



Universidad de Puerto Rico
Recinto Universitario de Mayagüez
Facultad de Artes y Ciencias – Departamento de Biología



MANGLAres EN RETROCESO:

EVIDENCIA GEOESPACIAL DE MORTALIDAD DE MANGLES EN EL SUROESTE DE PUERTO RICO

Proyecto final

Retsel A. González Valentín

Profesor: Dr. Fernando Gilbes Santaella

BIOL 5038-080

martes, 16 de diciembre de 2025

RESUMEN

Los bosques de manglares en Puerto Rico desempeñan funciones ecológicas, hidrológicas y de protección costera fundamentales. Sin embargo, estos ecosistemas se encuentran cada vez más amenazados por perturbaciones climáticas y antrópicas. Este estudio evalúa el deterioro a largo plazo del dosel en un sitio de manglares en el suroeste de Puerto Rico (17.9479°N , 67.1085°W) mediante una serie temporal de NDVI de 20 años (2005–2025). Se obtuvieron valores de NDVI de imágenes satelitales en diferentes momentos para medir los cambios en la salud de la vegetación y calcular la cantidad de manglares perdidos en un píxel que es representativo desde el punto de vista ecológico, llamado localmente área de muerte progresiva. Los resultados indicaron una salud del dosel que se mantuvo estable o en aumento entre 2005 y 2015, seguida de un leve descenso entre 2015 y 2020. Para el año 2025, el NDVI cambió de valores positivos altos (~ 0.81) a un valor negativo importante (-0.79), lo que indica un colapso total del dosel y un cambio hacia un área sin vegetación o agua abierta. En términos generales, el sitio experimentó una disminución total de aproximadamente 206% en relación con los niveles de NDVI de 2005, lo que refleja la pérdida total de biomasa de manglares vivos en esta ubicación. Estos descubrimientos muestran que las series temporales del NDVI son útiles para observar la degradación a largo plazo de los manglares y destacan la seriedad del daño que está ocurriendo en los humedales costeros vulnerables de Puerto Rico. El monitoreo continuo y la evaluación hidrológica serán fundamentales para identificar los factores que contribuyen al deterioro y para informar las estrategias de restauración.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de manglares se encuentran entre los bosques costeros más productivos y ecológicamente significativos en las regiones tropicales. Estos ecosistemas ofrecen servicios esenciales, tales como la estabilización de las costas, la captura de carbono, el ciclo de nutrientes y la provisión de hábitats para una amplia diversidad de fauna. En Puerto Rico, los manglares constituyen elementos fundamentales que actúan como amortiguadores en las zonas costeras de baja altitud, atenuando el impacto de las marejadas y favoreciendo la conservación de especies en peligro de extinción. No obstante, estos bosques son cada vez más vulnerables a las perturbaciones climáticas, a la alteración hidrológica y a la degradación provocada por actividades humanas. En las últimas dos décadas, Puerto Rico ha enfrentado eventos climáticos extremos, siendo el huracán María en 2017 el más notable. Estos fenómenos han estado acompañados de alteraciones en la calidad del agua costera y en la geomorfología, lo que ha contribuido a un deterioro generalizado de los manglares.

La detección y cuantificación del deterioro a largo plazo de la vegetación en los manglares requiere métricas confiables y repetibles que evalúen la salud del dosel. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) constituye un indicador sólido para evaluar el área foliar, la densidad del dosel y la actividad fotosintética. Esto lo convierte en uno de los índices más utilizados para el monitoreo del estado de los manglares a lo largo del tiempo. El análisis de series temporales usando el NDVI ayuda a los investigadores a detectar cambios sutiles en la salud de la vegetación, así como cambios bruscos causados por sequías, tormentas o estrés por inundación.

Este estudio analiza la pérdida del dosel de manglares a largo plazo en un área costera del suroeste de Puerto Rico (17.9479°N , 67.1085°W). Las observaciones realizadas han registrado un cambio gradual en la zona. A través del uso de imágenes de NDVI correspondientes a los años 2005, 2010, 2015, 2020 y 2025, se cuantifican los cambios en píxel con el fin de estimar la magnitud y la tasa de declive del dosel a lo largo de un periodo de 20 años. El objetivo de este estudio es calcular el porcentaje de pérdida debido a la degradación ecológica a largo plazo y describir cómo se ha dado este declive en relación con las presiones ambientales en la región.

METODOLOGÍA

Se evaluaron los cambios a largo plazo en la salud del dosel de manglar en un sitio fijo del suroeste de Puerto Rico (17.9479°N , 67.1085°W), localizado dentro de un manglar de franja expuesto a la hidrodinámica costera y a presiones climáticas persistentes. Todos los datos espaciales fueron proyectados al sistema de referencia WGS 1984 para asegurar consistencia espacial entre los análisis.

Se utilizaron rásteres del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondientes a los años 2005, 2010, 2015, 2020 y 2025. Las imágenes fueron previamente corregidas para minimizar interferencias atmosféricas y del sensor, estandarizadas, re-muestreadas a una resolución espacial común y recortadas al área de estudio. Los valores de NDVI oscilaron entre -1 y 1 , donde valores altos representan vegetación densa y valores negativos superficies no vegetadas o cuerpos de agua.

Para garantizar la comparabilidad temporal, se estableció un punto de muestreo fijo y se extrajeron los valores de NDVI de cada año utilizando la herramienta Extract Multi Values to

Points en ArcGIS Pro. Este enfoque permitió muestrear consistentemente la misma ubicación de píxel y evitar sesgos espaciales.

