



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe final de Proyecto de Investigación

DIGI-PUI-004

Informe final de proyecto de investigación

Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación

Programa Universitario de Investigación de Recursos Naturales y Ambiente

Cartografía y monitoreo geoespacial en Punta de Manabique para identificar cambios inducidos por el cambio climático

Unidad avaladora: Instituto de Investigaciones del Caribe de Izabal -IICI- Centro Universitario de Izabal -CUNIZAB-

4.8.69.2.03

Nombre del coordinador: Jeff Hendrik Taqué Aroche

Guatemala 28/11/25



Informe final de Proyecto de Investigación

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Andrea Rodas

Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente

Autores

Nombre del coordinador: Jeff Hendrik Taqué Aroche No. Registro de Personal 20171865

Nombre del investigador Jorge Alejandro Sologaistoa Dardón, No. Registro de Personal

Nombre del investigador Luis Alfredo Dardón Sandoval, No. Registro de Personal

Nombre del investigador, Braulio Rafael Hernández Ozuna No. Registro de Personal

Nombre del auxiliar de investigación I, Jorge José Bladimir Smith López No. Registro de Personal

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.69.2.03 en el Programa Universitario de Investigación de Recursos Naturales y Ambiente.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice general

Índice general	1
Índice de tablas	2
Índice de figuras	3
Resumen	4
Palabras clave	4
Abstract.....	5
Keywords.....	5
4. Objetivos.....	25
6. Método.....	26
Referencias	70
Apéndice.....	74
Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario.....	98
Recepción de la Dirección General de Investigación.....	98



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice de tablas

Tabla 1 Diseño de la investigación	19
Tabla 2 Técnicas utilizadas	23
Tabla 3 Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.	29
Tabla 4 Retracción de la línea costera	34
Tabla 5 Estimación de áreas de acreción	34
Tabla 6 Distribución de las muestras	40
Tabla 7 Porcentaje de precisión	40
Tabla 8 Porcentaje de precisión Índice Kappa	41
Tabla 9 Beneficiarios directos e indirectos de la investigación	46
Tabla 10 Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.	48
Tabla 11 Coordenadas geográficas de los Puntos de Control Terrestre (GCP)	69
Tabla 12 Distribución espacial de los GCP en el litoral de Punta de Manabique	70
Tabla 13 Datos de observación y validación obtenidos en campo	74
Tabla 14 Herramientas y parámetros de levantamiento de GCP	76



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice de figuras

Figura 1 Flujo del Proceso para la generación de cartografía	28
Figura 2 Cambios espaciales de la línea costera	35
Figura 3 Cambios espaciales de la línea costera	36
Figura 4 Mapa de pérdida de bosque	38
Figura 5 Matriz para poblaciones finitas	39
Figura 6 Análisis comparativo espacio-tiempo	61
Figura 7 Análisis de la dinámica del Litoral de Punta de Manabique	62
Figura 8 Ortofoto del área de Cabo Tres Puntas	63
Figura 9 Comparación de cambios en el litoral de Punta de Manabique	64
Figura 10 Análisis de la pérdida de cobertura vegetal	65
Figura 11 Establecimiento de Puntos de Control	66
Figura 12 Colocación de antena base GNSS RTK	67
Figura 13 Registro de coordenadas en tiempo real con sistema GNSS RTK	68
Figura 14 Registro de coordenadas en tiempo real con sistema GNSS RTK	68
Figura 15 Ubicación de bases GNSS RTK en zona costera	72
Figura 16 Operador realizando levantamiento de puntos con GNSS RTK	73
Figura 17 Equipos GNSS RTK utilizados	77
Figura 18 Mojón limítrofe Guatemala-Honduras	78
Figura 19 Georreferenciación del mojón limítrofe Guatemala-Honduras.	78
Figura 20 Georreferenciación del mojón limítrofe Guatemala-Honduras.	79
Figura 21 Mojón limítrofe Guatemala-Honduras 2011	80
Figura 22 Mojón limítrofe Guatemala-Honduras 2012	80
Figura 23 Mojón limítrofe Guatemala-Honduras 2021	81
Figura 24 Mojón limítrofe Guatemala-Honduras 2024	81



Informe final de Proyecto de Investigación

Resumen

La investigación abordó el problema de la dinámica y degradación del litoral de Punta de Manabique, asociada a procesos de erosión costera, pérdida de cobertura forestal y cambios geomorfológicos influenciados por la variabilidad ambiental y el cambio climático, los cuales afectan la estabilidad de ecosistemas costeros y la gestión territorial del área. La justificación del estudio radica en la necesidad de contar con información geoespacial actualizada y confiable que permita comprender estos procesos y apoyar la toma de decisiones para la gestión y adaptación costera.

La investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos del cambio climático en el litoral de Punta de Manabique mediante técnicas de monitoreo geoespacial y la generación de cartografía actualizada. Para ello, se analizaron imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2 del programa COPERNICUS, empleando herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) con técnicas semiautomáticas de clasificación, detección de cambios y análisis ráster. La validación de los resultados se realizó mediante puntos de control GNSS RTK y matrices de confusión, alcanzándose una precisión global del 88 % y un índice Kappa de 0.80. Los resultados evidenciaron una alta dinámica costera, con una pérdida de 126.70 hectáreas de litoral, una acreción de 90.14 hectáreas y una pérdida de cobertura forestal de 10 154.689 hectáreas, incluyendo manglares y bosques asociados. Asimismo, se identificaron retracciones de la línea costera de hasta 173.40 m entre 2006 y 2025, lo que confirma la influencia significativa de la variabilidad climática sobre la dinámica litoral del área de estudio.

Palabras clave

1. Cartografía	2. Teledetección	3. Geoespacial	4. Erosión costera	5. Dinámica costera
----------------	------------------	----------------	--------------------	---------------------



Informe final de Proyecto de Investigación

Abstract

The research addressed the problem of coastal dynamics and degradation in Punta de Manabique, associated with coastal erosion processes, loss of forest cover, and geomorphological changes influenced by environmental variability and climate change, which affect the stability of coastal ecosystems and land management in the area. The rationale for the study lies in the need for up-to-date and reliable geospatial information that allows for an understanding of these processes and supports decision-making for coastal management and adaptation.

The research aimed to assess the effects of climate change on the Punta de Manabique coastline using geospatial monitoring techniques and the generation of updated maps. To this end, Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images from the COPERNICUS program were analyzed using remote sensing tools and Geographic Information Systems (GIS) with semi-automatic classification, change detection, and raster analysis techniques. The results were validated using GNSS RTK control points and confusion matrices, achieving an overall accuracy of 88% and a Kappa index of 0.80. The results showed high coastal dynamics, with a loss of 126.70 hectares of coastline, an accretion of 90.14 hectares, and a loss of forest cover of 10,154,689 hectares, including mangroves and associated forests. Likewise, coastline retreats of up to 173.40 m were identified between 2006 and 2025, confirming the significant influence of climate variability on the coastal dynamics of the study area.

Keywords

1. Cartography 2. Remote sensing 3. Geospatial 4. Coastal erosion 5. Coastal dynamics.



Informe final de Proyecto de Investigación

1. Introducción

El litoral de Punta de Manabique, localizado en el Caribe de Guatemala, en el departamento de Izabal y en la zona Protegida del Área Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique, la cual constituye un espacio costero de alta relevancia ambiental, ecológica y estratégica. Esta región se caracteriza por la presencia de playas, arena blanca, sistemas de manglar, bosques costeros y humedales, los cuales cumplen funciones clave en la protección del litoral, alberga cinco especies de tortugas marinas, la conservación de la biodiversidad y el sustento de las comunidades locales. No obstante, durante las últimas décadas, este territorio ha experimentado transformaciones asociadas a la variabilidad ambiental y al cambio climático, manifestadas principalmente a través de procesos de erosión costera, retracción de la línea de costa, pérdida de cobertura forestal y modificaciones en la morfología litoral, (Consejo Nacional de Áreas Protegidas [CONAP], 2017).

Esta investigación radicó en la ausencia de información geoespacial actualizada, sistemática y validada que permita cuantificar y analizar la magnitud de los cambios ocurridos en el litoral de Punta de Manabique a lo largo del tiempo. La falta de cartografía reciente y de análisis multitemporales limita la toma de decisiones informadas para la gestión costera, la conservación de ecosistemas sensibles como: los manglares y la planificación de medidas de adaptación frente a los efectos del cambio climático, resulta indispensable aplicar herramientas tecnológicas que permitan monitorear de forma objetiva y reproducible la dinámica litoral (Heyman & Kjerfve, 2001).



Informe final de Proyecto de Investigación

El estudio se fundamentó en la necesidad de generar insumos técnicos confiables que contribuyan al fortalecimiento del monitoreo ambiental y a la gestión sostenible. El uso de técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite analizar grandes extensiones territoriales, evaluar cambios espaciales y temporales con alta precisión y establecer líneas base geomorfológicas que sirvan como referencia para estudios futuros y procesos de planificación territorial, (Aponte, 2016; Aguirre, 2009; Chuvieco, 2000; Chuvieco, 2010; Fuenzalida et al., 2015).

En este marco, el objetivo general de la investigación fue evaluar los efectos del cambio climático en el litoral de Punta de Manabique mediante técnicas de monitoreo geoespacial y la generación de cartografía actualizada. Para su cumplimiento, se aplicó una metodología basada en el análisis multitemporal de imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2 del programa COPERNICUS, procesadas mediante técnicas semiautomáticas de clasificación, detección de cambios y análisis ráster, utilizando plataformas como Google Earth Engine y software SIG especializado (Copernicus, 2018; Gómez et al., 2022; Palomar et al., 2018; Santiago et al., 2020).

Asimismo, se incorporaron procedimientos de validación espacial mediante puntos de control obtenidos con tecnología GNSS en modo RTK y la construcción de matrices de confusión, con el fin de evaluar la precisión de los productos generados (Pighini et al., 2023; Soria et al., 2020;).

Se logró evidenciar una alta dinámica del litoral de Punta de Manabique, identificando sectores con retracción, estabilidad y acreción de la línea costera. Se registró una pérdida de litoral, una acreción, pérdida de cobertura forestal, incluyendo manglares y bosques asociados. Además, se detectaron retracciones de la línea costera en sectores críticos entre los años 2006 y 2025, con una precisión global del 88 % y un índice Kappa de 0.80.



Informe final de Proyecto de Investigación

Estos resultados confirman la influencia significativa de la variabilidad climática sobre la dinámica costera y resaltan la utilidad de las herramientas geoespaciales como soporte técnico para la gestión ambiental y la planificación de estrategias de adaptación en el litoral de Punta de Manabique (Heyman & Kjerfve, 2001; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2009; Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2020).

Informe final de Proyecto de Investigación

Contexto de la investigación

La investigación se desarrolló en el litoral de Punta de Manabique, ubicado en el departamento de Izabal, al nororiente de Guatemala. El área de estudio forma parte del Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique, una región costera de alta importancia ambiental caracterizada por la presencia de playas arenosas, sistemas de manglar, bosques costeros, lagunas y humedales, los cuales desempeñan un papel fundamental en la protección del litoral y en la regulación de procesos geomorfológicos y ecológicos, (CONAP, 2017).

Desde el punto de vista geográfico, el litoral presenta una dinámica compleja asociada a la interacción entre procesos marinos, fluviales y atmosféricos, influenciada principalmente por la desembocadura del río Motagua y por la acción del oleaje y las corrientes marinas del Caribe, (Ramsar, 2000). En términos climáticos, la zona está expuesta a eventos hidrometeorológicos extremos, como tormentas tropicales, huracanes, variaciones en el régimen de lluvias y al incremento progresivo del nivel del mar, factores que contribuyen a la erosión costera, la retracción de la línea litoral y la pérdida de cobertura forestal, especialmente en ecosistemas de manglar.

Punta de Manabique ha sido identificada como una zona vulnerable a procesos de degradación costera, lo que ha motivado la implementación de estrategias de conservación y manejo ambiental por parte de instituciones nacionales y organizaciones vinculadas a la gestión del territorio.

El área de estudio se caracteriza por una alta riqueza ecológica y biodiversidad, al albergar ecosistemas costeros de gran importancia como manglares, playas arenosas, humedales y bosques costeros. En estos ambientes se registra la presencia de especies endémicas y de alto valor para la conservación, entre las que destacan el loro cabeza amarilla (*Amazona oratrix*), diversas aves migratorias, el jaguar (*Panthera onca*) y el manatí del Caribe (*Trichechus manatus*), entre otras especies de fauna y flora asociadas a los ecosistemas marino-costeros.

La relevancia ambiental del área se ve reforzada por su reconocimiento como Sitio Ramsar, lo que la identifica como un humedal de importancia internacional, especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático, tales como la erosión costera, la pérdida de cobertura



Informe final de Proyecto de Investigación

forestal y la alteración de la línea litoral. Estas características hacen de Punta de Manabique un espacio prioritario para el monitoreo ambiental y la generación de información geoespacial confiable que apoye la gestión y conservación del territorio.

Los beneficiarios directos de esta investigación son las instituciones gubernamentales responsables de la gestión ambiental y de áreas protegidas, así como los tomadores de decisión y técnicos en planificación territorial, quienes podrán utilizar la cartografía actualizada y los modelos de cambio generados para fortalecer el monitoreo costero y la planificación de medidas de adaptación climática. De manera indirecta, los resultados benefician a las comunidades locales, a las organizaciones de conservación y a los ecosistemas del área protegida, al contribuir a una mejor gestión y protección del litoral de Punta de Manabique.



Informe final de Proyecto de Investigación

2. Revisión de literatura

2.1 Cambio climático y su incidencia en zonas Marino-Costeras

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel global, debido a sus efectos sobre los sistemas naturales y las sociedades humanas. El incremento de la temperatura global, el aumento del nivel del mar y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos han generado transformaciones significativas en los ecosistemas, particularmente en las zonas costeras, que son altamente dinámicas y vulnerables. En todas las regiones del mundo, los efectos del cambio climático se han vuelto innegables el calentamiento global está generando transformaciones profundas y duraderas en el sistema climático y Guatemala no es la excepción, las cuales podrían ser permanentes si no se adoptan acciones inmediatas para mitigar su impacto, (PNUD, sf) <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/accion-por-el-clima>)

En America Latina y en Guatemala un país tropical representa una amenaza cada vez más apremiante, los impactos de cambio climático se manifiestan con mayor intensidad debido a condiciones geográficas y socioeconómicas que incrementan la vulnerabilidad del territorio. Guatemala es considerado un país altamente expuesto a fenómenos hidrometeorológicos como tormentas tropicales, huracanes e inundaciones, los cuales inciden directamente en la degradación ambiental, la pérdida de biodiversidad y la afectación de infraestructuras y comunidades (MARN, 2021). La población sufre pérdidas humanas, daños a la flora y fauna, así como a la infraestructura vial, lo que afecta significativamente la economía nacional. A raíz de esta emergencia ha impulsado la necesidad de fortalecer el conocimiento científico y técnico sobre los procesos ambientales que afectan al país.

Estos cambios no solo afectan la estabilidad de los paisajes naturales, sino también las actividades económicas y los medios de vida de millones de personas de dependen directamente de los recursos costeros.



Informe final de Proyecto de Investigación

2.2 Zonas costeras

Las zonas de riesgo son esas zonas que presentan la posibilidad que una amenaza pueda convertirse en un desastre por eventos climáticos extremos, en la zona amenazada, la presencia de infraestructura, vivienda, población o bienes es donde existen los mayores grados de amenaza y la más alta susceptibilidad de afectación tanto económicas, seguridad alimentaria y de pérdida de vidas humanas, (CONRED, 2023).

Las zonas costeras son afectadas siendo uno de los sistemas más sensibles a los efectos del cambio climático y la variabilidad climática. La interacción entre factores marinos, fluviales y atmosféricos generan una dinámica compleja que se traduce en la erosión costera, la acreción de sedimentos y la retracción de la línea litoral. A nivel internacional, diversos estudios han documentado como el aumento de nivel del mar y la intensificación de vientos extremos aceleran estos procesos, provocando la pérdida de playas, la degradación de manglares y la transformación de la geomorfología costera (Ortiz, 2008; Oliva & Olcina, 2022).

En este contexto, el uso de tecnologías geoespaciales ha cobrado gran relevancia para el análisis y monitoreo de la dinámica costera. La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten analizar grandes extensiones territoriales de forma eficiente, facilitando la detección de cambios a lo largo del tiempo mediante el uso de imágenes satelitales multitemporales. Investigaciones recientes han demostrado la efectividad de sensores como Sentinel-1 y Sentinel-2 para la extracción de la línea de costa, la identificación de zonas inundables y el análisis de cambios en cuerpos de agua, alcanzando niveles de precisión adecuados para aplicaciones cartográficas y de gestión territorial (Santiago et al., 2020; Jara et al., 2022).



Informe final de Proyecto de Investigación

2.3 Teledetección, SIG y geomática aplicados al monitoreo costero

La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica han transformado el estudio de la dinámica costera, al permitir el análisis multitemporal de grandes extensiones territoriales con niveles crecientes de precisión espacial y temporal. Chuvieco (2000, 2010) señala que la observación de la Tierra desde el espacio facilita la identificación de cambios en la cobertura, el uso del suelo y los procesos ambientales, mientras que los SIG permiten integrar, modelar y representar dichas transformaciones en productos cartográficos útiles para la gestión territorial. En la misma línea, Aguirre (2009), Aponte (2016) y Fuenzalida et al. (2015) destacan que la geomática constituye un enfoque integrador que articula sensores remotos, cartografía digital, geodesia y análisis espacial para resolver problemas complejos del territorio.

En monitoreos costeros, estas herramientas han mostrado alta utilidad para delimitar líneas de costa, identificar procesos de erosión y acreción, modelar cambios geomorfológicos y evaluar relaciones entre variables climáticas y ambientales. El uso de sensores ópticos y radar, como Sentinel-1 y Sentinel-2 del programa Copernicus, permite superar limitaciones asociadas a nubosidad, cobertura espacial y repetitividad temporal, mejorando la capacidad de monitoreo continuo. El propio programa Copernicus resalta que la información satelital constituye un insumo estratégico para la producción y gestión de información geoespacial aplicada al ambiente, la planificación y la toma de decisiones.

