

EROSIÓN COSTERA Y ESTABILIDAD DE PLAYAS EN LIMÓN, MAR CARIBE, COSTA RICA. COASTAL EROSION AND BEACH STABILITY IN LIMÓN, CARIBBEAN SEA, COSTA RICA

Sr. Omar G. Lizano Rodríguez¹ y Sra. Paula M. Pérez-Briceño^{2,3}

RESUMEN

Se estudió la variación de la línea de costa en algunas playas del Caribe de Costa Rica. Para Moín se evaluó la variación de la línea de costa desde las primeras fotografías aéreas (1952), para antes y después del levantamiento tectónico que produjo el terremoto de abril de 1991. Procesos de erosión y acreción se han dado en esta zona producto de no solo de tectonismo, sino también la construcción de estructuras portuarias. Se ajustaron perfiles parabólicos a la línea de costa para evaluar el equilibrio estático de la playa de Moín y la relación que tiene esta con el cambio del patrón de oleaje debido al levantamiento de la Isla Pájaros antes y después del terremoto y de la influencia de la construcción de las terminales portuarias. Este ajuste parabólico se extendió a otras playas de Limón para evaluar también su estado de equilibrio. Parámetros físicos como temperatura superficial del mar, altura de ola y nivel del mar, fueron evaluados para relacionar con los procesos de erosión que experimenta en la región. Los resultados indican que tanto un aumento en la temperatura del mar y el nivel del mar, con un proceso tectónico aún activo y fenómenos océano-meteorológicos extremos en los últimos años, podrían justificar la erosión evidente que continua en la zona.

Palabras claves: Erosión, oleaje, nivel del mar, Caribe, Costa Rica

ABSTRACT

The variation of the coastline was studied in some beaches of the Caribbean of Costa Rica. For Moín, the variation of the coastline was evaluated since the first aerial photographs (1952), before and after the tectonic uplift that produced the April 1991 earthquake. Erosion and accretion processes have occurred in this area as a result of not only tectonism, but also the construction of port structures. Parabolic profiles were adjusted to the coastline to evaluate the static equilibrium of the Moín beach and its relationship with the change in the wave pattern due to the rise of Pájaros Island before and after the earthquake and the influence of the construction of port terminals. This parabolic adjustment was extended to other beaches in Limón to also assess its state of equilibrium. Physical parameters such as sea surface temperature, wave height and sea level were evaluated to relate to the erosion processes experienced in the region. The results indicate that both an increase in sea temperature and sea level, with a tectonic process still active and extreme ocean-meteorological phenomena in recent years, could justify the evident erosion that continues in the area.

Keywords: Erosion, waves, sea level, Caribbean, Costa Rica.

¹ Módulo de Información Oceanográfico (MIO), Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR). Universidad de Costa Rica.

² Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica

³ Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.

Recibido 9 de agosto de 2021
Aprobado 18 de octubre de 2021

INTRODUCCIÓN

El último informe del Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático (IPCC 2019) señala que el Nivel Medio del Mar Global (NMMG) sigue, ...y seguirá, aumentando. La suma de las contribuciones de los glaciares y las capas de hielo es ahora la fuente principal de aumento de NMMG, cuya causa es el forzamiento antropogénico. El escenario máximo del IPCC: RCP8.5 (Representative Concentration Pathways), indica que para el 2100 se podría tener un aumento del nivel del mar de hasta 1.20 m. Sin embargo, ese mismo informe señala que el nivel del mar seguirá aumentando en los siguientes siglos, y que, por ejemplo, podría tener un nivel de mar máximo de 5.80 m para el 2300 (IPCC 2019).

Pero, por otro lado, como argumenta Lizano (2019-a), no solo se debería estar pensando en el aumento del nivel del mar, porque la mayor amenaza de la erosión costera son las marejadas (Lemos et al. 2021) de las recurrentes tormentas y su levantamiento temporal del nivel del mar (debido a las rompientes), así como la frecuencia de estas que se superponen a las mayores mareas astronómicas y/o a aumentos del nivel del mar del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Pero también hay otras componentes mareográficas y atmosféricas que están cambiando. Se sabe que en algunas regiones del mundo está aumentando la velocidad de los vientos (Young et al. 2011; OSU 2010), lo cual aumenta la altura de las olas (Meucci et al. 2020). También se pronostica una mayor intensidad y permanencia de los ciclones tropicales (Alfaro 2007; Pielke 2005; Knutson y Tuleya 2004).

No hay duda de que una de las causas de la erosión costera son los eventos extremos (Meucci et al. 2020; Mentaschi et al. 2018; Stephenson y Jhordanne 2017). Particularmente, para el Caribe de Centroamérica parece ir en aumento la presencia de ciclones tropicales, como lo demostró la temporada de 2020 que llegó a 30 tormentas tropicales incluyendo a los huracanes ETA e IOTA al final de la temporada (NOAA 2020). Aunque Otto fue el primer huracán que tocó territorio costarricense, dadas sus características y su circulación del viento, no generó un oleaje extraordinario en nuestra costa caribeña (Lizano y Mora 2019). Fue el Huracán Joan en octubre de 1988, el evento que pudo haber generado el oleaje más alto desde que se registran huracanes en el

Atlántico (5-6 m mar adentro y 3-4 m frente al rompeolas de Limón y en las playas de Moín), (Lizano y Mora 2019; Lizano 2011; Lizano y Moya 1990). A pesar de que los huracanes han generado oleaje alto, no han sido los mayores eventos extremos que se han presentado en esta zona. Los eventos extremos vienen de los frentes o empujes (Chinchilla et al. 2017), que se presentan entre noviembre y diciembre de cada año, los que generan los mayores oleajes e impactos en la costa caribeña (Lizano 2017, 2007).

Por otro lado, en los procesos de erosión y/o acreción en nuestras costas, también están involucrados movimientos tectónicos que han levantado o hundido la costa (Lizano, 2013). En el terremoto de Limón en abril de 1991 se produjo un levantamiento de la costa, dejando las plataformas coralinarias expuestas, cuyo máximo levantamiento se reportó en Portete (Amador et al. 1994). Este levantamiento también cambió el punto de difracción de oleaje (Knauss 1978) de varias bahías o ensenadas a lo largo de la costa del Caribe, lo que a la vez cambió la dinámica del transporte de sedimentos. Esto inició la formación de nueva línea de costa o tendencia a un nuevo perfil de equilibrio (Fontoura et al. 2003) en estas zonas.

