



Estudio de beach cusps en Playa de Palma (Mallorca)

Inés Morales Ortega

Trabajo de Fin de Máster. Máster Universitario en Análisis, Planificación y Gestión en Áreas Litorales, curso 2014-2015. Universitat de les Illes Balears.

Resumen

Se han analizado una serie de parámetros hidrodinámicos e imágenes diarias del año 2013 para Playa de Palma (Mallorca) con la finalidad de 1) explorar la variabilidad de la morfología costera y 2) determinar las condiciones ambientales asociadas a la presencia de beach cusps en este ambiente mediterráneo. La altura significativa del oleaje se caracteriza por oscilar entre 0.25 y 0.75 m y el periodo de pico entre 4 y 8 s para la mayoría de los días en los que se detecta presencia esta morfología rítmica en la playa. Combinando el estudio de los parámetros hidráulicos (definidos por la altura máxima significativa y su correspondiente periodo y la dirección del oleaje) con el análisis presencia/ausencia de beach cusps, se puede, para la mayoría de los casos, establecer relaciones de carácter estacional para esta morfología. En los meses de otoño-invierno aparecen frecuentemente grandes e intensos beach cusps y su formación parece seguir un patrón relacionado con las condiciones energéticas del ambiente. Estos presentan continuidad longitudinal tras periodos altamente energéticos. Por el contrario, en los meses de primavera-verano la magnitud de los beach cusps es menor y su continuidad longitudinal es prácticamente nula, siendo también su formación menos frecuente. Este estudio es sólo una primera toma de contacto con la materia, por lo que sería interesante seguir investigando en la materia de forma más detallada.

1. Introducción

Durante las últimas décadas se está llevando a cabo un gran esfuerzo investigador en la zona costera, debido principalmente a la concentración de población y a la actividad económica que tiene lugar en dicha zona. Es por ello que la mayor parte de estas investigaciones sobre el litoral están

enfocadas a la identificación, clasificación y evolución temporal de distintas morfologías costeras, y especialmente a la comprensión y cuantificación de los procesos y factores que intervienen en el desarrollo y evolución costera, aspectos necesarios para poder resolver los conflictos que surgen entre la población y el medio litoral.



Fig. 1. Beach cusps en Playa de Trafalgar (Cádiz, España). Fotografía del CEAMA (Centro Andaluz de Medio Ambiente).

Estas morfologías han sido estudiadas por numerosos autores, como Guza e Inman (1975), Sallenger (1979), Inman y Guza (1982), Holland y Holman (1996), Masselink et al. (1997), Masselink y Pattiaratchi (1998), Holland (1998), Masselink (1999) o Coco et al. (2001, 2003) entre otros.

En general, se acepta que las características geométricas de los beach cusps dependen de la energía del oleaje (Coco *et al.*, 1999), p.e. la distancia entre cúspides a lo largo de la costa. Holland (1998) concluyó que las cúspides se forman principalmente bajo incidencia normal del oleaje y durante los 2-4 días después del pico de una tormenta. Masselink *et al.* (2004) se centró en la relación que podrían tener la onda en alta mar y la formación de la topografía rítmica, concluyendo que las cúspides se forman bajo condiciones de calma y se destruyen bajo condiciones altamente energéticas. Sunamura

(2004) discute la importancia de la distribución longitudinal de la altura del oleaje en la formación inicial de la cúspide. Sin embargo, aunque la formación y evolución de los beach cusps han sido objeto de muchos estudios, no hay relaciones claras entre su presencia y la energía del oleaje.

1.1 Beach cusps, definición

Los “beach cusps” son morfologías rítmicas de playa que pueden variar en tamaño desde pocos metros hasta algo más de 50 m. Se encuentran en la zona interlitoral¹ y se componen de cúspides (o cuernos) que apuntan hacia el mar donde se acumula el material más grueso. Están separados entre sí por pequeñas bahías cuya superficie la ocupa el material más fino. Una de sus principales características es el espaciado regular o casi regular que las separa a lo largo de la costa (Figura. 1).

Estas morfologías son suficientemente pequeñas para ser consideradas como relativamente poco importante en materia geomorfológica, sin embargo, son a la vez interesantes y desconcertantes y, por tanto, han generado una gran literatura (Pethick, 1984). Están normalmente compuestos por sedimentos arenosos de tamaño medio/grueso, aunque han sido hallados en playas compuestas por sedimentos de todo tipo, incluyendo gravas, cantos y rocas de pequeño tamaño (Russell and McIntire, 1965; Komar, 1976).

1.2 Mecanismos de formación: Dos teorías

A pesar del interés general existente por conocer el desarrollo de los beach cusps, todavía existe debate acerca de los procesos fundamentales que tienen lugar en su formación. Existen varias teorías que intentan explicar o sugerir por qué los beach cusps presentan espaciados tan particulares a lo largo de la costa, incluyendo la teoría de olas de borde (p.e. Komar, 1973; Guza e Inman, 1975; Inman y Guza, 1982), la retroalimentación entre la topografía y los movimientos de flujo (Russell y McIntire, 1965; Dean y Maurmeyer, 1980; Werner y Fink, 1993), la inestabilidad de las olas rompientes (Cloud, 1966), la inestabilidad de la deriva litoral (Schwartz, 1972) y la intersección de trenes de onda (Darymple y Clague, 1976). Todas excepto las dos primeras de estas teorías han sido ignoradas debido al poco acuerdo general existente sobre ellas, por lo que las teorías en las que

nos centraremos para explicar la formación de estas morfologías serán la de “ondas de borde atrapadas” (“standing edge waves”) y la de “retroalimentación sedimento-oleaje”. Cabe señalar aquí que, dada la aparición de cúspides bajo una amplia gama de condiciones, es posible que ambos mecanismos sean viables o incluso que se den a la vez. (Coco *et al.*, 1999).

a) Modelo de olas de borde estacionarias (standing edge waves) de Guza e Inman (1975).

Las ondas de borde son olas estacionarias o progresivas cuyas crestas son perpendiculares a la costa. La longitud de onda se mide a lo largo de la costa, donde la amplitud varía de forma sinusoidal. A lo largo de la costa, los nodos donde la excursión vertical de partículas de agua es cero y la excursión horizontal está en el máximo, se alternan con antinodos donde ocurre lo contrario. Perpendicular a la costa, la amplitud de la onda de borde encuentra su máximo en la costa y varía sinusoidalmente hacia el mar, de forma exponencial decreciente.

La formación de las olas de borde estacionarias es un tema en discusión en la actualidad, aunque parece relacionada con la existencia de dos o más trenes de ondas con diferente período cuya superposición da lugar a la formación de grupos de olas (debido a la inestabilidad de una onda reflejada y la posterior transferencia de energía por parte de las ondas incidentes).

Cuando esto sucede, se produce una variación del nivel marino medio, formándose una depresión al paso de las olas de mayor tamaño y una cresta con las olas de menos altura. Esta variación del nivel marino medio presenta un período de infragravedad ($T > 30$ s). Cuando quedan atrapadas contra la costa por refracción con la orilla, como en el caso al que nos referimos, se denominan “olas de borde” (edge waves).

Cuando las olas de borde actúan en superposición con las olas incidentes, el resultado es una variación regular del run-up² a lo largo de la costa. De acuerdo con la teoría de las ondas de borde para la formación de beach cusps, esta variación se asocia al espaciado entre cúspides o longitud de onda (λ_c). Así, esta hipótesis sugiere que el swash de las olas incidentes se superpone sobre el movimiento de ondas estacionarias de borde. Esto provoca una variación en la altura alcanzada por el swash a lo largo de la costa y por ello la erosión toma patrones regulares.

b) Modelo de auto-organización del movimiento de swash o de retroalimentación sedimento-ola de Werner y Fink (1993).

Werner y Fink modelaron el movimiento de swash como una serie de eslabones de sedimento cargado de agua que recorre la orilla con un ángulo y una velocidad inicial predefinidos (pero esencialmente arbitrarios). A pesar del espectro de olas encontrado

normalmente en campo, no hay interacción entre un ciclo de swash y otro. La trayectoria de estas partículas está determinada por la pendiente de la playa, las cuales se ven aceleradas pendiente abajo debido a la gravedad. Las depresiones de la topografía incipiente se ven amplificadas por la atracción y aceleración que ejerce el flujo de agua, realzando así la erosión local, mientras las zonas topográficamente más altas repelen y desaceleran el flujo, lo cual resulta en una mayor deposición de sedimento. Su modelo incluye también la influencia local de los gradientes de presión que surgen de la convergencia y divergencia de las partículas de swash durante el movimiento. En resumen, esta teoría sugiere que los beach cusps se forman debido a una combinación de (1) retroalimentación positiva entre la morfología de la playa y el movimiento de swash que realza las irregularidades topográficas y (2) retroalimentación negativa que inhibe la acreción o erosión en cúspides bien desarrolladas.

