

Evaluación de la línea de costa de la península de Yucatán entre 1980 y 2019: potencial fuente de riesgo socionatural

Coastline evolution of the Yucatan peninsula between 1980 and 2019: potential source of socio-natural risk

Wilian Martínez-Rivera¹, Alexis Ordaz-Hernández^{1*}, Juan Carlos Garatachia-Ramírez¹

¹Universidad Autónoma del Estado de México, México

*Autor para la correspondencia: alexisordaz.1978@gmail.com

Resumen

La península de Yucatán, dada su posición geográfica y su relieve relativamente llano, está expuesta a fenómenos meteorológicos que históricamente han afectado su litoral, al tiempo que los procesos de planeación urbana y de infraestructura litoral no han sido totalmente bien diseñados; la combinación de ambos factores (natural y antrópico) están provocando un paulatino retroceso de la línea de costa. Este estudio se enfoca en la reconstrucción de la línea de costa del periodo 1980-2019, con el empleo de imágenes satelitales de la colección Landsat 1-5 MSS 1 y Landsat 7. Para ello se digitalizaron y analizaron espaciotemporalmente las líneas de costa correspondientes a los años 1980, 1990, 2000, 2010 y 2019. El nivel de detalle alcanzado permitió demostrar que en la península los procesos erosivos están predominando sobre los acumulativos. Los valores más altos de tasas de erosión ocurrieron en Punta Cancún, del año 1980 al 1990 (-0,75 m/año) y en Playa del Carmen, en la década de 1990 con -0,63 m/año.

Palabras clave: Península de Yucatán; procesos erosivos; tasa de erosión; imágenes Landsat; línea de costa.

Abstract

The Yucatan peninsula is exposed to meteorological phenomena that have historically affected its coastline, given the geographical position and

relatively flat relief while the urban planning and coastal infrastructure processes have not been totally well designed; the combination of both factors (natural and anthropic) are causing a gradual retreat of the coastline. This study focuses on rebuilding the coastline for 1980-2019 stage using satellite images from Landsat 1-5 MSS 1 and Landsat 7 collection. For this purpose, coastlines corresponding to 1990, 2000, 2010 and 2019 years were digitized and analyzed in space and time. The level of detail reached allowed demonstrating that erosive processes are prevailing over cumulative processes in the peninsula. The highest values of erosion rates occurred in Punta Cancún, from 1980 to 1990 (-0,75 m/year) and in Playa del Carmen, in the 1990s, with -0,63 m/year.

Keywords: Yucatan Peninsula; erosive processes; erosion rate; Landsat images; coast line; socio-natural risk.

1. INTRODUCCIÓN

El litoral constituye uno de los ambientes más frágiles de la tierra, en él se producen importantes interacciones entre la atmósfera, el mar y la tierra (Merlotto y Bértola 2009). Por su propia naturaleza, el sistema litoral es muy vulnerable a experimentar desequilibrios en su balance sedimentario, especialmente cuando la dinámica de los sedimentos o su medio de transporte es alterada considerablemente por la actividad humana.

En el sentido más amplio puede afirmarse que existe erosión en una costa cuando el sistema litoral en su conjunto ha perdido sedimento (De la Peña-Olivas y Sánchez-Palomar 2008). Por lo contrario, cuando se ha ganado sedimentos, el fenómeno imperante es la acreción.

Los estudios de dinámica litoral no en pocas ocasiones condicionan la localización de los asentamientos humanos, e incluso, mediante la experiencia y el conocimiento acumulado, las comunidades logran adaptarse y aumentar su resiliencia. Uno de los trabajos más recientes (Coca y Ricaurte 2019) así lo demuestran, tomando un caso de estudio del pacífico colombiano.

Las áreas costeras son muy dinámicas y complejas con cambios que ocurren en distintas escalas de tiempo, que van desde segundos hasta millones de años. La frontera entre el mar y la tierra define la línea de costa, las perturbaciones naturales como el viento, las olas, corrientes, tormentas, huracanes, así como las acciones antropogénicas provocan cambios en ellas; siendo estas últimas de gran impacto debido a la construcción de obras tales

como hoteles, carreteras, presas, muelles y otras, que inciden directamente en la migración y deposición de sedimentos en la línea litoral.

En la península de Yucatán, las áreas urbanas costeras de Champotón y Campeche han concentrado la mayoría de las actividades humanas. Así, las costas del estado de Campeche se han visto afectadas principalmente por el impacto de la salinización de los sedimentos en algunas zonas de manglar y la modificación del hidropериодо (duración y la frecuencia de inundación del humedal) como resultado del diseño en la construcción de carreteras que ha modificado los procesos de flujo-reflujo hidrológico (Herrera-Silveira, Comín y Capurro 2005).

En el estado de Yucatán el número de personas que viven en los pueblos costeros aumentó de 27 000 en 1970, a más de 100 000 en el año 2000, localizándose en los alrededores de Progreso, la ciudad costera más importante de este estado. Gran parte de la población se estableció en las zonas de manglar y la isla de barrera, provocando un gradual proceso de urbanización a ambos lados de Progreso. La creciente urbanización del espacio costero ha afectado considerablemente el ecosistema, ocupando zonas de dunas, manglares y ciénagas, y la consecuente pérdida de hábitats y la contaminación orgánica (Herrera-Silveira, Comín y Capurro 2005).

El estado más oriental de la Península, Quintana Roo, ha sufrido importantes transformaciones desde 1975, originado por la urbanización, al tiempo que ha crecido considerablemente la infraestructura turística; ambos elementos han provocado daños considerables en los hábitats costeros. Guido-Aldana y otros investigadores (2009) realizan el estudio de la erosión costera desde punta Cancún hasta playa del Carmen y establecen una dualidad causal para la erosión: natural y antrópica.

Entre las causas naturales más importantes mencionan la interacción de procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera; entre las antrópicas refieren la ocupación irregular, especialmente en la duna litoral, y la construcción desordenada de obras de protección.

