

Geoformas litorales como indicadores del estado morfodinámico de las playas arenosas del litoral nororiental de Cuba

Beach landforms as indicators of the morphodynamics state of the sandy beaches of the northeastern coast of Cuba

Ridel Rodríguez Paneque*

Recibido: 18/12/2023. Aceptado: 15/02/2023. Publicado: 01/04/2024.

Resumen. Los modelos de clasificación de playa son ampliamente usados para describir el estado de la playa en respuesta a las condiciones ambientales reinantes y han establecido las bases teóricas sobre los modelos de perfil de equilibrio y en planta de una playa y sus diversas aplicaciones. En el estudio se determina el estado morfodinámico en 54 playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, a partir de la identificación de las geoformas litorales encontradas en trabajos de terrenos, para el periodo comprendido entre agosto de 2018 y marzo del año 2022, y las geoformas identificadas en imágenes satelitales de alta resolución de Google Earth Pro (CNES/Airbus, Maxar Technologies). Además, se comprobó en 12 playas representativas del litoral nororiental, si las geoformas litorales observadas en los trabajos de campo, indicativas de ciertos estados morfológicos, se corresponden con las pronosticadas mediante el parámetro adimensional Ω o Índice de Dean, que permite clasificar las playas en disipativas, reflejantes e intermedias. Como rasgos geomorfológicos fundamentales destacan un ancho medio de la playa superior a 50 m, una cara de 11 m de ancho y bermas estrechas o ausentes, con altura media de 1.35 m, sin la presencia de cúspides y topografías rítmicas, excepto en el 26% de las playas y únicamente en la etapa invernal. En la parte sumergida aparece una barra de arena de poca altura, sin la presencia de corrientes de resaca. La presencia de arrecifes coralinos que protegen las playas del oleaje de mayor altura, en el 93% de los casos, constituye el rasgo geomorfológico más significativo de las playas objeto de estudio. El cálculo del parámetro adimensional confirmó

que las playas del litoral nororiental de Cuba corresponden a estados morfodinámicos de tipo intermedio y tienden más a estados modales reflejantes que disipativos, resultados que se corresponden con las geoformas litorales y la granulometría de los sedimentos encontrados en las playas objetos de estudio. Aun cuando las características reportadas por investigadores australianos, para playas intermedias coincidan con los valores pronosticados mediante el cálculo del parámetro adimensional Ω y con las características sedimentarias de las playas, las geoformas reportadas por estos, para playas intermedias, no fueron encontradas en las playas objeto de estudio. En ellas no aparecen corrientes de retorno, cadenas de surcos litorales, terrazas de bajamar, marcada topografía rítmica y cúspides. Otros estudios también han señalado que no siempre se cumple la clasificación de las playas, que tiene en cuenta las características de las olas y la velocidad de caída de los sedimentos, propuestas por investigadores australianos, debido particularmente a la presencia de arrecifes coralinos cercanos a la costa, la baja energía del oleaje y el control geológico. A ello habría que añadir el predominio del transporte longitudinal de arena sobre el transporte transversal en el área de estudio. Los resultados confirman que la clasificación de las playas, atendiendo a su estado morfodinámico es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en las playas y un mejor conocimiento local y regional de las mismas. Además, reafirman la necesidad de contar con estudios específicos de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral, antes

* Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales de Holguín (CISAT). Calle 18 e/. 1ra y Maceo, Rpto. El Llano, Holguín, 80100, Cuba. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2232-9937>. E-mail: alex.ridel@gmail.com; ridel@cisat.cu

de extrapolar modelos de perfil de equilibrio en playas y las ecuaciones que se derivan de ellos en las actuaciones para el control de la erosión.

Palabras claves: playas biogénicas, hidrodinámica, geomorfología litoral, arrecifes coralinos, regeneración de playas

Abstract. Beach classification models are widely used to describe the state of the beach in response to the prevailing environmental conditions and have set the theoretical grounds for equilibrium and in-plant profile models of a beach and their various applications. This study determined the morphodynamic state of 54 sandy biogenic beaches on the northeast coast of Cuba. This was done based on the identification of coastal geoforms found in land works between August 2018 and March 2022 and the geoforms identified in high-resolution satellite images from Google Earth Pro (CNES/Airbus, Maxar Technologies). In addition, on 12 representative beaches on the northeast coast, we explored whether the coastal geoforms indicative of certain morphological states observed during fieldwork match those predicted by the Ω dimensionless parameter or Dean's index, which classified beaches as dissipative, reflective, and intermediate. The main geomorphological features include an average beach width of more than 50 m, an 11 m-wide face, and a narrow or absent flat zone with a mean height of 1.35 m, lacking cusps and rhythmic topography, except for 26 % of beaches and only in winter. The submerged zone shows a low sand bar without rip currents. Coral reefs that protect the beaches from the highest waves in 93 % of the cases represent the distinctive geomorphological

feature of the beaches studied. The dimensionless parameter confirmed that the beaches of Cuba's northeast coast correspond to intermediate morphodynamic states with a trend toward reflective rather than dissipative modal states. These findings correspond to the coastal geoforms and sediment granulometry on the beaches studied.

The figures obtained with the dimensionless parameter Ω and the sedimentary characteristics of the beaches are consistent with the characteristics of intermediate beaches reported by Australian researchers, but we did not find the geoforms for intermediate beaches reported by them. The beaches studied showed no rip currents, chains of coastal furrows, low-tide terraces, marked rhythmic topography, and cusps. Other studies have also pointed out that the beach classification proposed by Australian researchers, which considers the characteristics of waves and the sedimentation rate, is not always applicable. In the study area, this is mainly due to the presence of coral reefs close to the coast, low wave energy, and the influence of geological factors, in addition to the prevalence of longitudinal over transverse sand transport. Our results confirm that beach classification considering their morphodynamic state is essential to understanding the spatio-temporal dynamics of the hydrodynamic processes on beaches and contributes to a better local and regional knowledge of them. In addition, they highlight that the hydrodynamic and sedimentary characteristics of each coastline should be studied before using beach equilibrium profile models and the equations derived from them for erosion control actions.

Keywords: biogenic beaches, hydrodynamics, coastal geomorphology, coral reefs, beach regeneration.

INTRODUCCIÓN

Las playas constituyen sistemas dinámicos en constante proceso de cambio como consecuencia directa del clima marítimo que las afecta, y en un proceso de balance entre las pérdidas e ingresos de sus sedimentos. La granulometría, la formación en planta y la sección transversal de la playa son elementos activos, cuya estabilidad dinámica depende, fundamentalmente, de la estabilidad energética y del ángulo de incidencia de los oleajes (Zenkovich, 1967; Medina *et al.*, 2001; Bird y Lewis, 2015; Alemán *et al.*, 2015; Casamayor *et al.*, 2022; Castelle y Masselink, 2023).

A largo plazo, la playa tenderá a presentar un perfil determinado por las características del sedimento, las condiciones medias del oleaje y el estado previo de la playa (Short, 2006; Scott *et al.*, 2011 y Merlotto *et al.*, 2013; Vos *et al.*, 2019). Sin embargo, como las variaciones de los diferentes agentes

(oleaje, marea, tamaño del grano de sedimento) están acotadas en una playa, la variabilidad del perfil está limitada en el tiempo, pudiéndose definir un estado modal o más frecuente para ciertos periodos de tiempo (Vidal *et al.*, 1995; Bernabeu *et al.*, 2003; Schwartz, 2005; Ruggiero *et al.*, 2016; Vos *et al.*, 2019).

Este comportamiento de las playas permitió la formulación de modelos de clasificación de las playas que reconocen la existencia de distintos estados morfológicos en respuesta a las condiciones ambientales predominantes. A partir de esto se han establecido las bases teóricas sobre los modelos de perfil de equilibrio y en planta de una playa y sus diversas aplicaciones, tanto en la ecología de playa (McLachlan y Defeo, 2017; McLachlan *et al.*, 2018), la gestión de la seguridad de los bañistas (Scott *et al.*, 2009, Scott *et al.*, 2011, Scott *et al.*, 2016, Gadkari y Das, 2023), así como el comportamiento dinámico, respuesta y efectividad de los

proyectos de regeneración de playas (González *et al.*, 2010; Yoshida *et al.*, 2014; Ludka *et al.*, 2018; Pranzini *et al.*, 2018; Carvalho y Woodroffe, 2023; Zhou *et al.*, 2023).

Wright y Short (1984) desarrollaron un modelo de morfología de la playa como una función del oleaje y del tamaño del grano del sedimento, que define el modo en que la energía del oleaje incidente se distribuye a lo largo del perfil y permite clasificar las playas en disipativas, reflejantes y cuatro estadios intermedios. Ellos encontraron que el Índice de Dean, o parámetro adimensional Ω , podía usarse para describir el estado morfodinámico modal de la playa.