Informe final de Proyecto de Investigación

2.4 Estudios Geoespaciales sobre dinámica litoral y monitoreo geoespacial

De forma complementaria, Gómez, Jara, Medina, Beck y Amine (2022) evaluaron el uso de información satelital para detectar cambios costeros en España, tanto en formato unidimensional, mediante líneas de costa, como tridimensional, a partir de batimetría. Su objetivo fue analizar la capacidad del monitoreo satelital para detectar cambios morfológicos a diferentes escalas espaciales y temporales. La metodología integró imágenes de muy alta resolución, índices espectrales ajustados por sitio y mediciones topo-batimétricas in situ. Entre los principales resultados, el estudio reportó una precisión horizontal cercana a la mitad del tamaño del píxel y confirmó que la geomática puede monitorear cambios costeros desde eventos erosivos de corta duración hasta tendencias regionales de largo plazo, aunque persisten limitaciones en la reconstrucción batimétrica tridimensional.

De igual manera, Oliva y Olcina (2022) analizaron el litoral sur de Alicante, España, para evaluar el impacto conjunto del cambio climático, el ascenso del nivel del mar y los temporales marítimos sobre playas ocupadas por asentamientos humanos. Su objetivo fue valorar los efectos de la borrasca Gloria, la regresión de playas y el riesgo de inundación. Los resultados evidenciaron alto riesgo de retroceso costero y afectación a viviendas, proponiendo medidas de recuperación y adaptación. Este estudio resulta especialmente pertinente para investigaciones en costas tropicales vulnerables, ya que demuestra la importancia de integrar la dinámica geomorfológica con la ocupación territorial.

Finalmente, López (2020) examinó la evolución de la cartografía de zonas inundables en España, comparando la Directriz Básica con el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. El objetivo fue identificar avances, limitaciones y oportunidades de mejora en la cartografía preventiva. La metodología se basó en análisis comparativo de escalas, calidad de datos, periodos de retorno y accesibilidad de la información. El autor concluyó que el

Informe final de Proyecto de Investigación

sistema más reciente mejora sustancialmente la calidad metodológica y la utilidad preventiva de la cartografía, lo cual refuerza la importancia de contar con productos geoespaciales actualizados y técnicamente validados.

Por su parte, Palomar, Pardo, Cabezas y Alonso (2018) analizaron la variación de superficie y volumen de agua en la Laguna de Gallocanta, España. El objetivo fue evaluar cambios hídricos durante varios meses mediante extracción de líneas de orilla. La metodología combinó imágenes Landsat-8, Sentinel-2, un sistema SHOREX, levantamiento GNSS y un modelo digital LiDAR validado con UAV. Los resultados mostraron pérdidas y recuperaciones parciales tanto de volumen como de superficie, demostrando que la integración de sensores, modelos topográficos y validación de campo mejora la precisión del análisis espacial.

En el ámbito de la detección semiautomática de la línea de costa, Santiago et al. (2020) desarrollaron una metodología en la Isla de la Plata, Ecuador, a partir de imágenes radar Sentinel-1. El objetivo del estudio fue extraer la línea costera mediante un umbral de clasificación que permitiera diferenciar agua y tierra firme en una zona litoral compleja. Metodológicamente, el trabajo se basó en procesamiento radar y segmentación por threshold, con énfasis en su aplicabilidad cartográfica. Los resultados demostraron que el procedimiento es funcional para cartografía a escalas menores de 1:250 000 y que puede incorporarse a procesos de actualización cartográfica, aunque los autores recomiendan usar imágenes de mayor resolución y algoritmos más robustos para aumentar la precisión.

El estudio presenta una metodología para la extracción semiautomática de la línea de costa en la Isla de la Plata, Ecuador, utilizando imágenes radar de la plataforma Sentinel-1. La implementación de un valor de "threshold" permitió clasificar con precisión los elementos de agua y tierra firme en la zona costera. Los resultados obtenidos demostraron que esta

Informe final de Proyecto de Investigación

técnica puede ser aplicada en cartografía de escalas menores a 1:250 000. La evaluación de los productos obtenidos reveló la posibilidad de incorporar este flujo de trabajo en los procesos de actualización de cartografía náutica, brindando una mayor frecuencia y precisión en la obtención de datos. Aunque se resalta la utilidad de esta metodología, se sugiere ampliar la investigación mediante el uso de imágenes radar de mayor resolución espacial y la aplicación de algoritmos más robustos para corregir las imágenes. La zona analizada, la Isla de la Plata, se considera un área de interés para futuros estudios debido a su morfología costera similar a las islas Galápagos, (Garzón, D., Jumbo, S., Santiago, D., Muñoz, M. 2020).

En una línea aplicada al análisis hidrológico y de superficies inundables, Soria, Leblon, Macedo, Ramírez y Fernández (2020) utilizaron imágenes Sentinel-1A y Radarsat-2 en Tabasco, México, para identificar zonas con inundaciones recurrentes. El objetivo consistió en comparar la dinámica de cuerpos de agua y humedales entre temporada seca y lluviosa. La metodología empleó sensores radar de polarización simple y dual, con análisis multitemporal. Como resultado, se detectó una diferencia de 88.2 km² entre temporadas, equivalente a un aumento del 16.9 % en época lluviosa, evidenciando la utilidad del radar para delimitar áreas vulnerables en condiciones de alta humedad y cobertura nubosa.

Asimismo, Sola (2020) aplicó el software SNAP y datos Sentinel-1 para identificar áreas propensas a inundación durante el temporal Gloria. Su objetivo fue delimitar zonas inundables en tres casos de estudio mediante teledetección radar. La metodología incluyó procesamiento SAR y validación temática. Como resultado, obtuvo un índice Kappa de 0.85 y una precisión global del 69 %, lo cual evidencia una concordancia aceptable y confirma la utilidad de este tipo de procesamiento para gestión del riesgo, aunque sugiere incorporar información física adicional para robustecer los resultados.



Informe final de Proyecto de Investigación

Desde la geomorfología costera, Ortiz (2008) estudió cambios en los litorales Caribe y Pacífico de Costa Rica, particularmente en el complejo deltaico de Sierpe. El objetivo fue describir los efectos del incremento del nivel del mar y otros procesos asociados al cambio climático sobre la configuración costera. La investigación documentó erosión de islas, ruptura de cordones litorales, desaparición de barreras y alteraciones en manglares, concluyendo que una parte importante de las transformaciones observadas se asocia a dinámicas compatibles con escenarios de ascenso del nivel marino.

En relación con la erosión hídrica y el ordenamiento territorial, Pighini et al. (2023) analizaron áreas vulnerables en la cuenca del arroyo Estacas, Entre Ríos, mediante SIG, modelos digitales de elevación, precipitación e imágenes Landsat 8. El objetivo fue cartografiar variables hidrológicas y pérdida de suelos. La metodología integró la curva número, el índice topográfico y la ecuación USLE. Los resultados permitieron identificar áreas críticas con pérdidas mayores a $15 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y sectores vulnerables que requieren intervención inmediata, mostrando cómo el análisis espacial puede sustentar decisiones de manejo territorial.

A pesar de estos avances a nivel global, en Guatemala el uso de herramientas geoespaciales para el análisis de la dinámica litoral aún presenta limitaciones. Si bien existen estudios enfocados en la cobertura forestal, los manglares y la vulnerabilidad climática, estos han sido en su mayoría generales o concentrados en otras regiones del país, especialmente en la costa del Pacífico. En contraste, el Caribe guatemalteco, y particularmente el litoral de Punta de Manabique, ha sido menos estudiado desde un enfoque multitemporal y cuantitativo, lo que limita la comprensión detallada de los procesos de erosión, acreción y cambio en la línea de costa (MARN, 2021).



Informe final de Proyecto de Investigación

Punta de Manabique, ubicada en el departamento de Izabal, constituye un ecosistema marino-costero de alta importancia ecológica, reconocido como sitio Ramsar y caracterizado por la presencia de manglares, humedales, playas arenosas y una rica biodiversidad. Estos ecosistemas cumplen funciones fundamentales en la protección del litoral, actuando como barreras naturales frente a eventos extremos y contribuyendo a la estabilidad geomorfológica de la costa. Sin embargo, su vulnerabilidad ante el cambio climático y la presión antrópica hace necesario el desarrollo de investigaciones que permitan comprender su dinámica y apoyar su conservación.

Aunque se han realizado estudios de caso previos mediante entrevistas a comunidades locales y el uso de información histórica del INSIVUMEH, se propone una nueva aproximación utilizando tecnología geoespacial para analizar las zonas más vulnerables a los efectos del cambio climático. Se busca obtener una visión más completa y precisa de las áreas críticas, permitiendo una planificación y gestión más efectiva frente a esta emergencia climática.

El objetivo es fortalecer la resiliencia del país ante los impactos del cambio climático y reducir las consecuencias negativas en la población y el entorno natural de Guatemala y brindar apoyo a las regiones más vulnerables tendrá un impacto directo no solo en el Objetivo 13 (Acción por el Clima), sino también en otros objetivos de Desarrollo Sostenible. Es fundamental que estas iniciativas se coordinen con los esfuerzos orientados a incorporar las estrategias de reducción de riesgos de desastres en las políticas y planes nacionales.

El estudio "Monitorización de cambios en la superficie y volumen de agua en la Laguna de Gallocanta" tuvo como objetivo evaluar las variaciones hídricas durante cuatro meses en 2018 mediante la extracción de líneas de orilla con el sistema SHOREX, calibrado con un levantamiento GNSS e imágenes Sentinel-2. Se utilizaron 8 imágenes Landsat-8 para calcular la superficie de la lámina de agua, y un MDE-LiDAR de 2010, validado con un

Informe final de Proyecto de Investigación

levantamiento UAV, para estimar la variación del volumen de agua. Los resultados mostraron una pérdida de 3,45 hm³ y 3,5 km² de superficie, con una recuperación parcial tras precipitaciones, alcanzando 1,52 hm³ y 2,6 km², respectivamente. (Alonso, D., Cabezas, C., Palomar, J., Pardo, J. 2018).

En este estudio, se empleó el software libre SNAP de la Agencia Espacial Europea para identificar áreas propensas a inundaciones ocasionadas por el temporal Gloria. Utilizando imágenes de radar del Sensor Sentinel-1, se obtuvieron resultados para tres casos de estudio, logrando un índice Kappa de 0.85 y un porcentaje de precisión del 69%. Estos resultados destacan la eficacia de la metodología utilizada, demostrando que se pueden mejorar los resultados al contar con información física adicional. El uso de tecnología espacial y software avanzado permitió obtener una evaluación precisa de las zonas inundables, lo que resulta valioso para la gestión de desastres y la prevención de daños en áreas afectadas por eventos climáticos extremos como el temporal Gloria. (Sola, 2020). Este estudio abre nuevas posibilidades para el monitoreo y análisis de inundaciones en tiempo real, brindando herramientas más efectivas para enfrentar este tipo de desafíos naturales.

El estudio sobre los cambios geomorfológicos en los litorales Caribe y Pacífico de Costa Rica, enfocado en el complejo deltaico de Sierpe, analiza los impactos del cambio climático, especialmente el incremento del nivel del mar. Su objetivo es describir los efectos de estos cambios en la costa, como la ruptura de cordones de playa y la erosión de islas y manglares. Los resultados destacan que un 20% de las alteraciones en el litoral Caribe están relacionadas con la destrucción de barreras, la desaparición de islas como Sucesión y Zacate, y la formación de nuevas islas barrera, siendo estos ejemplos de los efectos esperados ante el aumento del nivel del océano por el calentamiento global, (Ortiz, E. 2008).



Informe final de Proyecto de Investigación

El objetivo del estudio era áreas vulnerables a la erosión hídrica en la cuenca del A° Estacas, Entre Ríos, mediante la cartografía de variables hidrológicas y pérdida de suelos para el ordenamiento territorial. Utilizando SIG, datos como MDE ALOS PALSAR, carta de suelos, precipitación media anual e imágenes Landsat 8, se aplicaron la curva número (CN), el índice topográfico (TCI) y la ecuación USLE. Los resultados muestran que la pérdida de suelo aumenta con el escurrimiento y disminuye con el encharcamiento. Se verificó que reducir el umbral de pérdida a $3 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ es viable para una producción sustentable, y se identificaron áreas críticas con pérdidas mayores a $15 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ que requieren intervención inmediata, así como zonas vulnerables entre 5 y $15 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ bajo uso agrícola y ganadero, (Pighini. R. et., al. 2023).

El estudio realizado en una ciudad costera de España se analiza los impactos de la ocupación del dominio público marítimo-terrestre (DPMT) en el litoral sur de Alicante, ante el cambio climático, el aumento del nivel del mar y la frecuencia de temporales marítimos. Su objetivo es evaluar los efectos de la borrasca Gloria de enero de 2020, la regresión de las playas y el riesgo de inundación en las viviendas ubicadas en las playas de Babilonia, La Mata, Las Villas y El Mojón. Se identificó un alto riesgo de inundación y retroceso costero, proponiendo medidas para la recuperación de las playas y la adaptación al cambio climático. Esta investigación es relevante para nuestra propuesta en el litoral caribeño guatemalteco, ya que ambos estudios se enfocan en la vulnerabilidad costera ante el cambio climático, la erosión y las inundaciones, y proponen soluciones para mitigar estos riesgos y mejorar la resiliencia costera, Oliva, A., Olcina, J. (2022).



Informe final de Proyecto de Investigación

Se analizaron las características de la cartografía de inundaciones en España, enfocándose en la Directriz Básica y el actual Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), identificando sus diferencias, deficiencias y oportunidades de mejora. La metodología empleada incluye una comparación detallada entre ambos sistemas, evaluando el número de períodos de retorno estudiados, la calidad de los datos y la accesibilidad de la cartografía. Los resultados indican que el SNCZI optimiza significativamente los resultados de la Directriz Básica al aumentar la cantidad de períodos de retorno analizados y mejorar la metodología y los datos de partida, así como la disponibilidad de la cartografía, lo que resulta esencial para la gestión preventiva de los riesgos de inundación, (López, F. 2020).

La investigación en Guatemala acerca del cambio climático y la dinámica costera ha experimentado un crecimiento progresivo en los últimos años, impulsado principalmente por instituciones gubernamentales, académicas y organismos internacionales. Diversos estudios coinciden en que el país presenta una alta vulnerabilidad climática debido a sus características geográficas, socioeconómicas y ecológicas, lo que ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a la adaptación y mitigación (Boa et al., 2014).

En el ámbito institucional, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha promovido el uso de tecnologías geoespaciales para el monitoreo ambiental, particularmente en ecosistemas estratégicos como los manglares. Estas iniciativas incluyen el uso de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mejorar la generación de datos y fortalecer la gestión ambiental del país. Asimismo, plataformas como el Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático (SNICC) integran datos climáticos, modelos y escenarios que permiten analizar la vulnerabilidad del territorio y apoyar la toma de decisiones.



Informe final de Proyecto de Investigación

En cuanto a ecosistemas costeros, los manglares han sido objeto de múltiples estudios debido a su importancia ecológica y su papel como barreras naturales frente a eventos extremos. Investigaciones en Guatemala han demostrado su alta capacidad de almacenamiento de carbono, alcanzando valores significativamente superiores a otros ecosistemas forestales, lo que resalta su relevancia en estrategias de mitigación del cambio climático. Además, estos ecosistemas cumplen funciones clave en la protección del litoral, la biodiversidad y los medios de vida de las comunidades costeras.

Sin embargo, a pesar de estos avances, se identifica una limitación importante en estudios específicos sobre dinámica litoral en el Caribe de Guatemala, especialmente en áreas como Punta de Manabique. La mayoría de las investigaciones se han centrado en manglares del Pacífico o en estudios generales de cobertura forestal, sin profundizar en el análisis multitemporal de la línea de costa ni en la cuantificación precisa de procesos como erosión, acreción o retracción costera, evidenciando vacíos en la generación de información técnica especializada para la gestión costera del país (MARN, 2021).

En este contexto, existe una brecha de conocimiento en la aplicación sistemática de técnicas de teledetección y análisis geoespacial para el monitoreo costero en Guatemala. Por lo tanto, la presente investigación contribuye al estado actual del conocimiento al integrar herramientas modernas de análisis espacial, generar cartografía actualizada y proporcionar información cuantitativa sobre los cambios en el litoral, fortaleciendo así la base científica para la gestión y conservación de zonas costeras vulnerables.



Informe final de Proyecto de Investigación

2.5 Estado del arte

El estado actual del conocimiento muestra que, a nivel internacional, existe un desarrollo metodológico sólido en el uso de teledetección, SIG y análisis multitemporal para estudiar erosión costera, líneas de costa, inundaciones y cambios geomorfológicos. Los estudios revisados coinciden en que la integración de imágenes satelitales, sensores radar, validación GNSS y modelado espacial permite obtener resultados confiables y replicables para el monitoreo ambiental. También evidencian que la precisión mejora cuando se combinan fuentes remotas con datos de campo y procedimientos de validación estadística.

En América Latina y Europa se observan avances importantes en extracción semiautomática de líneas de costa, evaluación de inundaciones, monitoreo hídrico y cartografía de riesgo; sin embargo, la mayoría de estos estudios se concentran en contextos costeros o hidrológicos distintos al Caribe guatemalteco. En Guatemala, aunque existen esfuerzos institucionales para fortalecer la información climática y geoespacial, así como estudios sobre vulnerabilidad y ecosistemas como el manglar, todavía es limitada la producción científica enfocada en la dinámica litoral de Punta de Manabique desde una perspectiva multitemporal y cuantitativa.

Por ello, la presente investigación se inserta en una brecha de conocimiento específica: la falta de información geoespacial actualizada, sistemática y validada sobre los cambios de la línea costera, la pérdida de cobertura asociada y la dinámica geomorfológica en el litoral de Punta de Manabique. Su aporte radica en aplicar técnicas modernas de monitoreo geoespacial, generar cartografía actualizada y producir evidencia cuantitativa útil para la gestión costera, la conservación y la adaptación frente al cambio climático.

