

DOI: 10.24850/j-tyca-13-06-06

Artículos

Análisis de la línea de costa y evaluación del riesgo de erosión de una franja costera sometida a alta presión antrópica

Shoreline analysis and erosion risk assessment of a coastal strip subjected to high anthropogenic pressure

Yedid Zambrano-Medina¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8820-0688>

Cuauhtémoc Franco-Ochoa², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7554-3603>

Wenseslao Plata-Rocha³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9469-7886>

Fernando García-Páez⁴

Miguel Montoya-Rodríguez⁵

Edgar Mendoza-Baldwin⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1991-4721>



¹Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México, yedidzambrano@uas.edu.mx

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México, cfrancoo@uas.edu.mx

³Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México, wenses@uas.edu.mx

⁴Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México, garpaez@uas.uasnet.mx

⁵Departamento de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, mmontoya@imt.mx

⁶ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, emendozab@ii.unam.mx

Autor para correspondencia: Cuauhtémoc Franco-Ochoa, cfrancoo@uas.edu.mx

Resumen

El objetivo de este estudio es entender el papel de los principales impulsores de los cambios históricos de la línea de costa y sus implicaciones en el riesgo de erosión en una franja costera al norte del



estado de Sinaloa, ubicada en la costa este del golfo de California. Se analizaron mapas digitales de diferentes años (1981, 1991, 2004 y 2018) utilizando *softwares* de Sistemas de Información Geográfica (DSAS y CERA) para examinar: a) el desplazamiento y la tasa de cambio en la línea de costa, y b) la vulnerabilidad, las posibles consecuencias y el riesgo de erosión. Los resultados obtenidos indican que entre 1981 y 2018: a) las acciones antrópicas (presas y escolleras) fueron los principales impulsores tanto de los cambios en la línea de costa como del daño ambiental subyacente al riesgo de erosión que se han producido en las últimas décadas; (b) la costa del área de estudio se ha erosionado con un EPR promedio de -3.1 m por año, lo que ha dado lugar a un NSM promedio de -112.9 m, y c) el riesgo de erosión se mantuvo moderado, aunque la vulnerabilidad aumentó de un nivel moderado a un nivel alto y las posibles consecuencias de un nivel muy bajo a uno moderado. Los resultados de este estudio servirán de base para futuros análisis centrados en predecir los cambios en la costa y el riesgo costero.

Palabras clave: erosión costera, DSAS, CERA, riesgo costero, vulnerabilidad, golfo de California.

Abstract

This study aims to understand the role of key drivers of historical changes in the shoreline and its implications with the erosion risk in the northern



coastal strip of the state of Sinaloa, located on the east coast of the Gulf of California. Digital maps from different years (1981, 1991, 2004, and 2018) are analyzed using geographic information system software (DSAS and CERA) to examine: (a) the movement and rate of the shoreline change; and (b) the potential vulnerability consequences, and erosion risk. The obtained results indicate that between 1981 and 2018: (a) anthropogenic actions (dams and breakwaters) were the main drivers of both the shoreline changes and the environmental damage underlying the erosion risk that has occurred in recent decades; (b) the coastline of the study area has been eroding with an average EPR of -3.1 m per year, which has led to an average NSM of -112.9 m; and (c) the risk of erosion remained moderate, although the vulnerability increased from a moderate to a high level and potential consequences from a very low to a moderate level. Besides, the results of this study provide a basis for future analyses focused on predicting shoreline changes and coastal risk.

Keywords: coastal erosion, DSAS, CERA, coastal risk, vulnerability, Gulf of California.

Recibido: 14/07/2020

Aceptado: 16/08/2021



Introducción

La erosión causa cambios en la costa a diferentes velocidades dentro de un periodo de tiempo y su origen puede ser una respuesta a los cambios en la infraestructura y el clima de las zonas costeras (p. ej., Ahmad & Lakhan, 2012; Ataol, Kale, & Tekkanat, 2019; Fotsi, Pouvreau, Brenon, Onguene, & Etame, 2019; Gómez-Pazo, Pérez-Alberti, & Pérez, 2019; Jonah *et al.*, 2016; Kermani, Boutiba, Guendouz, Guettouche, & Khelfani, 2016; Lee, Eom, Do, Kim, & Ryu, 2019). Al encontrarse con condiciones de vulnerabilidad, la erosión costera es un peligro que representa una fuente de riesgo costero, y cuyas manifestaciones espaciales y temporales repercuten en otros tipos de riesgo, como el riesgo de inundación. (Pollard, Spencer, & Brooks, 2019). De acuerdo con Escudero-Castillo, Mendoza-Baldwin, Silva-Casarin, Posada-Vanegas y Arganis-Juaréz (2012), en las zonas costeras el significado del término "riesgo" depende del objetivo del estudio, pero la mayoría de las definiciones involucran la vulnerabilidad y el peligro; las metodologías definen el riesgo en términos cualitativos y/o cuantitativos, y los dos enfoques en los que se pueden basar estas metodologías son: (1) un enfoque de análisis de riesgos que

combina probabilidades y consecuencias (p. ej., Modelo Aleatorio de Translación del Perfil de Playa (RanSTM, por sus siglas en inglés) (Cowell, Roy, & Jones, 1992; Cowell, Roy, & Jones, 1995; Cowell, Thom, Jones, Everts, & Simanovic, 2006; Cowell *et al.*, 2016), y (2) un enfoque de evaluación del riesgo que evalúa e interpreta las percepciones del riesgo y las tolerancias sociales, y estima el probable riesgo futuro, proporcionando información sobre la distribución del riesgo y sus causas relacionadas (p. ej., Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI, por sus siglas en inglés) (Thieler & Hammar-Klose, 1999); Módulo de Evaluación de Riesgos Costeros (CHAM, por sus siglas en inglés) (Viavattene *et al.*, 2018). Desafortunadamente, ninguno de los enfoques y metodologías antes mencionados pueden aplicarse de modo universal. Por lo tanto, la selección de una metodología para un área de estudio en particular dependerá de los indicadores requeridos, escala, objetivos y escenarios apropiados de aplicación (Narra, Coelho, Sancho, Escudero, & Silva, 2019).

Muchas de las metodologías antes mencionadas se han aplicado en sitios específicos para generar mapas del riesgo de erosión costera presente y futura, pero sin tener en cuenta la evolución de estos sitios a lo largo del tiempo o los efectos causados por las acciones antrópicas (p. ej., desde la última década hasta el presente). Este problema no permite entonces conocer el papel de los impulsores clave de los cambios históricos y sus implicaciones con el riesgo costero para un sitio en

particular (Stevens, Clarke, Nicholls, & Wadey, 2015); ello genera incertidumbre sobre si es relevante conocer la dinámica de la línea de costa en la protección y gestión costera para promover un desarrollo planificado de la zona costera.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar los cambios de la línea de costa y evaluar el riesgo de erosión costera en diferentes periodos de tiempo para una franja costera específica de interés, aplicando dos metodologías: Sistema de Análisis Digital de la Línea de Costa (DSAS, por sus siglas en inglés) (Thieler, Himmelstoss, Zichichi, & Ayhan, 2009) y Evaluación del Riesgo de Erosión Costera (CERA, por sus siglas en inglés) (Narra, Coelho, Sancho, & Palalane, 2017).

Los autores de este artículo creen que la inclusión de la evolución temporal en el marco de la evaluación del riesgo de erosión costera proporciona una mejora significativa que, junto con los resultados del análisis de cambio de la línea de costa, apoyan la identificación de los principales impulsores de los impactos ocurridos en las zonas costeras y su relación con el riesgo de erosión, y de esta manera pueden proporcionar elementos importantes para la protección y gestión costera al planificar el desarrollo de una área costera.

El área de estudio de esta investigación es la franja costera norte del estado de Sinaloa, ubicada dentro del golfo de California. Tal zona costera está sometida a una alta presión antrópica y posee al mismo tiempo una considerable importancia biológica (Enríquez-Andrade *et al.*,



2005). Además, esta área es muy vulnerable a varios peligros costeros como la erosión. La selección del área de estudio también se justifica por ser una importante zona turística en desarrollo (Jiménez-Illescas, Zayas-Esquer, & Espinosa-Carreón, 2019) y para la que existe una cantidad significativa de datos experimentales, documentados en investigaciones previas.

Área de estudio

La franja costera en estudio tiene aproximadamente 45 km de largo y está localizada en la costa norte de la parte mexicana del océano Pacífico, más precisamente en la parte este y baja del golfo de California (ver Figura 1). El área consiste esencialmente de tres playas de arena (Macapule, Las Glorias y Bellavista) separadas por las desembocaduras del río Sinaloa y el estero La Piedra. El relieve es plano, con una pendiente suave, y la plataforma continental en el frente es en promedio ancha y poco profunda (Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards, & Morales-de-la-Garza, 2007). La marea astronómica es principalmente semidiurna, con rangos de marea viva y muerta de 1.2 y 0.5 m. respectivamente

(<http://mareografico.unam.mx/>). Las olas dominantes provienen de los sectores sur y suroeste, con alturas que varían entre 0.5 y 1.5 m, y periodos de 6 a 12 s (Franco-Ochoa, García-Paéz, Plata-Rocha, Montoya-Rodríguez, & Vergara-Sánchez, 2019).