Por otra parte, Dean (1977), al estudiar el comportamiento de los perfiles de playa en la costa este de los Estados Unidos y el Golfo de México, comprobó que los perfiles de playa se ajustaban adecuadamente a la función $h(y)=Ay^{(m)}$, donde (y) es la distancia en metros perpendicular a la dirección de la orilla, (h) la profundidad en metros y (A) un factor de escala dependiendo del diámetro medio de la arena nativa (D_{50}), y el exponente (m) un valor teórico relacionado con la energía del oleaje. Resultados similares habían sido reportados por Bruun (1954), en el análisis de perfiles de playa en la costa norte danesa y de Mission Bay, California.

Con base en el modelo de perfil de equilibrio de playa propuesto por Dean (1977), luego Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004) proponen un grupo de ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playas, las cuales son ampliamente utilizadas. Sin embargo, estas ecuaciones y modelos propuestos por Dean (1991) son válidas únicamente para el caso de playas disipativas y no pueden ser extrapoladas a costas donde sus playas tengan un comportamiento morfodinámico diferente.

Como fundamentos teóricos de los trabajos de regeneración de playa para mitigar los efectos de la erosión en las playas cubanas se han utilizado los modelos y ecuaciones matemáticas desarrollados por Dean (1991); sin embargo, no hay estudios en Cuba sobre el estado morfodinámico modal de las playas que respalden el uso de los modelos y ecuaciones desarrolladas por Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004) para playas disipativas.

Atendiendo a estos elementos, el objetivo de la presente investigación es determinar el estado morfodinámico modal de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, siguiendo el modelo conceptual de Wright y Short (1984), a partir de la identificación de geoformas litorales distintivas, de ciertos estados morfodinámicos, así como las características granulométricas de sus arenas. Además, comprobar en 12 playas representativas del litoral nororiental si los estados morfológicos observados en los trabajos de campo se corresponden con los pronosticados mediante el parámetro adimensional Ω o Índice de Dean.

Para la investigación fueron seleccionadas 54 playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba que recogen las principales características de las playas en cuanto a granulometría, composición genética de sus arenas, exposición al oleaje, forma y configuración de la línea litoral, entre otros aspectos. Los trabajos de terreno se realizaron en el periodo de agosto de 2018 hasta marzo de 2022, e incluyó la identificación y medición de las geoformas litorales, el muestreo y análisis en laboratorio de las arenas y la interpretación de imágenes satelitales de Google Earth.

ÁREA DE ESTUDIO

El litoral nororiental de Cuba, desde Punta Quemado (20°N; 74°W), el extremo más oriental de Cuba, hasta Punta Maternillo (21°N; 77°W), en la bahía de Nuevitas, tiene una extensión de 1402 km, incluyendo las costas interiores de las numerosas bahías que allí se encuentran. De estos, 474 km están expuestos a los efectos directos del oleaje proveniente del océano Atlántico y representan el 8.2 % de las costas exteriores de la isla de Cuba (Figura 1).

Desde el punto de vista dinámico, este litoral está sometido a la acción persistente del oleaje durante todo el año. Del total de rumbos incidentes, los rumbos este (53,09%), nordeste (9,75%), norte (5,48%) y sureste (8,94%), tienen una frecuencia superior al 77%. Esto se debe a que Cuba, y particularmente el litoral nororiental, es afectado durante casi todo el año por los vientos alisios, debido

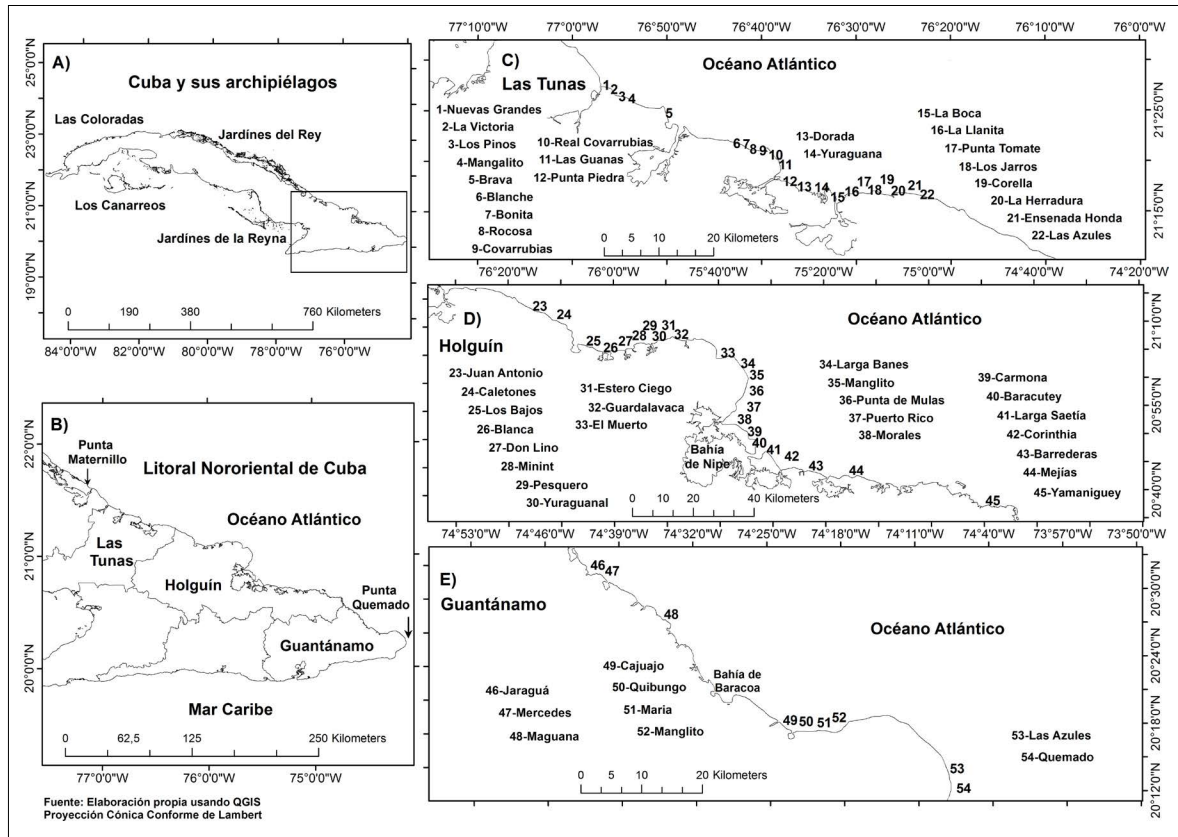


Figura 1. Contexto geográfico del área de estudio. A) Isla de Cuba y posición de los archipiélagos. B) Litoral nororiental de Cuba. C), D), E) Playas consideradas en el estudio por provincia.

a la presencia, casi permanente, del anticiclón del Atlántico Norte sobre las Islas Azores. El resto de los rumbos no tienen influencia en la zona de estudio o su influencia es muy baja, por lo que su tiempo de acción puede ser considerado como tiempo de calma (Figuras 2A, 2B y 2C).

Las mayores alturas medias del oleaje significativo (H_s) corresponden a los rumbos norte y noroeste: 2.00 m y 1.99 m, respectivamente (Figura 2B), lo que está relacionado con la entrada de los frentes fríos y los vientos fuertes acompañantes. Aunque hay un predominio de los oleajes del este y nordeste, el oleaje de los rumbos norte y noroeste resultan más energéticos y por tanto tienen una fuerte repercusión en los procesos litorales. Este hecho fue reportado con anterioridad por Rodríguez-Paneque y Córdova (2005 y 2010) al evaluar la efectividad de los trabajos de

alimentación artificial de playas ejecutados en las playas Estero Ciego y Don Lino.

Las playas, por su parte, están constituidas principalmente por arenas de grano medio, formada a partir de los restos esqueléticos de organismos marinos, fundamentalmente moluscos, corales, foraminíferos y algas calcáreas, de ahí su génesis biogénica.

Aunque todas las playas se encuentran en la costa norte de Cuba, el 54% tienen una orientación general este-oeste, el 22% una orientación norte-sur, el 17 % una noroeste-sureste y el 7 % noreste-suroeste. Debido a esta orientación y la configuración de la línea de costa, así como la alta persistencia de oleajes de componente este y noreste, se establece una deriva litoral neta en dirección noroeste y, ocasionalmente, en el periodo entre noviembre y abril (etapa invernal), se establece una deriva litoral en sentido inverso.