Las simulaciones con velocidades de onda iniciales no uniformes (aleatorias) de partículas de agua resultaron en el desarrollo de sistemas de cúspides regulares en los cuales se pudo observar que el espaciado entre las mismas era proporcional a la extensión del movimiento swash transversal a la orilla S :

$$\lambda_c = f \cdot S$$

donde f es una constante cuyo valor varía entre 1 y 3 según el algoritmo exacto usado en las simulaciones.

Tras el trabajo de Werner y Fink, muchos autores tratan de comparar las dos teorías para explicar las medidas de campo tomadas en playas naturales donde se habían formado beach cusps (Allen *et al.*, 1996; Holland y Holman, 1996; Masselink y Pattiaratchi, 1998). Los resultados de estos estudios tomados en conjunto no han resultado concluyentes. No es de sorprender teniendo en cuenta la afirmación que ya hicieron Werner y Fink en su trabajo: “Estos dos mecanismos incompatibles y físicamente diferentes llevan a predicciones similares para el espaciado y las condiciones de formación de beach cusps bajo una amplia gama de escalas”.

1.3 Justificación y objetivos

A pesar de la extensa bibliografía referente a beach cusps que existe a nivel mundial, apenas se han hecho estudios sobre estas morfologías en el Mediterráneo. Este trabajo constituye, por tanto, un tema innovador. Se trata de una tarea descriptiva, de una primera toma de contacto con la materia, que puede servir de base para continuar en el futuro con el estudio de estas formaciones en Baleares o en cualquier otra playa del Mediterráneo.

Se pretende crear una base de datos en la que figure la presencia/ausencia de beach cusps en Playa de Palma (Mallorca) considerando cada día del año 2013. Posteriormente, se anotarán los valores de una serie de variables hidrodinámicas (la altura significativa, el periodo de pico, la dirección asociada

al periodo de pico del oleaje...) - que serán explicadas más adelante – para todos los días del año 2013 con la finalidad de poder realizar así comparaciones del valor de estos parámetros antes, durante y después de la aparición de beach cusps en la playa. Se tratará finalmente de establecer relaciones entre la presencia de esta morfología en la playa y estos parámetros hidráulicos marinos.

Aunque existen varias teorías sobre el proceso de formación de estas morfologías rítmicas, no hay consenso entre los investigadores sobre su origen y desarrollo. Por ello, considero importante este trabajo, pues el análisis de estos datos de campo puede contribuir a entender este proceso.

2. Contexto fisiográfico

Playa de Palma está situada en la Bahía de Palma, en la fachada suroccidental de la isla de Mallorca (Figura. 2). La Bahía de Palma está ubicada en una zona de plataforma de unos 26 km de anchura y la delimitan en sus extremos laterales los relieves de la Serra de Tramuntana (NW) y la planicie de la Marina de Lluçmajor (SE), alcanzando su superficie unos 220 km² y un perímetro de costa cercano a los 50 km.

¹ Zona interlitoral: Aquella que se encuentra entre los límites superior e inferior del oleaje en condiciones de bonanza (Guillén y Díaz, 1990)

² run-up: en la zona de swash, lámina de agua que, tras la rotura de la ola, llega a la línea de costa y asciende por la pendiente de la playa.



Fig. 2. Mapa de localización de Playa de Palma en la costa SW de Mallorca. (Estudio de la Morfodinámica de la Playa de Palma, Marzo 2011, IMEDEA).

Desde un punto de vista fisiográfico la Playa de Palma tiene una longitud aproximada de 5 km y disposición NW-SE con la que cierra la cuenca de Palma entre los accidentes geográficos de la Punta de Cala Estància y el Torrent de s'Algar. Presenta una batimetría de pendiente bastante uniforme con una media de 0,75% hasta la isóbata de 6 m y de un 1,25% a partir de dicha profundidad.

Los fondos son mayoritariamente arenosos, pero existen fondos rocosos sumergidos frente a la bocana del Club Marítimo de San Antonio de la Playa y hasta los restos del dique exento de ses Fontanelles, así como frente al núcleo de ses Cadenes y s'Arenal, donde el substrato rocoso aflora en la playa seca (Figura. 3). En general, la tipología de fondo dominante en la Playa de Palma

está estrechamente ligada al gradiente batimétrico. Los fondos de las zonas más someras y hasta los 8 – 10 m de profundidad son generalmente arenosos, límite a partir del cual se extiende la pradera de *Posidonia oceanica* y hasta aproximadamente unos 35 metros de profundidad. En las zonas más someras, tanto en fotografía aérea como en diferentes perfiles batimétricos, puede reconocerse la presencia de un sistema de barras y senos muy cercanos a costa (entre -1 y -0,5 m), que aunque variables en el tiempo, mantienen una marcada continuidad desde Ses Fontanelles hasta Ses Cadenes.

Playa de Palma puede clasificarse morfológicamente como una playa intermedia de acuerdo con el modelo de clasificación de Wright and Short

(1983) según Gómez-Pujol *et al.* (2007). Esta playa semi-encajada (en forma de concha), se apoya sobre dos puertos deportivos y que está segmentada por solariums y un dique exento. Cabe destacar que en la playa desaguan los torrentes de la Síquia en el Norte y del Torrent dels Jueus en el Sur.

El calibre medio (D_{50}) de las arenas de la Playa de Palma es de 0,24 mm, lo que implica que desde un punto de vista textural se trata de una playa de arenas finas bien clasificadas. En cuanto a la naturaleza del sedimento de la playa, su composición es predominantemente carbonatada y se caracteriza por una elevada presencia de bioclastos (95,7%) así como por una pequeña parte de fragmentos detríticos y de cuarzo (4,3%). Por lo tanto, la principal fuente del sedimento en el sistema es de origen marino, relegando la contribución de sedimentos por aporte fluvial a un segundo plano, como es habitual en la isla de Mallorca (Fornós y Jaume, 1992).

No obstante, existe cierta variabilidad espacial en la distribución de los calibres del sedimento y su clasificación. En este sentido, para aquellas muestras recolectadas en la playa seca o a profundidades cercanas al límites superior de la pradera de *P. oceanica* o en su interior, el calibre del sedimento tiende a incrementar respecto a las muestras sumergidas, encontrándose arenas medias-gruesas ($0,25 \text{ mm} > D_{50} < 0,50 \text{ mm}$) o muy gruesas ($D_{50} > 1 \text{ mm}$). Las muestras localizadas entre los dos ambientes

descritos anteriormente, tienden a reducir el calibre desde la línea de costa hasta las zonas más profundas (de 0,09 a 0,08 mm), aunque siempre dentro del intervalo de las arenas muy finas.

La configuración fisiográfica de la Bahía de Palma, abierta hacia el SW, deja Playa de Palma expuesta a los oleajes que se propagan con direcciones entre el WSW y el S. El Cap de Cala Figuera supone una barrera frente a las direcciones del primer cuadrante, mientras que Cap Enderrocat y Cap de Regana solo suponen una relativa protección frente a las direcciones de S y SE que sólo inciden de forma refractada sobre la playa. El régimen anual medio de los datos de aguas profunda frente a la Bahía de Palma está caracterizado por oleajes de altura significativa (H_s) en torno a 1 m y períodos (T_p) entre los 4 y 6 segundos. Los oleajes predominantes son del SW y SE, siendo más energéticos (mayor altura) los del SW. Durante el invierno dominan los temporales procedentes del SW y especialmente los comprendidos entre la franja WSW-SW, mientras que en verano se concentran en la franja SW-SSW. Durante los periodos invernales el régimen medio viene caracterizado por una altura de ola significativa de 1 m, superándose en 1% de las ocasiones alturas superiores a 4 m, mientras que para los periodos estivales el régimen medio se sitúa en 0,7 m y solo se dan en un 1 % de las ocasiones oleajes mayores a 3 m.

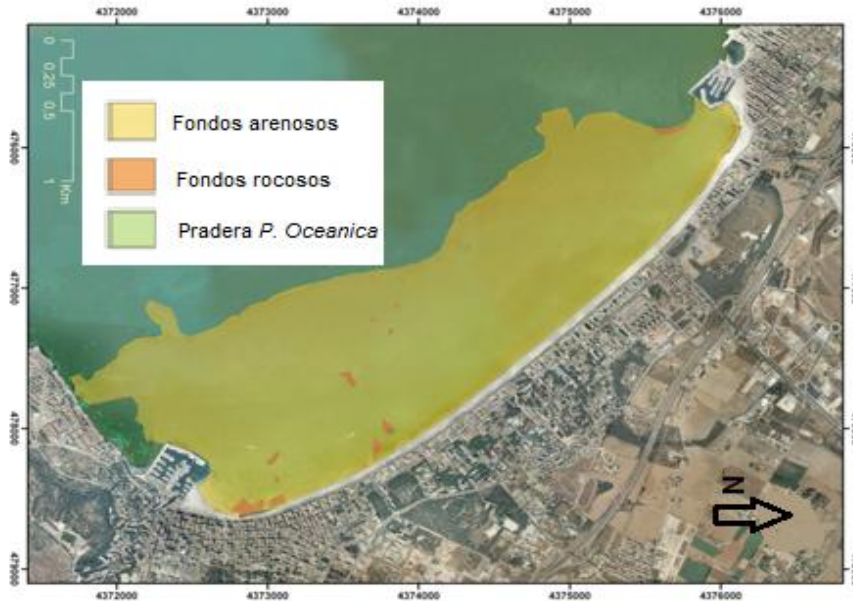


Fig. 3. Croquis de la tipología de fondos en la Playa de Palma en junio de 2009. (Estudio de la Morfodinámica de la Playa de Palma, Marzo 2011, IMEDEA)

3. Materiales y métodos

3.1 La video-monitorización costera

La video-monitorización costera es una técnica que permite la obtención autónoma y continua de imágenes digitales de alta resolución de la costa, así como su análisis y almacenamiento.