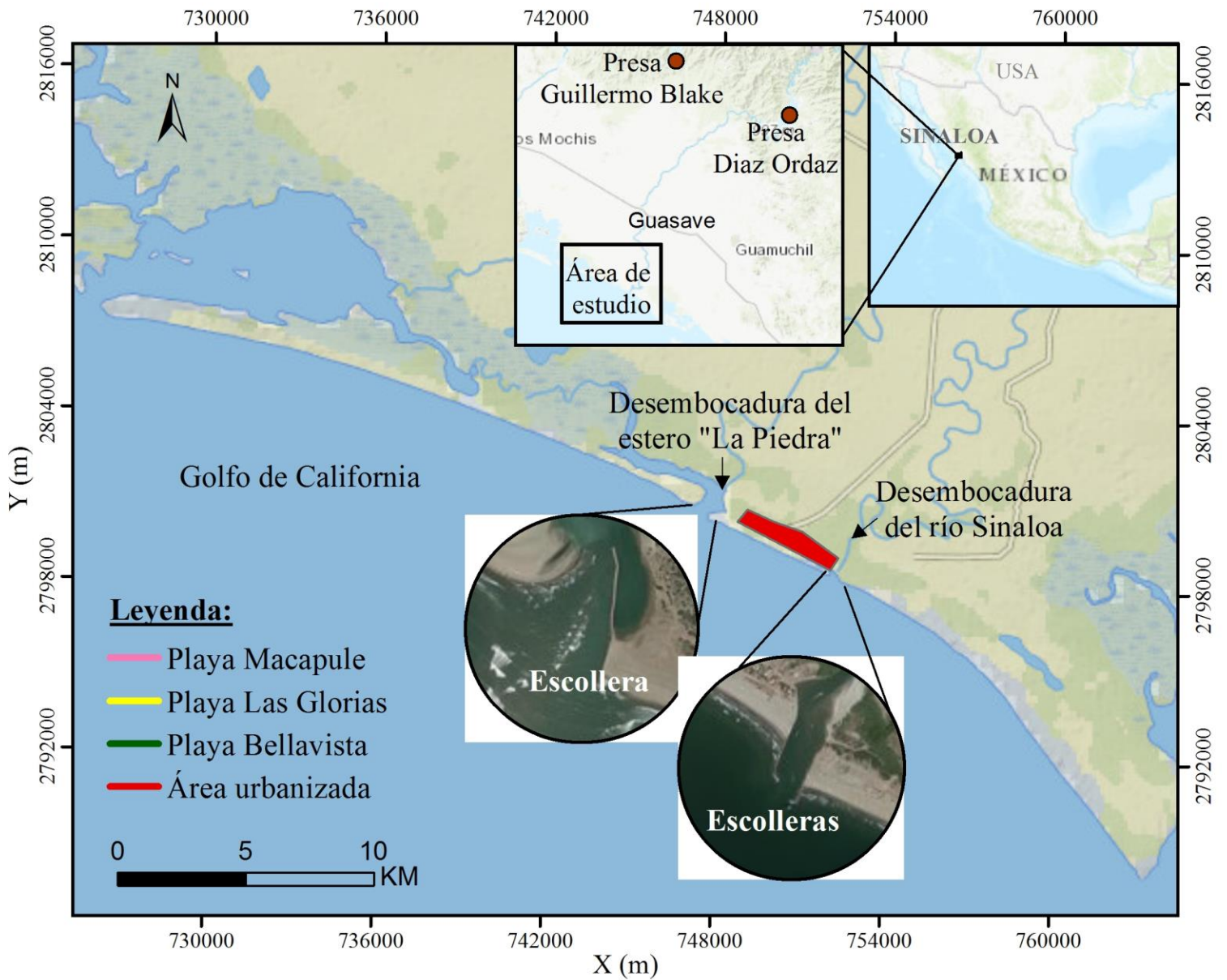


Figura 1. Localización del área de estudio.

Es ampliamente conocido que en esta área las presiones antrópicas han aumentado durante las últimas décadas, principalmente como resultado de la construcción de presas y escolleras, extracción de arena, urbanización, etcétera. En particular, la construcción de dos represas en el río Sinaloa (1972 y 1981), dos escolleras en su desembocadura (1992) y otra en la desembocadura del estero La Piedra (2006) han afectado gravemente la dinámica de los sedimentos. Por lo tanto, la erosión se sintió y se ha observado en varios puntos de la costa, sobre todo en la playa Las Glorias, lo cual representa una amenaza para la estabilidad del ecosistema costero y que afecta en especial el potencial turístico de la región (Jiménez-Illescas *et al.*, 2019).

Análisis y métodos

Para este análisis es necesario apoyarse en los indicadores más utilizados para las evaluaciones de riesgo costero, como los datos de mareas y oleaje que proporcionan información para evaluar los impactos del mar en la costa, así como las variables de distancia a la costa, topografía,

geología, geomorfología, uso del suelo, acciones antrópicas y la tasa de erosión, que permiten identificar límites y cambios reales en la costa. También es importante considerar los datos socioeconómicos para evaluar el riesgo de la población en la costa.

En este trabajo, el periodo de estudio fue de 1981 a 2018 y se ha dividido en tres subperiodos (1981-1991, 1991-2004 y 2004-2018) para demostrar el impacto de las acciones antrópicas (presas y escolleras) a lo largo del tiempo. Para cada uno de estos subperiodos, se analizaron los cambios en la línea de costa, y se evaluó el riesgo de erosión costera aplicando los métodos DSAS y CERA, respectivamente.

DSAS es un complemento de ESRI ArcGIS, que calcula estadísticas de tasa de cambio para una serie temporal de datos vectoriales en la costa (Thieler *et al.*, 2009). Este análisis se puede realizar de forma manual, midiendo las diferencias de posición entre las líneas de costas de diferentes periodos sobre perfiles trazados perpendicularmente a una de ellas. Por su parte, CERA es un complemento de QGIS (Quantum GIS Development Team, Equipo de Desarrollo de Quantum (GIS), 2016) propuesto por Narra *et al.* (2017), que evalúa el riesgo de erosión costera a partir de una estimación cualitativa de vulnerabilidad a la erosión, basada en las características geofísicas de la zona costera y el potencial de los agentes erosivos, y el análisis de las consecuencias del evento peligroso, teniendo en cuenta los aspectos sociales, ambientales, culturales y económicos del territorio. Los resultados de estos dos análisis

se combinan para obtener el resultado final buscado por CERA, que es obtener el mapa de riesgo de erosión costera.

Además, y con el fin de facilitar el análisis y la interpretación de los resultados, el área de estudio fue dividido en las playas Macapule, Las Glorias y Bellavista, respectivamente. Para aclarar cada parte del proceso de análisis desarrollado en esta investigación, se presenta una descripción completa de la metodología en las siguientes subsecciones.

Análisis de la línea de costa

Se utilizaron cuatro imágenes de la base de datos Landsat, como se muestra en la Tabla 1. Dichas imágenes fueron georreferencias al sistema de proyección Universal Transverse Mercator 12 N y al datum WGS84.

Tabla 1. Imágenes satelitales utilizadas en el análisis de la costa.

Satélite y sensor	Fecha de adquisición
Landsat 2-MSS	Oct-1981



Landsat 5-TM	Oct-1991
Landsat 5-TM	Oct-2004
Landsat 8-OLI	Oct-2018

Luego, se obtuvo la posición de la línea de costa en las imágenes localizando la línea que divide tierra y mar. Esta técnica para la ubicación de la línea de costa es la más utilizada debido a su simplicidad (Smith & Zartillo, 1990). Las imágenes usadas para encontrar la ubicación de la línea de costa fueron combinaciones de las bandas infrarrojas, ya que son muy útiles para detectar el límite entre la tierra y el agua (Natesan, Parthasarathy, Vishnunath, Kumar, & Ferrer, 2015). En este sentido, la mejor región de la longitud de onda para discriminar la tierra del agua es el infrarrojo cercano y el infrarrojo medio de 740 a 2 500 nm (Uysal, Polat, & Aydın, 2018) (ver Figura 2).

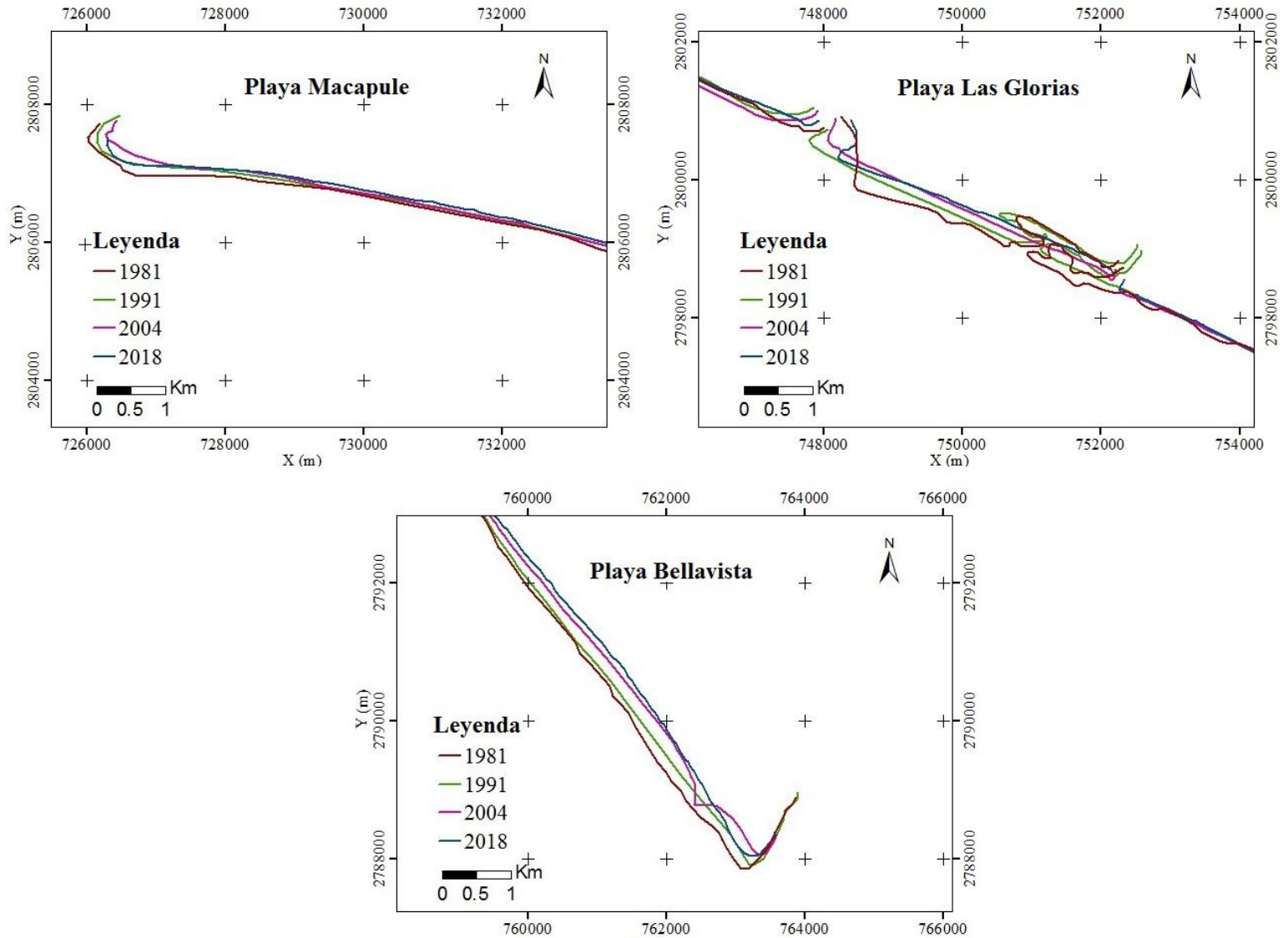


Figura 2. Línea de costa digitalizada del área de estudio para diferentes años: playa Macapule (izquierda), Las Glorias (derecha) y Bellavista (abajo).

