

# ***Desarrollo de Mapas en GIS para Futura Planificación en Áreas de Impacto debido al Aumento del Nivel del Mar en Puerto Rico***

*Hecmarie Rodríguez Crespo  
Maestría en Ingeniería Civil  
Dr. Christian A. Villalta Calderón  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

---

**Resumen** - *El fenómeno del Calentamiento Global es un tema de mucha importancia mundialmente, por tal razón, necesitamos estudiar y conocer los efectos en nuestra Isla de Puerto Rico y las áreas de mayor impacto. Nuestro objetivo, es investigar las áreas susceptibles debido al aumento del nivel del mar en Puerto Rico, conocer el efecto en los lugares de importancia para el turismo, la agricultura, los acuíferos (aguas subterráneas), estructuras, entre otros ambientes. En base a esto, se desarrollarán varios mapas que reflejan e identifican las áreas impactadas que deben ser considerados en la toma de decisiones y planificación futura, a la hora de implementar un nuevo proyecto de construcción y/o mitigar proyectos existentes.*

**Palabras claves** – *ArcGIS ArcMap 10.1, Aumento del Nivel del Mar, Calentamiento Global, Mapas de Puerto Rico.*

## **INTRODUCCIÓN**

Uno de los efectos más notables debido al Calentamiento Global es el aumento del nivel del mar, como habitantes de una Isla debemos y estamos obligados como País a conocer el impacto en Puerto Rico. Así como otros países del mundo implementan proyectos, construcciones y mega estructuras de acuerdo a sus necesidades y desventajas geográficas, Puerto Rico debe planificar teniendo en cuenta su huella territorial y como ésta cambiará en función del tiempo. En base a esto, hemos creado una serie de mapas utilizando el programa ArcGIS, donde se busca ver el efecto del aumento del nivel del mar en uno, dos y tres metros (1m, 2m y 3m) de elevación y se identifican las áreas más susceptibles a ser impactadas e inundadas, en varios de los municipios costeros.

## **JUSTIFICACIÓN**

El proyecto busca crear consciencia y tiene como objetivo el visualizar las áreas que serán impactadas debido al aumento del nivel de mar en Puerto Rico. Como es de conocimiento, el aumento del nivel del mar se debe al fenómeno del Calentamiento Global, como ciudadanos y profesionales tenemos la obligación de informarnos y planificar en un futuro, cómo vamos a combatir o adaptarnos a los efectos producidos por el cambio climático. Los efectos del Calentamiento Global no se reflejan a corto plazo, pero sí podemos retardar los impactos en el mundo para las futuras generaciones. Según informa anualmente el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) compuesto por cientos de científicos a nivel mundial, los incrementos proyectados al año 2100 (RCP4.5: 0.35m a 0.70m) está superpuesto a eventos extremos en el nivel del mar (por ejemplo: oleaje y marea alta a causa de tormentas, oscilación sur del fenómeno El Niño) lo cual presenta inundaciones severas por el nivel del mar y riesgos de erosión en los puntos más bajos de las áreas costeras e islas atolón (*alta confianza*). Igualmente, hay *alta confianza* en que el lavado de las olas de agua de mar, degrade los recursos de agua dulce subterránea y el aumento de la temperatura de la superficie del mar, resultará en el aumento del blanqueamiento de los corales y degradación de los arrecifes. Del mismo modo en el Caribe, la elevación equivalente del aumento del nivel del mar proyectado de 1 metro, ha sido superpuesto en mapas topográficos para estimar que del 49 al 60% de propiedades de complejos turísticos, estaría en riesgo de daños por erosión de las playas, transformación potencialmente de la posición competitiva y la sostenibilidad de los destinos turísticos costeros en la región (Scott et al.,