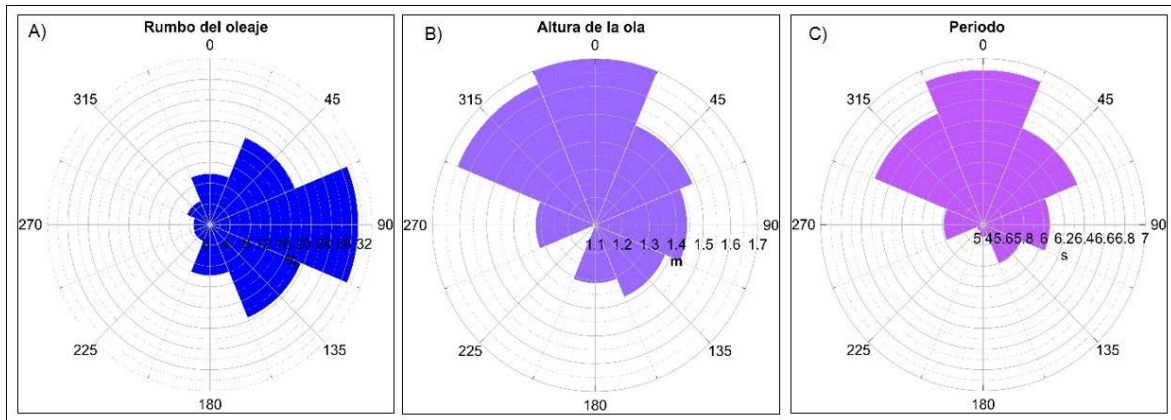


Figura 2. Estadística del clima de oleaje por rumbos de incidencia. A) Distribución porcentual del oleaje por rumbos, B) altura de la ola significativa para aguas profundas (Hs), C) periodo de la ola (Ts). Fuente: Rodríguez-Paneque y Finkl (2020).

En este litoral se registran las mayores amplitudes de marea del archipiélago cubano; su amplitud media no supera los 0.56 m y clasifica como mixta semidiurna irregular, por lo que las playas localizadas aquí son clasificadas como micro mareales, similares a las estudiadas por Wright y Short (1984).

MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación del estado morfológico modal de las playas se realizó utilizando el método de Wright y Short (1984), a partir de la identificación de geoformas litorales distintivas de ciertos estados morfodinámicos, en 54 playas biogénicas, para la etapa de verano (agosto de 2018-2021) y para la etapa de invierno (febrero y marzo de 2019-2022). Para ello se confeccionó una tabla que contiene el nombre de la playa, el ancho total considerando el ancho de las dunas, ancho de la berma, altura de la cresta de la berma, la presencia o ausencia de cúspides, oscilaciones rítmicas, corrientes de retorno, arrecifes coralinos frontales, entre otras. La Figura 3 muestra los elementos morfológicos del perfil de playa.

Las mediciones de las geoformas fueron realizadas con cintas métricas de acero con un nivel de precisión $\pm 0,10$ m. La presencia de corrientes de retornos fue determinada mediante el empleo de

objetos a la deriva, la entrevista de personas que habitan el lugar y la propia experiencia personal de conocer la mayoría de las playas. La existencia de arrecifes coralinos es detectada visualmente a través de la espuma de la ola en un primer rompiente y por fotos satelitales de Google Earth, verificadas *in situ* mediante buceo autónomo.

Para comprobar, si los estados morfológicos observados en el terreno se correspondían con los pronosticados mediante el parámetro adimensional Ω o Índice de Dean (Dean y Dalryple, 2004) (Ec.1), se seleccionaron 12 playas representativas del litoral nororiental, que recogen las principales características del resto de las playas en cuanto a granulometría, composición genética de sus arenas, exposición al oleaje, forma y configuración de la línea litoral, entre otros aspectos. Este Índice permite clasificar las playas en disipativas, reflejantes e intermedias, atendiendo a los parámetros de la ola y la velocidad de caída de los sedimentos.

El parámetro adimensional, o índice de Dean (Ω), fue calculado, de manera independiente, para cada una de las etapas de muestreo (Ago/18, Feb/19, Ago/19, Feb/20, Ago/20, Feb/21, Ago/21, Mar/22). Como estado morfodinámico fue elegida la condición modal, es decir, el estado más frecuente, considerando todas las etapas de muestreo. El parámetro adimensional fue calculado mediante la ecuación 1 (Ecuación 1).

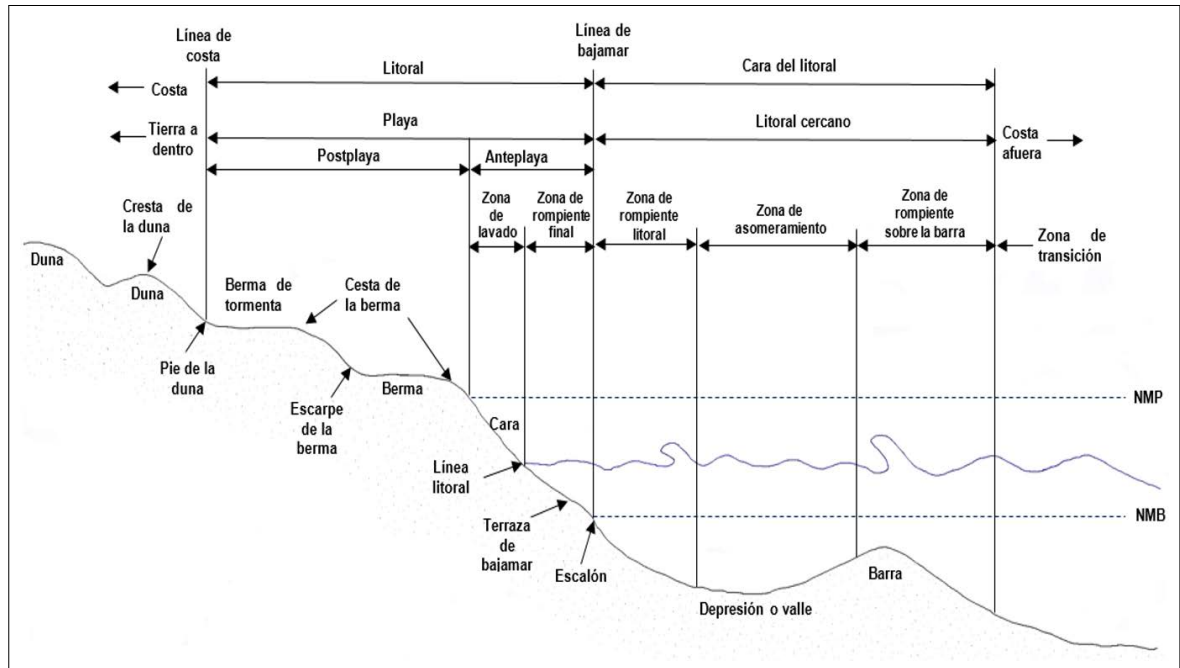


Figura 3. Posición y amplitud de los elementos morfológicos del perfil de playa. Fuente: elaboración propia a partir del Coastal Engineering Manual (2010).

$$\Omega = \frac{H_b}{w_s T} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde H_b es la altura de la ola de rompiente, w_s la velocidad de caída del sedimento y T , periodo de la ola de rompiente. Los datos de sedimentos y oleajes están referidos a valores promedio.

Según esta ecuación, el valor 1 define el umbral de una playa reflejantes a intermedia, un valor 6, un umbral de intermedia a disipativa, por lo que las playas de tipo intermedias tienen un valor mayor que 1 e inferior a 6. Para Wright y Short (1984), los cuatros estadios intermedios representan las más complejas formas morfológicas del perfil de playa y de los procesos costeros que intervienen en su formación.

Los datos de oleaje están referidos a la cuadrícula 33 del *Global Wave Statistics*, que aporta información relativa a la altura de la ola significativa (H_s) y el periodo (T) para el área geográfica donde se localiza el litoral nororiental de Cuba (Figuras 2B y 2C). Para el cálculo de la altura de la ola en

rompiente (H_b), se utilizó el software Ola 2.0, desarrollado por Cordobés y Rodríguez-Paneque (2008), el cual permite realizar la transformación del oleaje, desde aguas profundas hasta la playa, siguiendo las consideraciones de la teoría lineal de oleaje. Como datos de entrada, se introducen los datos de oleaje en aguas profundas (H_s) y se carga un perfil con la profundidad y morfología del fondo, para cada uno de los rumbos de incidencia sobre la playa. Para ello se les dieron continuidad a los perfiles de playas, mediante líneas de sondeo (batimetría), con un ecosonda Foruno (precisión de ± 0.10 m), hasta cubrir toda la pendiente sumergida. Los sondeos fueron corregidos en función de la altura de la marea.