La mayoría de los trabajos que se han hecho para el Caribe de Costa Rica que tratan el tema de la erosión costera, se evalúan desde observaciones puntuales (Lizano, 2013) y/o el uso de fotografías aéreas históricas (Sandoval-Murillo y Barrantes-Castillo 2021; Barrantes-Castillo et al. 2020), en los que se mencionan las posibles variables océano-meteorológicas involucradas y hasta la relacionan incluso, a cambios en el uso de la tierra en la franja costera. Ningún trabajo hasta ahora se ha realizado que presente evidencia de parámetros físicos que justifiquen la dinámica costera que se experimenta en la zona. En este artículo se describen las principales componentes océano-meteorológicas que están presentes en nuestro Caribe y que pueden estar asociadas a los procesos erosivos de las playas de Limón. Adicionalmente, se hace un análisis de la evolución de la línea de costa antes del terremoto de abril del 1991 y los cambios que se han generado en la zona a través del tiempo. Se emplea un modelo morfológico de ajuste parabólico a las bahías (Fontoura et al. 2003) ampliamente usado y corroborado, para evaluar el equilibrio o forma en "planta" de la línea de costa. Para ello se

utilizan fotografías históricas y recientes de algunas de las principales playas del Caribe de Costa Rica.

ÁREA DE ESTUDIO

Este artículo mostrará algunos procesos de la dinámica litoral desde Puerto Moín en el caribe central, donde se ubica la Terminal de APM hasta Puerto Viejo en el caribe sur. Quesada-Román y Pérez-Briceno (2019) caracterizaron la costa caribe según su geomorfología, se pueden encontrar formaciones de origen endogénico como las plataformas calcáreas en donde se ubica Ciudad Limón, la cabecera de la provincia; en Puerto Vargas dentro del Parque Nacional Cahuita y Puerto Viejo en el cantón Talamanca. Esta plataforma de unos 100 km fue expuesta producto del terremoto de 1991 (Quesada-Román 2016), esta formación calcárea tuvo una elevación

máxima de 1.51 m en la zona entre Moín y Playa Portete; y un mínimo de 0.36 m al oeste del cementerio de Limón (Quesada-Román 2021).

Por otro lado, se encuentran las formaciones exogénicas que se asocian a procesos fluviales como las planicies aluviales que están desde Limón, pasando por Cieneguita hasta llegar a Puerto Viejo; y las que se asocian a procesos costeros como la barra costera que viene desde el Caribe Norte hasta llegar a playa Moín. La Fig. 1 muestra el área de estudio en este artículo, así como sitios de referencia que se nombrarán a lo largo del artículo. Es importante señalar que las geoformas exogénicas están en constante intercambio de energía como el medio por lo que su morfología es variable, como en el caso de las playas que traemos a estudio y que han presentado procesos de acreción y erosión costera.

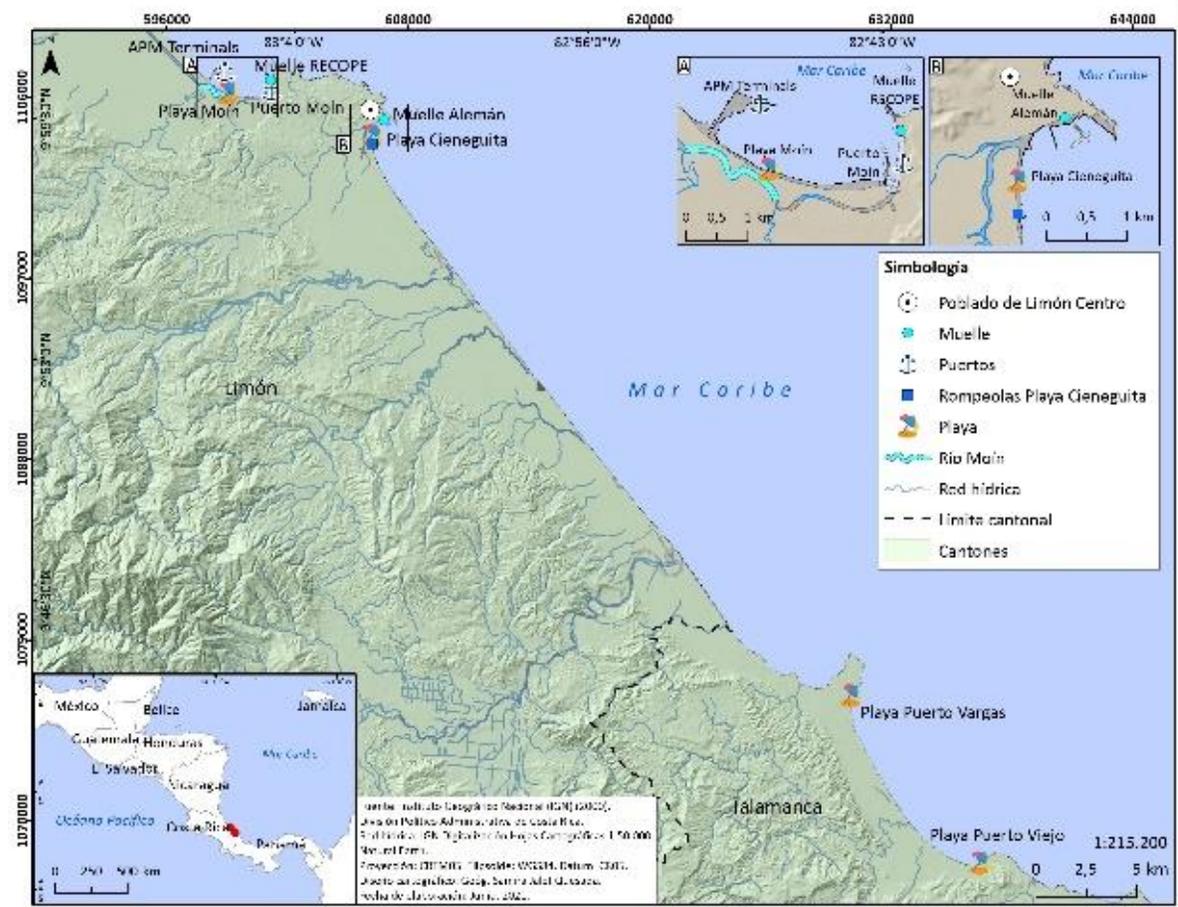


Fig. 1. Mapa de ubicación de las playas en estudio. Elaboración propia.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se usan fotografías aéreas históricas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de los años 1952, 1988, 1992. Estas se georreferencian para la posterior digitalización de la línea de costa utilizando el software ArcGIS 10.8. Además, se emplearon imágenes satelitales de Google Earth para los años 2010, 2021 con el fin de sobreponer los perfiles de equilibrio en planta de las principales bahías.

Se utilizó el programa MEPBAY (Thomas et al. 2016; Fontoura et al. 2003; Hsu y Evans 1989), escrito en lenguaje Object Pascal, para calcular el perfil parabólico de equilibrio estático o dinámico de las bahías y evaluar la posible tendencia futura de los sedimentos. Este modelo se aplica a la mayoría de las playas sedimentarias que tienen un promontorio o saliente de costa, ya sea natural o artificial, un rasgo que lo constituyen alrededor del 50% de la línea de costa mundial (Fontoura et al. 2003). El modelo hace un ajuste polinomial de segundo orden (es decir, en forma parabólica o cuadrática) que surge del ajuste de la forma en planta de 27 casos mixtos de bahías prototipo que se cree que están en equilibrio estático sin deriva litoral (Fontoura et al. 2003).