2012c). Las proyecciones en el aumento del nivel del mar para las regiones de islas pequeñas, son similares a las proyecciones globales de 0.41 a 0.71 metros, en un rango de 0.5 a 0.6 para el año 2100 comparado con los años de 1986 a 2005 en el Mar Caribe. [1] El objetivo principal es identificar en detalle algunas de las áreas de impacto significativo en nuestra Isla de Puerto Rico, teniendo presente no sólo el impacto en nuestras playas, sino en áreas como la economía producida por el turismo, la industria de la agricultura, los acuíferos (aguas subterráneas) y edificaciones de importancia. Para llevar a cabo estas proyecciones, es importante construir diferentes mapas que reflejen el aumento del nivel del mar y describir el proceso para conocer el procedimiento ejecutado. Estos mapas proyectarán el aumento del nivel del mar en uno, dos y tres metros de elevación (1m=3.28', 2m=6.56' y 3m=9.84') y se realizarán utilizando el programa de sistemas de información geográfica ArcGIS (ArcMap versión 10.1). Una de las ventajas de utilizar el programa, es aprender a manejar la información de campo suministrada de Puerto Rico para visualizar y comparar el mapa de Puerto Rico actual de huella aproximada 100 x 35 millas, con los mapas de la huella territorial reducida a causa de la elevación del mar. En cierto modo, entender la reducción territorial que ocurre paulatinamente nos ayuda a la planificación de proyectos futuros y mejor toma de decisiones.



Preparado por: Hecmaria Rodríguez  
 CE 6905-27 Proyecto de Maestría en Ingeniería Civil  
 Universidad Politécnica de Puerto Rico

Figura 1

Diagrama de Flujo para Metodología del Proyecto

## REVISIÓN DE LITERATURA

La actividad antropogénica y el efecto de la emisión de gases derivados del petróleo como el

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo cual se produce en la combustión del carbón, es una de las razones significativas del aumento del cambio climático; debido que es una serie de eventos, que ha creado una cadena de impacto acelerado en los últimos años. El aumento en la temperatura provoca el derretimiento de los glaciares, lo cual a su vez aumenta el nivel del mar y se refleja a través del planeta Tierra. [2]



Figura 2

Muestra de Emisiones de CO<sub>2</sub> a la Atmósfera

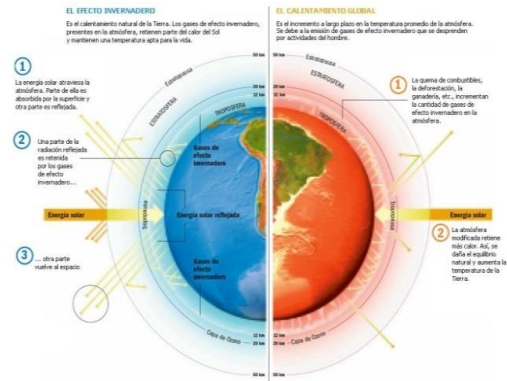


Figura 3

Efectos del Calentamiento Global

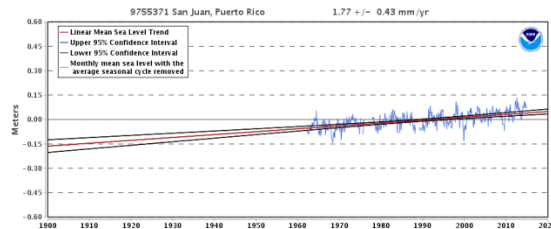
El clima de la Tierra ha aumentado 1°C (1.8°F) en los últimos 100 años, el nivel del mar ha aumentado acerca de 1 a 2 milímetros por año debido a la reducción en volumen de los glaciares y superficies de hielo. Por ejemplo en Islandia, cerca del 11 por ciento de la isla está cubierta por glaciares, si el Calentamiento Global continúa, los glaciares de Islandia disminuirían 40 por ciento para el año 2100 y desaparecerían para el año 2200. Actualmente la mayor parte de la masa de hielo

terrestre mundial se encuentra en la Antártida y capas de hielo en Groenlandia. La fusión completa de estas capas de hielo podría conducir a un aumento del nivel del mar estimado de unos 80 metros, mientras que la fusión de todos los demás glaciares podría llevar a un aumento del nivel del mar de sólo medio metro. [3]

**Tabla 1**  
**Estimado Potencial Máximo del Aumento del Nivel del Mar de la Fusión Total de los Glaciares en la Actualidad**