En la totalidad de las 12 playas, se llevaron a cabo ocho muestreos sedimentológicos, cuatro para la temporada de verano (agosto de 2018-2021) y los otros cuatro muestreos para el invierno (febrero/marzo de 2019-2022), que incluyó la toma de cinco muestras por perfil distribuidos de la siguiente manera: base de la duna al mar, berma, cara de la playa, primera barra de arena y el valle, ambos en

la pendiente submarina. Los perfiles de muestreo se encuentran localizados en la zona central y a ambos extremos de las playas, de manera que pudiera definirse, con exactitud, las características de la arena nativa de cada playa.

Para el procesamiento de las muestras de arena se siguió el método de ensayo estándar para el análisis del tamaño de las partículas de suelos, según normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D-422-98 y D-854-92. Como diámetro medio se utilizó la mediana, es decir, el percentil 50 (D_{50}) en la curva de distribución granulométrica y en su clasificación se utilizó la escala Wentworth, (1922). Por su parte, el coeficiente de selección (S_o) se determinó mediante la expresión (Ecuación 2):

$$S_o = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Q_3 y Q_1 son los percentiles 75 y 25, respectivamente, en la curva de distribución granulométrica (Pettijohn, 1956). Para la clasificación del coeficiente de selección (S_o), se siguió la escala de siete valores, usada por Blott y Kenneth (2001).

Para cada diámetro de arena se determinó la velocidad de caída (w_s) mediante un diseño experimental similar al empleado por Gibbs *et al.* (1971), aunque en este caso utilizando un tubo de vidrio de 1000 mm de longitud y un diámetro interior de 62.25 mm, de los cuales 310 mm estaban graduados en la parte inferior del mismo. Los ensayos fueron realizados en agua destilada a una temperatura de 24 °C, monitoreados permanentemente a través de un termómetro colocado en el extremo superior del tubo y filmados con una cámara fotográfica digital de 12.0 megapíxeles de resolución, la cual permite distinguir la trayectoria de las partículas de arena a través del tubo. Posteriormente fueron realizadas las diferentes correcciones necesarias.

RESULTADOS

Se presentan los resultados para 54 playas biogénicas donde se estudiaron las geoformas litorales y las

características de sus sedimentos, como indicadores de su estado morfodinámico, a través de trabajos de terreno durante cuatro años.

Identificación de las geoformas litorales

El estudio evidenció que el 93% de las playas del litoral nororiental tenían arrecifes coralinos frangeantes, casi paralelos a la costa, a una distancia promedio de 500 metros. Estos arrecifes están adosados generalmente al extremo este de los litorales y constituyen barreras donde rompe el oleaje oceánico y luego se reforma, en ondas de menor altura, al encontrar aguas más profundas. Ello hace que las playas reciban un oleaje atenuado, de altura inferior a un metro durante casi todo el año.

El 54% de las playas no poseían berma o resultaban inferiores a 14 metros de ancho, y en el 37% de ellas la berma estaba totalmente ausente. En este caso, la cara de la playa colinda directamente con la base de la duna, la cual mostró, en ocasiones, escarpes que denotan la ocurrencia de procesos erosivos. Esta situación no mejoró para el verano, donde el 35% de las playas no tenían berma, en tanto las playas con bermas inferiores a los 14 metros se incrementaron hasta el 24%, sin diferencias significativas entre los valores promedios, del ancho de la berma, tanto para el verano como para el invierno, aunque con un ligero aumento de su ancho durante el verano (Tabla 1).

Como se aprecia en la Tabla 1, hubo un ligero aumento en el ancho de la cara y la altura de la berma durante el invierno. En términos generales, las playas tenían una sola cresta de berma, sin embargo, para el invierno, en el período comprendido entre 2020 y 2022, entre el 20% y el 23% de las playas contaban con dos crestas de berma.

En promedio entre el 30% y el 33% de las playas no tenían barra de arena en la pendiente sumergida, sin embargo, esta cifra se redujo para el invierno, donde el 17% de las playas no contaban con barra y al menos el 20% de ellas poseían dos barras, condición que únicamente se observó para la temporada invernal. Las barras estaban generalmente a una profundidad entre 1 y 2 metros y a una distancia inferior a los 100 m de la línea litoral.

En ninguna de las etapas de muestreos fueron encontradas corrientes de retorno, ni cúspides;

Tabla 1. Valores promedio de los elementos morfológicos del perfil de playas en el litoral nororiental.

| Elementos geomorfológicos | Verano (agosto) | | | | Invierno (febrero-marzo) | | | |
|---------------------------|-----------------|----------|----------|----------|--------------------------|---------|----------|----------|
| | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Ancho total | 66 m | 68 m | 67 m | 67 m | 65 m | 62 m | 62 m | 63 m |
| Ancho cara | 11 m | 11 m | 11 m | 11 m | 12 m | 12 m | 12 m | 12 m |
| Ancho berma | 13 m | 13 m | 14 m | 14 m | 12 m | 12 m | 11 m | 11 m |
| Altura de la berma | 1,33 m | 1,38 m | 1,36 m | 1,36 m | 1,38 m | 1,38 m | 1,40 m | 1,38 m |
| Nº. de cresta de berma | 1(100 %) | 1(100 %) | 1(100 %) | 1(100 %) | 1(100 %) | 2(22%) | 2(20%) | 2(23%) |
| Nº. de barras | 0(33 %) | 0(31 %) | 0 (30 %) | 0 (30 %) | 2 (4%) | 2 (20%) | 2 (16 %) | 2 (21 %) |
| Presencia cúspides | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oscilaciones rítmicas | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 % | 22 % | 25% | 26 % |
| Corrientes de resaca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Granulometría media | 0,36 mm | 0,39 mm | 0,38 mm | 0,39 m | 0,40 mm | 0,42 m | 0,44 mm | 0,43 mm |
| Coefficiente de selección | 1,533 | 1,820 | 1,857 | 1,928 | 1,970 | 2,130 | 2,170 | 2,740 |

sin embargo, durante el invierno, el 26% de las playas mostraban pequeñas topografías rítmicas (Figura 4), particularmente en las porciones de las playas más expuesta al oleaje oceánico. Las topografías rítmicas no se apreciaron en el muestreo de agosto de 2018, por lo que es una condición que ha comenzado a aparecer en los últimos años de muestreo y particularmente durante el invierno. Observaciones realizadas con posterioridad evidenciaron que estas geoformas se mantienen hasta mediados del mes de abril.

En términos generales, las playas del litoral nororiental, en el periodo de estudio, se caracterizaron por poseer un ancho medio superior a 50 m, una cara de playa de 11 m de ancho y bermas estrechas, en muchos casos ausentes, para dar paso a una, a veces dos, cadenas de dunas. Las playas mostraron el predominio de arenas de granulometría media, con una sola cresta de berma de alturas entre 1.25 y 1.35 m, como promedio y una barra de arena en la pendiente submarinas, sin cúspides ni corrientes de retorno.

Sedimentos

El estudio de los sedimentos evidenció el predominio de arena de grano medio (0.25-0.50 mm),

según clasificación Wentworth, aunque con ligeras diferencias entre las temporadas de invierno y verano. En promedio, para el verano, el 83% de las playas estaban constituidas por arenas de grano medio, un 8% por arena gruesas (>0,50 mm) y un 9% por arenas finas (<0,25 mm). Esta condición cambió ligeramente durante el invierno, donde las arenas medias disminuyen hasta el 72%, en tanto se incrementan las arenas gruesas, llegando a alcanzar el 20%. De manera individual, el 89% de las playas incrementaron su granulometría durante el invierno (Tabla 2).

La granulometría media promedio para el verano fue de 0.39 mm, sin embargo, para la temporada de invierno alcanzó los 0.43 mm, aunque en términos generales hubo un ligero aumento de la granulometría, tanto durante el verano como en el invierno, durante los años de observación.

En cuanto al coeficiente de selección (S_o), durante el verano, el 83% de las playas tenían sus arenas entre moderadamente seleccionadas o muy bien seleccionadas ($S_o < 1,27-2,00$) y un 14% de las arenas entran en el rango de pobremente seleccionadas ($S_o > 2,00-4,00$). Esta condición cambió durante el invierno donde el 74% de las playas te-



Figura 4. Pequeñas topografías rítmicas en dos playas. En las imágenes de Google Earth apenas son apreciables. A y B), playa Yuraguanal; C y D), playa Guardalavaca: las grandes irregularidades de la línea litoral apreciable en la imagen de Google Earth obedece a reflexión de la ola en el arrecife de coral.

nían sus arenas entre moderadamente seleccionadas o muy bien seleccionadas y un 26% de las arenas entraron en el rango de pobremente seleccionada. Durante el verano las arenas tenían un coeficiente de selección promedio de 1768 en tanto en el invierno es de 1894, aunque en términos absolutos el 70% de las playas incrementaron su coeficiente de selección para el invierno.