En 2011 se instalaron en Playa de Palma tres estaciones de video-monitorización SIRENA basadas en la técnica ARGUS (Aarninkhof y Holman, 1999). Consisten en dos equipos, el primero es el "Argus Station", que guarda los datos el tiempo suficiente hasta que se transfieren al segundo equipo "Argus Network system" que almacena los datos y los hace disponibles para el usuario. El sistema SIRENA fue desarrollado en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados

(IMEDEA, CSIC-UIB). Fue desarrollado inicialmente para las cámaras de DFK31AF03, fuente de imágenes con una resolución máxima de 1024x768, que trabaja con el IIDC/DCAM formato 1 modo 5 estándar, aunque la resolución ha mejorado con el tiempo. Nieto et al. (2010) describe las características y capacidades del sistema.

Esta playa cuenta con un total de 14 cámaras repartidas en tres estaciones (Figura. 4). Las cámaras obtienen por cada hora de luz una imagen por segundo durante un periodo de diez minutos durante los cuales se obtienen: *snapshot* (foto instantánea), *timex* (promedio de 600 imágenes capturadas durante 10 minutos) y *variance* (desviación estándar de éstas 600 imágenes).



Fig. 4. Distribución de las tres estaciones de video monitorización SIRENA y las 14 cámaras en Playa de Palma

Todas las imágenes de la playa, así como otros datos de observación costera están disponibles al público y se pueden encontrar en la web del SOCIB (Sistema de Observación Costera de las Islas Baleares).

Los datos utilizados no son del todo exactos. Hay que considerar cierto error debido a diferentes motivos:

- al error de interpretación (p.e cuando los beach cusps son muy pequeños o la luz dificulta su visión).
- a la disponibilidad y calidad de la imagen, que algunas veces no permite la observación de la playa por encontrarse la cámara mojada o debido problemas informáticos.
- al turismo, que a veces impide observar con claridad la zona intermareal debido a la presencia de bañistas y tumbonas y al barrido diario de la playa durante los meses más cálidos.

- a que sólo se tienen en cuenta las horas de luz pero se toman los datos hidrodinámicos de las 24 horas del día.

3.2 Datos meteo y oleaje

Para obtener los parámetros hidráulicos usados en el trabajo se ha usado un Nortek awac, modelo AWAC ASC 600KHz; un perfilador de corrientes y oleaje instalado a -17m en el centro de Playa de Palma dotado de varios sensores para la medida de datos atmosféricos y oceanográficos. Se almacenan momentos espectrales y parámetros estadísticos como: H_s , H_{max} , $H_{1/n}$, T_z , T_p . Como nuestra boya es direccional, indica además la dirección de la frecuencia de pico θ_p y la dirección media de propagación θ_m . En este estudio se han analizado los siguientes parámetros: altura significativa de las olas (H_s), periodo de pico

de la ola (T_p), dirección asociada al periodo de pico (θ_p).

Cuando observamos el oleaje en un punto determinado de la costa vemos como en la mayoría de ocasiones se trata de un proceso irregular, es decir, las alturas de ola, periodos y direcciones no son siempre los mismos, presentando una cierta variabilidad. Sin embargo, cuando tratamos de caracterizar el fenómeno observado simplificamos el proceso asumiendo un único valor para cada una de las variables mencionadas. Supongamos que somos capaces de determinar con una gran resolución (boyas de oleaje) las variaciones de la superficie libre (η) durante un periodo de tiempo

suficientemente largo como para representar el oleaje que queremos analizar, en este caso obtendríamos un registro temporal tal como el de la Figura 5.a, donde se observa como para ese periodo de tiempo existe una gran variación en alturas y periodos.

La altura de la ola H_i es definida como el máximo y mínimo existente entre dos pasos descendentes por cero, siendo el tiempo transcurrido entre ambos episodios (paso descendente) el periodo T_i (Figura. 5.b). La altura de ola significativa (H_s o $H_{1/3}$) es la media aritmética del tercio de olas más altas del conjunto de olas del registro.

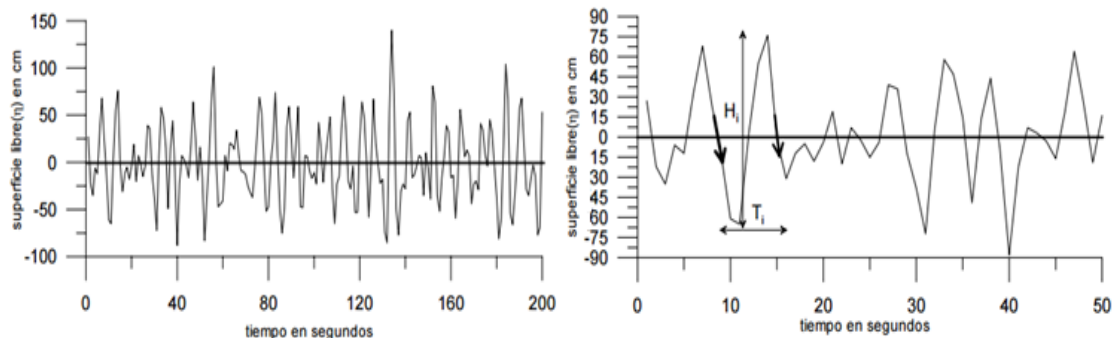


Fig. 5. a) A la izquierda, registro de la variación de la superficie libre del mar obtenido por una boya de oleaje. b) A la derecha, definición de altura de ola y periodo en un registro de una boya de oleaje. (Caracterización del oleaje, Escuela de Caminos de la UPC).

El registro de las variaciones de la superficie libre del mar puede ser tratado de una forma espectral, es decir, la señal observada (oleaje irregular) puede ser descompuesta mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier en un número de ondas sinusoidales (regulares o de frecuencia conocida) la suma de las cuales dan la señal original. Un espectro de energía $S(\omega)$ ($\omega=2\pi/T$)

representa la energía asociada a cada una de las frecuencias del oleaje (irregular) estudiado. El espectro muestra un pico en las frecuencias ($f=1/T$) en el que la energía es mayor denominado periodo de pico (T_p) que indica el periodo de los distintos oleajes asociado con mayor contenido energético. A la dirección asociada al periodo de pico de la ola la denominaremos θ_p .

3.3 Análisis ausencia-presencia

Se ha revisado el estado de la playa a lo largo de los 365 días de 2013 a través del visor de imágenes de Playa de Palma que proporciona el SOCIB (Sistema de Observación Costera de las Islas Baleares). A la vez, se ha ido creando una base de datos en la que figura: fecha, presencia o ausencia de beach cusps, Hs, Tp, θ_p y número de cámara/s desde donde se podían observar las distintas zonas de la playa para los casos en los que había presencia de beach cusps. Para facilitar la comprensión de los datos, en la tabla aparece un valor medio de los parámetros hidrodinámicos para cada día, ya que la boya situada a 17 m de profundidad nos proporciona datos a cada hora de luz.

4. Resultados

4.1 Variabilidad espacial y temporal de la presencia de beach cusps (estacionalidad, permanencia, continuidad etc.)

En total se pueden observar beach cusps durante 167 días (45,75%) del año 2013 en Playa de Palma cuya distribución a lo largo del año es irregular (Figura. 6). La presencia de beach cusps es notablemente mayor en los meses de otoño-invierno. La Tabla. 1 recoge los datos obtenidos para los días en que aparece esta morfología.