Location	Volume (km <sup>3</sup> )	Potential sea-level rise, (m)
East Antarctic ice sheet	26,039,200	64.80
West Antarctic ice sheet	3,262,000	8.06
Antarctic Peninsula	227,100	.46
Greenland	2,620,000	6.55
All other ice caps, ice fields, and valley glaciers	180,000	.45
Total	32,328,300	80.32

El programa de Mareas y Corrientes (“Tides & Currents”) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (“National Oceanic and Atmospheric Administration”, NOAA por sus siglas en inglés) informa que la tendencia del nivel del mar reflejado en la estación 9755371 en San Juan, es de 1.77 mm/año con un intervalo de confianza de +/- 0.43 mm/año basado en la data de los años 1962 hasta 2013, lo cual es equivalente a 0.58 pies en 100 años. [4]



**Figura 4**  
**Tendencia Nivel Medio del Mar**  
**Estación 9755371 San Juan, Puerto Rico**

El Calentamiento Global se refleja en muchas áreas, tanto social, ambiental y en la economía. Los efectos de mayor importancia es el aumento del nivel del mar y el aumento de la temperatura. El efecto al aumentar el nivel del mar en nuestra Isla de Puerto Rico, afectaría estructuras en las áreas de niveles bajos (área costera) o áreas inundables, y los acuíferos (aguas subterráneas) por la intrusión

salina, dañando el suministro de agua fresca y áreas de captación. También afectaría los suelos donde se lleva a cabo la agricultura, impactando por consiguiente la vida humana. Por otro lado, el efecto al aumentar la temperatura del agua afectaría la vida marina, algo que se vería reflejado en el blanqueamiento de los arrecifes de coral y la erosión costera de las playas, impactando así la economía proveniente del sector turismo.

Mundialmente existen países que se han adaptado y reinventado a causa de eventos extremos de inundaciones y sus desventajas geográficas por niveles territoriales bajos. Los Países Bajos, son un gran ejemplo ya que con su Plan Delta, (“*Deltawerken*”), han llevado a cabo exitosamente proyectos hidrológicos-hidráulicos. El Plan Delta fue desarrollado luego de la gran inundación en el año 1953. Dicho Plan, está compuesto por el trabajo y compromiso entre: seguridad, economía, recreación y naturaleza. [5]



**Figura 5**  
**Plan Delta para la Construcción de Diques en los Países Bajos (Licencia del autor CC BY-SA 3.0)**

Una de las construcciones más reconocidas es la barrera Maeslantkering, construida en el año 1997. La misma, es la única barrera contra oleadas de tormenta en el mundo con tales piezas movibles grandes, ambas puertas de la barrera miden 240 metros de largo en el canal Nieuwe Waterweg. [5]



**Figura 6**  
**Barreras Maeslantkering**

Otro gran ejemplo es el dique Seabrook ubicado en la ciudad de Nueva Orleans en Estados Unidos, la cual fue impactada desastrosamente por el huracán Katrina en el año 2005. La construcción de este dique, fue realizada para evitar futuras inundaciones e impactos en la ciudad. El dique cuenta con 215 kilómetros de largo y una combinación de presas, compuertas, muros y bombas hidráulicas; las cuales permiten el paso a la navegación y contienen un posible desbordamiento del lago Pontchartrain. [6]



**Figura 7**  
**Vista Aérea del Dique Seabrook**



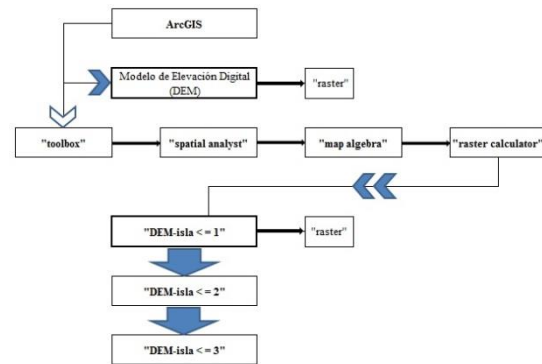
**Figura 8**  
**Visualización Compuertas Aumentando el Nivel del Mar**