Carranza-Edwards y demás colaboradores (2015) abordan los cambios morfológicos y sedimentológicos de algunas playas de Tabasco, Campeche y Quintana Roo. Para ello estudiaron perfiles de playa, variaciones de línea de costa, parámetros texturales y de composición de las arenas, concluyendo que las causas de las modificaciones recientes en la línea de costa se deben a la movilidad de sedimentos controlados por factores tanto naturales como antrópicos. Entre los principales factores naturales definieron a las tormentas

o huracanes y, en segunda instancia, al ascenso del nivel del mar por calentamiento global.

En cuanto a los factores antrópicos, dichos investigadores (Carranza-Edwards *et al.* 2015) consideran a los obstáculos del transporte litoral de los sedimentos por escolleras, tuberías submarinas no sepultadas, infraestructura portuaria, y a la extracción de arena en zonas litorales.

El contexto descrito demuestra la combinación de factores naturales y antrópicos como son los eventos hidrometeorológicos entre los primeros y la inadecuada planeación territorial entre los segundos, que al coincidir espacialmente con condiciones físicas, como la naturaleza de los sedimentos holocénicos de muy baja cohesión o la geomorfología y configuración de la costa, permiten inferir una condición de especial vulnerabilidad física.

Como contribución a esta problemática, el presente estudio se plantea como objetivo el análisis espaciotemporal de la línea de costa en la península de Yucatán. Para lograrlo, se tomará como referencia los cambios en la línea de costa ocurridos en los últimos 39 años; y finalmente, con las evidencias disponibles, se explicarán las posibles causas que provocaron las modificaciones más evidentes y relevantes.

1.1. Área de estudio

La península del Yucatán se localiza al sureste de México, es la porción septentrional de Mesoamérica, que divide el golfo de México del mar Caribe, con un territorio de aproximadamente 145 000 km (Figura 1). Políticamente, la extensión territorial de la península se encuentra dividida en tres estados: Yucatán (39,288.55 km²), Campeche (56,033.96 km²) y Quintana Roo (43,869.49 km²), según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI 2007). La península de Yucatán es una región principalmente turística, rubro que en los últimos 25 años se ha convertido en la principal fuente de ingresos de una gran parte de la población que vive en la zona costera, de ahí la importancia del recurso playa.

1.2. Caracterización físico-geográfica

Según la clasificación geomorfométrica del relieve mexicano (Hernández-Santana *et al.* 2017), la península de Yucatán se clasifica en un plano suavemente ondulado, muy débilmente diseccionado o no diseccionado, ocupando llanuras poligenéticas (sobre afloramientos rocosos, depósitos costeros y continentales, y microrrelieve carstificado). De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI 2011a, 2011b, 2011c), relacionada con las características

del relieve, clima e hidrología, la península se puede subdividir en tres regiones: sur occidental (Campeche), occidental y norte (Yucatán) y la del mar Caribe (Quintana Roo).



Figura 1. Ubicación geográfica de la península de Yucatán. A: Ubicación de la península de Yucatán en el contexto geográfico de América del Norte. B: Vista ampliada del área de estudio.

- Región sur occidental (Campeche): la zona ha experimentado el hundimiento de la superficie deltaica natural por la extracción de petróleo y esto, a su vez, ha provocado la transgresión marina. También, el aporte de sedimentos ha disminuido considerablemente en el litoral, desencadenando desequilibrios sedimentarios. Márquez-García (2011) estima para la península de Atasta, pérdidas de la franja de playa, en el orden de los 20 m por año; elemento este que confirma la dinámica extrema de esta región. El clima es cálido-húmedo y la precipitación varía entre los 1 500 mm y 2 550 mm anuales, respectivamente (INEGI 2011a). Se observa el río Champotón, clasificado como una cuenca alóctona cercana, que fluye sobre suelo calizo, con un curso corto y sin afluentes.
- Región occidental y norte (Yucatán): comprende una longitud de 650 km y se caracteriza por ser de origen calcáreo y, fundamentalmente, subterráneo. La zona litoral, en su mayoría, está compuesta por planicies de playas bajas acumulativas. La acción del viento, uno de los factores naturales de mayor incidencia en la configuración de la playa, provoca modificaciones en cortos lapsos de tiempo. De igual forma, se observan marismas, esteros, lagunas, parches de blanquiales, manglares y arrecifes de coral. La región presenta un clima cálido húmedo con una precipitación de 600 mm a 1 200 mm (INEGI 2011b).

- Región del mar Caribe (Quintana Roo): este litoral de aproximadamente 600 km se extiende formando parte de la estructura geológica de la península cárstica de Yucatán, definido como un bloque tectónico único (Batllori-Sampedro *et al.* 2006). El clima es cálido subhúmedo con lluvias abundantes en verano. Las precipitaciones se incrementan en la franja costera con respecto al resto de la superficie de la península de Yucatán, con niveles que comprenden intervalos entre los 1 300 mm anuales en el sector noreste y por encima de los 1 400 mm en el sur del litoral. En la región se registra la incidencia de nortes (frentes fríos), tormentas tropicales y huracanes (INEGI 2011c).

1.3. Geología de la península de Yucatán

La constitución geológica y la evolución histórica de los sistemas litorales permiten una mejor comprensión desde una visión sustentada en el medio físico. Los sistemas litorales de Yucatán se componen de carbonatos antigénicos y anhidritas que se originaron desde el Cretácico Medio-Aptiano (124,5 ma) hasta el Mioceno (23,3 ma). Desde el Cretácico (145,6 ma) hasta parte del Eoceno (56,5 ma), el análisis de los sedimentos ha revelado un hundimiento del estrato marino, siendo en el Cretácico donde prevalecieron las condiciones necesarias para la formación de material evaporítico. Las evaporitas de Yucatán se extienden desde el norte de Guatemala, sureste de Chiapas y norte de la península como una combinación de anhidritas, yesos, dolomías y calizas del Cretácico medio (97 ma). Actualmente, la península de Yucatán se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos del Terciario (López 1973).