La serie de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) se obtuvo del Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST) del National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos de América.

Datos del nivel del mar de la estación mareográfica de Limón Centro (Muelle Alemán) del 2010 al 2020 se obtuvieron del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) del Centro Nacional de Oceanografía en Liverpool, Inglaterra.

Datos de características del oleaje y el viento de 1967 al 2019 para el Caribe (82.50°W y 10.00°N) se descargaron de bases de datos de la NOAA para identificar posibles tendencias. Gráficas y cálculos se realizaron utilizando subrutinas del programa Python.

Particularmente, los datos del programa de WaveWatch III (WW3) de diagnóstico de oleaje que se utilizaron originalmente, tiene una resolución espacial de 50km. Este modelo tuvo un cambio de resolución espacial a partir del 2011 con 16 Km de tamaño de rejilla computacional. (https://polar.ncep.noaa.gov/waves/Waves_Changes.pdf), por lo que se utilizó las series de datos con ambas resoluciones para mostrar la diferencia significativa en altura de oleaje, especialmente para el huracán Otto cuando transitó frente de Limón.

RESULTADOS

A- EL PROCESO DE EROSIÓN EN PLAYAS DEL CARIBE DE COSTA RICA.

En la mayoría de las playas del Caribe de Costa Rica, se ha venido experimentando procesos de erosión, procesos que aún hoy continúan, como muestra las siguientes Fig. 2.



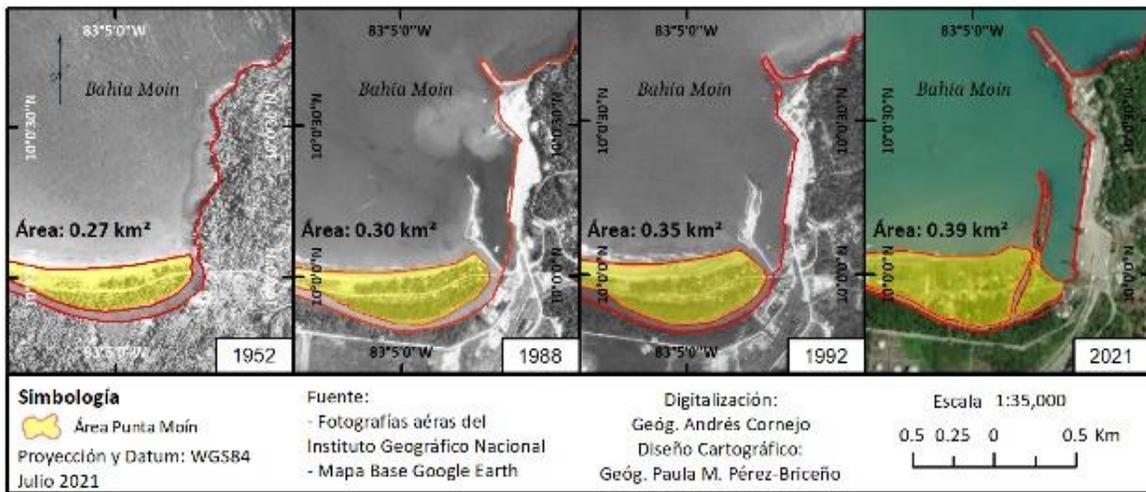


Fig. 2. Fotografías que evidencian erosión en playas del Caribe de Costa Rica. A: Playa Moín, diciembre del 2018, B: Playa Cieneguita, diciembre del 2015, C: Puerto Vargas, abril 2021 y D: Punta Uva, abril del 2021. En la Fig. 1C se señala con una elipse amarilla los escombros en el mar. Elaboración propia.

B- DINÁMICA DE LA COSTA EN PUERTO MOÍN.

Desde las fotografías aéreas de la costa en los alrededores del Puerto de Moín se puede ver la evolución de la costa desde 1952 y su posición

antes y después del terremoto de Limón en abril de 1991, como muestran las figuras siguientes:



Figs. 3. Fotografías aéreas e imagen satelital de Puerto Moín para 1952, 1988, 1992 y 2021. Elaboración propia.

La dinámica de los sedimentos en la costa específicamente para Puerto Moín y sus alrededores, está relacionada con la construcción de los puertos: el de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) en los años 60, que ha sido modificado a través de los años, y al levantamiento de la plataforma costera debido al terremoto de abril de 1991 (Amador et al. 1993; Denyer et al. 1991).

Con la construcción del muelle de RECOPE ya en el 1988, se nota una ampliación (acreción) de la playa al oeste de la desembocadura del Río Moín.

Más evidente es el mayor relleno de playa en esta zona para 1992, después del terremoto. Esto está relacionado con el cambio de refracción del oleaje (Thomas et al. 2016; Knauss 1978) generado en este caso por la Isla Pájaros y el levantamiento de la plataforma de la isla, y en menor medida, por el muelle de RECOPE. Para la imagen del 2021, se puede ver que la flecha de Moín se le hizo un canal artificial, cambiando la salida del Río Moín. Se puede observar cómo desde 1952 al 2021 la punta de la flecha arenosa ha ido creciendo a causa de la acumulación de sedimentos en la zona. Un estudio

adicional de a evolución de la línea de costa en Moín hasta el 2020, se presenta en la siguiente Figura 4:

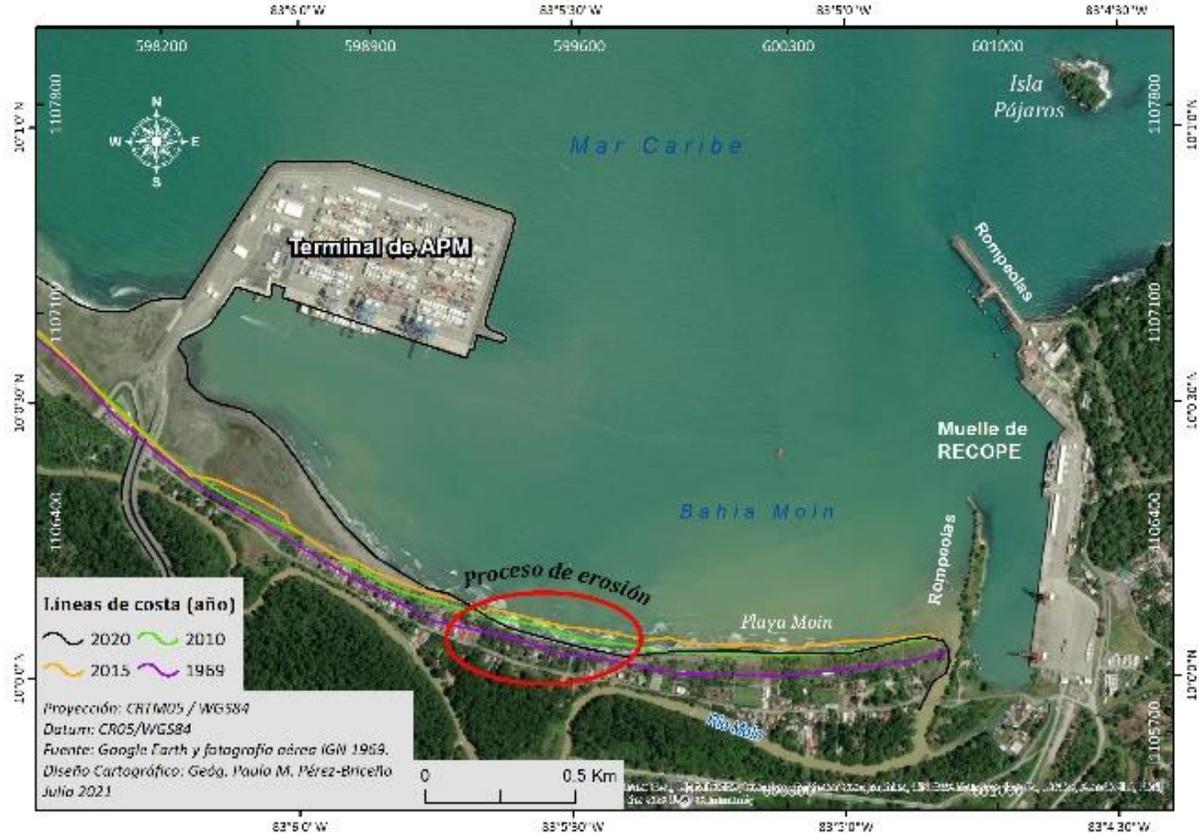


Fig. 4. Variación de la línea de costa en Moín, Limón. Elaboración propia.

De la figura anterior, se concluye que la variación de la línea de costa al noroeste, antes de que se construyera la terminal de APM, permanecía prácticamente la misma a través de los años. La ganancia en terreno (acreción) se tuvo sobre la porción de playa vecina a la desembocadura del Río Moín. Con la construcción de la terminal de APM, se alteró significativamente la línea de costa, generándose acumulaciones importantes de sedimentos alrededor de la entrada de la terminal, tanto sobre la derecha, como a la izquierda (mirando al mar) de esa entrada. Esto como veremos, está asociado al cambio del patrón de oleaje que produjo esa estructura. Pero también justamente con la construcción de la terminal, se

generó un proceso de erosión, señalada en el mapa con la elipse roja, debido a que al frente de esa playa y para la entrada de barcos a la dársena, se construyó el canal de acceso con mayor profundidad la cual permite a las olas alcanzar la playa con mayor energía.

C. EQUILIBRIO EN PLANTA DE LAS LÍNEAS COSTERAS EN LIMÓN.

C.1. Playa Moín.

La aplicación del modelo parabólico de Hsu y Evans (1989) para Moín se muestra en la siguiente figura 5:

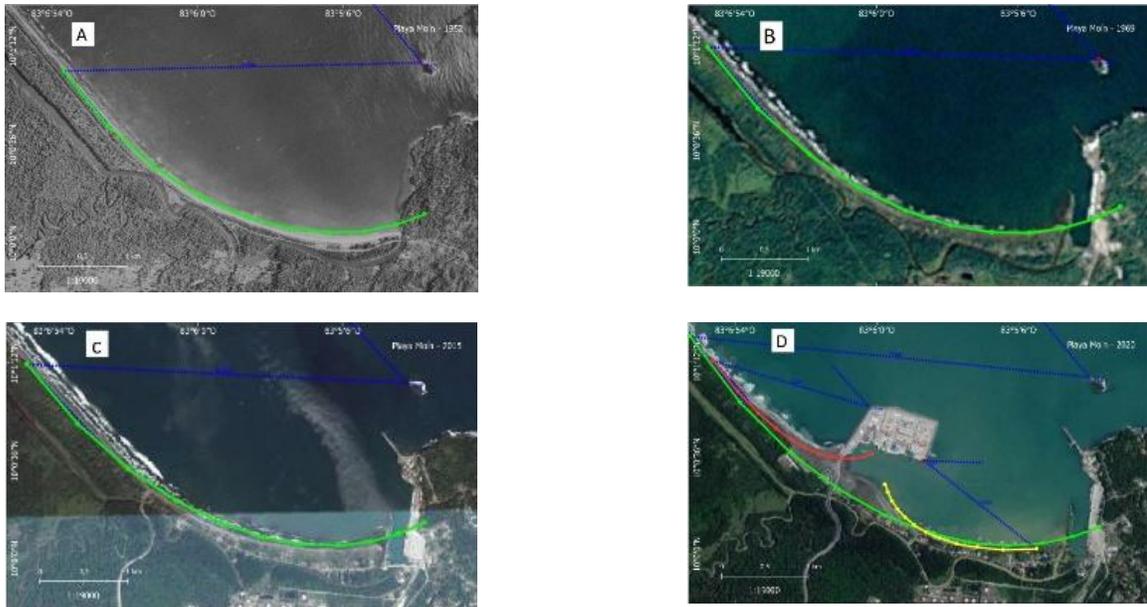


Fig. 5. A: Fotografía aérea de 1952, B: Fotografía aérea de 1969, C: Fotografía aérea del 2015 y D: Fotografía aérea del 2020. Se incluyen en cada una los perfiles parabólicos (líneas verdes, roja, celeste y amarillo) que generan la Isla Pájaros, el Muelle de RECOPE y la Terminal de APM. Elaboración propia.

Es evidente que el punto principal de difracción del oleaje (Knauss, 1976) para esta playa es Isla Pájaros (línea verde). En la medida que la playa se mantuvo sin ninguna estructura artificial, como muestra la Fig. 5A, el modelo de Hsu y Evans (1989) no se ajustaba a la línea de costa, lo cual indica que hay un equilibrio dinámico (Fontoura et al. 2003). Conforme se construyó el muelle de RECOPE (Fig.5B) y se luego se amplió (Fig. 5C), la curva parabólica del modelo de Hsu y Evans (1989) ajusta mejor a la línea de costa. Por otro

lado, al meter el muelle de APM al sistema (Fig. 4D), vuelve a romperse el equilibrio anterior y la línea de costa tiende a ajustarse según los nuevos puntos de difracción que muestra la Fig. 4D sobre las esquinas noroeste y sureste de la terminal.

C.2. Playa Cieneguita.