Cálculo del estado morfodinámico modal o índice de Dean

La Tabla 3 muestra el estado morfodinámico modal (Ω) de las doce playas y los datos utilizados para su cálculo.

Como se aprecia en la Tabla 3, se obtuvieron valores de Ω entre 1 y 4. Estos resultados demuestran que las playas del litoral nororiental de Cuba son de tipo intermedio (83%), y los 17% restantes corresponden a estado modal reflejante, no existiendo ningún caso de estado modal disipativo.

Dentro de las playas de tipo intermedio, el 60% tuvieron un valor de $\Omega=2$, un 30% un valor de $\Omega=3$, y el 10 % restante corresponden a playas con un valor de $\Omega=4$, no existiendo valores de Ω igual 5 y 6. Ello demuestra que las playas del litoral nororiental de Cuba tienden más a estados morfodinámicos reflejantes que disipativos.

Características de los estados morfológicos de las playas del litoral nororiental

La Figura 5 resume los principales rasgos morfológicos encontrados en las playas del litoral nororiental y muestra cuatro estadios modales donde es posible encontrar diferencias, aunque en algunos casos también similitudes, como el caso de los estados morfodinámicos modales $\Omega=1$ y $\Omega=4$, particularmente en la forma y configuración del perfil en la parte emergida. A continuación, se resumen las principales características halladas mediante la clasificación de las playas atendiendo al índice de Dean.

Tabla. 2. Granulometría media promedio y coeficiente de selección de las arenas de las playas del litoral nororiental de Cuba.

| Nombre playa | Verano | | | Invierno | | | Nombre playa | Verano | | | Invierno | | |
|---------------|----------|-------|-----------|----------|-------|-----------|--------------|----------|-------|-----------|----------|-------|-----------|
| | D50 (mm) | So | Clasif. | D50 (mm) | So | Clasif. | | D50 (mm) | So | Clasif. | D50 (mm) | So | Clasif. |
| N. Grandes | 0,35 | 1,440 | A. Media | 0,39 | 1,473 | A. Media | Minint | 0,53 | 1,424 | A. Gruesa | 0,59 | 1,440 | A. Gruesa |
| La Victoria | 0,49 | 1,659 | A. Media | 0,54 | 1,660 | A. Gruesa | Pesquero | 0,32 | 1,533 | A. Media | 0,36 | 1,659 | A. Media |
| Los Pinos | 0,28 | 1,899 | A. Media | 0,30 | 1,576 | A. Media | Yuraguanal | 0,24 | 1,547 | A. Fina | 0,27 | 1,899 | A. Media |
| Manglito (1) | 0,47 | 1,970 | A. Media | 0,51 | 1,560 | A. Gruesa | Estero Ciego | 0,31 | 1,630 | A. Media | 0,35 | 1,744 | A. Media |
| Brava | 0,31 | 1,655 | A. Media | 0,35 | 2,131 | A. Media | Guardalavaca | 0,21 | 1,846 | A. Fina | 0,23 | 1,984 | A. Fina |
| Blanche | 0,32 | 1,750 | A. Media | 0,36 | 1,920 | A. Media | Del Muerto | 0,42 | 2,130 | A. Media | 0,47 | 1,750 | A. Media |
| Bonita | 0,30 | 1,812 | A. Media | 0,32 | 1,590 | A. Media | Larga | 0,36 | 1,755 | A. Media | 0,40 | 1,855 | A. Media |
| Rocosa | 0,46 | 1,790 | A. Media | 0,49 | 2,090 | A. Media | Manglito (2) | 0,43 | 1,424 | A. Media | 0,48 | 2,170 | A. Media |
| Covarrubias | 0,46 | 1,630 | A. Media | 0,48 | 1,675 | A. Media | P. de Mulas | 0,42 | 1,670 | A. Media | 0,48 | 2,360 | A. Media |
| R.Covarrubias | 0,29 | 1,846 | A. Media | 0,31 | 1,750 | A. Media | Puerto Rico | 0,44 | 1,410 | A. Media | 0,50 | 1,836 | A. Media |
| Las Guanias | 0,30 | 2,130 | A. Media | 0,31 | 1,548 | A. Media | Morales | 0,49 | 2,170 | A. Media | 0,56 | 1,424 | A. Gruesa |
| Punta Piedra | 0,22 | 1,650 | A. Fina | 0,19 | 1,465 | A. Fina | Carmona | 0,45 | 1,615 | A. Media | 0,51 | 1,533 | A. Gruesa |
| Dorada | 0,51 | 1,579 | A. Gruesa | 0,53 | 1,792 | A. Gruesa | Baracutey | 0,40 | 1,770 | A. Media | 0,46 | 1,547 | A. Media |
| Yuraguana | 0,42 | 1,710 | A. Media | 0,44 | 1,870 | A. Media | Larga | 0,54 | 1,880 | A. Gruesa | 0,60 | 1,958 | A. Gruesa |
| La Boca | 0,21 | 1,630 | A. Fina | 0,23 | 1,517 | A. Fina | Corinthia | 0,38 | 1,875 | A. Media | 0,43 | 1,846 | A. Media |

Tabla. 2. Continuación.

| Nombre playa | Verano | | | Invierno | | | Nombre playa | Verano | | | Invierno | | |
|-----------------|-------------|-------|--------------|-------------|-------|--------------|-----------------|-------------|-------|--------------|-------------|-------|--------------|
| | D50 (mm) | So | Clasif. | D50 (mm) | So | Clasif. | | D50 (mm) | So | Clasif. | D50 (mm) | So | Clasif. |
| La Llanita | 0,33 | 3,755 | A. Media | 0,35 | 2,530 | A. Media | Barrederas | 0,36 | 2,110 | A. Media | 0,34 | 2,130 | A. Media |
| Punta Tomate | 0,36 | 1,850 | A. Media | 0,38 | 1,541 | A. Media | Mejías | 0,45 | 1,460 | A. Media | 0,39 | 1,736 | A. Media |
| Los Jarros | 0,57 | 1,955 | A. Gruesa | 0,59 | 1,912 | A. Gruesa | Yamanigüey | 0,41 | 1,241 | A. Media | 0,45 | 1,630 | A. Media |
| Corella | 0,33 | 1,485 | A. Media | 0,35 | 1,985 | A. Media | Jaragua | 0,21 | 1,410 | A. Fina | 0,23 | 1,545 | A. Fina |
| La Herradura | 0,45 | 1,670 | A. Media | 0,49 | 1,630 | A. Media | Mercedes | 0,47 | 2,370 | A. Media | 0,47 | 2,996 | A. Media |
| Ens. Honda | 0,43 | 1,750 | A. Media | 0,47 | 1,820 | A. Media | Maguana | 0,44 | 1,615 | A. Media | 0,49 | 1,930 | A. Media |
| Las Azules | 0,29 | 1,424 | A. Media | 0,31 | 1,654 | A. Media | Cajuaño | 0,37 | 1,875 | A. Media | 0,41 | 2,290 | A. Media |
| Juan Antonio | 0,48 | 1,535 | A. Media | 0,52 | 2,740 | A. Media | Quibungo | 0,43 | 1,956 | A. Media | 0,48 | 2,420 | A. Media |
| Calerones | 0,38 | 1,680 | A. Media | 0,42 | 2,580 | A. Media | María | 0,58 | 1,982 | A. Gruesa | 0,55 | 2,130 | A. Gruesa |
| Los Bajos | 0,39 | 1,558 | A. Media | 0,43 | 1,910 | A. Media | Manglito (3) | 0,51 | 2,110 | A. Gruesa | 0,47 | 2,515 | A. Media |
| Blanca | 0,23 | 2,420 | A. Fina | 0,25 | 2,962 | A. Media | Las Azules | 0,53 | 1,460 | A. Gruesa | 0,49 | 1,416 | A. Media |
| Don Lino | 0,55 | 1,540 | A. Gruesa | 0,61 | 1,839 | A. Gruesa | Quemado | 0,43 | 1,441 | A. Media | 0,49 | 1,820 | A. Media |

Tabla 3. Estado morfodinámico de las playas del litoral nororiental de Cuba.