A medida que el ambiente se vuelve más cálido debido a la estacionalidad de nuestro clima, y, de igual forma, el

mar presenta un estado menos energético, es menos frecuente observar beach cusps en Playa de Palma. De hecho, durante los meses de verano prácticamente no se genera esta morfología rítmica en Playa de Palma. La distribución de beach cusps a lo largo del periodo analizado (un año) es directamente proporcional a las condiciones energéticas del ambiente (Figura. 7) La morfología del fondo juega un papel importante en la hidrodinámica de Playa de Palma, provocando una notable variabilidad longitudinal de la morfología en la costa. En la Figura 3 se puede observar que el fondo de esta playa no es totalmente homogéneo y en él se diferencian zonas arenosas, zonas rocosas y zonas ocupadas por praderas de Posidonia oceanica. En este estudio se han analizado los parámetros hidrodinámicos para el conjunto de la playa, por lo que no podemos establecer una relación clara entre la falta de continuidad longitudinal de beach cusps en las distintas zonas de la playa (en algunos casos) y la tipología de fondo. En las áreas de la playa que registran las cámaras 5 y 9 (Figura. 5) es donde se aprecian beach cusps más comúnmente (93 y 127 días respectivamente). En las cámaras 6 y 8 también se han observado beach cusps pero de forma menos repetida, siendo la zona que se corresponde con la cámara 7 donde estas morfologías rítmicas han aparecido con la menor frecuencia (se debe tener en cuenta que sólo se han observado las cámaras 5,6,7,8 y 9 de las 14 que hay en total

por motivos de visibilidad). Lo más probable es que la ausencia de beach cusps en las zonas que se corresponden con las cámaras 1 a 4 se deba a la existencia de una laja rocosa en el fondo y al afloramiento de una playa fósil (arenisca) en la cámara 3 que disipan la energía y no permiten la formación de beach cusps.

4.2 Condicionantes hidrodinámicos

La gran mayoría del oleaje proviene del cuadrante SW, estando en el 99,4% de los casos el ángulo de incidencia del oleaje dentro del rango de $180^\circ - 255^\circ$. La altura de ola significativa más frecuente es de 0.25 m a 0.75 m (68,3% del tiempo), siendo sólo el 14,3% del periodo analizado mayor de 1.25 m (meses de otoño-invierno). El periodo más frecuente es de entre 5 y 7 s, siendo el 84.4% del tiempo es de entre 4 y 8 s (Figura. 9).

Como se puede leer al principio del texto, Holland (1998) concluyó que las

cúspides se forman principalmente bajo incidencia normal del oleaje y durante los 2-4 días después del pico de una tormenta mientras que Masselink *et al.* (2004) afirmó que se forman bajo condiciones de calma y se destruyen bajo condiciones altamente energéticas. Nuestros resultados coinciden más con la primera afirmación aunque no de forma exacta.

En los meses de otoño-invierno la relación entre eventos altamente energéticos y la formación de beach cusps es generalmente clara. Parece que los beach cusps durante estos meses del año se generan mientras tiene lugar un evento energético; una tormenta, o con un día de antelación/retraso a su comienzo. Una vez formada, esta morfología rítmica se suele mantener durante un cierto tiempo (semanas o varios días) mientras las condiciones energéticas se mantienen y/o van decayendo progresivamente.

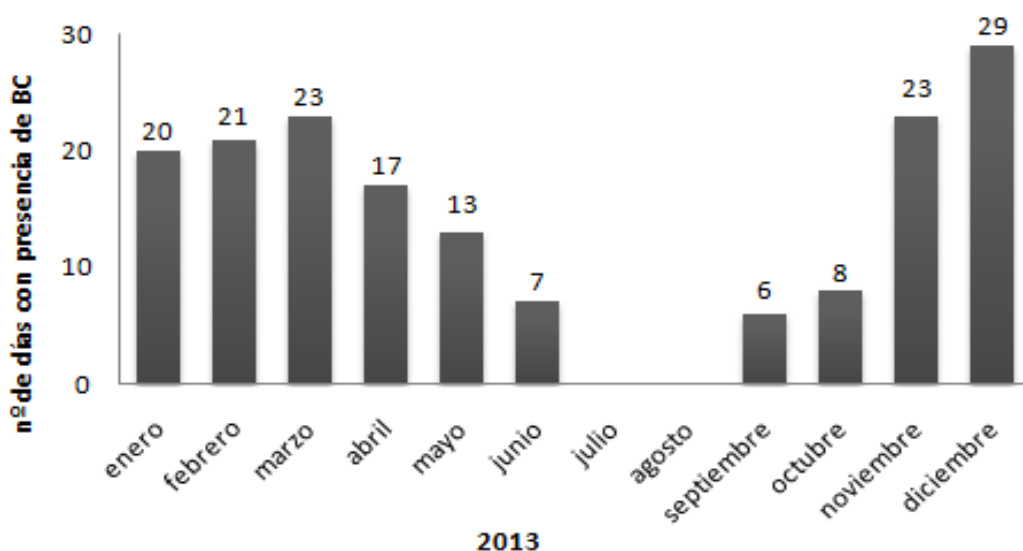


Fig. 6. Distribución de la presencia de beach cusps en días/mes del año 2013.

Mes	Día	Hm0	Tp	Øp	Cámaras	
ENE	6	0.68	6.36	217.30	6,7,8,9	
	7	0.53	5.39	216.43	7,8	
	10	0.92	6.20	226.18	9	
	13	1.19	6.43	228.55	5,6,9	
	14	0.50	6.83	221.63	5,6,7,8,9	
	15	0.87	6.67	237.69	5,6,7,8,9	
	14	0.37	6.09	213.04	5,6,9	
	16	1.56	7.93	232.92	5,6,7,8,9	
	17	1.47	9.06	225.04	5,6,-,-,9	
	18	0.85	6.71	224.69	5,6,-,-,-	
	19	1.95	7.07	220.26	5,6,9	
	20	1.69	9.04	222.82	5,6	
	21	1.31	7.48	222.41	5,6	
	22	1.28	7.05	222.73	5,6	
	23	1.58	8.17	230.70	5,6	
	24	1.35	9.10	224.09	5,6	
	25	0.70	9.16	221.45	5,6	
	26	0.59	6.27	227.56	5	
	27	0.59	5.88	213.42	5	
	28	0.89	7.91	217.18	5	
	29	0.44	6.86	213.08	5	
	FEB	2	1.25	6.56	242.43	5,6,8,9
		3	0.51	7.08	244.53	5,8,9
		4	0.49	5.82	227.52	5,8,9
		5	0.72	5.18	211.47	8,9
		6	0.87	5.01	236.91	8,9
		7	0.58	5.14	240.74	8,9
		8	0.39	7.13	224.30	8,9
		11	1.52	8.16	224.81	5,6,8,9
12		1.14	8.21	230.60	5,9	
13		0.60	7.94	218.22	5,8,9	
14		0.37	6.09	213.04	5,6,9	
15		0.29	5.03	216.69	8,9	
16		0.39	4.89	214.79	9	
17		0.36	4.55	214.64	9	
21		0.56	5.25	226.26	9	
22		1.26	7.45	215.23	5,6,7,8,9	
23		1.06	8.34	220.13	5,8,9	
24		0.60	8.05	228.88	5,6,7,8,9	
25		0.32	7.17	223.10	5,6,9	
26		0.26	6.92	217.78	6,9	
27		0.15	5.05	222.17	6,9	
28		0.34	7.21	240.31	6,9	
MAR		1	0.87	7.69	221.19	5,6,7,9
		2	0.38	8.67	221.45	5,6,7,9
		6	1.39	6.35	216.23	5,6,9
		7	1.28	6.87	217.39	5,6,7,8,9
		8	1.19	6.10	215.93	5,6,9
		9	0.93	6.50	215.33	5,6,7,8,9
		10	1.26	6.31	218.46	5,6,7,9
	11	1.64	7.24	224.50	5,6,9	
	12	1.45	6.94	225.55	5,6,9	
	13	1.03	6.86	223.62	9	
	15	0.49	7.16	222.86	9	
	18	0.87	6.09	213.35	9	
	19	0.47	6.08	213.83	9	
	24	0.67	5.94	214.96	9	
	25	1.38	7.95	220.52	5,6,8,9	
	26	1.57	7.56	215.09	5,6,9	
	27	1.02	7.13	211.54	5,6,8,9	
	28	0.75	6.34	216.92	5,9	
	29	0.96	5.65	217.16	9	
	30	1.34	7.01	217.78	5,9	
	31	0.62	7.04	214.39	9	
	ABR	1	1.25	6.40	217.38	5,6,9
		2	1.07	7.07	220.67	5,6,9
		3	0.67	6.33	213.96	9
		4	0.56	5.43	220.05	9
		5	0.71	6.43	215.41	9
		6	0.35	4.26	244.30	9
		7	0.48	6.14	218.44	9
		8	0.86	5.30	216.59	9
9		0.68	5.01	219.34	9	
10		0.64	5.64	213.05	9	
11		0.71	4.94	215.49	9	
12		0.65	5.50	217.19	9	
13		0.33	5.96	209.44	9	
27		0.25	4.46	196.33	9	
28		0.48	4.19	221.82	9	
29		0.69	5.48	220.75	9	
30		0.62	5.88	221.38	9	
MAY		1	0.26	4.54	221.57	9
		2	0.15	4.37	199.91	9
MAY		16	0.16	4.13	217.92	9
		17	0.18	3.65	197.36	5,6,9
		18	0.69	5.67	200.76	5,6,9
		19	1.01	7.26	211.25	9
		20	0.53	5.64	208.78	9
		21	0.24	4.35	216.25	9
		22	0.19	3.94	165.84	9
		23	0.19	3.83	191.59	9
		28	0.18	4.05	213.58	9
		29	0.26	3.65	191.40	9
	30	0.29	3.68	204.05	9	
	JUN	6	0.17	5.70	228.40	9
		7	0.19	4.68	187.26	9
		8	0.62	5.31	208.35	9
		9	1.01	6.04	211.62	5,9
		10	0.79	6.45	207.80	5,9
		11	0.49	5.03	204.09	9
		12	0.31	4.60	219.25	9
		18	0.34	5.39	204.51	9
		20	0.35	5.83	205.18	5,9
		21	0.23	4.15	190.64	9
	SEPT	28	0.71	5.07	205.93	5,9
		29	1.49	7.19	215.77	5,9
		30	1.11	6.62	213.67	5,7,8,9
		1	0.79	6.22	204.35	5,6,7,8,9
	OCT	2	0.52	5.09	207.29	5,6,7,8,9
		3	0.26	5.07	200.27	5,6
		4	0.33	5.40	212.38	5,6,-,8,-
		5	0.20	6.47	221.08	5,9
		20	0.23	4.26	217.48	9
21		0.19	4.40	198.79	9	
31		0.22	6.96	202.44	5,9	
NOV		1	0.25	4.58	187.41	5
		4	1.01	5.70	223.44	5
		5	1.32	7.50	221.64	5,6,9
	6	0.75	7.02	219.36	5,6	
	7	0.44	4.88	214.63	5,6,-,8,-	
	8	0.69	4.89	219.58	5,6,9	
	9	0.46	6.36	215.08	5,9	
	10	0.61	4.91	226.61	5,6,7,8,9	
	11	0.27	7.22	228.37	5,6,7,8,9	
	12	0.24	9.52	228.65	5,7,8,9	
	18	0.74	5.25	224.57	5,6,7,8,9	
	19	1.04	7.07	230.61	5,6,9	
	20	0.53	7.86	226.21	5,6	
	21	1.18	6.18	230.61	5,6,7,8,9	
	22	1.02	8.00	227.71	5,9	
	23	0.48	6.71	225.22	5,6,7,9	
	24	0.27	5.91	230.47	5,6	
	25	0.20	8.42	229.31	5,6,8,9	
	26	0.20	9.68	230.55	5,6,7,8,9	
	27	0.20	9.29	233.45	5,6,7,8,9	
	28	0.19	8.36	225.53	5,6,7,8,9	
	29	0.14	6.90	235.15	5,6,7,8,9	
	30	0.25	5.39	218.92	6,7,8	
	DIC	1	0.24	7.95	215.98	6,7,8
		2	0.21	9.54	227.09	5,6,7,8,9
		3	0.18	9.39	225.82	6,7,8
		4	0.18	7.53	209.29	6,7,8
		5	0.16	4.76	212.04	6,7,8
		6	0.15	4.11	220.71	-,7,8,-
		7	0.16	7.38	221.47	-,7,8,-
8		0.14	6.44	221.92	-,7,8,-	
9		0.11	4.17	223.22	-,7,8,-	
10		0.11	4.30	211.88	-,7,8,-	
11		0.10	4.39	211.04	6,7,8	
12		0.13	4.16	219.26	6,7,8	
13		0.11	4.55	224.41	6,7,8	
14		0.10	4.38	227.51	6,7,8	
15		0.14	3.11	234.15	6,7,8	
16		0.09	4.02	229.57	6,7,8	
17		0.23	5.52	231.24	6,7,8	
18		0.19	4.67	217.24	6,7,8	
19		1.10	5.35	218.03	5,6,7,8,9	
20		0.47	6.68	200.89	5,6,7,8,9	
21		0.25	8.97	219.43	5,6,7,8,9	
22		0.16	6.62	223.66	5,6,7,8,9	
23		0.29	4.86	225.05	5,6,7,8,9	
24		1.56	6.09	218.76	5,6,7,8,9	
25		2.28	7.54	220.81	5,6,7,8,9	
26		1.92	8.68	227.13	5,9	
27		1.36	7.67	224.42	5,-	
28		1.19	6.67	215.56	5,-	
29		0.45	6.27	223.18	5,9	