Informe final de Proyecto de Investigación

3. Planteamiento del problema

Punta de Manabique, ubicado en el municipio de Puerto Barrios, departamento de Izabal, es un ecosistema marino costero de gran valor ambiental y cultural, reconocido como un sitio Ramsar. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un aumento alarmante de la erosión costera lo cual se considera que es una de las causas de la pérdida de cobertura forestal, disminución de la extensión de playas, y ha afectado gravemente a la flora y fauna local, incluyendo especies vulnerables como aves migratorias, tortugas marinas, jaguares y tapires. Estos cambios en la configuración geográfica del litoral no solo presentan un riesgo ecológico, si no también genera una creciente preocupación en las comunidades locales, cuya subsistencia depende en gran medida de los recursos naturales de esta región, especialmente sectores como la pesca, (CONAP, 2008, 2017; Ramsar, 2020).

El cambio climático es un factor clave que podría estar impulsando estos fenómenos, mediante el aumento en el nivel del mar lo cual agrava la erosión y la pérdida de tierras, variaciones en los patrones de precipitación y la intensificación de eventos climáticos extremos, intensificando la erosión y pérdida de tierras. A pesar de la evidente necesidad de entender y mitigar estos efectos, actualmente existe una brecha significativa de información sobre los cambios específicos en la línea costera y su vulnerabilidad ante futuros escenarios climáticos, lo que limita la capacidad de respuesta y adaptación.

Ante este escenario, surge la necesidad de una investigación exhaustiva para evaluar y comprender los efectos de la erosión en el litoral de Punta de Manabique. Esta investigación propone utilizar técnicas avanzadas de monitoreo geoespacial, mediante el análisis de imágenes de satélite del programa COPERNICUS y la generación de cartografía actualizada para identificar y cuantificar los cambios en la línea costera, (Chuvieco, 2000; Chuvieco, 2010; Gómez et al., 2022; Santiago et al., 2020)



Informe final de Proyecto de Investigación

Además, se buscará establecer relaciones cuantitativas entre estos cambios geoespaciales y factores climáticos críticos, con el fin de determinar el grado de vulnerabilidad del litoral frente a futuros escenarios climáticos. Los resultados generados servirán como herramientas fundamentales para la toma de decisiones informadas, promoviendo la adaptación al cambio climático y la protección de los ecosistemas y comunidades costeras.

4. Objetivos

Evaluar los efectos de la variabilidad ambiental en el litoral de Punta de Manabique mediante técnicas de monitoreo geoespacial y la generación de cartografía actualizada.

Objetivos específicos

- Realizar un análisis geoespacial utilizando imágenes de satélite para identificar cambios en el litoral de Punta de Manabique a lo largo del tiempo.
- Aplicar técnicas semiautomáticas para detectar los efectos de la variabilidad en la línea costera y su evolución.
- Generar una cartografía actualizada que documente los procesos de cambio en el litoral de Punta de Manabique bajo la influencia de factores climáticos y ambientales.

Informe final de Proyecto de Investigación

5. Hipótesis (si aplica)

Debido a la naturaleza descriptiva de la investigación, no se requirió la formulación de una hipótesis, puesto que el propósito principal fue generar información técnica y cartográfica actualizada que permita comprender el comportamiento del litoral y servir de base para la toma de decisiones en gestión ambiental y planificación territorial.

6. Método

6.1. Tipo de investigación.

La investigación que se realizó se categoriza como una “Investigación Aplicada” se generaron nuevos conocimientos para resolver la problemática de la identificación y evaluación de los cambios inducidos por el cambio climático en el litoral de Punta de Manabique. Para ello se utilizaron imágenes de las misiones Sentinel-1 y Sentinel-2 del programa de la Agencia Espacial Europea COPENICUS y se implementaron técnicas de procesamiento geoespacial para realizar análisis temporal en la plataforma Google Earth Engine (GEE) y se realizó un modelado en ArcGIS Pro.

El objetivo principal fue generar productos cartográficos para el modelado de mapas temáticos, modelos de cambio y líneas base geomorfológicas los cuales tienen una aplicación directa en políticas de manejo del territorio, conservación de ecosistemas y fortalecimiento de la resiliencia local.

Por tanto, aunque se generaron conocimientos científicos sobre la dinámica costera y el efecto que causa la variabilidad climática, la investigación se orientó fundamentalmente hacia un objetivo práctico y de utilidad social, en concordancia con los principios de la investigación aplicada establecidos por el Manual de Frascati (OCDE, 2015).

6.2. Enfoque y alcance de la investigación.

Esta investigación tuvo un enfoque mixto, adaptando métodos cuantitativos y cualitativos para realizar un análisis de la dinámica costera en Punta de Manabique.

Informe final de Proyecto de Investigación

Se utilizaron imágenes satelitales RADAR Sentinel-1 y técnicas de procesamiento geoespacial para medir, analizar y representar los cambios en la línea costera a lo largo del tiempo. Esto permitió generar información, medible y reproducible sobre la magnitud y distribución espacial de los cambios geomorfológicos.

Y de manera complementaria, se generó información cualitativa analizando e interpretando los impactos ecológicos, integrando observaciones de campo, revisión de información ambiental y análisis de la respuesta de los ecosistemas ante la variabilidad climática.

Se considera que el alcance de la investigación es descriptivo y explicativo. Es descriptivo porque identifica, caracteriza y documenta los cambios geoespaciales del litoral mediante cartografía y análisis temporal. Es explicativo porque busca comprender las causas de dichos cambios, particularmente la influencia del cambio climático, el aumento del nivel del mar y otros factores que inciden en la erosión costera y la transformación geomorfológica del área.

6.3. Diseño de la investigación.

Tabla 1

Diseño de la investigación

Aspecto	Descripción
Enfoque cuantitativo	Los datos cuantitativos (imágenes satelitales y mediciones geoespaciales) y los datos cualitativos (interpretación ecológica de los procesos) se recolectaron y analizaron de forma simultánea para obtener una visión integral del fenómeno.
Tipo de estudio	Se evaluaron cambios en la línea costera de Punta de Manabique a lo largo de distintos periodos temporales, permitiendo analizar la evolución de la erosión y la dinámica costera asociada a la variabilidad climática dinámica costera.

Informe final de Proyecto de Investigación

Enfoque cualitativo	Diseño fenomenológico, se interpretaron los procesos ecológicos observados en los ecosistemas costeros, se realizó una interpretación técnico-ambiental de los resultados obtenidos a partir del análisis geoespacial, permitiendo identificar patrones de cambio en los ecosistemas costeros, tales como procesos de erosión, estabilidad y acreción. Asimismo, se complementó con revisión documental para contextualizar los resultados en el marco de la dinámica ambiental y la variabilidad climática del área de estudio.
Métodos procesamiento	Procesamiento digital de imágenes Sentinel-1 mediante Google Earth Engine (GEE) y ArcGIS Pro para la detección, cuantificación y cartografía de los cambios en la línea costera.

Nota. Descripción del diseño de investigación. Fuente: Elaboración propia, realizado con Excel.

6.4. Población, muestra y muestreo.

Area de estudio

El área de estudio corresponde al litoral costero de Punta de Manabique, ubicado en el municipio de Puerto Barrios, departamento de Izabal, Guatemala. Esta zona presenta una alta dinámica geomorfológica influenciada por procesos marinos, fluviales y climáticos, para el análisis de cambios en la línea costera.

El análisis abarcó la totalidad del litoral de Punta de Manabique, considerando sectores con presencia de playas, manglares, barras costeras y zonas de interacción con la desembocadura del río Motagua y el mojón limítrofe Guatemala-Honduras, donde se evidencian procesos de erosión, acreción y retracción de la línea de costa.



Informe final de Proyecto de Investigación

En el tipo de la muestra para el estudio utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, lo cual tiene como influencia la disponibilidad de datos geoespaciales en función de la disponibilidad y calidad de los datos de las misiones de Sentinel-1 y Sentinel-2 del programa COPERNICUS de la Agencia Espacial Europea (ESA), y además por las características y la geomorfológica del área de estudio. Se utilizó este tipo de muestreo por las características de los datos geoespaciales, donde se analiza la totalidad de los píxeles dentro del área de estudio y no una muestra aleatoria.

Unidades de análisis

Las unidades de análisis estuvieron constituidas de las imágenes satelitales utilizadas, los cuales representan los píxeles la mínima unidad espacial de observación. A partir de estos se identificaron y delimitaron cambios en la cobertura y en la posición de la línea costera mediante análisis multitemporal.

La investigación se basó en el uso de imágenes satelitales de las misiones Sentinel-1 (radar) y Sentinel-2 (óptico) del programa Copernicus, desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Estas imágenes fueron seleccionadas en función de su disponibilidad temporal, cobertura espacial y calidad para el análisis del litoral, ya que el programa proporciona datos geoespaciales abiertos y de alta resolución que permiten el monitoreo sistemático de la superficie terrestre y los ecosistemas (Agencia Espacial Europea, 2018; Programa Copernicus, 2018).



Informe final de Proyecto de Investigación

La resolución espacial utilizada fue de 10 metros para Sentinel-1 y 10–20 metros para Sentinel-2, lo que permitió realizar un análisis detallado de los cambios geomorfológicos en la zona costera.

Para el cálculo de la muestra no se utilizó el cálculo estadístico tradicional ya que el análisis cubre la totalidad del litoral del área protegida. La resolución espacial del sensor Sentinel-1 (10 metros) y Sentinel-2 (15 metros) y la disponibilidad de series temporales completas garantizan la representatividad del fenómeno sin necesidad de estimaciones muestrales adicionales. Para la precisión se utilizó el muestreo de poblaciones finitas y la matriz de coherencia y el índice Kappa.

Se incluyeron sectores con disponibilidad de series temporales completas de imágenes de radar y ópticas, y con una adecuada resolución para el análisis multitemporal. También se priorizaron áreas que mostraron cambios detectables entre los periodos analizados.

Se excluyeron zonas con cobertura de nubes persistente, interferencias que impidieran la delimitación precisa de la línea costera.

6.5. Técnicas.

La técnica empleada en la presente investigación integra procedimientos de análisis geoespacial y teledetección orientados a la identificación de cambios en la línea costera de Punta de Manabique, con el propósito de generar cartografía actualizada y georreferenciada que contribuya a la gestión del territorio frente a los efectos del cambio climático.

El proceso metodológico combina herramientas cuantitativas y cualitativas dentro de un enfoque mixto, permitiendo la recolección, procesamiento y análisis de información espacial proveniente de sensores satelitales, observaciones de campo y registros secundarios.



Informe final de Proyecto de Investigación

Cada fase técnica se diseñó para garantizar la precisión, reproducibilidad y validez de los resultados, empleando plataformas de análisis avanzadas como Google Earth Engine (GEE), SNAP, ArcGIS Pro, junto con instrumentos de observación directa y georreferenciación de alta precisión.

A continuación, se describen las fases que conforman la técnica desarrollada en la investigación.

Análisis de imágenes

Se emplearon imágenes satelitales del programa Copernicus de las misiones (Sentinel-1 y Sentinel-2) para la detección de cambios geoespaciales en la línea costera. El procesamiento se realizó en Google Earth Engine (GEE), utilizando algoritmos de detección de cambio y clasificación supervisada.

Para evaluar la precisión se realizaron recorridos de campo para verificar condiciones del litoral, erosión, pérdida de cobertura vegetal y afectación a hábitats costeros y colocar puntos de control (GCP) georreferenciar datos para mejorar la precisión espacial y así poder modelar mapas con una alta precisión.

Los datos obtenidos fueron procesados y analizados mediante técnicas de teledetección y análisis geoespacial, con el fin de establecer correlaciones entre los procesos de erosión costera, la elevación del terreno y la exposición a eventos climáticos.

Informe final de Proyecto de Investigación

En la fase de laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se realizó el análisis multitemporal de los cambios detectados en la línea costera, permitiendo la comparación espacial entre distintos periodos y la identificación de patrones de retroceso o avance del litoral.

Asimismo, se aplicaron herramientas de modelado geoespacial para estimar los cambios costeros bajo diferentes condiciones climáticas, integrando variables espaciales, topográficas y ambientales. Este enfoque permitió comprender la dinámica espacial del litoral y fortalecer la interpretación de los procesos geomorfológicos asociados a la variabilidad climática, aportando insumos técnicos para la generación de cartografía temática y líneas base geomorfológicas.

Tabla 2

Técnicas utilizadas

Técnica	Descripción	Instrumentos
Análisis de imágenes de satélites	Se utilizarán imágenes del programa de COPERNICUS de las misiones Sentinel-1 y Sentinel-2 para identificar y cuantificar cambios en la línea costera.	Software de análisis geoespacial
Observación directa	Observación de las condiciones actuales del litoral, incluyendo la erosión costera y la biodiversidad afectada.	Notas de campo, fotografías para documentar cambios visibles.
Análisis de datos geoespaciales	Evaluación de datos geoespaciales para establecer patrones y relaciones entre variables.	Herramientas de Teledetección y SIG (Sistema de Información Geográfica) y software de análisis estadístico.

Nota. Descripción de las técnicas para el desarrollo de la Investigación. Fuente: Elaboración propia realizado con Excel.

Informe final de Proyecto de Investigación

Instrumentos y Equipo

1. Software de análisis geoespacial
2. Imágenes de satélites del programa COPERNICUS
3. Plotter
4. Computadora
5. Dispositivos móviles para la recolección de datos en campo, utilizando aplicaciones de SIG.
6. Cuestionarios validados para la recolección de datos cuantitativos sobre percepciones de cambio climático.
7. Guías de entrevistas semiestructuradas adaptadas a la realidad local y a los temas de interés.

Equipo de observación:

8. Cámara fotográfica: Para documentar visualmente las condiciones del litoral y los cambios observados.
9. Aeronaves no tripuladas
10. Antenas GNSS
11. Vehículo 4x 4
12. Vehículo acuático (lancha)

Fases del proceso técnico de investigación

Fase 1. Adquisición y recopilación de datos

En esta etapa se obtuvieron las imágenes satelitales de las misiones Sentinel-1 (radar) y Sentinel-2 (ópticas), disponibles a través del programa Copernicus, el cual proporciona datos abiertos para el monitoreo ambiental a escala global (Agencia Espacial Europea, 2018; Comisión Europea, 2020).



Informe final de Proyecto de Investigación

Asimismo, se recopilaron datos secundarios de variables climáticas como temperatura, nivel del mar y precipitación, provenientes del Copernicus Climate Data Store (CDS) y del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, entidades que facilitan información climática confiable para estudios ambientales (Copernicus Climate Change Service, 2021; INSIVUMEH, s. f.). Los datos fueron organizados en formatos NetCDF (.nc) y GeoTIFF, garantizando su compatibilidad con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para su procesamiento y análisis.

Fase 2. Procesamiento de imágenes y pretratamiento geoespacial

Se realizó la selección de imágenes tanto para las misiones Sentinel-1 las cuales se le hicieron las correcciones: radiométrica, geométrica se aplicaron los filtros de speckle (efecto de sal y pimienta) este tratamiento es importante para las imágenes Radar, además se realizó el proceso de re proyectar a un sistema de coordenadas GTM.

El procesamiento de imágenes de radar de Sentinel-1 (banda C), se realizó la selección y descarga de imágenes, utilizando plataformas como Copernicus Open Access Hub, para el procesamiento se utilizaron las plataformas de libre acceso y SNAP (ESA Sentinel Application Platform) y Google Earth Engine, utilizando los productos GRD (Ground Range Detected), con baja interferencia (sin lluvias intensas) y fechas comparables para análisis temporal.

Posteriormente, se llevó a cabo el preprocesamiento de los datos SAR, iniciando con la aplicación de órbitas precisas (Apply Orbit File) para mejorar la geolocalización de la imagen. Seguidamente, se ejecutó la calibración radiométrica, transformando los valores digitales en coeficientes de retrodispersión (Sigma Naught), lo que permite interpretar físicamente la señal radar.



Informe final de Proyecto de Investigación

A continuación, se aplicó la reducción de ruido speckle, característica propia de las imágenes SAR, mediante filtros Refined Lee, con el fin de mejorar la calidad visual y analítica. Luego, se realizó la corrección geométrica (Terrain Correction) utilizando modelos digitales de elevación (DEM), lo que permite obtener una correcta representación espacial del terreno. Posteriormente, se puede efectuar la conversión a escala logarítmica (dB) para facilitar la interpretación de la retrodispersión.

Finalmente, se procedió al análisis e interpretación, donde la información radar permitió diferenciar superficies como agua (baja retrodispersión), vegetación (alta dispersión volumétrica). En estudios costeros, estas imágenes son especialmente útiles para la detección de cuerpos de agua y delimitación de la línea de costa, incluso en condiciones de nubosidad, así como para análisis multitemporales de cambios en el litoral.

Para el caso de las imágenes del de la misión Sentinel-2 se seleccionaron las imágenes que presentaran por lo menos un 20% de nubosidad y también se re proyectaron a un sistema de coordenadas GTM, el procesamiento se efectuó utilizando Google Earth Engine (GEE), ArcGIS Pro.

Para el análisis cartográfico del litoral de Punta de Manabique se desarrolló de forma secuencial. En primer lugar, se realizó la adquisición de datos, descargando imágenes satelitales desde plataformas como Copernicus y Google Earth Engine, seleccionando aquellas con baja nubosidad (menor al 10–20%) y de la misma época del año para asegurar su comparabilidad.

Informe final de Proyecto de Investigación

Posteriormente, se aplicó la corrección atmosférica con el fin de eliminar las distorsiones causadas por la atmósfera. A continuación, se efectuó la selección de bandas espectrales relevantes (B2, B3, B4 y B8), esenciales para el análisis del entorno costero. Con estas bandas, se procedió a la generación de índices espectrales, tales como NDWI y MNDWI para la identificación de cuerpos de agua, y NDVI para la detección de vegetación. A partir de estos resultados, se efectuó la extracción de la línea de costa, utilizando índices como el NDWI o las clases generadas, y convirtiendo los datos de formato ráster a vector.

Posteriormente, se desarrolló un análisis multitemporal, comparando imágenes de diferentes años para identificar procesos de erosión (retroceso) y acreción (avance) costera. Finalmente, se realizó la validación de resultados, mediante el uso de puntos GNSS (RTK) y la elaboración de una matriz de confusión para evaluar la precisión de la clasificación.

Esta fase permitió preparar los datos para el análisis de cambio en la línea costera, asegurando una base cartográfica precisa y estandarizada.