| Playa | Datos del sedimento | | Estado morfodinámico | |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | D ₅₀ (mm) | w _c (m/s) | Ω | Estado modal |
| Maguana | 0,45 | 0,071 | 2 | Intermedio-reflejante |
| Guardalavaca | 0,23 | 0,042 | 3 | Intermedio |
| Estero Ciego | 0,32 | 0,056 | 3 | Intermedio |
| Yuraguanal | 0,25 | 0,045 | 2 | Intermedio-reflejante |
| Pesquero | 0,31 | 0,054 | 3 | Intermedio |
| Minint | 0,55 | 0,080 | 1 | Reflejante |
| Don Lino | 0,57 | 0,082 | 1 | Reflejante |
| Blanca | 0,23 | 0,042 | 4 | Intermedio-disipativo |
| Los Bajos | 0,41 | 0,068 | 2 | Intermedio-reflejante |
| Corella | 0,32 | 0,056 | 2 | Intermedio-reflejante |
| Punta Tomate | 0,37 | 0,063 | 2 | Intermedio-reflejante |
| La Llanita | 0,34 | 0,059 | 2 | Intermedio-reflejante |

Valor de Ω=1. Reflejante

En esta condición fueron encontradas el 17% de las playas. Estas fueron Don Lino y Minint. Como rasgo característico, destacaba el predominio de arenas gruesas (>0,50 mm), la ausencia de barras de arena en la pendiente submarina, una cara de playa de pendiente fuerte y la presencia de una cresta de berma bien definida, con una altura de 1.65 m, las más alta encontrada en las playas estudiadas. El arrecife de coral se encuentra muy cerca de la playa (menos de 100 m) por lo que la rotura del oleaje ocurría sobre la playa (Figuras 5A y 5B).

Valor de Ω=2. Terraza de Bajamar

El 50% de las playas consideradas para el cálculo del parámetro adimensional se encontraban en esta condición. Estas fueron: Maguana, Yuraguanal, Los Bajos, Corella, Punta Tomate y La Llanita. Como rasgo característico, destacó el predominio de arena de granulometría media (0.25-0.5 mm), una cresta de berma alta y bien definida y al menos una barra de arena en la pendiente sumergida. Los arrecifes de coral se disponen entre los 300 y 900 m de la costa. No aparecen las formas del relieve distintivas a la condición morfológica *Low Tide Terrace* de la clasificación de Wright y Short (1984) (Figuras 5C y 5D).

Valor de Ω=3. Barra Transversal y Corriente de Retorno

En esta condición fueron encontradas el 25% de las playas. Estas fueron Estero Ciego, Guardalavaca y Pesquero. Como rasgo característico destacaba también el predominio de arena de granulometría media (0.25-0.5 mm), una cresta de berma bien definida y al menos una barra de arena en la pendiente sumergida. Los arrecifes costeros se encuentran más distantes, entre 600 y 700 m de la costa. Las formas del relieve son las mismas encontradas para la condición anterior. No aparecen las formas del relieve correspondientes a la condición morfológica *Transverse Bar and Rip* de la clasificación de Wright y Short (1984) (Figuras 5E y 5F).

Valor de Ω=4. Barra y Playa rítmicas

En esta condición solo fue encontrada una de las doce playas evaluadas, playa Blanca. Como rasgo característico, destacaba el predominio de arenas de granulometría fina, una cresta de berma bien definida, fuerte pendiente en la parte sumergida de la playa y una barra de arena. En la cara de la playa aparecen pequeñas topografías rítmicas, por lo que hay una coincidencia puntual con la condición morfológica *Rhythmic Bar and Beach*, de la clasificación de Wright y Short (1984). Sin

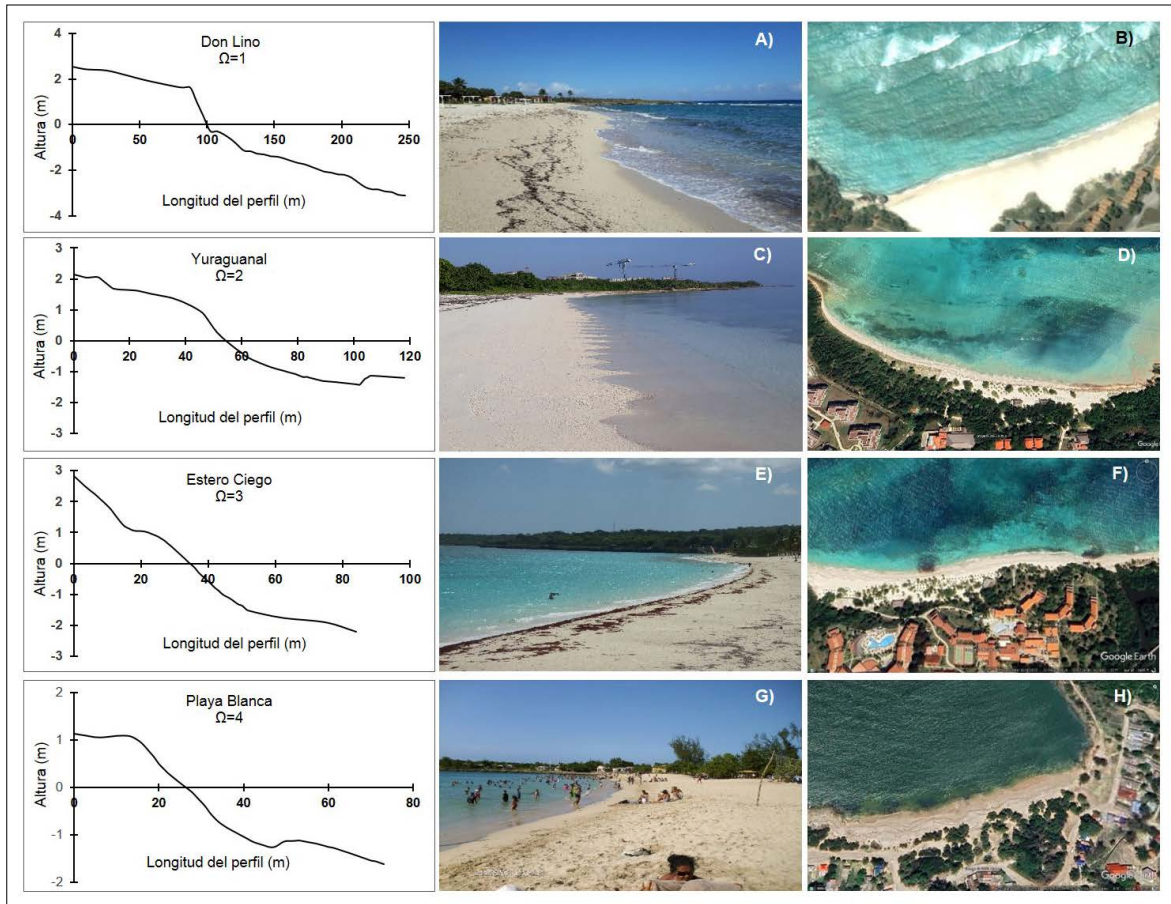


Figura 5. Principales rasgos geomorfológicos encontrados en las playas del litoral nororiental de Cuba.

embargo, es importante resaltar que las topografías rítmicas también fueron encontradas, para la etapa invernal, en las playas reflejantes ($\Omega=1$) (Figura 5B) y en playas intermedias ($\Omega=2$) (Figura 5C y 4D).

A modo de resumen, como elemento común en los estados morfodinámico de tipo intermedio ($\Omega=2, 3$ y 4), se apreció una cresta de berma bien definida con altura entre 1.15-1.35 m, una o dos barras de arena en la pendiente submarina y el predominio de arena de granulometría media o fina.

DISCUSIÓN

La presencia de arrecifes coralinos en el 93% de las playas constituye el rasgo geomorfológico más

significativo de las playas objeto de estudio. Junto a los organismos que viven en los pastizales marinos, estos arrecifes, constituyen la fuente principal de aporte de sedimentos y la razón fundamental del predominio de arenas de granulometría media en la mayoría de las playas, pues la fuente natural de aporte de sus arenas se encuentra muy próxima a ellas.

El hecho que el 54% de las playas no tuvieran berma o resultaran inferiores a los 14 metros de ancho son evidencias de los procesos erosivos que experimentan las playas de este litoral, tal y como han reportado Rodríguez-Paneque y Córdova (2006) y Rodríguez-Paneque y Finkl (2020).