Lugo-Hubp, Aceves-Quesada y Espinasa-Pereña (1992) interpretan la constitución geológica de la península del Paleógeno hasta el Cuaternario mediante el enfoque neotectónico. Indican que la presencia de rocas sedimentarias marinas terciarias atestigua un levantamiento gradual, al menos desde el Oligoceno. Consideran, además, que la actividad neotectónica ha provocado un levantamiento en forma basculada de mayor intensidad en el sur de la península.

1.4. Eventos hidrometeorológicos extremos

Dada su ubicación geográfica, el régimen de lluvias durante el invierno en la península de Yucatán está dominado por sistemas meteorológicos de latitudes medias, como ciclones y frentes fríos. Estos últimos, en muchas ocasiones provocan fuertes marejadas, que entre otros factores inciden notablemente en la morfodinámica de la línea de costas. Entre los huracanes más intensos

que afectaron la zona de estudio en los últimos 39 años están: Gilberto (1988), Isidoro (2002), Wilma (2005) e Ingrid (2013) (Tabla 1).

Tabla 1. Eventos hidrometeorológicos que afectaron la península de Yucatán en los últimos 30 años

Evento	Año de impacto en la península / Categoría según escala Saffir-Simpson	Impacto ocasionado
Huracán Gilberto	1988 / Cat - 5	Impactó por la zona de Cozumel. En la península de Yucatán 225 personas perdieron la vida; hubo 51 610 personas damnificadas, cerca de 140 000 personas evacuadas y provocó daños en sectores como la navegación, comunicaciones, servicios urbanos e infraestructura. Se estima que la pérdida económica total de este fenómeno fue de 76 millones de dólares aproximadamente
Huracán Isidoro	2002 / Cat - 3	Impactó a 45 km al este de Progreso en Yucatán. Se estiman pérdidas económicas de 5 000 millones de pesos mexicanos
Huracán Wilma	2005 / Cat - 5	Penetró en tierra por las costas de Quintana Roo, con vientos que alcanzaron los 280 km/h, dejó más de 144 000 damnificados en Quintana Roo y Yucatán. Pérdidas económicas estimadas en veinte mil millones de pesos mexicanos
Huracán Ingrid y Tormenta tropical Manuel	2013 / Cat - 1	Ingrid en combinación con la tormenta tropical Manuel dejaron a su paso más de 200 000 damnificados y 157 muertos al menos a su paso en México
Tormenta tropical Franklin	Agosto 2017	Rachas de viento superiores a 60 km/h y oleaje elevado de 1 m a 3 m, provocando una fuerte marea de tormenta en la zona de Campeche
Frente frío (# 23)	Diciembre 2019	Fuertes vientos del norte con rachas de hasta los 50 km/h en zona costera de Campeche y de Yucatán, así como fuertes penetraciones del mar
Frente frío (# 38)	Febrero 2020	Cierre de la navegación de la flota pesquera ribereña y las de recreo. Marejadas de 2 m de altura y rachas de vientos de fuertes e intensas penetraciones del mar

Fuente: Elaboración propia a partir de información publicada en la prensa digital, Segundo informe de Gobierno de Yucatán (2003), García-Arróliga *et al.* (2013) y Características e

impacto socio económico de los principales desastres ocurridos en la República mexicana (Gobierno de México 2005).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio comprende la reconstrucción histórica de la línea de costa del periodo 1980-2019, fundamentado en la determinación de su desplazamiento y el cálculo de la tasa de erosión-acreción. El procedimiento para estudiar la evolución de la línea de costa (Ojeda 2000; Ojeda *et al.* 2013) aplicado en este trabajo, consta de dos fases: (1) la obtención de fuentes que permitan reconstruir la línea de costa en el pasado y (2) la utilización de técnicas y procedimientos analíticos para medir los cambios y calcular las tasas de erosión (Figura 2).

En este estudio se emplearon las imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) disponibles en su sitio web. De la colección Landsat 1-5 MSS 1 se obtuvieron las imágenes satelitales para dos líneas temporales (1980 y 1990); mientras que, para las líneas de costas de los años 2000, 2010 y 2019, se utilizaron imágenes de la colección Landsat 7 que lleva el sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) (Tabla 2).

Para el tratamiento, uso y empleo de las imágenes Landsat se revisaron otras experiencias aplicadas a las soluciones de problemas similares (Van y Binh 2009; Cifuentes, Rosero y Selvaraj 2017).

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las imágenes empleadas. Tomado de USGS (2019a, 2019b)

Landsat 1-5	
Tamaño de píxel	Bandas reflectantes de 60 m 4-7 (Landsat 1-3) y Bandas 1-4 (Landsat 4-5)
Formato de salida	Geo TIFF
Método de remuestreo	Convolución cúbica (CC)
Proyección de mapas	UTM - WGS 84 Estereográfica polar para el continente Antártico
Orientación de imagen	Mapa (norte arriba)
Distribución	solo descarga HTTPS
Tiempo de entrega	Inmediato para escenas ya procesadas y listas para descargar. Las escenas Landsat MSS tardan de tres días a una semana en procesarse

Landsat 7

Sensor	Thematic Mapper Plus mejorado (ETM +)
Tamaño de píxel	30 m reflexivo, 60 m térmico
Entrega	imágenes de 8 bits con 256 niveles de gris
Bandas	Ocho bandas espectrales, incluyendo una banda panorámica y una térmica
Ciclo de repetición	16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 a.m. +/- 15 minutos

Una vez descargadas las imágenes satelitales se procedió a crear un proyecto con el software ARCGIS (SIG), utilizando el módulo ArcMap versión 10.4. Se cargaron las imágenes y se digitalizó cada una de las cinco líneas de costa objeto de estudio, lo que permitió obtener los datos vectoriales en cada período, así como la identificación de los cambios ocurridos mediante la comparación de estos. Posteriormente, se empleó el complemento *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) 4.3.4730 del programa ArcGIS, con buenos resultados en estudios previos (Oyedotun 2014; Sheeja y Gokul 2016).