Tabla 1. La tabla recoge la fecha de presencia de beach cusps y los valores de Hs, Tp y dirección del oleaje asociado y las cámaras que recogen las imágenes de la playa para tales días.

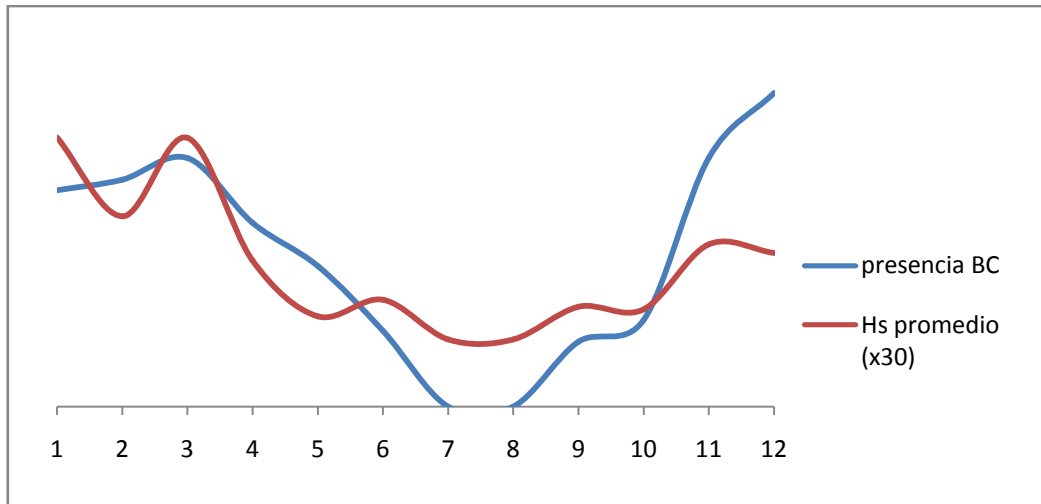


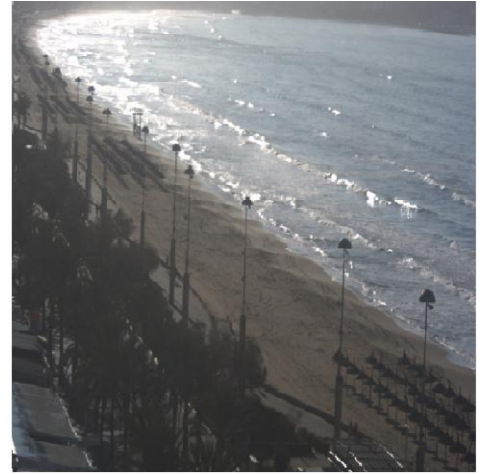
Fig.7. Gráfico comparativo entre la presencia de beach cusps a lo largo del año y la energía hidrodinámica promedio (Hs) de cada mes. En el eje X se representan los meses del año.

A continuación se añaden algunos de los “eventos energéticos” de este tipo encontrados en el periodo de estudio, el año 2013. En ellos, la energía hidrodinámica aumenta (crecen Hs y Tp) y estos valores se mantienen durante unos días o decrecen seguidamente, según la duración de la tormenta. En los meses de otoño-

invierno, la generación de beach cusps es simultánea a la tormenta o tiene lugar pocas horas después del pico de la misma. La morfología se mantiene días después y va desapareciendo lentamente si la energía del ambiente disminuye y no vuelve a crecer de forma significativa tras el suceso.

a)

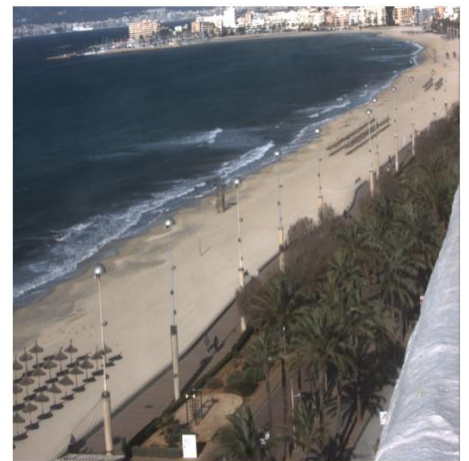
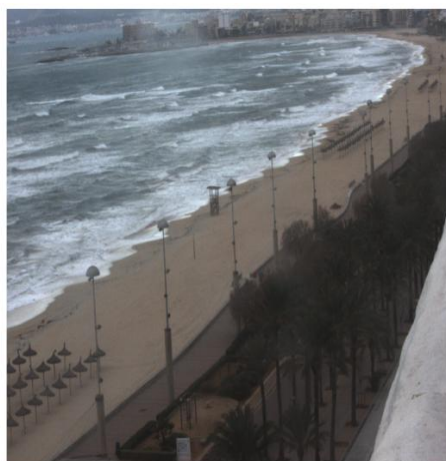
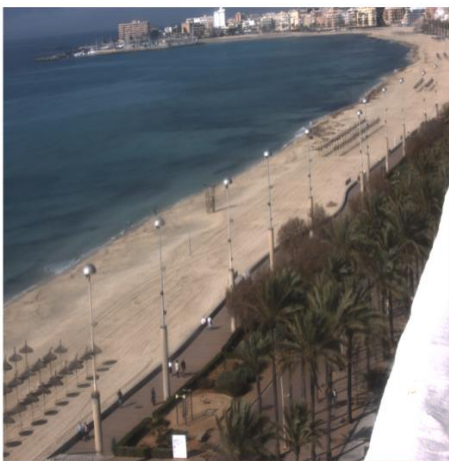
Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
ENE	11	0.31	4.96	229.19
	12	0.45	4.16	232.49
	13	1.19	6.43	228.55
	14	0.50	6.83	221.63
	15	0.87	6.67	237.69
	16	1.56	7.93	232.92
	17	1.47	9.06	225.04
	18	0.85	6.71	224.69
	19	1.95	7.07	220.26
	20	1.69	9.04	222.82
	21	1.31	7.48	222.41
	22	1.28	7.05	222.73
	23	1.58	8.17	230.70
	24	1.35	9.10	224.09
	25	0.70	9.16	221.45
	26	0.59	6.27	227.56
	27	0.59	5.88	213.42
	28	0.89	7.91	217.18
	29	0.44	6.86	213.08
	30	0.34	3.93	213.20
	31	0.33	4.73	212.95



