

Variación espacial y multitemporal de la línea de costa en playas arenosas del Caribe sur de Costa Rica

Spatial and Multitemporal Variation of the Coastline in Sandy Beaches of the South Caribbean Region of Costa Rica

Maikol Castillo-Chinchilla,* Lilliana Piedra-Castro,** Jose Miguel Pereira Chaves,***
Luis Sierra Sierra† y Jose Pablo Carvajal Sánchez§

Recibido: 28/04/2023. Aprobado: 30/05/2023. Publicado: 26/06/2023

Resumen. Múltiples factores se interrelacionan para establecer el límite entre el mar y el continente, sin embargo, en las últimas décadas esta demarcación ha sufrido variaciones importantes en la línea costera, debido a los diversos efectos del cambio climático, al deterioro de las barreras coralinas, construcción de infraestructuras de contención, entre otros. El objetivo de esta investigación fue analizar la variación espacial y multitemporal de la línea de costa en playas arenosas del Caribe sur de Costa Rica. El área de estudio se delimitó entre el centro de la provincia de Limón (N 10° 00'29"; W 83° 15'06), y la desembocadura del río Sixaola, en el cantón de Talamanca (N 09°25'40"; W 83°01'20"). Dicha área se subdividió en dos secciones tomando en consideración la biogénesis de la arena que conforman las playas y las características de irregularidad de la costa. El sector Noroeste, señalado como CSA1 y hasta el CSA3 que abarcó desde el centro de la provincia de Limón hasta la margen derecha del río Estrella (N 9°47'39.26; W 82°53'37.24"). Y el Sureste, descrito como CSB1 y hasta el CSB7, que abarca desde la margen izquierda de dicho río, hasta la desembocadura del Sixaola (N 9°34'16.25"; W 82°33'59.51"). En cada uno de estos 10 sectores se determinó la variación de la costa me-

dante el uso de imágenes aéreas (1960, 1976, 1998, 2005) y satelitales RapidEye (2011) y WorldView 2 y 3 (2018) y Sentinel 2A (2023). Se utilizó la herramienta Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3) para ArcGis, mediante la cual se generaron 1547 transectos ortogonales con una distancia de separación de 50 m, los cuales tomaron como línea base el límite continental de los 200 m de protección, establecido por la ley de zona marítimo terrestre de Costa Rica. Se obtuvo el desplazamiento espacial y temporal de la línea costera mediante el estadístico End Point Rate (EPR) y el Net Shoreline Movement (NSM), para los últimos 63 años. Para la comprobación del desplazamiento de la línea costera se utilizó una matriz de 700 puntos georreferenciados que se obtuvieron de los monitoreos realizados *in situ* en la última década (2012-2022) en nueve playas de estos sectores. Con esta información se realizó un análisis de clúster (puntos calientes) con el uso del algoritmo Getis-Ord Gi* (QGIS). Se evidenció que, entre 1960 y 2023 el 70.14% de los transectos mantuvieron tasas erosivas, las cuales se concentraron en el Parque Nacional Cahuita (-1,63 m/año), Puerto Viejo-Cocles (-0,37 m/año), Manzanillo (-2,07 m/año) y Gandoca (-1,74 m/año). Los desplazamientos de

* Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Costa Rica (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Escuela de Ciencias Biológicas Heredia, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6823-0326>. Email: maikol.castillo.chinchilla@una.cr. Autor de correspondencia.

** Escuela de Ciencias Biológicas Heredia, Costa Rica. Campus Omar Dengo. Heredia, Costa Rica. Avenida 1, Calle 9. Apartado Postal: 86-3000, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4878-1531>. Email: lilliana.piedra.castro@una.cr

*** Escuela de Ciencias Biológicas Heredia, Costa Rica. Campus Omar Dengo. Heredia, Costa Rica. Avenida 1, Calle 9. Apartado Postal: 86-3000, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6056-3364>. Email: jose.pereira.chaves@una.cr

† ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9619-8587>. Email: lmsierra1@yahoo.com.mx

§ Universidad Técnica Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7074-7298>. Email: jose.carvajal.sanchez@una.cr

la línea de costa por acreción ocurrieron principalmente en zonas cercanas o de influencia de ríos como Banano, Estrella, y Sixaola, en tasas que variaron entre 8.01 m/año y 76.14 m/año, en promedio. Se determinó que el balance general neto del NSM entre 1960-2023 varió de moderado a estable, tanto por erosión como por la acreción, alcanzando los valores más críticos de pérdida de costa hacia el Sureste del CS, en zonas como Puerto Vargas, Manzanillo y Gandoca. Por otro lado, el análisis de puntos calientes evidenció coincidencia con el EPR y el NSM en las zonas que presentaron mayor desplazamiento de la costa debido a la erosión, comportamiento que se también se comprobó con el análisis de los perfiles topográficos de estas playas arenosas, las cuales mantienen un patrón de tipo semi reflexivo y reflexivo, que son evidentes por los cambios en el ancho y el ángulo de inclinación. Se concluye que, las playas arenosas del Caribe sur han experimentado en los últimos 63 años afectación principalmente por procesos erosivos, los cuales coinciden con el comportamiento analizado mediante el análisis clúster y perfiles topográficos. Dicha tendencia del desplazamiento espacial y multitemporal de línea costera por erosión provocará en el mediano plazo impactos que incrementarán la vulnerabilidad y afectación de ecosistemas costeros y comunidades humanas presentes en esta franja litoral.

Palabras clave: cambio climático, erosión, acreción, sedimentos, infralitoral.

Abstrac. Multiple factors interrelate to define the boundary between the sea and the mainland. However, this demarcation has undergone significant variations in the coastline in recent decades due to the various effects of climate change, the deterioration of coral barriers, and the construction of containment infrastructures, among others. The objective of the present research was to analyze the spatial and multitemporal variations of the coastline in sandy beaches of the South Caribbean region of Costa Rica. The study area was delimited between the center of the Limón province (10°00'29" N; 83°15'06 W), and the mouth of the Sixaola River in the Talamanca canton (09°25'40" N; 83°01'20" W). This area was divided into two sections based on beach sand biogenesis and the irregularity features of the coast. The Northwest sector, from CSA1 to CSA3, comprised from the center of the Limón province to the right bank of the Estrella River (9°47'39.26 N; 82°53'37.24 W"). The Southeast, from CSB1 to CSB7,

covered from the left bank of this river to the mouth of the Sixaola River (9°34'16.25" N; 82°33'59.51" W). In each of these ten sectors, we determined the variation of the coast using aerial images (1960, 1976, 1998, 2005) and satellite images (RapidEye for 2011, WordView 2 and 3 for 2018, and Sentinel 2A for 2023). Using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3) tool for ArcGIS, we produced 1547 orthogonal transects separated by 50 m, considering as baseline the 200-meter continental protection limit established by the Law on the Land-Maritime Zone of Costa Rica. The spatial and temporal displacement of the coastline was estimated with the End Point Rate (EPR) statistic and the Net Shoreline Movement (NSM) for the past 63 years. The displacement of the coastline was verified using a matrix of 700 georeferenced points obtained from *in-situ* monitoring over the past decade (2012-2022) in nine beaches of these sectors. This information was used to perform a cluster analysis (hot spots) using the Getis-Ord G_i^* algorithm (QGIS). This study evidenced that, between 1960 and 2023, 70.14 % of the transects maintained erosive rates, which were concentrated in the Cahuita National Park (-1.63 m/year), Puerto Viejo-Cocles (-0.37 m/year), Manzanillo (-2.07 m/year), and Gandoca (-1.74 m/year). Coastline displacements by accretion occurred mainly in areas close to or influenced by rivers such as Banano, Estrella, and Sixaola, at average rates ranging from 8.01 m/year to 76.14 m/year. The NSM net balance between 1960 and 2023 varied from moderate to stable, both due to erosion and accretion, reaching the most critical coastal loss values to the southeast of the SC, in areas including Puerto Vargas, Manzanillo, and Gandoca. On the other hand, the analysis of hot spots revealed the consistency between EPR and NSM in the areas showing the greatest coastal displacement due to erosion. This behavior was also confirmed by analyzing the topographic profiles of these sandy beaches; they maintain semi-reflective and reflective patterns, evident by changes in width and slope angle. It is concluded that the sandy beaches of the South Caribbean have been impacted mainly by erosive processes over the past 63 years, which coincide with the behavior from the cluster analysis and topographic profiles. This trend of spatial and multitemporal displacement of the coastline due to erosion will cause medium-term impacts that will increase the vulnerability and affectation of coastal ecosystems and human communities in this stretch of coastline.

Keywords: climate change, erosion, accretion, sediments, infralitoral.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, diversas investigaciones han contribuido con la comprensión de la dinámica que afecta a los litorales en relación con los impactos que ocurren en las zonas costeras del mundo (Maulud *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2014). Uno de los temas que mayor preocupación causa en dichas

áreas es la variación de la línea de costa, que se ha relacionado con el incremento en el nivel del mar, y se considera un factor determinante en el deterioro de los ecosistemas costeros (Cazenave y Cozannet, 2014; Orejarena-Rondón *et al.*, 2019).

Según Dinesen (2019) y Labuz (2015), la variación de la línea de costa guarda estrecha relación con la erosión que afecta los ecosistemas de playas

arenosas del planeta, lo que influye en su equilibrio ecológico. Sus efectos no solo presionan la conservación de diversos ecosistemas litorales, sino que afecta la morfología de la costa y contribuye con el deterioro de la dinámica costera en general (Dugan *et al.*, 2011).