Para distinguir la tendencia erosiva de la acrecional, inicialmente se analizaron 191 transectos; separados a una distancia de 10 km a lo largo de los 2 000 km que aproximadamente tiene la costa de la península de Yucatán. De los 191 transectos, 20 se seleccionaron como puntos de control, distanciados entre sí a 100 km, y considerando la cercanía a ellos de zonas de interés, como centros turísticos, ciudades y puertos.

Se procedió a los cálculos de la tasa erosión en cada transecto, en todos los casos teniendo en cuenta las posiciones adoptadas por la línea de costa en los cinco momentos seleccionados (1980, 1990, 2000, 2010, 2019). Los análisis particulares tuvieron el fin de inferir las posibles causas de los cambios espaciales y temporales de la costa.

La determinación de las tasas de erosión se apoyó en el módulo DSAS, así como en cálculos puntuales en cada punto de control, donde se asignó signo negativo (-) para identificar retrocesos de la línea de costa y signo positivo (+) para indicar acreción (predominio de la acumulación de sedimentos).



Figura 2. Secuencia metodológica para la reconstrucción histórica de la línea de costa en la Península de Yucatán.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 191 transectos procesados inicialmente, 117 resultaron ser erosivos (61 %) y 74 acrecionales (39 %). Aunque es un resultado muy general, marca una pauta de tendencia erosiva en la mayor parte de la península. El posterior análisis en detalle demostró que 15 de los 20 puntos de control experimentan procesos erosivos de forma sistemática, aunque con intensidades (tasas de erosión) diferentes (Tabla 3).

Por ejemplo, en los 39 años transcurridos (de 1980 a 2019), los puntos 9 y 10 experimentaron los mayores valores de erosión (4,11 m/año y 4,18 m/año, respectivamente), estando esta área localizada en la costa norte del estado de Yucatán, la más crítica de la península. Sobre su línea costera se pueden reconocer diversos tipos de geoformas, entre las que destacan las playas acumulativas y erosivas de arenas finas; ello combinado con el relieve llano predominante y su ubicación geográfica, convierten al área en muy vulnerable a fenómenos meteorológicos como son los nortes, los ciclones tropicales y el incremento del nivel medio del mar causado por el cambio climático (Figura 3).

En el otro extremo de la respuesta a las modificaciones de las líneas de costas se ubican los sectores que en los 39 años analizados experimentaron avances sobre el mar, estos son los casos de los puntos de control 5, 8 y 20. De todos, el punto 5 siempre mantuvo una tendencia a la acreción. El punto 5 se ubica en la costa norte del estado de Campeche, precisamente sobre una estructura denominada el escarpe de Campeche, que según Stephan y demás colaboradores (1990) podría ser de origen tectónico, tratándose de una falla con movimiento lateral izquierdo, que funciona como plano de desplazamiento del Bloque Yucatán al inicio de la apertura del Golfo de México, en el Jurásico medio.

Este escarpe tiene una amplitud o diferencia máxima de alturas de 2 600 m, ya que inicia a la profundidad de 200 m bajo el nivel del mar y presenta su posición más distal a la profundidad de 2 800 m bajo el nivel del mar con una pendiente que oscila de 2° hasta ser superior a los 45° (Mendoza y Ortiz-Pérez 2000).

Tabla 3. Puntos de control analizados en la península de Yucatán

Puntos de Control	Desplazamiento de las líneas de costas (m)				
	1980	1990	2000	2010	2019
1		---	-1.5	-1,57	-0,43
2		-2,62	-2,37	-3,08	-1,42
3		-6,43	-3,13	-2,25	-1,13
4		-2,91	-1,58	-1,17	-0,37
5		18	2,18	10,1	0,8
6		-3,32	-2,57	-1,77	-1,98
7		5,1	-0,16	1,23	-0,5
8	Línea de referencia	-0,29	0,81	-0,38	0,36
9		2,41	-7,65	-1,43	-4,11
10		-20	-5,6	-8,67	-4,18
11		-7,5	1,1	-0,75	-1,25
12		-5,91	-4,91	-0,22	-1,36
13		-2,4	-6,25	-3,23	-1,55
14		-2,22	-0,5	-0,82	-0,95
15		-6,34	-1,89	-2,3	-0,65
16		-6,91	-1,64	-0,19	-0,37
17		-10,2	-5,28	-4,02	-3,33
18		-8,19	-8,05	-4,23	-4,01
19		-20.1	-6,65	-6,02	-3,72
20		-5,12	-1,78	0,28	0,36

Considerando los resultados de los puntos de control se seleccionaron cinco casos de estudio (marcados con color rojo en la Figura 3). Su elección obedeció a tres factores: (1) importancia socio económica del sector costero, (2) puntos representativos de cada zona geográfica de la península de Yucatán (oeste, norte y este) y (3) existencia de investigaciones anteriores que permitieran comparar la calidad de los datos obtenidos en esta investigación. Estos cinco casos fueron:

Caso A: Isla Aguada

Caso B: Chelem-Progreso

Caso C: Punta Cancún

Caso D: Playa del Carmen

Caso E: Tulum.