a). Tabla con datos hidrodinámicos e imágenes del estado de la playa desde la cámara 5 antes, durante y después de la tormenta (días 11, 19 y 27 de enero).

- b)

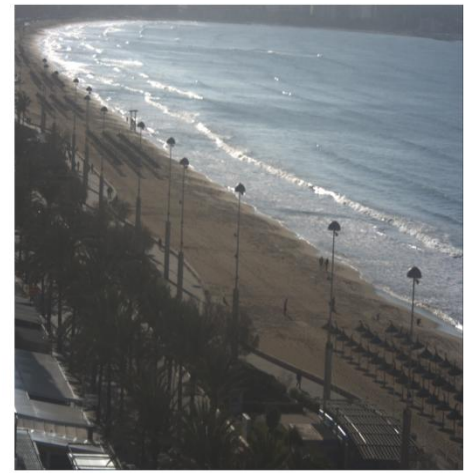
Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
FEB	1	0.55	4.75	216.16
	2	1.25	6.56	242.43
	3	0.51	7.08	244.53
	4	0.49	5.82	227.52
	5	0.72	5.18	211.47
	6	0.87	5.01	236.91
	7	0.58	5.14	240.74
	8	0.39	7.13	224.30
	9	0.27	5.86	203.26



b). Tabla con datos hidrodinámicos e imágenes del estado de la playa desde la cámara 9 antes, durante y después de la tormenta (días 1, 2 y 6 de febrero).

c)

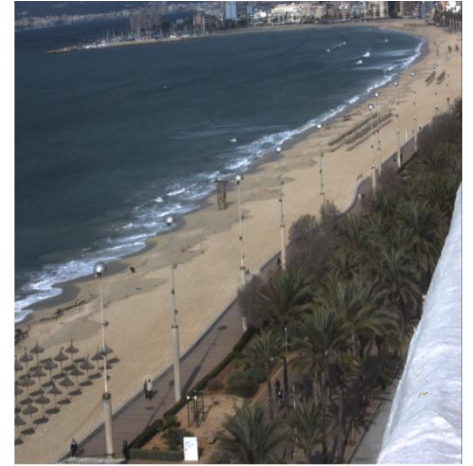
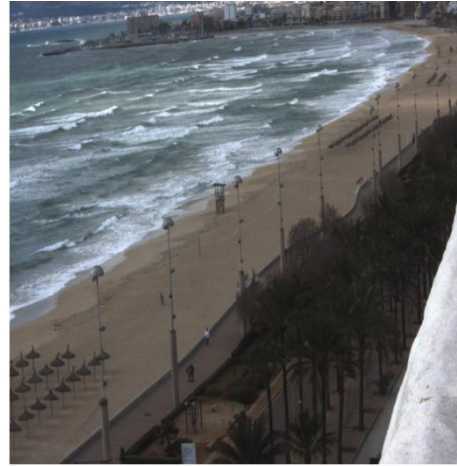
Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
FEB	9	0.27	5.86	203.26
	10	1.32	5.77	228.15
	11	1.52	8.16	224.81
	12	1.14	8.21	230.60
	13	0.60	7.94	218.22
	14	0.37	6.09	213.04
	15	0.29	5.03	216.69
	16	0.17	4.54	225.40
	17	0.24	3.94	212.84



c) Tabla con datos hidrodinámicos e imágenes del estado de la playa desde la cámara 5 antes, durante y después de la tormenta (días 9, 11 y 13 de febrero).

d)

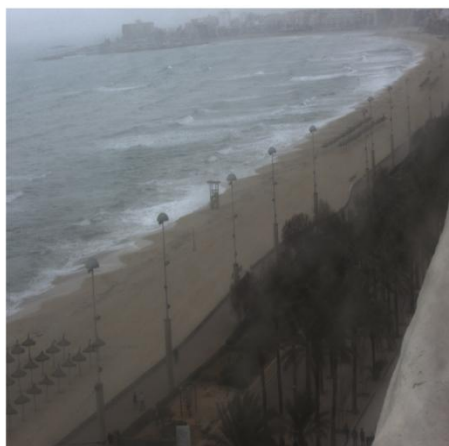
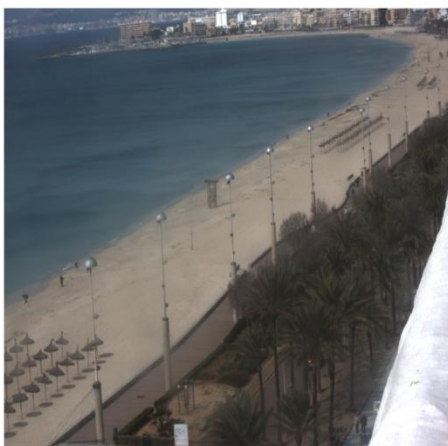
Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
FEB	19	0.18	5.19	218.72
	20	0.20	4.94	214.46
	21	0.56	5.25	226.26
	22	1.26	7.45	215.23
	23	1.06	8.34	220.13
	24	0.60	8.05	228.88
	25	0.32	7.17	223.10
	26	0.26	6.92	217.78
	27	0.15	5.05	222.17
	28	0.34	7.21	240.31
	1	0.87	7.69	221.19
	2	0.38	8.67	221.45
	3	0.21	6.25	235.58
	4	0.19	4.64	220.37



d). Tabla con datos hidrodinámicos e imágenes del estado de la playa desde la cámara 9 antes, durante y después de la tormenta (días 19, 22 y 24 de febrero).

e)

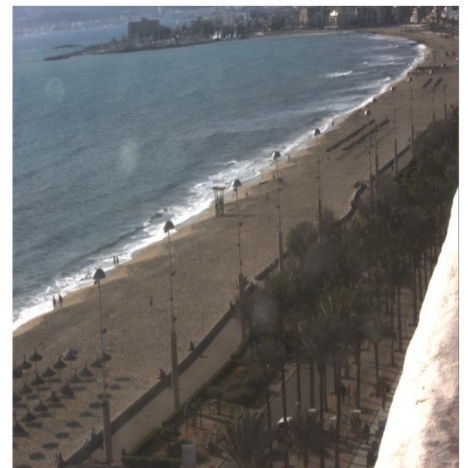
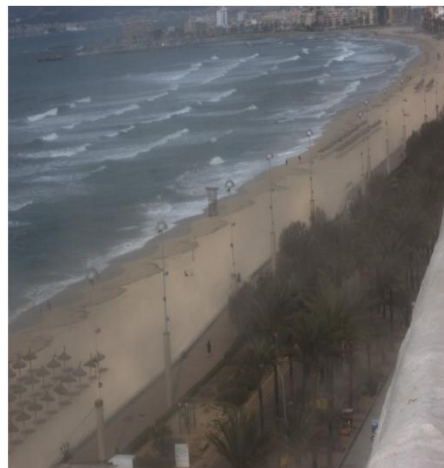
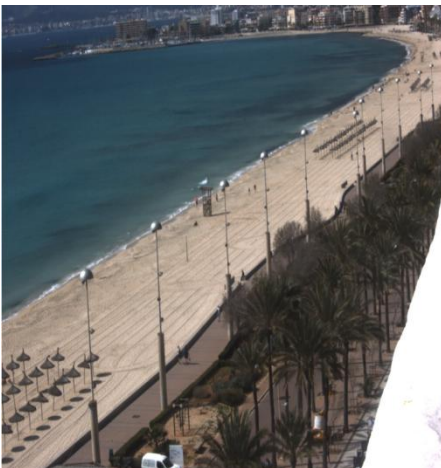
Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
MAR	4	0.19	4.64	220.37
	5	0.51	5.69	208.72
	6	1.39	6.35	216.23
	7	1.28	6.87	217.39
	8	1.19	6.10	215.93
	9	0.93	6.50	215.33
	10	1.26	6.31	218.46
	11	1.64	7.24	224.50
	12	1.45	6.94	225.55
	13	1.03	6.86	223.62
	14	0.82	7.67	231.92
	15	0.49	7.16	222.86
	16	0.39	4.89	214.79
	17	0.36	4.55	214.64
18	0.87	6.09	213.35	
19	0.47	6.08	213.83	
20	0.39	5.57	212.69	
21	0.51	6.66	216.85	
22	0.28	4.68	214.51	



e) Tabla con datos hidrodinámicos e imágenes del estado de la playa desde la cámara 9 antes, durante y después de la tormenta (días 4, 6 y 15 de marzo).