Además, también es importante mencionar que DSAS requiere una línea base que sirva como punto de partida para la evolución de la costa. Dicha línea se generó paralela a la línea de costa de 1981, a una distancia de 100 m. El número de transectos a través de la costa se determinó siguiendo lo reportado por Kallepalli, Kakani y James (2017), quienes propusieron una verificación manual del número de transectos dados automáticamente por el DSAS. Para medir los cambios en la línea de costa del área de estudio, se calcularon el movimiento neto de la línea de costa (NSM, por sus siglas en inglés), que es la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente. Además, se extrajo la tasa de cambio de la línea de costa (EPR, por sus siglas en inglés), que se obtiene dividiendo la distancia entre las líneas de costa con respecto al número de años que han transcurrido. Luego, a partir de la EPR, se determinaron áreas de muy alta, alta, muy baja, y baja erosión o acreción.

Evaluación del riesgo costero



Como ya se mencionó, la evaluación del riesgo costero fue realizada con CERA, que requiere mapas digitales georreferenciados considerando los siguientes 13 parámetros, que por lo general se conocen como mapas indicadores:

1. Distancia a la costa.
2. Topografía.
3. Geología.
4. Geomorfología.
5. Cobertura del suelo.
6. Acciones antrópicas.
7. Altura máxima de ola significativa.
8. Rango máximo de mareas.
9. Tasa de cambio de la costa.
10. Densidad de población.
11. Economía.
12. Ecología.
13. Patrimonio.

Los datos usados se cortaron tierra adentro, cubriendo así una franja costera de 2 km de ancho. El sistema de referencia de coordenadas

(SRC) establecido fue WGS84/UTM zona 12N (EPSG: 32612) para todos los mapas, el cual conglomerará toda la base de datos.

Todos los mapas se construyeron a partir de la transformación directa de los datos originales, obteniendo mapas ráster clasificados en categorías de 1 a 5, de acuerdo con las características de cada parámetro a lo largo de toda el área de estudio (ver Tabla B1 en Apéndice B en Materiales Complementarios).

La clasificación 1 corresponde a la severidad más baja y un aumento en la clasificación indica un nivel de severidad creciente. Los mapas 1 a 9 se usaron para evaluar la vulnerabilidad; el peso de cada parámetro puede cambiar con el incremento de la distancia a la línea de costa. Mientras que los mapas 10 a 13 se usaron para evaluar las posibles consecuencias; en este caso, todos los parámetros tienen el mismo peso. Luego, utilizando los mapas de vulnerabilidad y posibles consecuencias se obtuvo el mapa de riesgo costero a la erosión usando una calculadora ráster. Los mapas de vulnerabilidad, posibles consecuencias y riesgo también se clasificaron por niveles de severidad del 1 a 5 para toda el área de estudio. Los criterios, tablas y ecuaciones para cuantificar el peso de cada parámetro y los mapas clasificados se documentan en Narra *et al.* (2017).

En resumen, en este artículo, la clasificación global (CG) de parámetros fue evaluada por un promedio ponderado de la siguiente manera:



$$CG = \frac{\sum A * NC}{100} \quad (1)$$

Donde CG es un parámetro dimensional de clasificación general; A representa el área ocupada por el nivel de clase (1 a 5) como un porcentaje; NC es el nivel de clase. El valor de CG igual a uno corresponde a un nivel muy bajo, y los valores crecientes de CG indican un aumento de la severidad hasta un máximo de 5 (nivel muy alto).

Resultados

Los resultados del análisis de la línea de costa con DSAS llevaron a la identificación de puntos críticos de erosión costera a lo largo de la costa del área de estudio (véanse la Figura 3 y Figura 4). La erosión se ha concentrado en la playa Las Glorias y en el margen sureste de la playa Bellavista, y más recientemente en el margen sureste de la playa Macapule (desembocadura del estero "La Piedra").

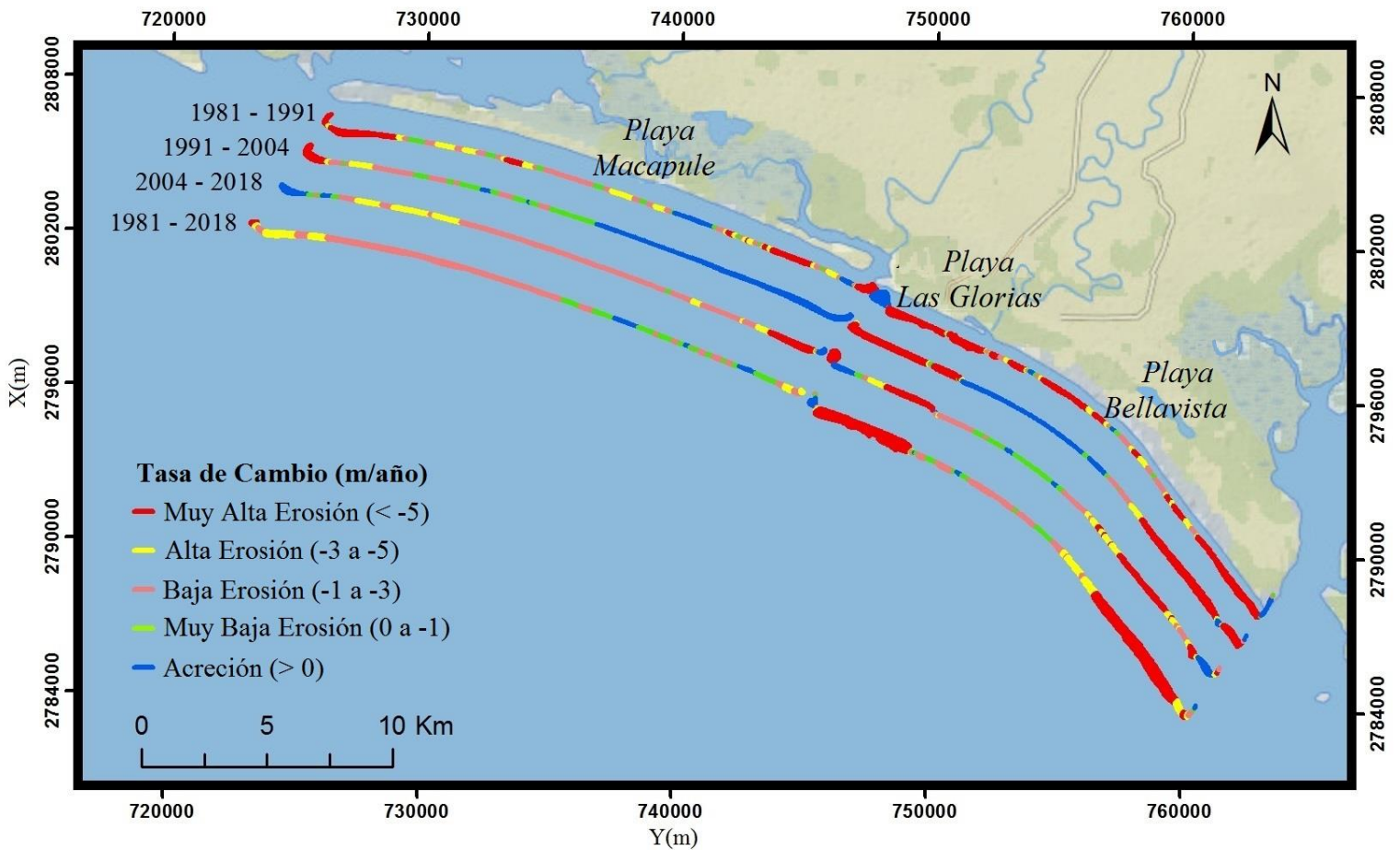


Figura 3. Tasa de cambio de la línea de costa a lo largo del área de estudio para todos los periodos.

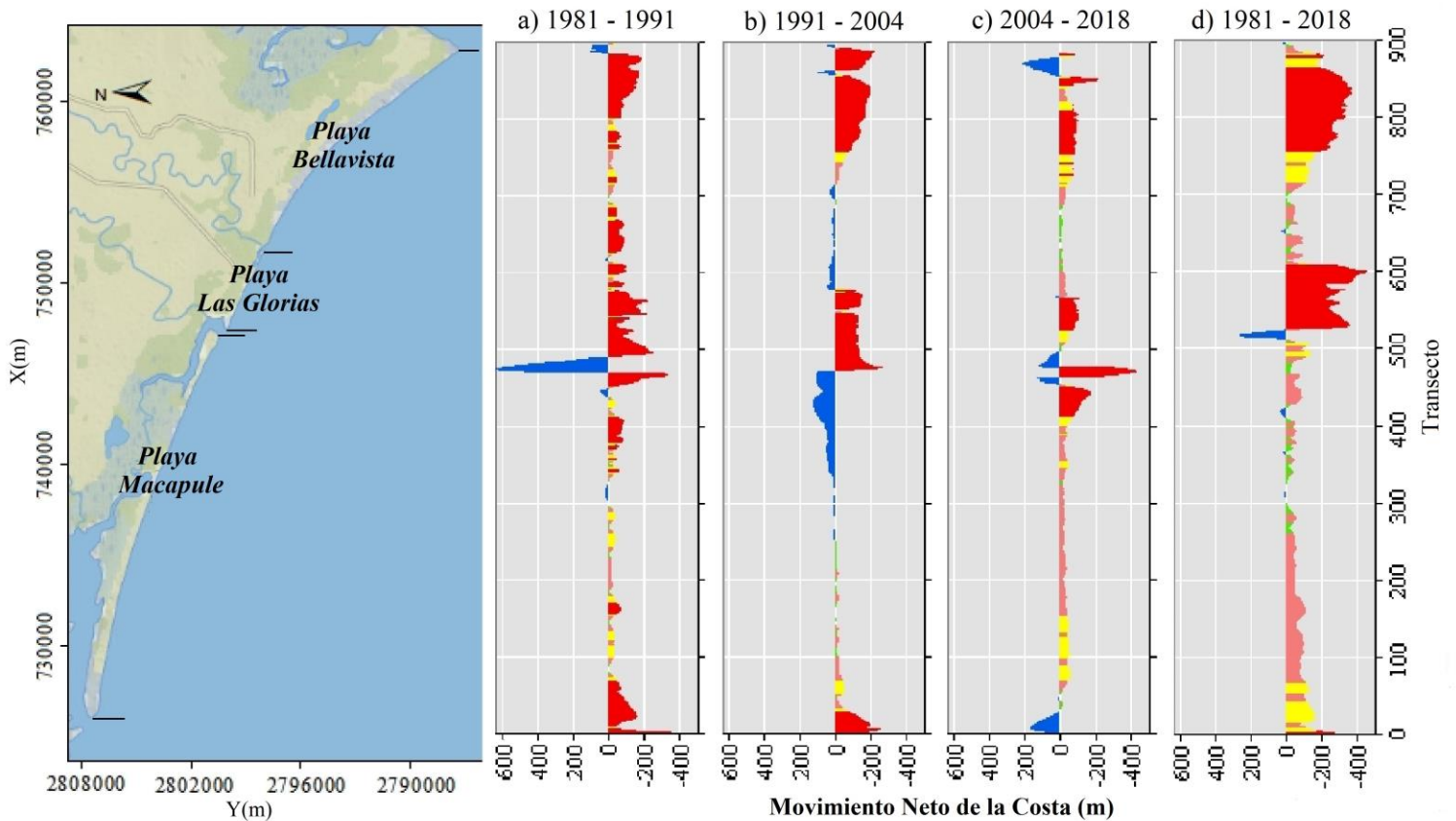


Figura 4. Movimiento neto de la línea de costa a lo largo del área de estudio para todos los periodos.

Por otro lado, al analizar los mapas indicadores de vulnerabilidad y posibles consecuencias para cada año (ver Apéndice A y Figuras A1 a A4 en Materiales Complementarios), se observó que seis parámetros de vulnerabilidad (distancia a la costa, topografía, geología, geomorfología,

altura máxima de ola significativa y rango máximo de marea) no han variado a lo largo de todo el periodo de estudio (1981-2018). Sólo los parámetros de cobertura de suelo, acciones antrópicas, tasa de cambio de la línea de costa y parámetros de consecuencias (densidad de población, economía, ecología y patrimonio) han variado al menos una vez durante cualquiera de los subperiodos del estudio.

La Figura 5 muestra los mapas de vulnerabilidad, posibles consecuencias y riesgo obtenidos con CERA (ver Apéndice B en Materiales complementarios), donde se puede apreciar a primera vista la distribución espacial en el tiempo de estos parámetros en el área de estudio.

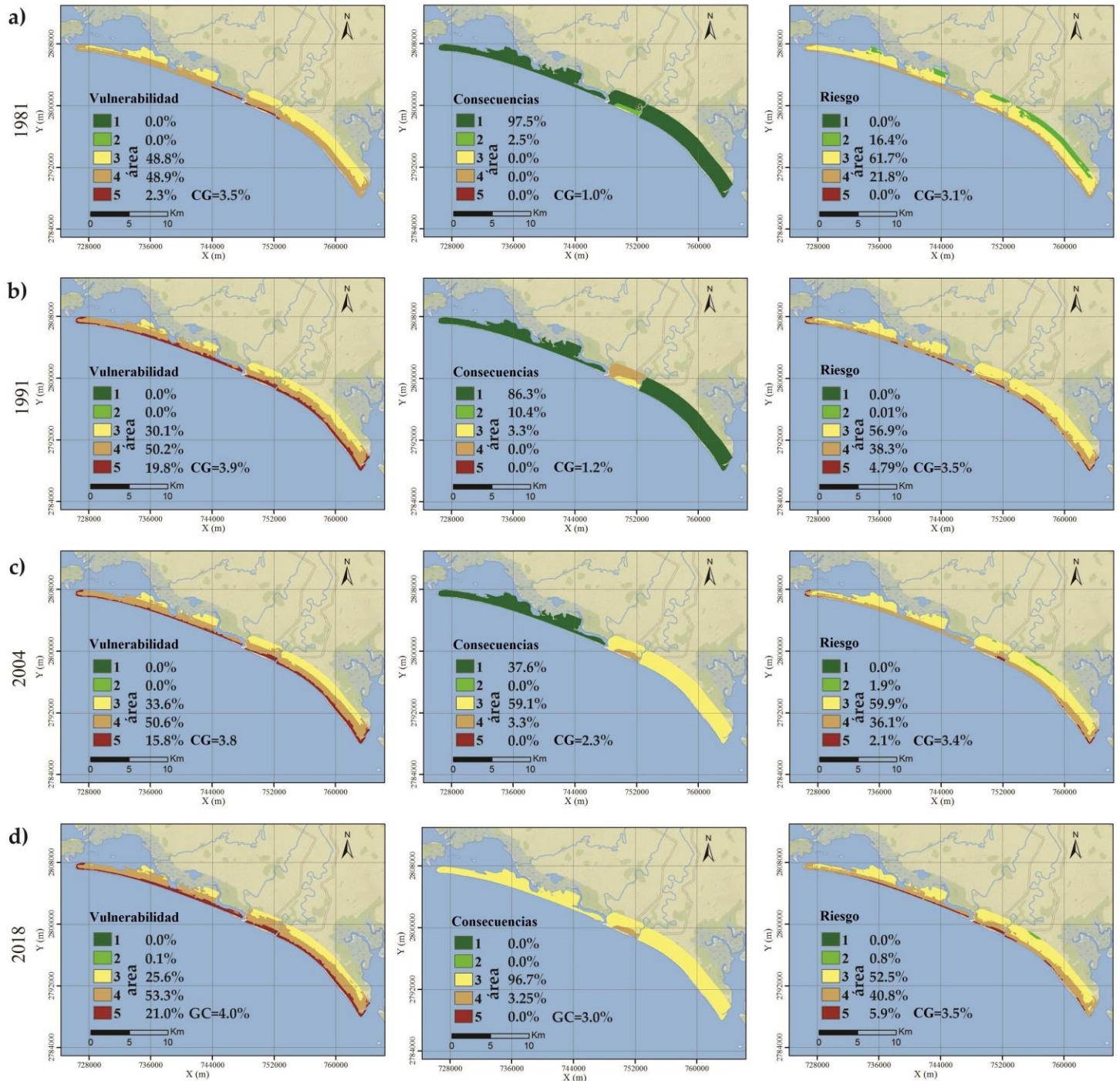


Figura 5. Mapas de vulnerabilidad, posibles consecuencias y riesgos para el área de estudio.

En las siguientes subsecciones se presentan los resultados del análisis de la línea de costa y la evaluación del riesgo de erosión para cada subperiodo.

Subperiodo de 1981 a 1991

A lo largo de este subperiodo de 10 años, las principales acciones antrópicas identificadas fueron la construcción de la presa Guillermo Blake Aguilar y Gustavo Díaz Ordaz en el río Sinaloa. Durante este periodo, toda la playa Las Glorias experimentó una EPR promedio de -13.4 m por año, lo que causó un NSM promedio de -127.6 m. Simultáneamente, las playas Bellavista y Macapule experimentaron principalmente problemas de erosión, con un NSM promedio de -67.4 y -41.0 m, respectivamente. La EPR promedio de estas playas fue de -7.3 m por año para Bellavista y de -4.4 m por año para Macapule (ver Tabla 2).

Tabla 2. Tasas de evolución para el subperiodo 1981-1991.

Variable	Área total	Playa Macapule	Playa Las Glorias	Playa Bellavista
EPR promedio (m/año)	-5.04	-4.4	-13.4	-7.3
NSM promedio (m)	-46.8	-41.0	-127.6	-67.4

Después de analizar los resultados de la evaluación de riesgos para este subperiodo (ver Figuras 5, a-b), se puede observar que la EPR promedio (-5.04 m por año) inducido por acciones antrópicas ha incrementado la CG de vulnerabilidad de 3.5 a 3.9 (+0.4). Por otro lado, un aumento de la población, economía y patrimonio ha incrementado la CG de consecuencias de 1.0 a 1.2 (+0.2). Esto finalmente causó que la CG de riesgo aumentara de 3.1 a 3.5 (+0.4).

Subperiodo de 1991 a 2004



Durante el segundo subperiodo, de 1991 a 2004 (13 años), la construcción de dos escolleras en la desembocadura del río Sinaloa, por primera vez en el área de estudio, interrumpió el transporte neto de sedimentos en la costa de sureste a noroeste. Como resultado, esto modificó la EPR promedio de la playa Las Glorias a -9.3 m por año, lo que llevó a un NSM promedio de -127.7 m durante este periodo y promovió la acumulación en la playa Bellavista en su margen noroeste, mientras que el margen sureste continuó erosionándose. En general, la playa Bellavista experimentó un NSM promedio de -57.6 m a una EPR promedio de -4.2 m por año. En este subperiodo, y en contraste con el anterior, la playa Macapule experimentó principalmente acreción y sólo su margen noroeste siguió erosionándose. Su NSM promedio fue de 5.05 m a una EPR promedio de 0.4 m por año (ver Tabla 3).

Tabla 3. Tasas de evolución para el subperiodo 1991-2004.

Variable	Área total	Playa Macapule	Playa Las Glorias	Playa Bellavista
EPR promedio (m/año)	-2.4	0.4	-9.3	-4.2
NSM promedio (m)	-32.9	5.05	-127.7	-57.6

Los resultados de la evaluación del riesgo para este subperiodo (ver Figuras 5, b-c) mostraron que principalmente debido a la reducción de la EPR promedio (de -5.04 a -2.4 m por año), la CG de vulnerabilidad ha disminuido de 3.5 a 3.4 (-0.1), en contraste con las CG de consecuencias que han aumentado de 1.2 a 2.3 (+1.1) debido a una economía en crecimiento. Esto causó que el CG de riesgo disminuyera de 3.5 a 3.4 (-0.1).

Subperiodo de 2004 a 2018

Durante el subperiodo 2004-2018 (14 años), por segunda vez en el área de estudio, el transporte neto de sedimentos de sureste a noroeste fue interrumpido por la construcción de otra escollera en la playa Las Glorias. Esta acción antrópica promovió la acumulación en el margen noroeste de la playa, mientras que el margen sureste continuó erosionándose. Aunque no tuvo ningún efecto en la playa Bellavista, generó erosión en el margen sureste de la playa Macapule. Durante este subperiodo, las playas de Las Glorias, Bellavista y Macapule experimentaron promedios de NSM de -75.9, -30.2 y -27.8 m, con promedios de EPR de -5.4, -2.2 y -1.9 m por año, respectivamente (ver Tabla 4).



Tabla 4. Tasas de evolución para el subperiodo 2004-2018.

Variable	Área total	Playa Macapule	Playa Las Glorias	Playa Bellavista
EPR promedio (m/año)	-2.5	-1.9	-5.4	-2.2
NSM promedio (m)	-34.3	-27.8	-75.9	-30.2

En este subperiodo, los resultados de la evaluación del riesgo (ver Figura 5, c-d) demostraron que el CG de vulnerabilidad ha incrementado de 3.8 a 4.0 (+0.2) debido a un aumento en la EPR promedio (de -2.4 m a -2.5 m por año). Asimismo, el CG de consecuencias ha incrementado de 2.3 a 3.0 (+0.7) debido a un incremento en el valor ecológico de la región como resultado de la declaración de la playa Macapule como un área costera protegida. Así, el CG de riesgo ha incrementado de 3.4 a 3.5 (+0.1).

Discusión

Los resultados de esta investigación demostraron que entre 1981 y 2018, el valor promedio de una EPR del área de estudio fue de -3.1 m por año, lo que llevó a un NSM promedio de -112.9 m. Entonces, se puede afirmar que la playa más erosiva es Las Glorias, con un NSM promedio de -235.9 m a una EPR promedio de -6.4 m por año; la menos erosiva es Macapule, con un NSM promedio de -61.6 m a una EPR promedio de -1.6 m por año. Por otro lado, la playa Bellavista experimentó un NSM promedio de -148.2 m a una EPR promedio de -4.0 m por año (ver Tabla 5).

Tabla 5. Tasas de evolución para el subperiodo 1981-2018.

Variable	Área total	Playa Macapule	Playa Las Glorias	Playa Bellavista
EPR promedio (m/año)	-3.1	-1.6	-6.4	-4.0
NSM promedio (m)	-112.9	-61.6	-235.9	-148.2

La CG de vulnerabilidad ha aumentado de 3.5 a 4.0 (+0.5), es decir, de un nivel moderado a alto. Esto se debió a los cambios en la cobertura del suelo, las acciones antrópicas y la tasa de cambio de la línea de costa. Similarmente, la CG de las posibles consecuencias ha incrementado de 1.0 a 3.0 (+2.0), lo que representa un incremento de un nivel muy bajo a uno moderado, como resultado de un aumento en la densidad de población, economía, ecología y patrimonio. En cuanto al CG de riesgo, sólo ha incrementado de 3.1 a 3.5 (+0.4), por lo que el nivel de riesgo se mantuvo en un nivel moderado (ver Figura 5, a-d).

La explicación más plausible para las diferencias en el NSM y EPR a lo largo del área de estudio se puede encontrar en el tipo de evolución de la costa que ocurrió con las diferentes acciones antrópicas, como el represamiento del río Sinaloa y la construcción de escolleras transversalmente a la costa. Al igual que en otros estudios en el área de estudio (p. ej., Alcántar, 2007; Jiménez-Illescas *et al.*, 2019), los resultados de este trabajo indican que las acciones antrópicas (presas y escolleras) son los principales impulsores de los cambios en la línea de costa que se han producido en las últimas décadas. Las presas y escolleras están entre los principales impulsores vinculados a la dinámica moderna de la costa según Gómez-Pazo *et al.* (2019), siendo el otro la urbanización. En el área de estudio, la urbanización durante todo el periodo de estudio se ha concentrado en la playa de Las Glorias. Sin embargo, el grado de urbanización no parece afectar la dinámica de

sedimentos como se observa en otras costas, por ejemplo, en la playa de Chachalacas dentro del Golfo de México, donde el desarrollo urbano ha tenido lugar a lo largo de la costa y la contracción costera está aumentando (Martínez, Landgrave, Silva, & Hesp, 2019).

La erosión más importante en toda el área de estudio ocurrió en el subperiodo 1981-1991, durante el cual la línea de costa sufrió un NSM promedio de -57.6 m a una EPR promedio de -4.2 m por año. Ciertamente, el represamiento del río Sinaloa redujo la carga de sedimentos que llegaban a la costa. Esto ha causado alteraciones en la línea de costa, que aún se pueden sentir después de varios años (Ataol *et al.*, 2019). Al igual que en este estudio, la erosión por la construcción de presas dentro del Golfo de California ha sido documentada por Ezcurra *et al.* (2019) para la franja costera localizada alrededor de los ríos El Fuerte y Santiago. Cuando estos ríos fueron represados, la línea de costa experimentó una rápida recesión en lo que de otra manera debería haber sido un área de acreción.

Durante el subperiodo de 1991 a 2004, la erosión afectó principalmente a la playa Las Glorias y al margen sureste de la playa Bellavista. El transporte neto de sedimentos de sureste a noroeste erosionó el margen sureste de la playa Bellavista. El material proveniente de esta erosión fue depositado en el lado sureste de la escollera en la desembocadura del río Sinaloa, y eso generó erosión en la playa Las Glorias. Por su parte, la playa Macapule experimentó acreción en términos

generales, lo que quizás se deba al depósito de sedimentos provenientes de la erosión de la playa Las Glorias, ya que cuando hay erosión en una playa, hay acreción en otra, cerca o lejos (Pollard *et al.*, 2019).

En el subperiodo 2004-2018 es importante señalar que la disminución en la erosión causada por el espigón de la margen noroeste de la playa Las Glorias modificó la desembocadura del estero "La Piedra". Además, es posible que la desembocadura continúe ampliándose y generando más erosión en el margen sureste de la playa Macapule. Una situación similar a la descrita anteriormente también se ha observado en la playa de Chachalacas (Martínez *et al.*, 2019), donde la construcción de escolleras está afectando la estabilidad de la playa y la desembocadura del río Actopan. La costa ha cambiado rápidamente, y aun no parece haberse estabilizado, lo que evidencia la necesidad de monitorearla, para evitar cambios potencialmente drásticos en la playa de Chachalacas. En el área de estudio de esta investigación, la desembocadura del estero "La Piedra" también necesita ser monitoreada de forma regular, pues los resultados obtenidos indican que la construcción del espigón en el margen noroeste de la playa Las Glorias ha tenido un efecto considerable en la evolución del margen sureste de la playa Macapule.

Por otro lado, el riesgo de erosión ha cambiado durante el periodo de estudio como resultado de los cambios en la cobertura del suelo, las acciones antrópicas, la tasa de cambio de la línea de costa, la densidad de población, la economía, la ecología y el patrimonio. Los resultados

indican que hasta la fecha la erosión inducida por las acciones antrópicas son los principales impulsores del daño ambiental subyacente al riesgo de erosión. De acuerdo con Stevens *et al.* (2015), todos estos impulsores pueden cambiar con el tiempo, por lo que un análisis completo debe incluir una evaluación de cómo tales impulsores han evolucionado históricamente y cómo son propensos a evolucionar en el futuro. Por lo tanto, los resultados de este estudio proporcionan una base para futuras investigaciones centradas en predecir los cambios en la línea de costa y el riesgo costero a través de análisis de escenarios. Sin embargo, estos resultados deben considerarse con cautela, ya que aún están sujetos a incertidumbres y dependen en gran medida de los rangos de valores de la Tabla B1 propuestos por Narra *et al.* (2017) y de la calidad de los datos de campo para los parámetros específicos del sitio utilizados como datos de entrada.

Conclusiones

La principal conclusión de este estudio es que las dos presas en el río Sinaloa (construidas en 1972 y 1981, respectivamente) y las escolleras construidas en la desembocadura del río Sinaloa (1992), y en la desembocadura del estero "La Piedra" (2006) son los principales impulsores tanto de los cambios en la línea de costa como del daño ambiental subyacente al riesgo de erosión que se ha incrementado en las últimas décadas en la franja costera norte del estado de Sinaloa.

Entre 1981 y 2018, la línea de costa del área de estudio se ha ido erosionando con una EPR promedio de -3.1 m por año, lo que llevó a un NSM promedio de -112.9 m, siendo la playa de Las Glorias la más erosionada, con una EPR promedio de -6.4 m por año y un NSM promedio de -235.9 m. La erosión más significativa en toda la costa del área de estudio ocurrió durante el subperiodo 1981-1991 debido al represamiento del río Sinaloa que redujo la carga sedimentaria que llegaba a la costa. En los otros subperiodos (1991-2004 y 2004-2018), la interrupción del transporte neto de sedimentos de sureste a noroeste por las escolleras afectó principalmente a la playa Las Glorias y a la desembocadura del estero La Piedra. Esta última necesita ser monitoreada para evitar

cambios potencialmente drásticos en el margen sureste de la playa Macapule. Por otro lado, el nivel de riesgo se mantuvo en un nivel moderado, aunque aumentó 0.5 unidades en su CG. Finalmente, la CG de vulnerabilidad y las posibles consecuencias aumentaron de un nivel moderado a uno alto y de un nivel muy bajo a moderado, respectivamente.