Fase 3. Análisis cuantitativo y modelado de cambios

A través de técnicas de detección de cambios a través del tiempo, se compararon las posiciones de la línea costera en distintos periodos utilizando imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2, lo que permitió evaluar la dinámica espacial y temporal de los procesos de erosión y transformación geomorfológica. En Google Earth Engine se implementaron algoritmos de clasificación supervisada incluyendo aplicaciones basadas en el conjunto de datos global de cambio de cobertura del bosque desarrollado por (Hansen et al. 2020), los cuales proporcionan una base estandarizada para interpretar variaciones en la cobertura de superficie a lo largo del tiempo en escalas regionales y locales.



Informe final de Proyecto de Investigación

Posteriormente, se aplicaron procedimientos de detección de bordes y segmentación por umbral para generar capas binarias que distinguen áreas con cambios significativos de aquellas sin variación aparente. Estos resultados se complementaron con análisis estadístico espacial en entornos SIG, utilizando raster calculator para analizar diferencias entre periodos de tiempo y modelos de proximidad kernel para visualizar patrones de densidad espacial de cambio.

El procesamiento multiespectral y multitemporal permitió construir mapas temáticos, identificar los vectores predominantes de cambio y generar modelos de evolución geomorfológica que sirven como líneas base para entender las tendencias de la erosión costera bajo condiciones de variabilidad climática.

ase 4. Validación de resultados

La validación de los resultados generados durante el análisis utilizando procesos de teledetección y modelado espacial este proceso es importante para garantizar la precisión posicional para la generación de archivos espaciales y rastes que a la postre se utilizaron para la generación del modelado de mapas derivados de los cambios detectados en la línea costera. En esta fase se integraron métodos de verificación de campo y análisis estadístico de precisión, siguiendo estándares de evaluación de exactitud geoespacial ampliamente utilizados en estudios de clasificación y detección de cambios.

Primeramente, fue necesario realizar un levantamiento de puntos de control en terreno mediante receptores GNSS con sistema RTK (Real Time Kinematic) las cuales se utilizaron para garantizar el nivel de precisión, que proporcionan georreferenciación con precisión centimétrica.

Informe final de Proyecto de Investigación

Lo cual permitió generar datos de referencia (ground truth) espacialmente distribuidos en sectores previamente establecidos utilizando hojas cartográficas seleccionando áreas que fueron representativas de la costa, los cuales se emplearon para comparar y validar las posiciones de la línea costera derivadas de las imágenes satelitales.

Para evaluar cuantitativamente la calidad del mapa resultante y del proceso de detección de cambios, se implementó la matriz de confusión (o matriz de error) junto con el coeficiente Kappa como medidas de concordancia entre los datos clasificados y los datos de referencia obtenidos en campo y o a partir de imágenes de alta resolución. La matriz de confusión permitió comparar de forma sistemática cada clase asignada en el mapa con su verdadera categoría de cobertura o condición, cuantificando aciertos y errores obtenidos por los algoritmos de clasificación supervisada y para la extracción de la línea costera.

A partir de esta matriz se calcularon indicadores como la precisión, mientras que el índice Kappa proporcionó una medida estandarizada de concordancia de la probabilidad de acierto aleatorio, lo cual permite ajustar los márgenes de error asociados al proceso automático de detección de cambio, informar sobre las limitaciones del modelo y aumentar la robustez de los productos cartográficos obtenidos.

Fase 5. Integración, interpretación y generación de productos finales

En esta etapa final se integraron, y se consolidó la información obtenida y se transformaron toda la data generada y organizaron los resultados obtenidos en el procesamiento satelital, los archivos espaciales vectoriales, los modelos ráster y los insumos de verificación en campo. Todos los datos fueron concordados en un entorno SIG para su análisis conjunto y posterior elaboración de productos cartográficos. Este proceso permitió estructurar una base espacial coherente y depurada, donde cada archivo espacial fue alineado bajo el mismo



Informe final de Proyecto de Investigación

sistema de referencia geográfica proceso clave para garantizar su compatibilidad y precisión espacial.

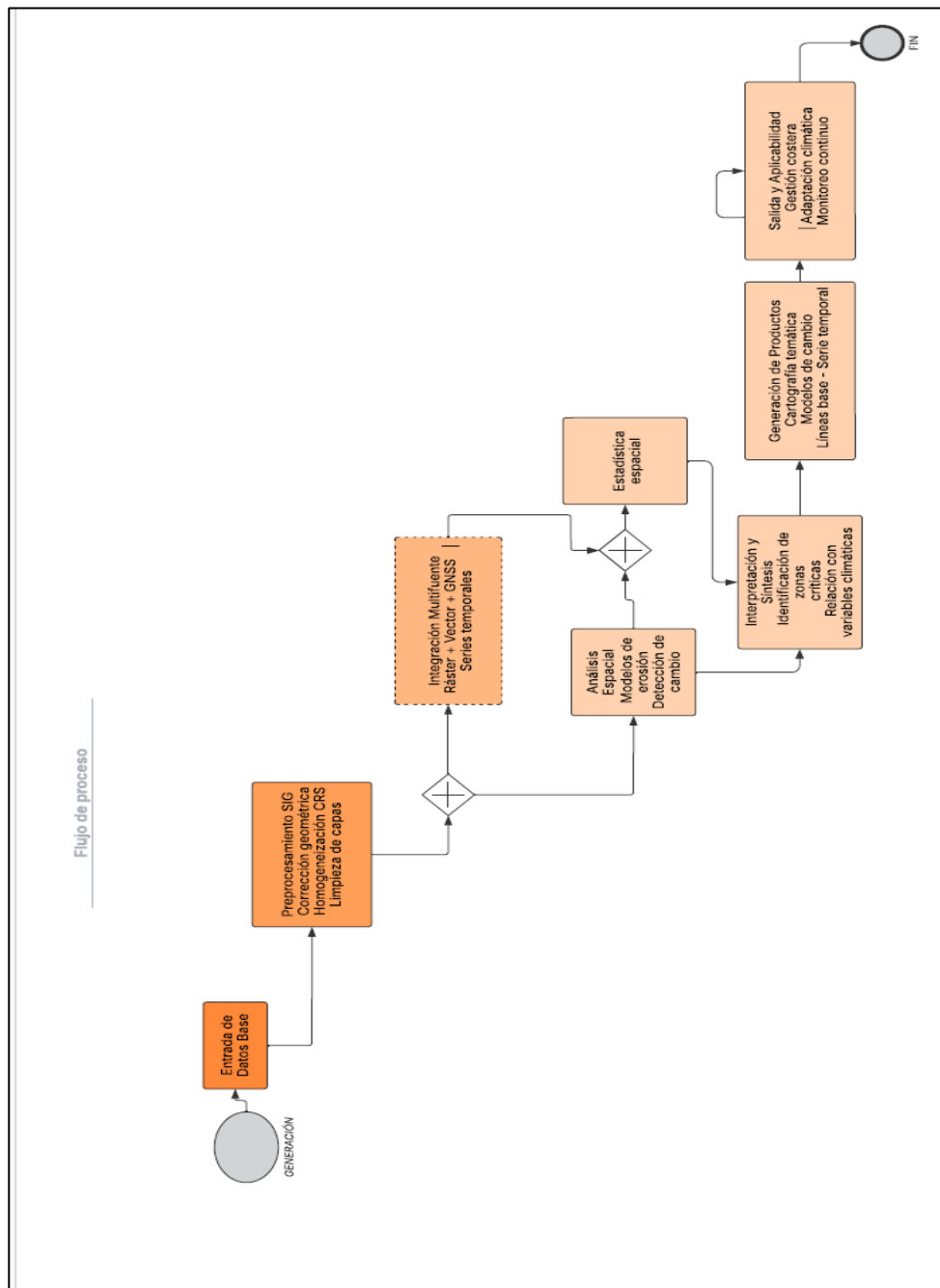
Posteriormente, se realizó la interpretación espacial y temporal de los patrones de erosión costera, identificando áreas con retroceso, avance o estabilidad de la línea de costa. Este análisis se vinculó con variables ambientales y climáticas relevantes, tales como elevación, exposición a mareas, oleaje y variabilidad temporal, lo cual permitió comprender la dinámica costera y los principales focos de vulnerabilidad. A partir de estos resultados se construyeron modelos de cambio geomorfológico, permitiendo visualizar tendencias evolutivas y posibles escenarios de afectación futura.

Los productos generados como: cartografía georreferenciada, mapas temáticos, series temporales, modelos de cambio y líneas base geomorfológicas pueden constituir herramientas aplicables para la gestión y toma de decisiones en torno al uso del territorio. Dichos insumos fortalecen el diseño de estrategias de adaptación climática, planificación costera, monitoreo ambiental continuo y definición de áreas prioritarias para conservación o intervención.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 1

Flujo del Proceso para la generación de cartografía



Nota. Esquema del contexto geográfico y ambiental del litoral de Punta de Manabique, Guatemala. Fuente. Elaboración propia mediante Lucidchart versión gratuita.

Informe final de Proyecto de Investigación

6.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

Tabla 3

Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
1. Realizar un análisis geoespacial utilizando imágenes de satélite para identificar cambios en el litoral de Punta de Manabique a lo largo del tiempo.	Cambios en la línea costera	Imágenes de satélite del programa COPERNICUS, software de análisis geoespacial	Metros (m) de retracción o avance
2. Aplicar técnicas semiautomáticas para detectar los efectos de la variabilidad en la línea costera y su evolución.	Efectos del cambio climático (erosión, sedimentación)	Software de análisis de imágenes (Plataformas de código abierto Google Earth Engine)	Grados de erosión (m) o cambios en el área (m ²)
3. Generar una cartografía actualizada que documente los procesos de cambio en el litoral de Punta de Manabique bajo la influencia de factores climáticos y ambientales	Configuración geográfica actual del litoral	SIG (Sistema de Información Geográfica), software de cartografía	Kilómetros (km) de línea costera, hectáreas (ha) de área afectada



Informe final de Proyecto de Investigación

6.7. Procesamiento y análisis de la información.

Para el componente cuantitativo se emplearon métodos y técnicas de análisis orientados a medir, comparar y modelar los cambios espaciales del litoral Punta de Manabique desarrollando mediante la realización de análisis geoespacial y estadística espacial aplicado a imágenes satelitales multitemporales y de Radar Sentinel-1 y Sentinel-2. Los datos fueron organizados en formato ráster y vectorial, estandarizando su proyección y resolución para asegurar comparabilidad entre periodos.

El análisis incluyó:

- Detección de cambio multitemporal para identificar variaciones en la línea costera.
- Clasificación supervisada y análisis espectral para distinguir áreas de erosión.
- Cálculo matricial y álgebra de mapas para cuantificar pérdida/ganancia costera.
- Modelos de proximidad y densidad Kernel para identificar zonas críticas de transformación.
- Estadística de validación con Matriz de Confusión e Índice Kappa para precisión temática.

Se trabajó con un nivel de confianza del 95%, considerando un margen de error del 5% en estimaciones espaciales, acorde al estándar aplicado en estudios de teledetección. Cuando fue necesario, se verificó el cumplimiento de supuestos estadísticos básicos para el cálculo de precisión y consistencia espacial. El análisis correlacional entre pérdida costera y variables físicas (elevación, exposición mareal) se evaluó mediante superposición espacial, coeficientes de correlación pixel-a-pixel y análisis visual comparativo.

El procesamiento se realizó con ArcGIS Pro, SNAP y Google Earth Engine, herramientas especializadas en análisis satelital. El uso de las plataformas fue bajo licencias institucionales o de libre acceso según el software utilizado.



Informe final de Proyecto de Investigación

Para complementar el análisis, se desarrollaron actividades de información generada durante el trabajo de gabinete y campo. A partir de registros fotográficos escénicas, análisis fotogramétrico, anotaciones de campo y observaciones directas, se buscó identificar y documentar las condiciones ambientales del litoral, así como interpretar los cambios observados en la cobertura y dinámica costera. Este proceso permitió contextualizar los resultados del análisis geoespacial, facilitando la comprensión de los posibles factores asociados a la pérdida de cobertura forestal y a la dinámica ambiental del área de estudio.

A partir de esta sistematización, se realizó un análisis interpretativo orientado a identificar patrones espaciales y temporales en el comportamiento del paisaje costero, permitiendo relacionar los cambios observados con posibles factores ambientales. Este análisis se utilizó exclusivamente como soporte para la interpretación de los resultados geoespaciales, facilitando la comprensión de la dinámica del litoral y aportando contexto a los procesos de erosión y pérdida de cobertura detectados mediante el análisis satelital.

Asimismo, se efectuó un análisis interpretativo de los registros, con el propósito de reconocer patrones espaciales y temporales observables en el paisaje, los cuales permitieran contextualizar los resultados derivados del análisis geoespacial.

Es importante destacar que esta información no fue utilizada como un enfoque cualitativo independiente ni como base de medición estadística, sino como un insumo complementario de interpretación, que contribuye a explicar y respaldar los resultados obtenidos a partir del procesamiento de imágenes satelitales y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), fortaleciendo así la comprensión integral de la dinámica ambiental del área de estudio.



Informe final de Proyecto de Investigación

Investigación Cuantitativa

1. Métodos y Técnicas de Análisis

- a) Para el análisis de Imágenes de satélite, se utilizarán técnicas de procesamiento de imágenes para detectar cambios en la línea costera a partir de imágenes de las misiones Sentinel-1 y Sentinel 2. Esto incluirá la extracción semiautomática de cambios para evaluar la erosión y sedimentación.
- b) Se aplicarán procedimientos estadísticos para evaluar la significancia de los cambios observados. El propósito es determinar la relación entre los cambios en la línea costera y los factores climáticos asociados.
- c) Se emplearán software como Google Earth Engine para el análisis de imágenes.

2. Aspectos Interpretativos

- a) Se buscará un nivel de confianza del 95% en las estimaciones, lo que implica un margen de error aceptable para los resultados obtenidos.
- b) Para las pruebas de hipótesis, se establecerá un nivel de significancia (p-valor) de 0.05.
- c) Se evaluarán los procesos de correlación para identificar relaciones entre variables, utilizando análisis de regresión lineal para predecir la evolución de la línea costera en función de las variables climáticas.
- d) Si se identifican grupos diferentes (por ejemplo, diferentes segmentos de la costa), se aplicarán pruebas de comparaciones múltiples para analizar las diferencias significativas entre ellos.



Informe final de Proyecto de Investigación

1. Triangulación de Datos

- a) Se aplicará triangulación de datos al comparar, así como los resultados del análisis de imágenes, para asegurar la validez y robustez de los hallazgos. Esto implica cruzar la información obtenida de entrevistas con los datos cuantitativos de los cambios en la línea costera.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan y analizan los principales resultados obtenidos a partir del procesamiento de imágenes satelitales y del análisis geoespacial aplicado al litoral de Punta de Manabique. Se exponen los cambios identificados en la cobertura forestal y en la dinámica de la línea costera.

Retracción o avance en Metros (m)

En el análisis espacial muestra cambios espaciales de la línea de costa existe desplazamiento de la playa lo que representa reducción del ancho y se identifican sectores con retracción significativa, como en las zonas de San Francisco del mar, Jaloa, Boba Barra del Motagua, Mojón limítrofe este fenómeno de pérdida de tierra a lo largo de la costa se considera que es debido a la erosión costera, a la acción de olas, corrientes y mareas, especialmente en esta área del caribe Guatemalteco porque no tiene protección natural como áreas rocosas por lo que los materiales blandos son removidos con mayor rapidez ver Tabla 4.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 4

Retracción de la línea costera

No.	Retracción de la costa	hectáreas
1	San Francisco- Jaloa	102.74
2	Boca Barra del Motagua	12.79
3	Mojón limítrofe	11.16
	Total	126.70

Nota. Estimaciones con base en el análisis geoespacial de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 (Copernicus), período 2006–2025. Fuente: Elaboración propia realizado con Excel.

Tabla 5

Estimación de áreas de acreción

No.	Acreción de costa	hectárea
1	Punta de Manabique	4.17
2	Boca Barra del Motagua	85.97
	Total	90.14

Nota. Análisis de áreas de acreción fueron estimadas mediante técnicas de teledetección y análisis en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para el período 2006–2025. Fuente: Elaboración propia realizado con Excel.

La retracción observada ha generado la disminución de áreas de playa, así como de bosque de mangle y bosques asociados a manglares, los cuales cumplen funciones geomorfológicas al estabilizar sedimentos y amortiguar la energía del oleaje; sin embargo, cuando la erosión supera la capacidad de los manglares para retener sedimento, su avance se ve comprometido y se traduce en pérdida de cobertura y retroceso de la línea costera.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 2

Cambios espaciales de la línea costera



Nota. La figura muestra los cambios espaciales de la línea costera en el litoral de Punta de Manabique durante el período 2006–2025. Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS Pro.

Este cambio en la forma geográfica del litoral refleja un proceso dinámico en el que la interacción entre la energía marina, la variabilidad climática y la estructura del sedimento costero dictan patrones de retracción o, en casos puntuales de acreción, de avance de la costa.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 3

Cambios espaciales de la línea costera



Nota. La figura muestra los cambios espaciales de la línea costera en el litoral de Punta de Manabique durante el período 2006–2025, evidenciando procesos de retracción de 173.40 m de distancia dentro del mar a la dinámica costera. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 del programa Copernicus, realizado con ArcGIS Pro.

Entre los años 2006 y 2025 se observó una retracción significativa de la línea costera en el sector del mojón limítrofe entre Guatemala y Honduras. El análisis multitemporal indica que la posición de la costa se desplazó hacia el interior del mar en una distancia de 173.40 m, en comparación con la posición de referencia establecida en 2006. Esta variación espacial representa una pérdida de terreno costero y refleja un proceso persistente de erosión influenciado por la dinámica marina y las condiciones ambientales de la región.

Informe final de Proyecto de Investigación

La magnitud de la retracción registrada es consistente con patrones de retroceso observados en costas expuestas a la acción combinada de oleaje, corrientes y eventos hidrometeorológicos extremos, que incrementan la remoción de sedimentos y la modificación geomorfológica del litoral. Este comportamiento destaca la necesidad de incorporar monitoreo continuo y estrategias de gestión costera, especialmente en puntos críticos como el mojón limítrofe, donde los cambios en la línea de costa tienen implicaciones directas sobre el paisaje físico y su funcionalidad ecológica.