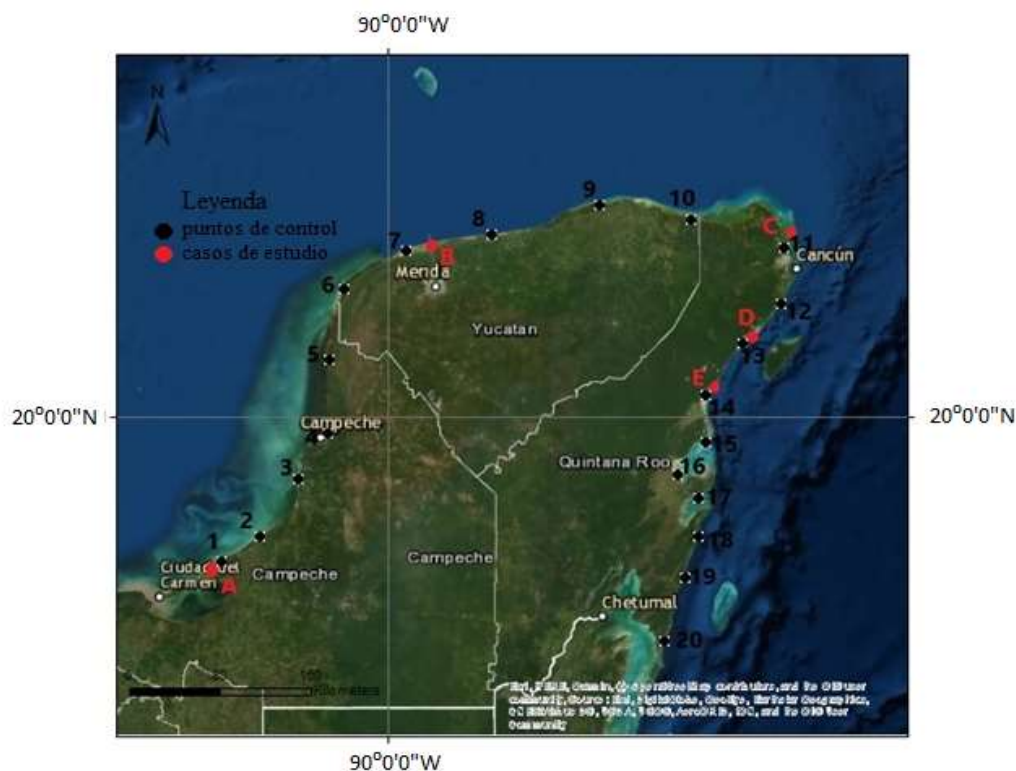


Figura 3. Disposición espacial de los puntos de control y casos de estudios abordados en este trabajo.

3.1. Análisis de los cinco casos de estudio

3.1.1. Caso A: Isla Aguada

Se encuentra situada en el extremo oeste de la península de Yucatán, en el estado de Campeche (Figura 3). El intervalo de años analizados destaca por su tendencia a la erosión costera, aunque muy levemente, como promedio de 2,1 m cada 10 años (Figura 4). Destaca la década de 1980 a 1990 donde se erosionaron 5,2 m, debido principalmente al impacto del huracán Gilberto en 1988 que provocó una gran devastación en la península, siendo conocido en México como el huracán del siglo XX. Los resultados alcanzados coinciden, en cierta medida, con el trabajo realizado por Torres-Rodríguez y otros investigadores (2010) quienes determinan una tasa de erosión de 0,2 m/año para esta zona.



Figura 4. Representación de las cinco líneas de costas analizadas en Isla Aguada.

3.1.2. Caso B: Chelem-Progreso

Esta zona se ubica al noroeste del estado de Yucatán, destaca por la industria pesquera y sede de una de las 10 zonas económicas especiales declaradas por el gobierno mexicano desde diciembre de 2017 (Figura 3). Entre el año 1980 y 1990 la línea de costa ganó espacio al mar, con mediciones de hasta 5,1 m (Punto de control 7). Sin embargo, la costa se ha mantenido relativamente estable en su posición. Para esta área López-Gutiérrez (2011) comprueba una acentuación en la erosión principalmente desde la construcción de la escollera de Chuburná en el puerto de YucaPetén, una barrera artificial que afecta de manera significativa reteniendo los provenientes del transporte litoral que viene desde el este. Así mismo, López-Gutiérrez (2011) destaca la influencia de la construcción desordenada de espigones como elemento antrópico y perturbador del balance sedimentario (Figuras 5 y 6).



Figura 5. Zona B: Chelem-Progreso.



Figura 6. Efecto del puerto Yucalpetén en el proceso erosivo. Figura tomada de López-Gutiérrez (2011).

3.1.3. Caso C: Punta Cancún

Es un saliente de tierra que marca el límite norte de la isla de Cancún del estado de Quintana Roo, en la costa oriental de la península de Yucatán sobre el litoral del mar Caribe (Figura 3); el lugar está marcado por una importante afluencia turística. La zona ha estado en un proceso

prácticamente constante de erosión, comenzando con un periodo erosivo en la década de los 80 con una tasa de 0,75 m/año; probablemente este resultado tenga relación directa con el huracán Gilberto en 1988 (Figura 7).

Posterior al año 2000 es muy probable que la causa principal de los procesos erosivos, especialmente en las playas, se asocie a un origen antrópico. En este caso, especialmente a la construcción de hoteles muy cerca o sobre la franja de playa. Mc Coy-Cador y Sosa-Ferreira (2016) resaltan el impacto negativo de las construcciones a pie de playa y destacan las transformaciones de las playas frente al Hotel Riu las Américas, con tasas de erosión de hasta -16,3 m/año, frente al Hyatt Regency Cancún con -14,6 m/año y al Hard Rock Hotel, Beach Paradise y Playa Nizuc con -13,0 m/año.



Figura 7. Caso C: Punta Cancún.

3.1.4. Caso D: Playa del Carmen

Localizada al sureste de México y al sur de Cancún, en el municipio de Quintana Roo (Figura 3); ubicada dentro de la zona turística denominada "Riviera Maya" donde la principal actividad económica es el turismo. Presenta una marcada tendencia a la erosión de sus costas, la más severa ocurrió entre los años 1990 y 2000, con una tasa de -0,62 m/año (Punto de Control 13, Tabla 3).

El análisis espacial realizado indica que la erosión tiene mayor incidencia en la zona norte de este caso de estudio, donde existe una notable cercanía de la línea de costa con la infraestructura residencial y turística (Figura 8). Los aportes realizados por Guido-Aldana y colaboradores (2009) corroboran los resultados aquí mostrados. Los autores antes citados señalan la colocación de obras de protección (geotubos) de forma indiscriminada, lo cual empeora la situación de las playas (Figura 9).

