para la Playa Córcega en comparación con el de la Bahía Tres Palmas.

Luego de haber evaluado las características del lugar, se propone que la presencia de arrecifes de corales protege a la costa de la erosión. La erosión de playas ocurre debido a la corriente litoral. Se conoce que los arrecifes de coral tienen un efecto de disipar la energía de este tipo de corriente. Se puede concluir que los arrecifes de coral han protegido la zona de la Bahía Tres Palmas, a diferencia de la Playa Córcega.

Luego de evaluar el patrón de corrientes y oleaje según el sistema de “CariCOOS”, se puede concluir que la geografía del lugar tiene un efecto importante en mitigar o aumentar el ritmo de perdida para una región en particular.

5. Recomendaciones y futuros trabajos

Para entender mejor el proceso de perdida de costa debido al aumento en el nivel del mar, se recomienda evaluar el comportamiento de la corriente litoral en

diferentes épocas del año. También se puede estudiar más a fondo el efecto que puede tener la presencia de arrecifes de corales y la geomorfología en la zona de estudio.

Nuevos estudios en diferentes regiones de Puerto Rico se deben llevar a cabo para entender más de fondo el problema. Sería ideal comparar variaciones en diferentes puntos de la Isla con características geográficas distintas.

6. Referencias

- Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (CCCPR). 2013. Estado del Clima de Puerto Rico 2010- 2013 Resumen Ejecutivo: Evaluación de vulnerabilidades socio-ecológicas en un clima cambiante, VERSIÓN ELECTRÓNICA. Programa de Manejo de la Zona Costanera, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, Oficina de Océanos y Recursos Costeros (NOAA-OCRM). San Juan, PR: pp. 27.

- Gómez, 2003, Reconocimiento de la erosión costera en el municipio de Rincón, P.R. y sus efectos en sobre la infraestructura [M.S. Tesis], Mayagüez, Universidad de Puerto Rico.