## METODOLOGÍA

El desarrollo de mapas se realizó utilizando el programa ArcGIS (ArcMap versión 10.1). La información necesaria para llevar a cabo este

análisis se obtuvo de la Junta de Planificación de Puerto Rico y otras bases de datos existentes suministradas públicamente. Se utilizó el Modelo de Elevación Digital de la Isla de Puerto Rico (DEM por sus siglas en inglés), para conocer e identificar las elevaciones al momento de reflejar el aumento del nivel del mar. Se utilizó la Ortofoto 2010 del USGS (“US Geological Survey”) para la Isla de Puerto Rico, para visualizar las áreas de impacto. Por último, se utilizaron diferentes datos con información geográfica de los Municipios, estructuras, ríos, lagos, lagunas y acuíferos.

La Figura 9 muestra el Diagrama de Flujo del procedimiento realizado y las herramientas utilizadas en el programa ArcGIS primeramente para definir los aumentos en los niveles del mar. En este caso, se realizarán para 1, 2 y 3 metros de elevación.



Preparado por: Hecmarie Rodríguez  
CE 6905-27 Proyecto de Maestría en Ingeniería Civil  
Universidad Politécnica de Puerto Rico

**Figura 9**

### Diagrama de Flujo del Procedimiento en ArcGIS

La ecuación es utilizada para los niveles de aumento de 2 y 3 metros. [7] Ya que el formato “raster” es una imagen que no se puede modificar, es necesario convertir el archivo en un formato “shape file” (“polygon”) de puntos y líneas el cual que se puede editar. Para la conversión de formatos se utilizó la herramienta proveniente del “toolbox” » “conversion” » “from raster” » “to polygon” para visualizar los niveles de aumento. En adición, se muestran varios Municipios en detalle los cuales se definieron utilizando el “layer” » “properties” » “definition query” » “query builder” » “Municipio” = “Municipio” » “verify” » “ok”. Los diez

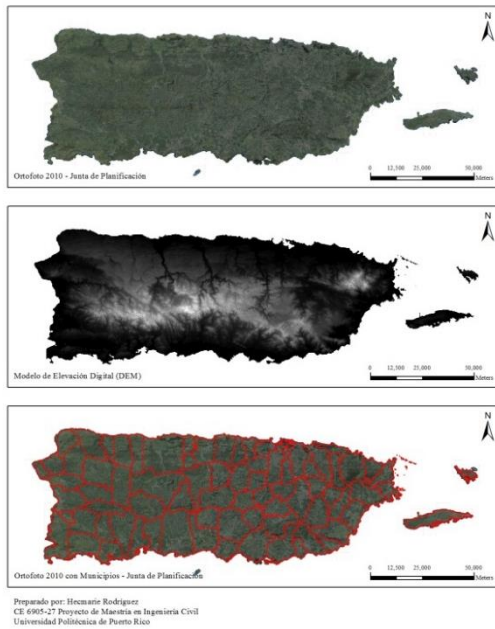
Municipios costeros de interés son Arecibo, Barceloneta, Cabo Rojo, Carolina, Guayama, Loíza, Ponce, San Juan, Vieques y Yabucoa.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos luego de realizar los procedimientos necesarios para la creación de mapas, se muestran en las figuras a continuación.

### Mapas de Puerto Rico

La Figura 10 muestra tres versiones de Puerto Rico, la Ortofoto 2010 del USGS, el DEM (“Digital Elevation Model”) y el Mapa de los Municipios. La Foto Aérea de Puerto Rico se utiliza para visualizar la huella y territorio actual de la Isla, el DEM para visualizar las elevaciones alrededor de la costa el cual se interpreta en la intensidad de los colores, el color negro son los niveles bajos mientras que el color blanco son los niveles más altos y el Mapa de los Municipios para conocer los límites de área de cada pueblo.