f)

Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
MAR- ABR	22	0.28	4.68	214.51
	23	0.48	5.11	218.73
	24	0.67	5.94	214.96
	25	1.38	7.95	220.52
	26	1.57	7.56	215.09
	27	1.02	7.13	211.54
	28	0.75	6.34	216.92
	29	0.96	5.65	217.16
	30	1.34	7.01	217.78
	31	0.62	7.04	214.39
	1	1.25	6.40	217.38
	2	1.07	7.07	220.67
	3	0.67	6.33	213.96
	4	0.56	5.43	220.05
	5	0.71	6.43	215.41
6	0.35	4.26	244.30	
7	0.48	6.14	218.44	
8	0.86	5.30	216.59	
9	0.68	5.01	219.34	
10	0.64	5.64	213.05	
11	0.71	4.94	215.49	
12	0.65	5.50	217.19	
13	0.33	5.96	209.44	
14	0.14	4.74	224.42	
15	0.19	5.95	244.48	



f) Tabla con datos hidrodinámicos e imágenes del estado de la playa desde la cámara 9 antes, durante y después de la tormenta (días 22, 25 de marzo y 3 de abril).

Con la llegada de la primavera y comienzos de verano, las condiciones energéticas toman un carácter más suave y la generación de beach cusps parece seguir otro patrón. En abril, mayo y junio, se pueden observar beach cusps de pequeña magnitud generados en condiciones de baja energía con tendencia al aumento. Una vez formados, las condiciones energéticas aumentan hasta alcanzar

un pico (breve en el tiempo y con alturas de ola < 1 m) tras el que vuelven a suavizarse. Así, durante estos meses tenemos series de beach cusps caracterizadas por tener una duración de pocos días (una semana aproximadamente) y por estar relacionadas con un aumento, un pico y una disminución de la energía hidrodinámica (Figura. 8).

Mes	Día	Hm0	Tp	θ_p
ABR- MAY	25	0.36	8.71	237.54
	26	0.30	8.24	229.72
	27	0.25	4.46	196.33
	28	0.48	4.19	221.82
	29	0.69	5.48	220.75
	30	0.62	5.88	221.38
	1	0.26	4.54	221.57
	2	0.15	4.37	199.91
MAYO	14	0.30	4.96	200.44
	15	0.25	4.85	224.45
	16	0.16	4.13	217.92
	17	0.18	3.65	197.36
	18	0.69	5.67	200.76
	19	1.01	7.26	211.25
	20	0.53	5.64	208.78
	21	0.24	4.35	216.25
	22	0.19	3.94	165.84
	23	0.19	3.83	191.59
	24	0.27	4.75	164.56
25	0.23	3.99	185.80	
JUN	4	0.16	3.41	182.26
	5	0.20	4.72	217.99
	6	0.17	5.70	228.40
	7	0.19	4.68	187.26
	8	0.62	5.31	208.35
	9	1.01	6.04	211.62
	10	0.79	6.45	207.80
	11	0.49	5.03	204.09
	12	0.31	4.60	219.25
	13	0.12	3.16	187.74
	14	0.15	3.65	175.87

Fig. 8. Los días señalados en color son aquellos en los que aparecen beach cusps. Las flechas rojas señalan un aumento energético en la hidrodinámica de la playa, la estrella indica el pico alcanzado y la fecha azul la disminución del valor de los parámetros hidrodinámicos final. Se puede observar el mismo modelo para estas tres series de beach cusps en los meses de primavera-verano.

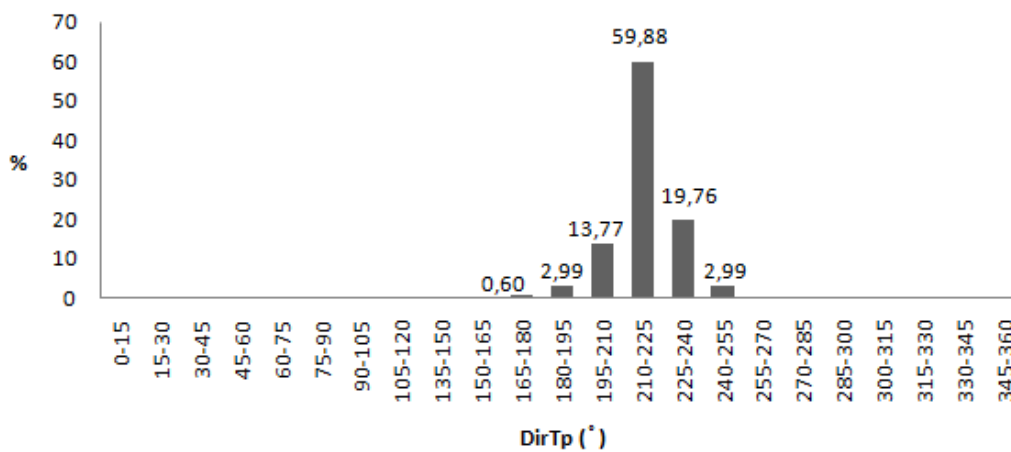
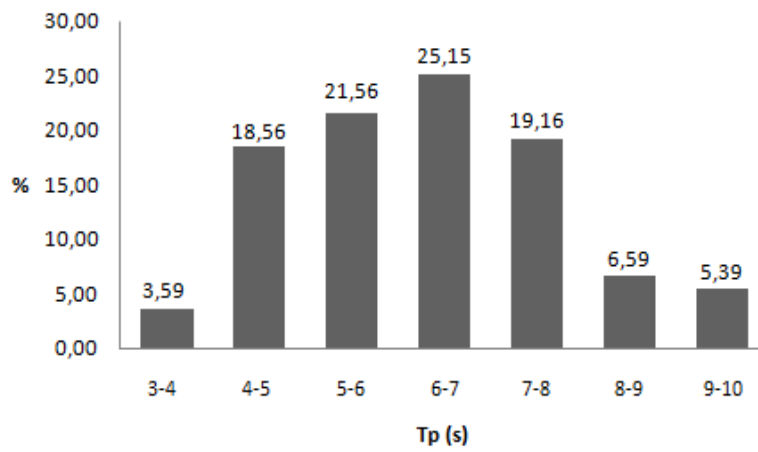
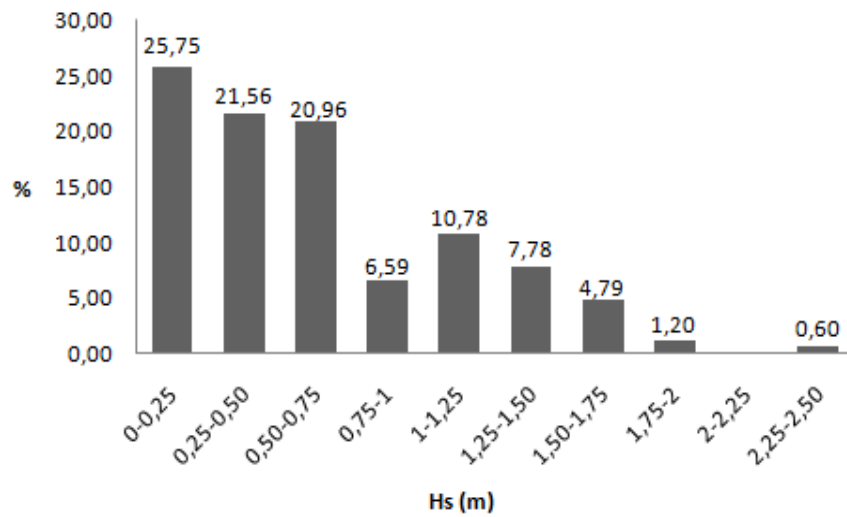


Fig. 9. Histogramas de la altura significativa (Hs), periodo (Tp) y dirección del oleaje (DirTp) para los días con beach cusps, de arriba abajo respectivamente. Datos obtenidos del perfilador de corrientes y oleaje Nortek awac, 2013 (el eje vertical representa la ocurrencia durante este periodo en %).