Precisamente, la erosión de las playas arenosas se ha incrementado por la acción del cambio climático, siendo uno de los agentes que mayores efectos ocasiona (Tsoukala *et al.*, 2015; Voudoukas *et al.*, 2020). Factores como el deterioro de las barreras coralinas, afectación de los organismos productores de arena, el aumento en la intensidad y periodicidad de los eventos meteorológicos extremos, pérdida progresiva e intensa de las funciones de amortiguamiento y protección costera que cumplen los manglares (Pennings *et al.*, 2021), siendo estas parte de las causas que la comunidad científica ha relacionado con la variación de la línea de costa a nivel mundial (Dugan *et al.*, 2008; Cazenave y Cozannet, 2014).

Otros agentes precursores del deterioro de la costa son el cambio de uso del suelo, la sedimentación, sobre extracción de materiales de ríos, que inciden en la dinámica sedimentaria de la que depende la conformación de playas arenosas (Tsoukala *et al.*, 2015). A estos agentes se suma la construcción de obras de alto impacto, como puertos de embarque, complejos turísticos y obras de contención (Dugan *et al.*, 2008; 2011; Silva *et al.*, 2014; Vargas *et al.*, 2016), muchos de estas costosas obras incluso se construyeron con el fin de funcionar como barreras de protección de la costa, aun cuando su efecto parece ser contrario (Petrișor *et al.*, 2020; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005).

En Costa Rica, al igual que otros países, se exhibe la pérdida de costa en playas arenosas del litoral Pacífico y Caribe, siendo evidente el cambio en el paisaje y los daños ocasionados a infraestructuras (Lizano, 2007). Sin embargo, la investigación que se realiza en este tema es reciente y con pocos estudios que evalúen las tasas de erosión o acreción y sus relaciones con el deterioro del litoral.

En las playas del Caribe sur (CS) de Costa Rica se han observado cambios progresivos en el desplazamiento de la línea de costa en la última década que parecen agravarse con el ingreso del

mar hacia el continente. En este litoral se han registrado secciones críticas donde los procesos erosivos se extienden entre el 55%-80% (Lizano, 2013; Piedra-Castro *et al.*, 2013). Esta situación se agrava con las características que mantiene la plataforma continental, la cual es clasificada por Bergoeing (2017) como angosta a lo largo del caribe de Costa Rica, hasta la Laguna Chiriquí en Panamá.

La variación de la línea de costa del CS es causada por la influencia en la dinámica sedimentaria y el consecuente ingreso del mar hacia el continente, lo que constituye una amenaza creciente. Sin embargo, la investigación en este tema en el litoral caribeño de Costa Rica es incipiente. De ahí que sean escasas las investigaciones en el CS relacionadas con este tema, por lo que es fundamental su análisis considerando la influencia que tiene sobre la dinámica sedimentaria el ingreso del mar hacia el continente. El objetivo de esta investigación fue analizar la variación espacial y multitemporal de la línea de costa en playas arenosas del Caribe sur de Costa Rica.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El Caribe sur de Costa Rica (CS) se extiende entre el centro de la provincia de Limón (N 10° 00'29"; W 83° 15'06), y la desembocadura del río Sixoala, en el cantón de Talamanca (N 09°25'40"; W 83°01'20") (Figura 1).

En la sección sur del litoral Caribe, la velocidad promedio del viento es de 3 ms⁻¹. Los valores máximos ocurren de noviembre a marzo, y entre julio y agosto, mientras que los mínimos ocurren entre abril y mayo, con otro período de disminución que se extiende de setiembre y octubre (Pérez-Briceño *et al.*, 2017; Quesada, 2016; Ricaurte-Villota *et al.*, 2017), de ahí que se les clasifique como de tipo bimodal.

Las corrientes marinas exhiben circulación ciclónica (movimiento antihorario) que se extiende hasta Colombia. El agua superficial sobre el borde de la plataforma continental presenta un movimiento hacia el sur-sureste y al frente de la provin-

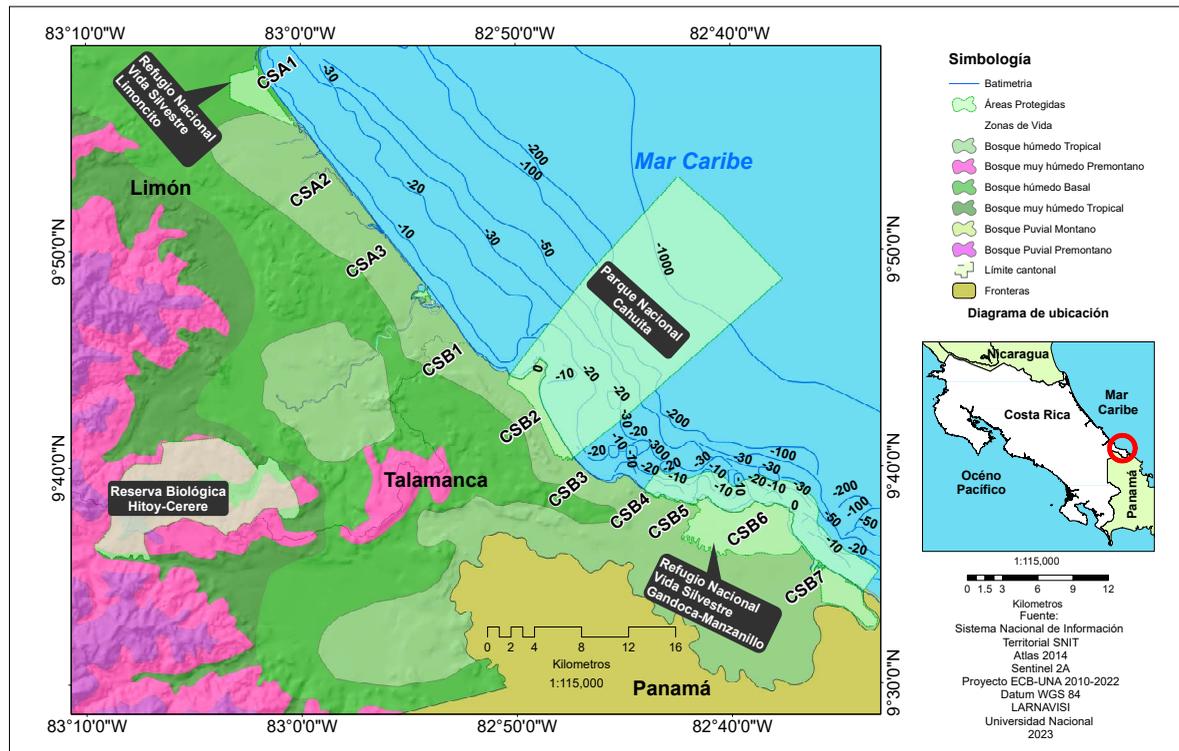


Figura 1. Sectores del litoral Caribe Sur, Costa Rica con detalle de las zonas de vida.

cia de Limón. El oleaje se dirige hacia el noreste durante todo el año con incrementos en la altura y el periodo entre olas, vinculados con la acción de los vientos alisios (Lizano, 2018; Ricaurte-Villota *et al.*, 2017).

Análisis espacial

Se procesó una serie temporal de imágenes desde 1960 hasta 2023, que incluyeron fotografías aéreas obtenidas del Instituto Geográfico Nacional. Además, de imágenes satelitales de los satélites RapidEye (2011) y WordView 2 y 3 (2018) y Sentinel 2A (2023). El procesamiento de la información espacial se realizó con los programas ArcGIS 10.3, ENVI 5.1 y Agisoft PhotoScan 1.4.2 y Google Earth Engine. Se seleccionaron imágenes con un máximo de nubosidad del 20%. Para los periodos 1960 y 1970, en escala de grises, se seleccionaron aquellas imágenes en las que no existía distorsión por ingreso de brisa marina.

Se georreferenciaron 80 imágenes, distribuidas entre los años 1960, 1976, 1998, 2005, 2011, 2018, y 2023 para las que se obtuvieron 150 puntos de control verificados en campo. Para la digitalización de la línea de la costa de cada año, se utilizó la vegetación emergente presente en la duna de la playa arenosa, siguiendo los criterios de Boak y Turner (2005). Esta ubicación se considera indicador de la jurisdicción del estado sobre los usos recreativos o con fines turísticos (Komar *et al.*, 2001).

La zona de trabajo comprendió 85 km, subdividida en dos secciones, según la biogénesis de la arena y las características de irregularidad de la costa. El sector noroeste (desde el CSA1 y hasta el CSA3) abarcó desde el centro de la provincia de Limón hasta la margen derecha del río Estrella 27.42 km. Y el sureste (desde el CSB1 hasta el CSB7) abarca desde la margen izquierda de dicho río hasta la desembocadura del río Sixaola 57.58 km en la frontera con Panamá.

Tasas de erosión de las playas arenosas

Se utilizó la extensión Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3) para ArGis 10.3 con el fin de obtener las tasas de erosión de las playas arenosas del Caribe sur. Se unificaron las líneas de cada periodo en un solo archivo de Geodatabase siguiendo el flujo de trabajo propuesto por Himmelstoss *et al.*, (2018). Se utilizó como línea base la delimitación de la zona de protección de 200 m, establecida en Ley sobre la Zona Marítimo Terrestre N° 6043, de Costa Rica de 1977, que demarca un área de protección de dicha amplitud, medida desde la pleamar ordinaria.

Se generaron 1547 transectos ortogonales en intervalos de 50 m a lo largo de esta delimitación de la zona de protección. Para evaluar las variaciones en la posición de la línea de costa se consideraron las estadísticas End Point Rate (EPR), que describen los cambios en la línea costera, y cuyo valor representa la tasa de cambio. Además, se determinó el Net Shoreline Movement (NSM) que, junto con el indicador anterior, compara la variación total que experimenta la línea costera en el tiempo. Para ambos los signos negativos representan pérdida por erosión, y los signos positivos ganancia o estabilidad por acreción (Sarwar y Woodroffe, 2013; Himmelstoss *et al.*, 2018).

Los procesos erosivos y de acreción de las playas arenosas fueron clasificados según la evolución costera con base en los criterios de Cifuentes-Ossa *et al.* (2017), Del Río *et al.* (2013) y Natesan *et al.* (2015).

La comprobación del proceso de desplazamiento de línea costera EPR y el NSM se validó mediante el análisis de Clúster con una matriz de 700 puntos georreferenciados por año que se obtuvieron de los monitoreos *in situ*, mismos que se registran anualmente desde el año 2012 en nueve playas del CS (Piedra-Castro *et al.*, 2021).

Una vez seleccionados los puntos con erosión, se desarrolló una base de datos espacial que incluyó las características de la morfología y porcentajes de erosión de playa. Todos estos puntos se analizaron y se procesaron con el algoritmo Getis-Ord G_i^* (QGIS), misma que agrupa espacialmente las entidades con valores altos o bajos para la variable de interés y permite obtener el un indicador del desplazamiento de la línea de costa de las playas arenosas. Para la extracción del clúster se utilizaron como referencia media cinco años (2017-2021) y la década completa (2012-2021).

Adicionalmente, se realizó el perfil topográfico de las playas arenosas con el fin de establecer la relación cualitativa entre ellas, la tasa de erosión y la pendiente de la costa. Para esto se recopiló la información de campo obtenida con el método de EMERY, en el cual se mide la distancia, ángulo y elevación de un segmento hasta donde existe cambio de pendiente hasta el observador, quien verifica y anota la elevación con respecto al horizonte (Figura 2).

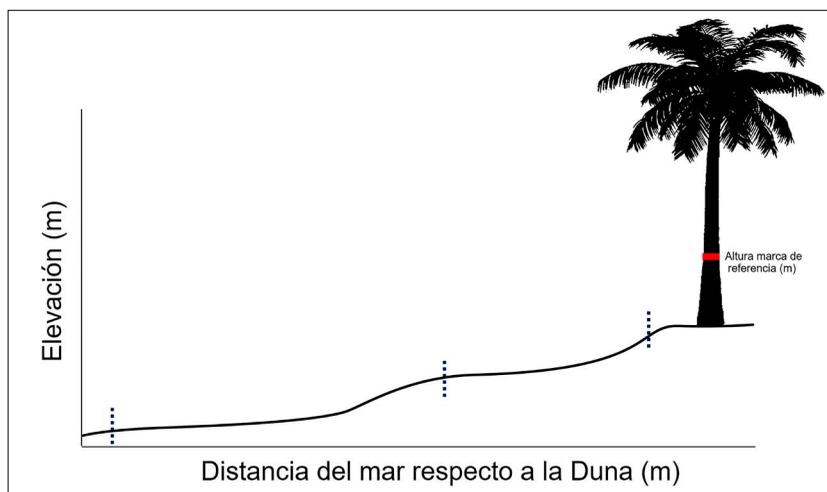


Figura 2. Perfil topográfico de playas arenosas del Caribe sur de Costa Rica.

RESULTADOS

Entre 1960-2023, el 70,14% de los transectos ortogonales evidenciaron tendencia general hacia la erosión, principalmente hacia el sur del litoral. Destaca el EPR obtenido para los sectores del Parque Nacional Cahuita, Puerto Viejo, Manzanillo y Gandoca, por la severidad que presentan. Otros sectores, como Estrella y Vizcaya, evidenciaron tendencia estable, con prevalencia hacia la acreción, misma que se concentró en las desembocaduras de los ríos Bananito, Estrella y Home Creek.

Las playas arenosas del CS son dinámicas y evidenciaron variación de la espacial y temporal de la línea costera para toda el área analizada. Se determinó que el balance general neto para los 63 años experimentó variación del NSM de moderados a estables, tanto por erosión como por la acreción. Este desplazamiento de la línea de costa fue crítico hacia el sureste, afectando tanto las costas con barreras naturales como aquellas en las que no existe tal protección (Figura 3).

El NSM, para 1960-2023, correspondió a erosión con valores promedio que alcanzaron los -6.85 m/año. En el caso del desplazamiento por acreción, este se ubicó en 7.01 m/año, siendo el sector CSB7 en el área cercana a la desembocadura del río Sixaola el que mayor aporte tuvo para este factor (Tabla1).

Entre 1960-1976, el NSM por erosión en general para toda el área de estudio fue de -5.36 m/año, siendo la playa de Gandoca, una de las que evidenció mayor desplazamiento. Para este mismo período, el NSM por acreción fue de 2.96 m/año. Para 1998-2005 el desplazamiento de la línea costera por procesos de erosión alcanzó los -5.68 m/año, siendo Gandoca y Estrella los sectores que presentaron afectaciones importantes. En el caso de la acreción, se observaron tasas de 5.75 m/año, siendo la zona de Cocles y Estrella las que mayor contribución tuvieron por este proceso (Tabla 1).

Los signos negativos de la Tabla 1 se refieren al desplazamiento de la costa por erosión, lo cual se traduce en la reducción de la playa. Los signos

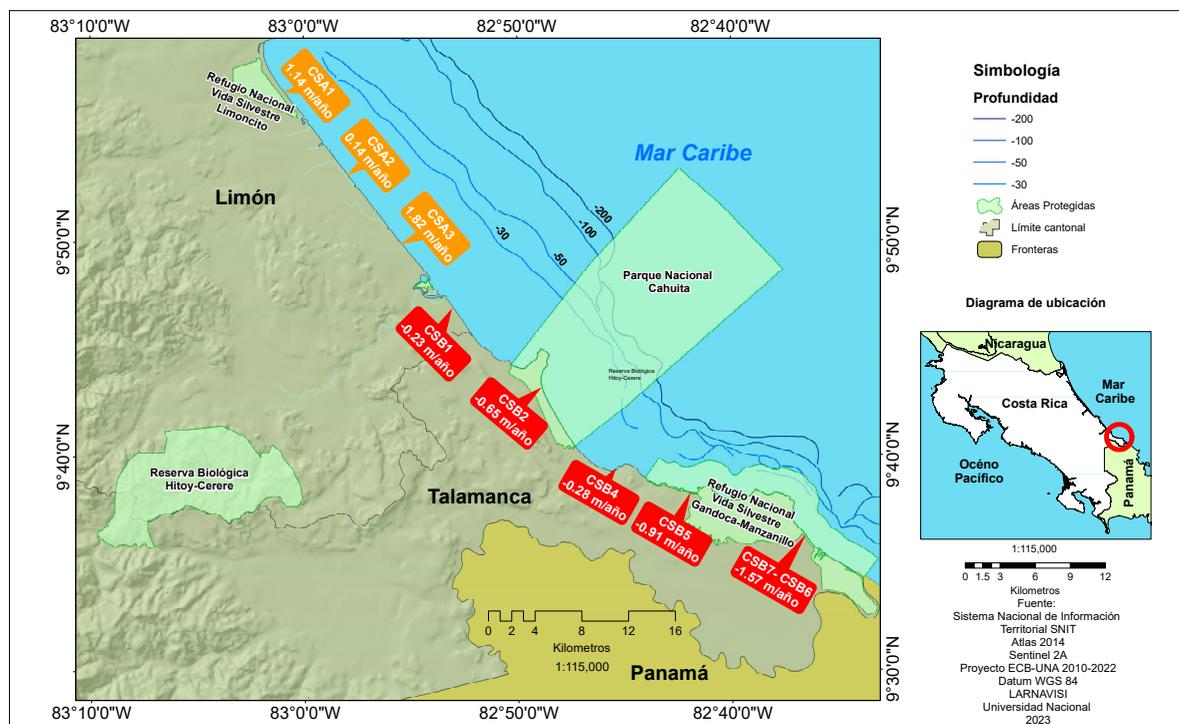


Figura 3. Valores de tasas erosivas y de acreción promedio para los sectores evaluados en playas arenosas del Caribe sur de Costa Rica.

Tabla 1. Desplazamiento neto de la línea de costa por procesos erosivos y de acreción en el Caribe sur, Limón Costa Rica en cuatro periodos.

Sector/Períodos	Rango NSM m/año			
	1960-1976	1998-2005	2011-2018	2018-2023
Gandoca-Manzanillo	-86.2 a 55.4	-65.6 a 49.8	-23.3 a 55.2	-58.28 a 57.03
Cocles-Puerto Viejo	-29.6 a 47.1	-25.8 a 36.8	-12.2 a 27.7	-23.99 a 22.03
PN Cahuita-Estrella	-87.2 a 42.3	-41.2 a 37.9	-47.3 a 9.7	-38.27 a 32.88
Estrella-Limón	-115.5 a 8.0	-61.7 a 77.1	-41.6 a 51.4	-50.92 a 42.98

positivos denotan movimiento neto por acreción. Los valores de la tabla se establecen en esos rangos obtenidos de la totalidad de los transectos ortogonales de cada sector de playa evaluado.

Los principales hallazgos en cada sector se describen a continuación:

Gandoca-Manzanillo (REGAMA). En los sectores CSB6 y CSB7, el cambio en la posición de la línea de costa entre 1960-2023 correspondió a procesos erosivos en 90% de los casos. En el período 1976-1998 y en el 2005-2011 los sectores presentaron incrementos en las áreas de erosión entre -0.61 y -2.07 m/año, situándose como dos de los sectores con mayor pérdida de costa. En el período total, el desplazamiento de la línea por erosión se clasifica como estable, con variaciones entre -0.44 y -1.74 m/año. El NSM mostró un mínimo de acreción de 39.26 m. Solo el 5% de los 175 transectos ortogonales experimentaron tasas de acreción entre 0.01 y 0.23 m/año (Figura 4).

En Manzanillo, en el sector CSB5, la tendencia al igual que la anterior fue hacia la erosión de la playa. El 67% de los transectos evidenció *tasas* de EPR entre -2.07 y -0.01 m/año. Los valores más críticos de erosión se observaron en 2005-2011. En el resto de los periodos el comportamiento presentó poca variación con respecto a la acreción. Para el período total entre 1960-2023 la tasa de acreción alcanzó un máximo de 2.4 m/año, mientras que el NSM fue de 42.64 m en sectores cercanos a las desembocaduras de los ríos (Figura 4).

Mediante el análisis de puntos calientes en el REGAMA, se evidencia que el sector noroeste del CSB7 experimenta un proceso erosivo constante y repetitivo que se ha documentado efectivamente desde el 2012. En los otros dos transectos CSB6 y

CSB5, se documentó este comportamiento, aunque en menor magnitud que en el anterior (Figura 4 A y 4 B).

Cocles-Puerto Viejo. De los 151 transectos ortogonales de CSB4 y CSB3, el 90% de ellos evidenciaron procesos erosivos en los períodos 1960-1976 y 2005-2011, con valores por encima de -0.06 m/año. En el período total 1960-2023, entre el 67%-83% de estos transectos denotaron erosión según las tasas del EPR, con variación entre el -0.2 m/año y -0.4 m/año, lo que clasifica este desplazamiento como estable. En contraste con lo anterior, la acreción se clasificó como moderada con valores entre 0.01 y 3.51 m/año entre 2011-2023, en sitios puntuales de ambos sectores. El NSM fue de 39.16 m para los lugares donde ocurre este tipo de desplazamiento de la línea de costa (Figura 5).

En ambos sectores CSB4 y CSB3, el análisis HotSpot mostró que las tasas erosivas que se mantienen a lo largo del tiempo incluso alternan en las áreas cercanas a Puerto Viejo, y en menor magnitud hacia el sureste, en dirección a Cocles (Figura 5 A y 5 B).

Parque Nacional Cahuita-Estrella. En el sector CSB2, entre el 80% y el 85% de los transectos ortogonales correspondieron a tasas negativas de EPR, para los períodos 2005-2011 y entre 2011-2023 con valores promedio de -0.65 m/año, catalogando la erosión como estable. Las áreas críticas por pérdida de playa se concentraron en punta Cahuita y en cerca del estero Perezoso. En el sector CSB1, los mayores desplazamientos por EPR negativo se presentaron entre 1960-1976 y 1998-2005, con valores del 74% al 82% del total de transectos respectivamente. En cuanto al NSM, este alcanzó los -0.93 m/año para el período total 1960-2023,

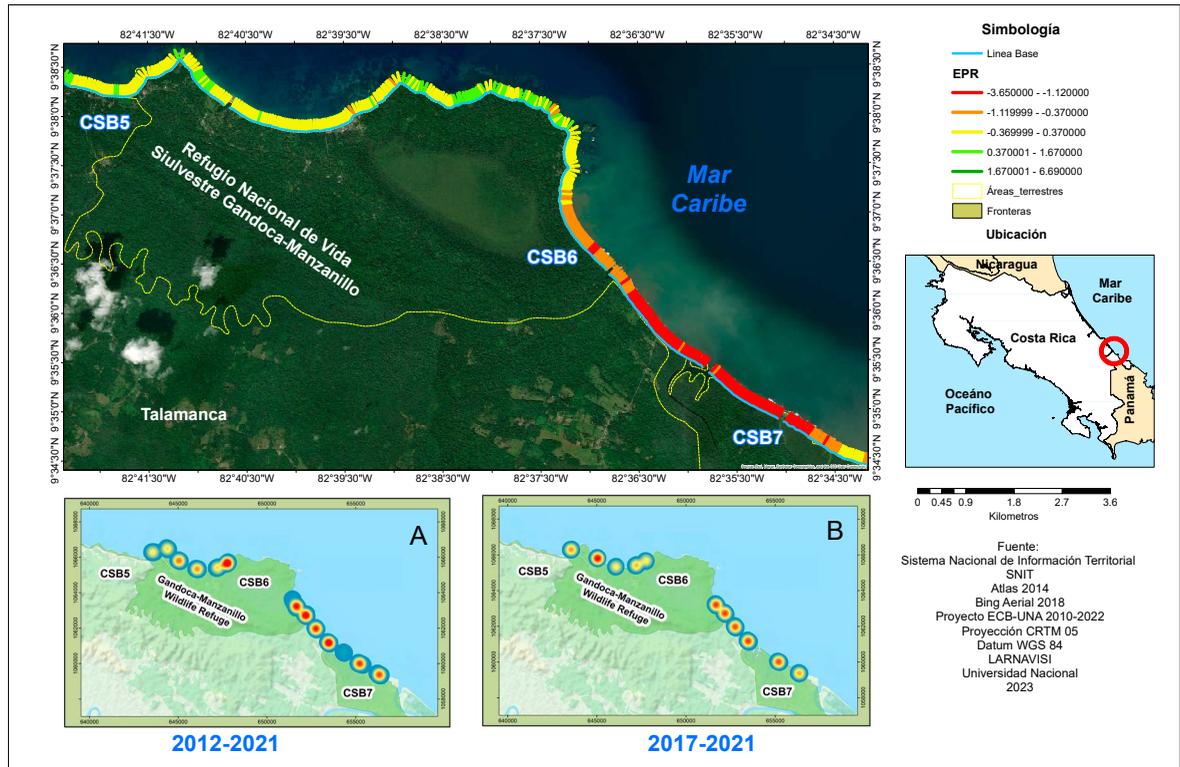


Figura 4. Desplazamiento de la línea de costa entre 1960-2023 por procesos erosivos y de acreción en el Refugio Mixto de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón Costa Rica. A) HotSpot 2012-2021; B) HotSpot 2017-2021.

observando leve tendencia de los datos hacia el desplazamiento de la línea costera por erosión en ambos sectores (Figura 6).

Los puntos críticos de erosión de costa en el Parque Nacional Cahuita se mantienen espacialmente en las mismas áreas, siendo el sector de Puerto Vargas donde se observa mayor afectación por este tipo de eventos (Figura 6 A y 6 B)

Estrella-Limón. En el tramo litoral CSA3 de los 131 transectos ortogonales, entre el 68% y 83% obtuvieron valores EPR erosivos para los períodos 1998-2005 y 2011-2023, respectivamente, con tasas que oscilaron entre -0.7 m/año a -0.8 m/año. Las áreas que presentaron acreción se ubicaron en las desembocaduras de los ríos Estrella y Bananito principalmente. En el caso de los sectores CSA2 y CSA1, los EPR de tipo erosivo se presentaron en el 69% y el 74% de los transectos en los períodos de análisis que se extienden desde el 2005 y hasta el 2023, con valores que oscilaron entre estables a

moderadas de -3.2 m/año en las inmediaciones del río Bananito (Figura 7).

Se destaca el posible efecto que tiene la Zona de Convergencia Intertropical en la variación de los perfiles de costa, ya que se ha demostrado que esta puede incidir de manera directa en las interacciones océano-atmósfera y tierra-atmósfera a escala local (Waliser y Jiang 2015), por lo que se convierte en un factor adicional que puede potencialmente afectar las playas arenosas, al favorecer la formación de eventos meteorológicos intensos y más frecuentes, los cuales golpean con mayor fuerza estas áreas de la costa provocando variaciones en el perfil topográfico.

Al igual que ocurre con las playas de Gandoca y Estrella, las que se ubican en estos tramos CSA3, CSA2 y CSA1 mantienen fondos no consolidados y blandos, sin formaciones geológicas que favorezcan la reducción de la energía de ingreso del oleaje, de ahí que su afectación sigue patrones puntuales en

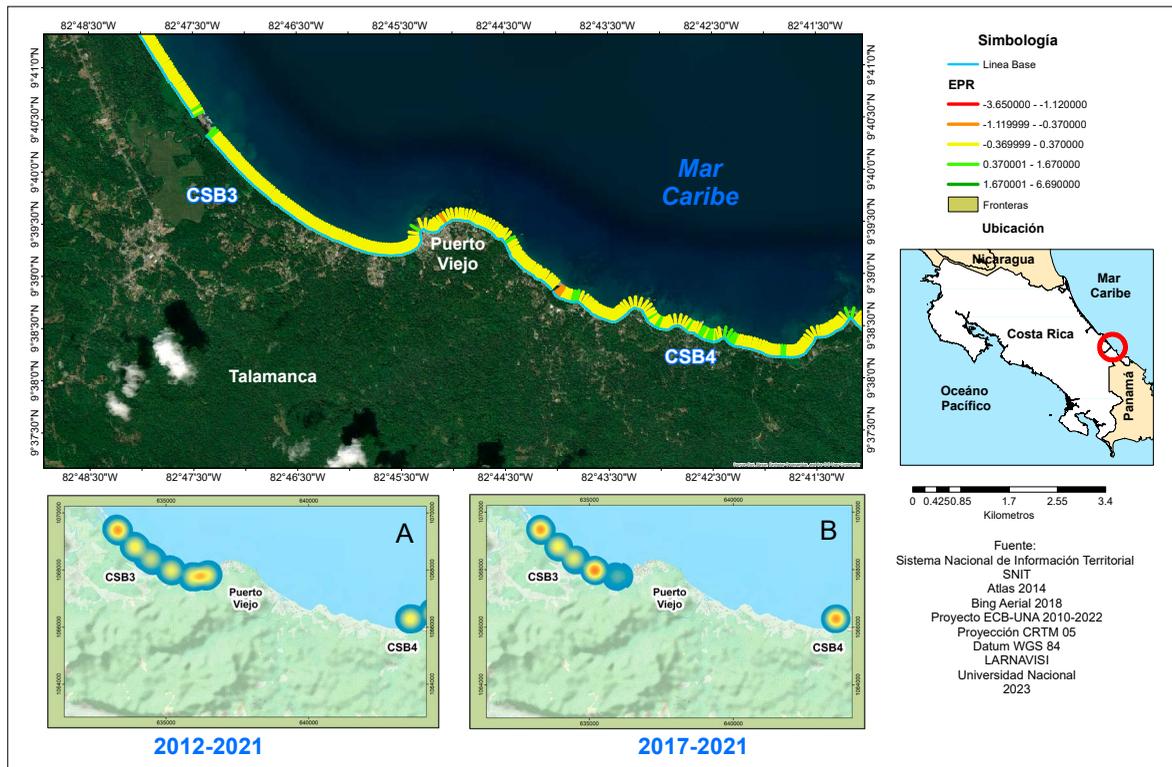


Figura 5. Desplazamiento de la línea de costa entre 1960-2023 por procesos erosivos y de acreción en Puerto Viejo, Limón Costa Rica. A) HotSpot 2012-2021; B) HotSpot 2017-2021.

los que ocurre tasas de EPR elevadas, siendo focalizada la erosión (Figura 7).

En concordancia con lo anterior, el análisis de clúster evidenció que los sectores CSA1, CSA2 y CSA3 mantienen áreas críticas por erosión, mismas que fueron identificadas por el EPR. Al igual que se desprende del resultado del DSAS, el HotSpot detectó las áreas de las desembocaduras de los ríos Estrella, Bananito, Estero Negro y Vizcaya como puntos fríos o de baja significancia. Esta condición prevalece debido al aporte y deposición de los sedimentos que ingresan en el sistema sedimentario de playas arenosas de origen terrígeno que se forman a la salida de estos ríos (Figura 7 A y 7 B).

Con respecto a los perfiles topográficos de las playas arenosas del CS, se destaca la variación que mantienen en la pendiente, la cual ha ido incrementando su ángulo, siendo Gandoca y Puerto Vargas los que presentaron la mayor reducción en el ancho e inclinación. Estas playas se mantienen

una tendencia de tipo reflexiva (McLachlan y Defeo, 2017).

En Vizcaya, al igual que en el resto del tramo CSA1, CSA2 y CSA3, se observa el mismo comportamiento de playa tipo semi-reflexiva, con inclinación reducida y con anchos que superan los 40 m (Figura 8).

DISCUSIÓN

A nivel mundial, la variación de la línea costera se ha vinculado a los efectos que son provocados y multiplicados por la acción del cambio climático, como resultado del incremento en el nivel medio del mar (Tsoukala et al., 2015; Vousdoukas et al., 2020). Una de las consecuencias fuertes y que mayor cambio provoca en las playas arenosas es la erosión de la costa (Dinesen, 2018; Labuz, 2015). Precisamente, el retroceso de la costa prevé valores

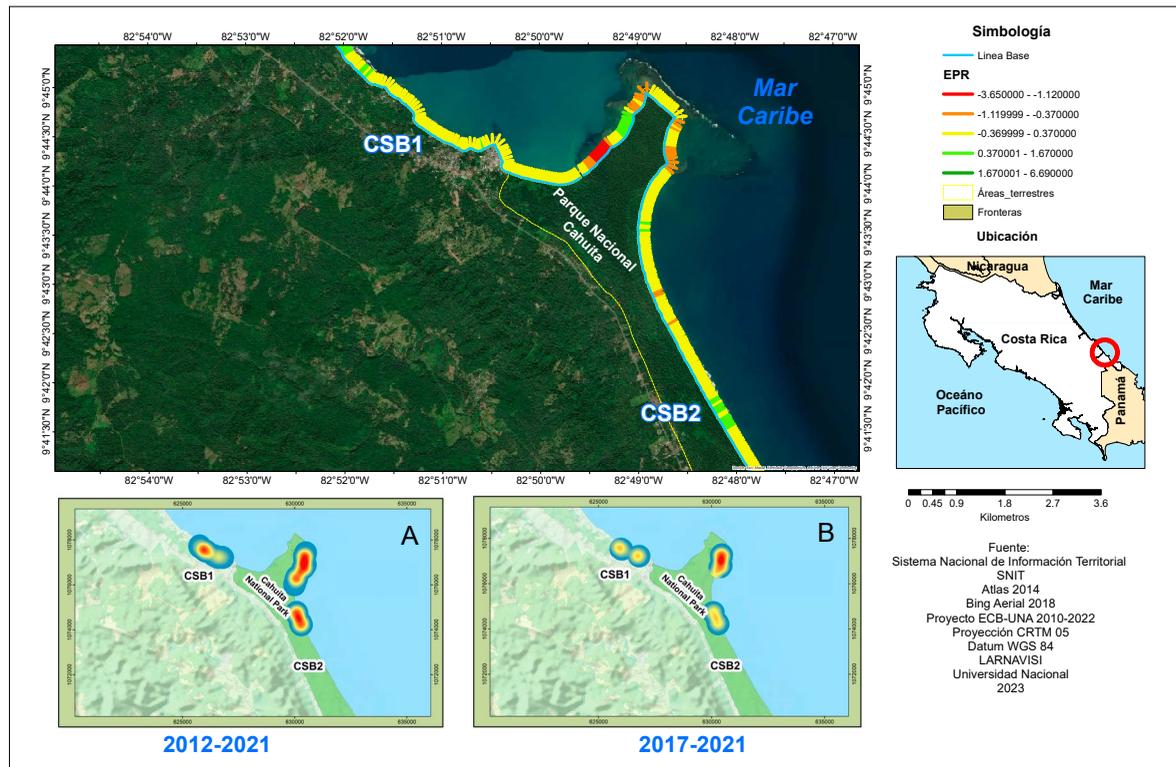


Figura 6. Desplazamiento de la línea de costa entre 1960-2023 por procesos erosivos y de acreción en el Parque Nacional Cahuita, Limón Costa Rica. A) HotSpot 2012-2021; B) HotSpot 2017-2021.

mundiales de pérdida alrededor del 80% de las zonas costeras del mundo en escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (Dugan et al., 2008; Labuz, 2015; López et al., 2017; Vousdoukas et al., 2020). Sytnik, Del Río, Greggio y Bonetti (2018) destacan que la información cuantitativa sobre la posición de la costa en distintos períodos de tiempo es vital para sustentar acciones puntuales de la gestión costera, incluyendo el ingreso del mar hacia el continente y la colocación de defensas en la zona costera.

Durante el periodo comprendido entre 1960-2023, el CS ha experimentado desplazamiento de la línea costera por erosión, que se ha intensificado en algunas de las playas arenosas que conforman este espacio. Respecto al escenario a nivel mundial, existen factores en el CS que pueden vincularse a estos impactos, por ejemplo, el intenso arrastre de sedimentos (López et al., 2017; Ordaz et al., 2016; Ricaurte-Villota et al., 2017), deterioro generalizado de los productores de arena, reducción del efecto

barrera de arrecifes coralinos, poca o nula presencia de reservas de arena, dunas incipientes, incremento de fenómenos climáticos extremos como el de ENOS (Mentaschi et al., 2018), afectación del sistema sedimentario por efecto de infraestructura humana (Cazenave y Cozannet, 2014; Dungan et al., 2011; Silva et al., 2014).

Entre 1960 y 2023, más del 70% de la línea de costa del CS evidenció cambios severos de posición principalmente relacionado con la erosión. Se obtuvieron valores del EPR por cada playa del CS, y se logró determinar cómo el NSM que ocurre es debido a erosión por encima de los eventos de deposición. Estas variaciones espacio-temporales de línea costera destacan los datos obtenidos para el Parque Nacional Cahuita, Puerto Viejo, Manzanillo y Gandoca. Los eventos de variación de la línea coinciden con otros documentados en países como Cuba, Colombia, Puerto Rico, Haití y República Dominicana, donde el desplazamiento

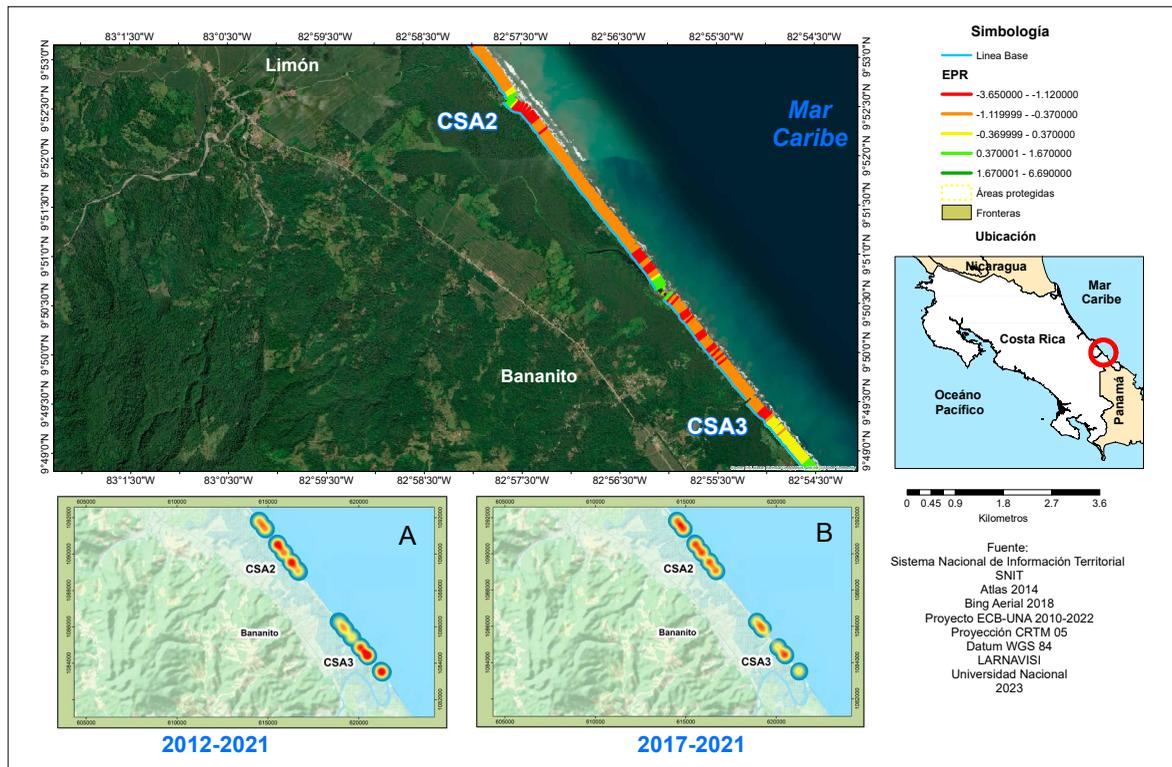


Figura 7. Desplazamiento de la línea de costa entre 1960-2023 por procesos erosivos y de acreción en Limón, Costa Rica. A) HotSpot 2012-2021; B) HotSpot 2017-2021.

de la línea costera afecta ecosistemas e infraestructuras humanas (Pacheco *et al.*, 2015; Paneque *et al.*, 2010; Rangel-Buitrago *et al.*, 2015; Rangel y Posada, 2013; Silva *et al.*, 2014).

Adicionalmente, las playas arenosas del CS han experimentado cambios constantes de la pendiente y del ancho. Siendo evidente en Puerto Vargas, Manzanillo, Puerto Viejo y Gandoca, la variación y la temporalidad corta que ocurre son indicadores efectivos del avance de la erosión de la costa y de la vulnerabilidad a la que se enfrentan. Al respecto, Aizam (2021), concluye que ambos factores juegan un rol importante en la mitigación del efecto que tiene la entrada de oleajes de alta energía y la consecuente pérdida de grandes volúmenes de sedimentos.

En ese mismo lapso, la tasa EPR de acreción varió principalmente en áreas cercanas a las desembocaduras de los ríos Estrella, Bananito, Estero Negro y Vizcaya. Entre 1960 y 1998, hubo una

reducción del desplazamiento de línea de costa de 30% aproximadamente, que afectó en sectores como Manzanillo (CSB5), Puerto Vargas (CSB2), Estrella (CSA3) y Banano (CSA2). Dicha reducción se relaciona con el posible efecto que tuvo el terremoto del año 1991, que modificó la topografía costera y expuso la plataforma marina entre 0.3 m y 1.85 m (Quesada, 2016). Este afloramiento de sustrato rocoso conformó una barrera natural que mitigó el impacto del nivel de mar en sectores puntuales al sur de la provincia (Amador *et al.*, 1994; Denyer *et al.*, 1994). Debido a lo anterior, se logró evidenciar como se redujo la erosión en playas, principalmente en aquellas donde emergió la plataforma rocosa, con la consecuente progradación en áreas cercanas a las desembocaduras de ríos.

Otro factor importante de estas playas tiene que ver con el origen de la partícula y su tamaño, pues determinan la vulnerabilidad que tienen éstas a ser erosionadas, por lo cual son fundamentales en la

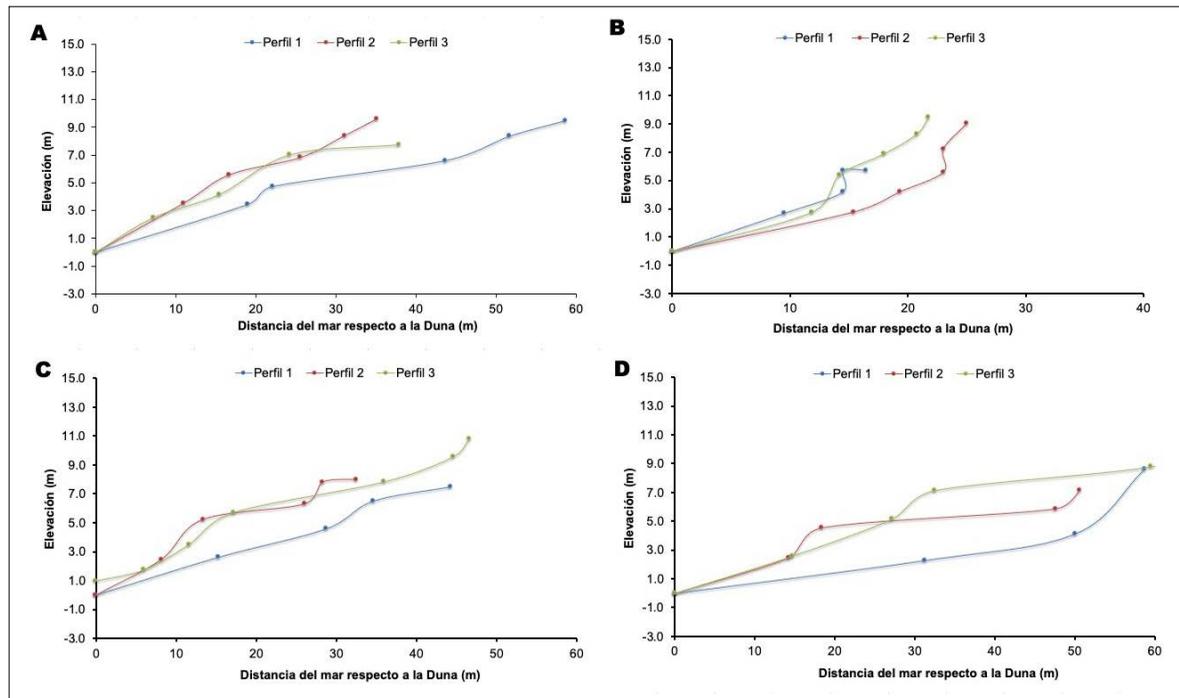


Figura 8. Perfiles topográficos de playas arenosas del Caribe Sur de Costa Rica 2016-2019; A) Gandoca; B) Puerto Vargas; C) Estrella; D) Vizcaya.

comprensión del transporte de sedimentos (Cortés *et al.*, 1998; Salazar *et al.*, 2004). Puerto Vargas, Cocles, Punta Uva y Manzanillo tienen sedimentos provenientes de la desintegración de organismos marinos con estructuras duras de carbonato de calcio y de conformación fina en su mayoría que, al ser arrastrados por la acción del oleaje se pueden acumular en las cuencas submarinas de la barrera arrecifal a profundidades mayores a los 30 m, en donde ocurren procesos de litificación que conlleva a pérdida de arena (López *et al.*, 2017; Medvedev y Juanes, 1981).

En las playas del CS, el tamaño en general de las partículas muestra una tendencia a la pérdida de sedimentos finos de la duna (Piedra *et al.*, 2021), lo cual limita la capacidad de asimilación que tiene el sistema sedimentario ante el arrastre ocasionado por el oleaje de corto período y alta energía. Según Nguyen *et al.* (2016), al variar el tamaño de la partícula a tamaños mayores de 1 mm, se incrementa la vulnerabilidad a la erosión, esto como consecuencia de la excavación que provoca la movilización

de partículas gruesas ubicadas en la postplaya y punto de inflexión. En este proceso juega un rol de importancia la dirección del oleaje, el cual se ha determinado que sigue un rumbo noreste, y con una relación proporcional entre la altura y el período que se incrementa considerablemente en los últimos y primeros meses del año debido a la acción de los vientos alisios (Lizano, 2007).

Gandoca-Manzanillo (REGAMA). En playas como Gandoca (CSB7) y Manzanillo (CSB5), denotan un patrón de tipo semi-reflexivo, en donde el ingreso de olas rompe directo en la barrera de vegetación ubicada en la duna, lo que contribuye con la extracción de importante cantidad de sedimento, el cual posiblemente se deposita en zonas profundas del lecho marino (López *et al.*, 2017; Ordaz *et al.*, 2016; Ricaurte-Villota *et al.*, 2017). Este aspecto es respaldado por Bergoing (2017), quien destaca que las isobatas que ingresan en dirección noroeste-sureste y hasta la laguna de Chiriquí, en Panamá, se acercan progresivamente al continente, lo que provoca que la plataforma

continental sea angosta en dichos sectores, lo que avorece que el sedimento recorra menor distancia para ser depositado en áreas profundas.

Esta particularidad de la batimetría propicia variaciones de la profundidad en distancias cortas (Brenes-Rodríguez y Benavides-Morera, 2015), favoreciendo la acción de oleaje sobre el arrastre de sedimentos que ocurre en distintas secciones de la playa (López *et al.*, 2017; Ricaurte-Villota *et al.*, 2017). Esta condición favorece el desplazamiento de la línea de costa y pérdida de territorio continental por inundación de los ecosistemas continentales, y el posible cambio de la estructura y composición de la barrera de vegetación de la duna y posduna, de ahí que en lugares como Gandoca (CSB7, CSB6), Manzanillo (CSB5), Cocles (CBS4) y Puerto Vargas (CBS2), es recurrente la caída de árboles y palmeras de altura superior a los 10 m. Esta sería una consecuencia directa del bajo aporte de sedimentos fluviales, la influencia de la variabilidad climática que afecta el mar Caribe, los procesos tectónicos y el aumento progresivo del nivel del mar que inciden en la movilidad de la línea de costa (Bergoeing, 2017; Quesada-Román y Pérez-Briceño, 2019).