Se calcularon los cambios absolutos y porcentuales del NDVI entre intervalos consecutivos de cinco años y para el período completo de 2005 a 2025. La pérdida de dosel se estimó comparando los valores iniciales y finales, expresando la disminución relativa con respecto a la línea base de 2005. Valores negativos de NDVI fueron interpretados como pérdida total de cobertura vegetal o conversión a cuerpos de agua abiertos.

$$\% \Delta NDVI = \frac{NDVI_{t2} - NDVI_{t1}}{NDVI_{t1}} \times 100$$

Finalmente, se generó una visualización integrada que incluyó un gráfico de series temporales del NDVI y mapas raster con un esquema de color uniforme, facilitando la interpretación de las tendencias espaciales y temporales en la salud del manglar.

RESULTADOS

Los valores de NDVI extraídos del sitio de manglares ubicado en 67.1085°W, 17.9479°N, indicaron condiciones de vegetación estables y saludables desde 2005 hasta 2020. Los valores oscilaron entre 0.7519 en 2005 y 0.8124 en 2020, lo que indica la presencia de un dosel de manglar denso y fotosintéticamente activo. Las diferencias que se vieron en estos 15 años fueron muy pequeñas, con una variación de menos del 10%. Esto sugiere que el dosel se ha mantenido estable a largo plazo y que no se han encontrado perturbaciones importantes según el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Entre 2020 y 2025, se produjo un cambio significativo, evidenciado por la disminución del NDVI, que pasó de 0.8124 a -0.7953. Esto representa una reducción neta de 1.6077 unidades de NDVI y una disminución del 198% en relación con el valor de 2020, lo que indica una pérdida total de la cobertura vegetal. El valor negativo del NDVI en 2025 indica que el comportamiento espectral del píxel cambió a agua abierta o a un material sin vegetación que es muy reflectante. Al comparar con el valor de referencia de 2005, la disminución total hasta 2025 es del 205.8% en la señal del NDVI, lo que confirma el colapso total del dosel en este lugar. Los resultados evidencian que el sitio mantuvo una estabilidad ecológica durante dos décadas antes de experimentar una muerte masiva y rápida de los manglares entre 2020 y 2025.

DISCUSIÓN

El colapso acelerado del dosel de manglares entre 2020 y 2025 sugiere una perturbación a nivel ecosistémico que supera la variabilidad normal observada en las dos décadas anteriores. Los sistemas de manglares son muy sensibles a cambios en el agua, la sal y el movimiento de los sedimentos. Es común que ocurran muertes repentinas de plantas cuando se superan ciertos límites. Los posibles factores que pueden influir en esta situación incluyen la inundación prolongada como resultado del aumento del nivel del mar y el incremento de la hipersalinidad en cuencas cerradas. También está la erosión que socava las estructuras radiculares, así como el estrés fisiológico crónico que pudo haber permanecido indetectado hasta que se superó un umbral crítico a consecuencia de los huracanes durante estos 25 años. El fuerte descenso que se vio en 2025, que resultó en valores de NDVI muy negativos, muestra que la cobertura de plantas se perdió totalmente y fue reemplazada por agua abierta o suelo descubierto. Este patrón está relacionado con las observaciones de mortalidad retardada de los manglares en el Caribe después

de tormentas extremas. En estos casos, la recuperación inicial del dosel es seguida por un colapso de agua años después. Es necesario realizar una verificación adicional en el campo para determinar si el sitio experimentó bloqueo hidrodinámico, erosión por sedimentos o estancamiento de agua salina, lo que en última instancia condujo al fracaso del ecosistema.

CONCLUSIÓN

Este análisis documenta una pérdida total de la vegetación de manglar en el sitio de estudio entre 2020 y 2025, tras dos décadas de relativa estabilidad. Los valores del NDVI se mantuvieron elevados entre 2005 y 2020, lo que indica la existencia de un manglar robusto y funcional. No obstante, el cambio drástico hacia un valor negativo del NDVI en 2025 representa una disminución del 205.8% en comparación con 2005 y confirma el colapso total del dosel. Este hallazgo pone de manifiesto la vulnerabilidad de los ecosistemas de manglares de Puerto Rico ante cambios ambientales abruptos y subraya la necesidad de un monitoreo continuo que emplee tanto enfoques de teledetección como métodos basados en el campo. La comprensión de los factores que impulsan este colapso es fundamental para informar las estrategias de restauración y prevenir la pérdida adicional de manglares en sistemas costeros similares.

REFERENCIAS

Branoff, B. L. (2020). Mangrove disturbance and response following the 2017 hurricane season in Puerto Rico. *Estuaries and coasts*, 43(5), 1248-1262.

Dandois, Jonathan & Ellis, Erle. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*. 136. 259–276. 10.1016/j.rse.2013.04.005.

Howe, J., Merchant, S., Hernández, W. J., Pessutti, J., & Groffman, P. (2025). Assessing mangrove canopy height and health changes in Puerto Rico post-Hurricane Maria using remote-sensing techniques. *Ecosphere*, 16(3). <https://doi.org/10.1002/ecs2.70226>

Sebastián Martinuzzi, William A. Gould, Ariel E. Lugo, Ernesto Medina, Conversion and recovery of Puerto Rican mangroves: 200 years of change, *Forest Ecology and Management*, Volume 257, Issue 1, 2009, Pages 75-84, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.037>.

Urrego, Ligia & Polanía Vorenberg, Jaime & Buitrago, María & Cuartas, Luisa & Lema, Alvaro. (2009). Distribution of Mangroves Along Environmental Gradients on San Andrés Island (Colombian Caribbean). *Bulletin of Marine Science*. 85. 27-43.