Se generó una base de datos SIG que incluye datos estadísticos, mapas temáticos e índices vinculados de los que se obtuvieron los resultados, y que será útil para futuros estudios enfocados en la predicción de los cambios en la línea de costa y el riesgo costero.

Materiales complementarios

Apéndice A. Recopilación y procesamiento de datos para los mapas



Para generar el mapa topográfico del área de estudio se utilizó la base de datos del Continuo de Elevación de Mexicano (CEM) del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). Este conjunto de datos representa las elevaciones del territorio continental mexicano, con una resolución de 15 m; está georreferenciado por el sistema ITRF92, y fue publicado en 2013. La extracción del área de estudio del CEM se realizó con herramientas de ArcGis. Los mapas geológicos se realizaron con base en GLiM (Global Lithological Map) y en información geoespacial de datos geológicos del INEGI. De manera similar, los mapas geomorfológicos y de cobertura del suelo se realizaron con base en información geoespacial del INEGI proveniente de datos fisiográficos y de uso de suelo y vegetación, respectivamente. Para el mapa de acciones antrópicas se utilizaron imágenes satelitales, donde se identificaron estructuras de defensa costera y cambios de la línea de costa, para inferir si existían fuentes sedimentarias cercanas.

El mapa de altura máxima de ola significativa se elaboró con base en datos de reanálisis de olas de aguas profundas del nodo PAC17MX del Atlas Mexicano de Olas Oceánicas (ATLOOM), desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (Montoya-Rodríguez, 2016). En cuanto a la creación del mapa de rango máximo de mareas, los datos fueron proporcionados por la Secretaría de Marina (SEMAR), los cuales fueron tomados de la Estación Mareográfica Topolobampo. En este trabajo, la altura promedio de ola durante las condiciones de tormenta y el rango

promedio de las mareas vivas se consideraron como la altura máxima de ola significativa y el rango máximo de marea, respectivamente. Durante la generación de estos mapas, los parámetros mencionados anteriormente se evaluaron como un valor único para toda el área de estudio. El mapa de la tasa de cambio de la de costa se generó con un análisis de la línea de costa a partir de imágenes de satélite utilizando DSAS, como se describe en la subsección Análisis de la línea de costa. Para la creación del mapa de tasas de cambio de la línea de costa se consideró la línea de costa 2018 como la línea base.

La información requerida para la densidad de población y los parámetros económicos también se obtuvieron de la base de datos del INEGI correspondiente al Censo Nacional 2010. Los datos utilizados para la generación del mapa ecológico consideraron áreas protegidas definidas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conanp). El cálculo del mapa patrimonial se realizó mediante el análisis visual de imágenes de satélite identificando la existencia de zonas urbanas continuas o discontinuas, carreteras, monumentos históricos o importantes cerca de la costa.

Los mapas digitales (procedentes de Arcgis®, Environmental Systems Research Institute) para los años 1981, 1991, 2004 y 2018 se presentan en la Figura A1, Figura A2, Figura A3 y Figura A4.

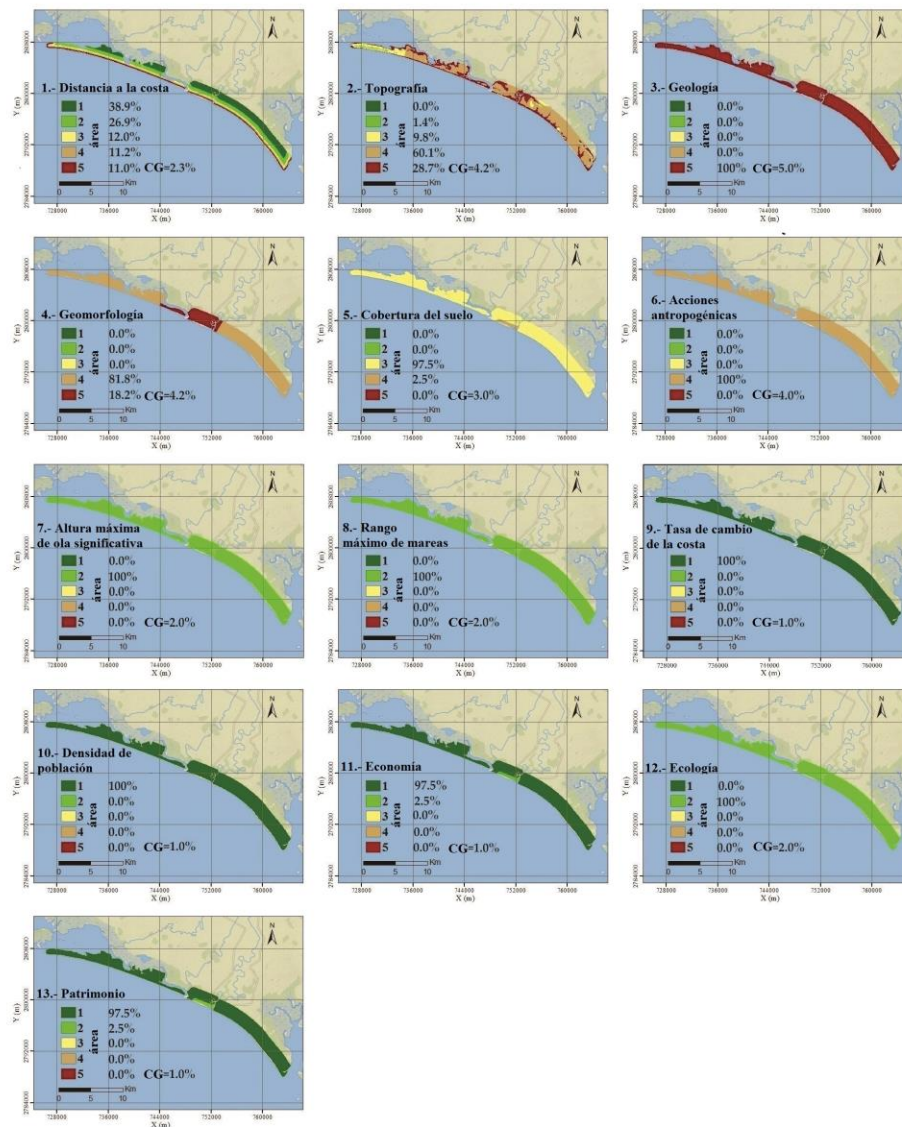


Figura A1. Mapas indicadores de vulnerabilidad (1 a 9) y posibles consecuencias (10 a 13) del año 1981.

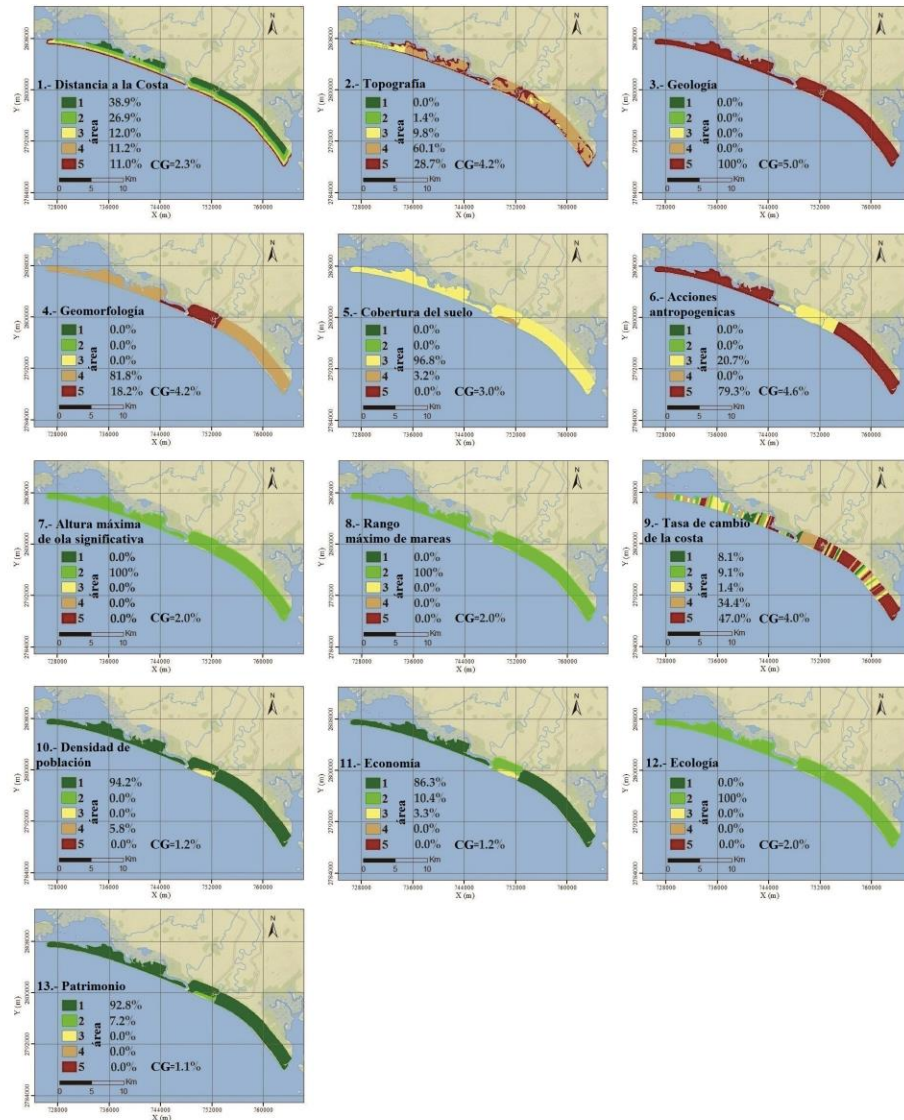


Figura A2. Mapas indicadores de vulnerabilidad (1 a 9) y posibles consecuencias (10 a 13) del año 1991.