Los sectores de las playas arenosas de Gandoca (CSB7, CSB6) y Manzanillo (CSB5), son parte de los bloques dinámicos y con mayores desplazamientos documentados mediante recolección de datos *in situ* en la última década, siendo la sección del noreste la que denota valores altos para el HotSpot erosivo. Destaca en estas secciones la existencia de dos orígenes distintos del sedimento y la presencia de barreras coralinas, que pueden restringir el arrastre de material particulado fino, aunque su efecto de protección ha sido paulatinamente superado dada la intensidad de la erosión.

Tanto Gandoca como Manzanillo exhiben un patrón de rompimiento de olas en las áreas cercanas a la zona infralitoral (ZIL), donde se ubican los bancos de arena, los cuales tienen un rol fundamental en la mitigación de los efectos del oleaje (Andreeva *et al.*, 2021), sin embargo, estos son afectados por la intensidad con que son impactados e influenciados por las corrientes de resaca, las cuales posiblemente son las responsables de desplazar el sedimento de estas barreras hacia sitios de profundidad en

la plataforma continental (Castelle y Masselink, 2022), de ahí que el desplazamiento de la costa de este tramo litoral entre 1960-2023 mantuvo una tendencia general hacia la erosión.

Dicho patrón de desplazamiento de la costa es evidenciado en las continuas variaciones del perfil, mismos que cambian el ángulo de inclinación en pocos metros, conduciendo a la playa hacia una de tipo semi-reflexivo. Al respecto, Van Rijn, (2009) señala que la variación en ambos factores afecta de manera significativa el desplazamiento de la costa, siendo erosionada con facilidad y periodos cortos de tiempo, principalmente por la acción de rompimiento que tienen olas grandes en la barra, lo que afecta el flujo de retorno del sedimento desde el lecho marino (Andreeva *et al.*, 2021). De igual manera, al aumentar el nivel del mar en el CS, la zona de rompiente de las olas posiblemente sufre variaciones y es desplazada hacia el continente, favoreciendo los procesos erosivos por encima de la acreción, lo que acrecienta el desequilibrio en el ingreso de los sedimentos a la playa.

Cocles-Puerto Viejo. En contraste con lo anterior, el desplazamiento de la línea costera en el tramo Cocles (CSB4) y Puerto Viejo (CSB3) presentó poca o nula variación en el tiempo. La tasa de erosión se clasifica como estable con baja fluctuación, no así la acreción, que es importante en las zonas cercanas a las desembocaduras. La función de barrera y aporte sedimentario son parte de las características llamativas, pues su comportamiento de mitigación es efectivo al compararlo con las áreas anteriores.

Existe una concordancia entre los resultados obtenidos por DSAS y el análisis HotSpot para los segmentos CSB4 y CSB3, ya que, aunque los procesos erosivos son menos intensos, se documentó la permanencia de áreas con desplazamiento de costa por este factor, principalmente en las áreas cercanas a Puerto Viejo, y en menor magnitud hacia el sureste, en dirección a Cocles. Al igual que Manzanillo, en estos sectores existen barreras coralinas y fondos duros que contribuyen en la mitigación, reducción de la erosión y retención del sedimento, que favorece la conformación de bancos de arena en la ZIL que actúan como una barrera natural que mitiga el efecto del oleaje alta intensidad.

En cuanto a los perfiles y el ancho, se destaca que ambos sectores tienen características similares. Estos factores antes mencionados mitigan levemente las variaciones en estas condiciones. Estas características, como las que ocurren en el tramo CSB4 y CSB3, corresponden con playas de tipo semi reflexivo o intermedio, en las cuales el oleaje rompe directamente en la ZIL y en condiciones de tormenta ingresan hasta la barrera de vegetación, lo cual puede variar la granulometría y pendiente de la playa.

Parque Nacional Cahuita-Estrella. Los tramos de costa comprendidos entre Parque Nacional Cahuita (CBS2) y Estrella (CBS1) evidenciaron variación continua con fluctuaciones mínimas en las tasas de acreción, ocasionado importantes procesos erosivos, y responsables del desplazamiento de la línea costera. Las zonas críticas corresponden con punta Cahuita, y Perezoso, donde las altas tasas de EPR sugieren que existe un claro déficit entre el volumen de sedimentos que se mueve en el transporte litoral por deriva neta respecto a los que están disponibles en la duna (Rangel-Buitrago *et al.*, 2015).

Mediante el análisis de puntos calientes se logró determinar que los sectores CBS2 y CBS1 muestran comportamiento similar al descrito por las tasas EPR para el desplazamiento de la línea costera por erosión, coincidencias que aparecen principalmente en las zonas cercanas al estero Perezoso, ubicado al noroeste del área protegida. En el caso de CBS1, las zonas cercanas al río Estrella mostraron baja significancia en el clúster, lo cual puede tener relación con el flujo de sedimentos de origen continental que llegan a la desembocadura y que son depositados en la playa por acción del oleaje. Según Dipper (2022), el transporte litoral de sedimentos por deriva neta juega un rol de importancia para la nutrición y distribución horizontal de los materiales que se depositan, esto al facilitar el reemplazo del sedimento que se mueve en semanas, meses o años de una a otra playa, favorece de esta manera el intercambio entre ellas (Patsch y Griggs, 2006).

Estrella-Limón. Este tramo de la costa Estrella-Limón (CSA1, CSA2 y CSA3) presenta variación de

las tasas EPR por erosión en los que hay alternancia con la acreción. En general, corresponde a uno de los sectores estables y con variación equitativa entre ambos procesos. Los escarpes en las playas arenosas aparecen durante periodos cortos que se extienden de unas semanas a meses, sin que esto pueda ser utilizado como un indicador de la reducción en el avance del mar hacia el continente.

Adicionalmente, en este lugar puede existir una contribución significativa de los bancos de arena para reducir los oleajes intensos, que son la única protección que existe, de ahí que la morfología de las playas de este tramo costero exhibe reducida exposición a cambios bruscos en la posición de línea costera, variación de los perfiles o del oleaje incidente. Al respecto Taveira-Pinto *et al.*, (2011), señalan que factores como las olas y las corrientes de la zona infralitoral son los responsables directos del transporte de sedimentos y por tanto, los que producen variaciones evidentes en la morfología. De hecho, los sectores CSA1, CSA2 y CSA3 parecen mantener un balance positivo de ingreso de sedimentos, los cuales son resultado de la alimentación fluvial y terrígena en la cual intervienen los ríos Vizcaya, Banano y Bananito.

CONCLUSIÓN

En general, durante los últimos 63 años, las playas arenosas del Caribe sur experimentaron procesos erosivos fuertes en aproximadamente el 70% de la costa, caracterizados por cambios abruptos en el perfil y ancho de las mismas. La variación multitemporal de la línea costera ha ido intensificando su desplazamiento en dirección hacia el continente, posiblemente como resultado de una menor resiliencia ante los eventos climáticos, al incremento en el nivel medio del mar y al deterioro generalizado de las reservas de sedimento como la duna y los bancos de arena. La situación crítica que atraviesan estos ecosistemas de transición mar-continente provocará en el mediano plazo impactos que incrementarán la vulnerabilidad y afectación de ecosistemas costeros y comunidades humanas presentes en esta franja litoral.

AGRADECIMIENTOS

Al Observatorio Ambiental de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional. Al personal docente y administrativo del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo por el apoyo brindado a lo largo del programa doctoral. Y al Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre (LARNAVISI) por su contribución con equipo para la ejecución de los análisis.