El estrechamiento de las playas durante el invierno (Tabla 1) responde al comportamiento general de las playas durante esta época del año,

como dan cuenta diversos autores (Vidal *et al.*, 1995; Schwartz, 2005; Bird, 2008; Bird y Lewis, 2015; Konstantinou *et al.*, 2021). Durante el invierno, con olas de mayor altura, la pendiente de la playa se satura rápidamente y se intensifica el flujo de retorno, transportando parte de la arena a la pendiente submarina en forma de barras. Ello explica el incremento de la presencia de barras, encontradas en las playas durante la época invernal.

El ligero incremento de la altura de la berma y también un ligero incremento del ancho de la cara de la playa se explica porque durante la etapa invernal tienen lugar oleajes de mayor altura, capaces de avanzar, aún más, tierra adentro. Con el avance de la ola, se incrementa la altura de la berma o aparece una berma de tormenta, y en consecuencia generalmente se produce un ligero incremento del ancho de la cara (Bird y Lewis, 2015; Konstantinou *et al.*, 2021).

El predominio de arenas de granulometría media (0.25 -0.50 mm) encontrada en la mayoría de las playas del litoral nororiental, así como oleaje moderado, con altura entre 1.0-1.25 m, son características reportadas por Wright y Short (1984) y Short, (2006) para las playas con estado morfodinámico intermedio. La combinación de olas altas (mayores de 2.5 m) y arenas finas (D_{50}) inferior a 0.2 mm, reportada por estos investigadores para las playas disipativas, no son condiciones que se encuentren en las playas del litoral nororiental de Cuba.

Que el cálculo del parámetro adimensional arrojará que el 83% de las playas tenían estados morfodinámicos intermedio, confirma que las arenas de granulometría media y un oleaje moderado son elementos distintivos de las playas con estado morfodinámico intermedio, como habían reportado Wright y Short (1984) y Short (2006). Además, el hecho que los estados morfodinámicos encontrados en las playas tengan valores del parámetro adimensional Ω entre 1 y 4, confirma que las playas del litoral nororiental de Cuba tienden más a playas con estados morfodinámicos reflejantes que disipativos (Tabla 3).

Estos resultados coinciden con la condición intermedia reportada por Boon y Green (1989), al estudiar el perfil de equilibrio en playas del Caribe

bahameño, con características sedimentarias y de oleaje similares a las presentes en el litoral nororiental. Gadkari y Das (2023) reportan idénticos resultados para la costa norte de Mumbai, en la India, con un régimen hidrodinámico diferente al del área de estudio. También Feysat *et al.* (2024) encontraron resultados similares en playas micromareales del Mediterráneo, aunque con altura de olas similares a las playas del litoral nororiental de Cuba.

Los resultados confirman también los obtenidos por Goulart (2003), quien reporta el predominio de playas de tipo intermedio en la región subtropical, al estudiar la ocurrencia de estados de playa y los cambios de los factores físicos con la morfodinámica y la latitud, en 52 playas micro mareales localizadas en la zona tropical (Madagascar, noreste de Brasil), subtropical (sureste de Brasil) y templada (Sudáfrica y costa centro sur de Chile) de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico.

El hecho que en el litoral nororiental de Cuba aparezcan topografía rítmicas en el 26% de las playas, únicamente en el periodo invernal, obedece a dos condiciones fundamentales: 1) durante la etapa invernal hay una mayor frecuencia de oleajes de rumbo norte, el cual incide perpendicularmente sobre la costa, teniendo lugar un transporte de sedimento transversal a la playa; 2) durante la etapa invernal ocurren las mayores alturas del oleaje, lo cual hace que la ola tenga una mayor incidencia en la playa, particularmente durante las pleamares, al franquear el obstáculo que representan los arrecifes coralinos.

El transporte de sedimento transversal a la playa y oleaje de altura moderada (mayores de 2 m), son condiciones similares a las encontradas en las costas australianas donde fueron realizados los estudios por Wright y Short (1984), pero que ocurren solamente de manera muy puntual en el área de estudio. Ello explica porque las topografías rítmicas aparecen exclusivamente en el periodo invernal.

Aun cuando las características reportadas por Wright y Short (1984) y Short (2006) para playas intermedias coincidan con los valores pronosticados mediante el cálculo del parámetro adimensional Ω , y con las características sedimentarias de las playas, las geoformas reportadas por Wright y Short para playas intermedias no fueron encontradas en

las playas objetos de estudio. En ellas no aparecen corrientes de retorno, cadenas de surcos litorales, terrazas de bajamar, marcada topografía rítmica y cúspides, encontrando sólo en el 26% de las playas, pequeñas topografías rítmicas y únicamente en la etapa invernal.

Numerosos estudios también han señalado que no siempre se cumple la clasificación de las playas realizada por Wright y Short (1984), particularmente por la presencia de arrecifes coralinos cercanos a la costa (Short, 2010; Gallop *et al.*, 2020), la baja energía del oleaje (Aleman *et al.*, 2015), el control geológico (Hegge *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 2005; Short, 2010; Gallop *et al.*, 2020; Jackson *et al.*, 2022), entre otros factores. Estas condiciones señaladas se encuentran presentes en las playas del litoral nororiental de Cuba y explican, en alguna medida, el comportamiento de estas.

A ello habría que añadir el predominio del transporte longitudinal de arena sobre el transporte transversal, por la alta persistencia de los oleajes de rumbo del I cuadrante de la rosa de los vientos (E-N), durante casi todo el año. Además, la clasificación morfodinámica de las playas implica numerosos parámetros, como la granulometría y velocidad de caída de la arena, la dirección y altura del oleaje, el rango de mareas y la morfología del perfil de la playa, los cuales son cambiantes a lo largo de las costas del mundo.

Estos resultados confirman que la clasificación de las playas, atendiendo a su estado morfodinámico, es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en las playas y reafirman la necesidad de contar con estudios específicos de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral, antes de extrapolar modelos de perfil de equilibrio en playas y las ecuaciones que se deriven de ellos en las actuaciones para el control de la erosión. Tal es así que, las ecuaciones propuestas por Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004) para playas disipativas no serían extrapolables a playas con estados morfodinámicos diferentes sin que previamente se realicen los ajustes correspondientes.

Por otra parte, las costas caribeñas son muy variadas en su morfología, el grado de exposición a los oleajes predominantes, la génesis y características

de sus arenas, lo cual, junto con las perturbaciones generadas por tormentas tropicales y huracanes, influyen en sus características morfológicas e hidrodinámicas.

Aunque es necesario ampliar el número de playa objeto de estudio, lograr una mayor frecuencia de observaciones y por periodos más largos de tiempo, los resultados contribuyen a un mejor conocimiento local y regional de las playas y son de vital importancia para proponer soluciones para mitigar la erosión costera y mejorar el manejo y gestión de las mismas ante nuevos escenarios, como el aumento del nivel del mar.

Además, las incertidumbres derivadas de los vacíos de conocimientos deberían ser aprovechadas para desarrollar nuevas estrategias de gestión que optimicen la resiliencia costera, eviten la aplicación de modelos y herramientas inapropiados basados en playas con características hidrodinámicas y sedimentarias diferentes, especialmente con un clima cambiante e incierto y propongan nuevos modelos que predigan la respuesta de la playa al aumento del nivel del mar.

CONCLUSIONES

Las geoformas litorales encontradas en 54 playas destacan como rasgos geomorfológicos fundamentales un ancho medio de la playa superior a 50 m, una cara de 11 m de ancho y bermas estrechas o ausentes, con altura media de 1.35 m, sin la presencia de cúspides y topografías rítmicas, excepto en el 26% de los casos, exclusivamente en la época invernal. En la parte sumergida aparece una barra de arena de poca altura, sin la presencia de corrientes de resaca. La presencia de arrecifes coralinos, que protegen las playas del oleaje de mayor altura, constituye el rasgo geomorfológico más significativo de las playas objeto de este trabajo.

El estudio mostró el predominio de arenas de granulometría media (0.25 -0.50 mm) en la mayoría de las playas del litoral nororiental y una altura del oleaje inferior a una 1.0 m, características reportadas por Wright y Short (1984) y Short (2006) para las playas con estado morfodinámico intermedio.

Se comprobó, mediante el cálculo del parámetro adimensional, que las playas del litoral nororiental de Cuba corresponden a estados morfodinámicos de tipo intermedio y tienden más a estados modales reflejantes que disipativos, resultados que se corresponden con las geoformas litorales y la granulometría de los sedimentos encontrados en las playas objetos de estudio.

Las geoformas reportadas por Wright y Short para playas intermedias no fueron encontradas en las playas objeto de estudio. En ellas no aparecen corrientes de retorno, cadenas de surcos litorales, terrazas de bajamar, marcada topografía rítmica y cúspides.