Análisis de la estimación de la Pérdida de cobertura forestal

En el contexto de la dinámica ambiental del área de estudio, se estimó una pérdida de cobertura forestal de 10,154.689 hectáreas en el litoral de Punta de Manabique. Para ello, se adaptó el algoritmo de Global Forest Change de Hansen et al. en un análisis multitemporal de teledetección óptica con lo que se evaluó los cambios en la cobertura a lo largo del tiempo, utilizando clasificación supervisada y análisis espectral con las imágenes satelitales, el cual permite identificar eventos de pérdida de cobertura forestal. Este enfoque facilitó la detección de patrones espaciales de pérdida a escala local, evidenciando una reducción significativa del bosque en el área de estudio, en concordancia con tendencias globales asociadas a presiones antrópicas y condiciones climáticas cada vez más extremas.

Esta pérdida de cobertura forestal puede interpretarse como un indicador de perturbaciones continuas en los ecosistemas del litoral de Punta de Manabique, asociadas tanto a factores naturales como antrópicos. En particular, las condiciones hidrometeorológicas, como el incremento en la intensidad y frecuencia de lluvias, tormentas tropicales y eventos hidrometeorológicos, erosión junto con el aumento del nivel del mar, contribuyen a la degradación de los ecosistemas costeros, favoreciendo procesos de inundación, erosión y salinización de suelos que afectan directamente la estabilidad y permanencia de la cobertura boscosa.



Informe final de Proyecto de Investigación

Además, factores antrópicos como actividades de expansión del uso del suelo, vinculada a actividades de extracción de madera y la conversión de áreas naturales para usos productivos, intensifica la pérdida de cobertura forestal, incrementando la vulnerabilidad ecológica del sistema litoral.

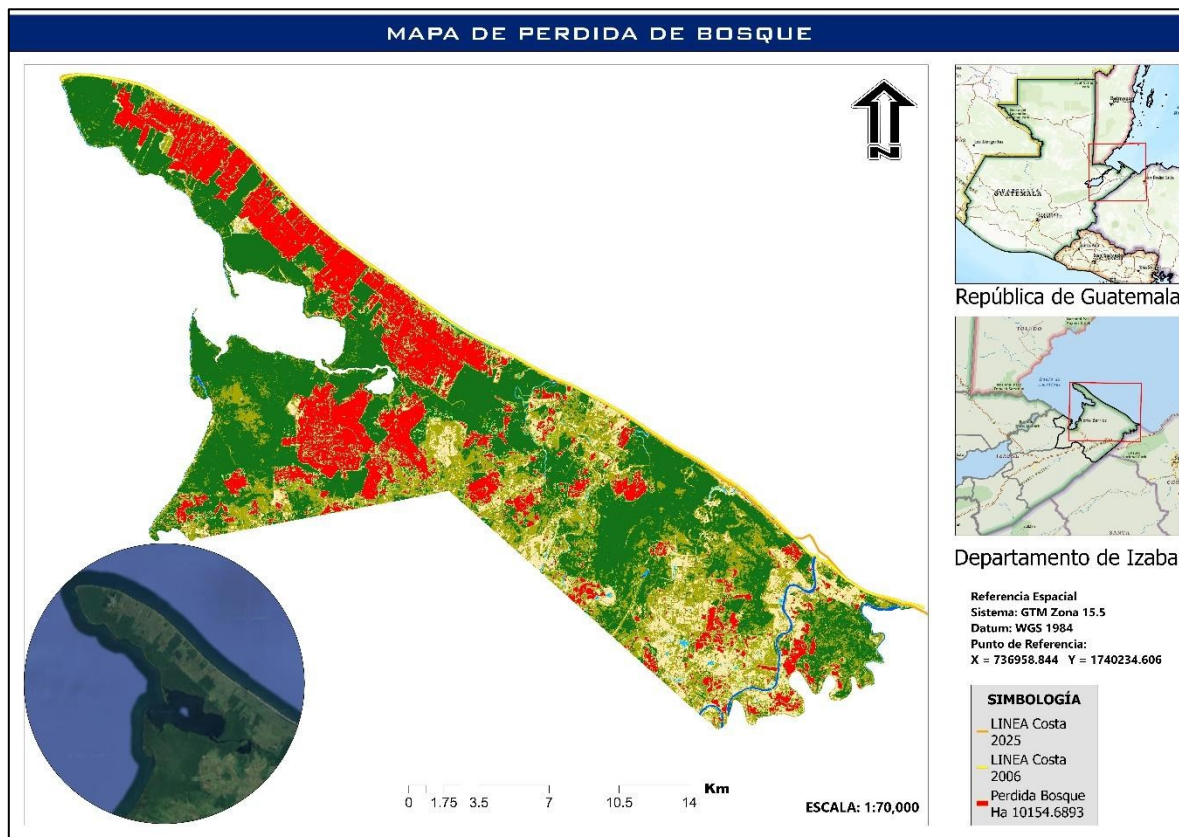
Esta pérdida de cobertura forestal puede tener impactos directos sobre procesos ambientales de importancia para el sistema de litoral Punta de Manabique, tales como:

- Alteración de la estructura y funcionamiento del paisaje, reduciendo la capacidad de captura de agua y la regulación local del ciclo hidrológico.
- Reducción del carbono almacenado, ya que la eliminación de bosques contribuye a mayores concentraciones de CO₂ en la atmósfera ya que el litoral de Punta de Manabique se considera como un sitio Ramsar (los bosques actúan como sumideros de carbono).
- Incremento de vulnerabilidad ecológica, dado que la pérdida de bosque puede facilitar la degradación del suelo y la fragmentación de hábitats.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 4

Mapa de perdida de bosque



Nota. Dinámica ambiental del área de estudio con una pérdida de cobertura forestal de 10,154.689 ha en Punta de Manabique, estimada mediante el algoritmo *Global Forest Change*. Fuente: Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

El análisis de precisión de los resultados se realizó mediante el cálculo del porcentaje de precisión global y el Índice Kappa, utilizando una matriz de confusión diseñada para poblaciones finitas. Para llevar a cabo esta validación, primero se generaron 500 puntos aleatorios distribuidos en toda la zona de estudio, los cuales representan posibles lugares para verificar la información. A partir de estos, se seleccionaron 217 puntos de control, cuyo número fue definido mediante un cálculo estadístico que garantizó que la muestra sea representativa (con un 95 % de confianza y un margen de error del 5 %).



Informe final de Proyecto de Investigación

El tamaño de la muestra se determinó considerando un nivel de confianza del 95 %, una probabilidad de ocurrencia (p) de 0.5 y un margen de error del 5.0 %, garantizando la representatividad y robustez de la evaluación. Este procedimiento permitió cuantificar el grado de concordancia entre la clasificación obtenida y los datos de referencia, reduciendo el sesgo asociado a la selección de muestras y asegurando la confiabilidad de los resultados, de acuerdo con metodologías ampliamente utilizadas en estudios de teledetección y análisis geoespacial (adaptado de Orozco y Pineda, 2019).

Los puntos de control son lugares específicos dentro del área de estudio que se utilizan para verificar si los resultados obtenidos con imágenes satelitales son correctos. Cada punto representa una ubicación donde se revisa qué tipo de cobertura existe realmente (clase: bosque, no bosque, agua,) y se compara con lo que indicó el análisis realizado con las imágenes. Utilizando estos puntos, se midió la precisión del análisis espacial de clasificación supervisada y análisis espectral, si este análisis coincide con la información obtenida en campo.

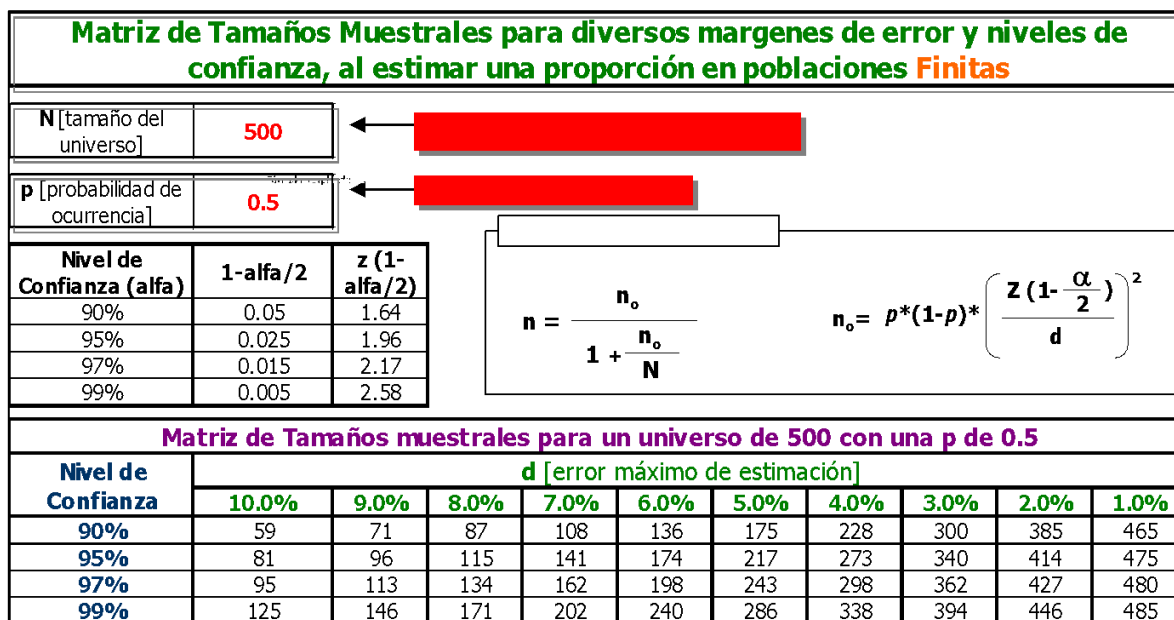
Informe final de Proyecto de Investigación

Cálculo de Precisión

El cálculo de precisión permitió evaluar la confiabilidad de la clasificación obtenida mediante el análisis geoespacial. Para ello, se utilizó una matriz de confusión a partir de puntos de control, obteniendo indicadores como la precisión global y el Índice Kappa. Estos resultados evidencian el grado de concordancia entre la información clasificada y las condiciones reales del área de estudio.

Figura 5

Matriz para poblaciones finitas



Nota. Proceso que se realizó para determinar las muestras al azar con random point, Adaptado de Orozco y Pineda, 2019. *Revista Internacional de Aprendizaje*, pp. (27), 1-27.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 6

Distribución de las muestras

Clases	Mangle	Aguas Abiertas	Bosque	No bosque	Playa	Total	Error de Comisión
Mangle	15	17	2	6	0	40	25
Aguas Abiertas	0	185	0	0	0	185	0
Bosque	0	0	61	3	0	64	3
No bosque	0	0	32	84	0	116	32
Playa	0	0	0	0	95	95	0
Error de Emisión	0	32	52	46	16	500	
Total	15	234	147	139	111		

Nota: distribución de las muestras para determinar el nivel de precisión, Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 7

Porcentaje de precisión

	Ítem	Índice	%
Precisión global o concordancia general	po	0.88	88%
Proporción esperada	pe	0.32	32%
	K	0.8	80

Nota. La evaluación espacial presento una precisión del 88%.

Tabla 8

Porcentaje de precisión Índice Kappa

Clases	Error de Com (%)	Error de Omi (%)	Precisión Global (po)	Precisión Global (po) %	Índice K	Índice K (%)
Mangle	5	0				
Aguas Abiertas	0	6.4				
Bosque	0.6	10.4	0.88	88%	0.8	80
No Bosque	6.4	9.2				
Infraestructura	0	3.2				

Nota. El porcentaje del índice Kappa muestra un 0.8 lo que significa que tiene una buena concordancia.



Informe final de Proyecto de Investigación

Discusión de resultados

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se identificaron cambios significativos en el litoral, asociados a procesos de erosión, acreción y transformación del paisaje costero en función de la variabilidad ambiental. En este sentido, el uso de herramientas de geomática constituye un elemento que puede ser utilizado para la evaluación espacial, planificación del territorio, monitoreo secuencia y temporal de estos procesos con mayor precisión y confiabilidad, del litoral de Punta de Manabique en el Caribe de Guatemala.

En relación con los procesos de erosión, los resultados evidencian una retracción significativa de la línea costera en sectores específicos del litoral de Punta de Manabique, alcanzando una pérdida total de 126.70 hectáreas. De manera puntual, el sector San Francisco y Jaloa presentó la mayor afectación con 102.74 hectáreas de retracción, seguido por Boca Barra del Motagua con 12.79 hectáreas y el Mojón limítrofe con 11.16 hectáreas. Adicionalmente, en sector del mojón se estima que el retroceso de la línea de costa es de 173.40 metros lineales, lo que constituye un indicador relevante de la intensidad del proceso erosivo en esta zona fronteriza. Este comportamiento refleja una pérdida progresiva de superficie terrestre, asociada a la influencia de factores hidrometeorológicos, como el incremento en la intensidad del oleaje, eventos extremos y variaciones en el régimen de precipitaciones, así como a la dinámica sedimentaria condicionada por la desembocadura del río Motagua. Asimismo, la disminución de la cobertura vegetal costera, particularmente en ecosistemas de manglar, podría estar contribuyendo a la reducción de la capacidad natural de protección del litoral, incrementando la vulnerabilidad del sistema costero frente a procesos erosivos.

En cuanto a la dinámica de la cobertura forestal, los resultados evidencian una pérdida significativa de 10,154.689 hectáreas en el litoral de Punta de Manabique, lo que refleja un proceso sostenido de transformación del paisaje. Esta reducción de bosque se asocia tanto a factores antrópicos, como la expansión del uso del suelo para actividades productivas, como condiciones ambientales, particularmente procesos hidrometeorológicos y el aumento del nivel del mar que afectan directamente los ecosistemas costeros.

Informe final de Proyecto de Investigación

La pérdida de cobertura vegetal, reduce la capacidad natural de protección del litoral, ya que estos ecosistemas actúan como barreras frente al oleaje y favorecen la estabilización de sedimentos. En consecuencia, su degradación contribuye directamente a la erosión costera y a la pérdida progresiva de playa, facilitando el retroceso de la línea costera observado en sectores como San Francisco, Jaloa y el Mojón limítrofe. Asimismo, esta dinámica impacta funciones ecológicas como la captura de carbono, la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad, evidenciando una creciente vulnerabilidad del sistema costero, donde la interacción entre presiones humanas y factores ambientales intensifica los procesos de degradación del territorio.

La generación de cartografía actualizada permitió documentar de manera precisa los procesos de cambio en el litoral de Punta de Manabique, evidenciando la distribución espacial de la erosión, la acreción y la pérdida de cobertura forestal bajo la influencia de factores climáticos y ambientales. Estos productos cartográficos constituyen una herramienta que coadyuva para la visualización y análisis de la dinámica costera, ya que integran información geoespacial que facilita la identificación de zonas críticas y tendencias de transformación del territorio.

En este sentido, la cartografía generada no solo aporta al conocimiento del comportamiento del litoral, sino que también representa un insumo técnico fundamental para la planificación, gestión y toma de decisiones orientadas a la adaptación y conservación de los ecosistemas costeros.

Los resultados evidencian que la integración de imágenes satelitales y herramientas de geomática permitió analizar de manera sistemática la dinámica costera en el área de estudio, facilitando la identificación y cuantificación de procesos como la erosión, acreción y retracción de la línea litoral. A través del uso de técnicas semiautomáticas, incluyendo clasificación, detección de bordes y análisis ráster en entornos SIG, se logró delimitar con mayor precisión los cambios espaciales y evaluar su evolución temporal.



Informe final de Proyecto de Investigación

7. Propiedad intelectual

Esta investigación es producto del proyecto de investigación: Cartografía y monitoreo geoespacial en Punta de Manabique para identificar cambios inducidos por el cambio climático, avalado, aprobado y cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación, Centro Universitario de Izabal CUNIZAB de la Universidad de San Carlos de Guatemala, febrero del año 2025, con número de partida presupuestaria del proyecto de investigación 4.8.69.2.03.

Los resultados obtenidos en la presente investigación no están sujetos a un proceso restrictivo de gestión de propiedad intelectual, ya que corresponden a productos científicos generados a partir del análisis, procesamiento e interpretación de datos satelitales de acceso abierto (programa COPERNICUS y otras fuentes públicas) y del uso de software con licencias institucionales y plataformas abiertas.

No obstante, la cartografía, modelos geoespaciales, bases de datos derivadas y metodologías aplicadas constituyen producción académica original, por lo que se reconoce la autoría intelectual del investigador, recomendándose su uso con fines científicos, técnicos y de gestión territorial, citando adecuadamente la fuente. En caso de publicación o difusión institucional, estos resultados podrán ser compartidos bajo esquemas de acceso abierto, sin fines comerciales, en concordancia con los principios de ciencia abierta y transferencia de conocimiento.