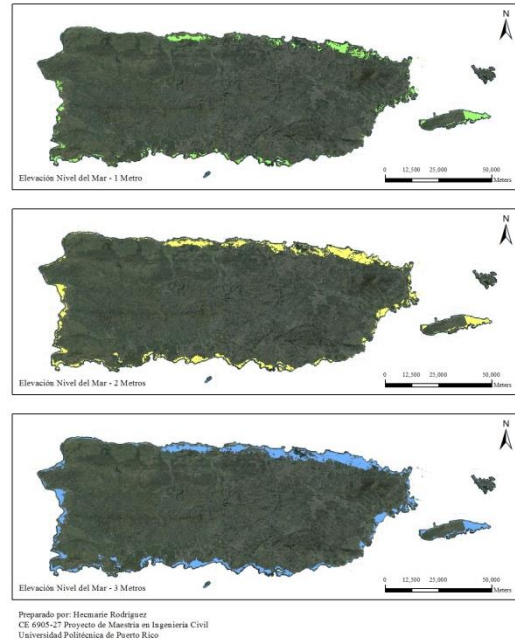


**Figura 10**

**Ortofoto 2010, DEM y Municipios de Puerto Rico**

La Figura 11 muestra tres versiones de Puerto Rico con las elevaciones del Nivel del Mar. El primer mapa muestra la elevación de 1 metro, el segundo mapa muestra la elevación de 2 metros y

el tercer mapa muestra la elevación de 3 metros de altura. Estos mapas se crearon para visualizar como se reduce la huella actual a las diferentes elevaciones y ver en detalle las áreas afectadas. Teniendo en cuenta los lugares para actividades como turismo, playas, agricultura, acuíferos, zona industrial, estructuras y la ciudad Capital.

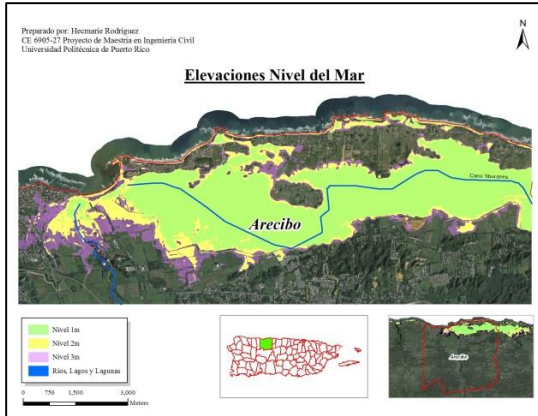


**Figura 11**

**Elevaciones del Nivel del Mar 1, 2 y 3 metros en Puerto Rico**

### Mapa de Arecibo

El Municipio de Arecibo se encuentra en la zona del Acuífero del Norte, uno de los acuíferos más importantes y potenciales en Puerto Rico. Si el aumento en el nivel del mar fuera de 1 metro se afectaría los acuíferos por la intrusión salina, contaminando así el más productivo sistema de aguas subterráneas en Puerto Rico, la cual se utiliza para abastecer gran parte de las industrias, agricultura y la población. La zona de recarga del Acuífero del Norte en la Región Arecibo-Manatí ocurre en el Caño Tiburones para el caso del acuífero artesiano y por infiltración en el acuífero aluvial. [8]

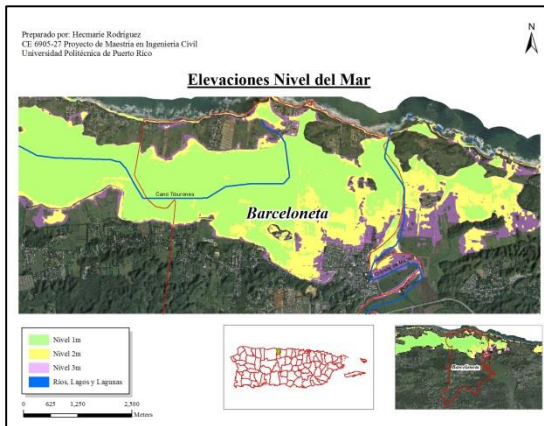


**Figura 12**

**Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Arcibo**

### Municipio de Barceloneta

El Municipio de Barceloneta pertenece al Acuífero del Norte y cuenta con una zona industrial la cual se beneficia de las aguas subterráneas para sus procesos. Según el análisis, en Barceloneta se afectarían pequeñas zonas urbanizadas y terrenos agrícolas.

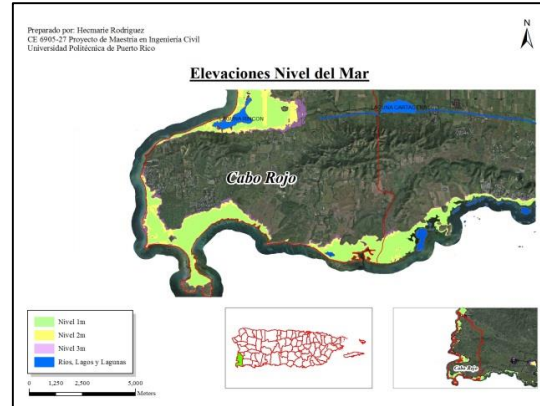


**Figura 13**

**Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Barceloneta**

### Municipio de Cabo Rojo

El Municipio de Cabo Rojo es un área de mayor turismo en la zona suroeste de la Isla, y en este análisis se verán afectadas las zonas concurrentes e históricas del Poblado, el Faro entre otras áreas de comunidades, playas y recursos naturales.

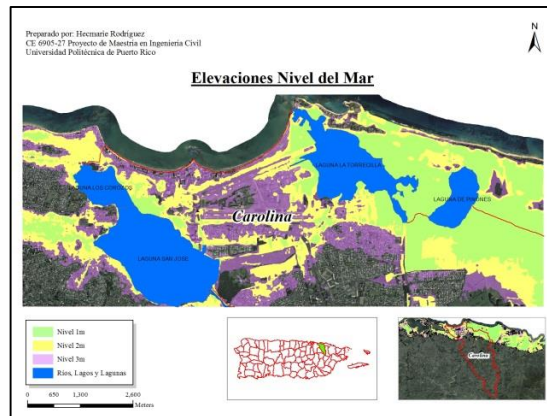


**Figura 14**

**Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Cabo Rojo**

### Municipio de Carolina

En el Municipio de Carolina, el aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín de Isla Verde sería impactado si el nivel del mar aumentara 3 metros en su elevación. Una de las edificaciones de mayor importancia en la Isla es el aeropuerto, punto esencial de la llegada del turismo a la Isla. Una planificación futura para mitigar el problema de inundación a largo plazo sería beneficioso implementarlo en el presente. En adición, se afectaría gran parte de la población metropolitana y áreas urbanizadas.

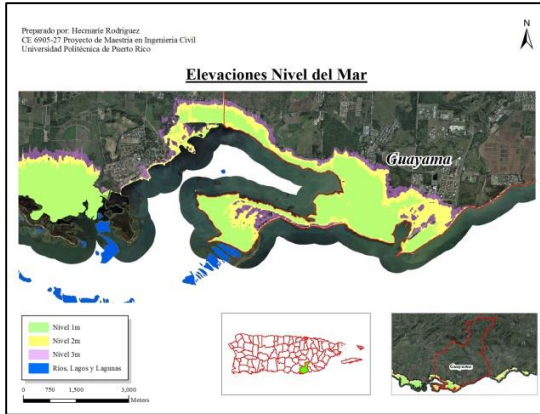


**Figura 15**

**Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Carolina**

### Municipio de Guayama

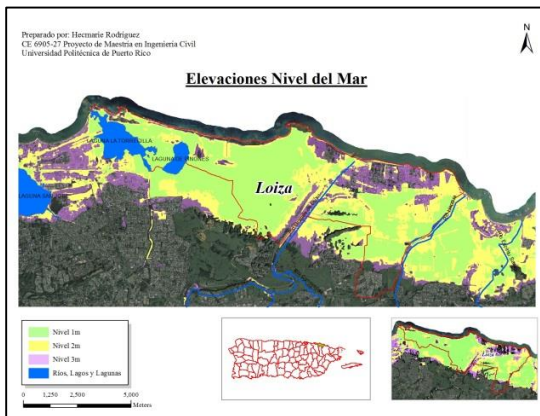
El Municipio costero de Guayama sería impactado en su principal y concurrente área de turismo y gastronomía en la zona de Pozuelo y áreas urbanizadas.