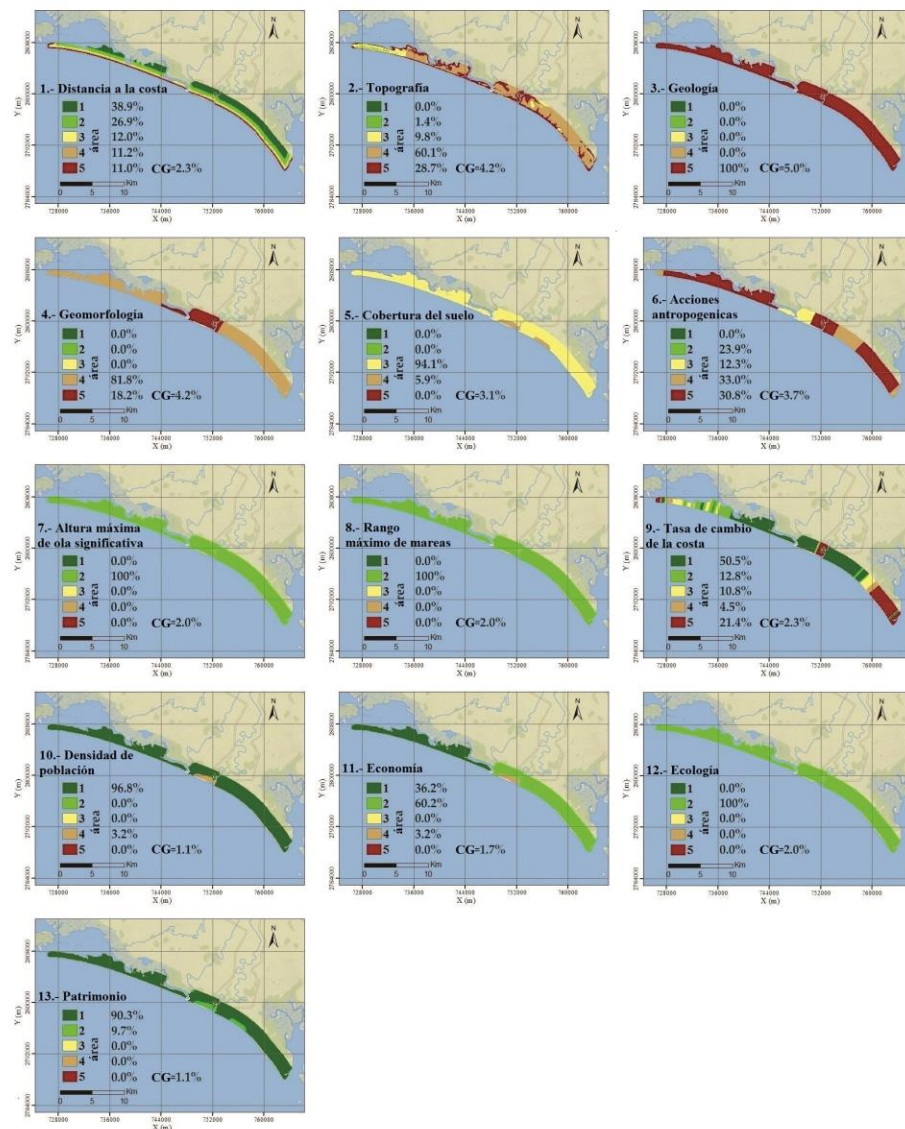


Figura A3. Mapas indicadores de vulnerabilidad (1 a 9) y posibles consecuencias (10 a 13) del año 2004.

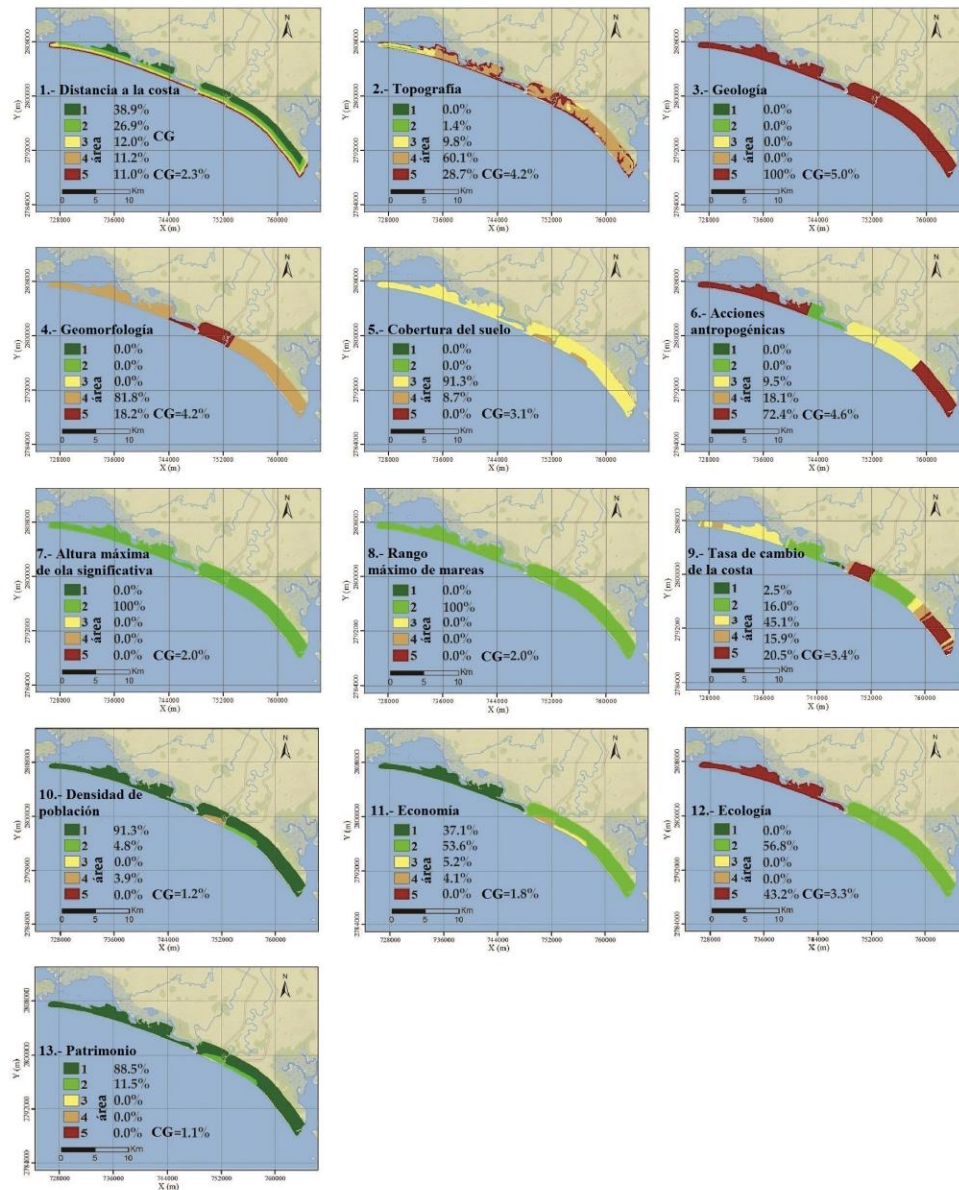


Figura A4. Mapas indicadores de vulnerabilidad (1 a 9) y posibles consecuencias (10 a 13) del año 2018.

Apéndice B. Aplicación de la metodología CERA

El método CERA requirió del procesamiento de datos para la creación de mapas indicadores (el procesamiento de cada uno de ellos se describe en el Apéndice A), los cuales se obtuvieron de la transformación directa de los datos originales obteniendo mapas ráster clasificados del 1 al 5. Los cinco niveles para clasificar los mapas indicadores necesarios para ejecutar la aplicación CERA se presentan en la Tabla B1. Cada uno de los mapas indicadores fueron generados con una resolución de salida de 5 m/px con base en lo indicado por el autor de CERA, el cual realizó varias pruebas y concluyó que ésta es la resolución más aceptable porque proporciona un tiempo de cálculo razonable sin comprometer el detalle de los datos de cualquier otro mapa indicador; por tal razón, todos los mapas indicadores se crearon en dicha resolución.

Tabla B1. Clasificación de parámetros, adaptado de Narra *et al.* (2017).

Parámetros	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
------------	----------	------	----------	------	----------



	1	2	3	4	5
Distancia a la costa (m)	>1 000	[500,1 000]	[300,500]	[150,300]	≤ 150
Topografía (m)	>30	[20,30]	[10,20]	[5,10]	≤ 5
Geología	Rocas magmáticas	Rocas metamórficas	Rocas sedimentarias	Sedimentos gruesos no consolidados	Sedimentos finos no consolidados
Geomorfología	Montañas	Acantilados de roca	Acantilados erosivos; playas protegidas; dunas	Playas expuestas; llanuras costeras	Desembocaduras de los ríos; esteros
Cobertura del suelo	Bosque	Vegetación cultivada	No cubierta	Urbanizada rural	Urbanizada; industrial
Acciones antrópicas	Intervención de estabilización de la costa	Intervención sin reducción de fuentes de sedimentos	Intervención con reducción de fuentes de sedimentos	Sin intervenciones ni reducción de fuentes de sedimentos	Sin intervención y con reducción de fuentes de sedimentos
Altura máxima de ola significativa (m)	<3.0	[3.0,5.0]	[5.0,6.0]	[6.0,6.9]	≥ 6.9
Rango máximo de mareas (m)	<1.0	[1.0,2.0]	[2.0,4.0]	[4.0,6.0]	≥ 6.0

Tasas promedio de erosión/ acreción (m/año)	>0.0 Acreción	[0.0, -1.0] Erosión	[-1.0, -3.0] Erosión	[-3.0, -5.0] Erosión	≤ -5.0 Erosión
Densidad de población (hab/km²)	<125	[125,250]	[250,500]	[500,1 000]	≥ 1000
Economía (número de empleos)	0	[0,120]	[120,240]	[240,480]	>480
Ecología	Sin relevancia ecológica	Reserva agrícola; áreas de interés de la comunidad	Área protegida ecológica	Zona de protección costera	Reserva natural
Patrimonio	No patrimonio	Casas dispersas; carreteras	Asentamiento urbanos	Edificios históricos regionales; instalaciones críticas	Monumentos nacionales

La información obtenida para la generación de los mapas de indicadores para evaluar la vulnerabilidad se basó en datos actuales e históricos, según lo requerido por cada parámetro. Los nueve parámetros para calcular la vulnerabilidad costera son distancia a la costa (distancia

lineal más corta desde cualquier punto en tierra hasta la costa); topografía; geología; geomorfología; cobertura del suelo; acciones antrópicas; altura máxima de ola significativa (dentro de un periodo de datos representativo); rango máximo de marea, y tasa de erosión/acreción, a los que se atribuye una clasificación del 1 al 5 basada en la Tabla B1. La vulnerabilidad en cada punto se obtiene calculando la media ponderada de los pesos de los nueve parámetros en función de lo establecido por Narra *et al.* (2017).