Informe final de Proyecto de Investigación

8. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 9

Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Cartografía actualizada de la línea costera y zonas de retracción/acreción	Autoridades ambientales y de gestión costera (CONAP, MARN), municipalidades del área de influencia	30	Comunidades locales, pescadores artesanales y población costera	1,500
Modelos de cambio del litoral	Instituciones técnicas y académicas (universidades, centros de investigación geoespacial)	50	Investigadores, estudiantes y profesionales del área ambiental y SIG	500
Identificación de áreas vulnerables a la erosión costera	Gestores del Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique y tomadores de decisión	25	Organizaciones no gubernamentales y proyectos de conservación	300
Estimación de pérdida de cobertura forestal (bosque y manglar)	Instituciones forestales y de conservación (INAB, CONAP)	20	Comunidades dependientes de servicios ecosistémicos	800
Líneas base geomorfológicas para monitoreo costero	Unidades técnicas de planificación territorial y gestión de riesgos	15	Población local y regional expuesta a riesgos costeros	2,000
Metodología geoespacial aplicada y documentada	Sector académico y profesionales en geomática y teledetección	40	Instituciones públicas y privadas	200



Informe final de Proyecto de Investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
			interesadas en replicar el método	
Cartografía actualizada de la línea costera y zonas de retracción/acreción	Autoridades ambientales y de gestión costera (CONAP, MARN), municipalidades del área de influencia	30	Comunidades locales, pescadores artesanales y población costera	1,500
Modelos de cambio multitemporal del litoral	Instituciones técnicas y académicas (universidades, centros de investigación geoespacial)	50	Investigadores, estudiantes y profesionales del área ambiental y SIG	500
Identificación de áreas vulnerables a la erosión costera	Gestores del Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique y tomadores de decisión	25	Organizaciones no gubernamentales y proyectos de conservación	300
Estimación de pérdida de cobertura forestal (bosque y manglar)	Instituciones forestales y de conservación (INAB, CONAP)	20	Comunidades dependientes de servicios ecosistémicos	800
Líneas base geomorfológicas para monitoreo costero	Unidades técnicas de planificación territorial y gestión de riesgos	15	Población local y regional expuesta a riesgos costeros	2,000
Metodología geoespacial aplicada y documentada	Sector académico y profesionales en geomática y teledetección	40	Instituciones públicas y privadas interesadas en replicar el método	200



Informe final de Proyecto de Investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Cartografía actualizada de la línea costera y zonas de retracción/acreción	Autoridades ambientales y de gestión costera (CONAP, MARN), municipalidades del área de influencia	30	Comunidades locales, pescadores artesanales y población costera	1,500
Modelos de cambio multitemporal del litoral	Instituciones técnicas y académicas (universidades, centros de investigación geoespacial)	50	Investigadores, estudiantes y profesionales del área ambiental y SIG	500
Identificación de áreas vulnerables a la erosión costera	Gestores del Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique y tomadores de decisión	25	Organizaciones no gubernamentales y proyectos de conservación	300

Informe final de Proyecto de Investigación

9. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Los resultados de esta investigación podrán ser divulgados a la comunidad y el público en general, lo que generará conciencia sobre la importancia de proteger los ecosistemas costeros y adoptar prácticas más sostenibles. La educación ambiental y la sensibilización sobre el cambio climático serán elementos clave para promover una mayor responsabilidad y compromiso con la conservación de nuestros recursos naturales.

Tabla 10

Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

	Sí	No
Presentación TV		
Entrevistas radiales		
Podcast		
Entrevista DIGI		
Recursos audiovisuales		
Congresos científicos nacionales o internacionales		
Talleres		
Publicación de libro		
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales		
Presentación pública		
Presentación autoridades USAC		
Presentación a beneficiarios directos	X	
Entrega de resultados		



Informe final de Proyecto de Investigación

	Sí	No
Docencia en grado		
Docencia postgrado		
Póster científico		
Trifoliales		
Conferencias		
Otro (describa)		

10. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

En los últimos años, la tecnología geoespacial a través de los análisis de imágenes de satélite revela una inquietante verdad que mantiene en vilo a la comunidad científica. Los datos recopilados a partir de imágenes sugieren que el pintoresco litoral de Punta de Manabique, antes reconocido por sus playas en las áreas de San Francisco del Mar donde se tiene presencia de 3 especies de tortugas marinas las cuales están en riesgo por la pérdida de la playa entre otra biodiversidad marina, está siendo devorado por las implacables olas del cambio climático.

Se estima que, en las comunidades costeras, como San Francisco del Mar, Santa Isabel y La Graciosa, Quetzalito, Los Quíneles, se enfrentan a una lucha contra la erosión y la pérdida forestal de forma gradual, poniendo en peligro su forma de vida y su patrimonio natural. Según el artículo 64 de la Constitución Política de La Republica de Guatemala declara que es de interés nacional la conservación, protección y mejoramiento del patrimonio natural de la Nación y garantiza su protección y de la fauna y flora que en ellos exista.

La generación de cartografía actualizada pone al descubierto las áreas más afectadas, las cuales corren el riesgo de desaparecer bajo el abrazo implacable del océano.

Informe final de Proyecto de Investigación

Las técnicas de extracción semiautomática podrían dibujar el escenario con una alta precisión del avance del mar sobre el litoral, mientras la línea costera se desplaza hacia atrás, acercándose peligrosamente a viviendas y ecosistemas vulnerables.

El uso de tecnología espacial, junto con técnicas de teledetección, facilitaría la toma de decisiones estratégicas para enfrentar el cambio climático. Esta combinación ofrece una oportunidad para planificar acciones dirigidas a la adaptación, concentrando los recursos en zonas afectadas por la deforestación y la pérdida de conectividad ecológica. Esto contribuiría a los objetivos de "Acción por el Clima" y "Vida de Ecosistemas Terrestres", considerando que, según el PNUD, cada año se pierden millones de hectáreas de bosques, generando graves consecuencias para los ecosistemas, la biodiversidad y el equilibrio natural.

Considerando la riqueza natural de Izabal y su potencial para el desarrollo sostenible, es fundamental fomentar la gestión sostenible de los recursos naturales y fortalecer la adaptación al cambio climático, con el objetivo de reducir riesgos y aumentar la resiliencia ante desastres naturales. Esta región enfrenta una alta vulnerabilidad a una amplia variedad de amenazas ambientales, incluidas:

- Eventos hidrometeorológicos como huracanes, tormentas tropicales, depresiones tropicales y precipitaciones intensas de temporada.
- Sismicidad significativa, influenciada por la interacción de las placas tectónicas del Caribe y Cocos, así como por la actividad de las fallas geológicas de Chamelecón, Jalpatagua y Motagua.
- Deslizamientos de tierra, especialmente en zonas de alta pendiente y suelos inestables.
- Incendios forestales, cuya frecuencia ha aumentado en los últimos cinco años, asociados a las altas temperaturas y cambios en los patrones climáticos.

Para abordar estas problemáticas, es necesario implementar una planificación estratégica que permita fortalecer la gestión integral de riesgos, promoviendo la seguridad y el bienestar de

Informe final de Proyecto de Investigación

las comunidades costeras. Desde un enfoque geomático, esta propuesta se enfoca en la generación de cartografía precisa y el análisis espacial detallado, herramientas clave para:

- Apoyar el ordenamiento territorial, facilitando la toma de decisiones basadas en datos geoespaciales.
- Promover un desarrollo urbano-rural sostenible, considerando las zonas de riesgo y la distribución óptima de infraestructuras.
- Facilitar la identificación temprana de amenazas, integrando sistemas de alerta temprana y modelos predictivos para mitigar el impacto de eventos extremos.

De esta manera, se contribuirá a la creación de comunidades más resilientes, preparadas para enfrentar los desafíos ambientales y adaptarse proactivamente al cambio climático.

La investigación sobre el litoral de Punta de Manabique no solo es una llamada a la acción sino también un grito desgarrador para sensibilizar a la sociedad sobre los desafíos que enfrentan nuestras costas ante la magnitud del cambio climático. Cada revelación de esta investigación nos recuerda que la protección de nuestros ecosistemas es vital para salvaguardar el legado que dejamos a las futuras generaciones.

En este escenario incierto, solo queda una certeza: el reloj avanza implacablemente, y es responsabilidad de todos nosotros tomar medidas audaces y decisivas para preservar la belleza y la diversidad de este rincón paradisíaco antes de que sea demasiado tarde.

En cambio, en los últimos años, el Estado no ha cumplido con la implementación de medidas drásticas y apremiantes para detener el desarrollo en la costa. Argumentamos que han sido factores políticos los que han impedido la implementación de leyes y de políticas públicas eficaces para mitigar el impacto del cambio climático a pesar de su conocimiento a través de los años.



Informe final de Proyecto de Investigación

11. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo

12. Vinculación

Para el desarrollo de esta investigación se logrará obtener vínculos con las instituciones y organizaciones siguientes:

Los resultados de la investigación fueron divulgados en la Mesa Marino Costera, presidida por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) por medio del Departamento de Ecosistemas, a través de la cual se realizó la presentación técnica de los principales hallazgos, incluyendo mapas, análisis de cambios en la línea costera y pérdida de cobertura forestal, con el objetivo de aportar insumos para la gestión ambiental del litoral y transferencia de conocimiento y tecnología.

Consejo Nacional Áreas Protegidas/Nororiente -CONAP-

Es el ente rector de las áreas protegidas en el país, este vínculo se tendrá directamente con la Unidad Técnica de Punta de Manabique. Como ente rector del área protegida, se presentaron los resultados generados información técnica potencialmente útil para la Unidad Técnica de Punta de Manabique, especialmente en procesos de monitoreo, planificación y toma de decisiones además de transferencia de conocimientos.



Informe final de Proyecto de Investigación

Los resultados de la investigación también fueron presentados ante la Coordinadora Municipal para la Reducción de Desastres (COMRED), como instancia local vinculada al sistema de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED). En este espacio se realizó la socialización de los principales hallazgos, incluyendo la identificación de zonas con mayor susceptibilidad a procesos de erosión costera y pérdida de cobertura forestal, con el objetivo de aportar información relevante para la gestión del riesgo a nivel municipal.

Comunidades Marino-Costeras

En relación con las comunidades marino-costeras del litoral de Punta de Manabique, se estableció una coordinación directa a través de líderes comunitarios para el desarrollo de las visitas de campo, lo que permitió validar información, identificar cambios observados en el territorio y comprender la percepción local sobre los procesos de erosión y transformación del paisaje. Asimismo, los resultados de la investigación fueron socializados en espacios participativos como la Mesa Marino Costera y la Comisión Departamental de Medio Ambiente, donde participan pescadores, comunidades costeras y diversas instituciones. En estos espacios se realizó la presentación de los principales hallazgos y productos cartográficos, facilitando el intercambio de conocimientos y promoviendo el uso de la información generada como insumo para la gestión comunitaria, la toma de decisiones y el fortalecimiento de estrategias locales de adaptación frente a la dinámica costera.

Informe final de Proyecto de Investigación

13. Conclusiones

1. En relación con el análisis geoespacial del litoral, los resultados evidencian que el uso de imágenes satelitales permitió identificar y cuantificar los cambios ocurridos en Punta de Manabique entre 2006 y 2025, alcanzando una precisión global del 88 % y un índice Kappa de 0.80, lo que indica una buena concordancia. Se identificaron sectores con retroceso, estabilidad y avance de la línea costera, destacando áreas críticas como San Francisco–Jaloa, Boca Barra del Motagua y el mojón limítrofe entre Guatemala y Honduras, donde se registró una retracción de hasta 173.40 metros lineales. Asimismo, se estimó una pérdida de cobertura forestal de 10,154.69 hectáreas, reflejando una transformación significativa del paisaje costero y evidenciando procesos erosivos persistentes.
2. En cuanto a la aplicación de técnicas semiautomáticas, se comprobó que el uso de herramientas de procesamiento geoespacial permitió la extracción precisa de la línea costera y la cuantificación objetiva de los cambios en el litoral. Mediante la aplicación de algoritmos de clasificación y detección de cambios, fue posible estimar una retracción total de 126.70 hectáreas en sectores específicos, así como identificar retrocesos de hasta 173.40 metros lineales en áreas críticas como el mojón limítrofe. Asimismo, estas técnicas facilitaron la estimación de la pérdida de cobertura forestal, permitiendo analizar de manera integrada la relación entre degradación del bosque y dinámica costera. El uso de herramientas semiautomáticas redujo la subjetividad en la delimitación espacial, optimizó los tiempos de análisis y fortaleció la consistencia y reproducibilidad de los resultados.
3. Respecto a la generación de cartografía actualizada, los productos obtenidos permitieron documentar de manera integral los procesos de cambio en el litoral de Punta de Manabique, identificando zonas vulnerables a la erosión y áreas con modificaciones geomorfológicas significativas. Los mapas temáticos, líneas costeras y modelos de cambio constituyen herramientas técnicas fundamentales para



Informe final de Proyecto de Investigación

interpretar la influencia de factores climáticos y ambientales, aportando insumos clave para la gestión territorial y ambiental.

4. La integración de técnicas de monitoreo geoespacial y la generación de cartografía actualizada permitieron caracterizar de manera integral la dinámica del litoral de Punta de Manabique, evidenciando la incidencia de la variabilidad ambiental en la transformación del territorio. Los resultados muestran procesos persistentes de erosión, retracción de la línea costera y pérdida de cobertura forestal, particularmente en sectores críticos como San Francisco–Jaloa, Boca Barra del Motagua y el mojón limítrofe entre Guatemala y Honduras. En este contexto, la información generada, incluyendo cartografía georreferenciada, líneas base y modelos de cambio, constituye un insumo técnico confiable que permite comprender la magnitud y distribución espacial de estos procesos, aportando elementos clave para la gestión y planificación sostenible del litoral.



Informe final de Proyecto de Investigación

14. Recomendaciones

1. Se recomienda fortalecer el Centro de monitoreo ambiental del Centro Universitario de Izabal y generar un programa Interinstitucional para un continuo monitoreo costero basado en imágenes satelitales y técnicas de geomática, que permita actualizar periódicamente la posición de la línea costera. Esto facilitará la detección temprana de procesos de retracción y acreción, así como el seguimiento sistemático de los efectos de la variabilidad ambiental en Punta de Manabique.
2. Se sugiere institucionalizar el uso de algoritmos para la detección de cambios semiautomáticos e integrarlos a plataformas de SIG con el fin de optimizar los tiempos de análisis, realizar transferencia de tecnologías a instituciones y mejorar la gestión territorial del las áreas del litoral de Punta de Manabique.
3. Es recomendable que la cartografía generada sea actualizada en intervalos regulares de tiempo y utilizada como insumo técnico para la planificación del uso del suelo, la gestión de áreas protegidas y la toma de decisiones en zonas vulnerables a la erosión costera, priorizando sectores críticos identificados en el estudio.
4. Se aconseja incorporar los mapas de retracción, acreción y pérdida de cobertura forestal en los planes de gestión ambiental y estrategias de adaptación al cambio climático, con el objetivo de fortalecer la resiliencia del litoral y minimizar los impactos sobre los ecosistemas costeros y la infraestructura existente. complementar el análisis geoespacial con levantamientos periódicos de campo utilizando tecnologías GNSS de alta precisión, lo que permitirá mejorar la exactitud de la cartografía, validar los modelos de cambio y ajustar los márgenes de error en los análisis automatizados.



Informe final de Proyecto de Investigación

Referencias

- Agencia Espacial Europea (ESA). (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/12_Componente_InSitu.pdf
- Aguirre, R. (2009) Conceptos de Geomática y estudios de caso en México. (1ra ed 1-366) Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Aponte, F. (2016). Geografía, Geotecnología y Análisis Espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. *Terra*, 32(51), 193-194.
- ArcGIS Pro. (07 de 05 de Consultado en 2022). GNSS y dispositivos de ubicación. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/device-location/gnss-and-location-devices.htm>
- Chuvieco, E. (2000). Fundamentos de Teledetección Espacial. España: Ediciones Rialp S.A.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental, La Observación de la Tierra desde el espacio. Barcelona: *Planeta S.A.*
- Comisión Europea. (2018). Copernicus Programme: Earth observation for sustainable development. <https://www.copernicus.eu/en>
- CONAP (2008). Guatemala y su biodiversidad: Un enfoque histórico, cultural, biológico y económico. Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Oficina Técnica de Biodiversidad. Guatemala. 650 p.
- CONAP. (2017). Plan Maestro del Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique. Primera Actualización. Proyecto Conservación de Recursos Marinos en Centroamérica Guatemala. 1-244
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED). (s. f.). Gestión del riesgo y documentos institucionales.



Informe final de Proyecto de Investigación

- Fuenzalida, M., Buzai, G., Moreno, A., García, A. (2015) *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones*. (1ra ed 1-213) Editorial Triangulo. <http://geografia.uahurtado.cl>
- Gámez, R., Obando, V., Zamora, N. (2024). El INBio: su labor innovadora en el conocimiento y el uso sostenible de la biodiversidad en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*. 58(2) 1-38 <https://doi.org/10.15359/rca.58-2.7>
- Gomez, P. Jara, M., Medina, R., Beck, L., Amine, M. (2022) *On the use of satellite information to detect coastal change: Demonstration case on the coast of Spain* [Sobre el uso de información por satélite para detectar el cambio costero Caso de demostración en la costa de España]. Universidad de Cantabria, España 1-36 <https://doi.org/10.1002/essoar.10511027.1>
- Heyman, W. D., & Kjerfve, B. (2001). Avances para el manejo costero integrado en el Caribe de Guatemala. *Revista de Biología Tropical*, 49(Supl. 2), 287–295.
- López, F. (2020). Análisis y evolución de la cartografía de zonas inundables en España, desde un marco jurídico de referencia nacional a uno europeo. Universidad de Murcia España. (46). 277-284.
- MARN, M. (Julio de 2009). Política Nacional De Cambio Climático. Ciudad de Guatemala, Guatemala, Guatemala: Gobierno de Guatemala.
- Martínez, J. Martín, P., Díaz, J., López, J., Muñoz, F. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Red Nacional de Teledetección Ambiental. 1-208.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2021). Conservación del ecosistema manglar es vital para la biodiversidad y la economía.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (s. f.). Dirección de Análisis Geoespacial y Cambio Climático.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (s. f.). Dirección de Cambio Climático.



Informe final de Proyecto de Investigación

- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres -UNDRR- y Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres. (2018). *Economic Losse, Poverty and Disasters* 1998-2017.
- Oliva, A., Olcina, J. (2022). Temporales marítimos, cambio climático y cartografía de detalle de ocupación de la franja costera: diagnóstico en el sur de la provincia de Alicante (España). Universidad de Alicante. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. (68)/1 107-138.
- Organización de las Naciones Unidas -ONU-. (2020). *Informe del Secretario General, Contribución de las Tecnologías Espaciales al Desarrollo Sostenible y Ventajas de la Colaboración Internacional en la Investigación Sobre este Ámbito*. Ginebra. https://unctad.org/system/files/official-document/ecn162020d3amend1_es.pdf
- Ortiz, E. (2008). Cambios geoformofológicos en el litoral Caribe y Pacífico de Costa Rica. Caso del Complejo Déltico de Sierpe. *Kuru Revista Forestal*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica 5(15).
- Palomar, J., Pardo, J., Cabezas, C., Alonso, D. (2018). Monitorizando los cambios de superficie y volumen de la Laguna de Gallocanta mediante imágenes Landsat-8 y Sentinel-2. Universidad Politécnica de València, España 1-4.
- Parrot, J., Ramírez C., Palacio, J. (2024) *Geodiversidad de México*. Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM 1-13 <https://doi.org/10.14350/rig.60903>
- Pighini. R., Wingeyer, A., Rodríguez, L., Wilson, M., Gabioud, E., Van Opstal, N. (2023). Relación Cartográfica Entre Variables Hidrológicas y de Degradacion por Pérdida de Suelo Superficial: Sitio Piloto A° Estacas, Entre Ríos. *Ciencia suelo*. 40 (2) 167-184. <https://doi.org/10.35305/scs.v40i2.593>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2024). Pérdidas y daños derivados del cambio climático.



Informe final de Proyecto de Investigación

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (s. f.). Acción por el clima.

<https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/accion-por-el-clima>

Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, Copernicus. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial.

Componente In Situ.

https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/12_Componente_InSitu.pdf

Ramsar. (13 de abril de 2020). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar Punta de Manabique. Obtenido de <https://bit.ly/3cbyZDI>

Renda, E. (2017). *Manual para la elaboración de mapas de riesgo*. Programa Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD I (1) 1-74.

Ríos, A., Revolorio, F., Daniel, A. (2021). Valoración económica de Servicios ecosistémicos del Corredor Biológico Sostenible Cuyamel-Omoa Punta de Manabique, Roma Italia. pp 1-70.

Santiago, D., Jumbo, S., Garzón, D., Muñoz, M. 2020 (2020) Extracción Semiautomática De Línea De Costa A Partir De Imágenes Radar Sentinel – 1 Para Generación De Cartografía Náutica. Geoespacial. 17(2) 48-65.

Soria, J., Leblon, B., Macedo, A., Ramírez, M., Fernández, Y. (2020) Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel-1^a y Radarsat-2. México 1-19.



Informe final de Proyecto de Investigación

Apéndice

En esta investigación se plantean tres objetivos específicos que orientan el desarrollo y aplicación de la metodología. Este objetivo es la base del estudio, pues permite reconocer y cuantificar los cambios que luego serán validados en los siguientes apartados.

En el marco de la investigación cartográfica que está en proceso realizada en el litoral de Punta de Manabique, se ha realizado una recolección de información geoespacial y de campo, con el objetivo de generar una caracterización precisa de las áreas costeras y el litoral. La integración de imágenes satelitales Sentinel-1 datos radar y Sentinel-2, y registros de campo utilizando alta tecnología (antenas GNSS con señal RTK, Aeronave no tripulada DRON para el mapeo y generar orto mosaicos) ha permitido obtener información georreferenciada de alta resolución y precisión milimétrica, constituyendo una base sólida para el análisis comparativo de los cambios en el litoral del caribe guatemalteco.

Este informe intermedio expone los resultados preliminares y las metodologías aplicadas en el procesamiento cartográfico y geoespacial, destacando los avances en la identificación de patrones de erosión, dinámica costera y variaciones en el uso del suelo. Los hallazgos obtenidos proporcionan una visión inicial sobre la transformación del paisaje y constituyen un insumo clave para evaluar la posible influencia del cambio climático en la configuración espacial de Punta de Manabique.

El primero consiste en realizar un análisis geoespacial con imágenes satelitales para identificar cómo ha cambiado el litoral de Punta de Manabique a lo largo del tiempo para ello ya se a realizado un análisis de las imágenes, Este objetivo es la base del estudio, pues permite reconocer y cuantificar los cambios que luego serán validados en los siguientes apartados. Ver Figura 1,2,3,4.



Informe final de Proyecto de Investigación

El segundo busca aplicar técnicas semiautomáticas para detectar los efectos de la variabilidad en la línea costera y su evolución, lo cual representa la parte innovadora y técnica del trabajo, aportando mayor solidez a los resultados. Ver Figura 2, 5

Finalmente, el tercer objetivo es generar una cartografía actualizada de los procesos de cambio en el litoral bajo la influencia de factores climáticos y ambientales. Este producto constituye la aplicación práctica más importante, ya que será clave para la toma de decisiones, la gestión territorial y la comunicación de resultados a instituciones y comunidades locales. Para ello se ha realizado levantamiento de información de campo utilizando equipos de alta precisión, se ha realizado un análisis fotogramétrico y se ha generado ortofotos. Ver Figura 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 6

Análisis comparativo espacio-tiempo



Nota. Comparación espacio-tiempo del litoral de Punta de Manabique entre los años 2006 y 2025, elaborada a partir de imágenes satelitales y análisis geoespacial. Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS 3.0.

Para la extracción de geometrías espaciales la línea costera e imágenes se utilizó la plataforma Google Earth Engine, para delimitar con precisión el litoral de Manabique de las áreas de interés. Posteriormente, estas geometrías se incorporan como capas al mapa, aplicando estilos personalizados que incluyen atributos como el color y grosor del borde.

Informe final de Proyecto de Investigación

Estas herramientas espaciales resultan fundamentales en el análisis del litoral de Punta de Manabique, ya que posibilita la delimitación clara de zonas costeras y ecosistemas sensibles, facilitando la detección de cambios geoespaciales asociados a procesos de erosión, variación en la línea de costa y otros impactos derivados del cambio climático.

Figura 7

Análisis de la dinámica del Litoral de Punta de Manabique

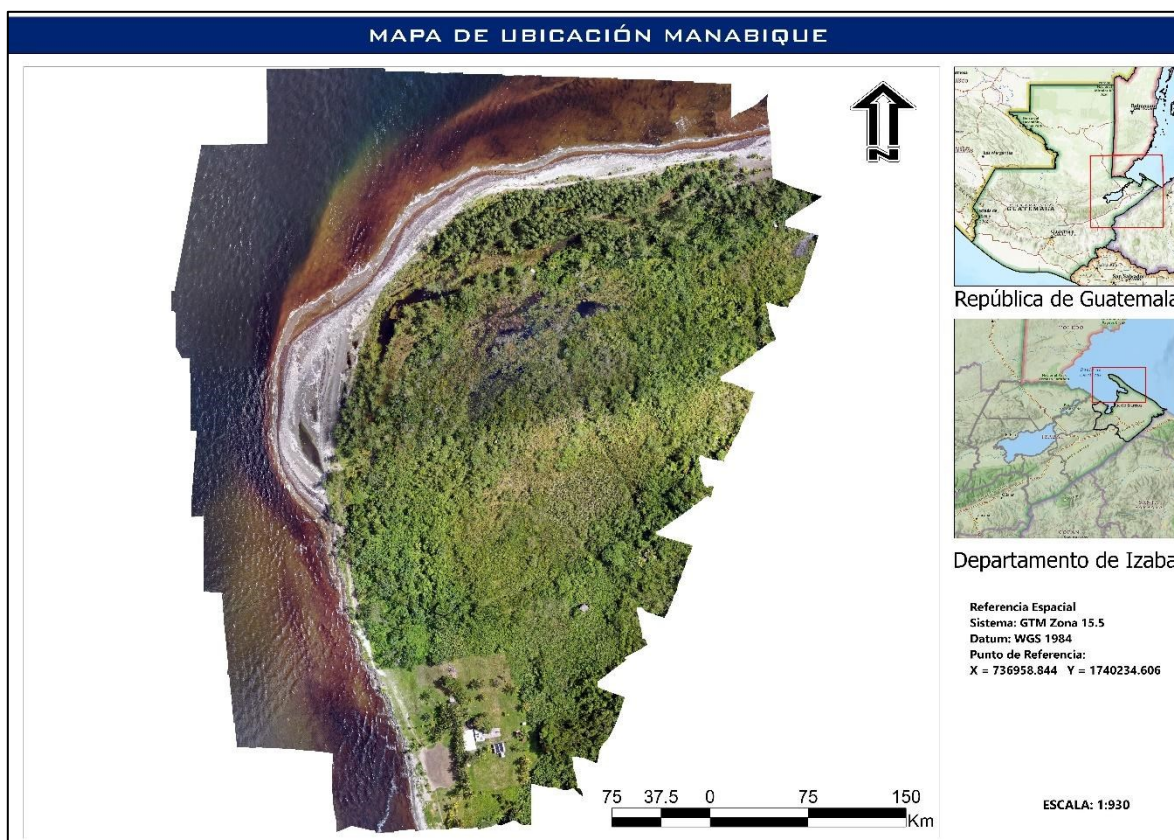


Nota. La cartografía evidencia los cambios en la línea de costa asociados a procesos de erosión y dinámica costera, influenciados por la variabilidad y el cambio climático en el litoral de Punta de Manabique entre los años 2006 y 2025, elaborada a partir de imágenes satelitales y análisis geoespacial. Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS 3.0.

Figura 8

Informe final de Proyecto de Investigación

Ortofoto del área de Cabo Tres Puntas



Nota. Se genero la ortofoto del área de Cabo Tres Puntas el cual se encuentra dentro del litoral de Punta de Manabique obtenida mediante vehículo aéreo no tripulado (VANT), con plan de vuelo ejecutado a través de la aplicación DJI Pilot. El procesamiento fotogramétrico de las imágenes se realizó en Agisoft Metashape, aplicando la técnica de Structure from Motion (SfM). El producto generado constituye un insumo cartográfico de alta resolución para el análisis de variaciones morfodinámicas del litoral y la detección de cambios en la cobertura y uso del suelo vinculados a procesos de cambio climático. Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS 3.0.

Figura 9

Informe final de Proyecto de Investigación

Comparación de cambios en el litoral de Punta de Manabique



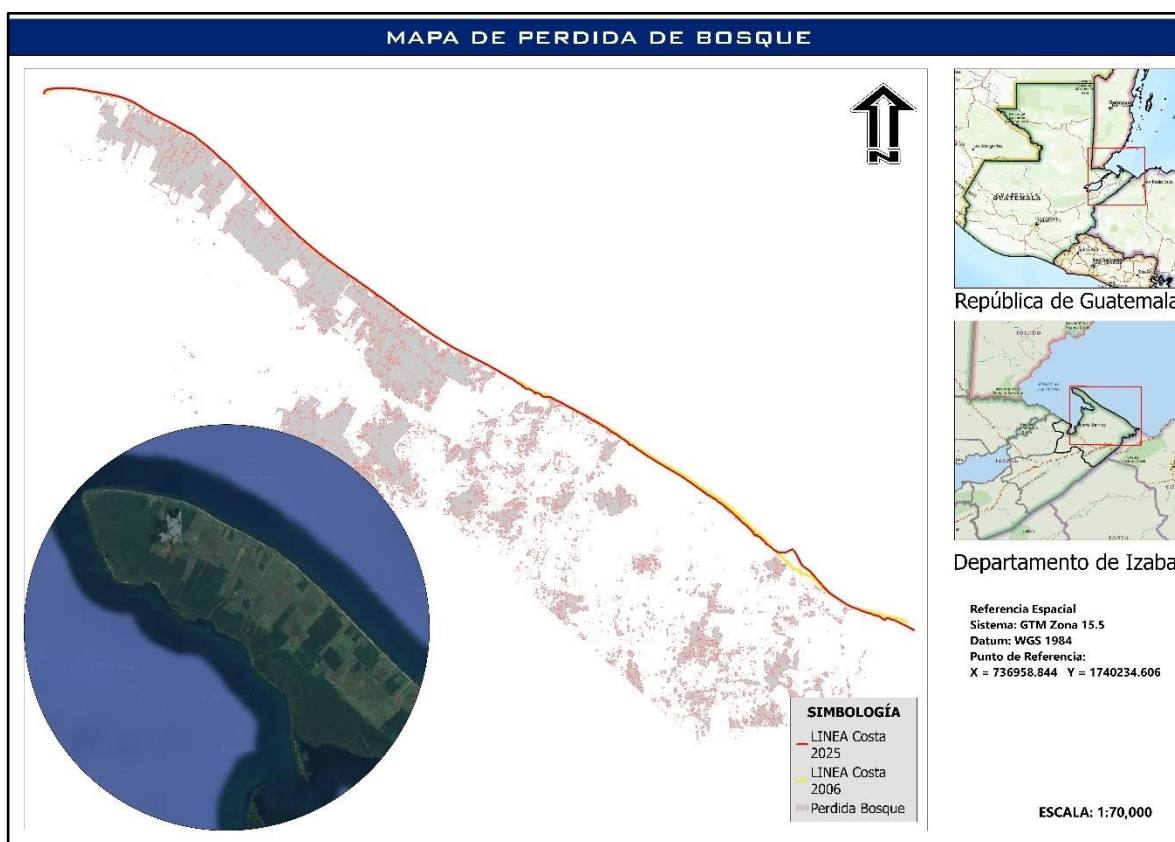
Nota. Comparación de la línea de costa en Punta de Manabique entre 2006 y 2025, junto con una ortofoto generada en 2025 mediante dron. El litoral, entendido como la franja de tierra en contacto con el mar, muestra cambios significativos asociados a los efectos del cambio climático. Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS 3.0.

La pérdida de cobertura vegetal en el litoral de Punta de Manabique es un indicador clave de los impactos a la dinámica costera. La reducción de la vegetación afecta la estabilidad del suelo, la biodiversidad y la capacidad de amortiguamiento frente a eventos extremos, por lo que su monitoreo mediante imágenes satelitales y análisis multitemporal resulta fundamental para evaluar la degradación y planificar medidas de conservación.

Figura 10

Informe final de Proyecto de Investigación

Análisis de la pérdida de cobertura vegetal



Nota. Cambios en la cobertura vegetal en Punta de Manabique, evidenciando áreas de pérdida de vegetación entre los periodos analizados, identificadas a partir de imágenes Sentinel-2. Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS 3.0.

Para complementar el análisis remoto y validar la precisión geométrica de las imágenes satelitales, se realizó el levantamiento de Puntos de Control Terrestre (GCP) utilizando antenas GNSS con tecnología RTK, que permiten obtener coordenadas con precisión milimétrica. Esta etapa es fundamental para determinar el porcentaje de precisión de la cartografía generada y fortalecer la confiabilidad de los resultados en la detección de cambios costeros.

Figura 11

Informe final de Proyecto de Investigación

Establecimiento de Puntos de Control

MAPA DE PUNTOS DE CONTROL



Nota. Ubicación de los Puntos de Control Terrestre (GCP) en el litoral de Punta de Manabique, obtenidos mediante GNSS RTK, utilizados para la validación y georreferenciación de imágenes satelitales y ortofotos.
Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS 3.0.

Figura 12

Informe final de Proyecto de Investigación

Colocación de antena base GNSS RTK



Nota. Instalación del equipo GNSS sobre punto de referencia para asegurar precisión milimétrica en la georreferenciación en el área de Cabo Tres Puntas, Punta de Manabique. Fuente: L. Dardón, realizada con cámara GoPro.

Figura 13

Informe final de Proyecto de Investigación

Registro de coordenadas en tiempo real con sistema GNSS RTK



Nota. Captura de datos de alta precisión mediante enlace con estación base para corrección diferencial. Fuente: L. Dardón, realizada con cámara GoPro.

Figura 14

Registro de coordenadas en tiempo real con sistema GNSS RTK



Nota. Captura de datos de alta precisión mediante enlace con estación base para corrección diferencial. Fuente: L. Dardón, realizada con cámara GoPro.

Tabla 11

Coordenadas geográficas de los Puntos de Control Terrestre (GCP)



Informe final de Proyecto de Investigación

Puntos de control Sistema de coordenadas GTM 15.5 Datum WGS84

Cabo Tres Puntas

PUNTO	E	N	PUNTO	E	N
p1	700942.267	1766114.31	p34	701237.262	1766475.25
p2	700932.435	1766133.34	p35	701286.514	1766490.91
p3	700922.849	1766159.67	p36	701307.372	1766490.66
p4	700921.8	1766171.92	p37	701330.692	1766488.61
p5	700916.773	1766209.77	p38	701347.67	1766489.59
p6	700909.58	1766220.21	p39	701359.617	1766490.76
p7	700889.655	1766241.3	p40	701368.055	1766492.75
p8	700887.286	1766244.89	p41	701376.198	1766481.97
p9	700879.389	1766266.6	p42	701377.382	1766496.2
p10	700880.29	1766283.37	p43	701400.082	1766505
p11	700883.643	1766310.74	p44	701419.391	1766517.74
p12	700888.915	1766331.6	p45	701435.425	1766529.58
p13	700902.501	1766343.57	p46	701446.414	1766535.00
p14	700927.877	1766359.23	p47	701450.937	1766534.27
p15	700944.803	1766375.27	p48	701457.294	1766533.62
p16	700957.167	1766389.35	p49	701469.412	1766532.17
p17	700978.437	1766412.05	p50	701487.806	1766528.49
p18	700990.335	1766421.9	p51	701504.361	1766526.61
p19	701002.205	1766432.01	p52	701528.792	1766524.65
p20	701017.069	1766438.01	p53	701540.984	1766525.68
p21	701032.602	1766441.63	p54	701558.598	1766525.76
p22	701049.347	1766444.66	p55	701572.022	1766524.89
p23	701059.374	1766447.95	p56	701594.795	1766523.74
p24	701076.37	1766452.83	p57	701613.214	1766524.74
p25	701095.716	1766455.49	p58	701625.071	1766523.74
p26	701106.125	1766455.11	p59	701640.788	1766523.83
p27	701121.792	1766454.52	p60	701649.53	1766523.5
p28	701137.019	1766456.34	p61	701667.252	1766522.47
p29	701149.492	1766458.24	p62	701687.602	1766523.8
p30	701169.089	1766459.11	p63	701695.49	1766525.57
p31	701188.475	1766461.17	p64	701716.465	1766530.53
p32	701201.427	1766467.68	p65	701731.849	1766531.51
p33	701217.643	1766472.69			

Nota. Se incluyen latitud, longitud y altitud de cada GCP levantado con GNSS RTK de precisión milimétrica.