**Figura 16**  
Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Guayama

### Municipio de Loíza

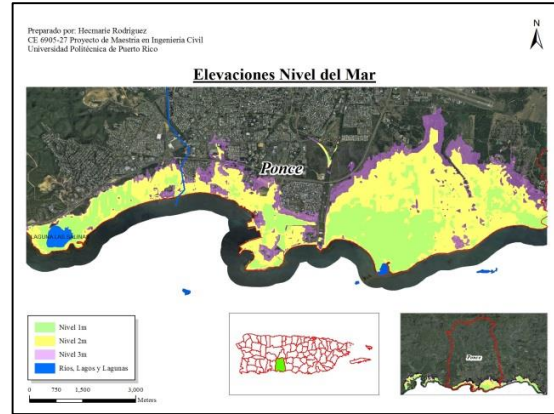
El Municipio de Loíza ubicado en la costa norte de la Isla, quedaría prácticamente afectado en su totalidad. Al ser un territorio de niveles bajos, el mar invade significativamente en esta área afectando en su mayoría zonas urbanizadas, áreas recreativas, complejos turísticos, playas, entre otras áreas.



**Figura 17**  
Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Loíza

### Municipio de Ponce

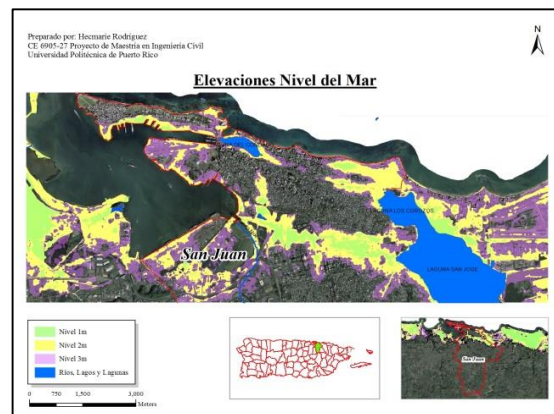
El Municipio de Ponce, punto clave en la zona sur de la Isla también recibiría el impacto en el aumento del nivel del mar. En este caso, es impactada la zona turística de la Guancha, edificaciones de importancia como el Puerto de las Américas Rafael Cordero Santiago y el Aeropuerto Mercedita, entre otras áreas urbanizadas.



**Figura 18**  
Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Ponce

### Municipios de San Juan

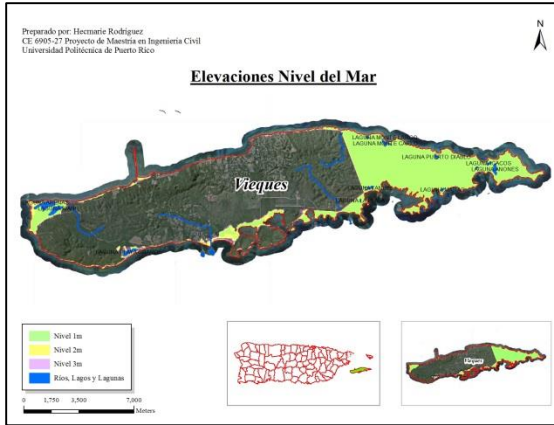
En la Capital de la Isla, el Municipio de San Juan, el área metropolitana de mayor importancia turística e histórica se vería impactada en zonas como Condado, Santurce, Aeropuerto de Isla Grande Fernando Luis Ribas Dominicci, la costa sur del Viejo San Juan, entre otras áreas de complejos turísticos, viviendas, áreas recreativas como parques y pista atlética, edificaciones de importancia y playas.



**Figura 19**  
Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de San Juan

### Isla Municipio de Vieques

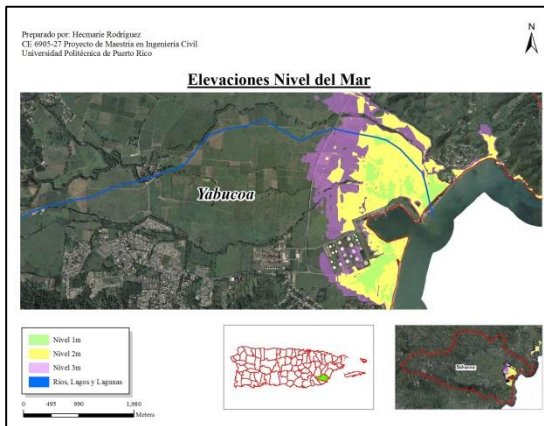
Es impactante ver la Isla Municipio de Vieques, ser impactada en un gran porcentaje de su territorio. El lado este de la Isla compuesto por áreas verdes (Vieques National Wildlife), y playas es la mayor área de impacto.