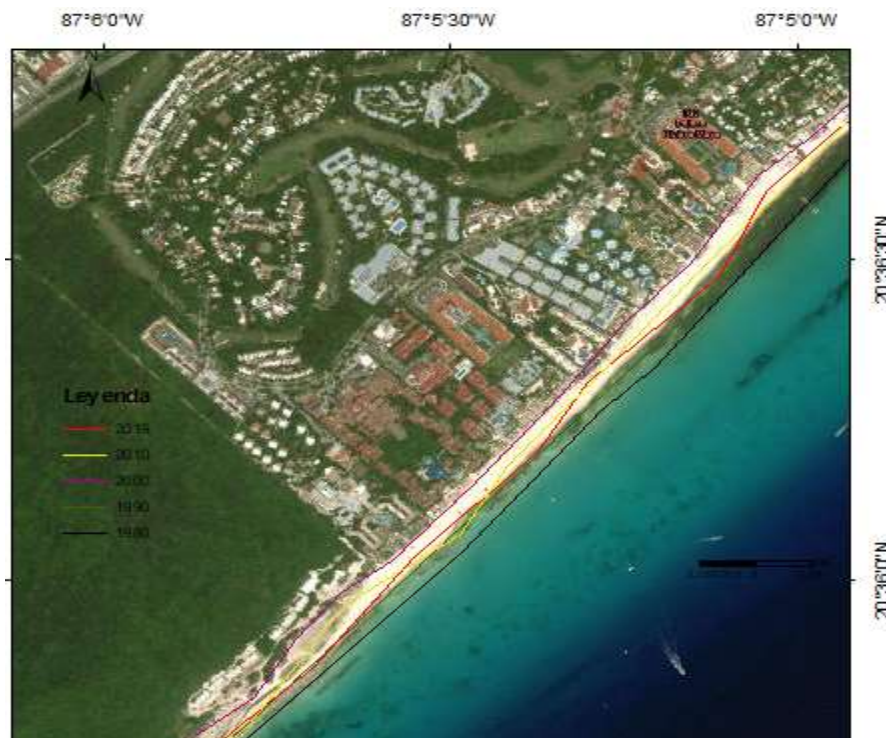


Figura 8. Zona D: Playa del Carmen.



Figura 9. Geotubos en playa del Carmen. Figura tomada de Guido-Aldana *et al.* (2009).

3.1.5. Caso E: Tulum, Quintana Roo

Ubicado en el Estado de Quintana Roo, sureste de México, en la costa del mar Caribe (Figura 3). De forma general, ha sido un área con tendencia a la erosión. Presentó su punto máximo erosivo en la década de 1980-1990 con una tasa de 0,22 m/años, derivado muy probablemente del impacto del huracán Gilberto en 1988 (Figura 10). El análisis, mediante imágenes de satélite, del crecimiento urbanístico revela la existencia de obras lineales e infraestructura hotelera que potencialmente están añadiendo elementos antrópicos que alteran las condiciones naturales.



Figura 10. Zona de Tulum, Quintana Roo.

Resultados de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo reportados (Bolongaro-Crevenna *et al.* 2016) y referidos a las modificaciones de la línea de costa (Tabla 4) coinciden, en gran medida, con los obtenidos en este estudio.

Tabla 4. Tasa de erosión o acreción promedio anual de destinos turístico de la Riviera Maya (Bolongaro-Crevenna *et al.* 2016)

Destino Turístico	Año inicial	Año final	Intervalo (años)	Desplazamiento Total, promedio (m)	Tasa de erosión/acreción (m/año)
Puerto Morelos	2004	2012	8	-2,30	-0,29
Playa del Carmen	2004	2012	8	-13,56	-1,70
Akumal	2004	2012	8	-13,45	-1,68
Promedio				-9,77	-1,22

Los resultados que ofrecen los cinco casos de estudio (Isla Aguada, Chelem-Progreso, Punta Cancún, Playa del Carmen y Tulum) permiten tener un diagnóstico relativo a las modificaciones de la línea de costa en los últimos 39 años y sus causas. Estos hallazgos constituyen una herramienta valiosa para la gestión del potencial riesgo que representa la erosión costera, que como mínimo marca la tendencia en cada uno de estos escenarios geográficos.

Finalmente, consideramos oportuno ofrecer algunas sugerencias de manejo y regulaciones futuras para la administración sustentable de los sitios estudiados (Tabla 5). Importante es destacar que la implementación de algunas de las siguientes propuestas debe antecederse de un estudio de Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), e incluso de estudios ingenieriles muy específicos, que permitan definir la factibilidad ambiental. En los estudios previos a la implementación de estas medidas deben considerarse las condiciones socioeconómicas y físicas del área de estudio.

Al respecto, la implementación de las medidas (sugerencias) de manejo costero, generalmente intervienen algunas decenas de metros, sin embargo, su impacto es regional. Esto significa que los estudios de MIA, deben ser regionales. A propósito, Silva-Casasola y otros investigadores (2018) enfatizan que: "Los ecosistemas costeros están interconectados y las afectaciones en uno de ellos tienen consecuencias en los otros". Esta reflexión es de gran peso y, lamentablemente, no se ha tenido en cuenta. Algunos ejemplos de malas prácticas y sus consecuencias en el manejo costero son expuestas por algunos investigadores (Guido-Aldana *et al.* 2009; López-Gutiérrez 2011).

Tabla 5. Sugerencias de manejo por riesgo a erosión costera para la península de Yucatán

Sugerencias de manejo por riesgo a erosión costera	Requiere estudios de prefactibilidad o manifestación de impacto ambiental
Restablecer vegetación nativa (Silva-Casasola <i>et al.</i> 2018)	Sí
Siembra de algas y pastos marinos (Silva-Casasola <i>et al.</i> 2018)	Sí
Construcción de pasarelas para acceso a la playa (Puyuelo-Cazorla y Merino-Sanjuan 2011; García 2018)	Sí
Alimentación artificial de arena para la restauración del perfil de playa (Juanes 2006)	Sí
Soluciones duras, puede incluir: diques, espigones, defensas longitudinales, entre otras (Peña, Anta y Pena 2011 y Sattler-Cantons 2014)	Sí
Relocalización de instalaciones	Sí
Monitoreo de la granulométrica de los sedimentos en la franja de playa (Ordaz-Hernández <i>et al.</i> 2016)	No
Monitoreo del perfil de playa, mediante análisis espacio temporal (Ordaz-Hernández <i>et al.</i> 2016)	No
Inspección sistemática, mediante la observación de imágenes de alta resolución o recorridos de campo, donde se detecten nuevas expresiones de la erosión costera: caída de árboles, socavamiento de infraestructura, nuevos afloramientos rocosos	No