Fuente: Elaboración propia realizado con Excel.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 12

Distribución espacial de los GCP en el litoral de Punta de Manabique

Puntos de control		Sistema de coordenadas
GTM 15.5 Datum WGS84		
Cabo Tres Puntas		
P	E	N
p1	700969.861	1766021.05
p2	700976.076	1765999.48
p3	700983.623	1765982.78
p4	700988.557	1765979.57
p5	700993.603	1765972.85
p6	701000.932	1765959.14
p7	701007.796	1765937.1
p8	701016.347	1765920.66
p9	701018.482	1765921.13
p10	701032.636	1765910.25
p11	701040.357	1765900.18
p12	701047.329	1765899.88
p13	701055.758	1765893.3
p14	701066.984	1765883.73
p15	701101.414	1765820.08
p16	701107.468	1765801.24
p17	701114.481	1765783.16
p18	701122.71	1765762.36
p19	701136.563	1765724.78
p20	701152.39	1765684.75
p21	701158.882	1765660.68
p22	701173.156	1765621.91
p23	701184.481	1765592.02
p24	701194.705	1765561.98
p25	701204.906	1765532.96
p26	701209.82	1765514.81
p27	701218.147	1765484.48
p28	701224.919	1765465.33
p29	701229.571	1765442.62
p30	701235.083	1765418.11
p31	701240.664	1765393.1
p32	701241.933	1765381.87

Nota. Los puntos fueron ubicados estratégicamente para cubrir sectores críticos del litoral y garantizar la precisión geométrica de las imágenes satelitales y ortofotos. Fuente: Elaboración propia realizado con Excel.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 15

Ubicación de bases GNSS RTK en zona costera



Nota. Aplicación del sistema GNSS en condiciones de campo, optimizando la calidad geométrica de la información espacial. Fuente: J. Smith realizado con cámara GoPro.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 16

Operador realizando levantamiento de puntos con GNSS RTK



Nota. Procedimiento técnico para la generación de puntos de control terrestre utilizados en la validación de ortofotos y análisis multitemporal. Fuente: L. Dardón, realizada con cámara GoPro.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 13

Datos de observación y validación obtenidos en campo

Puntos de control Sistema de coordenadas GTM 15.5 Datum WGS84

San Francisco del Mar

Punto	E	N	Punto	E	N	Punto	E	N
p1	719910.132	1754526.32	p48	720165.677	1754358.91	p95	720228.452	1754297.15
p2	719922.114	1754521.25	p49	720168.290	1754355.55	p96	720224.852	1754299.22
p3	719928.499	1754517.02	p50	720168.332	1754352.13	p97	720219.636	1754302.94
p4	719934.050	1754514.15	p51	720171.342	1754348.59	p98	720212.059	1754307.80
p5	719942.886	1754511.21	p52	720176.098	1754345.91	p99	720204.306	1754313.54
p6	719954.306	1754505.34	p53	720180.049	1754342.70	p100	720200.287	1754316.74
p7	719964.117	1754499.66	p54	720183.310	1754340.92	p101	720195.411	1754319.96
p8	719972.031	1754493.22	p55	720187.706	1754337.91	p102	720190.920	1754323.51
p9	719980.216	1754487.80	p56	720190.763	1754334.14	p103	720185.047	1754328.21
p10	719985.238	1754482.47	p57	720196.362	1754328.64	p104	720181.057	1754331.61
p11	719989.545	1754480.56	p58	720201.69	1754325.56	p105	720175.719	1754336.22
p12	719992.147	1754479.78	p59	720210.245	1754321.55	p106	720169.501	1754340.85
p13	719996.593	1754477.46	p60	720218.495	1754315.07	p107	720165.161	1754344.15
p14	720000.145	1754474.61	p61	720222.982	1754311.77	p108	720161.517	1754346.61
p15	720003.988	1754473.14	p62	720228.112	1754308.32	p109	720158.089	1754348.43
p16	720008.856	1754469.89	p63	720234.315	1754307.43	p110	720154.959	1754350.88
p17	720014.474	1754466.35	p64	720238.843	1754303.93	p111	720152.305	1754353.23
p18	720019.531	1754463.65	p65	720243.576	1754300.66	p112	720148.976	1754355.41
p19	720019.536	1754463.63	p66	720247.874	1754297.91	p113	720145.697	1754357.99
p20	720026.287	1754457.92	p67	720253.082	1754293.93	p114	720142.107	1754360.53
p21	720031.609	1754453.43	p68	720258.952	1754289.37	p115	720138.811	1754363.14
p22	720036.577	1754449.60	p69	720264.288	1754284.92	p116	720132.974	1754367.20
p23	720041.288	1754445.27	p70	720268.854	1754281.94	p117	720127.650	1754371.00
p24	720046.75	1754440.60	p71	720274.008	1754278.45	p118	720126.540	1754371.63
p25	720051.096	1754435.92	p72	720280.100	1754273.49	p119	720121.784	1754374.98
p26	720051.732	1754435.44	p73	720287.836	1754268.62	p120	720112.630	1754380.46
p27	720055.445	1754432.05	p74	720293.839	1754263.61	p121	720108.260	1754383.39
p28	720060.186	1754428.94	p75	720297.742	1754259.93	p122	720102.555	1754387.01
p29	720067.358	1754423.94	p76	720303.842	1754255.84	p123	720102.563	1754387.00
p30	720071.143	1754420.21	p77	720309.880	1754250.21	p124	720094.349	1754391.82
p31	720076.131	1754416.53	p78	720314.538	1754246.43	p125	720086.547	1754396.88
p32	720080.591	1754413.60	p79	720320.951	1754242.56	p126	720080.854	1754401.46
p33	720087.982	1754408.43	p80	720326.281	1754242.02	p127	720075.348	1754404.85
p34	720093.921	1754405.10	p81	720319.651	1754237.15	p128	720069.612	1754408.75



Informe final de Proyecto de Investigación

p35	720100.617	1754401.86	p82	720319.649	1754237.16	p129	720063.350	1754413.19
p36	720102.952	1754399.38	p83	720311.045	1754243.18	p130	720058.645	1754416.41
p37	720108.951	1754394.71	p84	720302.211	1754246.71	p131	720049.164	1754422.64
p38	720117.709	1754388.45	p85	720295.334	1754252.07	p132	720039.553	1754429.63
p39	720123.881	1754384.84	p86	720286.752	1754258.05	p133	720027.418	1754437.72
p40	720130.616	1754382.67	p87	720273.403	1754268.100	p134	720019.047	1754444.46
p41	720134.998	1754380.59	p88	720263.995	1754273.97	p135	720007.646	1754452.63
p42	720140.675	1754377.51	p89	720255.281	1754279.33	p136	719991.969	1754464.25
p43	720142.299	1754376.94	p90	720251.142	1754282.11	p137	719966.314	1754483.16
p44	720146.142	1754373.37	p91	720245.601	1754286.18	p138	719947.345	1754494.40
p45	720149.672	1754370.22	p92	720240.603	1754288.99	p139	719933.476	1754503.28
p46	720153.07	1754367.33	p93	720236.409	1754292.48	p140	719917.801	1754513.80
p47	720161.115	1754361.71	p94	720232.582	1754295.21	p141	719910.187	1754518.00

Nota. Cada GCP se utilizó para validar la corrección geométrica y radiométrica de imágenes Sentinel-1 y

Sentinel-2, así como de ortofotos generadas con dron. Fuente: Elaboración propia realizado con Exel.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 14

Herramientas y parámetros de levantamiento de GCP

Puntos de control Sistema de coordenadas GTM 15.5 Datum WGS84

San Francisco del Mar					
P	E	N	P	E	N
p1	719891.383	1754542.11	p21	719308.771	1754961.38
p2	719878.924	1754551.05	p22	719276.058	1754989.69
p3	719852.735	1754571.16	p23	719243.484	1755013.94
p4	719829.032	1754590.01	p24	719212.048	1755040.19
p5	719797.327	1754614.19	p25	719185.716	1755059.46
p6	719780.739	1754625.39	p26	719155.155	1755080.17
p7	719746.234	1754648.15	p27	719123.364	1755100.94
p8	719715.018	1754668.47	p28	719092.064	1755122.35
p9	719683.014	1754689.85	p29	719057.508	1755137.11
p10	719652.600	1754716.34	p30	719048.449	1755149.24
p11	719634.026	1754725.91	p31	719030.771	1755158.43
p12	719620.445	1754737.03	p32	718993.671	1755175.65
p13	719587.250	1754762.91	p33	718948.869	1755201.27
p14	719559.211	1754793.69	p34	718928.659	1755215.56
p15	719527.648	1754812.25	p35	718888.859	1755244.47
p16	719492.941	1754830.70	p36	718852.642	1755266.31
p17	719442.480	1754868.96	p37	718814.600	1755302.67
p18	719409.737	1754893.89	p38	718782.050	1755331.80
p19	719377.321	1754916.29	p39	718748.108	1755358.67
p20	719343.288	1754939.46	p40	718686.051	1755402.27

Nota. Los puntos fueron ubicados estratégicamente para cubrir sectores críticos del litoral y garantizar la precisión geométrica de las imágenes satelitales y ortofotos se detallan los equipos GNSS RTK, tiempo de registro, condiciones de visibilidad y configuración de precisión empleadas durante el levantamiento de los puntos. Fuente: Elaboración propia realizado con Exel.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 17

Equipos GNSS RTK utilizados



Nota. La fotografía demuestra el tipo de equipo utilizado para la colocación de puntos de control. Fuente: J. Sologastoa realizado con cámara GoPro.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 18

Mojón limítrofe Guatemala-Honduras



Nota. Se georreferencio el mojón limítrofe Guatemala-Honduras, para optimizar la calidad geométrica de la información espacial. Fuente: J. Taqué realizado con cámara GoPro.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 19

Georreferenciación del mojón limítrofe Guatemala-Honduras.



Nota. Secuencia de la operación con la que se georreferencio el mojón limítrofe Guatemala-Honduras, para optimizar la calidad geométrica de la información espacial. Fuente: J. Taqué realizado con cámara GoPro.

Figura 20

Georreferenciación del mojón limítrofe Guatemala-Honduras.



Nota. Se georreferencio el mojón limítrofe Guatemala-Honduras, para optimizar la calidad geométrica de la información espacial. Fuente: J. Taqué realizado con cámara GoPro.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 21

Mojón limitrofe Guatemala-Honduras 2011



Nota Mojón limitrofe entre Guatemala y Honduras registrado el 21 de mayo de 2011, donde se observa la posición original del monumento Fuente. G Cabrera, 2011.

Figura 22

Mojón limitrofe Guatemala-Honduras 2012



Nota. Mojón limitrofe entre Guatemala y Honduras documentado el 25 de abril de 2012. Fuente. G. Cabrera, 2012.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 23

Mojón limítrofe Guatemala-Honduras 2021



Nota. Mojón limítrofe entre Guatemala y Honduras registrado el 9 de julio de 2021, donde se aprecia un avance significativo del mar y una reducción notable de la franja de playa, reflejando procesos erosivos persistentes asociados a la dinámica litoral. Fuente. M Ixquiac, 9 de julio de 2021.

Figura 24

Mojón limítrofe Guatemala-Honduras 2024

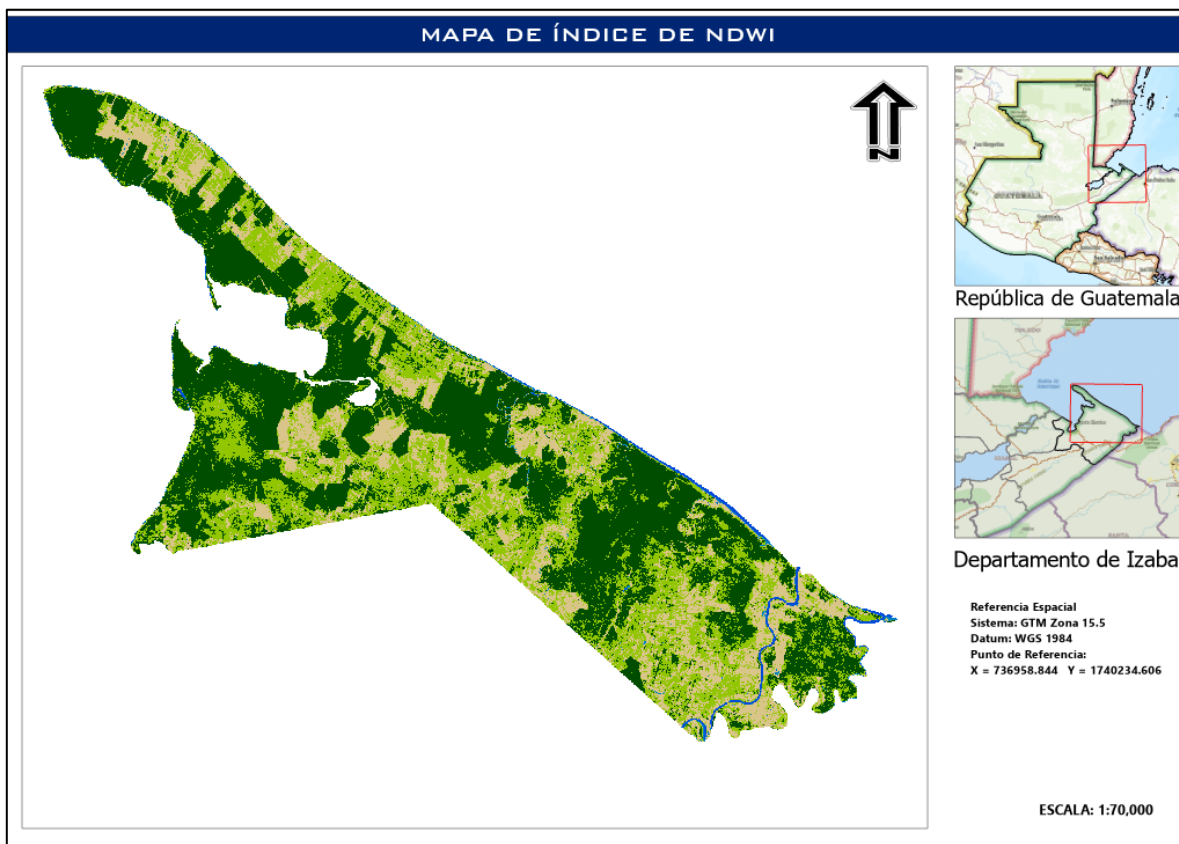


Nota. Mojón limítrofe entre Guatemala y Honduras captado el 14 de junio de 2024, mostrando una condición crítica de retracción costera, con el monumento prácticamente inmerso en el mar, evidenciando de forma clara los efectos acumulativos del cambio climático y el desplazamiento de la línea de costa. Fuente. J. Taqué 14 junio del 2024.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 25

Calculo de Índice NDWI

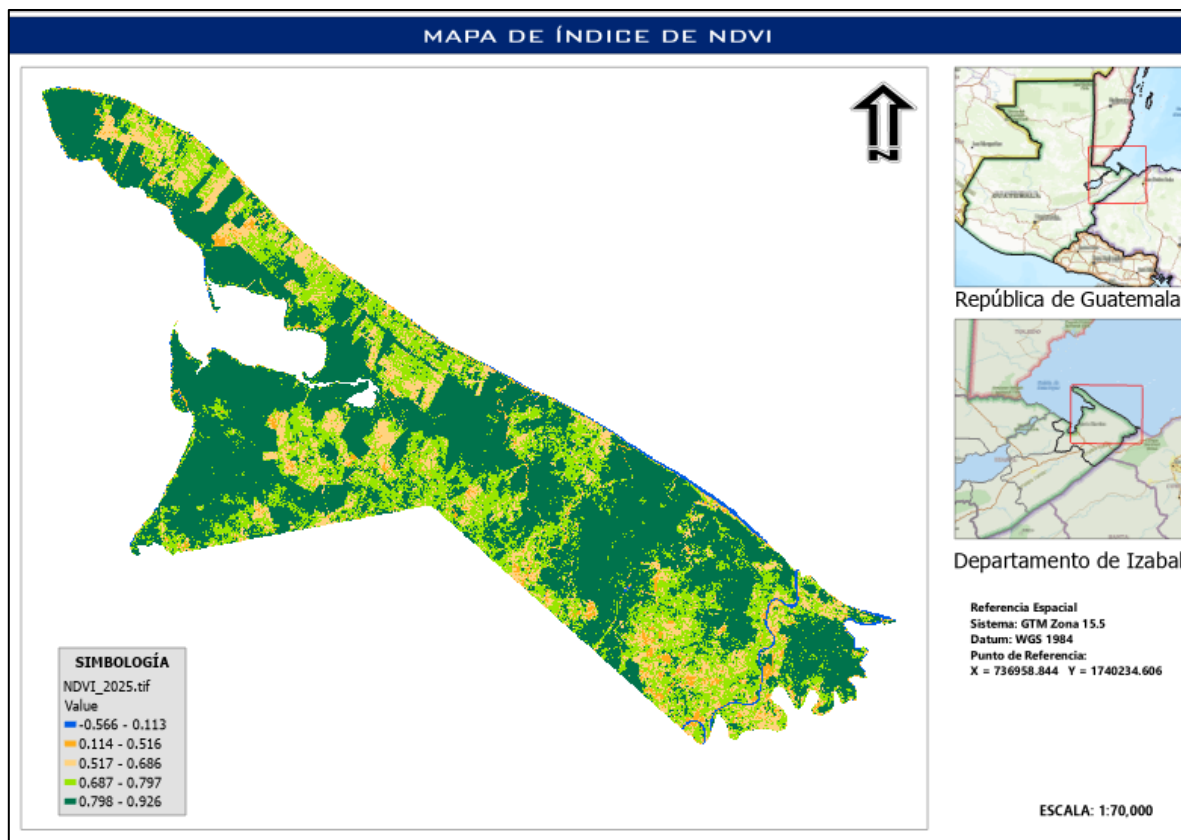


Nota. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) resalta cuerpos de agua en imágenes satelitales al maximizar la reflectancia verde y reducir la del infrarrojo cercano (NIR). Fuente: Elaboración propia realizado con ArcGIS Pro.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 25

Cálculo de Índice NDVI



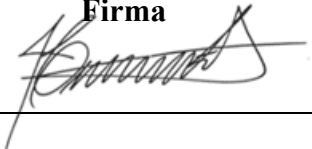
Nota. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permite identificar y resaltar la cobertura vegetal en imágenes satelitales, al contrastar la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) con la del rojo visible, lo que facilita la evaluación del estado y densidad de la vegetación. Fuente: Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.



Informe final de Proyecto de Investigación

Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

Jeff Hendrik Taqué Aroche coordinador (a) del proyecto de investigación	Firma 
Fecha: 28/nov/2025	

Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto Cartografía y monitoreo geoespacial en Punta de Manabique para identificar cambios inducidos por el cambio climático en mi calidad Coordinador del Instituto, de Investigación del Caribe de Izabal del Centro Universitario de Izabal, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. Mario Estuardo Salazar Rodríguez Coordinador del Instituto, de Investigación del Caribe de Izabal	Firma 
Fecha: 28/nov/2025	

Recepción de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Andrea Rodas Morán Coordinadora del programa universitario de investigación en Recursos Naturales y Ambiente	Firma
28/nov/2025	

/Digi2025