El cálculo de las consecuencias se realiza de forma similar al de vulnerabilidad, pero incluye sólo cuatro parámetros: densidad de población, economía, ecología y patrimonio; de igual forma estos parámetros se clasifican del 1 al 5 basados en la Tabla B1. Por lo tanto, este mapa se obtuvo de la media de los cuatro mapas, los cuales tienen el mismo peso.

Para obtener el mapa de riesgo de erosión costera, los mapas de vulnerabilidad y consecuencia se combinan utilizando la matriz de riesgo presentada en la Figura B1.

		Consecuencia				
		I	II	III	IV	V
Vulnerabilidad	I	I	I	I Muy bajo	II	III
	II	I	II	II Bajo	III	IV
	III	I	II	III Moderado	IV	V
	IV	II	III	IV Alto	IV	V
	V	III	IV	V Muy alto	V	V

Figura B1. Matriz de riesgos utilizada por CERA (Narra *et al.*, 2017).

El riesgo se define en cinco clases diferentes: "I" representa un riesgo muy bajo y "V" un riesgo muy alto. La matriz de riesgos es simétrica, teniendo en cuenta tanto la vulnerabilidad como las consecuencias con igual importancia (Narra *et al.*, 2017).

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y a la Secretaría de Marina (SEMAR) por la información proporcionada



para la elaboración de este trabajo. Los autores también están muy agradecidos con el Dr. Sébastien de Brye por su útil y desinteresado apoyo en la revisión de este artículo. Esta investigación fue financiada por la Universidad Autónoma de Sinaloa con el número de beca de investigación PROFAPI2022/A1_016.

Referencias

- Ahmad, S. R., & Lakhan, V. C. (2012). GIS-based analysis and modeling of coastline advance and retreat along the coast of Guyana. *Marine Geodesy*, 35(1), 1-15. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/01490419.2011.637851>
- Alcántar, R. (2007). *Temporal space variability of the beach profile, in "Las Glorias" beach (Master's degree)*. Guasave, Mexico: National Polytechnic Institute.
- Ataol, M., Kale, M. M., & Tekkanat, İ. S. (2019). Assessment of the changes in shoreline using digital shoreline analysis system: A case study of Kızılırmak Delta in northern Turkey from 1951 to 2017. *Environmental Earth Sciences*, 78(19), 1-9. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8591-7>
- Cowell, P. J., Roy, P. S., & Jones, R. A. (1992). Shoreface translation model: Computer simulation of coastal-sand-body response to sea level rise. *Mathematics and Computers in Simulation*, 33(5-6), 603-



608. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(92\)90158-D](https://doi.org/10.1016/0378-4754(92)90158-D)
- Cowell, P. J., Roy, P. S., & Jones, R. A. (1995). Simulation of large-scale coastal change using a morphological behavior model. *Marine Geology*, 126(1-4), 45-61. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00065-7](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00065-7)
- Cowell, P. J., Thom, B. G., Jones, R. A., Everts, C. H., & Simanovic, D. (2006). Management of uncertainty in predicting climate-change impacts on beaches. *Journal of Coastal Research*, 22(221), 232-245. Recuperado de <https://doi.org/10.2112/05a-0018.1>
- Cowell, P. J., Stive, M. J. F., Niedoroda, A. W., Vriend, H. J. De, D. J., Swift, P., & Capobianco, M. (2016). The coastal-tract (Part 1): A conceptual approach to aggregated modeling of low-order coastal change stable. *Journal of Coastal Research*, 4(19), 812-827.
- Enríquez-Andrade, R., Anaya-Reyna, G., Barrera-Guevara, J. C., De-los Ángeles-Carvajal-Moreno, M., Martínez-Delgado, M. E., Vaca-Rodríguez, J., & Valdés-Casillas, C. (2005). An analysis of critical areas for biodiversity conservation in the Gulf of California Region. *Ocean and Coastal Management*, 48(1), 31-50. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.11.002>
- Escudero-Castillo, M., Mendoza-Baldwin, E., Silva-Casarin, R., Posada-Vanegas, G., & Arganis-Juaréz, M. (2012). Characterization of risks

in coastal zones: A review. *Clean-Soil, Air, Water*, 40(9), 894-905.
Recuperado de <https://doi.org/10.1002/clen.201100679>

Ezcurra, E., Barrios, E., Ezcurra, P., Ezcurra, A., Vanderplank, S., Vidal, O., & Aburto-Oropeza, O. (2019). A natural experiment reveals the impact of hydroelectric dams on the estuaries of tropical rivers. *Science Advances*, 5(3). Recuperado de <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9875>

Fotsi, Y. F., Pouvreau, N., Brenon, I., Onguene, R., & Etame, J. (2019). Temporal (1948-2012) and dynamic evolution of the Wouri estuary coastline within the gulf of Guinea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10). Recuperado de <https://doi.org/10.3390/jmse7100343>

Franco-Ochoa, C., García-Paéz, F., Plata-Rocha, W., Montoya-Rodríguez, J. M., & Vergara-Sánchez, M. Á. (2019). Observation and analysis of hydro-morphologic parameters in Las Glorias beach, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(2), 153-170. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-06>

Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., & Pérez, X. L. O. (2019). Recent evolution (1956-2017) of rodas beach on the Cíes Islands, Galicia, NW Spain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5). Recuperado de <https://doi.org/10.3390/jmse7050125>

- Jiménez-Illescas, Á. R., Zayas-Esquer, M. M., & Espinosa-Carreón, T. L. (2019). Integral management of the coastal zone to solve the problems of erosion in Las Glorias Beach, Guasave, Sinaloa, Mexico. In: *Coastal Management* (pp. 141-163). Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810473-6.00010-8>
- Jonah, F. E., Boateng, I., Osman, A., Shimba, M. J., Mensah, E. A., Adu-Boahen, K., & Effah, E. (2016). Shoreline change analysis using end point rate and net shoreline movement statistics: An application to Elmina, Cape Coast and Moree section of Ghana's coast. *Regional Studies in Marine Science*, 7, 19-31. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.05.003>
- Kallepalli, A., Kakani, N. R., & James, D. B. (2017). Digital shoreline analysis system-based change detection along the highly eroding Krishna-Godavari delta front. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(03), 1. Recuperado de <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.036018>
- Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., & Morales-de-la-Garza, E. (2007). Textural characterization of beach sands from the Gulf of California, Mexico: Implications for coastal processes and relief. *Ciencias Marinas*, 33(1), 83-94. Recuperado de <https://doi.org/10.7773/cm.v33i1.1018>
- Kermani, S., Boutiba, M., Guendouz, M., Guettouche, M. S., & Khelfani, D. (2016). Detection and analysis of shoreline changes using

- geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean and Coastal Management*, 132, 46-58. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.010>
- Lee, Y., Eom, J., Do, J., Kim, B., & Ryu, J. (2019). Shoreline movement monitoring and geomorphologic changes of beaches using lidar and UAVs images on the coast of the East Sea, Korea. *Journal of Coastal Research*, (90), 409-414. Recuperado de <https://doi.org/10.2112/SI90-052.1>
- Martínez, M. L., Landgrave, R., Silva, R., & Hesp, P. (2019). Shoreline dynamics and coastal dune stabilization in response to changes in infrastructure and climate. *Journal of Coastal Research*, 92(sp1), 6. Recuperado de <https://doi.org/10.2112/si92-002.1>
- Montoya-Rodríguez, J. M. (2016). Red Nacional de Datos Oceanográficos para Zonas Costeras. *Journal of Civil Engineering (IC, by Its Initials in Spanish)*, 566, 14-18. Recuperado de https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/ic-566_ok/16
- Narra, P., Coelho, C., Sancho, F., Escudero, M., & Silva, R. (2019). Coastal Hazard Assessments for Sandy Coasts: Appraisal of Five Methodologies. *Journal of Coastal Research*, 35(3), 574. Recuperado de <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-18-00083.1>
- Narra, P., Coelho, C., Sancho, F., & Palalane, J. (2017). CERA: An open-source tool for coastal erosion risk assessment. *Ocean and Coastal*

- Management*, 142, 1-14. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.013>
- Natesan, U., Parthasarathy, A., Vishnunath, R., Kumar, G. E. J., & Ferrer, V. A. (2015). Monitoring longterm shoreline changes along Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 325-332. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.044>
- Pollard, J. A., Spencer, T., & Brooks, S. M. (2019). The interactive relationship between coastal erosion and flood risk. *Progress in Physical Geography*, 43(4), 574-585. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0309133318794498>
- Smith, G. L., & Zartillo, G. A. (1990). Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, 6(1), 111-120. Recuperado de <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/78000>
- Stevens, A. J., Clarke, D., Nicholls, R. J., & Wadey, M. P. (2015). Estimating the long-term historic evolution of exposure to flooding of coastal populations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1215-1229. Recuperado de <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1215-2015>
- Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (1999). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise. *Open-File Report 00-179*, 1.

- Thieler, R., Himmelstoss, E., Zichichi, J., & Ayhan, E. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Uysal, M., Polat, N., & Aydın, M. (2018). *Monitoring of coastal erosion of Karasu Coast in Black Sea*. In: Kallel, A., Ksibi, M., & Ben-Dhia, H. (ed.). Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_470
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., & McCall, R. (2018). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: A coastal risk assessment framework. *Coastal Engineering*, 134(January, 2017), 33-47. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.002>