REFERENCIAS

- Aizam, A., Abdul, H., Amri, F., y Nizam, K. (2021). Beach Profile Assessment and Erosion Rate Estimation of Monsoonal Coastline Area in Pahang, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 799, 012005. DOI 10.1088/1755-1315/799/1/012005
- Amador, J. A., Chacón, R. E., y Lizano, O. G. (1994). Estudio de efectos geofísicos del terremoto de Limón mediante percepción remota y análisis hidrometeorológico. *Revista Geológica de América Central*, 65, 150-170.
- Andreeva, N., Saprykina, Y., Valchev, N., Eftimova, P., y Kuznetsov, S. (2021). Influence of wave climate on intra and inter-annual nearshore bar dynamics for a sandy beach. *Geosciences*, 11(5), 206. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050206>
- Bergoeing, J. P. (2017). *Geomorphology and volcanology of Costa Rica*. Elsevier.
- Boak, E. H., y Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Brenes-Rodríguez, C., y Benavides-Morera, R. (2015). Thermohaline characteristics of coastal waters in the southern Caribbean of Costa Rica. *Journal of Marine and Coastal Sciences*, 7, 27-41. <https://doi.org/10.15359/revmar.7.2>
- Cazenave, A., y Cozannet, G. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15-34. <https://doi.org/10.1002/2013EF000188>
- Cortés, J., Fonseca, A., Barrantes, M y Denyer, P. (1998). Type, distribution, and origin of sediments of the Gandoca-Manzanillo National Wildlife Refuge, Limón, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 251-256. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/29883>
- Cifuentes-Ossa, M., Rosero-Henao, L. V., y Josephraj-Selvaraj, J. (2017). Detection of shoreline changes in the northern District of Buenaventura using remote sensing. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 46(1), 137-152. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2017.46.1.719>
- Denyer, P., Arias, O., y Personius, S. (1994). Efecto tectónico del terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central*, 65, 39-52.
- Del Río, L., Garcís, F.J., y Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027>
- Dinesen, R. (2019, noviembre 22). Erosion effects on ecosystem. *Sciencing*. <https://sciencing.com/about-6085011-erosion-effects-ecosystem.html>
- Dipper, F. (2022). The physical structure of oceans. En F. Dipper (Ed.), *Elements of Marine Ecology* (1era ed., pp. 1-35). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03993-9>
- Dugan, J. E., Hubbard, D. M., Rodil, I. F., Revell, D. L., y Schroeter, S. (2008). Ecological effects of coastal armoring on sandy beaches. *Marine Ecology*, 29, 160-170. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2008.00231.x>
- Dugan, J. E., Airolidi, L., Chapman, M. G., Walker, S. J., Schlacher, T., Wolanski, E., y McLusky, D. (2011). Estuarine and coastal structures: environmental effects, a focus on shore and nearshore structures. *Treatise on estuarine and coastal science*, 8, 17-41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00802-0>
- Himmelstoss, E. A., Farris, A. S., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., Ergul, A., Zhang, O., Zichichi, J.L., y Thielier, E. R., (2018). Digital Shoreline Analysis System U.S. Geological Survey software (version 5) [Computer software]. <https://code.usgs.gov/cch/dsas/>
- Komar, P., Diaz-Mendez, G., y Marra, J. (2001). Stability of the new river Spit, and the position of Oregon's beach-zone line. *Journal of Coastal Research*, 17(3), 625-635. <https://www.jstor.org/stable/4300214>
- Labuz, T. (2015). Environmental impacts-coastal erosion and coastline changes. En B. Hans-Jürgen., M. Menenti., y S. I. Rasool (Eds.), *Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin* (2da ed.) (pp. 381-396). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_20
- Lizano, O. (2007). Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 25(1-2), 43-56.
- Lizano R, O. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, 27, 6-27.
- Lizano, O. (2018). La dinámica de las corrientes marinas frente al Caribe de Costa Rica. *Ambientico*, 265, 6-12.
- López, M., Pagán, J., López, I., Aragonés, L., Tenza-Abril, A., y García, J. (2017). Factors influencing the retreat of the coastline. *International Journal of*

- Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(5), 741-749.
- McLachlan, A y Defeo, O. (2017). *The Ecology of Sandy Shores*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04773-6>
- Maulud, K., Mohd, F., Mohtar, W., Jaafar, O., y Benson, Y. (2018). Impact of sea level rise on the coastal ecosystem. En W. Suparta., M. Abdullah., y M., Ismail (Eds.), *Space science and communication for sustainability* (pp. 173-184). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6574-3_15
- Mentaschi, L., Voudoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E., y Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific reports*, 8(1), 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Medvedev, V., y Juanes, J. (1981). Investigaciones morfolitodinámicas en la zona costera y la plataforma del litoral norte de Cuba. *Revista Plataformas Continentales e Insulares*, 229-250.
- Nguyen, V.B; Nguyen, Q.B; Zhang, Y.W; Lim, C.Y., y Khoo, B.C. (2016). Effect of particle size on erosion characteristics. *Wear*, 348–349, 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.12.003>
- Natesan, U., Parthasarathy, A., Vishnunath, R., Jumar, E. J., y Ferrer, V.A. (2015). Monitoring longterm shoreline changes along Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Aquatic Procedia*, 4, 325-332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.044>
- Ordaz, A., Hernández, J., Estévez, E., Díaz, C., y Méndez, A. (2016). Coastal Morphodynamics at Playa Bailén, Southwestern Cuba, 2003-2013. *Investigaciones Geográficas*, 91, 56-69. <http://dx.doi.org/10.14350/ig.47086>
- Orejarena-Rondón, A., Sayol, J., Marcos, M., Otero, L., Restrepo, J., Hernández-Carrasco, I., y Orfila, A (2019). Coastal impacts driven by sea-level rise in Cartagena de Indias. *Frontiers in Marine Science*, 6, 614. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00614>
- Pacheco, C., Valdez, J., Gama, L., Gordillo, E., Moguel, E, Rangel, L., y Luna, R. (2015). Sistemas agrícolas como refugio de herpetofauna en zonas de acreción-retroceso y erosión costera, en Tabasco, México. *Agro productividad*, 249, 74-79.
- Paneque, R, García, E, Abreu, J, y Rueda, A. (2010). La erosión en las playas del litoral de Holguín, Cuba. *Ciencias Holguín*, 15(1), 1-20.
- Patsch, K., y Griggs, G. (2006). *Littoral Cells, Sand Budgets, and Beaches: Understanding California's Shoreline*. Institute of Marine Sciences.
- Pennings, S. C., Glazner, R., Hughes, Z. J., Kominoski, J. S., & Armitage, A. R. (2021). Effects of mangrove cover on coastal erosion during a hurricane in Texas, USA. *Ecology*, 102(4). <https://doi.org/10.1002/ecy.3309>
- Pérez-Briceño, P. M., Amador Astúa, J. A., y Alfaro, E. J. (2017). Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el sistema de Thornthwaite. *Revista de climatología*, 17, 1-16.
- Piedra-Castro, L., Sierra, L., Hernández, A. Castillo-Chinchilla, M., y Ramírez-Vargas, M. (2013). Factors affecting coastal erosion in the southern Caribbean, Costa Rica [Poster]. New Frontiers in Tropical Biology, The Next 50 Years, San José, Costa Rica.
- Piedra-Castro, L.; Castillo-Chinchilla, M., y Morales-Cerdas, V. (2021). Characterization of sandy beaches of the southern Caribbean of Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 34(3), 120-133. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5197>
- Petrişor, A. I., Hamma, W., Nguyen, H. D., Randazzo, G., Muzirafuti, A., Stan, M. I., Tran, T., Astefănoaiei, R., Bui, Q., Vintilă, D., Truong, Q., Lixăndroiu, C., Tenea, D., Sîrodoev, I., y Ianoş, I. (2020). Degradation of coastlines under the pressure of urbanization and tourism: Evidence on the change of land systems from Europe, Asia and Africa. *Land*, 9(8), 275. <https://doi.org/10.3390/land9080275>
- Quesada, A. (2016). Impactos geomorfológicos del terremoto de Limón (1991; ms= 7.5) y consideraciones para la prevención de riesgos asociados en Costa Rica. *Revista Geográfica De América Central*, 1(56), 93-111. <https://doi.org/10.15359/rgac.1-56.4>
- Quesada-Román, A y Pérez-Briceño, P. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica, *Journal of Maps*, 15(2), 363-371. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592>
- Rangel, N. G., y Posada, B. O. (2013). Determination of the vulnerability and the coastal risk by the application of gis tools and multicriteria methods. *Intrópica*, 8, 29-42.
- Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., y Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Ricaurte-Villota, C., Murcia-Riaño, M., y Ordoñez-Zuñiga, S. (2017). Región 9: plataforma centroamericana. En C. Ricaurte-Villota, y M.L. Bastidas (Eds.), *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe* (pp. 156-178). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés (INVEMAR).
- Sanjaume, E., y Pardo-Pascual, J. E. (2005). Erosion by human impact on the Valencian coastline (E of Spain). *Journal of Coastal Research*, 49, 76-82.
- Salazar, A., G Lizano, O y Alfaro, E. (2004). Composición de sedimentos en las zonas costeras de Costa Rica utilizando Fluorescencia de Rayos-X (FRX). *Revista*

- de *Biología Tropical*, 52, 61-75. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/26578>
- Sarwar, M., y Woodroffe, C. (2013). Rates of shoreline change along the coast of Bangladesh. *Journal of Coastal Conservation*, 17(3), 515-526. <http://doi.org/10.1007/s11852-013-0251-6>
- Silva, R., Martínez, L., Hesp, P., Catalan, P., Osori, A., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A., y Govaere, G. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin América. *Journal of Coastal Research*, 71, 1-16. <https://doi.org/10.2112/SI71-001.1>
- Sytnik, O., Del Río, L., Greggio, N., y Bonetti, J. (2018). Historical shoreline trend analysis and drivers of coastal change along the Ravenna coast, NE Adriatic. *Environmental earth sciences*, 77(23), 779. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7963-8>
- Tsoukala, V.K., Katsardi, V., Hadjibiros, K., y Moutzouris, C. (2015). Beach erosion and consequential impacts due to the presence of harbours in sandy beaches in Greece and Cyprus. *Environmental Processes*, 2, 55-71. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0096-0>
- Taveira-Pinto, F., Silva, R., y Pais-Barbosa, J. (2011). Coastal erosion along the portuguese northwest coast due to changing sediment discharges from rivers and climate change. En G., Schernewski, J., Hofstede., y T., Neumann (Eds.), *Global change and baltic coastal zones* (pp. 135-151). Springer https://doi.org/10.1007/978-94-007-0400-8_9
- Van Rijn, L. (2009). Prediction of dune erosion due to storms. *Coastal Engineering*, 56, 441-457. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.10.006>
- Vargas, V., Uribe, E., Ríos, C., y Castellanos-A, O. (2016). Coastal landforms caused by deposition and erosion along the shoreline between Punta Brava and Punta Betín, Santa Marta, Colombian Caribbean. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(157), 664-682. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.387>
- Vousdoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T., Athanasiou, P., Luijendijk, A., y Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature climate change*, 10, 260-263 <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>
- Waliser, D. E., y Jiang, X. S (2015). Tropical meteorology and climate. Intertropical Convergence Zone. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2ª. ed.) (pp. 121-131). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-382225-3.00417-5>