Las curvas de ajuste parabólico para esta playa se muestran en la siguiente Figura 6:

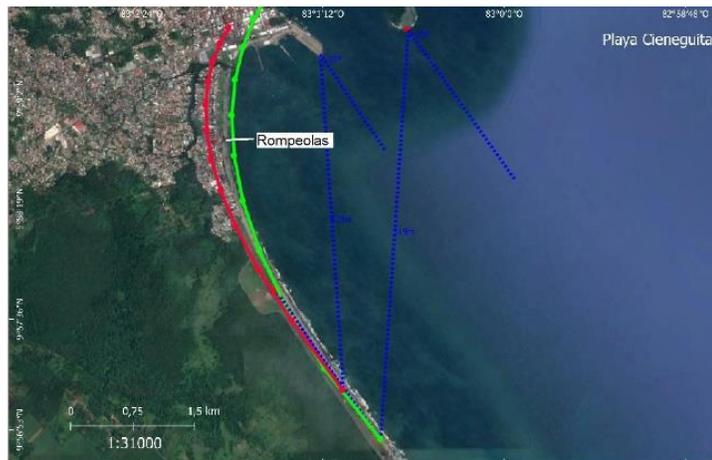


Fig. 6. Imagen de Google Earth del 2020 y curvas de ajuste parabólico de la playa de Cieneguita. Elaboración propia.

El ajuste de la línea de costa de esta playa responde al punto de difracción del oleaje de Isla Uvita (línea verde), que por supuesto, es un nuevo punto (corrido hacia el sureste) después del terremoto de Limón de 1991, por el levantamiento de la plataforma insular. Nótese que la línea verde está ligeramente corrida hacia el mar respecto de la línea de costa sobre la parte norte. Ejerciendo influencia también, está el muelle Alemán, que tiene su propio punto de difracción, y que si no estuviera la Isla Uvita, la línea de costa seguiría la línea roja (tierra adentro) de Fig. 6. Sin embargo, el mejor ajuste del modelo parabólico se da con línea verde con el punto de difracción en Isla Uvita. Es

meritorio mencionar que en esta playa de Cieneguita hay un pequeño rompeolas (señalado en Fig. 1), y que, debido a eso, la costa tiene una zona más amplia (con más borde de playa entre el caserío y el mar) en la parte norte de esta playa. Sin embargo, la parte sur de Cieneguita tiene problemas de erosión, como lo evidencian los trabajos de Barrantes-Castillo et al. (2020) y Lizano (2019-a).

C.3. Playa Puerto Vargas.

La aplicación del modelo parabólico a esta playa se muestra en la siguiente Fig. 7:



Fig. 7. Imagen de Google Earth de 2019 y curva de ajuste parabólico de Cahuita-Puerto Vargas. Elaboración propia.

El punto de difracción de esta zona está en los arrecifes sobre la esquina sureste del mismo. Aunque la curva parabólica (línea verde) se ajusta a la línea de costa al sur-sureste de la imagen, en la parte norte hay una porción de costa fuera de la curva parabólica, indicando que en esta zona podría estar aún en un proceso de erosión para los próximos años.

C.4. Playa Puerto Viejo.

La aplicación del modelo a esta playa se muestra en la siguiente Fig. 8. La línea verde es la del ajuste del modelo parabólico utilizando de referencia el punto 1.



Fig. 8. Imagen Google Earth de 2020 y curvas de ajuste parabólico de Puerto Viejo. Elaboración propia.

Como evidencian las dos curvas parabólicas ajustadas a esta playa, el punto de difracción que mantiene o modula la línea de costa (línea roja), no está en la parte de las rompientes de las olas (punto 1, línea verde), sino más bien, como lo sugiere la línea roja, debería estar al norte (punto 2).

La sobreposición de los contornos batimétricos (Lizano, 2019-c) sobre una imagen Google Earth

muestra una serie de bajos batimétricos (promontorios de baja profundidad) que se encuentran al frente de la costa de Puerto Viejo, como muestra la Fig. 9. Situando el punto de difracción sobre el bajo batimétrico más prominente de esa zona (profundidad mínima alrededor de 6m), el modelo parabólico ajusta perfectamente a la línea de costa.

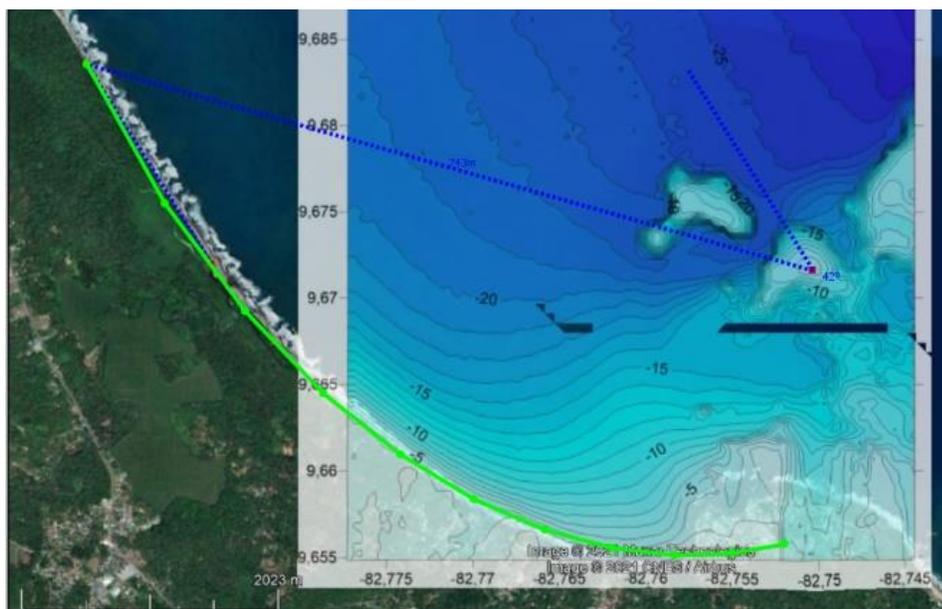


Fig. 9. Contornos batimétricos sobrepuestos a la imagen Google Earth del 2020 y curva de ajuste parabólico de Puerto Viejo. Elaboración propia.

D- Dinámica de la línea de costa en Limón Centro.



Fig. 10. Fotografías aéreas de la plataforma marina frente a Limón Centro. A: tomada después del terremoto de abril de 1991 (Blanco y Carbajal 2021) y B: imagen de Google Earth de febrero del 2021.

En la siguiente Fig. 10 se muestran fotografías aéreas del Centro de Limón, una justo después el terremoto de 1991 (Fig. 10A, Blanco y Carbajal, 2021) y la otra del año 2020.

Comparando el ancho de las plataformas expuestas de ambas figuras se puede notar que la plataforma coralina en la Fig. 10A, por ejemplo, es más ancha en el centro de la imagen y hacia la izquierda de este, y en la Fig. 10B, en estos mismos sectores la plataforma es menos ancha. Esto podría indicar que hay procesos tectónicos activos generándose en estas costas y que la costa de Limón se está hundiendo nuevamente lo cual se traduce en un aumento relativo del nivel del mar.

E- Variables océano-meteorológicas.

Es claro que la TSM frente a Limón tiene una tendencia positiva que viene aumentando desde hace muchos años (Fig. 11). El máximo valor de temperatura (30.05 °C) se dio en octubre del 2015 durante un año de El Niño intenso (Alvarado, 2015) y el anterior máximo se dio en el 1998, justamente en otro evento intenso de ENOS - El Niño (Lizano 1997). La tendencia de esta serie es robusta dado que el parámetro de la distribución t (Blank, 1980) es de 20.62. La Fig. 12 siguiente muestra la variación del nivel del mar en los últimos 12 años en la estación mareográfica de Limón, colocada en el Muelle Alemán. Datos de PSMSL.

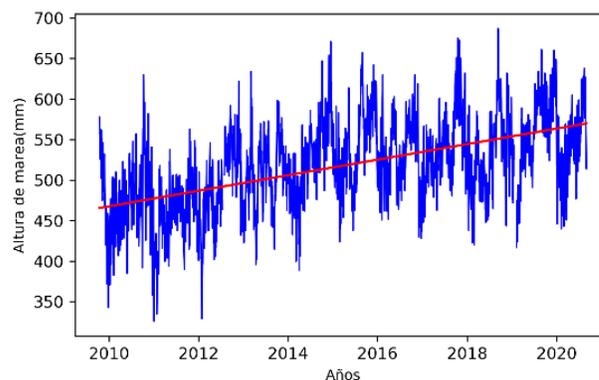


Fig. 11. Serie de la temperatura superficial del mar (TSM) frente a Limón. Elaboración propia.

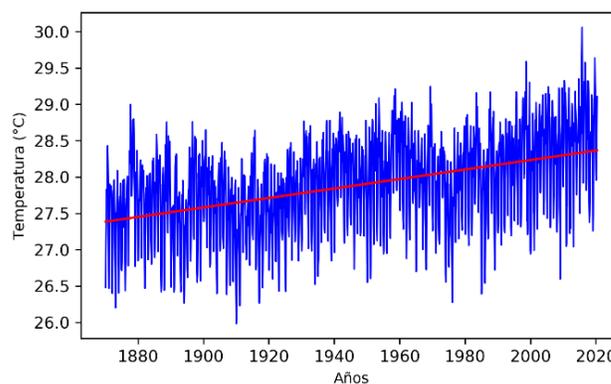


Fig. 12. Variación del nivel del mar en la estación mareográfica de Limón colocada en el Muelle Alemán. Datos de PSMSL. Elaboración propia.

Aunque la gráfica anterior muestra una serie del nivel del mar que es realmente corta, es claro que muestra una tendencia positiva, y que es estadísticamente robusta ($t= 40.28$).

La Fig. 13 siguiente muestra la variación de la altura de la ola al frente de la costa de Limón.

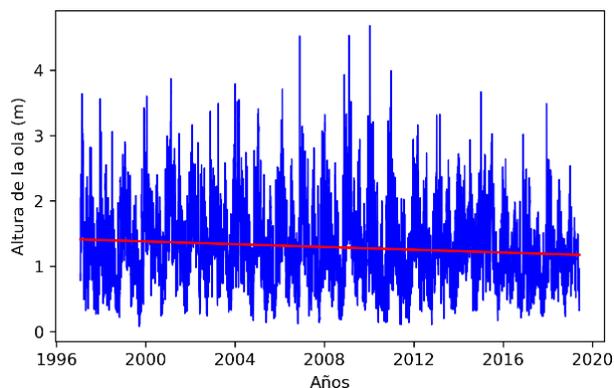


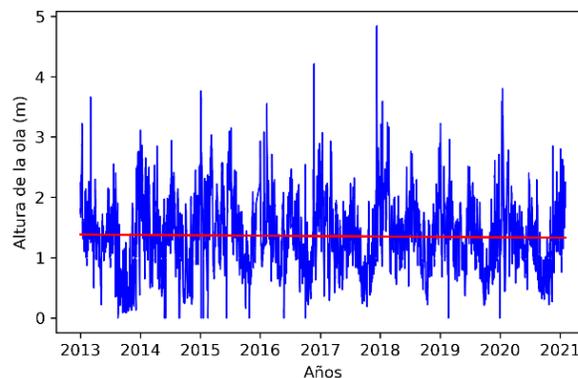
Fig. 13. Altura de ola (m) frente a Limón. Resultados de reanálisis de WW3 con resolución espacial de 1.25° de longitud y 1.00° de latitud extraídos en una boya virtual situada en 82.50°W y 10.00°N . Elaboración propia.

Curiosamente la serie de altura de ola de figura anterior que se tiene para esta zona muestra una tendencia negativa (línea roja), que es estadísticamente robusta ($t= -6.96$), mostrando eso sí, al menos hasta el 2010, un aumento en eventos extremos.

Dado que el modelo WW3 cambió de resolución espacial en el 2013, se estudió el comportamiento de esta nueva serie en el mismo punto de la serie anterior. Aunque esta serie también muestra una tendencia negativa (Fig. 14), es de resaltar el incremento de los eventos de oleaje extremos en los últimos años, con un máximo de 4.84 m el 17 de diciembre, justo con la aparición del Huracán Otto.

Es meritorio resaltar este cambio de valor máximo en esta serie respecto de la serie que muestra la Fig. 13, pues es conocido que cuando se mejora la resolución espacial de los modelos, definen mejor el campo de oleaje para ciclones tropicales (Mora y Lizano 2020; Lizano 2006; Lizano 1990), como fue el caso para este Huracán Otto. La Fig. 14 muestra también, que los eventos extremos vinieron creciendo desde el 2013 al 2018.

Fig. 14. Altura de ola (m) frente a Limón. Resultados de reanálisis de WW3 con resolución espacial de 0.50° de longitud y 0.50° de latitud extraídos en una boya virtual situada en 82.50°W y 10.00°N . Elaboración propia.



DISCUSIÓN

La reconstrucción histórica de la playa en Moín demuestra que esta playa no estaba en equilibrio estático en 1958, pues la curva del modelo parabólico no ajustó a la línea de costa (Fig. 5A). La construcción del muelle de RECOPE y el levantamiento de la plataforma después del terremoto de Limón de 1991 conformó una línea de costa bastante aproximada al modelo parabólico. Evidentemente estas nuevas estructuras cambiaron el patrón de oleaje y la línea de costa tendió cada vez a ajustarse a ese modelo, como lo demostraron las curvas de ajuste de software MEPBAY. El último gran modificador de la costa en Moín, fue la construcción del muelle de APM Terminal S.A., donde se interrumpió el transporte litoral de sedimentos, y además, la terminal generó 2 nuevos puntos de difracción de oleaje para establecer un nuevo equilibrio de la línea de costa, condición que es probable que aún esté en un proceso dinámico de sedimentación. Con la construcción de la terminal de APM se tuvo que construir un canal más profundo de acceso a la dársena, lo que generó un aumento de energía del oleaje hacia la playa y está provocando erosión sobre esa porción de playa como se señaló en la Fig. 4.

En el caso de Playa Cieneguita, las curvas parabólicas de ajuste demuestran que el punto de difracción principal es la Isla Uvita. Adicionalmente, el muelle Alemán también genera otro punto de difracción que hace un cambio en la dirección del oleaje, por lo que la línea de costa no coincide

exactamente con la línea verde, y muestra cierta tendencia a seguir la línea roja, que sería la línea de costa si solo el Muelle Alemán fuera el punto de difracción.

En el caso de Cahuita, la playa de Puerto Vargas está modulada por el punto de difracción que situamos al sur del arrecife, como se muestra en la Fig. 7. De este ajuste se desprende que la parte norte de esa playa aún no está en equilibrio, lo que advierte de un continuo proceso de erosión en esta zona. La Fig. 1C muestra de la posición de la antigua casa del parque, como a 100 m de la línea actual de costa. Este proceso continúa y probablemente se aceleró después del terremoto de Limón por alguna modificación de la plataforma arrecifal.

En el caso de Puerto Viejo, es evidente que el punto de difracción está en los bajos arrecifales que están sumergidos al norte de la costa, y que genera el punto principal que le da forma a la línea de costa en esa región (línea roja, Fig. 9).

En general, estos ajustes parabólicos producen equilibrios inestables en el tiempo en la medida en que otros parámetros ambientales sean cambiantes y modifiquen la línea de costa o el nivel del mar. Como lo demuestran el incremento en la TSM desde hace muchos años, el nivel del mar y el posible hundimiento de la costa (Fig. 9 y 10), está generando un aumento relativo del nivel del mar que mantendrá un equilibrio inestable en la región y continúen los procesos de erosión en esta región.

Es evidente que la TSM para el Caribe ha estado aumentando, y esto se ve reflejado en el aumento del nivel del mar registrado en la corta serie medida por el mareógrafo de Limón. Dado los escenarios del aumento del nivel del mar para la región (IPCC 2019; Lizano y Lizano 2019), el nivel del mar seguirá aumentando y las playas tendrán nuevos puntos de difracción que irá configurando una nueva línea de costa.

La energía del oleaje no parece estar en aumento al frente de Limón (Fig. 12 y 13). Los tres eventos extremos que muestra la Fig. 13 que superaron los 4.00 m de altura de ola (mar adentro), todos fueron generados durante empujes de viento o frentes del norte (Chinchilla et al. 2017), en noviembre del 2006, febrero del 2009 y enero del 2010,

respectivamente. Sin embargo, el análisis de mayor resolución espacial (antes 50 Km, ahora 16 Km) de la nueva versión del modelo WaveWatch III (https://polar.ncep.noaa.gov/waves/Waves_Changes.pdf) de la serie de las características del oleaje al frente de Limón (Fig. 14), muestra eventos extremos de oleaje que han ido creciendo en los últimos años. El pico máximo de altura de ola mar adentro (4.80 m) que muestra la Fig. 14, fue generado durante el Huracán Otto, que permanece como el único huracán que ha cruzado nuestro país en la historia de ciclones tropicales (Lizano y Mora 2019; Brown 2017), y que a la vez representa la mayor altura de ola generada en los últimos años al frente de Limón (alrededor de 5 m), valor que es similar al simulado por Lizano y Mora (2019) en esta región justamente para este fenómeno. Nótese que este evento no quedó bien definido en la serie de la Fig. 13, una característica relacionada a la resolución espacial de la versión vieja de WW3 en donde no se define adecuadamente el ojo de un ciclón tropical, y por lo tanto, no calculó apropiadamente la altura de ola generada por el ciclón, como lo ha señalado Lizano (1990, 2006) y Mora y Lizano (2019), en trabajos anteriores. Y por supuesto que, con la nueva versión de WW3, cualquier ciclón tropical en nuestra región, será mejor representado en sus características de viento y oleaje.

Tal como se mencionó anteriormente, el Huracán Joan fue el que mayor altura de ola generó al frente de Limón y el Huracán Otto fue el evento de mayor altura de ola en nuestro país en los últimos años, y que, de seguro, generaron erosión en las playas de Limón. Sin embargo, son los oleajes generados por los frentes o empujes de vientos del norte, los que generan mayor erosión, pues permanecen en la región por más días. Por ejemplo, el Huracán Otto generó tres días de oleaje alto, mientras que el evento de enero del 2010 permaneció con oleaje alto durante ocho días.

Los escenarios del nivel del mar del IPCC (2019) y los impactos de calentamiento global en nuestras costas, ya evidentes según lo demuestran los trabajos de Lizano (2013 y 2019-b), indican que no habrá equilibrio estático de sedimentación en esta región, por lo que nuevas configuraciones de costa y procesos de erosión se esperarían para los próximos años.

AGRADECIMIENTOS

A las estudiantes Gabriela Leiva y Samira Jalet y al estudiante Andrés Cornejo por el apoyo en la elaboración de las principales figuras de este artículo. Al Instituto Geográfico Nacional (IGN) por cedernos las fotografías áreas de Limón. Se agradece al proyecto C1-022 de la Escuela de Geografía y el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología; y al C0-610 del Centro de Investigaciones Geofísicas. Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Y a los lectores anónimos por sus comentarios, que permitieron mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- ALFARO, E. J. Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. 2007, 7, 1-13.
- ALVARADO, L. F. Boletín del ENOS N° 87, Fase actual: NIÑO. Informe 21. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas, Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2015, 6 pp.
- AMADOR, J., E. CHACÓN, E. Y LIZANO, O. G. "Estudio de efectos geofísicos del Terremoto de Limón mediante percepción remota y análisis hidrometeorológico". *Rev. Geol. Amér. Central*, Vol. *Esp. Terremoto de Limón*. 1994, p. 153-170.
- BARRANTES-CASTILLO, G., AROZARENA-LLOPIS, A., SANDOVAL-MURILLO, L. F. Y VALVERDE-CALDERÓN, J. F. "Playas críticas por erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005-2016". *Revista Geográfica de América Central*. 2020, p. 95-122.
- BLANCO, P. Y CARBAJAL, S. Tras 25 años del terremoto de Limón. El reporte de los sismos se volvió más rápido y preciso. Ciencia y Tecnología. Oficina de Divulgación e Información (ODI) y Red Sismológica Nacional. Universidad de Costa Rica. Publicado en 2021. [consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2016/04/21/el-reporte-de-los-sismos-se-volvio-mas-rapido-y-preciso.html>.
- BLANK, L. *Statistical Procedures for Engineering, Management and Science*. McGraw-Hill, Nueva York. 1980.
- BROWN, D. HURRICANE OTTO: Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Publicado en 2017. [Consulta: 05 junio 2021]. Disponible en: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL162016_Otto.pdf
- CHINCHILLA, G., GUTIÉRREZ, J. Y ZÁRATE, E. "Análisis sinóptico de casos de eventos extremos de lluvia asociados a líneas de cortante de empujes fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal". *Top. Meteor. y Oceanog.*, vol 16, 2017, p. 5-18.
- DENYER, P., ARIAS, O. Y PERSONIUS, S. "Efecto tectónico del terremoto de Limón". *Revista Geológica de América Central*. 1991, Vol. *Esp.*, p. 39-52.
- FONTOURA, A. H., VARGAS, A., RAABE, A. L. Y HSU, J. "Visual assessment of bayed beach stability with computer software". *Computers & Geosciences*. Vol 29, 2003, p.1249–1257.
- HSU, J.R.C. Y EVANS, C. "Parabolic Bay shapes and applications". *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part 2*. 1989, 87, 557–570.
- IPCC. Summary for Policymakers. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Publicado en 2019. [Consulta: 05 mayo 2021]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>
- KNAUSS, J. *Introduction to Physical Oceanography* (2 ed, reissued). Waveland Press, 1978.
- KNUTSON, T. R. Y TULEYA, R. E. "Impact of CO₂-Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation: Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization". *J. of Climate*. Vol 17, n 18, 2004. p. 3477-3485.
- LE MOS, G., SEMEDO, A., HEMER, M., MENENDEZ, M. Y MIRANDA, P. "Remote climate change propagation across the oceans—the

directional swell signature". *Environ. Res. Lett.* 2021, 16.

LIZANO, O. G. El impacto en nuestras costas del aumento del nivel del mar. Consejo Científico del Cambio Climático de Costa Rica (4C). Publicado en 2019-A. [Consulta: 17 marzo 2021]. Disponible en: <https://4CCRI.ORG>.

LIZANO, O.G. "El calentamiento global y su relación con el impacto en la pesquería en el Golfo de Nicoya, Costa Rica". *InterSedes.*, XX n 41, 2019-b, p. 190-207.

LIZANO, O. G. Estudio de variables oceanográficas frente a Puerto Viejo para la instalación de un sistema de alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales de Puerto Viejo de Limón. Informe Técnico. No publicado. 2019-c.

LIZANO, O.G. "Los accidentes acuáticos alrededor de nuestras costas y su relación con el estado del mar y de la atmósfera". *Revista En Torno a la Prevención.*, vol 18, 2017, p. 07-14.

LIZANO, O.G. Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes.*, vol XIV, n 17, 2013, p. 6-27.

LIZANO, O.G. "Altura máxima de ola en huracanes con trayectorias similares en el Caribe Centroamericano y su relación con los impactos costeros". *Boletín Científico CIOH.*, vol 29, 2011, p. 46-59.

LIZANO, O.G. "Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica". *Ciencia y Tecnología.*, vol 25, n 1-2, 2007, p. 43-56.

LIZANO, O. G. "Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de Tercera Generación- Hurricane wave simulation using parametric wind models in aThird Generation wave model". *Boletín Científico CIOH.* Vol 24, 2006, p.36.47

LIZANO, O. G. "Las mareas extraordinarias de 1997 en la costa Pacífica de Costa Rica". *Tóp. Meteorol. y Oceanog.* Vol 4, n 2, 1997, p. 169-179.

LIZANO, O. G. "Modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico

durante huracanes". *Geofísica.* Vol 33, 1990, p. 75-103.

LIZANO, M. Y LIZANO, O. G. Escenarios ante el aumento del nivel del mar para las localidades de Moín y Cahuita, Limón, Costa Rica. En (Ed). Picado, L.; García, H.; Fernández, M.; Barrantes, Araya, R. y C. Mesén. MEMORIA IV Congreso Nacional de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático. 10-11 de octubre, 2018. Publicado en 2019. [Consulta: 03 marzo 2021]. Disponible en: <http://monitor.cne.go.cr/sites/default/files/MEMORIA%20IV%20CONGRESO%202018%20-%20GR.pdf>.

LIZANO, O. G. Y MORA, R. "Simulación de las condiciones oceanográficas de los huracanes que han pasado más cerca de Costa Rica". *Revista En Torno a la Prevención.* Vol 22, 2019, p. 21-31.

LIZANO, O. G. Y MOYA, R. J. "Simulación de oleaje durante el Huracán Joan (1988) a su paso por el Mar Caribe de Costa Rica". *Geofísica.* vol 33, 1990, p. 105-126.

MENTASCHI, L., VOUSDOKAS, M. I., PEKEL, J. F., VOUKOUVALAS, E. Y FEYEN, L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports.* 2018, 8:12876.

MEUCCI, A., YOUNG, I., HEMER, M., KIREZCI, E. Y RANASINGHE, R. Projected 21st century changes in extreme wind-wave events. *Sci. Adv.* 2020, 6.

MORA, R. E. Y LIZANO, O.G. La respuesta de modelos espectrales de olas en condiciones de huracanes intensos en el golfo de México. *Rev. Mar. Cost.* 2020, 12 (2), 73-93.

NOAA. Record-breaking Atlantic hurricane season draws to an end. Publicado en 2020. [consulta: 26 abril 2020]. Disponible en: <https://www.noaa.gov/media-release/record-breaking-atlantic-hurricane-season-draws-to-end>.

OSU. Maximum height of extreme waves up dramatically in Pacific Northwest. *ScienceDaily.* Publicado en 2010. [consulta: 26 abril 2021]. Disponible en: www.sciencedaily.com/releases/2010/01/100125123233.htm.

PIELKE, R., LANDSEA, C., MAYFIELD, M. Y PASCH, R. "Hurricanes and global warming". *Bull. Amer. Meteor. Soc.* vol 86, 2005, p. 1571-1575.

QUESADA-ROMÁN, A. "Impactos geomorfológicos del terremoto de Limón (1991; ms=7.5) y consideraciones para la prevención de riesgos asociados en Costa Rica". *Rev. Geograf. de Amér. Centr.* Vol 1 n 56, 2016, p. 93.

QUESADA-ROMÁN, "A. Review of the geomorphological effects of the 1991 Limón earthquake". *Rev. Geológ. de Amér. Centr.* Vol 65, 2021,, p. 1–13.

QUESADA-ROMÁN, A. & PÉREZ-BRICEÑO, P. M. "Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica". *J of Maps.* Vol 15, n 2, 2019,p 363-371.

SANDOVAL-MURILLO, L. F. Y BARRANTES-CASTILLO, G. "Cambios en la cobertura de la tierra en los puntos calientes de erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005 – 2017". *Uniciencia.* Vol 35, n 2, 2021, p. 1-23.

STEPHENSON, T. Y JHORDANNE, J. "Impacts of Climate Change on Extreme Events in the Coastal and Marine Environments of Caribbean Small Island Developing States (SIDS)". *Science Review.* 2017, p. 10-22.

THOMAS, T., WILLIAMS, A., RANGEL-BUITRAGO, N., PHILLIPS, M. Y ANFUSO, G. "Assessing Embayed Equilibrium State, Beach Rotation and Environmental Forcing Influences; Tenby Southwest Wales, UK". *J. Mar. Sci. Eng.* Vol 4, n 30, 2016, p. 23.

YOUNG, I, ZIEGER, S., Y BABANIN, A. "Global Trends in Wind Speed and Wave Height". *Science.* 2011, p. 332-451.