4. CONCLUSIONES

- En los procesos morfodinámicos a lo largo de la península de Yucatán, desde 1980 hasta 2019, se evidencia un predominio de los procesos erosivos sobre los deposicionales, donde 117 transeptos resultaron ser erosivos para un 61 %, y 74 fueron acrecionales, para un 39 %. En los sitios catalogados como erosivos, la herramienta DSAS estima un desplazamiento promedio de -19,0 m.
- El análisis realizado a cinco casos de estudio: Isla Aguada, Chelem-Progreso, Punta Cancún, Playa del Carmen y Tulum demuestra que, excepto en la zona de Chelem-Progreso, prevalece la erosión sobre la acumulación de sedimentos. Los valores más altos de tasas de erosión ocurrieron en Punta Cancún del año 1980 al 1990 con -0,75 m/año y en Playa del Carmen, en la década de los 90, con una tasa de erosión de -0,63 m/año.

- Entre las causas que pudieron acelerar los procesos erosivos están las de origen natural y las antrópicas. Dentro las naturales, se demuestra a partir de la temporalidad de los eventos que el huracán Gilberto de categoría 5 tuvo incidencia directa sobre las modificaciones experimentadas por Punta Cancún en 1988. Dentro de las causas antrópicas se detectan la ubicación de infraestructura urbana u hotelera a escasos metros de la línea de costa, por ejemplo, en Playa del Carmen la distancia es de apenas 35 m como promedio y en Punta Cancún de unos 40 m. Este último elemento de planeación urbana impide la disipación de la energía del oleaje o de las penetraciones del mar acelerando los procesos erosivos. Otra causa antrópica, en los casos de estudios analizados se relaciona con la infraestructura portuaria de Chelem-Progreso que ha derivado en la necesidad de aplicar soluciones duras.

5. REFERENCIAS

- Batllore-Sampedro, E.; González-Piedra, J. I.; Díaz-Sosa, J. y Febles-Patrón, J. L. 2006: Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas*, 59(abril): 74-92.
- Bologaro-Crevenna-Recaséns, A.; Anglés Hernández, M.; Márquez-García, A. Z.; Márquez-García, M. I. y Córdova-Novion, S. 2016: Propuesta de programa de adaptación ante el cambio climático para el municipio de Tlacotalpan, Veracruz. En: Bologaro Crevenna Recaséns A. (coord.). *Estudio de vulnerabilidad al cambio climático en diez destinos turísticos seleccionados*. Informe Técnico Proyecto 238980. Fondo Sectorial para la Investigación en Desarrollo y la Innovación Tecnológica en Turismo CONACYT-SECTUR. México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. 80 p.
- Carranza-Edwards, A.; Zoilo-Márquez, A. G.; Tapia-González, C. I.; Rosales-Hoz, L.; y Alatorre-Mendieta, M. A. 2015: Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1): 21-43. ISSN-e 1405-3322.
- Cifuentes, M. A.; Rosero, L. y Selvaraj, J. 2017: Detección de cambios de la línea costera al norte del distrito de Buenaventura mediante el uso de sensores remotos. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 46(1): 137-152.
- Coca, O. y Ricaurte, C. 2019: Análisis de la evolución litoral y respuesta de las comunidades afro-descendientes asentadas en la zona costera: caso de estudio La Barra, Buenaventura, Pacífico Colombiano. *Entorno Geográfico*, (17): 7-26. DOI: 10.25100/eg. v0i17.7918

- De La Peña-Oliva, J. M. y Sánchez-Palomar, F. J. 2008: ¿Qué es erosión costera? *Cimbra*, 380: 6-17.
- García-Arróliga, N.; Méndez-Estrada, K.; Reyes-Rodríguez, R. y Marin-Cambranis, R. 2013: Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2013. Consulta: 25/06/2020. Disponible en: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/324-NO.15>
- Gobierno de México. 2005: Características e impacto socio económico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2005. Consulta: 25/06/2020. Disponible en: http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/no_7.pdf
- Gobierno de Yucatán. 2003: Segundo Informe: Consulta: 25/06/2020. Disponible en: http://www.yucatan.gob.mx/docs/transparencia/informes/2001_2007/2do/anexo_huracan_isidoro.pdf
- Guido-Aldana, P.; Ramírez-Camperos, A.; Godínez-Orta, L.; Cruz-León, S. y Juárez-León, A. 2009: Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (20): 41-55.
- García, G. 2018: *Adaptación del entorno de la playa de Ponzos para su mejor aprovechamiento peatonal (Ayuntamiento de Ferrol)*. Trabajo de diploma. Universidade da Coruña. Consulta: 25/06/2020. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/21010>
- Hernández-Santana, J. R.; Pérez-Damián, J. L.; Rosete-Vergés, F.; Villalobos-Delgado, M.; Méndez-Linares, A. P. y Navarro-Salas, E. 2017: Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de curvas de nivel y la energía del relieve. *Investigaciones Geográficas*, 94(dic): 49-63. ISSN: 2448-7279. DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.57019](https://doi.org/10.14350/rig.57019).
- Herrera-Silveira, J. A.; Comín, F. A. y Capurro, L. 2005: Los usos y abusos de la zona costera en la Península de Yucatán. Consulta: 25/07/2019. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/35618>.
- INEGI. 2011a: Cuéntame clima, estado de Campeche. Información por entidad. Consulta: 25/01/2019. Disponible en: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/territorio/clima.aspx?tema=me&e=04>.
- INEGI. 2011b: Cuéntame clima, estado de Yucatán. Información por entidad. Consulta: 25/01/2019. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/clima.aspx>.
- INEGI. 2011c: Cuéntame clima, estado de Quintana Roo. Información por entidad. Consulta: 25/01/2019. Disponible en:

cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/clima.aspx?tema=me&e=23

- INEGI. 2007: *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*. México: INEGI. ISSN: 0188-8692.
- Juanes, J. L. 2006: *La erosión en las playas de Cuba, alternativas para su control*. Tesis doctoral. Instituto de Oceanología. La Habana. 100 p.
- López, E. 1973: Estudio geológico de la península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 25(1-3): 23-73.
- Lugo-Hubp, J.; Aceves-Quesada, J. F. y Espinasa-Pereña, R. 1992: Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*, 10(2): 143-150.
- López-Gutiérrez, H. 2011: La historia del proceso evolutivo de erosión y posibles soluciones. En: 1er Foro sobre Erosión Costera en Yucatán. México, 25 jun. Consulta: 25/02/2020. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/26196198/la-historia-del-proceso-evolutivo-de-erosion-y-posibles-soluciones>
- Márquez-García, A. Z. 2011: *Procesos de erosión y depositación en el litoral sur del Golfo de México*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. 185 p. Consulta: 25/02/2020. Disponible en: https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000672276
- Mc Coy-Cador, C. E. y Sosa-Ferreira, A. P. 2016: Causas y efectos de un destino no sustentable: Caso playas públicas de Cancún, Quintana Roo. *El Periplo Sustentable: revista de turismo, desarrollo y competitividad*, 31. ISSN-e 1870-9036.
- Mendoza, M. y Ortiz-Pérez, M. A. 2000: Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México. *Investigaciones geográficas*, (43): 7-31.
- Merlotto, A. y Bertola, G. R. 2009: Evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina. *Ciencias marinas*, 35(3): 271-286.
- Ojeda, J. 2000: Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30: 103-118.
- Ojeda, J.; Díaz, M.; Prieto, A. y Álvarez, J. 2013: Línea de costa y Sistemas de Información Geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa Andaluza. *Investigaciones geográficas*, 60: 37-52.
- Oyedotun, T. D. 2014: Shoreline geometry: DSAS as a tool for Historical Trend Analysis. *Geomorphological Techniques*, 3(2.2): 1-12. ISSN 2047-0371.

- Ordaz-Hernández, A.; Hernández-Santana, J. R.; Estévez-Cruz, E.; Díaz-Guanche, C. y Méndez-Linares, A. P. 2016: Morfodinámica costera en la playa Bailén, costa sur del occidente de Cuba, entre los años 2003-2013. *Investigaciones geográficas*, (91): 56-69. ISSN: 0188-4611. Consulta: 20/06/2020. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/569/56949503004.pdf>
- Puyuelo-Cazorla, M. y Merino-Sanjuan, L. 2011: Diseño de Equipamientos de Playa: duchas, pasarelas y puestos de vigilancia. Consulta: 20/06/2020. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/13684>
- Peña, E.; Anta, J. y Pena, L. 2011: Actuaciones en el litoral y defensa de la costa. En: Xornada Sobre A Enerxía Que Vén Do Mar. Universidade da Coruña. Consulta: 25/06/2020. Disponible en: https://www.udc.es/iuem/documentos/doc_xornadas/anaeco/ACTUACIONES_NOLITORALEDEFENSADACOSTA.pdf
- Stephan, J.; Mercier de Lepinay, B.; Calais, E.; Tarday, M.; Beck, C.; Carfantan, J.; Villa, J.; Bouysse, P.; Mauffret, A. and Dercourt, J. 1990: Paleodynamic maps of the Caribbean. *Bulletin Soc. Geol. Fr.*, (6): 915-919.
- Sattler-Cantons, F. 2014: *Propuesta de soluciones para la creación y estabilización de la costa entre los puertos de Mataró y Premià del Mar*. Trabajo de diploma. Universitat Politècnica de Catalunya. Consulta: 25/06/2020. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/23525>
- Sheeja, P. S. y Gokul, A. A. 2016: Application of digital shoreline analysis system in coastal erosion assessment. *Internat. J. Engineer. Sci. Comput.*, 6(6): 7876-7883.
- Silva-Casasola, R.; Patricia-Martínez, M.; Mendoza, E.; López-Portillo, J.; Lithgow, D.; Vázquez, G.; Martínez, R. e Ibarra, R. 2018: Recomendaciones generales para el manejo de la zona costera. Consulta: 25/06/2020. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/313770856>
- Torres-Rodríguez, V.; Márquez-García, A.; Bolongaro-Crevenna, A.; Chavarria-Hernández, J.; Expósito-Díaz, G. y Márquez-García, E. 2010: Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático, p. 325-344. En: Botello, A. V.; Villanueva-Fragoso, S.; Gutiérrez, J. y Rojas Gala-viz, J. L. (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- USGS 2019a: Landsat misión. Landsat 7. Consulta: 30/06/2020. Disponible en: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con

USGS 2019b: USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 1-5 Multispectral Scanner (MSS) Level-1 Data Products. Consulta: 30/06/2020. Disponible en:

https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-1-5-multispectral-scanner-mss-level?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Van, T. y Binh, T. 2009: Application of remote sensing for shoreline change detection in Cu Longestuary. *VNU J. Sci., Earth Sci.*, 25: 217-222. Consulta: 30/06/2020. Disponible en: https://repository.vnu.edu.vn/bitstream/11126/4897/3/TC_02638.pdf

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

WMR: Trabajo cartográfico, cálculo de las variaciones de las líneas de costa, edición de figuras, tabulación de resultados y redacción del original. AOH: Diseño del objetivo, análisis de las posibles causas de los cambios de las líneas de costa propuestas por el primer autor. Edición y ajuste a normas del original. Encargado de la correspondencia. JCGR: Comparación de resultados con otros estudios, revisión del original, orientaciones metodológicas y redacción de las conclusiones revisión y aprobación de la versión final.

ORCID

WMR, <https://orcid.org/0000-0002-4740-0779>

AOH, <https://orcid.org/0000-0002-6788-650X>

JCGR, <https://orcid.org/0000-0003-2603-4770>

Recibido: 20/01/2020

Aceptado: 13/09/2020