**Figura 20**  
Elevaciones Nivel del Mar en la Isla Municipio de Vieques

### Municipio de Yabucoa

La actividad agrícola en el Municipio de Yabucoa se vería afectada, ya que el aumento en el nivel del mar afectaría los terrenos de siembra de plátanos en la zona. También se verían afectados los terrenos de la Petroquímica Shell, la zona del puerto y la playa donde se realizan actividades recreativas y turísticas.



**Figura 21**  
Elevaciones Nivel del Mar en el Municipio de Yabucoa

### CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Resumiendo los resultados de este análisis con la ayuda del programa ArcGIS al identificar y visualizar varios puntos de importancia en las zonas de los Municipios costeros para los sectores del turismo refiérase al aeropuerto, playas, complejos turísticos y/o áreas recreativas, la agricultura en su sembradío de plátanos y/o tubérculos, los acuíferos,

zonas industriales y su potencial uso de aguas subterráneas, la economía que proviene de todas las actividades antes mencionadas entre otras áreas, es necesario realizar proyecciones para futuros proyectos de construcción teniendo en cuenta las áreas a ser impactadas. En los proyectos de la actualidad como urbanizaciones, poder implementar proyectos de mitigación para evitar la relocalización de comunidades. Las industrias que utilizan reservas de agua de los acuíferos tendrán que modificar sus procesos o buscar alternativas para la utilización de agua potable como por ejemplo para el enfriamiento de calderas u otros procesos. Aunque estos efectos de impacto son a largo plazo y pasarán largos años para que sean notables, la Isla de Puerto Rico debe incluir como parte de su desarrollo el mitigar los impactos por el Calentamiento Global y tener la visión a la hora de invertir presupuestos significativos en comenzar proyectos de obras públicas el futuro impacto.

Como primer paso es recomendable que la población contribuya positivamente en minimizar los efectos del Calentamiento Global y orientar a la comunidad del posible impacto que tendrá la Isla. Posteriormente, llevar a cabo estudios de viabilidad en construcciones de diques, compuertas, rompeolas, dragados en embalses y caños, y toda aquella estructura hidráulica y/o trabajos que operan en defensa contra las inundaciones.

Finalmente, es una oportunidad para desarrollar nuevas ideas, investigaciones y diseños futuros de proyectos para combatir los efectos en la Isla de Puerto Rico.

### REFERENCIAS

- [1] IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V. R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.



- [2] Xisco. (2007). *10 Cosas concretas que podemos hacer para frenar el Calentamiento Global* [Online]. Disponible: <https://certeza.wordpress.com>.
- [3] R. Z. Poore, R. S. Williams Jr. and C. Tracey. (2000, January). *Sea level and climate* [Online]. U.S. Geological Survey. Fact Sheet 002-00. Disponible: <http://pubs.usgs.gov/fs/fs2-00>.
- [4] NOAA / National Oceanic Service. (2013). *Tides & Currents 9755371 San Juan, Puerto Rico* [Online]. Disponible: <http://tidesandcurrents.noaa.gov>.
- [5] Wikipedia. (2013). *Plan Delta* [Online]. Disponible: <http://es.wikipedia.org>.
- [6] Eva Sáiz (2012). *Nueva Orleans se blindo con un dique de 215 kilómetros* [Online]. Disponible: <http://sociedad.elpais.com>.
- [7] Humboldt State University, GSP 270 Lab 9: Raster Analysis - Sea Level Rise around Humboldt Bay.
- [8] T. de Veve and B. E. Taggart (editors), "Atlas of Ground-Water Resources in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands," US Geological Survey Water-Resources Investigations, US Environmental Protection Agency, San Juan, PR, Rep. 94-4198, 1996.