Los resultados confirman que la clasificación de las playas, atendiendo a su estado morfodinámico, es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en las playas y un mejor conocimiento local y regional de las mismas. Además, reafirman la necesidad de contar con estudios específicos de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral, antes de extrapolar modelos de perfil de equilibrio en playas y las ecuaciones que se deriven de ellos en las actuaciones para el control de la erosión.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la contribución del Dr. José Manuel Cordobés por su ayuda en la programación y el desarrollo de las ecuaciones matemáticas para el experimento de velocidad de caída de arena en agua; a los ambientalistas José Benites, Juan Carlos Mustelier y Daniel Cobas, que acompañaron la realización de los trabajos de terreno, así como aquellos que ayudaron al procesamiento en laboratorio de las muestras de arena. Además, se agradece a los pares evaluadores por sus observaciones y recomendaciones.

REFERENCIAS

Aleman, N., Robin, N., Certain, R., Anthony E. J., y Barusseau, J. P. (2015). Longshore variability of

beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment. *Geomorphology*, 241, 175-191.

Bernabeu, M., Medina, R., y Vidal, C. (2003). Wave reflection on natural beaches: An equilibrium beach profile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 577-585.

Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: An Introduction* (Second Edition). John Wiley y Sons.

Bird, E., y Lewis, N. (2015). *Causes of Beach Erosion*. En *Beach Renourishment* (pp. 2-28). Springer International Publishing.

Blott, S. J. y Kenneth, P. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics Package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248. DOI: 10.1002/esp.261

Boon, J. D., y Green, M. O. (1989). Caribbean beach face slopes and beach equilibrium modes. *Proceeding 21 Coastal Engineering Proceedings*, 1(21). <https://doi.org/10.9753/icce.v21.120>

Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Technical memorandum 44.

Carvalho, R. C. y Woodroffe, C. D. (2023). Coastal compartments: the role of sediment supply and morphodynamics in a beach management context. *Journal of Coastal Conservation*, 27(58): 1-17. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11852-023-00984-6>

Casamayor, M., Alonso, I., Valiente, N. G., y Sánchez-García, M. J. (2022). Seasonal response of a composite beach in relation to wave climate. *Geomorphology*, 108245. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108245>

Castelle, B. y Masselink, G. (2023). Morphodynamics of wave-dominated beaches. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1(1), 1-13. Reino Unido. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.2>

Cordobés, J. M. y Rodríguez-Paneque, R. (2008). OLA 2.0: Una herramienta para el cálculo del oleaje incidente en la playa. CITMA.

Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts*. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report 12. University of Delaware.

Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7, 53-84.

Dean, R. G. y Dalryple, R. A. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.

Feyssat, P., Certain, R., Robin, N., Barusseau, J. P., Lamy, A., Raynal, O., y Hebert, B. (2024). Morphodynamics of two Mediterranean microtidal beaches presenting permanent megacusps under the

- influence of waves and strong offshore winds. *Continental Shelf Research*, 272(105160), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105160>
- Gadkari, D. y Das, S. (2023). Beach stage identification for Aksa Beach (Malad, Mumbai) by analysing wave dynamics, grain size distribution and morphodynamic characteristics. *Research Square*, 1-18. Mumbai, India. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2859908/v1>
- Gallop, S. L., Kennedy, D. M., Loureiro, C., Naylor, L. A., Muñoz-Pérez, J. J., Jackson, D. W. T., y Fellows, T. E. (2020). Geologically controlled sandy beaches: their geomorphology, morphodynamics and classification. *Science of The Total Environment*, 731(139123), 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139123>
- González, M., Medina, R. y Losada, M. (2010). On the design of beach nourishment projects using static equilibrium concepts: Application to the Spanish coast. *Coastal Engineering*, 57(2), 227-240.
- Gibbs, R. J., Mathews, M. D., y Link, D. A. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44(1), 7-18.
- Goulart, A. (2003). *Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic on Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic Communities in Temperate, Subtropical and Tropical Regions - A Macroecological Approach*. Thesis on option of the Degree of Philosophiae Doctor in the Faculty of Science at The University of Port Elizabeth, South Africa.
- Hegge, B., Eliot, I. y Hsu, J. (1996). Sheltered sandy beaches of Southwestern Australia. *Journal of Coastal Research*, 12(3): 748-760.
- Jackson, D. W. T., Cooper, J. A. G., y del Rio, L. (2005). Geological control of beach morphodynamics state. *Marine Geology*, 216(4), 297-314.
- Jackson, D. W. T., Short, A. D., Loureiro, C., y Cooper, J. A. G. (2022). Beach morphodynamic classification using high-resolution nearshore bathymetry and process-based wave modelling. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 268, 1-13. Article 107812. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107812>
- Konstantinou, A., Stokes, C., Masselink, G. y Scott, T. (2021). The extreme 2013/14 winter storms: Regional patterns in multi-annual beach recovery. *Geomorphology*, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107828>.
- Ludka, B. C., Guza, R. T., y O'Reilly, W. C. (2018). Nourishment evolution and impacts at four southern California beaches: A sand volume analysis. *Journal of Coastal Engineering*, 136, 96-105.
- McLachlan, A., y Defeo, O. (2017). *The Ecology of Sandy Shores* (3rd Ed.). Elsevier.
- McLachlan, A., Defeo, O., y Short, A. D. (2018) Characterising sandy beaches into major types and states: implications for ecologists and managers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 215, 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.027>
- Masselink, G., y Short, A. D. (1993). The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 785-800.
- Medina, R., Vidal, C. y González, M. (2001). Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio. *Física de la Tierra*, 13, 95-117.
- Merlotto, A., Ricardo, G. y Piccolo, M. (2013). Morphodynamics classification of beaches in Necochea. *Ciencias Marinas*, 39(4), 331-347.
- Pranzini, E., Anfuso, G., y Muñoz-Perez, J. J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139, 32-35.
- Pettijohn, F. J. (1956). *Sedimentary rocks* (2nd ed.). The Rice Institute Wisconsin.
- Rodríguez-Paneque, R. y Córdova, E. (2005). Efectividad de los trabajos de alimentación artificial con arenas ejecutadas en Playa Estero Ciego entre 1997 y 1998, Cuba. *Ciencias Holguín*, 11(3), 1-14. <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181517982003>
- Rodríguez-Paneque, R., y Córdova, E. (2006). La erosión en las playas de la Región Nororiental de Cuba. *Revista Geográfica*, 139, 9-26.
- Rodríguez-Paneque, R. y Córdova, E. (2010). Efectividad de los trabajos de creación artificial de Playa Don Lino, Cuba. *Ciencias Holguín*, 16(1), 1-18. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181517919023>
- Rodríguez-Paneque, R. y Finkl, C.W. (2020). Erosion of carbonate beaches on the northeastern coast of Cuba. *Journal of Coastal Research*, 36(2), 339-352.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G. y Cohn, N. (2016). Morphodynamics of prograding beaches: A synthesis of seasonal-to century-scale observations of the Columbia River littoral cell. *Marine Geology*, 376, 51-68.
- Schwartz, M. L. (2005). *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer.
- Scott, T., Masselink, G., y Russell, P. (2011). Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286, 1-20.
- Scott, T., Russell, P., Masselink, G. y Wooler, A. (2009). Rip current variability and hazard along a macro-tidal coast. *Journal of Coastal Research*, 56, 895-899.
- Scott, T., Austin, M., Masselink, G. y Russell, P. (2016). Dynamics of rip currents associated with groynes -

- field measurements, modelling and implications for beach safety. *Coastal Engineering*, 107, 53-69.
- Short, A. D. (2006). Australian Beach Systems-Nature and Distribution. *Journal of Coastal Research*, 22(1), 11-27.
- Short, A. D. (2010). Role of geological inheritance in Australian beach morphodynamics. *Coastal Engineering*, 57, 92-97.
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., y Turner, I. L. (2019). Subannual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160-174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., y Losada, I. (1995). Modelos de Morfodinámica de Playas. *Ingeniería del Agua*, 2, 55.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- Wright, L. D., y Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability and surf zone and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- Yoshida, J., Udo, K., Takeda, Y. y Mano, A. (2014). Framework for proper beach nourishment as adaptation to beach erosion due to sea level rise. En A. N. Green y J. A. G. Cooper (Eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa). *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 70, 467-472.
- Zenkovich, V. P. (1967). *Processes of coastal development*. Oliver and Boyd.
- Zhou, Y., Feng, X., Liu, M. y Wang, W. (2023). Influence of Beach Erosion during Wave Action in Designed Artificial Sandy Beach Using XBeach Model: Profiles and Shoreline. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(984). <https://doi.org/10.3390/jmse11050984>