Para conocer cuál de nuestros tres parámetros hidrodinámicos influye más en la formación de beach cusps, realizamos el siguiente análisis:

$$\frac{P_{x=1}}{P_{x=0}} = e^Q$$

Siendo:

$P_{x=1}$ = presencia de beach cusps

$P_{x=0}$ = ausencia de beach cusps

Donde:

$$Q = 5.2651 - 3.0850 * H_s - 0.6696 * T_p - 0.0016 * D$$

Siendo:

H_s = Altura significativa del oleaje

T_p = Periodo de pico del oleaje

D = Dirección asociada a T_p

*(coeficientes obtenidos realizando una regresión logística a través de Matlab)

Desarrollando la ecuación quedaría:

$$\frac{P_{x=1}}{1 - P_{x=1}} = e^Q$$

$$P_{x=1} = e^Q - P_{x=1} * e^Q$$

$$P_{x=1} * (1 + e^Q) = e^Q$$

$$P_{x=1} = \frac{e^Q}{1 + e^Q} = \frac{1}{e^{-Q} + 1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{e^Q}}$$

Lo que hace que $P_{x=1}$ aumente es que $(1 + \frac{1}{e^Q})$ sea grande. Para que esto ocurra, $(\frac{1}{e^Q})$ también debe ser grande. Lo que quiere decir que e^Q debe ser pequeño y por lo tanto, que el valor de $Q \rightarrow -\infty$.

Como:

$$Q = 5.2651 - 3.0850 * H_s - 0.6696 * T_p - 0.0016 * D$$

El que más influye en que:

$$Q \rightarrow -\infty \equiv P_{x=1} = 1 \rightarrow 1, \text{ es } H_s.$$

5. Conclusiones

Se han analizado los parámetros hidrodinámicos e imágenes diarias de Playa de Palma, una playa arenosa de unos 5 km de longitud, durante el periodo de un año (2013). Se han observado beach cusps en un total de 167 días (45,75% de los días del año). La formación de beach cusps está claramente influenciada por la estacionalidad de clima, siendo esta morfología más frecuente en los meses de invierno y otoño y disminuyendo su presencia en los meses de primavera-verano. Durante el otoño y el invierno se observan las mayores condiciones energéticas (mayores alturas de olas), periodos mayores a 5 s y ángulos de incidencia del oleaje de carácter WSW-SW. La generación de beach cusps durante estos meses está ligada a la ocurrencia de eventos altamente energéticos (tormentas) y sucede de

forma simultánea a este hecho. Cuando esto es así, la morfología presenta generalmente continuidad longitudinal en el espacio. Los beach cusps se mantienen en la zona intermareal mientras perduran las condiciones energéticas y van decayendo posteriormente de forma progresiva.

Aunque presentan continuidad longitudinal en un primer momento, con el paso del tiempo van desapareciendo de forma desigual en el espacio. Durante estos meses más fríos la formación de beach cusps es más frecuente y estos son de mayor tamaño e intensidad que los que se pueden observar en los meses más cálidos. Con la llegada del buen tiempo la energía del ambiente disminuye de forma general, los periodos son menores (entre 3 y 5 s en la mayoría de los casos) y los ángulos de incidencia del oleaje tienen generalmente al SW-SSW. La formación de la morfología durante estos meses ya no está ligada a la presencia de tormentas. Los beach cusps se generan en condiciones de baja energía y, aunque también están relacionados con un aumento de las condiciones energéticas, se forman antes de que se alcance el bajo pico energético. Durante estos meses más cálidos la continuidad espacial de beach cusps a lo largo de la playa es prácticamente nula: para la mayoría de días de finales de primavera – verano sólo se pudieron ver beach cusps en la zona que se corresponde con la cámara número 9 y, en escasas ocasiones, también en la que se corresponde con la cámara número 5. Esto, unido al hecho de

que en los meses de otoño-invierno los beach cusps desaparecen de forma desigual en el espacio tras un periodo de continuidad longitudinal, como se comenta más arriba, nos revela la existencia de otro condicionante a la hora de hablar de la generación de beach cusps: la naturaleza del fondo y la inclinación de su pendiente en la zona intermareal.

Así, podemos concluir señalando que la presencia de beach cusps en esta playa está influenciada por las condiciones energéticas del mar, y por tanto, por la estacionalidad de nuestro clima.

Este trabajo es una primera toma de contacto con la materia. Sería interesante realizar un estudio de mayor profundidad, diferenciando distintos estadios morfológicos y teniendo en mayor cuenta la tipología y pendiente de los fondos, así como periodos de tiempo más amplios.

Agradecimientos

Al SOCIB por el acceso y autorización para el uso de sus bases de datos de imágenes y oleaje de Playa de Palma

.

6. Bibliografía

Aarninkhof, S.G.J., Holman, R.A., 1999. Monitoring the nearshore with video. *Backscatter* 10, 8–11.

Allen, J.R.L. 1996. The sequence of early land-claims on the Walland and Romney Marshes, southern Britain: a preliminary hypothesis and its

implications. *Proceedings of the Geologist's Association* 107, 271-280.

Coco, G., O'Hare, T.J. and Huntley, D.A. 1999. *Beach Cusps: A Comparison of Data and Theories for Their Formation*. *Journal of Coastal Research*, 15(3), 741-749. Royal Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Coco, G., Huntley, D.A., O'Hare, T.J., 2001. Regularity and randomness in the formation of beach cusps. *Marine Geology* 178, 1-9.

Coco, G., Burnet, T.K., Werner, B.T., 2003. Test of self-organization in beach cusp formation. *Journal of Geophysical Research* 108 (C3), 3101.

Dalrymple, G. B. and Clague, D. A., 1976. Age of the Hawaiian-Emperor bend, *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 31, pp. 313-329

Davison-Arnott, R. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. 1st Edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-87445-8.

Dean, R.G., Maurmeyer, E.M., 1980. Beach cusps at Point Reyes and Drakes beaches, California. *Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, pp. 863-884.

Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Cañellas, B., Alvarez-Ellacuria, A., Méndez, F.J., Medina, R., Tintoré, J. 2007. Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment. *Marine geology*, 242, 235-246

Guza, R.T., Inman, D.L., 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research* 80, 2997-3012.

Guillén, J., Díaz, J.I., 1990. Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro. *SCI.MAR.*, 54(4): 359-373

Holland, K.T., Holman, R.A., 1996. Field observations of beach cusps and swash motions. *Marine Geology* 134, 77-93.

Holland, K.T., 1998. Beach cusp formation and spacings at Duck, USA. *Continental Shelf Research* 18, 1081-1098.

Inman, D.L., Guza, R.T., 1982. The origin of swash cusps on beaches. *Marine Geology* 49, 133-148.

Jaume, C. Fornós, J.J., 1992. Composició i textura dels sediments de platja del litoral mallorquí. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* 35, 93-110.

Komar, P.D. 1973: Computer models of delta growth due to sediment input from rivers and long-shore transport. *Bull. Geol. Soc. Am.* 84. 2217-26.

Komar, P.D. 1976: Beach processes and sedimentation. Prentice-Hall, NJ.

Masselink, G., Hegge, B.J., Pattiaratchi, C.B., 1997. Beach cusps morphodynamics. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1139-1155.

Masselink, G., Pattiaratchi, C.B., 1998. Morphological evolution of beach cusps and associated swash circulation patterns. *Marine Geology* 146, 93-113.

Masselink, G., 1999. Alongshore variation in beach cusp morphology in a coastal embayment. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 335–347.

Masselink, G., P. Russell, G. Coco, and D. Huntley (2004), Test of edge wave forcing during formation of rhythmic beach morphology, *J. Geophys. Res.*, 109, C06003, doi:10.1029/2004JC002339.

Masselink, G., Hughes, M.G., and Knight, J. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. 2^o Edition: Hodder Education, 2011. ISBN 13: 978-1-444-12240-4.

Nieto, M. A., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G. A., Ortiz, A., Tintoré, J., Alvarez-Ellacuria, A., Gómez-Pujol, L. Orfila, A. (2010) An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms*. Wiley & Sons, Ltd. 1096 - 9837 (<http://dx.doi.org/10.1002/esp.2025>.)

Ortega-Sánchez, M., Fachin, S., Sancho, F., Losada, M.A. 2008. Relation between beachface morphology and wave climate at Trafalgar beach (Cádiz, Spain). *Geomorphology*, 99, 171-185
Pethick, J., *An Introduction to Coastal Geomorphology*. Londres, Gran Bretaña: 13^a Edición: Arnold. 1984. ISBN 0-7131-6391-7

Russell, R. J. y McIntire, W. G. 1965: Beach cusps. *Bull. Geol. Soc. Am.* 76, 307-20.

Sallenger, A.H., 1979. Beach cusp formation. *Marine Geology*, 29, 23–27.

Short, A.D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Chichester, West Sussex, England: Wiley, 1999. ISBN 0-471-96570.

Schwartz, L. W. 1972. Analytic continuation of Stokes' expansion for gravity waves. PhD thesis. Stanford University.

Werner, B.T., Fink, T.M., 1993. Beach cusps as self-organized patterns. *Science* 260, 968-971.

Wright, L.D., Short, A.D., 1983. Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia, *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. In: Komar, P.D. (Ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 35–64.

Estudio de la Morfodinámica de la Playa de Palma. Marzo 2011. IMEDEA (Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados).