



TESIS DOCTORAL  
Mariona Casamayor Font

Monitorización del transporte de cantos y morfología de la playa de San Felipe

# Monitorización del transporte de cantos y morfología de la playa de San Felipe

Tesis doctoral

Mariona Casamayor Font







D. SANTIAGO HERNÁNDEZ LEÓN COORDINADOR DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN OCEANOGRAFÍA Y CAMBIO GLOBAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

INFORMA,

De que la Comisión Académica del Programa de Doctorado, en su sesión de fecha                      tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la tesis doctoral titulada "*Monitorización del transporte de cantos y morfología de la playa de San Felipe*" presentada por la doctoranda D<sup>a</sup>. **Mariona Casamayor Font** y dirigida por el Doctor **Ignacio Alonso Bilbao** y codirigida por la Doctora **Nieves García Valiente**.

Y para que así conste, y a efectos de lo previsto en el Artº 11 del Reglamento de Estudios de Doctorado (BOULPGC 04/03/2019) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a      de                      de dos mil      .







# MONITORIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE CANTOS Y MORFOLOGÍA DE LA PLAYA DE SAN FELIPE

Programa de Doctorado en Oceanografía y Cambio  
Global

Instituto de Oceanografía y Cambio Global

Tesis presentada por **Mariona Casamayor Font** y dirigida por Dr. **Ignacio Alonso Bilbao** y codirigida por la Dra. **Nieves García Valiente**.

La Doctoranda,

El Director,

La Codirectora,

Las Palmas de Gran Canaria, a 14 de junio de 2022





*Als meus pares,  
sempre al meu costat*



“El camí que, a poc a poc,  
escris per demà”

Que tinguem sort, Lluís Llach





# Contenidos

Índice de figuras	v
Índice de tablas	x
Agradecimientos	xii
Presentación	xvi
Resumen	xviii
Abstract	xx
<b>Capítulo 1: Introducción y objetivos</b>	<b>2</b>
1.1.    Introducción	2
1.1.1.    Importancia de la Geomorfología Costera	2
1.1.2.    Morfodinámica de playas	3
1.1.3.    Playas de cantos y mixtas. Clasificaciones	5
1.1.4.    Caracterización hidrodinámica	9
1.1.5.    Transporte sedimentario	9
1.1.6.    Características morfológicas de las playas de cantos y mixtas	13
1.2.    Objetivo de la tesis	15
<b>Capítulo 2: Artículo 1</b>	<b>18</b>
<i>Long term recovery rates obtained using RFID technology at mixed beach</i>	
2.1.    Abstract	18
2.2.    Introduction	19
2.3.    Regional setting	20
2.4.    Methods	23

2.4.1.	Particle sampling and preparation	23
2.4.2.	Detection system	25
2.4.3.	Detection range	27
2.5.	Tracer characteristics	27
2.5.1.	Weight	27
2.5.2.	Size	28
2.5.3.	Shape	29
2.6.	Results	30
2.6.1.	Detection threshold	30
2.6.2.	Tracer recovery	30
2.6.3.	Factors related to the tracer	32
2.6.4.	Factors related to the environment	34
2.7.	Discussion	35
2.8.	Conclusions	40
2.9.	Acknowledgments	41
<b>Capítulo 3: Artículo 2</b>		<b>43</b>
Classification and characteristics of beaches at Tenerife and Gran Canaria Islands		
3.1.	Introduction	43
3.1.1.	Geological context	43
3.1.2.	Socio-economic context	46
3.2.	Beaches at Tenerife and Gran Canaria Islands	47
3.2.1.	Criteria used for beach classification	47
3.2.2.	Beaches at Tenerife Island	48
3.2.3.	Beaches at Gran Canaria Island	53
3.2.4.	Comparison between beaches in both islands	55
3.3.	Case studies	60
3.3.1.	Movement of pebbles and cobbles at San Felipe beach (Gran Canaria)	60
3.3.2.	Medium term sedimentary balance at Las Canteras beach	63
<b>Capítulo 4: Artículo 3</b>		<b>69</b>
Seasonal response of a composite beach in relation to wave climate		
4.1.	Abstract	69

4.2.	Introduction	70
4.3.	Regional setting	72
4.4.	Data and methods	75
4.4.1.	Morphological data	75
4.4.1.1.	Field measurements	75
4.4.1.2.	Volume change and morphometric parameters	77
4.4.2.	Wave propagation	78
4.4.3.	Hydrodynamic parameters	79
4.4.4.	Morphodynamic parameters	80
4.4.5.	Statistical analysis	82
4.5.	Results	82
4.5.1.	Wave model validation	82
4.5.2.	Wave climate	82
4.5.3.	Morphological response	84
4.5.4.	Morphodynamic behaviour	89
4.5.5.	Correlation between wave variables and morphodynamic	90
4.6.	Discussion	93
4.7.	Conclusions	103
4.8.	Acknowledgments	104
<b>Capítulo 5: Discusión</b>		<b>106</b>
5.1.	Discusión general	106
5.2.	Playas de cantos y mixtas en Canarias	107
5.3.	Monitorización del transporte de cantos con tecnología RFID	108
5.3.1.	Tasa de recuperación	109
5.3.2.	Factores que influyen en la tasa de recuperación	109
5.4.	Caracterización hidrodinámica mediante la propagación del oleaje	112
5.5.	Transporte de cantos	112
5.5.1.	Factores que intervienen en el transporte de cantos	114
5.6.	Respuesta morfológica de la playa compuesta de San Felipe	115



5.6.1. Elementos geomorfológicos	115
5.6.2. Cambios morfológicos estacionales	117
5.6.3. Efecto del clima marítimo en los cambios morfológicos	118
5.7. Principales parámetros morfodinámicos	120
5.8. Modelo de evolución morfodinámica de la playa de San Felipe	121
<b>Capítulo 6: Conclusiones y perspectivas</b>	<b>123</b>
6.1. Conclusiones generales	123
6.2. Perspectivas de futuro	128
<b>Referencias</b>	<b>130</b>
<b>Lista de símbolos y abreviaturas</b>	<b>152</b>
<b>Anexo I</b>	<b>154</b>
Otras contribuciones	
<b>Anexo II</b>	<b>156</b>
Caracterización morfométrica de los cantos en la playa de San Felipe, Gran Canaria	
<b>Anexo III</b>	<b>161</b>
Medición del transporte transversal de cantos en la playa de San Felipe (Gran Canaria)	
<b>Anexo IV</b>	<b>166</b>
Procesos de acumulación y erosión en playas mixtas en relación con el oleaje	

# Índice de figuras

- Figura 1.1.** Principales focos de erosión (rojo) y acumulación (verde) en las playas a escala global. Los valores corresponden a la tasa de cambio media de las playas arenosas para cada uno de los continentes analizados. Fuente: Luijendijk et al. (2018). 3
- Figura 1.2.** Clasificación de las playas de cantos y mixtas según Jennings and Shulmeister (2002): a) playas de cantos dominadas por cantos principalmente y con gran pendiente b) playas mixtas de arena y cantos donde se produce mezcla de arena y cantos a lo largo de todo el perfil c) playas compuestas donde la separación entre ambos tamaños está bien delimitada. Fuente: adaptado de Jennings and Shulmeister (2002). 8
- Figura 1.3.** Ejemplos de los distintos tipos de trazadores utilizados en el estudio del transporte sedimentario en playas de cantos: a) Trazadores de litologías exóticas. Fuente: Curoy (2012). b) Trazadores con pintura fluorescente. Fuente: Stark and Hay (2016). c) Trazador sintético creado a partir de resina epoxi con transmisión por radio de la ubicación. Fuente: Curoy (2012). Proceso de preparación de los trazadores pasivos, sistema RFID: d) Perforación de los cantos seleccionados. e) Transpondedor pasivo con número de identificación único para cada trazador introducidos en un tubo de plástico para su protección. f) Sellado con resina epoxi una vez introducidos los transpondedores. Fuente: elaboración propia. 13
- Figura 1.4.** Nomenclatura de las principales características morfológicas de las playas de cantos y mixtas. Fuente: adaptado de Orford and Anthony (2013). 15
- Figure 2.1.** a) Map of Canary Islands. b) The star close to the island of Gran Canaria indicates the wave buoy location used in this work, and the square shows the location of the study area. c) Aerial photograph of San Felipe beach. The line is the beach profile shown in Figure 2.3. 21
- Figure 2.2.** Photography of San Felipe beach at low tide during summer conditions. Note i) that pebbles and cobbles are very well rounded and quite well sorted, and ii) the sand over the lower foreshore. 22

- Figure 2.3.** *Beach profile at the central section of San Felipe beach. Profile location is shown in Figure 2.1c. Elevation corresponds to orthometric height. Note the net accumulation of sediments in the summer profile, which is mostly related to the onshore migration of the sand bar.* 23
- Figure 2.4.** *Hourly data recorded at the Gran Canaria buoy from March 2013 to August 2014. Tidal values were calculated with the WXTide32 program. Vertical lines show the date of the different field experiments.* 24
- Figure 2.5.** *a) Distribution of tracer weights using the  $\phi_w$  scale. b) Distribution of tracer sizes, in  $\phi$ . c) Distribution of tracer shapes according to the Sneed and Folk (1958) classification (C: compact, P: platy, B: bladed, E: elongate).* 29
- Figure 2.6.** *Axis length distributions for both populations: 198 particles used as tracers (lines) and 802 particles whose axes were measured (histograms).* 30
- Figure 2.7.** *Tri-plot diagram based on Sneed and Folk (1958), which represents particle shapes according to their orthogonal axes: 198 tracers, and 802 additional beach particles. a: long-axis, b: intermediate-axis, c: short-axis. C: compact, P: platy, B: bladed, E: elongate and V: very. Diagram generated after Graham and Midgley (2000).* 31
- Figure 2.8.** *Number of particles recovered in each field session. Continues and dashed lines are the linear and exponential fits, respectively.  $R^2=0.82$  in both cases.* 33
- Figure 2.9.** *Recovered tracers during the time span of the experiment depending on the axis through which the tag was inserted.* 33
- Figure 2.10.** *Time evolution of the number of recovered particles for the different weight categories ( $\phi_w$ ).* 34
- Figure 2.11.** *Recovered particles for each field session as a function of the length of the intermediate axis.* 35
- Figure 2.12.** *Recovered tracers as a function of particle shape.* 36
- Figure 2.13.** *Relationship between recovered particles and average significant wave height ( $H_s$ ) for the four considered cases.* 37
- Figure 2.14.** *Time evolution of the number of recovered tracers as a function of the elevation where they were found.* 38
- Figure 3.1.** *Location of the Canary Islands. Tenerife and Gran Canaria Islands are located in the centre of the archipelago. Eastern islands are older while those located westward are much younger. Image modified from Google Earth.* 44
- Figure 3.2.** *Location and classification of all the beaches at Tenerife Island. Note that beaches can be found all around the island except at the NE and NW ends on the island, as well as in the city area (between beaches 87-88). The colours key indicates the type of beach considered.* 49

- Figure 3.3.** *Photographs of several beaches in Tenerife Island. a and b) Typical sandy beach in the northern coast backed by high cliffs, so that debris are common in the upper part of the beach (La Garañona, number 16). c) Three artificial beaches in the SW coast. Two of them limited by groins and the one on the right is within the harbor area (El Camisón, Las Vistas and Los Cristianos beaches, 50-52 from left to right). d) Artificial beach of Las Teresitas (number 88), quite large and wide because is the closest beach to the main town in the island. e) Cobble beach of Playa Honda (number 48). It is quite narrow and a pedestrian promenade occupies the upper limit, which is quite common in tourist areas.* 53
- Figure 3.4.** *Location and classification of the different beaches at Gran Canaria Island. Note that at the northern and northwestern coast the amount of beaches is much lower than at the rest of the island. The colours key indicates the type of beach considered.* 54
- Figure 3.5.** *In situ and aerial view of several beaches at Gran Canaria. a) Guguy Chico beach (number 15), a magnificent sandy beach in the western coast. Note the dune attached to the cliff. b) Example of mixed beach, with sand in the lower foreshore and pebbles in the upper part of the profile (photograph taken at low tide, Vargas beach, number 51). c) Aerial view of El Veril beach (number 39), an artificial sandy beach formed by three sub-beaches, separated by curved groins. d) Aerial view of El Cura, Tauro and Amadores beaches (numbers 24-26 respectively from top to bottom). Note the different color of the sand, which indicates the different source of the material: El Cura is a natural beach, Tauro has been nourished with sand from the Sahara Desert, and Amadores has sand from a submerged sand bank rich in coralline algae, which explains the white colour.* 56
- Figure 3.6.** *a) Location of San Felipe beach (yellow rectangle in the upper panel) in the northern coast of Gran Canaria. b) Original location of the tracers (colour dots) in the six defined sectors (see text). c, d, e) Tracers location in the subsequent surveys. f) Evolution of wave height and wave direction measured offshore during the experiment. The red arrows refer to the dates of determining the tracers location on the beach.* 62
- Figure 3.7.** *a) Aerial view of Las Canteras beach, showing the three sectors that form the beach. Note the presence of the offshore bar. The yellow polygon corresponds to the area measured in the different DTMs. b) Difference between DTMs carried out in August 1996 and August 2006. c) Difference between DTMs carried out in August 2006 and November 2012. d) Difference between DTMs carried out in November 2012 and July 2015. e) Evolution of the amount of sediments at the beach considering the accumulation rates and the two extractions carried out in 2003 and 2009.* 67

- Figure 4.1.** *a) Location map of the study area. b) Situation of the tide gauge (black star) managed by the Spanish Ports Authority in Gran Canaria Island. c) Delft3D-WAVE nested model grids (resolution of  $300 \times 300$  m,  $100 \times 100$  m and  $30 \times 30$  m) and model nodes used for the extraction of bulk wave parameters. Red squares represent Iberia-Biscay-Irish (IBI) model nodes from Copernicus Marine Service used as wave input. Green triangles and blue dots indicate the offshore and the inshore nodes used in the analysis, respectively. SIMAR node 4035011 used to validate Delft3D-WAVE output data is shown as a yellow dot. d) Interpreted aerial photograph of San Felipe Beach showing the 12 profiles (red lines) used to obtain the morphological characteristics in the study area. Orthophoto source: IDECanarias, GRAFCAN S.A. (2015).* 74
- Figure 4.2.** *Schematic representation of beach face slope ( $\tan\beta$ ) and width calculations. Two subsystems (upper and lower part of the beach) used for a detail study. MSL: mean sea level in Las Palmas Port; MLWS: mean low water spring. This beach profile corresponds to profile 6 (centre of the beach) and was obtained from the DEM of 6th February 2015.* 78
- Figure 4.3.** *Validation of the hourly wave data (significant wave height,  $H_s$ , and peak period,  $T_p$ ) from 1st November to 31st November 2013. Data comparison was performed between SIMAR data and Delft3D-WAVE data corresponding to the closest node of the intermediate grid (Figure 4.1c).* 83
- Figure 4.4.** *Time-series of wave data corresponding to the central inshore node (C blue dot in Figure 4.1c) during the study period. Red line is the running average with a window of 7 days. The grey vertical bars represent the time interval between surveys.* 85
- Figure 4.5.** *Wave roses of significant wave height ( $H_s$ ) at the three inshore nodes (blue dots in Figure 4.1c). Upper row wave roses correspond to winter 2013/2014 (Nov 2013 to Apr 2014) and lower row wave roses represent summer 2014 (May 2014 to Oct 2014).* 86
- Figure 4.6.** *Long-term series of hourly significant wave height data on the central IBI node (C red square in Figure 4.1c). Green rectangle corresponds to the study period. Shown values correspond to the four largest average winters.* 87
- Figure 4.7.** *a) DEMs corresponding to a winter state (14th January 2014) and a summer state (26th September 2014), showing the presence of cusps and berms. b) Profile p1 shows the storm berm built in winter and the berm. c) Alongshore transect p2 from W-E with cusps bays and horns. d) and e) Photographic examples of berms and cusps on San Felipe Beach.* 88
- Figure 4.8.** *Cumulative volume changes ( $\Sigma\Delta V$ ) during the study period for the whole beach and the upper and lower zones.* 89



- Figure 4.9.** *a) Summer DEM (26th September 2014) with the location of three profiles (Figure 4.1d). b) Winter DEM (6th February 2015). c) Sediment budget between both DEMs. d) Profile comparison between summer (26th September 2014) and winter (6th February 2015) DEMs. e) Low tide summer photograph (26th September 2014), with lots of sand in the lower foreshore. f) Winter profile at low tide with no sand in the intertidal zone (28th January 2014).* 91
- Figure 4.10.** *a) Evolution of morphological variables: slope ( $\tan\beta$ ), width and coastline orientation (orientation) during the study period. b) Correlation between these variables and the sediment volume.* 94
- Figure 4.11.** *Temporal evolution of the morphodynamic parameters during the study period in the central offshore node (green triangle in Figure 4.1c).* 96
- Figure 4.12.** *Schematic representation in cross-section (left) and plain view (right) of the two seasonal states identified at San Felipe Beach. MSL: mean sea level in Las Palmas; MLWS: mean low water spring.* 101
- Figura 5.1.** *Número de partículas recuperadas en cada una de las campañas realizadas desde el 19 de marzo de 2013 hasta el 22 de marzo de 2015. La línea continua y la discontinua corresponden al ajuste lineal ( $R^2=0,64$ ) y exponencial ( $R^2=0,50$ ), respectivamente. Es análoga a la Figura 2.8 pero se han incluido los datos que faltaban hasta el final del periodo de estudio.* 110
- Figura 5.2.** *Transporte de cantos dividido en la componente longitudinal ( $\Delta x$ ) y la transversal ( $\Delta y$ ) en los diferentes intervalos de tiempo entre las campañas representadas en la Figura 3.6.* 114



# Índice de tablas

<b>Tabla 1.1.</b> <i>Escala de Udden-Wentworth con los términos en castellano para los distintos tamaños de grano y en inglés (cursiva). Las unidades phi corresponden a la escala logarítmica del tamaño de partículas según Krumbein (1941). Fuente: adaptado de Blair and McPherson (1999) y con los términos en castellano de Flor (2004).</i>	5
<b>Table 2.1.</b> <i>Summary of the different components that form the detection system.</i>	26
<b>Table 2.2.</b> <i>Morphometric properties and weight of selected particles used to determine weight loss resulting from the preparation of the tracers.</i>	28
<b>Table 2.3.</b> <i>Detection thresholds in three different media.</i>	32
<b>Table 3.1.</b> <i>Main characteristics of the four types of beaches considered in this work.</i>	48
<b>Table 3.2.</b> <i>Main characteristics of the beaches at Tenerife Island. More than one value in length indicates that there are several beaches very close to each other and responding to the same name. These are called “sub-beaches” (see text). Width is measured from high tide mark. Two values refer to the wider and narrower parts of the beach. Beach type description: sandy beach (1), mixed beach (2), pebbles-cobbles beach (3), artificial beach (4).</i>	50
<b>Table 3.3.</b> <i>Idem Table 3.2 for Gran Canaria Island beaches.</i>	57
<b>Table 3.4.</b> <i>Total and average values for the different beach types and for both considered islands. Beach type: sandy beach (1), mixed beach (2), pebbles-cobbles beach (3), artificial beach (4).</i>	59
<b>Table 3.5.</b> <i>Volume changes between DTMs carried out by Bolaños and Santana (1997) (August 1996), Medina et al. (2006) (August 2006), Demarcación de Costas (November 2012) and Alonso et al. (2015) (July 2015). Volume of material removed in each extraction, elapsed period between DTMs and accumulation rate are also shown.</i>	66

<p><b>Table 4.1.</b> <i>Survey characteristics and mean wave climate data between consecutive surveys. Survey characteristics include the date when the survey was conducted, days interval between surveys, the elevation of the most seaward measured point in the subtidal zone (minimum elevation measured) and the low tide height on the survey day (low tide height). Wave climate descriptors include mean significant wave height (Hs), mean peak period (Tp) and mean wave direction (Dir) for each interval computed in the central (C) offshore node (refer to Figure 4.1c).</i></p>	<p>76</p>
<p><b>Table 4.2.</b> <i>Statistically significant (<math>p</math>-value &lt; 0.01) correlation coefficients (<math>r</math>) of hydrodynamic variables of the central inshore node with respect to the morphological variables. Correlation between morphological and morphodynamic parameters correspond to values of the central offshore node, except for the run-up which was computed both from offshore and inshore node values (subscript off and in respectively). Empty cells and non-listed variables (<math>T_p</math>, wave direction, wave steepness, etc) correspond to non-statistically significant correlations (<math>p</math>-value &gt; 0.01). Gray values indicate directly related variables.</i></p>	<p>99</p>
<p><b>Table 4.3.</b> <i>Newly proposed classification of coarse-grain beaches based on Jennings and Shulmeister (2002) and the results obtained in this study.</i></p>	<p>102</p>

# Agradecimientos

He soñado con este instante durante mucho tiempo, y ahora que ha llegado tengo sentimientos encontrados, pura felicidad por este momento tan anhelado, y para mi sorpresa, *morriña*. Melancolía que vendrá implícita por ser el final de una etapa, pero sobre todo porque el doctorado siempre me ha permitido tener una parcelita de ciencia dentro de mi carrera profesional. Ha sido un viaje muy largo e intenso repleto de cansancio después de muchas horas de campo, de agobio cuando los resultados no son los esperados y estás estancada cuestionándote tus propias capacidades, y de mucha presión. Pero todo esto queda en segundo plano cuando ves tus artículos publicados y lo único que sientes es satisfacción personal. Pongo punto final a esta etapa de mi vida no sin antes agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado en esta travesía, total o parcialmente, y sin las cuales no hubiese podido llegar a destino.

En primer lugar, y no podría empezar de otro modo, me gustaría agradecer a mi director, el Dr. Ignacio Alonso Bilbao, todo su compromiso y dedicación sin la cual esta tesis no hubiese culminado. Gracias por todas las ‘aventuras’ vividas en la playa de San Felipe, muchas risas, esfuerzo y algún que otro peligro. Gracias por todas esas horas de corrección, que siempre serán *peccata minuta* en comparación con las invertidas en aconsejarme, guiarme y sobre todo enseñarme. Muchas gracias por confiar en mí, a veces más de lo que he confiado en mi misma, y por darme esta oportunidad para que hoy pueda sentirme muy orgullosa de haber terminado esta tesis. Después de tantos años es difícil establecer límites entre director, amigo y familia, y es por este motivo que para mí Nachete eres todos y cada uno de ellos. De modo que solo puedo decirte ¡Muchísimas gracias por todo Nacho!



También me gustaría agradecerle a mi codirectora, la Dra. Nieves García Valiente, todo el esfuerzo y dedicación que ha tenido con esta tesis, pero sobre todo conmigo. Nuestras vidas se cruzaron en el año 2003, sin embargo, jamás pensé que terminaría siendo la mejor codirectora que he podido tener nunca. Gracias por todo ese trabajo con la propagación del oleaje y por todo lo que me has enseñado, a pesar de que no siempre ha resultado fácil desde la distancia. Gracias por todas las horas de sueño que te he quitado corrigiendo mis discutibles expresiones en inglés. Desde el ámbito más personal, gracias por formar parte de mi vida, aunque llevamos tiempo separadas, vivo del recuerdo de todos aquellos momentos que hemos pasado juntas en Vigo, Plymouth y nunca se sabe los que nos quedan por delante. ¡Muchas gracias Nenita!

Agradecerle al Dr. Jorge Cabrera Gámez haber hecho posible esta tesis, no solo se encargó de construir todo el sistema de detección de los cantos, sino que además estuvo al pie del cañón en todas aquellas campañas donde el sistema decidió fallar, que os aseguro que no fueron pocas.

Que decir de las campañas de campo, para mí son un misterio totalmente desconcertante, cuando estás en ellas te sientes agotado y solo quieres terminar, pero cuando dejas de tenerlas, las necesitas en tu vida de nuevo. Sin embargo, lo que es indiscutible es que durante las campañas, el trabajo en equipo es esencial y por tanto sin todos vosotros no hubiese sido posible esta tesis. Gracias a todas aquellas personas, y espero no olvidarme ninguna, que han hecho posible las campañas de San Felipe: Nacho, Horta, Mariajo, Silvia, Isa, José Antonio, Nadia, Edu, Annetty, Abisai, Ricardo, Lea, Dídac y María.

Gracias a los miembros del grupo de investigación GEOGAR con los que he tenido la oportunidad de trabajar y aprender a lo largo de estos años. Gracias también a todas aquellas personas de la facultad de Ciencias del Mar que en algún momento u otro han contribuido en el desarrollo de esta tesis. Pero muy especialmente, gracias a Mariajo, Isa, Abi y Tania porque no hay momento más importante en esta travesía que esas deseadas pausas para el café, que aunque han variado en el tiempo y a veces de lugar, siempre han sido fundamentales. No tanto por el café, sino por las conversaciones, las risas, los chismorreos y sobre todo por vuestra compañía y apoyo. ¡Gracias a todos!

I would like to thank to Prof. Gerd Masselink for welcoming me to his team during my research stay in Plymouth. In just three months I acquired a lot of knowledge, and it was

a very important period for me because it was a great advance in my work. Thank you for your dedication. I also want to thank all the people who made my research stay more pleasant: Nieves, Diego, Rafa and Mark.

Gracias a todos mis compañeros de PLOCAN porque, aunque solo os conozco desde hace 4 meses, me habéis regalado todo vuestro apoyo en esta recta final. Y en especial a Joaquín y Silvana que han hecho posible que hoy me encuentre escribiendo estas líneas. ¡Gracias a todos!

Muchas gracias a mi familia canaria, que hacéis de esta isla un sitio mucho más agradable donde vivir. Gracias Mariajo e Isa por dejarme formar parte de vuestras familias, por convertirme en la Tita Nona de vuestros hijos, por todos esos buenos momentos compartidos, por esos días de playa tan anhelados, por las risas, por todo el apoyo que me habéis ofrecido durante tantos años, por ayudar a levantarme, por todos esos paseos perrunos, por hacer las horas de laboratorio o campo mucho más livianas. Muchas gracias a Fran y Miguel, porque a pesar de ser pequeños, en su momento me recordaron qué es lo más importante de esta vida. En definitiva, no tengo palabras suficientes de agradecimiento para todos vosotros, y solo deseo que independientemente donde nos lleve la vida, podamos seguir formando parte de la misma familia. ¡Muchas gracias familia Hortas-Sánchez y Montoya-Montes!

Moltes gràcies als del Goya, som un grup ben peculiar, i no només amb el menjar, però sempre és un plaer tornar a Barcelona i reunir-nos. Son molts anys els que portem caminant plegats, alguns de vosaltres us conec des de la llar d'infants, i espero que ho puguem seguir fent per molts anys més. M'agradaria donar les gràcies de forma especial a la Laura i a la Xènia que com a bones doctores que son, m'han aconsellat i ajudat incondicionalment. Quantes hores s'han passat el telèfon per animar-me i donar-me suport durant tots aquest anys, i en especial aquesta fase final que ha sigut del tot interessant. Espero que algun dia no molt llunyà pugui ser més a prop per compartir aquesta etapa tan bonica que acabeu de començar. I es que en el fons les tres sabem que tot anirà bé. ¡ Moltíssimes gràcies boniques!

Por último, pero no por ello menos importante quiero agradecerle a mi familia todo su esfuerzo y apoyo porque sin ellos jamás hubiese realizado el doctorado.

Per fi ha arribat aquest moment tan desitjat per els quatre, i es que tots tenim clar que el lema dels Casamayor Font sempre ha sigut i serà P i C. La gent pensarà que son les inicials del papa, o un ordinador o qui sap quina altre cosa, però el més important és que per nosaltres son les paraules que ens donen força, empenta i ganes de lluitar. Gràcies mamuxi i papuxi per la vostra generositat, amb només 18 anys veu deixar volar a la vostre petita i gràcies això avui he arribat on he arribat. Aquesta tesis és també vostre. Gràcies per tots els valors que m'heu inculcat, generositat, humilitat, treball, empatia, honestat i principalment per ensenyar-me què és una família. Gràcies perquè encara que sóc lluny, ser de bona tinta que no estic sola, i que sempre sereu el meu costat. Cauré mil vegades més, i segurament no serà gens fàcil per vosaltres, però no dubteu que em tornaré aixecar, és el que meu ensenyat. Gràcies, gràcies i més gràcies però sobretot gràcies per estimar-me.

Mariona  
Junio 2022

# Presentación

Esta tesis doctoral titulada “Monitorización del transporte de cantos y morfología de la playa de San Felipe” se ha desarrollado dentro del Programa de Doctorado en Oceanografía y Cambio Global de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria bajo la supervisión del Dr. Ignacio Alonso Bilbao miembro del grupo de Geología Aplicada y Regional (GEOGAR) perteneciente al Instituto Universitario de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG) y de la Dra. Nieves García Valiente, del Met Office (Reino Unido). En ella se incluyen tres contribuciones científicas originales: dos artículos publicados en revistas internacionales indexadas en el *Journal Citations Reports* (JCR) y un capítulo de libro indexado en *Scopus*.

La presente tesis doctoral se presenta en formato de tesis por compendio de publicaciones según el Reglamento de Estudios de Doctorado de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (BOULPGC de 9 de enero de 2013, modificado en el BOULPGC de 4 de marzo de 2019, Capítulo III, Artículo 12). Esta tesis se organiza en tres grandes bloques, el primero de ellos en el que se incluye una introducción general en la que se aborda la importancia de la comprensión de los mecanismos que tienen lugar en las playas, los antecedentes de la morfodinámica de las playas de cantos y mixtas y los principales objetivos de esta investigación. El segundo bloque está formado por las tres contribuciones científicas en formato artículo que contribuyen a alcanzar los objetivos previamente establecidos. Finalmente, en el último bloque se expone una discusión general dando lugar a las conclusiones y a las futuras líneas de trabajo que se abren a partir de esta tesis.

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral la doctoranda ha realizado una estancia de 3 meses (desde el 18 de septiembre de 2016 hasta 18 de diciembre de 2016) bajo la supervisión del Prof. Gerd Masselink en el Coastal Processes Research Group (CPRG) de la University of Plymouth en el Reino Unido. Asimismo, ha participado en diversos proyectos de investigación y asistencias técnicas del grupo GEOGAR fruto de los cuales se han realizado diferentes contribuciones científicas tanto en revistas indexadas como en participaciones en congresos nacionales e internacionales (Anexo I, II, III y IV).

# Resumen

El interés científico en la franja costera ha ido en aumento en las últimas décadas, no sólo para la comprensión y cuantificación de los distintos procesos costeros, sino para minimizar las alteraciones causadas por los dos tercios de población mundial que reside y desarrolla su actividad económica en esta zona. Las playas de cantos y mixtas han sido poco estudiadas debido a las dificultades logísticas que conllevan y al menor interés turístico que presentan. Sin embargo, han sido descritas en la literatura científica como amortiguadores naturales de oleajes extremos y de la subida del nivel del mar.

En el presente trabajo se han clasificado las playas de Tenerife y Gran Canaria en función de su naturaleza y el sedimento dominante, con el objetivo de determinar la importancia de las playas de cantos y mixtas en Canarias. En Tenerife el 57% de las playas de más de 100 m, y en el caso de Gran Canaria el 50% corresponden a playas de cantos y mixtas. La distribución espacial de estas playas está determinada por las características geológicas de las islas.

En particular, se ha estudiado la evolución morfológica de la playa de San Felipe (Gran Canaria), como caso de estudio de playa compuesta, a partir de la toma de datos topográficos con estación total y de los modelos digitales de elevaciones generados con estos datos. Además, se ha analizado el transporte de cantos mediante tecnología RFID y el clima marítimo para la determinación de los principales procesos que intervienen en las playas compuestas.

La similitud de los resultados de este estudio con las tasas de recuperación de otros trabajos, validan la aplicación de la tecnología RFID para la medición del transporte de

cantos a largo plazo. Sin embargo, esta tasa puede verse afectada por factores como la duración del periodo de estudio, el entierro de los trazadores, la orientación de los transpondedores o la ubicación de los trazadores en el perfil de playa.

La caracterización morfodinámica y el estudio del transporte de cantos ha permitido generar el modelo de evolución morfodinámica de la playa de San Felipe donde se identifica un fuerte carácter estacional dando lugar a dos estados claramente diferenciados. En verano, el oleaje dominante es del NNE y se caracteriza por ser poco energético y con rotura de tipo *spilling*. Estas condiciones favorecen que la arena de la zona submareal migre hacia la playa cubriendo parte de los cantos situados en la zona intermareal baja. Este cambio volumétrico causa modificaciones importantes en la morfología de la playa, como el aumento de la anchura de playa, la disminución de la pendiente y la rotación de la línea de costa en dirección ONO-ESE. La marea adquiere relevancia dando lugar a la creación de múltiples bermas situadas por debajo de la berma de tormenta, que es parcialmente desmantelada por el transporte transversal de cantos causado por los procesos de gravedad. La playa sigue un patrón más disipativo-intermedio. Por el contrario, en invierno el oleaje procede del N y es más energético, con una rotura de tipo *plunging* que favorece la erosión de la arena siendo depositada en forma de barra en la zona submareal, y dando lugar a una playa de cantos de tipo reflectivo. De este modo, se produce una disminución severa de la anchura de la playa y una rotación de la línea de costa en dirección O-E. A pesar de que predomina el transporte longitudinal, el fuerte oleaje desplaza los cantos hacia la parte alta del perfil de playa formando una única berma de tormenta, que a veces puede aparecer parcialmente segmentada, causando un aumento significativo de la pendiente de la playa. Estas condiciones favorecen la presencia de *beach cusps* en los que se identifican procesos de selección por tamaño de grano. Este modelo de evolución morfodinámica de San Felipe sirve como ejemplo del comportamiento de las playas compuestas estacionales.



# Abstract

Scientific interest in coastal zone increased in recent decades, not only because it is necessary to better understand and quantify coastal processes, but also because it is essential to minimize the alterations caused by the two-thirds of the world's population who lives and develops its economic activity in this area. Gravel and mixed beaches have been understudied due to the logistical difficulties involved and the lower tourist interest. However, they have been described in the scientific literature as a very efficient natural buffer against extreme waves and flooding due to sea level rise.

In the present work, the beaches of Tenerife and Gran Canarias have been classified according to their nature and the dominant sediment, with the aim of determining the importance of gravel and mixed beaches in the Canary Islands. At Tenerife Island, gravel and mixed beaches represent the 57% of the beaches longer than 100 m and in the case of Gran Canaria is the 50%. The spatial distribution of these beaches is determined by the geological characteristics of the islands.

In detail, the morphological evolution of the composite beach of San Felipe (Gran Canaria) has been studied conducting topographic surveys using a total station and through the comparison of digital elevation models generated from these. In addition, the transport of gravel has been analysed using RFID technology and the maritime climate has been studied to determine the main processes driving the morphological response of composite beaches.

The similarity of the results of this study compared with the recovery rates of other works, validate the application of RFID technology for long-term transport of gravels. However,

this rate can be affected by factors such as the duration of the study period, the burial of tracers, the tags orientation and the tracers location on the beach profile.

The morphodynamic characterization and the study of the transport has allowed to reconstruct the morphodynamic evolution model of San Felipe Beach, where a strong seasonal behaviour was identified and two main beach states were defined. In summer, dominant waves are from the NNE. They have low energy levels and a spilling break type. These conditions favour that sand from the subtidal zone migrates towards the beach (i.e., onshore transport), covering the pebbles and cobbles located in the lower foreshore. This volumetric change causes important modifications on the morphology of the beach, such as a width increase, a slope decrease and coastline rotation in a WNW-ESE direction. Hence, the tide becomes important causing multiple berms located below the storm berm, which is partially dismantled by the cross-shore transport of gravel caused by gravity processes. The beach follows a more dissipative-intermediate pattern. Conversely, in winter, waves come from the N and are more energetic with a plunging break type, which determines the erosion of sand, being transported offshore. Thus, there is a strong decrease in the beach width and the coastline rotation is in a W-E direction. Although longshore transport dominates, the high-energy waves move the coarse-grained particles towards the upper part of the beach profile, where a single storm berm develops. This process causes a significant increase in the slope of the beach producing a reflective behaviour. These conditions enhance the presence of cusps on the beach face which present a sorting process This morphodynamic evolution model of San Felipe serves as an example of the behaviour of seasonal composite beaches.

# Capítulo 1



# Introducción y objetivos

## 1.1. Introducción

### 1.1.1. Importancia de la Geomorfología Costera

La costa es la interfaz donde la atmósfera, el océano y la superficie terrestre intercambian materia y energía. Los procesos que tienen lugar en la costa la convierten en uno de los ambientes más dinámicos de la Tierra. Sin embargo, estos procesos han sido alterados en las últimas décadas debido a la actividad humana puesto que dos tercios de la población mundial reside y desarrolla su actividad principal en la franja costera (Komar, 1998). Esta alteración de los procesos naturales como por ejemplo la subida del nivel del mar, la mayor recurrencia de fenómenos meteorológicos extremos o las inundaciones afectan tanto a los ecosistemas como la actividad humana. La subida del nivel del mar y la consiguiente erosión de las playas provocarán en un futuro cercano desplazamientos drásticos de población e infraestructuras (Sherman, 2013) (Figura 1.1). Por este motivo, la geomorfología costera se ha convertido en una de las disciplinas más relevantes, ya que mediante la comprensión de los mecanismos e interacciones morfodinámicas que tienen



lugar en la franja costera se pueden minimizar las alteraciones y realizar una gestión de las zonas costeras adecuada y sostenible en el tiempo (Davidson-Arnott, 2010).

La costa mundial es muy variable tanto espacial como temporalmente y está formada por diferentes tipos de ambientes como por ejemplo las islas barrera, acantilados, deltas o playas entre otros (Luijendijk et al., 2018). Generalmente la literatura científica en el campo de la geomorfología costera está centrada en las playas debido a que son uno de los recursos naturales de mayor importancia (Komar, 1998). El estudio de las playas se desarrolló rápidamente durante la Segunda Guerra Mundial (Jackson and Nordstrom, 2020) debido a que estos ambientes sedimentarios se utilizaban como zonas de desembarco y se dieron cuenta de la falta de conocimientos sobre los procesos que ocurren tanto en la zona de surf como de batida, dificultando las maniobras (Short, 1999).

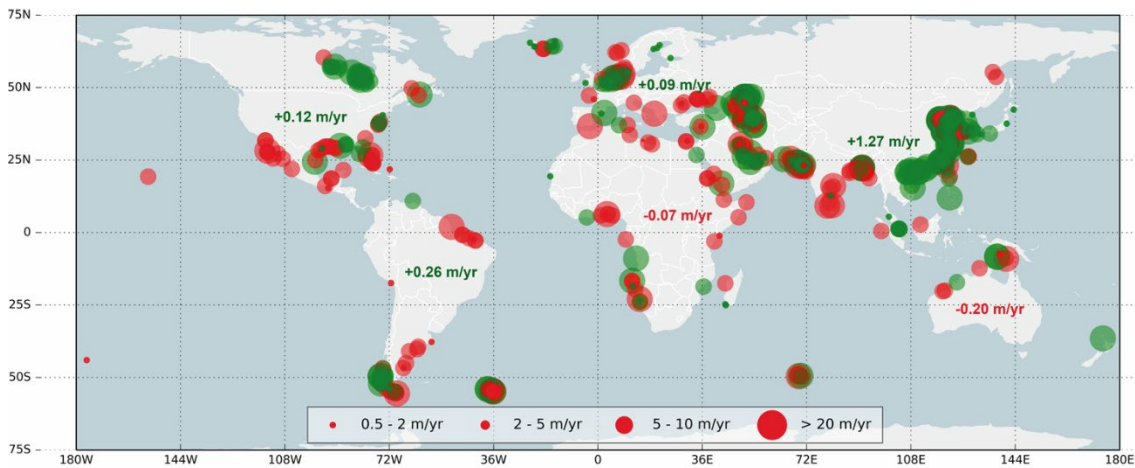


Figura 1.1. Principales focos de erosión (rojo) y acumulación (verde) en las playas a escala global. Los valores corresponden a la tasa de cambio media de las playas arenosas para cada uno de los continentes analizados. Fuente: Luijendijk et al. (2018).

### 1.1.2. Morfodinámica de playas

La clasificación de las playas ha sido objeto de estudio de muchos científicos. Los sistemas de playas son el producto de la interacción del oleaje y la marea en los sedimentos. Por ello, las clasificaciones más empleadas son las que clasifican las playas

según alguno de estos parámetros, como por ejemplo las playas de alta o baja energía (según las características del oleaje), playas macro, meso o micromareales (según el rango mareal) o playas de arena, cantos, gravas, bolos o mixtas (según el tamaño de grano del sedimento). Autores como Sonu et al. (1973) y Battjes (1974) ya relacionaban los cambios espacio-temporales que se registran en la playa con el transporte de sedimentos inducido por el oleaje, pero fueron Wright and Thom (1977) quienes introdujeron en la literatura científica el término morfodinámica de playas, que se define como la interacción recíproca entre la topografía y la dinámica de fluido que involucran el transporte de sedimentos. Trabajos posteriores permitieron elaborar modelos destinados a clasificar las playas en función de su variabilidad morfológica y dinámica (p.ej., Wright and Short, 1984; Masselink and Short, 1993).

Gran parte de los trabajos científicos se han centrado mayoritariamente en las playas de arena. Sin embargo, en las últimas décadas ha aumentado significativamente el interés por las playas de cantos y mixtas (p.ej., Bluck, 1967; Carter and Orford, 1993; Mason and Coates, 2001; Jennings and Shulmeister, 2002; Allan et al., 2006; Buscombe and Masselink, 2006; Bertoni et al., 2012; López-Ruiz et al., 2020). En la literatura científica no existe homogeneidad entre estos términos, por lo que en este trabajo se consideran las playas en función del tamaño de grano de sus sedimentos según la escala de Udden-Wentworth (Tabla 1.1) que se ha convertido en el estándar universal para describir el tamaño de grano de sedimentos (Blair and McPherson, 1999). Playas de arena son aquellas cuyos sedimentos están formados predominantemente por tamaños de grano entre 0.063 mm y 2 mm, playas de cantos es un término general que hace referencia tanto a las playas de gravas y cantos constituidas por sedimentos entre 2 y 256 mm y finalmente, playas de bolos con tamaños de grano superiores a 256 mm. Sin embargo, en la naturaleza existen otras variedades de playas como son las playas mixtas, donde predominan dos tamaños de grano claramente diferenciados y presentan por tanto una distribución granulométrica bimodal. A pesar de que McLean (1970) definió las playas mixtas como aquellas que tienen proporciones casi iguales entre ambas modas, no existe una definición clara sobre la proporción de arena o cantos necesaria para definir una playa como mixta (Mason and Coates, 2001) porque según establece Ciavola and Castiglione (2009) las proporciones dependen de la fuente de sedimentos y de la energía del oleaje a la que está expuesta la playa.

Tabla 1.1. Escala de Udden-Wentworth con los términos en castellano para los distintos tamaños de grano y en inglés (*cursiva*). Las unidades phi corresponden a la escala logarítmica del tamaño de partículas según Krumbein (1941). Fuente: adaptado de Blair and McPherson (1999) y con los términos en castellano de Flor (2004).

Diámetro del tamaño de partículas		Grado	Clase	En este estudio
mm	Phi ( $\phi$ )			
> 256.00	-8		Bloque <i>boulder</i>	Cantos <i>gravel</i>
			Canto <i>cobble</i>	
64.00	-6		Grava <i>pebble</i>	
4.00	-2		Gravilla <i>granule</i>	
2.00	-1			Arena <i>sand</i>
		Muy gruesa		
1.00	0			
		Gruesa		
0.50	1		Arena <i>sand</i>	
		Media		
0.25	2			
		Fina		
0.125	3			Lodo <i>mud</i>
		Muy fina		
0.063	4			
		Grueso		
0.031	5		Limo <i>silt</i>	
		Medio		
0.015	6			
		Fino		
0.008	7			Lodo <i>mud</i>
		Muy fino		
< 0.004	8		Arcilla <i>clay</i>	



### 1.1.3. Playas de cantos y mixtas. Clasificaciones

Desde los años 60 del siglo XX son varios los autores que han desarrollado clasificaciones para playas de cantos y mixtas según sus características morfológicas y sedimentológicas. Bluck (1967) realizó una de las primeras clasificaciones de las playas de cantos en función de la distribución de los sedimentos en base a su tamaño y forma de grano. Bluck (1967) estableció que las partículas de tamaño y forma diferentes no respondían del mismo modo al oleaje, por lo que definió dos tipos de facies diferenciadas en función de la energía del oleaje incidente (alta o baja), y de los patrones de distribución de sedimento según forma y tamaño de las partículas. Posteriormente han sido varios los autores que desarrollaron sus trabajos a partir de las bases establecidas por Bluck (1967) (p.ej., Orford, 1975; Caldwell and Williams, 1985; Williams and Caldwell, 1988).

Otra de las clasificaciones de playas de cantos que aparece en la literatura científica es la establecida por Carter and Orford (1993). En este estudio se analizó la evolución de las playas de cantos a largo plazo. Estos autores sugirieron que la forma del perfil de playa y la pendiente de la zona submareal son los factores determinantes para el comportamiento morfodinámico de este tipo de playas. Sus resultados les permitió definir dos tipos de perfiles de playa: el primero formado por una única pendiente rectilínea desde la cresta de la berma hasta la profundidad de cierre, ignorando las pequeñas crestas y barras. El segundo tipo corresponde a un perfil de playa compuesto, definido también desde la cresta de la berma hasta la profundidad de cierre, donde la zona intermareal superior presenta una mayor pendiente que la zona intermareal inferior que genera un cambio brusco de pendiente en el perfil de playa.

Pye (2001) establece la clasificación de las playas en función de la proporción de arena y de su distribución a lo largo de la playa. Según este autor existen tres tipos de playas: playas de cantos (*pure gravel beaches*), playas con una zona intermareal superior y supramareal formada por cantos y una zona intermareal inferior y submareal constituida por arena y finalmente las playas mixtas de arena y cantos (*mixed sand and gravel beaches*) donde la división espacial entre ambos componentes no está claramente definida.

Jennings and Shulmeister (2002) propusieron una de las clasificaciones más empleadas en playas de cantos a partir del análisis de 42 playas de Nueva Zelanda. En ella se definían tres tipos de playas en función de características geomorfológicas y morfodinámicas tales como la anchura de la playa, la altura de la berma de tormenta, el número de bermas, la pendiente del perfil activo de la playa, el tamaño medio de grano o el número de Iribarren. Según los análisis llevados a cabo por estos autores, existen tres tipos de playas: playas de cantos, playas mixtas de arena y cantos y playas compuestas (Figura 1.2). Las playas de cantos (*pure gravel beaches*, PG) dominadas por cantos con tamaños medios que varían entre 4 y 64 mm. Son playas con una gran pendiente, altamente reflectivas donde se desarrollan distintas geoformas como bermas de tormenta o *beach cusps*. El segundo tipo de playa definido por Jennings and Shulmeister (2002) son las playas mixtas de arena y cantos (*mixed sand and gravel beaches*, MSG) que presentan mezcla de sedimento (arenas y cantos) a lo largo del perfil y en profundidad. Son playas que se caracterizan por una zona de batida que controla el régimen hidrodinámico de la playa y el transporte de sedimentos, con un oleaje de tipo *plunging* y *collapsing*. Finalmente, el tercer tipo de playas son las denominadas playas compuestas (*composite beaches*) donde el perfil de playa está compuesto por dos partes; una parte inferior, hacia el mar, caracterizada por una pendiente pequeña y sedimento mayoritariamente de tipo arena. Y una parte superior, formada principalmente por cantos que tiene una elevada pendiente y por tanto presenta un fuerte carácter reflectivo durante la pleamar.

Aragonés et al. (2015) establece un modelo de clasificación donde se describen cinco tipos de playas diferentes. Esta clasificación resultó del análisis discriminante de 34 playas de la costa de Alicante teniendo en cuenta 14 variables: moda del sedimento (bimodal o unimodal), el tamaño de grano en función de los diferentes percentiles ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ), fuente de sedimento, altura de ola en la rompiente ( $H_b$ ), periodo de pico ( $T_p$ ), dirección del oleaje, la frecuencia del oleaje, el tipo de perfil, longitud del perfil hasta la profundidad de cierre, la pendiente de la berma, la profundidad a la que se localiza la *Posidonia oceánica* y la distancia a la fuente de sedimento.

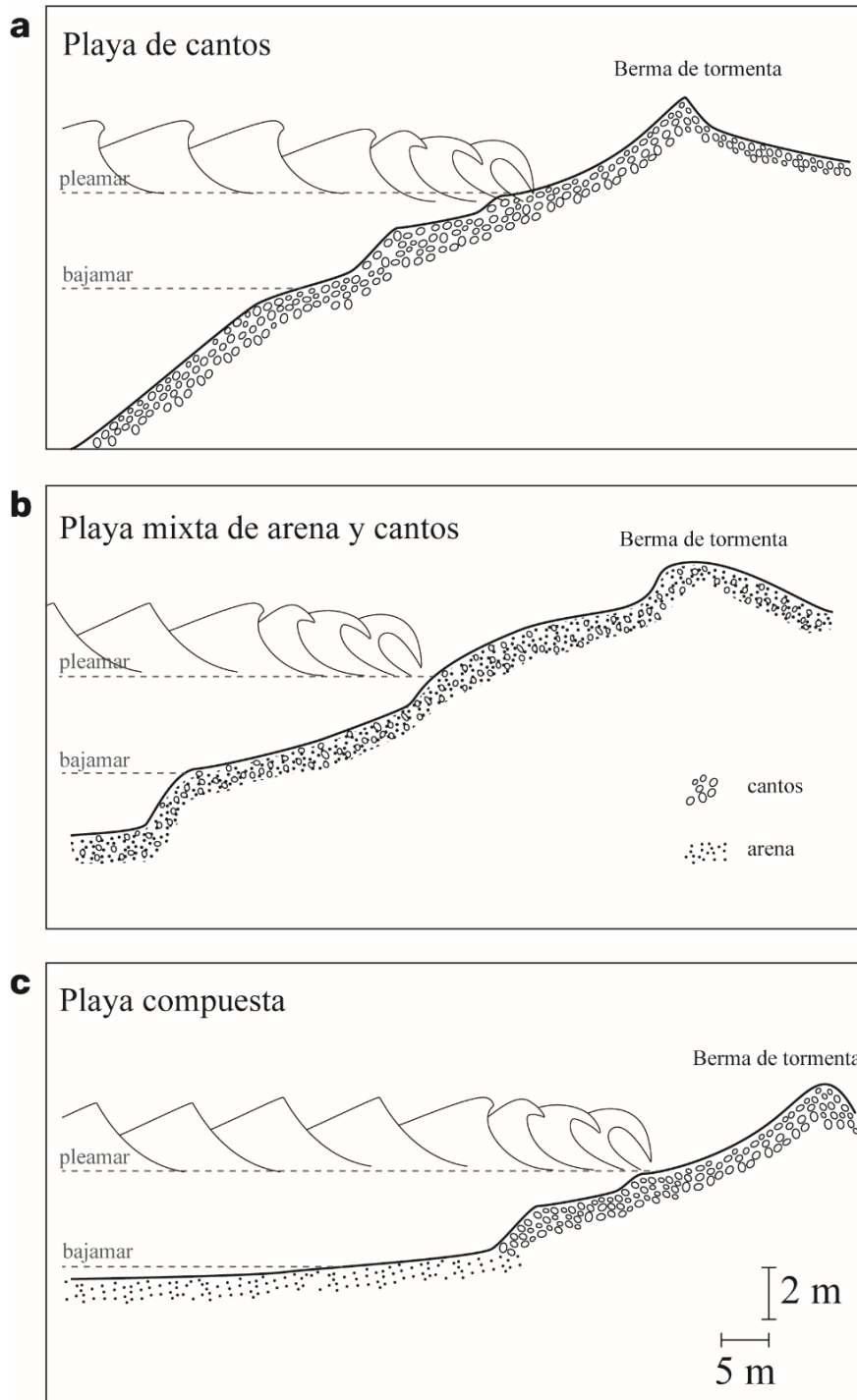


Figura 1.2. Clasificación de las playas de cantos y mixtas según Jennings and Shulmeister (2002): a) playas de cantos dominadas por cantos principalmente y con gran pendiente b) playas mixtas de arena y cantos donde ambos tamaños están mezclados a lo largo de todo el perfil c) playas compuestas donde la separación de los cantos y la arena está bien delimitada. Fuente: adaptado de Jennings and Shulmeister (2002).

#### 1.1.4. Caracterización hidrodinámica

En los últimos 50 años se ha producido un importante avance en los modelos físicos de alta calidad que permiten conocer las principales características del oleaje en la franja más cercana a la costa. Esta información es esencial tanto para el diseño de infraestructuras como para la gestión adecuada de las actividades económicas y recreativas que tienen lugar en el ámbito marino, además de necesarias para la gestión de todos aquellos recursos que nos ofrece el océano. Los modelos numéricos de oleaje se pueden dividir en diferentes grupos en función de distintos parámetros como su complejidad, su aplicabilidad en aguas profundas o someras, del uso de datos de oleaje paramétricos o espectrales, entre otros criterios (Guisado-Pintado, 2020).

Las playas son sistemas sedimentarios dinámicos que están afectados por las condiciones hidrodinámicas (oleaje, mareas y corrientes) de la zona submareal. La mayoría de los datos de oleaje disponibles corresponden a datos en aguas profundas que pueden obtenerse a partir de mediciones de boyas, modelos físicos o datos de altimetría obtenidos por satélites. Sin embargo, a medida que las olas se desplazan hacia la costa, van experimentando cambios en su comportamiento y estructura que son significativos, por lo que los modelos de propagación de oleaje en entornos someros se han convertido en una herramienta fundamental para predecir y comprender la morfodinámica de la costa (Guisado-Pintado, 2020).

#### 1.1.5. Transporte sedimentario

En las últimas décadas, comprender los principios de la morfodinámica de las playas, y en particular calcular el transporte de sedimentos ha sido uno de los objetivos fundamentales del estudio de playas (Bertoni et al., 2013). Las investigaciones desarrolladas han intentado definir mejor cada aspecto que interviene en el transporte de sedimentos, desde la evaluación más sencilla del desplazamiento de la arena a lo largo de la costa hasta la predicción más compleja sobre el comportamiento de las partículas en un fluido con unas características determinadas (Bertoni et al., 2010). Sin embargo, las playas de cantos y mixtas son sistemas de los que aún no se dispone toda la información sobre su funcionamiento debido tanto a los problemas de escala que implica la reproducción de estos ambientes en un laboratorio como la propia preparación de los

experimentos en el campo (Buscombe and Masselink, 2006). Esta complejidad en el estudio de ambos tipos de playas hace que no se dispongan de suficientes datos a largo plazo de la respuesta de la playa y por tanto que los modelos numéricos de predicción sean poco precisos.

Por otro lado, el interés para definir los procesos morfodinámicos que tienen lugar en las playas mixtas y de cantos va en aumento debido principalmente a la creación de playas artificiales de ambos tipos (Kirk, 1992). Este tipo de playas son consideradas una herramienta de protección natural frente a la erosión costera por su alta eficacia de amortiguación a oleajes de alta energía que le otorgan un elevado grado de estabilidad (Komar and Allan, 2010). La amplia distribución global de las playas mixtas y de cantos (Holland and Elmore, 2008), su complejidad morfodinámica y el creciente uso de este tipo de playas como protección de la costa ponen de manifiesto la importancia de desarrollar más investigación en estos sistemas que nos permitan obtener un mayor conocimiento de su comportamiento y a su vez una mejor gestión de estas como recursos (Miller and Warrick, 2012).

La medición del transporte sedimentario en playas de cantos y mixtas se realiza principalmente con tres técnicas (Miller and Warrick, 2012). La primera es la toma de datos topográficos. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se desarrollaron a finales de la década de los 80 y fueron reconocidos rápidamente como una potente herramienta para la gestión costera (Davidson-Arnott, 2010). La mayoría de los softwares de SIG incorporan funciones para la interpolación de los datos topográficos que generan una superficie continua denominada modelo digital de elevaciones (MDE). Asimismo, estas herramientas también permiten el cálculo del área y volumen de una superficie en relación con un plano de referencia o respecto de otra superficie (Hamylton, 2017), lo que genera mayor información tanto espacial como temporal sobre los cambios que experimentan estos sistemas tan dinámicos.

La segunda técnica corresponde a la implementación de trampas de sedimento que proporcionan una medida absoluta de la tasa de transporte en una escala de tiempo determinada (Kraus, 1987). Las trampas permiten medir tanto el transporte por carga de fondo como por suspensión (Austin and Masselink, 2006). Principalmente existen dos tipos de trampas, las fijas y las móviles, y que pueden ser colocadas de manera paralela a

la línea de costa para la obtención del transporte de sedimentos causado por la deriva litoral o perpendicular a la costa para el estudio del transporte originado durante el movimiento de ascenso (*uprush*) y el de retroceso (*backwash*) (Curoy, 2012). La mayoría de los estudios en playas de cantos y mixtas utilizan las trampas de sedimento de tipo móviles (p. ej., Chadwick, 1989; Bray et al., 1996; Austin and Masselink, 2006; Dawe, 2006; Ivamy and Kench, 2006; Payo et al., 2020). Sin embargo, el uso de estos instrumentos es limitado, sobre todo en playas de cantos, por la propia complejidad del sistema. Por ejemplo, en condiciones de oleaje de elevada energía las trampas se llenan rápidamente dificultando su retirada tanto por la propia fuerza del oleaje como por el peso de la trampa, haciendo que los datos sean inutilizables (Dawe, 2006).

Finalmente, la tercera técnica es el uso de trazadores para medir el transporte de partículas de sedimento de distintos tamaños. Los primeros trabajos consistieron en utilizar trazadores visuales, tales como pintar un cierto número de partículas para medir su desplazamiento (p.ej., Jolliffe, 1964; Ciavola and Castiglione, 2009) (Figura 1.3b) o la introducción de litologías exóticas que permiten su rápida identificación (p.ej., Carr, 1971; Hattori and Suzuki, 1978; Matthews, 1983) (Figura 1.3a). Los trazadores visuales ofrecen tasas de recuperación muy bajas porque los trazadores quedan enterrados por el resto de las partículas de la playa o en el caso de la pintura finalmente termina desapareciendo debido a la abrasión que experimentan los cantos durante su transporte (Lamarre et al., 2005).

Otros autores como Osborne (2005) y Voulgaris et al. (1999) adhirieron imanes a las partículas que mediante un detector de metales podían ser localizadas a lo largo de la zona de estudio. Además, cada uno de los trazadores se recubrió con pintura epoxi, por lo que se trata de estudios que emplea dos metodologías lo que resulta en una mejora de la tasa de recuperación.

En las últimas décadas, la comprensión del transporte sedimentario en playas de cantos y mixtas ha experimentado un fuerte impulso a raíz de la aplicación de nuevas técnicas de monitoreo que ofrecen solución a algunos de los problemas logísticos que presentan este tipo de ambientes costeros (Bertoni et al., 2013). Una de las más empleadas son los trazadores pasivos, *Radio Frequency Identification* (RFID), que consisten en la inserción de un transpondedor (*Passive Integrated Transponder*, PIT) dentro de las partículas de

sedimento (Figura 1.3f). Cuando los transpondedores se encuentran dentro del campo electromagnético generado por la antena se activan y emiten su número de identificación que es único para cada uno de los trazadores. De este modo, se puede monitorizar la posición de estas partículas en cada una de las campañas. Esta técnica proporcionó un gran impulso para la comprensión de los mecanismos que intervienen en el desplazamiento de cantos o incluso de bloques en playas (p.ej., Allan et al., 2006; Curtiss et al., 2009; Dickson et al., 2011; Miller and Warrick, 2012; Bertoni et al., 2013; Grotoli et al., 2019; Hastewell et al., 2019; Gómez-Pazo et al., 2021).

Una de las principales ventajas del sistema RFID es la tasa media de recuperación, que suele presentar variaciones entre el 25% (Allan et al., 2006) y 80% (Curtiss et al., 2009) en función de las condiciones hidrodinámicas de la playa o de la duración del estudio. El proceso de inserción de los transpondedores solo supone una pérdida de masa de menos del 1% del total de la masa de la partícula (Miller et al., 2011), por lo que no hay cambios significativamente relevantes en las características de las partículas. Sin embargo, uno de los grandes inconvenientes que presenta esta técnica de monitorización es la imposibilidad de detectar los trazadores si se encuentran bajo el agua (Bertoni et al., 2010). Además, la eficiencia de la detección de los trazadores depende del campo electromagnético creado por la antena que se ve atenuado cuando el trazador se encuentra enterrado (Johnson, 2010) o de la orientación del transpondedor en relación con la antena.

La última de las técnicas de trazadores más empleadas en el estudio del transporte de sedimentos en playas de cantos y mixtas son lo que se conocen como trazadores inteligentes. Se trata de cantos artificiales fabricados con resina epoxi emulando las características morfométricas medias de la población de partículas del área de estudio. Estas partículas están equipadas con un transmisor de radio que envía de manera continua su ubicación a una estación base local (Curoy, 2012) (Figura 1.3c). A pesar de que esta técnica presenta limitación para la transmisión de la información cuando el trazador se encuentra sumergido en el agua, es la técnica de monitoreo que presenta mayor tasa de recuperación. Sin embargo, en comparación con la técnica anterior tiene dos inconvenientes fundamentales: el primero es el uso de partículas artificiales cuya respuesta frente al oleaje difiere respecto a los cantos naturales, y en segundo lugar se tratan de sistemas costosos económicamente. Por estos motivos, los RFID son

consideradas una de las técnicas que maximiza el ratio de eficiencia y costes (Allan et al., 2006), por lo que es uno de los métodos más empleados.



*Figura 1.3. Ejemplos de los distintos tipos de trazadores utilizados en el estudio del transporte sedimentario en playas de cantos: a) Trazadores de litologías exóticas. Fuente: Curoy (2012). b) Trazadores con pintura fluorescente. Fuente: Stark and Hay (2016). c) Trazador sintético creado a partir de resina epoxi con transmisión por radio de la ubicación. Fuente: Curoy (2012). Proceso de preparación de los trazadores pasivos, sistema RFID: d) Perforación de los cantos seleccionados. e) Transpondedor pasivo con número de identificación único para cada trazador introducidos en un tubo de plástico para su protección. f) Sellado con resina epoxi una vez introducidos los transpondedores. Fuente: elaboración propia.*



### 1.1.6. Características morfológicas de las playas de cantos y mixtas

Las playas de cantos y mixtas, a pesar de tener características sedimentológicas claramente diferenciadas respecto a las playas de arena, presentan muchos elementos morfológicos comunes, como por ejemplo el escalón de batida (*step* o *plunge step*), las cúspides de playa (*beach cusps*) o las bermas (Curoy, 2012) (Figura 1.4).

El *step* es una de las morfologías típicas de playas reflectivas (Masselink and Hughes, 1998). Se define como un cambio de pendiente generalmente desarrollado en la base de la playa cerca del límite de bajamar y compuesto principalmente por material sedimentario de mayor tamaño de grano (López-Ruiz et al., 2020). El *step* permanece siempre sumergido y los pocos trabajos que se centran en su estudio han determinado que su creación y evolución están controlados por los procesos de batida, así como de rotura de oleaje (Hughes and Cowell, 1987). Masselink et al. (2010) determinaron que la evolución del *step* durante un ciclo mareal era asimétrica, desarrollándose mejor durante bajamar que en pleamar.

Otra de las morfologías características de este tipo de playa son los *beach cusps*. Se trata de elementos morfológicos rítmicos en forma de media luna, con una longitud de onda casi uniforme a lo largo de la línea de costa (López-Ruiz et al., 2020) que presentan material de mayor tamaño en las partes elevadas (*horns*) y materiales más finos en las bahías (Buscombe and Masselink, 2006). Se han desarrollado diferentes hipótesis sobre la formación de los *beach cusps*, destacando dos modelos: el de las ondas de borde y el modelo de autoorganización (Coco, 2017). El modelo de onda de borde estacionario (Guza and Inman, 1975) se basa en la superposición en la zona de batida de las olas incidentes con las ondas de borde que quedan atrapadas en la zona submareal. Esto genera variaciones regulares en la altura del oleaje que producen perturbaciones erosivas, lo que da lugar a los *beach cusps*. Sin embargo, autores como Holland and Holman (1996) o Masselink et al. (2004) determinaron mediante experimentos que la teoría de ondas de borde era insuficiente para explicar la formación de los *beach cusps*. Por otra parte, el modelo de autoorganización (Coco et al., 2001) establece que existe una retroalimentación positiva entre el movimiento de batida y la topografía subyacente.

La berma es un rango deposicional ubicado en la parte alta del perfil de playa. Su desarrollo está estrechamente relacionado con las diferencias entre el flujo de *uprush* y el de *backwash* del frente de playa, lo cual está relacionado con el elevado grado de infiltración que tiene lugar en este tipo de playas (López-Ruiz et al., 2020). La posición de la cresta de la berma depende de la marea y se suele situar cerca del límite de pleamar en mareas vivas (Orford and Anthony, 2013), mientras que su altura depende tanto de la marea como de las condiciones de oleaje. Durante los eventos de tormenta, los cantos son empujados hacia tierra dando lugar al rasgo morfológico conocido como la berma de tormenta (Buscombe and Masselink, 2006).

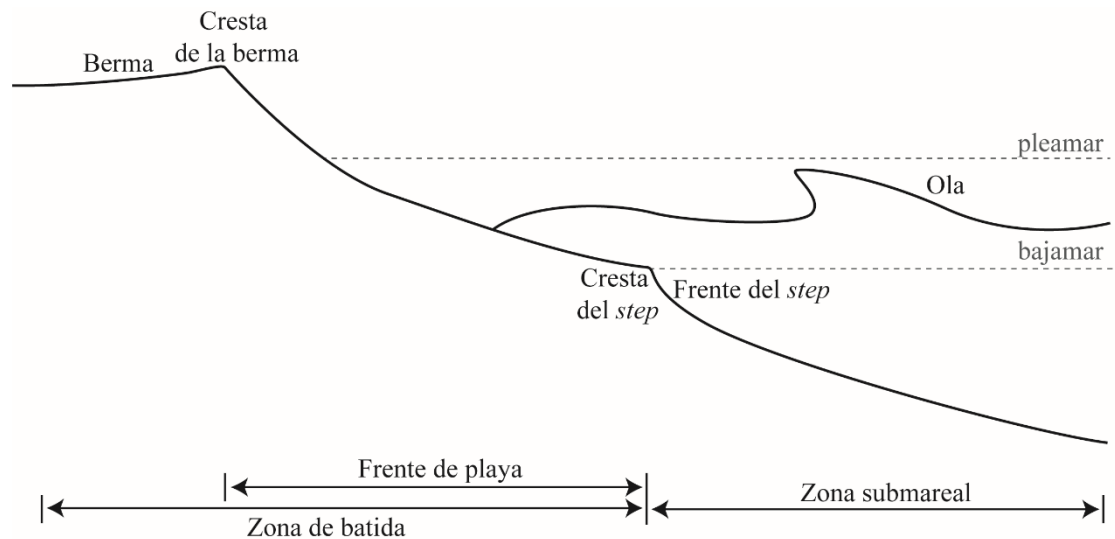


Figura 1.4. Nomenclatura de las principales características morfológicas de las playas de cantos y mixtas. Fuente: adaptado de Orford and Anthony (2013).

## 1.1. Objetivo de la tesis

En la actualidad se conocen muchos aspectos de los procesos costeros y transporte sedimentario, principalmente en playas de arena, siendo muchos menos los estudios basados en playas de cantos y mixtas. Por tanto, el principal objetivo de este trabajo de investigación es monitorizar el transporte de cantos en una playa piloto (San Felipe, Gran Canaria) mediante la tecnología RFID para tratar de comprender los mecanismos

responsables del transporte de partículas en este tipo de playas a diferentes escalas temporales. No obstante, dicho transporte no se puede comprender sin considerar y analizar las características del entorno. Por ello, es necesario realizar tanto la toma de datos sedimentológicos y topográficos de la playa, así como el modelado de las características del oleaje en la zona, a fin de contextualizar los mecanismos de transporte analizados.

Este objetivo general se ha subdividido en objetivos específicos que permitan abordar la complejidad del sistema para su completa comprensión y que se describen a continuación:

- Determinar la importancia relativa de las playas de cantos y mixtas en el contexto de Canarias.
- Evaluar la aplicabilidad del sistema RFID para la monitorización del transporte de cantos.
- Caracterizar el clima marítimo y el transporte de cantos en el área de estudio.
- Analizar los principales elementos geomorfológicos de la playa de San Felipe, y relacionarlos con los cambios volumétricos experimentados durante el periodo de estudio y distintos parámetros hidrodinámicos.
- Establecer un modelo de evolución morfodinámica de la playa que pueda ser replicable a otras playas de características semejantes.

# Capítulo 2



# Artículo 1

## Long term recovery rates obtained using RFID technology at a mixed beach

Geologica Acta, June 2015  
doi: 10.1344/GeologicaActa2015.13.2.1

---

**Mariona Casamayor**<sup>a,\*</sup>, **Ignacio Alonso**<sup>a</sup>, **Jorge Cabrera**<sup>b</sup>, **Silvia Rodríguez**<sup>a</sup> and  
**María José Sánchez-García**<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

\*marionacasamayor@gmail.com

<sup>b</sup> Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería, IUSIANI, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

---

### 2.1. Abstract

Recovery rates were obtained by radio frequency identification (RFID) technology in pebbles and cobbles at San Felipe beach, Gran Canaria. The aim of this work was to define which factors affected the recovery of tagged gravels. Several tests were performed

to determine the detection depth threshold, and 16 field experiments were carried out over seventeen months after tracer deployment on the beach. Recovery rates are highly variable with time, ranging from 72.2% in the first recovery session to 25.8% in the last one. Nevertheless, a nearly stable situation was found for the final eight months. Apart from the effect of time, there were several factors that affected the recovery rate. Some of these were related to the particle, such as the position of the tag within the particle, as well as its weight, size and shape. Two environmental factors were considered. First, the elevation of the tracer on the beach showed that the recovery rate was higher with particles located above the storm berm. Second, wave height, which showed no relation with recovery rates even though during the experiment significant storms and periods of calm took place.

## 2.2. Introduction

Sediment transport is one of the fundamental aspects that must be addressed in order to understand the processes that take place on beaches, and it is therefore indispensable to properly manage these coastal areas. Sandy beaches have been studied for many years and there is much available information on the mechanisms of sediment transport. However, there are few studies on coarse-grained beaches due to the logistical difficulties involved, such as the rough dynamic conditions and the fragility of the instrumentation. One of the most important characteristics of coarse-grained beaches are their high efficiency at protecting shore from extreme wave conditions, due to their high degree of stability (Carter and Orford, 1984), so that in many places these beaches are considered as a management tool against coastal erosion (Allan and Komar, 2004; Dickson et al., 2011). Interest in these kinds of beaches has increased thanks to technological advances that allow for the study of transport of individual particles over long periods of time (Allan et al., 2006; Curtiss et al., 2009; Bertoni et al., 2010; Dickson et al., 2011; Bertoni et al., 2012).

There are three predominant types of tracers (Allan et al., 2006). The first group are visual tracers that consist of painted coarse-grained particles or exotic lithologies for the quick identification of the particles. Such tracers have different problems, such as those derived from their burial and the loss of paint with the pass of time. These problems lead to low recovery rates (between 5 and 50%) (Jolliffe, 1964; Dornbusch et al., 2002; Sear et al.,



2002; Allan et al., 2006; Ciavola and Castiglione, 2009). The second group are called passive tracers, and may include different techniques such as radioactive, aluminium, magnetic or electronic tracking technologies. These techniques are a significant improvement in tracking because they allow the user to locate particles even when they are buried. In this case, recovery rates show great variability, ranging from 40 to 85%, depending on the hydrodynamic conditions at the study area (Voulgaris et al., 1999; Sear et al., 2002; Osborne, 2005). Finally, the third group are active tracers which are composed of an electronic tracking system powered by a battery that is encapsulated within a resin to produce a tracer with the size and shape characteristic of beach particles (Bray et al., 1996; Voulgaris et al., 1999). The great advantage of these tracers is that they can be detected up to a depth of 1 m, rising recovery rates to values greater than 70%. However, their drawbacks are their costs and artificial nature, which can influence the tracer response to local hydrodynamic conditions (Allan et al., 2006).

The tracers used in this study are passive tracers, the radio frequency identification (RFID) tracers. This technique presents a high ratio of efficiency to cost, since it is possible to obtain high recovery rates with low operating costs (Allan et al., 2006; Bertoni et al., 2010).

This paper presents the results of applying RFID technology to the mixed beach of San Felipe, Gran Canaria, to study the recovery rates of pebbles and cobbles over one and a half year. The different factors that can affect the recovery rate are considered. Factors related to the tracer are weight, size, shape and the axis through which the tag is inserted; and those related to the environment are wave conditions and elevation of the tracer on the beach profile.

## 2.3. Regional setting

The study area, San Felipe beach, is located on the north coast of the island of Gran Canaria (Spain), at the western limit of San Felipe village (Figure 2.1). It is approximately 200 m long and has variable width depending on the season, ranging from 20 m wide in winter to 40 m in summer, measured from the upper part of the beach profile to 0 m orthometric height.

San Felipe is a mixed beach consisting of fine black sand formed by basalt erosion (Balcells and Barrera, 1990), and coarse-grained particles that are mainly phonolitic and basaltic pebbles and cobbles. Coarse-grained materials are distributed over the backshore and upper foreshore, while sand is found on the lower foreshore and nearshore (Figure 2.2). San Felipe beach is subjected to large morphological changes, which are mostly related to wave climate variations. In winter time, storm berm is formed, which increases the foreshore slope. During this season only cobbles and pebbles are visible along the beach, even at low tide. Around May, with the beginning of the trade winds, the submerged sand bar moves onshore, and by the end of the summer the cobbles and pebbles located on the foreshore become completely covered by sand, with a clear reduction in beach slope (Figure 2.3).

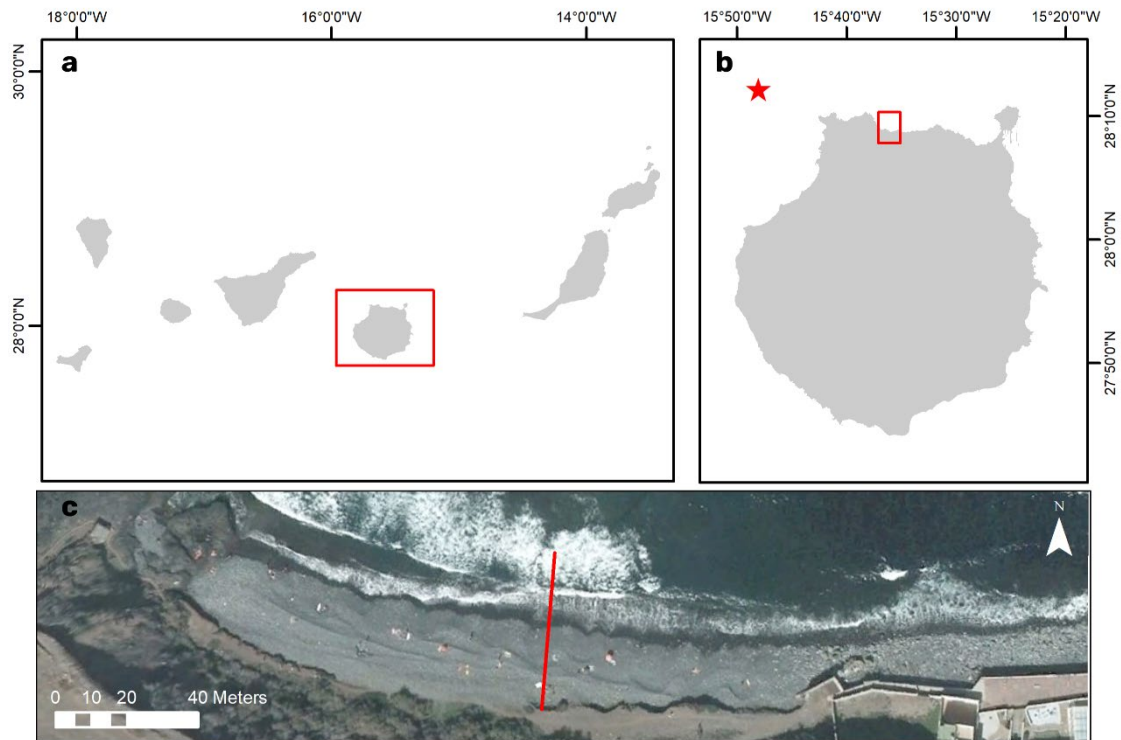


Figure 2.1. a) Map of Canary Islands. b) The star close to the island of Gran Canaria indicates the wave buoy location used in this work, and the square shows the location of the study area. c) Aerial photograph of San Felipe beach. The line is the beach profile shown in Figure 2.3.



In a general geological context, the northern coast of Gran Canaria is characterized by phonolitic Miocene lava flows that have been eroded by the sea, and constitute a coastal platform raised 6–15 m above mean local sea level (Balcells and Barrera, 1990). Most of this coastal platform is covered by crops and villages. The beach is backed by colluvial deposits and debris. The western edge is bounded by a basaltic lava flow, which enters into the sea, while the eastern sector of the beach leads to the ravine of San Felipe, 8,600 m in length and maximum 817 m in height (Menéndez et al., 2008).

Gran Canaria has a semidiurnal tidal regime with 2.8 m tidal range at spring tides and 0.8 m at neap tides. These are all astronomic tidal values obtained from the WXTide32 program. Data from wave recorder buoy number 2442 from Puertos del Estado have been used to characterize the wave climate. This buoy is located northwest of Gran Canaria, several km offshore and at 780 m water depth (see location in Figure 2.1).



*Figure 2.2. Photography of San Felipe beach at low tide during summer conditions. Note i) that pebbles and cobbles are very well rounded and quite well sorted, and ii) the sand over the lower foreshore.*

Wave data covering the study period (from March 2013 to July 2014) are shown in Figure 2.4. Significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and wave direction show a clear seasonal pattern, with calm conditions from April to October and storm conditions from November to March. The first period is under the influence of the trade winds. Dominant waves come from the N–NNE, average  $H_s=1.52$  m and average  $T_p=9.43$  s. Regarding the winter season, dominant waves come from N,  $H_s=1.97$  m and  $T_p=12.08$  s. There are frequent storms that generate waves with  $H_s>4$  m. During the study period, 13 stormy events took place, all of them with  $H_s$  higher than 3.0 m on average. The duration of these storms was highly variable, ranging from 7 to 71 h.

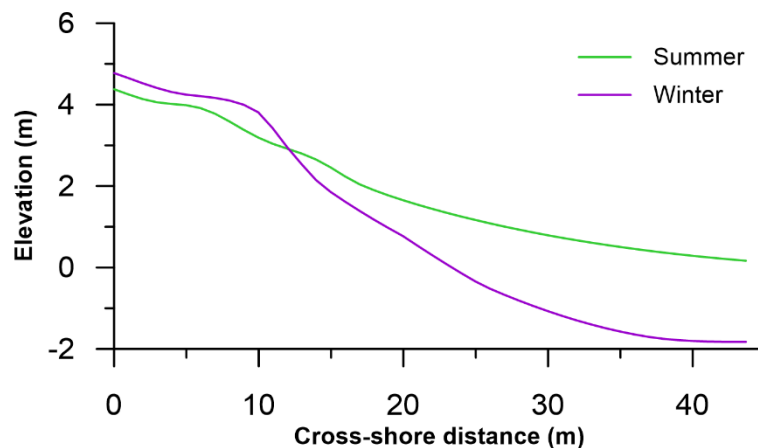


Figure 2.3. Beach profile at the central section of San Felipe beach. Profile location is shown in Figure 2.1c. Elevation corresponds to orthometric height. Note the net accumulation of sediments in the summer profile, which is mostly related to the onshore migration of the sand bar.

## 2.4. Methods

### 2.4.1. Particle sampling and preparation

To carry out the experiment 198 particles were collected over homogeneously distributed region along and across the beach. Sampling of pebbles and cobbles took place on November 1, 2012, at low spring tide conditions. Although sample selection was random, the particles had to meet certain requirements due to the limitations of the experiment:

the major axis of the particle had to be larger than 42 mm, and cobbles weighing more than 3 kg were discarded. Considering these experimental limitations, axial lengths of 802 additional particles were measured in the beach to check if tracer dimensions were representative of beach particles. These 802 additional particles were randomly selected along and across the beach.

The three axes (long, intermediate and short) of each individual particle were measured by means of a vernier calliper with 0.1 mm precision and weighed on a scale with precision of 0.01 g.

Preparation of tracer particles was undertaken in three phases: drilling, tag introduction and sealing. The first phase consisted of drilling a hole of 6mm diameter and 40 mm in length in each particle. Following Allan et al. (2006), Dickson et al. (2011) and Miller and Warrick (2012), the holes were drilled through the short-axis of the particle, but when it was smaller than 42 mm, it was necessary to drill the hole through the intermediate-axis, or even through the major axis when the intermediate one did not reach the required length.

The tag dimensions were  $30.2 \pm 0.6$  mm long and  $3.8 \pm 0.05$  mm in diameter and were protected by a glass capsule. To avoid breakage through impact with other coarse grains, tags were introduced into a plastic hose with a section of 4 x 6 mm. Once this process was finished, both ends of the hose were sealed with universal acid silicone and the tag, properly protected, introduced into the cobble. Finally, the particles were sealed with epoxy resin of two components. This product was used because of its high resistance to impacts and temperature changes.

Tracers were regularly deployed on the beach on March 14, 2013 at low spring tide. The entire beach was surveyed sixteen times from March 19, 2013 to July 28, 2014 with a detection system to locate the tagged particles.

#### 2.4.2. Detection system

This study uses RFID technology following Allan et al. (2006), who investigated a mixed sand and gravel beach with this method. The detection system is composed of a base station and one mobile detection device. The different elements of this system are listed

on Table 2.1. Once a certain tag is detected, its identification number is stored in a microSD card by the mobile device and transmitted to the base station in real time using a XBee radio module operating in the 869MHz ISM (Industrial, Scientific and Medical) radio band. Tracer positioning was carried out by means of an electronic total station.

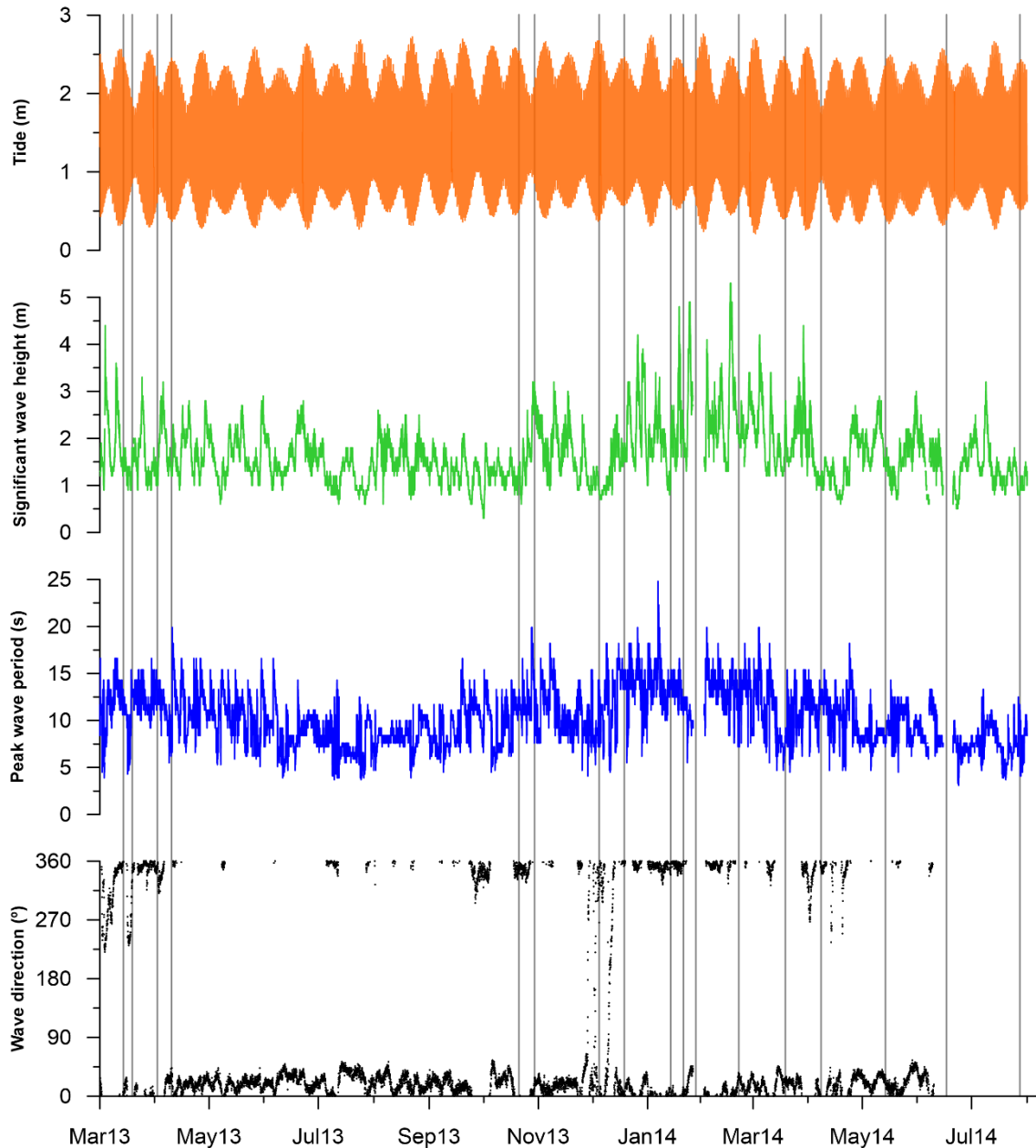


Figure 2.4. Hourly data recorded at the Gran Canaria buoy from March 2013 to August 2014. Tidal values were calculated with the WXTide32 program. Vertical lines show the date of the different field experiments.

The detection range of the RFID reader increases with supplied voltage. However, a high voltage generates heat that must be removed from the box that contains the electronic components. After experimenting with various voltages, it was found that 18 V gave the best result, so that the detector temperature was kept within reasonable limits and the detection distance was close to the maximum.

The antenna is a circular structure of PVC tube 80 cm in diameter containing a 1.88 mm copper wire looped around three times. A synchronization module was used to adjust the radio frequency circuit to the resonant frequency of the antenna. When it detects a tag, the mobile detection device emits an acoustic signal and then its position is recorded by the total station.

Table 2.1. Summary of the different components that form the detection system.

System	Sub-system	Components
Base station	Waspnote	12 channels SirFIII GPS receiver and radio modem XBee 868 Pro With direct USB connection to waspmote
	Laptop	
	Total station	
Mobile device	Battery 24V	12V7Ah lead-gel batteries
	RFID reader	RI-CTL-MB2B from Texas Instruments
	RFM module	RI-RFM-008B from Texas Instruments
	Synchronization	RI-ACC-008B from Texas Instruments
	Module	
	Antenna	In-house design
	Waspnote	12 channels SirFIII GPS receiver and radio modem XBee 868 Pro
RS232-3V3 adapter		

### 2.4.3. Detection range

Several tests were carried out in order to determine the maximum detection depth of our antenna. Considering that the beach under study contains different types of sediment, such as sand at the lower foreshore and cobbles and pebbles at the backshore, as well as water if the beach becomes submerged, some experiments were designed to assess the detection capability of the antenna in these three different media. In each medium, a tracer was buried at different depths, being the maximum detection depth considered the detection threshold. The relative position of the tag was considered: the tag could be perpendicular to the beach surface (which means that it was parallel to the short-axis of the pebble) or parallel to the surface (which may happen when the tag is either in the intermediate or in the long-axis).

## 2.5. Tracer characteristics

Since this work mostly deals with recovery rates of tracers, it is necessary to know the properties of these particles.

### 2.5.1. Weight

Tracer weight ranges between 82 and 2,837 g with an average of 450.58 g. These values were obtained once the particles had been drilled, the tag inserted and the hole sealed. Due to the large range of weights, it was necessary to make a transformation of the data. We chose the same transformation used by Krumbein (1936), who established the phi ( $\phi$ ) scale for grain size. The proposed scale for particle weight is named phi-weight ( $\phi_w$ ), and is defined as

$$\phi_w = \log_2 W \quad (2.1)$$

where  $W$  is the particle weight in grams. After applying the above transformation and considering that the different categories derived from the  $\phi_w$  scale are delimited by integer units, all our tracers lay in the small range between 6 and 12  $\phi_w$ . There are two main categories (7–8 and 8–9  $\phi_w$ ) of very similar abundances, with the average value corresponding to 8.82  $\phi_w$ , equivalent to 450.58 g (Figure 2.5a).

The weight loss during preparation of the tracer was calculated measuring the initial and final weight of three particles. The final weight takes into account the drilling, the introduction of the tag and sealing of the hole. Table 2.2 shows that the preparation process represents an average mass loss of 0.58% of the initial weight for these three particles. Considering that these particles are lighter than the average, and that the weight loss is similar in each particle and does not depend on its size, the estimate average loss of weight of the whole of the particles is only 0.42%.

*Table 2.2. Morphometric properties and weight of selected particles used to determine weight loss resulting from the preparation of the tracers.*

Particle ID	Axis			Weight		
	Short (mm)	Intermediate (mm)	Long (mm)	Initial (g)	Final (g)	Loss (%)
175	48.0	64.0	78.5	308.06	306.25	0.59
176	42.0	65.5	83.5	345.11	343.06	0.59
177	44.0	65.1	80.6	336.94	335.09	0.55
Average 3 particles	44.67	64.87	80.87	330.04	328.13	0.58
Average 198 particles	44.71	65.28	85.73	452.48	450.58	0.42

### 2.5.2. Size

Tracer particle size is in the range of cobbles and pebbles. The major axis ranges between 49.2 to 160.0 mm, with an average length of 85.90 mm, the intermediate axis is in the range 37.6 – 135.0 mm, with an average length of 65.47 mm, and the minor axis measures between 26.0 and 90.0 mm (average length of 44.77 mm).

Figure 2.6 shows the three axes length distribution for two types of particles: those used as tracers (198 particles) and 802 additional particles whose axes were measured. It is

shown that both populations follow a normal distribution with regard to any of the three axes. Note that the distribution of the three axes in the tracer population is very similar to that in the population of 802 particles, and therefore it is very reasonable to assume that the selected pebbles and cobbles used as tracers are representative of the particles on the beach.

In fact, the average grain size is  $-5.98 \phi$  and  $-5.80 \phi$  for the tracer population and for the additional 802 beach particles respectively. Considering the intermediate axis as the average particle size, the dominant size of tracers corresponds to very coarse pebbles (between  $-5.5$  to  $-6.0 \phi$ ), based on the Blair and McPherson (1999) classification (Figure 2.5b).

### 2.5.3. Shape

The shape of the particles was analysed using the approach of Sneed and Folk (1958) based on the ratio between their three axes. Figure 2.7 shows the predominant shapes of 1000 particles plotted on the diagram proposed by Sneed and Folk (1958). There are slight differences between additional beach particles and tracers. In most parts of the beach particles are bladed, and tracers are either bladed or compact-bladed (Figure 2.5c). Moreover, tracers are not very-platy, very-bladed or very-elongate since these categories are not suitable for particle preparation.

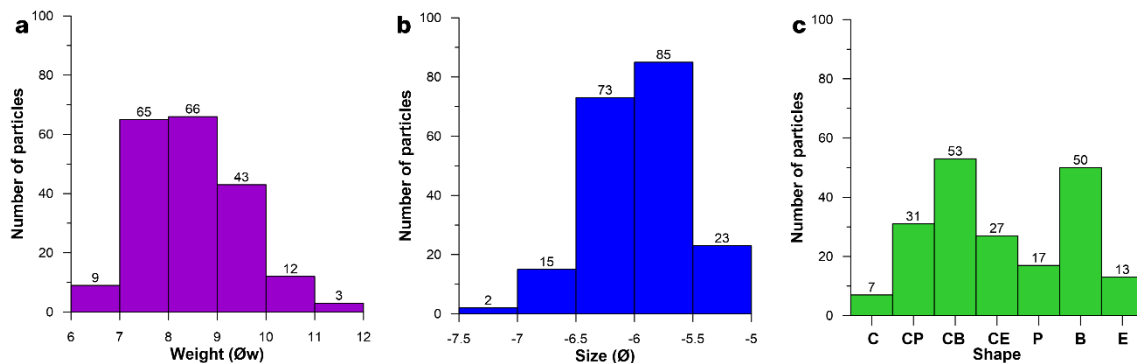


Figure 2.5. a) Distribution of tracer weights using the  $\phi_w$  scale. b) Distribution of tracer sizes, in  $\phi$ . c) Distribution of tracer shapes according to the Sneed and Folk (1958) classification (C: compact, P: platy, B:bladed, E: elongate).



## 2.6. Results

### 2.6.1. Detection threshold

Several tests were performed on the beach to determine the detection threshold of the system. Table 2.3 shows that the greatest detection depth occurs when the tag is buried in gravel decreases in the case of sand, and has the lowest values when it is immersed in water. These results confirm that the propagation of electromagnetic waves in water is worse than in solid media. On the other hand, the detection range is greater when the tags are in the short-axis of the pebbles, which is the direction normal to the electromagnetic field generated by the antenna, while the lowest range occurs when the tags are in the long-axis.

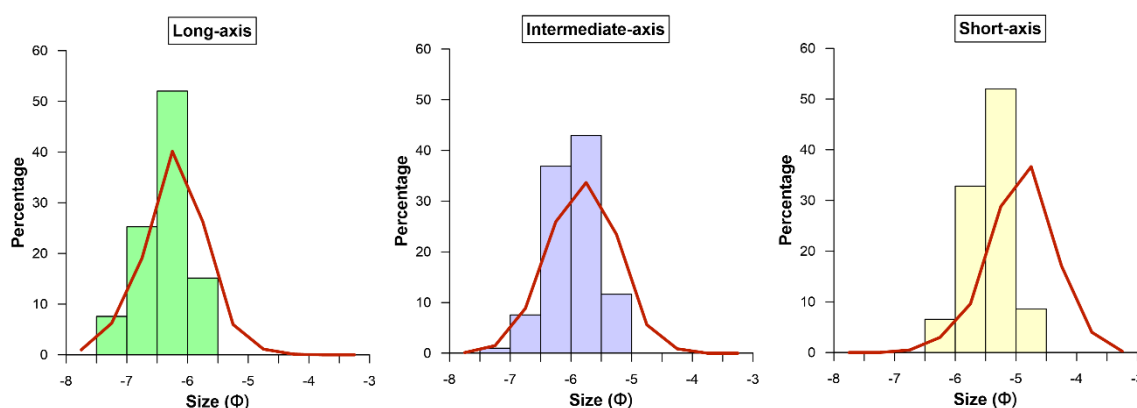


Figure 2.6. Axis length distributions for both populations: 198 particles used as tracers (lines) and 802 particles whose axes were measured (histograms).

### 2.6.2. Tracer recovery

Sixteen field experiments covering the period between March 2013 and July 2014 were carried out to determine the movement of the tracers on the beach. The number of tracers recovered (detected by RFID system) shows a clear decrease with time, so that the longer the elapsed time between the deployment and recovery, the lower the amount of tagged particles recovered (Figure 2.8). In fact, during the first field session carried out five days

after deployment (March 19th), only 143 tracers from 198 were found, and three weeks later the number had decreased to 114. From these numbers it could be guessed that in three months all tracers should have been removed, but what we really found was that nearly 18 months later there were still 51 tracers left on the beach. In fact, the cloud of dots (Figure 2.8) may be fitted by a linear trend, which indicates that the total disappearance of tracers would happen by March 2015 (two years after deployment), or by an exponential fit in which case two and a half years after deployment we still should have 10% of the initial number of tracers.

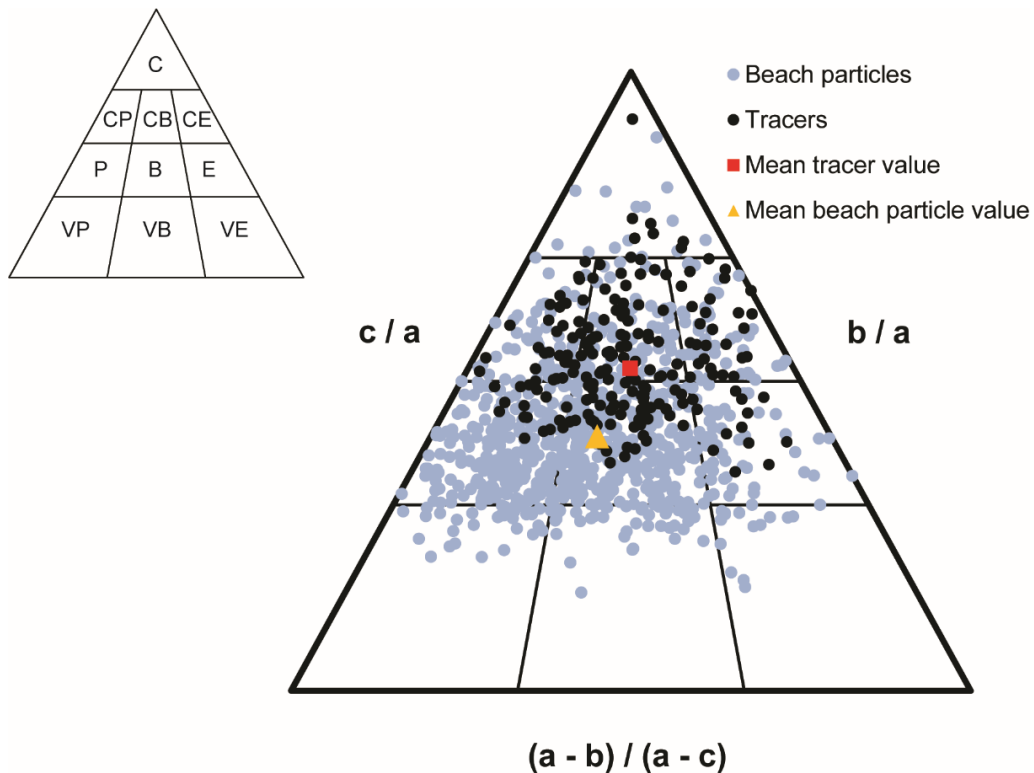


Figure 2.7. Tri-plot diagram based on Sneed and Folk (1958), which represents particle shapes according to their orthogonal axes: 198 tracers, and 802 additional beach particles. *a*: long-axis, *b*: intermediate-axis, *c*: short-axis. *C*: compact, *P*: platy, *B*: bladed, *E*: elongate and *V*: very. Diagram generated after Graham and Midgley (2000).

### 2.6.3. Factors related to the tracer

The tag may be inserted into the particle through the long, intermediate or the short axis. The influence of this factor on the recovery rate is shown in Figure 2.9, from which it is clear that the number of recovered particles decreases with time for the three axes. Nevertheless, the linear fits (Figure 2.9) clearly indicate that the particles in which the tag was inserted through the short axis lasted longer compared to those particles with the tag in the intermediate or long axis. It should be noted that the initial number of tracers is not the same for each category. Tags in the long axis occur in only 27 particles, while there are 97 with the tag in the intermediate axis and 74 in the short axis. Relative to these numbers, the percentage of recovered particles with the tag in the short-axis is 37.8%, 36.7% in the intermediate-axis and 35% in the long-axis. These values confirm that the best position in terms of recovery is when the tag is inserted through the short axis.

Table 2.3. Detection thresholds in three different media.

Environment	Media	Axis	Maximum detection depth (cm)
Backshore	Pebbles and cobbles	Short	46
		Intermediate	25
		Long	15
Lower foreshore	Sand	Short	35
		Intermediate	21
		Long	17
Submerged beach	Water	Short	22
		Intermediate	16
		Long	13.5

Regarding the weight of the particles, recovery rates of all categories of  $\phi_w$  (light, medium and heavy clasts) decrease with time. Nevertheless, particles with  $\phi_w$  between 7 and 8 (128–256 g) have a higher negative slope, which indicates that this category will disappear sooner than the others (Figure 2.10).

Recovery rates versus time and size of the pebbles and cobbles show similar patterns to those described for weight. The dominant categories of the initial 198 particles (Figure

2.5b) are those with higher recovery rates (Figure 2.11). However, the category corresponding to tracers in the range between  $-5.5$  and  $-6 \phi$  (45.3–64 mm) has the most negative slope, and therefore this is the least favourable size range for long-term RFID experiments.

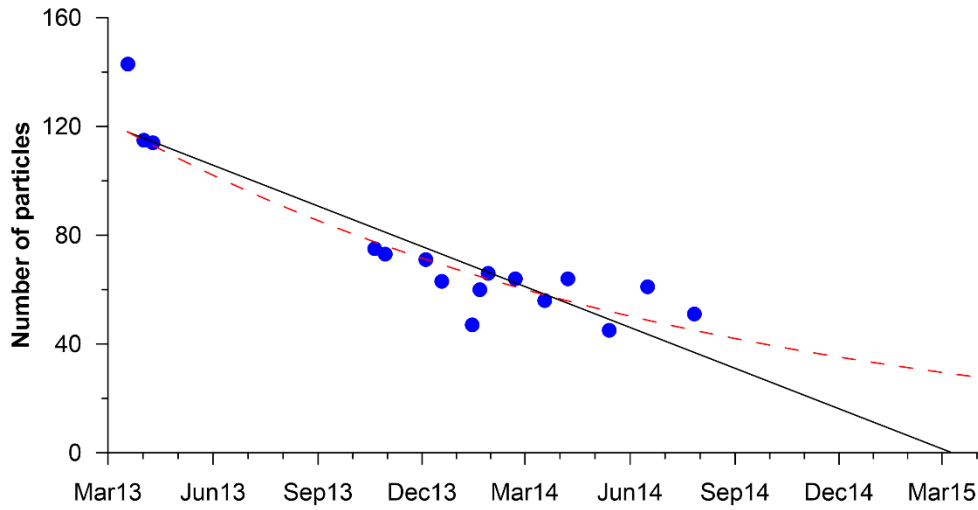


Figure 2.8. Number of particles recovered in each field session. Continues and dashed lines are the linear and exponential fits, respectively.  $R^2=0.82$  in both cases.

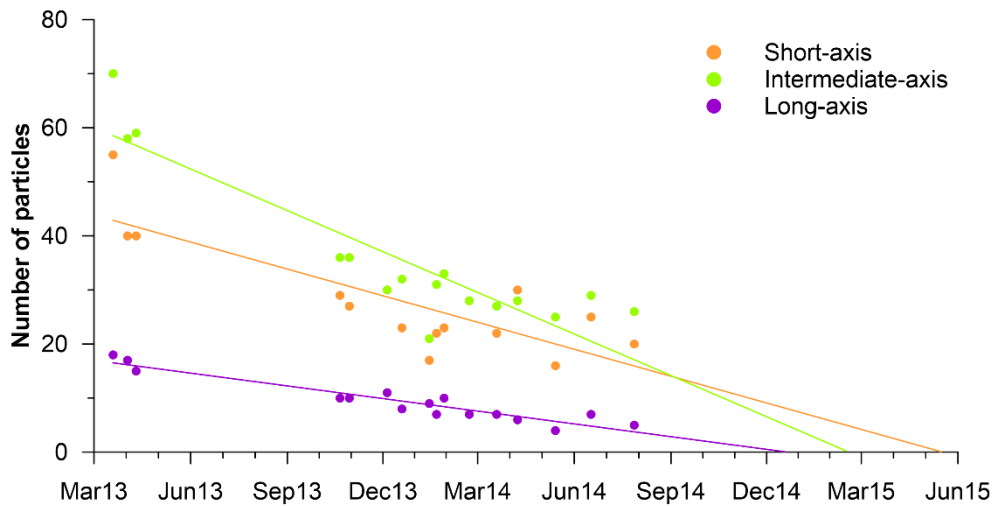


Figure 2.9. Recovered tracers during the time span of the experiment depending on the axis through which the tag was inserted.

Regarding the different shapes of the tagged particles, no clear pattern is seen when they are plotted against time, despite the great diversity of shapes (Figures 2.5c and 2.7). All shapes present a negative slope, which corresponds to a decrease in the recovery rate. The only difference is that platy and elongate particles show a more stable trend. Therefore, these are the best shapes for this kind of experiment (Figure 2.12).

#### 2.6.4. Factors related to the environment

One of the environmental variables to be considered when analysing the recovery rates of tracers is the wave climate. However, to cope with this effect it is necessary to know what was the time elapsed during which waves were responsible for tracer movement. Four different cases have been considered: the average of hourly wave data during 1, 5, 10 and 20 days prior to the field experiment.

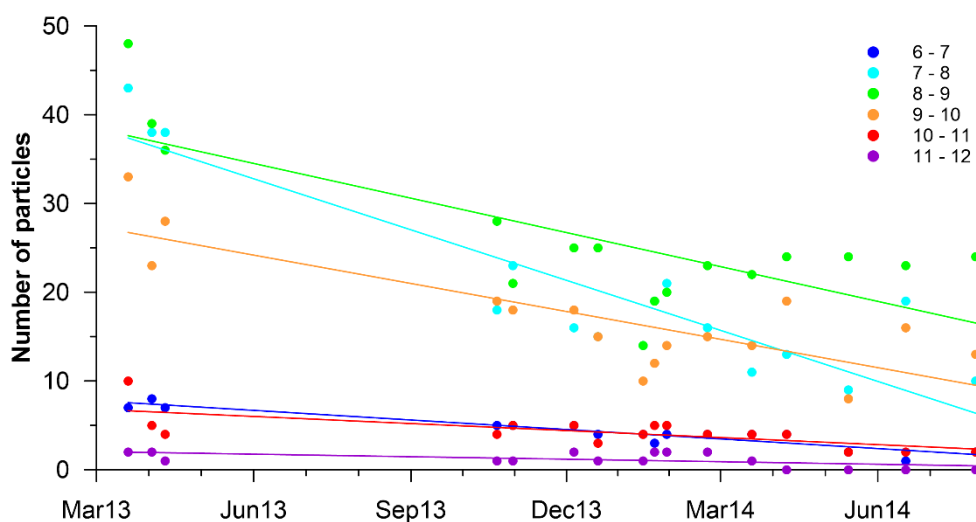


Figure 2.10. Time evolution of the number of recovered particles for the different weight categories ( $\phi_w$ ).

Figure 2.13 shows the number of recovered particles vs significant wave height ( $H_s$ ) for the four mentioned cases. No clear relationship is found for any of them, which indicates that under high waves and in mild conditions the recovery rates were quite similar.

Obviously, waves are the main agent of particles movement, but it seems to have no direct effect on tracer recovery.

The second factor to be considered is the elevation of the tracers on the beach. For this purpose, we divided the beach into four regions. Tracers found below 0 m were below mean low level, those between 0 – 2 m were along the lower and central part of the foreshore, particles between 2 – 4 m were in the upper foreshore and the summer berm, and those above 4m were above the crest of the winter berm. Despite the general decreasing trend in the number of retrieved particles, we found a positive trend for tracers found above 4 m (Figure 2.14).

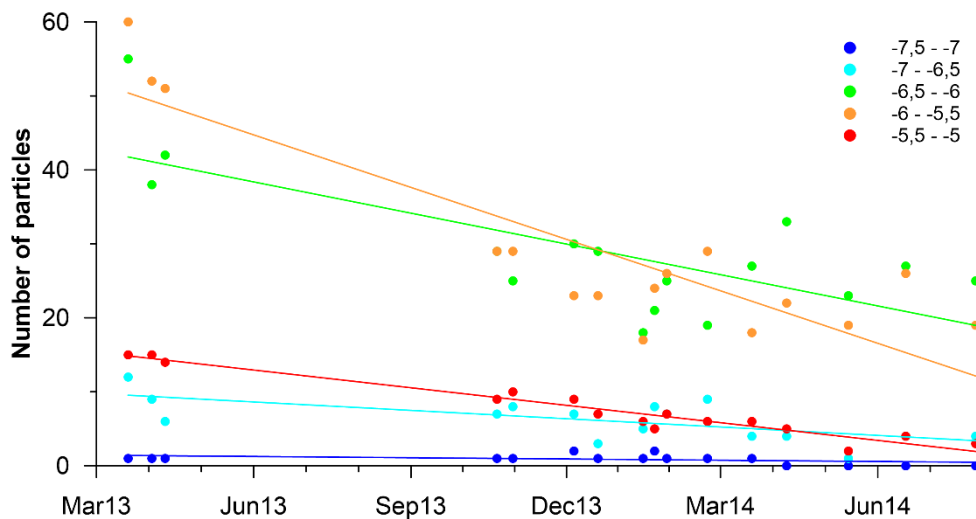


Figure 2.11. Recovered particles for each field session as a function of the length of the intermediate axis.

## 2.7. Discussion

The entire process of tracer preparation is associated with a certain mass loss of the sample due to the drilling for the tag introduction. It has been calculated that this loss of weight only represents 0.42% on average of the mass of the whole particles (Table 2.2). This result is similar to that of Miller et al. (2011), who state that mass loss after RFID

placement in most cases was less than 1%. Therefore, it can be considered that this process does not affect the basic characteristics of the particles.

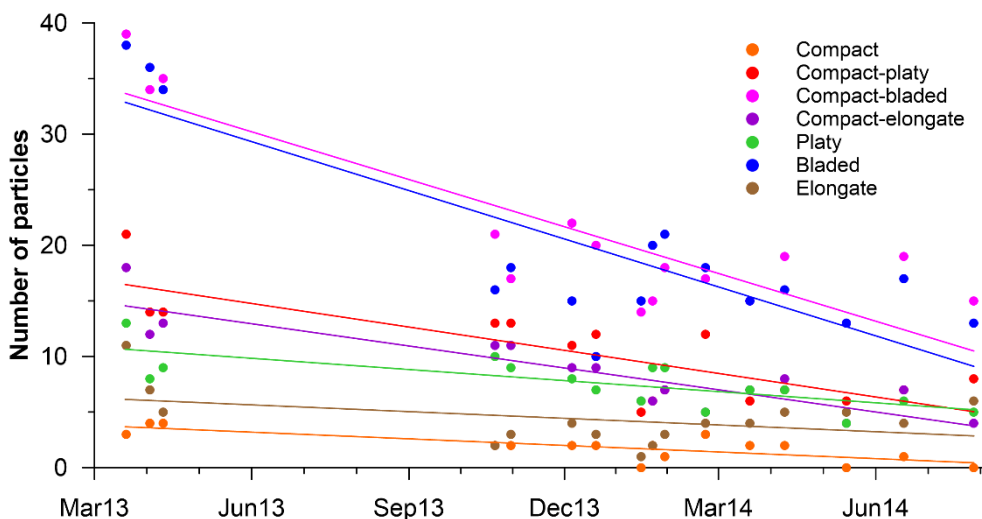


Figure 2.12. Recovered tracers as a function of particle shape.

Results of the detection threshold in depth (Table 2.3) match those presented by Bertoni et al. (2010) who obtained a detection range of 0.40 m and 0.35 m under water, as well as those from Curtiss et al. (2009) who obtained a detection range of 0.40 m. However, other authors such as Allan et al. (2006) and Dickson et al. (2011) obtained ranges from 0.8 to 1 m. The detection depth in water is lower than that in other media (sand, gravel), since the signal attenuation in water depends on the frequency of the electromagnetic field and the water conductivity (Bertoni et al., 2010). Therefore, results show that the type of media where the tracer was immersed produces a decrease in the detection threshold in depth. However, Chapuis et al. (2014) concluded that the sediment material does not hinder the signal transmission and thus burial does not significantly affect detection other than to increase the vertical distance between the transponder and the antenna. One of the most important technical factors that could determine the detection threshold is the diameter of the antenna. Allan et al. (2006) indicate that reducing the antenna diameter by 70% causes a decrease in surface detection distance of about 50%. Since the different authors use antennas of different diameter sizes, this could explain the different detection thresholds. Nevertheless, there are some other antenna characteristics that are determinant

in detection, such as the copper wire diameter, the number of loops and the voltage. None of these have been considered in this paper.

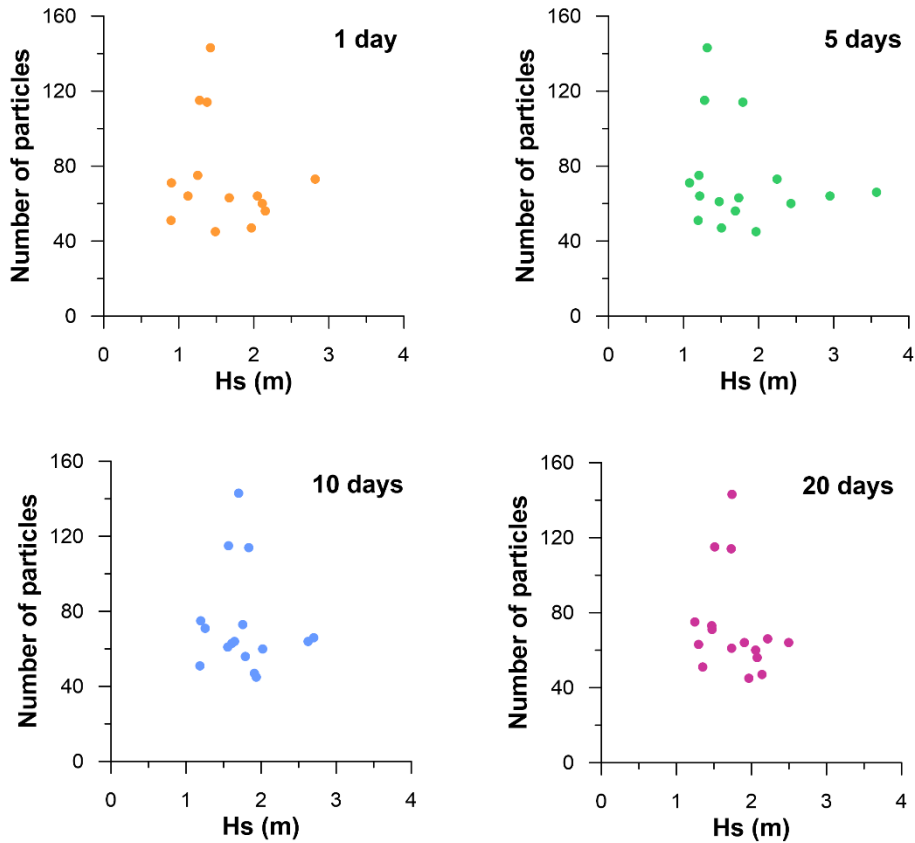


Figure 2.13. Relationship between recovered particles and average significant wave height ( $H_s$ ) for the four considered cases.

Another important aspect that affects the detection threshold is the tag orientation inside the pebble. Most authors normally obtain higher detection distances (both at surface and at depth) when the tag is perpendicular to the beach surface, which indicates that this is the most favourable position, and this is achieved when the tag is inserted in the short axis of the particle (Allan et al., 2006; Dickson et al., 2011; Chapuis et al., 2014). The tests we have carried out to calibrate the instrumentation follow the same pattern (Table 2.3), and the same result was found when the recovery rate obtained from the sixteen field experiments was related to the axis through which the tag was inserted (Figure 2.9). Therefore, it is confirmed that particles with tags inserted through the short axis are more



efficient as tracers, since they can be detected when buried in deeper positions and, additionally, they may be recovered after longer periods.

During the first five days the decrease in detection rate was very high: 27.8% in 5 days, 5.6% every day. Between March 19 and April 2, 2013, the decrease in recovery rate was not so strong: 14.1% in 14 days, 1% daily. During the last period the recovery rate was 39% in October 2013 and 26% in July 2014, with a reduction of 0.05% daily. This pattern seems to indicate that certain stability in the recovery rate could be reached if the experiment would continue long enough.

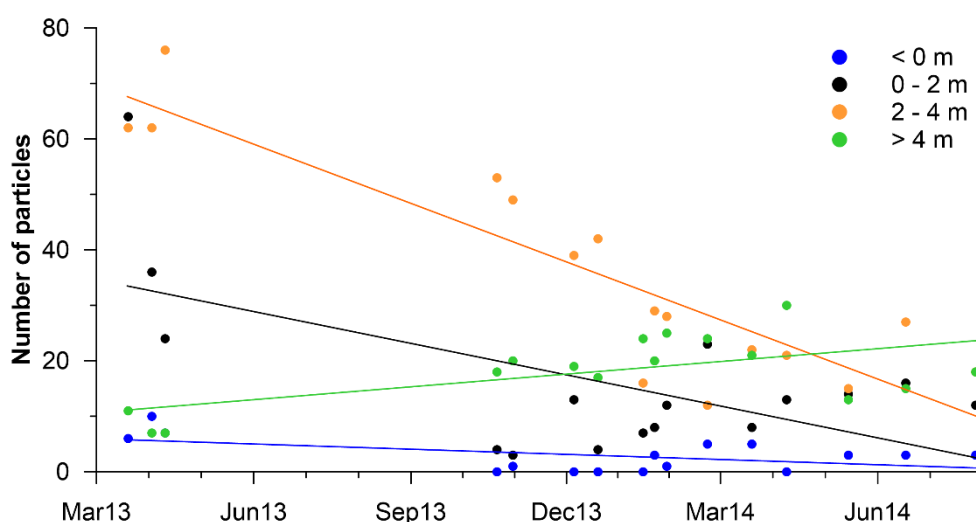


Figure 2.14. Time evolution of the number of recovered tracers as a function of the elevation where they were found.

Three main possible factors may explain the decrease of recovery rates with time: (i) tracers may have been transported out of the survey area; (ii) tracers may become buried at greater depths than the detection threshold; and (iii) tracers may eventually be destroyed due to abrasion or collision against other particles. Since detected pebbles are not always the same, the stability we have found in the last period could indicate that after a certain period tracers become completely distributed in the three dimensions (alongshore, cross-shore, and in depth). Probably, most tracers that were not retrieved were outside of the survey area or too deeply buried, but they were still active and may

eventually be moved again to the survey area. Therefore, the arrival of tracers that were located too far away is compensated by the exit of other tracers that were in the survey area and, as a result, it is possible to achieve certain stability in the number of retrieved particles.

In this study 51 tracers were found seventeen months after deployment, which represents a 25.8% recovery rate. This value is very similar to that of Allan et al. (2006), who obtained 24% and 25% recoveries at the lower and upper beaches respectively on the high-energy Oregon coast (USA) after eighteen months. Bertoni et al. (2010) obtained 77% two months after tracer deployment, while Curtiss et al. (2009) obtained recovery rates higher than 80%, with a minimum of 73% fourteen months after the gravel release. Nevertheless, comparison of data is not easy, since the factors that must be taken into consideration include not only the time duration of the experiment, but also the number of storms that occurred and the presence of protective structures on the beach (Benelli et al., 2012). Considering these variables, only the results from Allan et al. (2006) are comparable to ours, since the work by Bertoni et al. (2010) was carried out on a beach between lateral groins and bounded seaward by a submerged breakwater, and the study site of Curtiss et al. (2009) was a mixed sand gravel beach located near a narrow navigation channel, which is completely different to the open ocean beach of San Felipe.

In this study it has been found that there is no significant influence of particle weight and size on the recovery rate (Figures. 2.10 and 2.11), since both large and heavy cobbles, as well as small and light pebbles, show a decrease in recovery rates with time. Nevertheless, results obtained in this paper indicate that particles between 7 and 8  $\phi_w$ , as well as those between -5.5 and -6  $\phi$ , have the less favourable weights and sizes for long-term RFID experiments. This result agrees with Osborne (2005), who reported a very significant decrease in the recovery rate for small particles. He explained his results arguing that the smaller particles were more favourable for burial than the larger ones, and therefore more difficult to be detected.

Tracer detection rates are higher at the upper part of the beach profile than below the berm (Figure 2.14). This pattern is related to particle transport, since those located along the lower part of the profile are more heavily pulled by waves, so that they can be moved larger distances, and some of them may eventually leave the survey area. On the contrary,

it is more difficult for particles above the berm to be moved by waves, and therefore they remain in the same location. However, those tracers located close to the berm crest may fall down to the lower part due to berm retreat. Despite this process, the linear fit for particles retrieved at  $> 4$  m elevation (Figure 2.14) shows a positive slope, which indicates that the number of particles retrieved above the berm is gradually increasing. This can only be explained by onshore transport from the foreshore.

Regarding the effect of waves, even though wave energy is the most important agent of particle transport, no clear relationship with recovery has been found. Wave conditions have been very changeable over time, with significant storms during the experiment (see Figure 2.4), but the number of detected particles was quite stable. This is in disagreement with Benelli et al. (2012), who state that the frequency of storms is a key factor in recovery rates.

## 2.8. Conclusions

The RFID system developed for this study is based on that of Allan et al. (2006) and has proved to be appropriate because it allows to locate tracers accurately and with acceptable recovery rates. Therefore, it permits to study the movement of cobbles and pebbles over long periods of time. The sample preparation process did not affect the basic characteristics of the particles, since the weight loss originated only represented 0.42% of the whole tracers.

After deployment of tracers on the beach, sixteen field experiments were carried out over seventeen months for tracer positioning. Recovery rates strongly decreased at the beginning but tended to stabilize after one year from initial deployment. After seventeen months a recovery rate of 26% was achieved, which is very similar to those reported in the literature for similar periods in open beaches.

Several factors that could affect the recovery rate have been considered. Some of them are related to the particle, and it is confirmed that tracers with the tag inserted through the short axis are more efficient in terms of recovery. Furthermore, the worst particles to be used in RFID long term experiments are those whose intermediate axis are between -5.5

and  $-6 \phi$ , as well as those between 7 and 8  $\phi_w$  in weight. Regarding particle shape, platy and elongate shapes seem to be the best for this kind of experiment.

Finally, two factors regarding the environmental conditions have been considered. The first was the tracer location of the beach profile found with recovery, and it was clear that the most favourable position to detect a certain tracer is the upper part of the beach, above the storm berm. The second factor was wave energy, and no relationship has been found with recovery rates, which were quite stable both under storm and calm conditions.

## 2.9. Acknowledgments

We are grateful to the people that participated in the field experiments for their invaluable help. Thanks are due to two anonymous reviewers whose detailed comments have helped to improve this manuscript. Wave data were provided by Pilar Gil from Puertos del Estado.



# Capítulo 3



# Classification and characteristics of beaches at Tenerife and Gran Canaria Islands

The Spanish Coastal Systems, October 2018  
doi: 10.1007/978-3-319-93169-2\_16

---

*Ignacio Alonso<sup>a,\*</sup>, Mariona Casamayor<sup>a</sup>, María José Sánchez-García<sup>a</sup> and Isabel Montoya<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.*

*\* ignacio.alonso.bilbao@ulpgc.es*

---

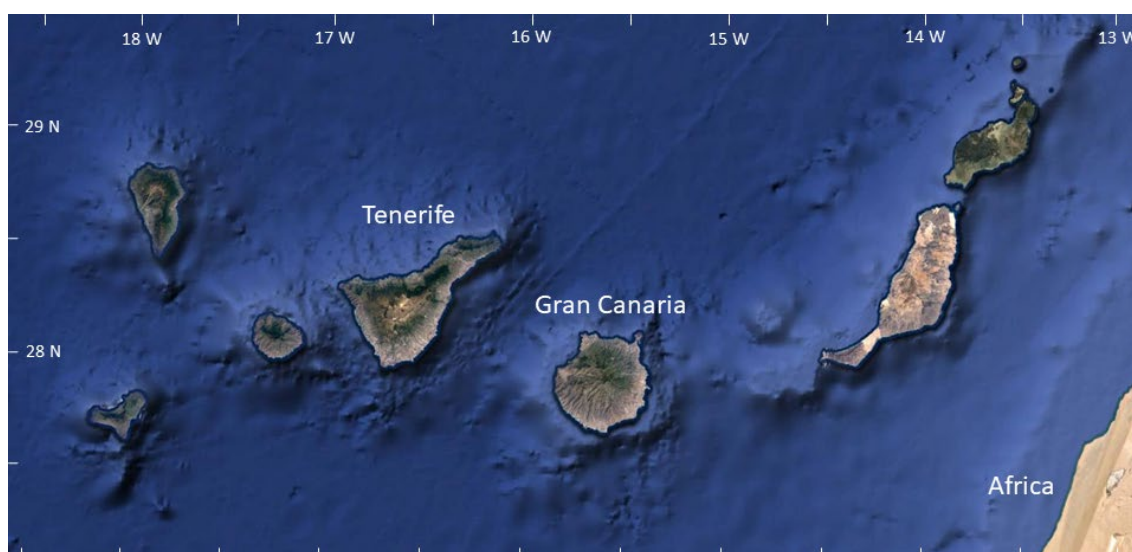
## 3.1. Introduction

### 3.1.1. Geological context

Canary archipelago is formed by seven main islands and several islets that extends for nearly 500 km across the eastern Atlantic, between latitudes 27°N and 30°N, lying its eastern edge only 100 km from the NW African coast (Figure 3.1).



The Canary Islands have a volcanic origin. They are the result of a hot spot acting in a passive continental margin on a very slow-moving tectonic plate (Carracedo et al., 1998). Submarine volcanic activity began around 35 m.y. in Fuerteventura (Cantagrel et al., 1993) and it has continued until recent times, since the last eruption took place only few years ago at El Hierro island (Rivera et al., 2014; Oglialoro et al., 2017).



*Figure 3.1: Location of the Canary Islands. Tenerife and Gran Canaria Islands are located in the centre of the archipelago. Eastern islands are older while those located westward are much younger. Image modified from Google Earth.*

This large period of magmatism has not been continuous. Periods of volcanic activity have been followed by relaxation periods during which erosion took place, and huge amounts of sediments were eroded through a very dense network of gullies to the coast (Menéndez et al., 2008). In five of the seven islands (Lanzarote, Gran Canaria, Tenerife, La Palma and El Hierro) there are evidences of volcanic activity in the last five centuries, and the lava flows resulting from this activity have also reached the coast.

Other geological factor that has contributed to shape the different insular volcanic edifices, both the emerged and the submerged parts, are the landslides. These avalanches are the result of gravitational instabilities on these very high volcanic edifices, since the



original stratovolcanoes could be higher than 7,000 m measured from the ocean bottom (Urgeles et al., 1997; Carracedo et al., 1998; Masson et al., 2002).

Because of all the aforementioned geological factors, as well as to the effect of waves that steadily contribute to erode the northern coast of the islands, the shelf presents very strong differences between some islands and the others. In this context, Lanzarote and Fuerteventura present quite large shelves, as opposite to Tenerife, La Palma and El Hierro where the shelf is practically non-existent. There are also significant differences between different coastal stretches in certain islands: in Gran Canaria the shelf is very narrow at the NE while it is quite large in the rest of the island, or in Gomera where the shelf is much wider at the north than at the south. Age of the islands, recent volcanism and wave incidence are the key factors to understand these differences (Maestro-González et al., 2005).

Criado et al. (2011) point out that as the littoral shelf becomes wider, there are more opportunities for marine organisms such as molluscs, equinoids, arthropods, foraminifera and corallinaceous algae to find out the adequate habitat to grow. These organisms are the key ingredient of marine sedimentary inputs, which are transported by waves from the nearshore to the foreshore. Therefore, as far as the shelf in the Canaries is narrow, the amount of marine sedimentary inputs is scarce in long stretches of the coastline.

The other possible source of sediments to the coast is terrestrial, which is related either to cliff erosion or to fluvial runoff. Criado et al. (2011) state that both possible sources represent a very small contribution of sediments to the coast. This is explained by the slow response of volcanic materials to wave action and to the weak precipitation in most parts of the archipelago. Probably the only exception is located at Tzacorte beach (west coast of La Palma Island). This particular beach receives the runoff from the Caldera de Taburiente, located in the central part of the island. The very large catchment area, the height difference and the episodic but extremely heavy rains determine that the beach receives from time to time large amounts of sediments. Resulting from these inputs the beach is clearly prograding and the nearby harbour has siltation problems (Marrero et al., 2017). Because of the limited inputs of sediments to the coast, particularly in areas with narrow shelf, beaches in the islands are normally short and naturally limited by rocky headlands.

### 3.1.2. Socio-economic context

The Canaries have an area of just over 7,500 km<sup>2</sup> and a population over 2.1 million people. This population is very irregularly distributed, since 83% of the total population concentrates in Tenerife and Gran Canaria islands, which have 895,000 and 843,000 inhabitants respectively (ISTAC, 2018).

More than 40% of the islands surface has been declared natural protected areas, where the population is very scarce. Therefore, the pressure of population on the territory is quite large, with values of 475 inhabitants/km<sup>2</sup> for the whole archipelago, which rise up to 850 and 950 inhabitants/km<sup>2</sup> for Tenerife and Gran Canaria respectively. This population pressure is not homogeneously distributed over the territory, since the largest towns and infrastructures in each island are located along the coast. Therefore, most of the coastline is built up and there are more roads per km<sup>2</sup> than in any other European islands (Moreno Gil, 2003).

An additional factor related to this pressure is the main economic activity in the islands: tourism accounts for at least 50% of the GDP of the islands (Garín-Muñoz, 2006), though according to Parra-López and Baum (2004) tourism represents around 83% of the GDP. In fact, Canary Islands received more than 16.7 million visitors in 2017, distributed in the following way: 6.2 million in Tenerife, 4.6 million in Gran Canaria and 5.9 million in the rest of the islands (ISTAC, 2018). More than 96% of these visitors come to the islands for holidays, and most of them stay at tourist resorts located within few hundreds of meters from the coastline (Morales and Santana, 1993). Therefore, large touristic complexes have been built along the islands coast, and it explains what Moreno Gil (2003) has called “concrete tourism”.

The Canaries have become a global player in tourism due to a number of factors. Climate conditions such as low rainfall and relative isolation have become fundamental pillars of the tourism development scheme that has been put into action on the islands in recent decades. Another invaluable regional resource that has also contributed is the magnificent natural conditions of the islands, among which the beaches and coastal dunes are a key aspect for any tourist destination based on sun, sand and surf (García-Rodríguez et al., 2016).

Both the native population and the huge number of visitors are mostly concentrated in the coastal zone. Therefore, related activities are also located close to the shoreline. They include not only urban and tourist developments, but all sort of infrastructures. Among them marinas, ports, desalinization and sewage treatment plants, artificial beaches and all kind of roads and parking lots can be cited. All they result from the pressure that population and mass tourism and related activities have on the coastal zone. This pressure originates different impacts along the coast, whose effects has been pointed out by several authors (Alonso et al., 2002; Hernández-Calvento et al., 2005; García-Romero et al., 2016; Ferrer-Valero et al., 2017).

## 3.2. Beaches at Tenerife and Gran Canaria Islands

### 3.2.1. Criteria used for beach classification

A good approximation to the beaches in the whole archipelago has been performed considering the beaches in the two most populated islands: Tenerife and Gran Canaria. To characterize the beaches along these two islands, we have made a thorough search of the whole coastline along both islands. Beaches have been classified in four groups following two different criteria: Firstly, according to their nature (natural or artificial), and secondly the natural ones have been divided according to the dominant sediments: sandy beaches, mixed beaches and pebble-cobble beaches. Table 3.1 summarizes the main characteristics of each of the resulting groups and Figure 3.2 shows several examples of these beaches.

In this search we have considered only beaches larger than 100 m. Using different orthophotos we have measured the length, maximum width and minimum width at each particular beach. To avoid problems related to tide, width has always been measured from the high tide mark to the back of the beach. This upper limit can be either artificial (normally roads, pedestrian promenades or agriculture fields) or natural (cliffs, dunes or natural lowlands). In the latter case the upper limit of the beach was selected following either a geomorphologic (cliff toe, first foredunes) or a sedimentologic criteria (where the dominant beach material was observed). The dominant grain size was obtained from scientific papers, technical reports, in situ observations and analysis of photographs available in the web for each of the different spots.

Table 3.1. Main characteristics of the four types of beaches considered in this work.

Beach type	Description
Sandy beach	Wave-built foreshore accumulation of dominant sand size sediments, usually composed of both emerged and submerged bodies.
Mixed beach	Wave-built accumulation of sand to boulders. These materials can be either randomly distributed all year round or following a seasonal pattern: pebbles and cobbles dominant size across the whole foreshore during winter, while at summer time the lower foreshore is mostly composed by sand.
Pebble-cobble beach	Wave-built accumulations of pebbles and cobbles dominant grain size, usually forming berms and supratidal ridges. These materials do not change along the year.
Artificial beach	Beach that has been created by man-made structures (groins, detached breakwaters, etc) and/or by artificial inputs of sand. In some cases there were natural beaches at that particular spot, but they have been altered to be larger and/or wider (e.g. Alcaravanceras, La Laja, Tauro and Meloneras beaches in Gran Canaria Island).

### 3.2.2. Beaches at Tenerife Island

There are 93 beaches all around Tenerife Island, but there is no clear pattern in the distribution of the different types of beaches along the coast (Figure 3.2). Nevertheless, sandy beaches are mostly concentrated in three areas: N coast (between beach numbers 15-25), W coast (numbers 32-40) and SE coast (between beaches 62-77). Artificial beaches are mostly found along three areas: at the SW (between beaches 42-52) along Las Américas area, and in the north coast at Puerto de la Cruz (beaches 20-21). In both areas the concentration of tourist resorts is very high, and therefore there is a big touristic pressure for sandy beaches. The third sector is along the E-NE coast, where four artificial beaches are found (beaches 80, 86-88). In this case they are mostly designed for the native population, since along this area there are big villages and towns (Güímar, Candelaria, Radazul and Santa Cruz de Tenerife). Therefore, the demand for sandy beaches as recreation areas is not only due to tourism but also to local residents.

Regarding the coarse-grain beaches, including both the mixed beaches and the pebble-cobble ones, they are found all along the island. However, they are mostly located at the three corners of Tenerife Island: along Anaga at the NE, Teno at the NW and Las Galletas at the S. These corners correspond to the distal part of the three-armed rift system (Carracedo et al., 2007; Geyer and Martí, 2010). The geological configuration along these areas, characterized by basaltic lava flows cut by a dense network of dykes, total absence of shelf and very short and steep gullies, do not favour the presence of beaches. The few beaches present in these areas are very narrow and dominated by coarse grained materials. Figure 3.3 shows several examples of the beaches at Tenerife Island.

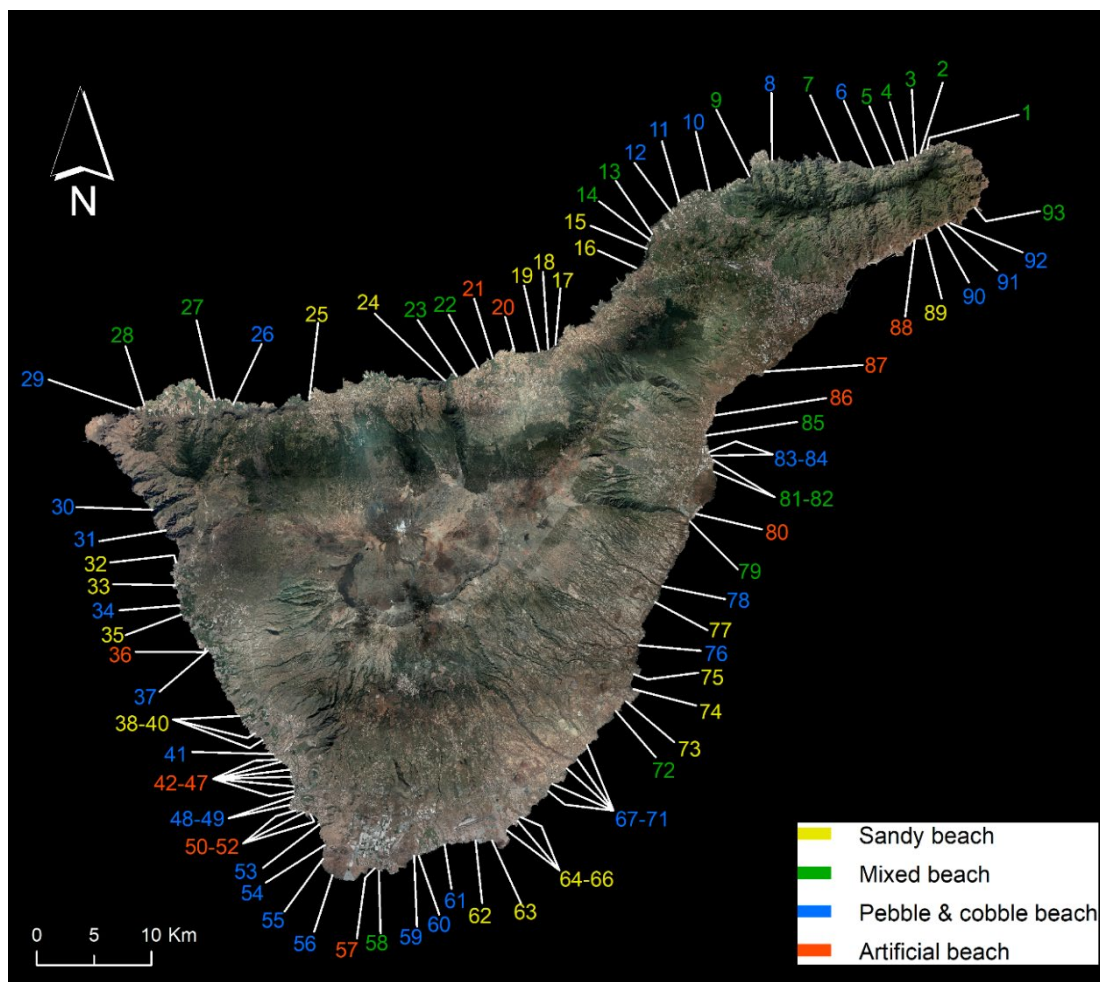


Figure 3.2. Location and classification of all the beaches at Tenerife Island. Note that beaches can be found all around the island except at the NE and NW ends on the island, as well as in the city area (between beaches 87-88). The colours key indicates the type of beach considered.

Table 3.2 shows the main characteristics associated to all those beaches. In some cases there are several beaches located very close to each other and responding all of them to the same name. They are called sub-beaches. In case of artificial beaches, these sub-beaches are normally separated by groins, while in natural areas are separated by headlands. Length of each one of them is shown in the length column of Table 3.2 (e.g., Playa Jardín beach, number 21, includes three sub-beaches of 280, 130 and 260 m length).

*Table 3.2. Main characteristics of the beaches at Tenerife Island. More than one value in length indicates that there are several beaches very close to each other and responding to the same name. These are called “sub-beaches” (see text). Width is measured from high tide mark. Two values refer to the wider and narrower parts of the beach. Beach type description: sandy beach (1), mixed beach (2), pebbles-cobbles beach (3), artificial beach (4).*

	<b>Beach name</b>	<b>Beach type</b>	<b>Length (m)</b>	<b>Width (m)</b>
1	El Draguillo	2	130	0-10
2	Unknown name	2	180	10
3	Benijo	2	270	15
4	Almáciga	2	290	15
5	Roque de las Bodegas	2	350	0-20
6	Tachero	3	200	0-10
7	Tamadite	2	210	10-20
8	Punta del Hidalgo	3	580	0-10
9	El Arenal	2	260	0-10
10	Jover	3	120	0-20
11	La Barranquera	3	130	0-10
12	Chamorro	3	150	20
13	El Pris	2	160	10
14	San Juan	2	150	0-10
15	La Arena	1	210	10-35
16	La Garañona	1	1100	0-10
17	El Ancón	1	210+140	0-20
18	Los Patos	1	115+650	0-40
19	Bollullo	1	210+100	0-35
20	Martíáñez	4	400	0-25
21	Playa Jardín	4	280+130+260	10-60

(continued)

22	Los Roques	2	340	15
23	de Castro	2	120	15
24	El Socorro	1	250	15-60
25	San Marcos	1	200	5-30
26	Caleta de Interián	3	235	5-20
27	Agua Dulce	2	115+95	10-20
28	La Arena	2	100	0-20
29	El Fraile	3	250	0-15
30	Masca	3	200	0-10
31	Barranco Seco	3	500	0-15
32	Los Gigantes	1	120	0-20
33	La Arena	1	160	40
34	Punta Blanca	3	120	15
35	La Jaquita	1	45+45+ 120	0-30
36	San Juan Puerto	4	60+290	5-30
37	San Juan	3	200	5-25
38	Callao Salvaje	1	120	15-50
39	El Puertito	1	160	0-5
40	Diego Hernández	1	70+75	0-10
41	La Enramada	3	360	0-30
42	Unknown name	4	365	0-15
43	El Duque	4	400	15-55
44	Fañabé	4	920	5-55
45	La Pinta	4	195	20-35
46	Las Américas	4	140	15-50
47	Troya	4	420	5-70
48	Playa Honda	3	450	0-20
49	El Guincho	3	120	0-5
50	El Camisón	4	360	10-20
51	Las Vistas	4	880	25-75
52	Los Cristianos	4	360	30-85
53	Los Callaos	3	220	5-10
54	Palm-Mar	3	160	5-10
55	Malpaís de Rasca	3	140	5-20
56	Faro de Malpaís de Rasca	3	140	10-20
57	Las Galletas Puerto	4	400	0-35
58	Las Galletas	2	430	0-10
59	Colmenares	3	330	5-10

(continued)

60	El Barranco	3	360	0-15
61	San Blas	3	190	45
62	Los Perros	1	170	25
63	La Tejita	1	950	20-110
64	El Médano	1	330+220+75+35+100	10-60
65	El Cabezo	1	70+70	15-30
66	La Jaquita	1	70+130	10-60
67	Unknown name	3	480	0-50
68	El Medio	3	100+195+190	0-45
69	Los Tarajales	3	220	15
70	Mareta del Río	3	860	5-15
71	Callao Hondo	3	120+165	7-30
72	Ensenada de Abades	2	160+20+45+30	5-10
73	Abades	1	40+100+95	20-65
74	Punta de Abona	1	145	10-35
75	El Porís	1	60+90	0-20
76	El Sombrerito	3	210+60+120	10-15
77	El Abrigo	1	50+130	0-30
78	Barranco de Herques	3	225	15
79	Las Bajas	2	660	5-10
80	Puertito de Güimar	4	730	0-55
81	El Socorro	2	815	0-15
82	La Restinga	2	255	10
83	Lima	3	420	0-10
84	La Viuda	3	120+45	0-20
85	Candelaria	2	320	0-5
86	Punta Larga	4	600+270+260	0-30
87	La Nea	4	290	5-35
88	Las Teresitas	4	1230	40-75
89	Las Gaviotas	1	110	0-5
90	El Burro	3	140	0-5
91	El Llano	3	300	5
92	Igüeste	3	380	5-10
93	Antequera	2	330	5





*Figure 3.3. Photographs of several beaches in Tenerife Island. a and b) Typical sandy beach in the northern coast backed by high cliffs, so that debris are common in the upper part of the beach (La Garañona, number 16). c) Three artificial beaches in the SW coast. Two of them limited by groins and the one on the right is within the harbour area (El Camisón, Las Vistas and Los Cristianos beaches, 50-52 from left to right). d) Artificial beach of Las Teresitas (number 88), quite large and wide because is the closest beach to the main town in the island. e) Cobble beach of Playa Honda (number 48). It is quite narrow and a pedestrian promenade occupies the upper limit, which is quite common in tourist areas.*

### 3.2.3. Beaches at Gran Canaria Island

Beaches at Gran Canaria Island are present all along the coastline, but beach concentration is denser in the S and E coast. Beach distribution (Figure 3.4) follows a clearer pattern than at Tenerife. Sandy and artificial beaches are mostly located in two sectors along the coastline: at the S-SW (between beach numbers 22-41) and at the E-NE

(between beach numbers 53-62 and 1-2), while both mixed and pebble-cobble beaches are dominant along the N-W coast (beach numbers 3-21) and at the SE (beaches 42-52).

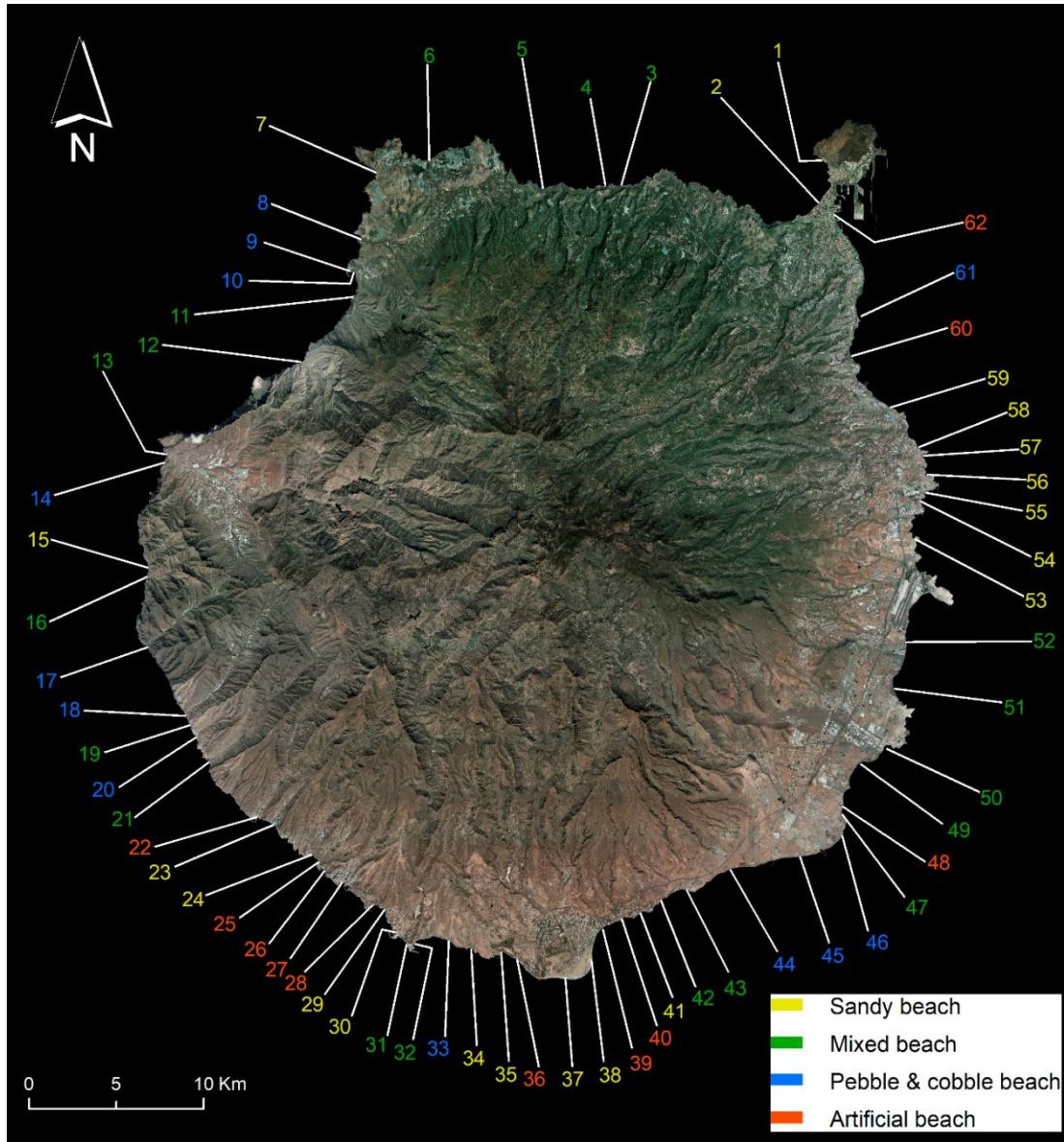


Figure 3.4. Location and classification of the different beaches at Gran Canaria Island. Note that at the northern and northwestern coast the amount of beaches is much lower than at the rest of the island. The colours key indicates the type of beach considered.

In the former case, beaches 3-21 are located along the northern and western coast. All along this area, waves are higher and therefore they break against the shoreline with more

energy. As a result, sandy beaches are very unusual. There are only three exceptions along this area: Las Canteras, Sardina and Guguy Chico (beaches number 2, 7 and 15 respectively). Las Canteras and Sardina beaches are located in small bays where sandy sediments are the dominant material in the seafloor (Ministerio de Medio Ambiente, 2008). Both of them are protected from incident waves by the coastline configuration as well as by a natural offshore rocky bar in the case of Las Canteras beach and a nearby groin at Sardina beach. These specific conditions allow the existence of sandy beaches at Gran Canaria northern coast.

Guguy Chico is a different case. This facing west beach is completely open to the ocean with a very high cliff at the back. The very wide sandy shelf and the existence of a dune attached to the cliff are key aspects to understand why this beach is sandy all year round (Figure 3.5).

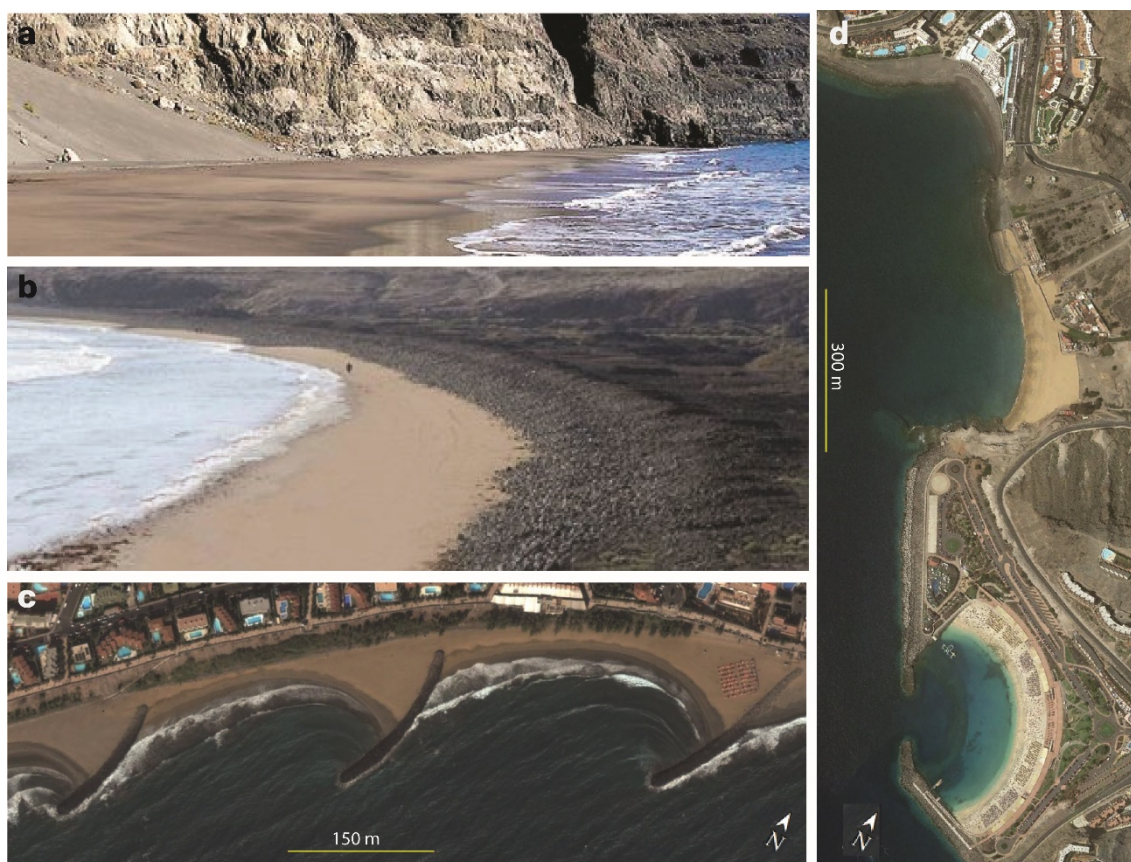
The other group of coarse grain beaches is located at the SE coast (beaches 42-52 in Figure 3.3). They are associated to the mouth of three of the largest gullies in the island (Guayadeque, Arinaga and Tirajana gullies), which according to Menéndez et al. (2008) have evacuated the amount of nearly 22 km<sup>3</sup> of material to the coast. The deposition of such huge amount of material along the coast has formed three fan deltas that can be clearly identified from aerial photography. Even though the eroded material covers a wide range of particle size, pebbles and cobbles are the dominant fraction along the coastline, since waves and coastal currents wash away the finer fractions. Table 3.3 shows the main characteristics of all those beaches.

#### 3.2.4. Comparison between beaches in both islands

Considering the values shown in Tables 3.2 and 3.3, it has been possible to obtain the total length of beaches in both islands, as well as the average length and width corresponding to each of the different beach types. Average length has been obtained both for the beaches, as well as for the associated “sub-beaches” listed in Tables 3.2 and 3.3. The average area is also shown in Table 3.4. It has been obtained after multiplying the average length by the average width. Since the width was measured from the high tide line until the upper limit of the beach, the average area corresponds to the area landward



from the foreshore, what is mostly used for sunbathing. This is what Komar (1998) relates to as the backshore, or what Short, (1999) defines as subaerial beach.



*Figure 3.5. In situ and aerial view of several beaches at Gran Canaria. a) Guguy Chico beach (number 15), a magnificent sandy beach in the western coast. Note the dune attached to the cliff. b) Example of mixed beach, with sand in the lower foreshore and pebbles in the upper part of the profile (photograph taken at low tide, Vargas beach, number 51). c) Aerial view of El Veril beach (number 39), an artificial sandy beach formed by three sub-beaches, separated by curved groins. d) Aerial view of El Cura, Tauro and Amadores beaches (numbers 24-26 respectively from top to bottom). Note the different color of the sand, which indicates the different source of the material: El Cura is a natural beach, Tauro has been nourished with sand from the Sahara Desert, and Amadores has sand from a submerged sand bank rich in corallinaceous algae, which explains the white colour.*

At Tenerife Island there are 93 beaches larger than 100 m and this number expands to 124 when considering the sub-beaches. These beaches cover a total length of nearly 32 km, which represents 9.3% of the 342 km of coastline. The four types of beaches are well

represented, both in number and total length, but there is a clear difference in size between natural and artificial beaches. While the first ones have average length of roughly 300 m and widths ranging from 9 to 19 m, the average values for artificial beaches reach 550 m length and 35 m width. Consequently, the average area of natural beaches is only 0.28 Ha while the artificial ones are more than 5 times that size, expanding up to 1.47 Ha.

Table 3.3. *Idem Table 3.2 for Gran Canaria Island beaches.*

	<b>Beach name</b>	<b>Beach type</b>	<b>Length (m)</b>	<b>Width (m)</b>
1	El Confital	1	440	0-15
2	Las Canteras	1	2830	0-70
3	El Altillo	2	400	0-15
4	San Andrés	2	810	0-15
5	San Felipe	2	200	20
6	Bocabarranco	2	190	50
7	Sardina	1	75+40	0-25
8	Juncal	3	120	25
9	Puerto de Las Nieves	3	215	15
10	Agaete	3	170	0-20
11	Guayedra	2	140	35
12	El Risco	2	390	25
13	La Aldea	2	105+80	20
14	El Charco	3	360	15
15	Guguy Chico	1	550	0-30
16	Guguy Grande	2	210	10-25
17	Tasartico	3	460	0-20
18	Tasarte	3	700	0-25
19	El Ambar	2	275	0-20
20	Los Secos	3	140	15
21	Veneguera	2	370	15-30
22	Mogán	4	215	15-55
23	Taurito	1	220	0-60
24	El Cura	1	250	0-25
25	Tauro	4	190	15
26	Amadores	4	490	30

(continued)

27	Puerto Rico	4	280	40-80
28	Anfi del Mar	4	200	25-50
29	Patalavaca	1	90+125	5-30
30	Marañuelas	1	270	10
31	Cementera	2	380	15
32	El Pajar	2	75+140	10-25
33	Triana	3	220+145+115	15
34	Montaña Arena	1	240	10
35	Pasito Blanco	1	180	5-40
36	Meloneras	4	270	45
37	Maspalomas	1	2710	10-80
38	El Inglés	1	2700	70
39	El Veril	4	110+280+330	0-70
40	Las Burras	4	330	10-90
41	San Agustín	1	195+400	0-80
42	El Aguila	2	400	15
43	Tarajalillo	2	230	10
44	Juncalillo del Sur	3	2950	10
45	El Matorral	3	1060+750	10
46	Tenefé	3	2270	10
47	Pozo Izquierdo I	2	360	10
48	Pozo Izquierdo II	4	290	10
49	Bahía de Formas	2	500	10-30
50	Arinaga	2	320	0-10
51	Vargas	2	1200	15
52	El Burrero	2	400	10-20
53	Aguadulce	1	100	15
54	Salinetas	1	270	25
55	Melenara	1	310	15-85
56	El Hombre	1	230	15-80
57	La Garita	1	230	20-65
58	San Borondón	1	190	50
59	Bocabarranco	1	330	60
60	La Laja	4	1260	0-40
61	San Cristóbal	3	270	0-15
62	Alcaravaneras	4	440	0-95

The lower values of width in natural beaches (both sandy, mixed and pebble beaches) are mostly due to the very narrow shelf, so that marine sediments are very scarce. On the contrary, artificial beaches are much wider thanks to a sort of coastal protection structures that creates a shelter to waves action, as well as thanks to the artificial nourishment carried out in most of them.

At Gran Canaria Island the situation is slightly different. There are 62 beaches larger than 100 m (72 considering sub-beaches), but they extend over nearly 35 km. Since the island perimeter is 256 km, it indicates that beaches represent 13.6% of the island perimeter. The most abundant ones are the natural sandy beaches, which cover 14 km, followed by the pebble and cobble beaches that extends over nearly 10 km. Beaches in these two categories are the largest ones, since they have 700 and 830 m average length respectively. On the contrary, mixed and artificial beaches are much shorter, since they extend for only roughly 350 m. Regarding beach amplitude, artificial and natural sandy beaches are the widest with average values of 31-35 m, while pebble-cobble and mixed beaches are much narrower, since the average width is only 13 and 18 m respectively.

Natural sandy beaches are by far the largest type of beaches, with an average area of nearly 2 Ha. Artificial beaches are half that size and both mixed and pebble-cobble beaches are slightly smaller, but much larger in any case than those at Tenerife Island.

The lower number and size of artificial beaches in Gran Canaria compared to Tenerife is explained by the much larger extension of natural sandy beaches (14 km at Gran Canaria versus 7.1 km at Tenerife). In both islands the pressure derived both from tourism and local residents is very high, which demand adequate infrastructures, and sandy beaches are a key infrastructure for recreational purposes. Therefore, administrations have had to create more artificial beaches at Tenerife Island to compensate the lower number of natural sandy beaches. As stated by Cooper and Alonso (2006), nourishment is justified on the basis of creating recreational space.

In Gran Canaria there are a good number of natural sandy beaches, some of them quite large (Las Canteras, Maspalomas and El Inglés beaches, each one of them around 2.8 km length) and with adequate services for users. On the contrary, there is only one natural sandy beach at Tenerife larger than 1 km (La Garañona, beach number 16 in Table 3.2). Even though this beach is spectacular (Figure 3.3a and 3.3b), it is not heavily used

because a number of factors: it is very narrow at high tide; it is backed by a high cliff, so that during many hours it is in the shade; it can be dangerous because of big waves and debris falling from the cliff and it is not easily accessible to people.

Table 3.4. Total and average values for the different beach types and for both considered islands. Beach type: sandy beach (1), mixed beach (2), pebbles-cobbles beach (3), artificial beach (4).

Island	Beach type	Total length (m)	Beaches		Sub-beaches		Average width (m)	Average area (Ha)
			Num.	Average length (m)	Num.	Average length (m)		
Tenerife	1	7140	23	310	39	183	19	0.34
	2	5835	20	292	24	243	9	0.23
	3	9505	33	288	39	244	12	0.29
	4	9240	17	544	22	420	35	1.47
	TOTAL	31720	93	341	124	256	17	0.44
Gran Canaria	1	14025	20	701	23	610	31	1.92
	2	7195	19	379	21	343	18	0.61
	3	9945	12	829	15	663	13	0.86
	4	3635	11	330	13	280	35	0.98
	TOTAL	34800	62	561	72	483	24	1.17

### 3.3. Case studies

#### 3.3.1. Movement of pebbles and cobbles at San Felipe beach (Gran Canaria)

San Felipe beach is a mixed beach, 200 m long, located in the northern cost of Gran Canaria Island (number 5 in Figure 3.4 and Table 3.3). It is a perfect example of how



these beaches evolve both in the medium and in the short term. It follows a clear seasonal pattern. In summer time, the lower foreshore is fully covered by sand, with pebbles only in the upper foreshore and the backshore. The general appearance is very similar to that of figure 5B. On the contrary, during winter, the beach is exposed to higher waves, and the increase in wave energy results in the offshore movement of the sand and the onshore movement of part of the pebbles, which creates a higher winter berm (Casamayor et al., 2017).

Nevertheless, the beach behaviour in the shorter term, and particularly during the stormy period, shows that the coarser particles move not only in the cross-shore direction, but mostly in the longshore one. To follow the movement of individual pebbles and cobbles on the beach, Casamayor et al. (2015) used passive integrated transponders in 198 particles, according to the methodology proposed by Allan et al. (2006). Tracer weight ranges between 82 and 2,837 g with an average of 450.6 g.

The beach was divided in six sectors considering both the alongshore and the cross-shore directions: East, Centre and West in the alongshore direction, and upper and lower foreshore in the cross-shore direction. Particles used as tracers were displaced on the beach on March 14, 2013, with nearly the same number of particles in each sector (Figure 3.6). The distribution of the pebbles on the beach was randomly, so that in each sector there was approximately the same number of lighter and heavier particles.

Location of tracers on the beach was measured three times in less than one month after their initial location on the beach. Therefore, the movement followed by these particles during this period (from March 14 until April 10, 2013) can be separated in three shorter episodes: First one took place from March 14 until March 19. During this period wave height was very small and the tagged particles showed slight movements. Most of them remained in their original sector, but a small number of pebbles initially located in the upper foreshore fell down to the lower foreshore.

Second period took place between March 19 and April 2. During this period, a stormy event with waves around 3 m significant wave height hit the area. These NNW waves pulled mostly the lower foreshore, and therefore particles located along this area were detected quite far eastwards from their original location.

During third period (lasting between April 2 and April 10) another stormy event took place in the area. In this case significant wave heights were also around 3 meters and offshore direction was from the NNW, but this event lasted for nearly 60 hours while the previous one lasted for only 36 hours. The resulting situation was a new longshore transport towards the east of most particles located in the lower foreshore. In addition, some particles previously located in the upper foreshore showed an eastward movement, which indicates that they fell from the upper berm and then were also pulled eastwards by the waves.

Wave data shown in Figure 3.6 corresponds to SIMAR point 4035011, located approximately 3 km offshore San Felipe beach. They are the outcome of two models: WAM and WaveWatch (Puertos del Estado, 2020) and therefore they were not directly measured on the field and have not been propagated to the coast. Nevertheless, this experiment shows that pebbles and cobbles move on the beach depending on wave conditions, so that higher wave height determines that pebbles move longer distances in the longshore direction, and this transport takes mostly place in the lower foreshore.

### 3.3.2. Medium term sedimentary balance at Las Canteras beach

Las Canteras beach is an urban beach, since it is located adjacent to Las Palmas de Gran Canaria, the largest city in the Canaries. This is a sandy beach nearly 3 km long located in the northeastern cost of Gran Canaria Island (number 2 in Figure 3.4 and Table 3.3). Boundary conditions are the key aspect when talking about beach morphodynamic at this beach. The beach is bounded by a rocky headland at the north, a small breakwater at the south and a partially fragmented offshore sandstone bar, which extends parallel to the shoreline 200-300 m offshore (Figure 3.7a). According to Alonso and Vilas (1994), the boundary conditions determine the existence of three different sectors along the beach, which resemble to the beach states defined by the well-known beach morphodynamic model proposed by Wright and Short (1983).

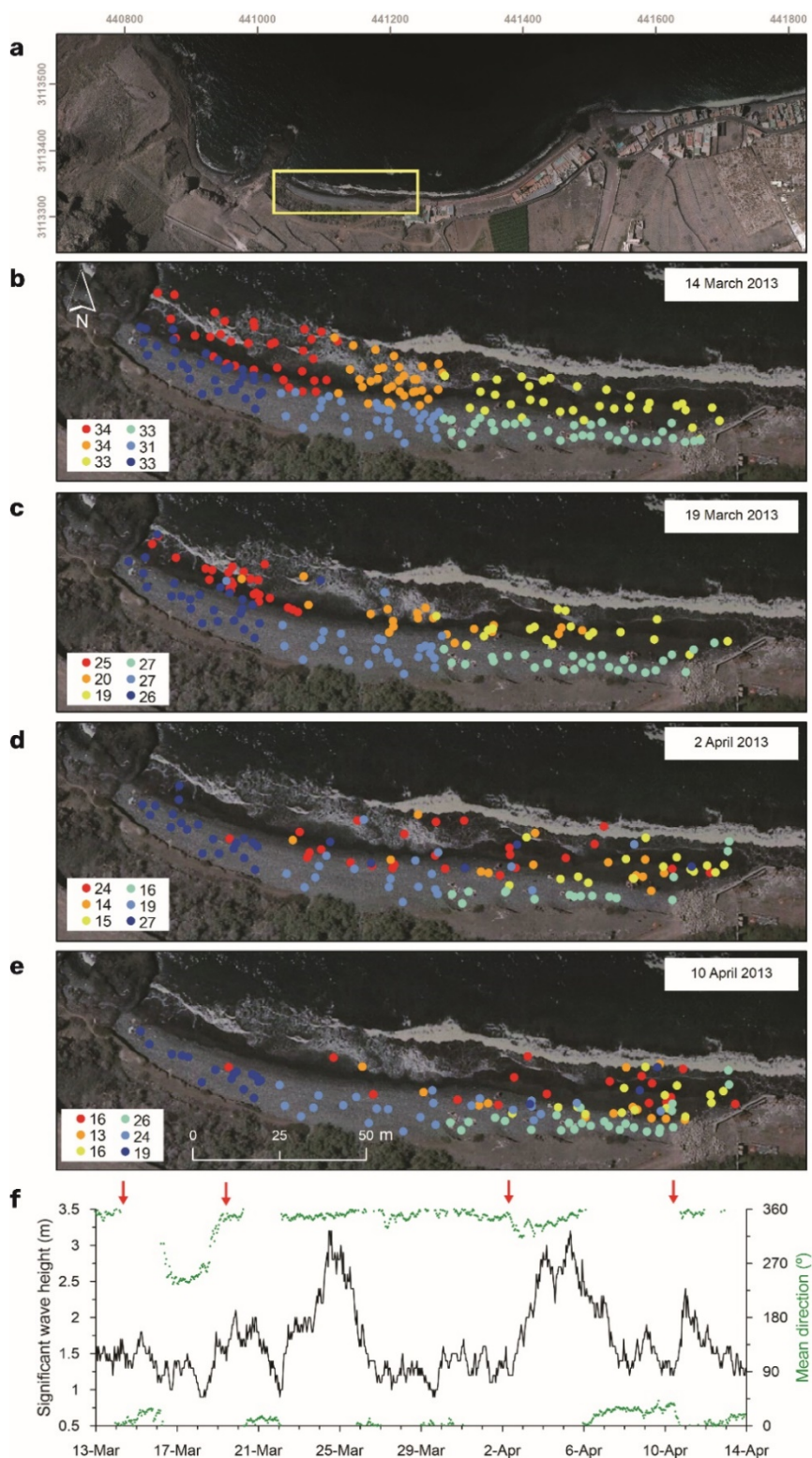


Figure 3.6. a) Location of San Felipe beach (yellow rectangle in the upper panel) in the northern coast of Gran Canaria. b) Original location of the tracers (colour dots) in the six defined sectors (see text). c, d, e) Tracers location in the subsequent surveys. f) Evolution of wave height and wave direction measured offshore during the experiment. The red arrows refer to the dates of determining the tracers location on the beach.

The southern part of the beach is completely exposed to incident waves and it behaves as a typical dissipative beach: mild foreshore slope, very occasional beach cusps and an offshore sand bar in winter that migrates onshore, forming a subaerial sand bar during late spring and summer.

The central sector of the beach is partially protected from wave energy by the two main fragments of the offshore rocky bar, but the opening between them is large and deep enough for waves to come in without breaking, but dissipating part of their energy by refraction and diffraction. A rocky substrate covers the lower foreshore. Outcrops of this substrate may be either exposed or fully buried by sand, depending on the amount of sand on the area.

The northern sector is the most sheltered one due to the presence of the offshore bar as well as by the general shoreline configuration. This area is much more reflective, with a steeper beach slope and regular beach cusps all year round. It shows a natural trend to accumulate sediments transported by the longshore drift from the southern sector. This trend has been observed for many years (Alonso, 1993; Alonso et al., 2000), and different administrations have carried out along the years, topographic measurements and digital terrain models (DTM) of the area, to determine the necessity to remove part of this accumulated material. Because of it, in 2003 and 2009 different amounts of sand were extracted to nourish other beaches in Gran Canaria.

Alonso et al. (2015) made a detailed search of all previous studies carried out in the beach. As a result of this analysis, some of the different DTMs were not comparable to the others because they followed different procedures in the data acquisition. Only four of these studies were considered perfectly comparable between them. These are the studies carried out by Bolaños and Santana, (1997), Medina et al. (2006) and Alonso et al. (2015). All of them included a detailed DTM of the beach face and the subaerial beach at the northern sector of Las Canteras beach.

In 2003 the administration carried out a sand extraction of sand from the upper part of the beach profile along most of the area shown in Figure 3.7b. Therefore, in the period 1996-2006 there was a sand accumulation of 59,400 m<sup>3</sup> (25,400 m<sup>3</sup> derived from the balance between DTMs and 34,000 m<sup>3</sup> from the extraction). Considering a period of 10 years between both DTMs, the accumulation rate is 5,940 m<sup>3</sup>/year.

In 2009 a new extraction was also carried out in this part of the beach, but in this case 56,400 m<sup>3</sup> of sand were extracted both from the foreshore and the upper profile. Therefore, the net accumulation of sediments in the period 2006-2012 was 52,500 m<sup>3</sup> (-3,900 m<sup>3</sup> from the balance between DTMs and 56,400 m<sup>3</sup> from the extraction). In this case the elapsed period is 6.3 years (from August 2006 until November 2012), and the accumulation rate increases up to 8,330 m<sup>3</sup>/year.

First extraction explains the reddish colours shown in Figure 3.7b in the upper part of the beach, while second extraction explains the intense red colours in the foreshore and the reddish ones in the upper beach in Figure 3.7c.

Regarding the last comparison of DTMs, there is a net increment of 3,200 m<sup>3</sup> of sand. The elapsed period is in this case much shorter, only 2.7 years between November 2012 until July 2015, which gives a net accumulation rate of 1,200 m<sup>3</sup>/year. This accumulation rate is much smaller than the previous ones (6,000 and 8,300 m<sup>3</sup>/year in 1996-2006 and 2006-2012 respectively).

The reason of such big difference is that in the period November 2012 until July 2015 three very big stormy events took place in the North of the Canaries. They happened in February 2014, November 2014 and February 2015. Significant wave heights larger than 5.3 m were recorded in each one of them (Alonso et al., 2015). Wave heights were recorded at Gran Canaria wave buoy located offshore in the North coast of Gran Canaria. Propagation of such swell to the coast could perfectly give values of maximum breaking wave heights around 9 m. These three events not only lasted each one of them for many hours, but what it is really unusual, is that the three of them took place just in the period of twelve months. The first of these events was particularly strong, and its effects in the north of Spain were reported by Flor et al. (2015). Las Canteras beach could not recover from the erosive effect of this event because few months later a new storm took place.

The sedimentary balance shown in Figure 3.7d reflects the effect of those storms. The red colours represent a loss of nearly 12,000 m<sup>3</sup> of sand. The eroded area shows a shape like a wedge, being more intense towards the South and particularly in the lower foreshore. Both elements (shape and location) reflect that the loss of sand is related to erosive processes. Therefore, the low accumulation rates obtained for the period 2012 - 15 are related with the mentioned stormy events.

Table 3.5. Volume changes between DTMs carried out by Bolaños and Santana (1997) (August 1996), Medina et al. (2006) (August 2006), Demarcación de Costas (November 2012) and Alonso et al. (2015) (July 2015). Volume of material removed in each extraction, elapsed period between DTMs and accumulation rate are also shown.

Period	Change	Volumen change (m <sup>3</sup> )	Extraction (m <sup>3</sup> )	Time interval (years)	Accumulation rate (m <sup>3</sup> /year)
August 1996 - August 2006	Accumulation	29,450	34,000	10	5,940
	Erosion	4,050			
	Difference	25,400			
August 2006 – November 2012	Accumulation	12,350	56,400	6,3	8,330
	Erosion	16,250			
	Difference	-3,900			
November 2012 – July 2015	Accumulation	15,260		2,67	1,200
	Erosion	12,060			
	Difference	3,200			

Figure 3.7e shows the evolution of the volume of sediments in this northern sector of Las Canteras beach in nearly two decades relative to the situation measured in August 1996. This figure has been drawn considering that the amount of sand is zero in August 1996, and that the accumulation rates mentioned in previous paragraphs keep constant during the periods between consecutive DTMs. It shows a steady increment of sand between 1996 - 2003 at the rate of 6,000 m<sup>3</sup>/year. A sharp decrease in 2003 of 34,000 m<sup>3</sup> represents the first extraction. Since then, the accumulation processes continue until 2006, when the accumulation rate increases at 8,300 m<sup>3</sup>/year. In 2009 the second extraction took place, and the volume of material was reduced to values even lower to those of 1996. Nevertheless, the beach quickly recovered and by November 2012 there was a new excess of nearly 20,000 m<sup>3</sup> of sand. Since then, the accumulation rate is much smaller due to the high energy events recorded in the area. In July 2005 the amount of material is approximately 23,000 m<sup>3</sup> more than the amount existing in 1996.



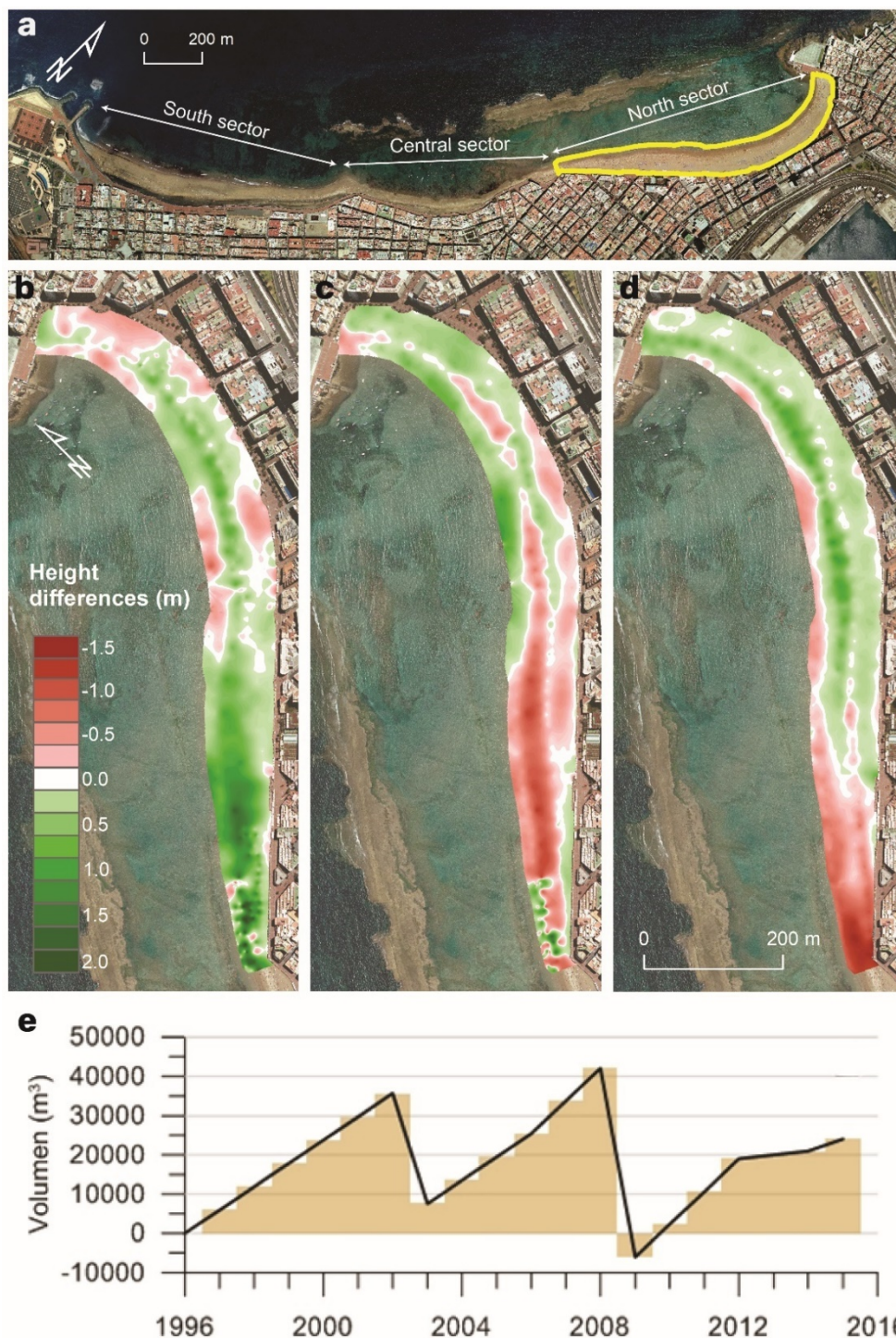


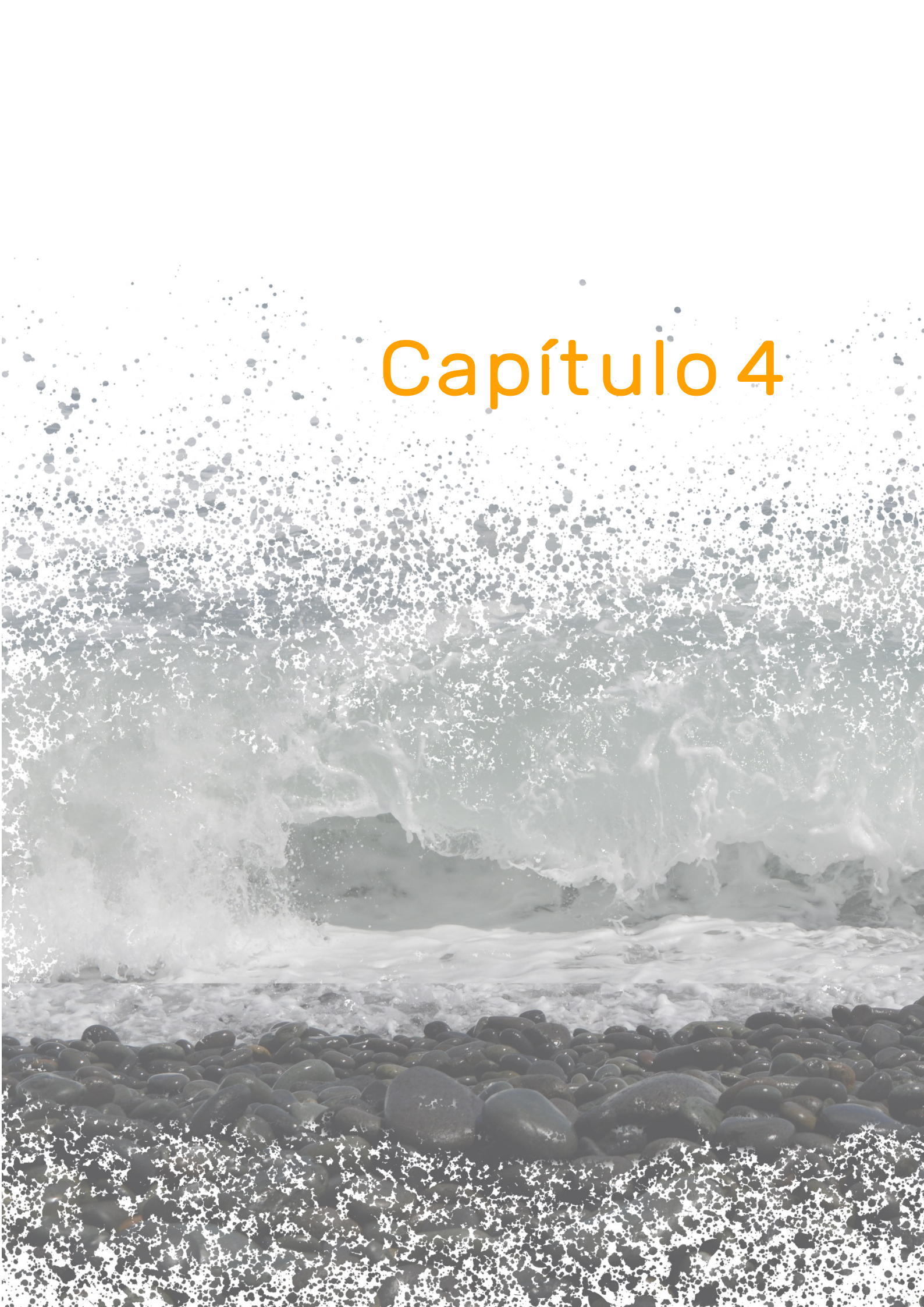
Figure 3.7. a) Aerial view of Las Canteras beach, showing the three sectors that form the beach. Note the presence of the offshore bar. The yellow polygon corresponds to the area measured in the different DTMs. b) Difference between DTMs carried out in August 1996 and August 2006. c) Difference between DTMs carried out in August 2006 and November 2012. d) Difference between DTMs carried out in November 2012 and July 2015. e) Evolution of the amount of sediments at the beach considering the accumulation rates and the two extractions carried out in 2003 and 2009.

This sector of the beach presents a natural trend to gain sediments even under very adverse circumstances as it has happened in the 2014 and 2015. Nevertheless, the future evolution is uncertain, since the accumulation rate depends on wave climate. The administration should consider the convenience of making new DTMs in order to determine if new extractions may be necessary in the near future.





# Capítulo 4



## Artículo 3

# Seasonal response of a composite beach in relation to wave climate

Geomorphology, April 2022  
doi: 10.1016/j.geomorph.2022.108245

---

*Mariona Casamayor*<sup>a,\*</sup>, *Ignacio Alonso*<sup>a</sup>, *Nieves G. Valiente*<sup>b</sup> and  
*María José Sánchez-García*<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,  
Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

\*mariona.casamayor101@alu.ulpgc.es

<sup>b</sup> Met Office, Fitz Roy Road, Exeter, EX1 2PB, United Kingdom.

---

## 4.1. Abstract

Most studies regarding coastal morphodynamic have focused on sandy beaches or beaches with a single type of sediment. Wave climate has been described as one of the main factors behind the morphological changes, although this interaction is not fully understood on composite beaches. The aim of this work is to present new insights into the seasonal variability of a composite beach called San Felipe (Gran Canaria, Spain). Statistically significant correlations were obtained between different measured

morphological variables, morphodynamic parameters and the wave climate. The run-up and Iribarren number were found to be good indicators of the morphological response of a composite beach. The morphological seasonal dynamics of this composite beach enabled the definition of two morphodynamic beach states which correspond to summer and winter situations. The summer state is characterized by a profile with two different sedimentological and morphological sections: an upper part dominated by pebbles forming two berms, and a lower sandy section with a gentle slope. Spilling low-energy waves dominate and the beach follows a dissipative-intermediate pattern. The winter state is defined by a reflective-intermediate behaviour of the beach, which is narrower and steeper. Two morphological features were identified: a single storm berm and cusps along the foreshore. Plunging breakers and high-energy waves dominate during winter. Based on the results obtained in this study, a new classification of composite beaches is proposed.

## 4.2. Introduction

The vast majority of research focused on beaches deal with areas with a single dominant type of sediment (Mason and Coates, 2001). However, there are beaches with a bimodal sediment distribution (Atkinson and Esteves, 2018) ranging over three orders of magnitude from sands to gravels and boulders (Horn and Walton, 2007). Sometimes these variations in grain size occur on both a temporal and spatial scale (Holland and Elmore, 2008), and it is not clear what proportion of sand is required for a beach to be considered a mixed sand and gravel type (Mason and Coates, 2001; Horn and Walton, 2007; Holland and Elmore, 2008; Aragonés et al., 2015).

Several studies have aimed to provide a classification for gravel beaches according to their sedimentological or morphological characteristics. Bluck (1967) performed one of the first classifications of gravel beaches based on the distribution of particles according to their size and shape. Other authors also established gravel beach classifications taking into account sedimentological and morphological characteristics as well as wave conditions (e.g., Orford, 1975; Williams and Caldwell, 1988; Carter and Orford, 1993; Pye, 2001; Jennings and Shulmeister, 2002; Aragonés et al., 2015). The classification of Jennings and Shulmeister (2002) is one of the most widely used. They identified three main types of gravel beaches, with two of them having mixed sediments: mixed sand and gravel beaches and composite beaches. According to these authors, a mixed sand and

gravel beach includes a constant slope with both types of sediments homogeneously distributed across the beach, whereas a composite beach could be defined as a beach with two different parts in its profile: the seaward part with a gentle slope and dominated by sand, and the landward part that is mainly gravel dominated and steeper. Despite these classifications, there is still a lack of uniformity in the terminology used, since some authors refer indistinctly to mixed beaches, but without specifying whether they are speaking about mixed sand and gravel beaches or composite ones.

Considering mixed beaches as those environments with a bimodal sediment distribution, these systems have been the subject of many research studies which have focused on their sedimentary characteristics (Bluck, 1967; Horn and Walton, 2007; McLean and Kirk, 1969; Watt et al., 2008), sediment transport dynamics (Allan et al., 2006; Bertoni et al., 2010; Curtiss et al., 2009; Dickson et al., 2011; Grotoli et al., 2019; Mason and Coates, 2001; Osborne, 2005; Van Wellen et al., 2000) or morphodynamic behaviour (Kirk, 1970; Carter and Orford, 1993; Pontee et al., 2004; Ivamy and Kench, 2006; López de San Román-Blanco et al., 2006; Pedrozo-Acuña et al., 2007; Ciavola and Castiglione, 2009; Bertoni and Sarti, 2011; Dolphin et al., 2011; Bramato et al., 2012; Roberts et al., 2013; Atkinson and Esteves, 2018; Pitman et al., 2019). However, despite the growing number of morphodynamic studies on mixed beaches in recent years (Bertoni and Sarti, 2011), the hydrodynamic processes that take place to modify the response of these beaches are not yet fully understood (Pontee et al., 2004; Ivamy and Kench, 2006). Most of these works concentrate on morphodynamic aspects of the backshore and foreshore of mixed sand and gravel beaches, whereas relatively few studies have considered the nearshore conditions of this type of beach. This may be due to both high energy conditions (Osborne, 2005; Dickson et al., 2011) and the fragility of the instrumentation (Curoy, 2012).

Despite the high complexity of mixed beaches (Buscombe and Masselink, 2006; Dickson et al., 2011), waves and tides can be considered the main drivers of its morphological response and evolution. Ivamy and Kench (2006) established the importance of tidal processes in sediment transport and the morphological behaviour of the beach under low energy conditions. Additionally, Jennings and Shulmeister, (2002) reported the importance of hydrodynamic processes on composite beaches given that the morphodynamic response depends on the tide. At high tide, the beach follows a reflective

regime while at low tide conditions, due to the sandy and mild lower foreshore, the dissipative regime dominates. Wave climate and other hydrodynamic parameters that depend directly on the forcing conditions have been considered in the study of mixed beaches. Pontee et al. (2004) determined that wave climate is one of the main factors in profile changes on mixed beaches and these changes occur on a shorter timescale than in other beach types. Other research studies have found a relationship between morphological changes and some of the wave climate components such as wave height, wave period or wave energy (Powell, 1990; Pontee et al., 2004), although this correlation has not been studied in depth. Additionally, other studies demonstrate that wave run-up contributes to sediment transport of coarse-grain particles (Van Wellen et al., 2000; Pedrozo-Acuña et al., 2006) and is also responsible for the formation and remodelling of the berm (Curoy, 2012). Moreover, derived hydrodynamic parameters such as the Iribarren number also help understanding the behaviour of this type of beaches as they provide information about the hydrodynamic processes at the swash zone, which in turn generate changes in the beach face profile (Pedrozo-Acuña et al., 2008; López-Ruiz et al., 2020).

Most of these processes have been described for mixed sand and gravel beaches, leaving the beach response and evolution of composite systems poorly resolved. Hence, this research aims to provide a better understanding of the morphological response and evolution of a composite beach through the correlations with the forcing conditions and morphodynamic parameters. This study evaluates the seasonal dynamics of San Felipe Beach, a composite coastal system located in the central part of the northern coast of Gran Canaria (Spain). The response and evolution of San Felipe Beach using morphological observations over a period of 17 months are examined and analysed and the beach morphological changes are related to the main wave forcing parameters.

### 4.3. Regional setting

The Canary archipelago comprises a group of eight main volcanic islands and several islets located in the Atlantic Ocean (27–29° N, 13–18° W), with the easternmost islands about 100 km from the African coast.

The study area is located in a central position of the north coast of Gran Canaria island (Figure 4.1), the third largest island (1,560 km<sup>2</sup>) in the archipelago. Gran Canaria is over 14 Ma and its formation can be divided into six stages. The first of these, the submarine volcanic stage, is responsible for more than 90% of the total volume of the island (Schmincke, 1982). The depth at which these volcanic materials are found means they cannot be dated. The rest of the stages are subaerial and are characterized by three magmatic stages interspersed by stages of volcanic inactivity during which erosive processes are dominant (Mangas Viñuela, 2020). The age of the volcanic materials, particularly in the case of recent volcanism, the wave incidence and the existence of giant landslides are the key factors to explain the differences in the insular shelf width (Maestro-González et al., 2005), which ranges from hundreds of meters to ten kilometres. Along the northern coast of Gran Canaria the insular shelf is very narrow, with an average width of 2.5 km (Sánchez-García et al., 2017). The study area is characterized by phonolitic formation of the Upper Miocene, alluvial conglomerate deposits belonging to the Roque Nublo cycle (Pliocene), and pyroclasts and basaltic lavas of the Middle Pleistocene (post-Roque Nublo cycle). The most recent materials correspond to alluvial and colluvial deposits during the Holocene (Bellido Mulas and Pineda Velasco, 2008).

All these materials became eroded and transported to the coast along the San Felipe ravine, at the mouth of which is found a fan delta. The eastern boundary of San Felipe Beach is situated at the ravine mouth, while to the west the beach is bounded by a basaltic lava flow. The southern limits of the beach are a promenade along the eastern part and colluvial deposits and debris with a steep slope in the western part.

While San Felipe Beach is approximately 450 m long, the study area only covers the western half of the beach. There were two main reasons to exclude the eastern part of the beach in this study: *(i)* sediment closer to the fan delta are mostly boulders, whereas finer materials from sand to cobble dominate in the western part, and *(ii)* the presence of the promenade blocks the normal transport of sediment to and from the backshore (Figure 4.1d).



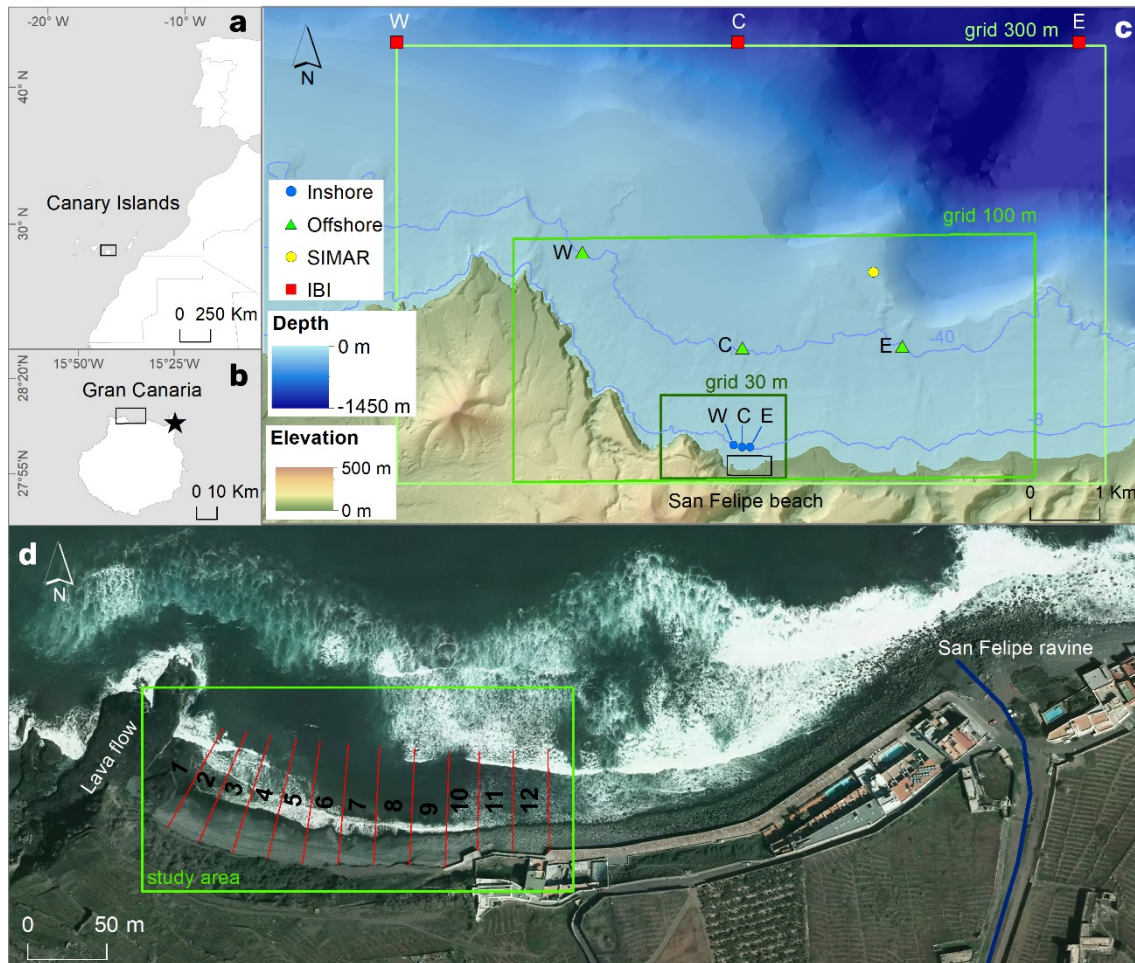


Figure 4.1. a) Location map of the study area. b) Situation of the tide gauge (black star) managed by the Spanish Ports Authority in Gran Canaria Island. c) Delft3D-WAVE nested model grids (resolution of  $300 \times 300$  m,  $100 \times 100$  m and  $30 \times 30$  m) and model nodes used for the extraction of bulk wave parameters. Red squares represent Iberia-Biscay-Irish (IBI) model nodes from Copernicus Marine Service used as wave input. Green triangles and blue dots indicate the offshore and the inshore nodes used in the analysis, respectively. SIMAR node 4035011 used to validate Delft3D-WAVE output data is shown as a yellow dot. d) Interpreted aerial photograph of San Felipe Beach showing the 12 profiles (red lines) used to obtain the morphological characteristics in the study area. Orthophoto source: IDECanarias, GRAFCAN S.A. (2015).

On Gran Canaria island, 30.6% of the beaches correspond to mixed beaches (Alonso et al., 2019). San Felipe is classified as a composite beach according to Jennings and Shulmeister (2002) and includes two parts with different sedimentologic and morphodynamic characteristics. The upper part of San Felipe Beach is composed of



phonolitic and basaltic pebbles and cobbles throughout the year, with an average grain size ( $D_{50}$ ) of 59.95 mm. The lower part has a marked seasonal behaviour due to wave climate. In winter the lower part of the beach has similar characteristics to those described for the upper part, while in summer, this part of the beach is composed of fine sand with a  $D_{50} = 0.23$  mm. This thinner sediment is located in the nearshore zone forming sand bars in winter, but during summer periods when wave energy decreases, these bars migrate onshore covering the foreshore zone (Casamayor et al., 2015).

The Canary Islands have a semidiurnal tidal regime with mean spring and neap tide ranges of 2.8 and 0.4 m, respectively (Puertos del Estado, 2019). San Felipe is exposed to northern waves with a deep water average significant wave height ( $H_s$ ) of 1.6 m and peak period ( $T_p$ ) of 9.7 s. However, wave characteristics vary throughout the year, showing a clear seasonal pattern. During the summer (May – October), waves come mainly from N (49%) and NNE (33%), with a mean  $H_s$  of 1.5 m and mean  $T_p$  of 8.6 s, whereas in winter (November – April), dominant di-rections are from the N (36%) and NNW (31%) with a mean  $H_s$  of 1.7 m and mean  $T_p$  of 10.9 s (Puertos del Estado, 2018).

## 4.4. Data and methods

### 4.4.1. Morphological data

#### 4.4.1.1. Field measurements

Eighteen topographic surveys were conducted using an electronic total station (Leica TCR 307) from October 2013 to March 2015. Both the temporal distribution and the spatial extension of each survey, especially of the subtidal zone, are highly heterogeneous since they depend fundamentally on wave and tide conditions. The temporal sequence in each survey was also strongly determined by the occurrence of storm events. The elapsed time between consecutive surveys varies from 7 days in winter when the frequency of forecast storm events was higher to 60 days in summer when wave conditions are steadier (Table 4.1).

Topographic surveys were conducted at low tide and were performed in spring tides to measure the maximum possible surface of the subtidal zone (Table 4.1).

*Table 4.1. Survey characteristics and mean wave climate data between consecutive surveys. Survey characteristics include the date when the survey was conducted, days interval between surveys, the elevation of the most seaward measured point in the subtidal zone (minimum elevation measured) and the low tide height on the survey day (low tide height). Wave climate descriptors include mean significant wave height ( $H_s$ ), mean peak period ( $T_p$ ) and mean wave direction (Dir) for each interval computed in the central (C) offshore node (refer to Figure 4.1c).*

<b>Id interval</b>	<b>Dates</b>	<b>Interval (days)</b>	<b>Minimum elevation measured (m)</b>	<b>Low tide height (m)</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>Dir (°)</b>
-	Oct 21, 2013	-	-1.53	-0.89	-	-	-
1	Oct 30, 2013	9	-1.20	-0.58	1.4	12.7	353.9
2	Dec 05, 2013	36	-2.14	-1.04	1.6	11.2	9.9
3	Dec 19, 2013	14	-1.89	-0.97	1.3	14.3	358.0
4	Jan 14, 2014	26	-2.05	-0.85	1.9	14.6	356.3
5	Jan 21, 2014	7	-1.91	-0.84	2.2	13.4	359.3
6	Jan 28, 2014	7	-1.87	-0.83	2.5	10.4	14.2
7	Feb 21, 2014	24	-2.56	-0.72	2.2	13.8	0.8
8	Mar 19, 2014	26	-2.46	-1.03	1.8	11.8	9.7
9	Apr 08, 2014	20	-1.73	-0.35	1.8	11.0	4.6
10	May 14, 2014	36	-1.89	-0.97	1.4	9.9	8.8
11	Jun 17, 2014	34	-2.02	-0.91	1.5	9.1	12.9
12	Jul 28, 2014	41	-2.03	-0.89	1.3	7.5	16.5
13	Sep 26, 2014	60	-1.98	-0.89	1.2	9.3	8.3
14	Nov 11, 2014	46	-1.69	-0.64	1.4	12.3	2.4
15	Dec 19, 2014	38	-2.62	-0.85	2.1	12.6	0.6
16	Feb 06, 2015	49	-2.72	-1.01	1.7	12.5	12.2
17	Mar 22, 2015	44	-2.62	-1.17	1.9	11.2	10.2

#### 4.4.1.2. Volume change and morphometric parameters

Digital elevation models (DEMs) for each survey were constructed using kriging interpolation method. These DEMs have 0.1 m spatial resolution and an average root-mean-square error (RMSE) of 0.007 m. All DEMs covered part of the subtidal zone, since topographic data were measured further seaward than the low tide mark (Table 4.1). The quantification of volume changes was obtained from the comparison of each survey relative to the previous one. In order to compute the sedimentary budget all DEM dimensions should be the same, therefore the most restrictive lower limit was chosen (survey of 6th February 2015).

The study area is characterized by a strong seasonal pattern, such that in summer time the pebbles and cobbles of the lower part of the beach face becomes covered by sand, whereas the upper part and the backshore are formed by pebbles and cobbles all year round (Casamayor et al., 2015). In order to obtain the volume changes in each of these two sections, it was necessary to divide the beach profile into an upper and a lower part. The limit between these two subsystems must be fixed to obtain the volume variability over time (Figure 4.2). This limit between the upper and lower parts was established by comparison of summer and winter DEMs where the sedimentary budget was equal to zero, separating the upper from the lower parts of the beach where one of them shows erosion.

Three different time intervals were considered to compute the sediment budget between the largest recorded erosive/accumulative events: (i) DEMs of difference between 21st October 2013 and 14th January 2014; (ii) DEMs of difference between 14th January and 26th September 2014; and DEMs of difference between 26th September 2014 and 6th February 2015.

Twelve profiles with 20 m spatial separation were extracted from the different DEMs and used to measure beach face slope, beach width and coastline orientation (Figure 4.1d). The width of the beach is defined as the distance between the head of each profile and the mean sea level (MSL) at Las Palmas Port. The beach face slope ( $\tan \beta$ ) was also calculated considering the distance between the crest of the storm berm and the mean low water spring (MLWS = - 1.14 m), and the elevation difference between both points

(Figure 4.2). The coastline orientation was obtained from the angle of the contour of 0 m elevation which matches the MSL respect to north.

#### 4.4.2. Wave propagation

The third-generation spectral wave model SWAN (Booij et al., 1999), packaged within Delft3D in the WAVE module, was used to transform waves from offshore to inshore. SWAN was set up using three rectangular grids with different grid cell size decreasing toward the coast (grid resolution of 300 m, 100 m and 30 m respectively). High-resolution bathymetry was created by combining bathymetric data with a summer profile. The bathymetric data were obtained using a multibeam echosounder within the framework of an echo-cartographic project run by the Spanish Government (Ministerio de Medio Ambiente, 2008) and the summer profile with the topographic data of 26th September 2014. SWAN was run with default parameters. Four dissipation mechanisms were considered: refraction, bottom friction (with JONSWAP friction coefficient of 0.067  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ), whitecapping (Komen et al., 1984) and depth-induced breaking (with ratio of maximum individual wave height over depth equal to 0.7). In addition, non-linear wave-wave interactions were considered (TRIADS mechanism).

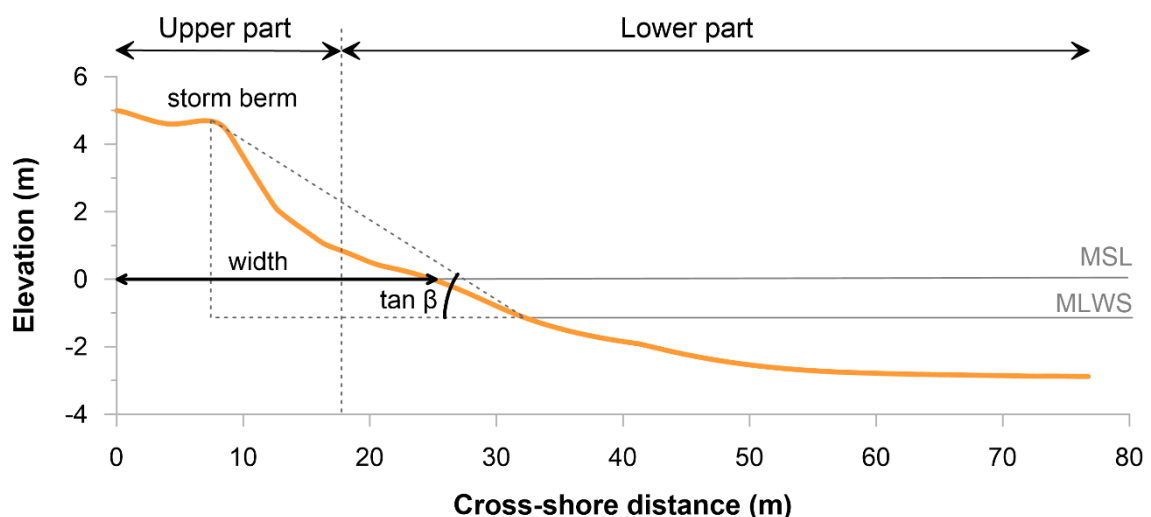


Figure 4.2. Schematic representation of beach face slope ( $\tan \beta$ ) and width calculations. Two subsystems (upper and lower part of the beach) used for a detail study. MSL: mean sea level in Las Palmas Port; MLWS: mean low water spring. This beach profile corresponds to profile 6 (centre of the beach) and was obtained from the DEM of 6th February 2015.

Time series of waves and water levels were used as model forcing. Hourly bulk parameters of wave characteristics ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $Dir$ , and directional spread) were obtained from three Iberia-Biscay-Irish (IBI) nodes (Figure 4.1c) that come from a multi-year and high-resolution wave reanalysis model provided by the Copernicus Marine Service (Copernicus Marine Service, 2020). IBI nodes were linearly interpolated at intervals to the outer grid wave model boundaries. Water levels were acquired from the tide gauge the Spanish Ports Authority located in Las Palmas Port (Figure 4.1b).

Due to the lack of in-situ measurements within the domain, wave model simulations were compared against SIMAR node 4035011 of the Spanish Ports Authority located in the intermediate grid (100 m resolution) (Figure 4.1c).

#### 4.4.3. Hydrodynamic parameters

San Felipe Beach has a concave shape. Three offshore (green triangles in Figure 4.1c) and three inshore nodes (blue dots in Figure 4.1c) were analysed. The central inshore node (C) was located in front of the central profiles of the study area (profiles 6 – 7 in Figure 4.1d) at 8 m water depth. The eastern and western ones (E and W) were placed 120 m apart from the central node and at the same depth. Therefore, these three nodes cover the entire beach area. The three offshore nodes were chosen along the 40 m bathymetric contour all of them aligned to the corresponding IBI node (refer to Figure 4.1c).

Several wave-related parameters were obtained from SWAN in the inshore nodes: significant wave height, peak period, mean wave direction, wavelength, steepness, wave energy and wave power. Wave power was computed using the Herbich (2000) equation:

$$P = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_e \quad (4.1)$$

where  $\rho$  is water density,  $g$  is gravity and  $T_e$  is the energy period (it is assumed that  $T_e \approx 0.90T_p$ ) (Gonçalves et al., 2014).

It is unknown if morphological changes experienced by the beach are due to specific events or to the cumulative effects of the wave climate. Therefore, following Stokes et al.

(2016) and Valiente et al. (2019), the cumulative integral of wave energy ( $E_{cum}$ ) and wave power ( $P_{cum}$ ) were also calculated:

$$E_{cum} = \int_{t_0}^{t_n} (E - \bar{E}) dt \quad (4.2)$$

$$P_{cum} = \int_{t_0}^{t_n} (P - \bar{P}) dt \quad (4.3)$$

where  $E$  and  $P$  correspond to hourly values of wave energy and power, respectively, at the inshore node and  $\bar{E}$  and  $\bar{P}$  are the long-term mean conditions for each variable.

#### 4.4.4. Morphodynamic parameters

The morphodynamic parameters relate morphological characteristics with wave climate. In general, the most widely used morphological variable is the beach slope, while in oceanographic variables it is wave height and period. However, some of the parameters use sedimentological variables instead of morphological ones.

One of the most relevant morphodynamic parameters in gravel beaches is the run-up. Several studies relate this parameter with onshore sediment transport and berm formation (Van Wellen et al., 2000; Horn and Li, 2006; Pedrozo-Acuña et al., 2006). There are different expressions for wave run-up, being those of Nielsen and Hanslow (1991) and Stockdon et al. (2006) the most used (López-Ruiz et al., 2020). This work calculated the 2% exceedance run-up using two equations. The first one was developed for a wide range of conditions on natural beaches (Stockdon et al., 2006):

$$R_s = 1.1 \left( 0.35 \tan \beta (H_s L)^{1/2} + \frac{[H_s L (0.563 \tan \beta^2) + 0.004]^{1/2}}{2} \right) \quad (4.4)$$

where  $\tan \beta$  is beach face slope,  $H_s$  is significant wave height and  $L$  is wavelength.

The second equation used comes from Poate et al. (2016):

$$R_p = 0.33 \tan \beta^{0.5} T_p H_s \quad (4.5)$$

where  $\tan \beta$  is beach face slope,  $T_p$  is peak period and  $H_s$  is significant wave height. This equation is a more adequate fit for gravel beaches since it is based on data collected under

energetic conditions ( $H_s = 1 - 8$  m) in beaches with different grain size, ranging from gravel to pebble. Due to the importance of run-up on the morphodynamic processes on single beaches, not only two different equations have been tested, but also two different sources of wave data (from inshore and offshore nodes).

Other morphodynamic parameters such as the Iribarren number, the surf scaling parameter and Dean's parameter were calculated in order to obtain more information about the hydrodynamic processes that take place in the swash zone of mixed beaches.

The Iribarren number ( $\xi_b$ ) refers to the break point (Battjes, 1974):

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{(H_b/L_0)}} \quad (4.6)$$

where  $\tan \beta$  is beach face slope,  $H_b$  is breaking wave height obtained after Komar and Gaughan (1972) and  $L_0$  is wave length in deep waters.

The surf scaling parameter ( $\varepsilon$ ) was defined by Wright and Short (1984) to classify the morphodynamic state of the surf zone:

$$\varepsilon = \frac{4\pi^2 H_b}{g T_p^2 \tan^2 \beta} \quad (4.7)$$

where  $H_b$  is breaking wave height,  $g$  is gravity,  $T_p$  is wave peak period and  $\tan \beta$  is beach face slope.

Dean's parameter ( $\Omega$ ) was used to relate wave and sediment characteristics (Dean, 1973):

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T_p} \quad (4.8)$$

where  $H_b$  is breaking wave height,  $T_p$  is wave peak period and  $\omega_s$  is the grain-size dependent sediment fall velocity derived from the Soulsby equation (Soulsby, 1997). Since the grain size distribution of the study beach is bimodal,  $\omega_s$  was computed using two different sediment grain sizes: 0.23 mm for sand and 59.90 mm for coarse-grain particles.

#### 4.4.5. Statistical analysis

In order to establish correlations between hydrodynamic and morphological parameters, the correlation coefficient and p-value were calculated to determine which of the correlations were statistically significant. These correlations were performed using both the mean and maximum values of each wave related variable. Correlations between morphodynamic parameters and morphological variables were also obtained.

### 4.5. Results

#### 4.5.1. Wave model validation

Wave model Delft3D simulations were compared against SIMAR data due to the lack of in-situ measurements within the domain. SIMAR data consist of a time-series of wave and wind parameters provided by the Spanish Ports Authority. SIMAR wave data are generated using Wave-Watch III numerical model, which includes refraction and shoaling effects; however, sea bottom effects can be considered negligible due to the model resolution (Puertos del Estado, 2020).

$H_s$  and  $T_p$  are well predicted (Figure 4.3), showing biases of -0.05 m and 0.36 s, respectively. The root-mean-square error (RMSE) of  $H_s$  (0.27 m) and  $T_p$  (1.92 s) show a good prediction of data. These differences between both models are mainly due to the shoaling effect which is included in Delft3D model simulations but it is not well resolved in SIMAR. Overall, the model performance is considered good at predicting wave conditions.

#### 4.5.2. Wave climate

The values obtained in the three inshore nodes are very similar, although there is a small decrease in the significant wave height from west to east. Propagated wave climate data of these nodes shows a clear seasonal pattern during the study period, and they can be mainly divided into two seasons: a summer period and a winter period. Limits between these periods are not fixed since they depend on the natural variability of the wave climate. The study period covers only one entire winter (from November 2013 to April



2014) and one summer (from May 2014 to October 2014) during the seventeen months of this study. However, as it is shown in the time-series, there is a clear seasonal pattern in wave energy ( $E$ ), power ( $P$ ) and wave peak period ( $T_p$ ), while significant wave height ( $H_s$ ) and breaking wave height ( $H_b$ ) present a less pronounced seasonal behaviour (Figure 4.4).

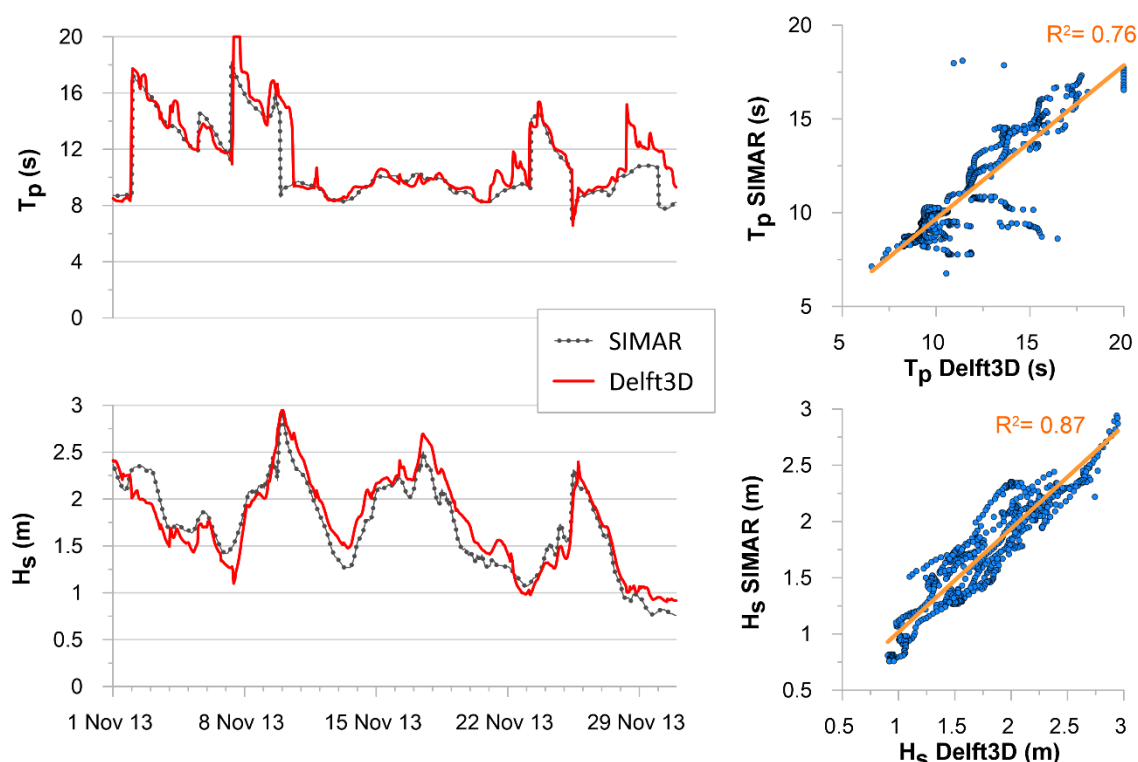


Figure 4.3. Validation of the hourly wave data (significant wave height,  $H_s$ , and peak period,  $T_p$ ) from 1st November to 31st November 2013. Data comparison was performed between SIMAR data and Delft3D-WAVE data corresponding to the closest node of the intermediate grid (Figure 4.1c).

Mean wave direction is the parameter that shows the greatest differences between the three analysed inshore nodes (Figure 4.5). In general waves are mainly from N, although the proportion of other directions varies depend on the location of the node and the season. Regarding the only whole winter in the western node waves comes from the NNE (66%), the N (32%) and the NNW (2%) with a mean  $H_s$  of 1.6 m and a mean  $T_p$  of 12.5 s. In the

central and eastern nodes most waves come from the N (92% and 99%, respectively) with a  $T_p$  very similar to the western node. However, wave height increases eastward, being  $H_s = 1.7$  m for the central node and  $H_s = 1.8$  m for the eastern one. In summer  $H_s$  is lower at all nodes, slightly increasing from west to east (ranging from 1.15 m to 1.22 m).  $T_p$  is also significantly lower, which indicates that during summer wind waves predominate (average  $T_p$  of 9.5 s). Wave direction also varies depending on the location of the node: in the western node the proportion of waves from the NNE increases compared to winter (66%). Likewise, in the central and eastern node N waves are dominant (77% and 98%, respectively).

In summary, despite the significant differences in  $H_s$  and  $T_p$  between both seasons, it is worthy to note that in both cases there is a slight change in  $H_s$  and direction between the different nodes, which are only 240 m apart from the western to the eastern one. The western node presents waves from the NNE while the eastern one presents wave from the N and slightly higher. Such changes in only 240 m are mostly attributed to the wave refraction induced by the dominant headland located westward of the study area (Figure 4.1c).

Shown seasonal pattern is coherent with long-term evolution of  $H_s$ , since the average IBI values in winter are always higher than those in summer. Likewise, it can also be observed that the two winters of the study period correspond to the second (2.03 m) and third (1.98 m) highest average values since 1993 (Figure 4.6).

#### 4.5.3. Morphological response

Two morphologic features are identified in San Felipe Beach: cusps and berms. Eight of the analysed DEMs show cusps on the beach. Most of them are found in winter, except for 14th May 2014 when 5 cusps can be identified along the beach. Since these features mostly take place during winter, the horns and bays are made up of pebbles and cobbles, although some sand can also be found in the bays. The distance between horns varies from 12 to 18 m, with an average value of 15 m. The cusps are mostly located along the central part of the study area, between 0 and 1.5 m elevations in the swash zone (Figure 4.7c) and their location changes even between consecutive surveys.

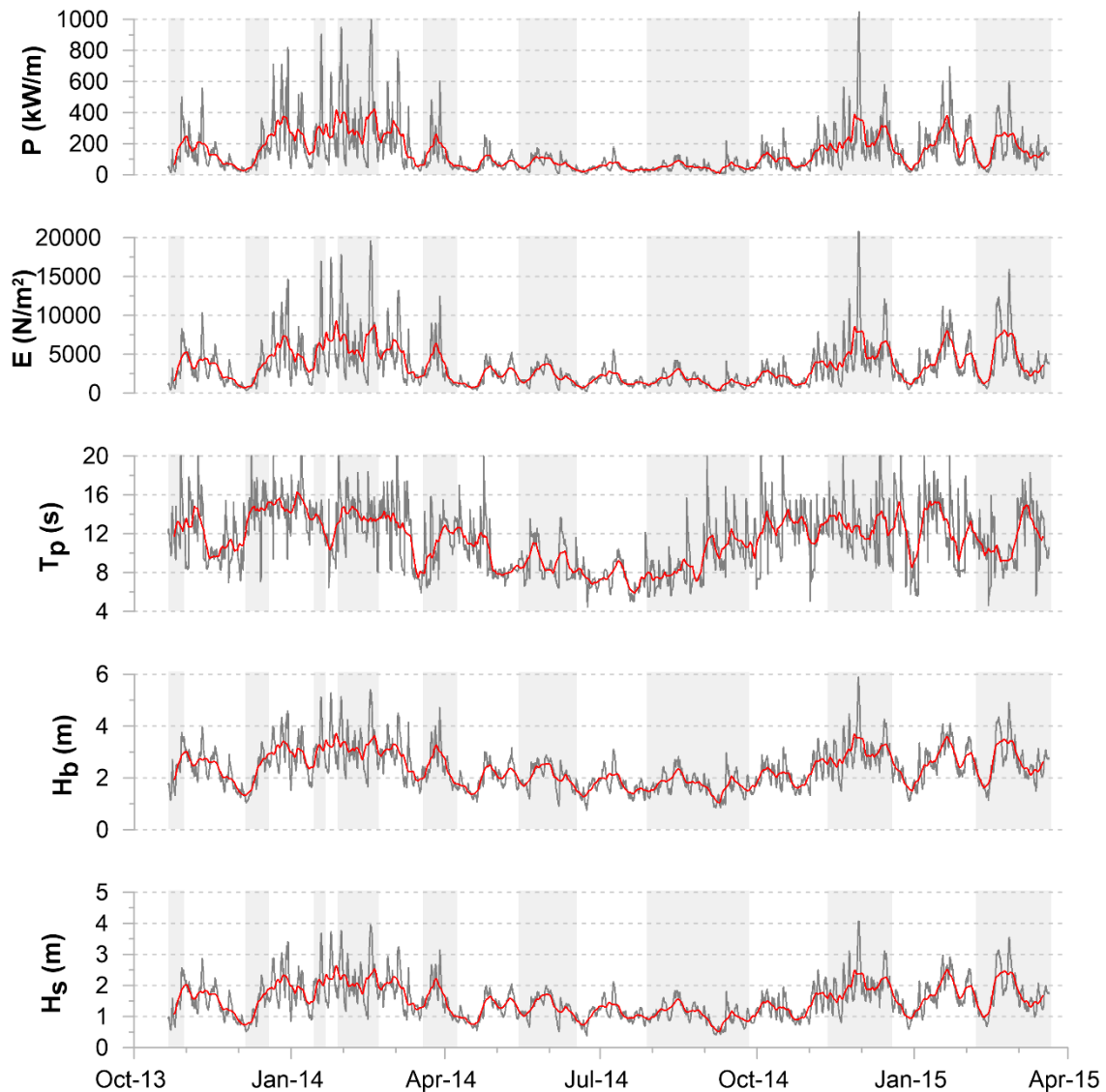


Figure 4.4. Time-series of wave data corresponding to the central inshore node (C blue dot in Figure 4.1c) during the study period. Red line is the running average with a window of 7 days. The grey vertical bars represent the time interval between surveys.

Berms are located in the upper part of the beach face and their elevation depends on tidal and wave conditions. In winter, the berms are found in a higher position than in summer, although two exceptions could be identified during the study period: (i) berm elevation value is higher than the average value in summer on 14th May 2014; and (ii) average elevation is low for winter on 6th February 2015. There is no clear pattern between berm

length and the number of berms on the beach. Nevertheless, in winter, there is usually one single berm along the beach, which is sometimes not continuous and it can be divided into several segments. Different berms are found at different elevations in summer (Figure 4.7b), with the remains of the winter berm located landwards.

Volumetric changes in San Felipe Beach show a marked seasonality. As expected, much higher volumes are observed in summer when comparing to those in winter. The most abrupt changes took place at the beginning of the two winters measured during this study. These changes correspond to the erosion of the sand in the intertidal and subtidal zones that is transported offshore ( $-13,672 \text{ m}^3$  the first winter and  $-8,415 \text{ m}^3$  the second one) (Figure 4.8). As the beach has no longer large volumes of sand available, the beach experiences small gains and losses of sediment during the rest of the winter period. The beach gradually accumulates sediment from May until it reaches its maximum in September. In the following months, the beach slowly erodes until a major event takes place again, eroding all the sand from the beach. When comparing the volumetric changes with the initial survey (21st October 2013), the beach after winter 2013/2014 does not completely recover and maximum volumes of sediment in the entire beach are 45% below the initial value (Figure 4.8).

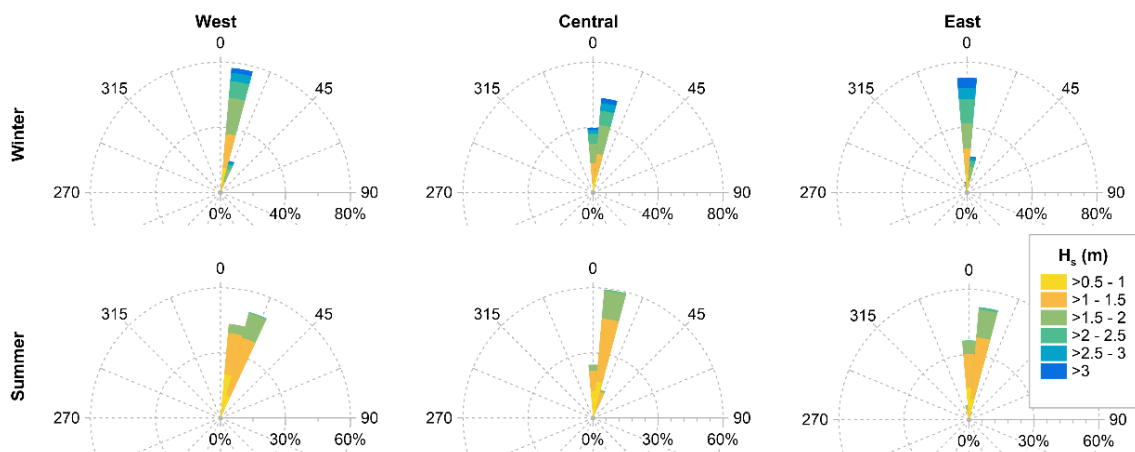


Figure 4.5. Wave roses of significant wave height ( $H_s$ ) at the three inshore nodes (blue dots in Figure 4.1c). Upper row wave roses correspond to winter 2013/2014 (Nov 2013 to Apr 2014) and lower row wave roses represent summer 2014 (May 2014 to Oct 2014).

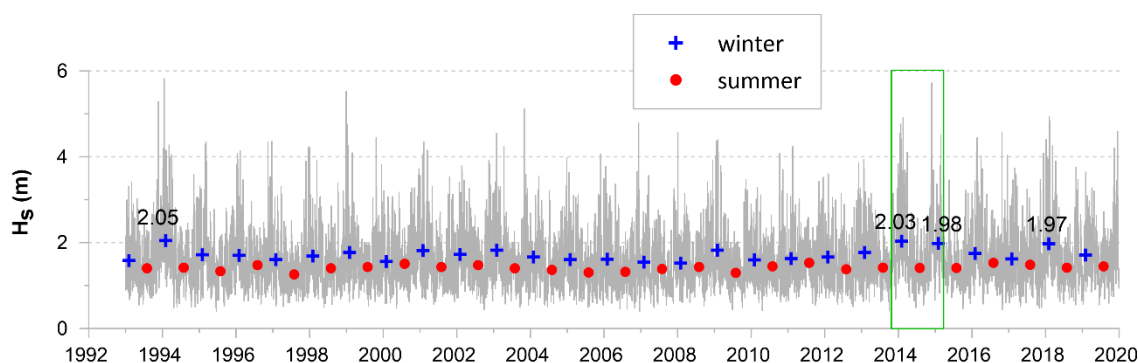


Figure 4.6. Long-term series of hourly significant wave height data on the central IBI node (C red square in Figure 4.1c). Green rectangle corresponds to the study period. Shown values correspond to the four largest average winters.

Regarding the upper and lower parts of the beach, it can be observed how volume changes follow opposite patterns in the two parts of the beach. During the winter months, the lower zone erodes and the sand is transported offshore. On the other hand, the upper zone accumulates sediment, indicating that pebbles and cobbles are transported upwards by waves. This onshore movement contributes to build up the winter berm. The opposite pattern happens in summer, with sand migrating onshore in May and reaching its maximum around September. During this period, part of the coarse-grain sediment from the upper part of the beach is steadily moved downslope, showing a net erosion along this sector. The volume changes in the upper zone are much smaller than those measured in the lower zone. Nevertheless, the correlation between the two volume evolution changes is statistically significant ( $p\text{-value} = 0.002$  and  $r = -0.69$ ) showing that when the upper zone accumulates sediment the lower area of the shoreface undergoes erosion (Figure 4.8). This opposite response of the two parts of the beach to similar forcing conditions highlights the need to divide the beach into two parts that are coupled: the upper zone which is fully covered by pebbles and cobbles all year round, and the lower one where sand accumulates in summer.

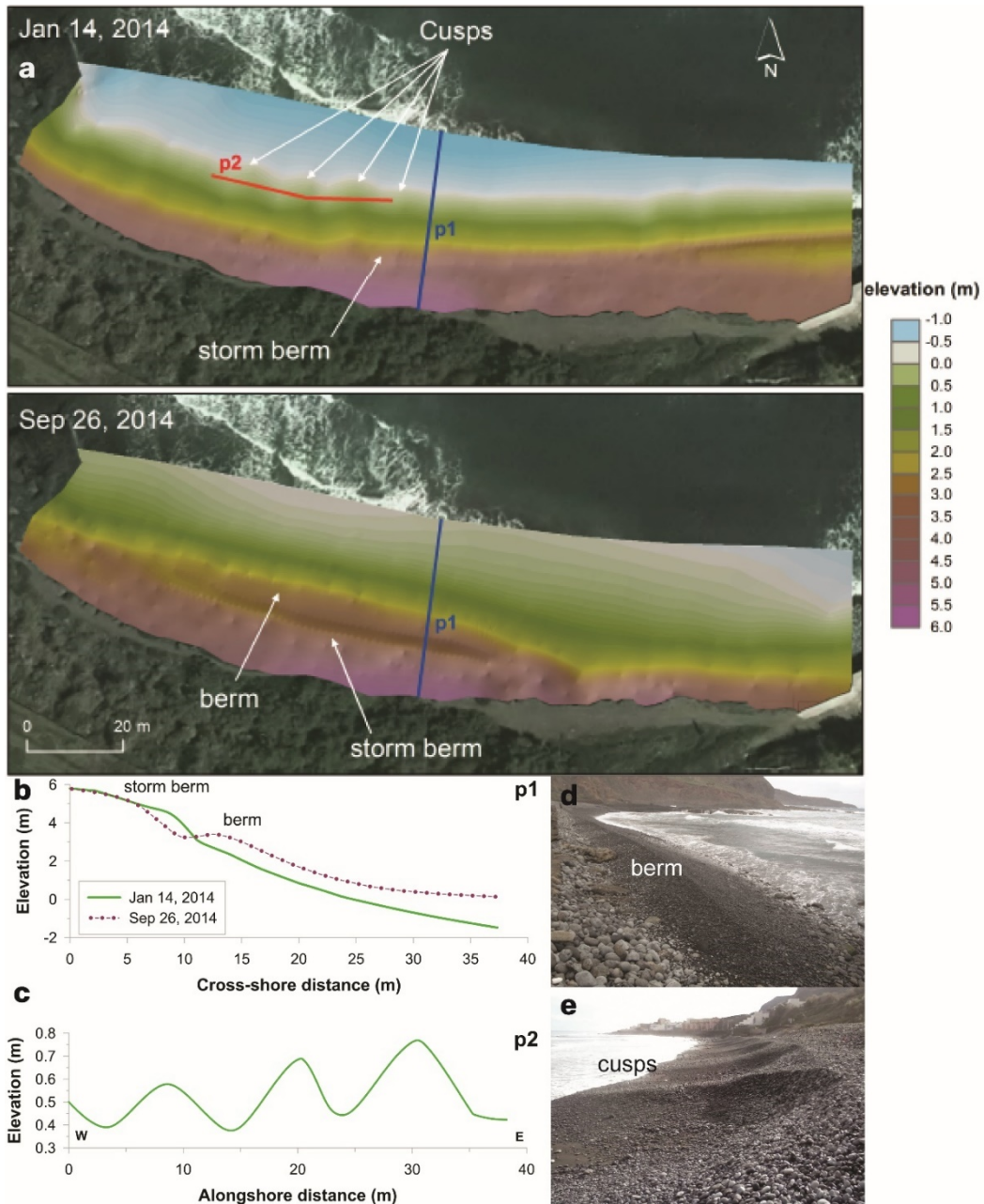


Figure 4.7. a) DEMs corresponding to a winter state (14th January 2014) and a summer state (26th September 2014), showing the presence of cusps and berms. b) Profile p1 shows the storm berm built in winter and the berm. c) Alongshore transect p2 from W-E with cusps bays and horns. d) and e) Photographic examples of berms and cusps on San Felipe Beach.

The rest of the morphological variables also show a strong seasonal variability (Figure 4.10). The beach face slope during winter increases with an average value of  $\tan \beta = 0.147$ , while in summer, due to the onshore migration of the sand bar that covers the lower

part of the foreshore, the slope decreases with a mean  $\tan \beta = 0.072$ . The width of the beach varies by almost a factor of 2 from one season to another, with the minimum value of 21.8 m recorded on 21st January 2014, and the maximum of 45.2 m on 21st October 2013. Finally, the variation in coastline orientation is small ( $8.61^\circ$ ), although it also presents a seasonal pattern: in summer the dominant direction of the coastline is WNW-ESE, while in winter it rotates to W-E.

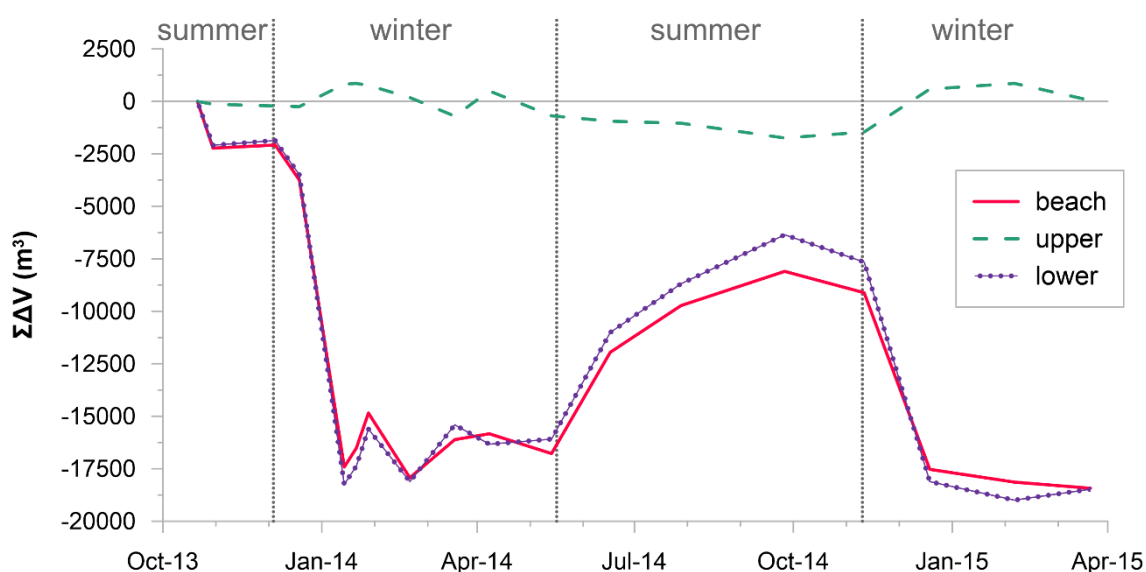


Figure 4.8. Cumulative volume changes ( $\Sigma\Delta V$ ) during the study period for the whole beach and the upper and lower zones.

Both the beach face width and the coastline orientation have an opposite behaviour to the beach slope: in the winter period they decrease and in summer increase. This is reflected in the statistically significant correlation (p-value < 0.01) between slope and width ( $r = -0.88$ ), slope and coastline orientation ( $r = -0.89$ ) and width and coastline orientation ( $r = 0.84$ ) (Figure 4.10). These morphological variables also show a good correlation with volumetric changes. Cumulative net volume of the beach has a statistically significant correlation (p-value < 0.01) with slope ( $r = -0.95$ ), width ( $r = 0.95$ ) and coastline orientation ( $r = 0.85$ ). All correlations are positive except for slope, the steeper the beach is, the more erosion it experiences. Regarding the division of the beach, the correlation coefficients between the volumetric change of the lower part of the beach and the rest of

the morphological parameters are very similar to those with respect to the volumetric change of the entire beach. However, the upper part of the beach only presents a weak correlation with slope ( $r = 0.70$ ) and does not have a statistically significant correlation with the rest of the morphological variables ( $p\text{-value} > 0.01$ ) (Figure 4.10).

#### 4.5.4. Morphodynamic behaviour

Wave data from the offshore nodes (green triangles in Figure 4.1c) were used to compute several morphodynamic parameters: Run-up with two different equations ( $R_P$  and  $R_S$ ), Iribarren number ( $\xi_b$ ), surf scaling parameter ( $\varepsilon$ ) and Dean's parameter with two different grain-size ( $\Omega_{sand}$  and  $\Omega_{pebble}$ ). After some sensitivity analysis, it is noted that differences between the three nodes (W, C, E) are very small and can be considered insignificant.

According to the classification of beaches based on the surf scaling parameter ( $\varepsilon$ ), San Felipe Beach could be reflective, intermediate or dissipative. However, this morphodynamic parameter also presents a certain seasonal pattern. The average values for the different survey periods show that the beach mostly behaves as intermediate (average  $\varepsilon$  of 10.72 for the study period). It should be noted that there are three periods in which a dissipative character dominates (intervals 1, 2 and 13, all corresponding to summer situations) and three with a reflective character (intervals 4, 5 and 16, all corresponding to winter periods) (Figure 4.11).

Dean's parameter ( $\Omega$ ) presents two different ranges depending on whether  $\omega_s$  was computed from the median sand values ( $D_{50} = 0.23$  mm) or from the pebbles/cobbles mode ( $D_{50} = 59.90$  mm). In both cases, the temporal evolution is the same but in a different range, since  $D_{50}$ , used to calculate the settling velocity of grains, remains constant throughout the study period. When  $D_{50}$  corresponds to pebble grain size, Dean's parameter has values between 0.07 and 0.48, all of them associated to a reflective beach. On the other hand, when  $D_{50}$  reflects the sand fraction, the variation is much greater, from 2.44 to 17.98, and the beach state changes from intermediate to dissipative, with the latter being the dominant one (Figure 4.11).



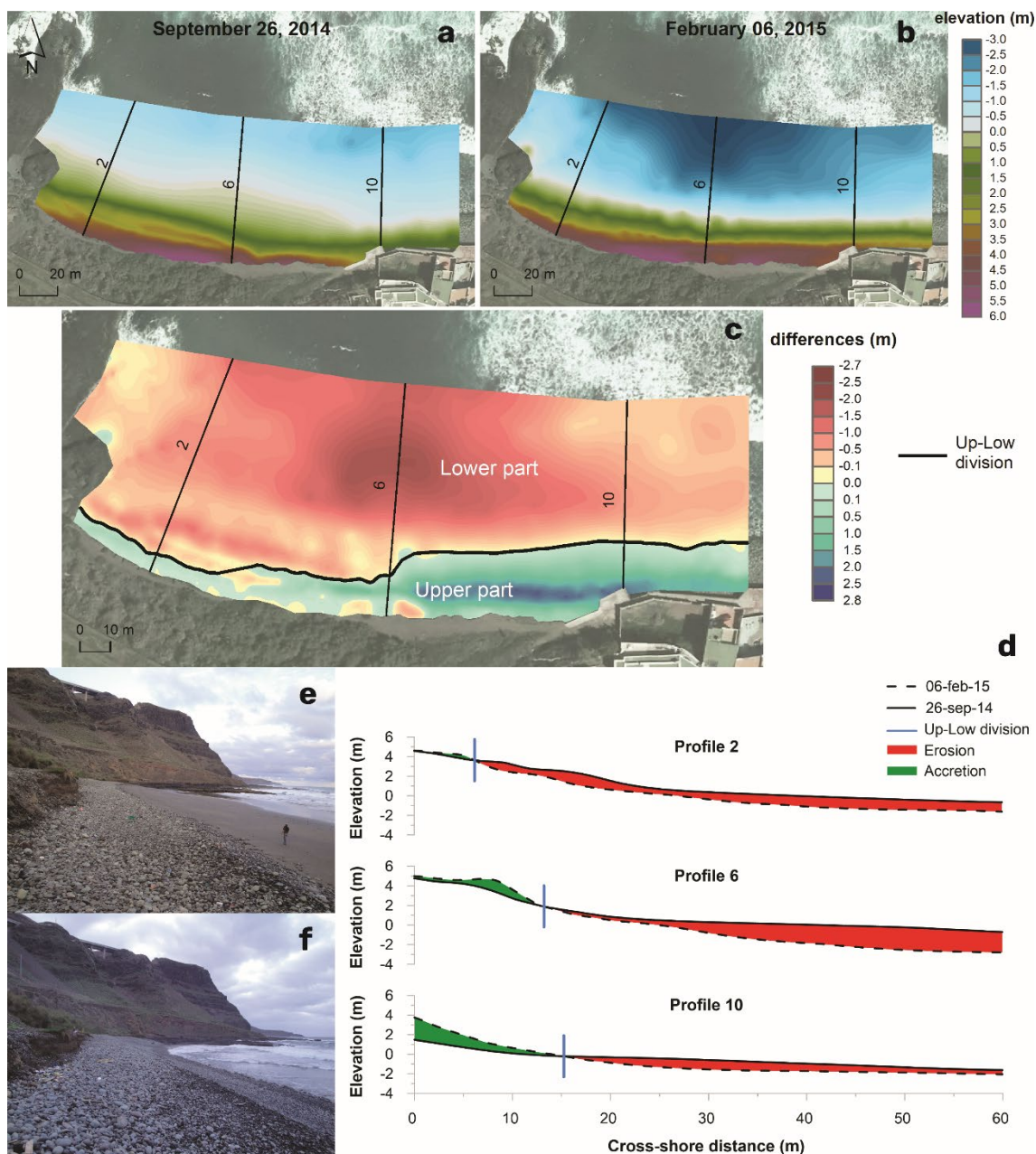


Figure 4.9. a) Summer DEM (26th September 2014) with the location of three profiles (Figure 4.1d). b) Winter DEM (6th February 2015). c) Sediment budget between both DEMs. d) Profile comparison between summer (26th September 2014) and winter (6th February 2015) DEMs. e) Low tide summer photograph (26th September 2014), with lots of sand in the lower foreshore. f) Winter profile at low tide with no sand in the intertidal zone (28th January 2014).

#### 4.5.5. Correlation between wave variables and morphodynamic

The result of the analysis between the morphological, morphodynamic and hydrodynamic variables shows that there are different statistically significant correlations (p-values < 0.01). In general, the best correlations are found between morphodynamic and morphological parameters. Although some of the wave climate variables show significant correlations, their correlation is weaker (Table 4.2). This analysis was conducted using the three offshore and inshore nodes. The results show that correlations coefficients are very similar between the different inshore and offshore nodes, showing a maximum standard deviation of 0.012 and 0.026, respectively. For this reason, only results for the central inshore and offshore nodes are developed below.

Correlations between the cumulative volumetric changes of the entire beach and the wave variables are poor, and the only statistically significant correlation is with the significant wave height (Table 4.2). When the wave height increases the beach erodes, while conversely, when the wave height decreases the beach accumulates sediment. However, when considering the upper and lower parts of the beach, the behaviour is different. The volumetric changes of the upper and the lower parts show opposite correlations with wave height, wave energy and wave power. In other words, when  $H_s$ ,  $E$  or  $P$  increase, the upper part accumulates sediment while the lower part erodes (Table 4.2).

It should also be noted that  $E_{cum}$  and  $P_{cum}$  only show statistically significant correlation coefficients with volumetric changes in the upper part and beach face slope. These are quite similar to those obtained with  $E$  and  $P$ , but slightly better in the case of volumetric changes and slightly poorer for  $\tan \beta$ .  $E_{cum}$  also shows correlation with volumetric changes in the lower part, although it is weaker ( $r = -0.63$ ).

There is a positive correlation between beach face slope and some of the wave climate variables such as wave height (both significant and breaking), wave energy and wave power. This relation is bidirectional, therefore, when any of these variables increase, the beach slope also increases and vice versa (Table 4.2).

Beach width does not have a statistically significant correlation with any of the wave climate variables, while the coastline orientation presents a negative correlation with most

of them (Table 4.2). When wave height and energy are greater, the coastline angle is smaller, which indicates that the beach is more parallel to the W-E axis, whereas when the wave height and energy decreases, the coastline slightly rotates to a WNW-ESE direction.

The wave run-up correlates well with all the morphological variables. The run-up obtained following Stockdon's equation (Eq. 4.4) using offshore wave data shows higher correlation values with the morphological variables, except for volumetric changes in the upper part which have a slightly better fit with the run-up obtained from Poate's equation (Eq. 4.5). The  $R_p$  values are higher in winter and therefore have a better fit with the volumetric changes in the upper part of the beach that require energetic waves with high tide conditions. Both run-up computed under Stockdon's or Poate's equations shows better correlations coefficients when using offshore wave data than those from the inshore node.

Both the Iribarren number and the surf scaling parameter show statistically significant correlations with the morphological response of the beach. Dean's parameter is the morphodynamic variable with the lowest correlation coefficients (Table 4.2). Morphodynamic parameters are widely used in coastal geomorphological literature, and they relate the morphological and hydrodynamic characteristics of beaches. The good correlations obtained with the Iribarren number and the surf scaling parameter are mainly due to the fact that both parameters include the beach gradient, which presents a good correlation with the hydrodynamic variables. Regarding the weak correlation of Dean's parameter, it relates to sediment fall velocity and therefore to grain size. Composite beaches present a bimodal distribution with completely different grain size due to the presence of sand in the lower beach face and coarse-grain sediments in the upper profile. Hence, it is difficult to apply parameters that include grain size in their definition.

## 4.6. Discussion

Some authors have highlighted the importance of the timescale in field studies (e.g. Pontee et al., 2004). In gravel beaches, tides play an essential role in the control of the swash zone processes and beach profile changes, while wave conditions determine the type of morpho-logical response (Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010; Wiggins et al., 2019a, 2019b; Wiggins et al., 2020). For example, Bujan et al. (2019)

found that steep beaches could change depending on clast size and wave climate in different timescales. So, whereas sandy and pebble beaches vary on timescales of hours to days, cobble beaches do so on a seasonal or annual basis. The present medium-term study (17 months), conducted in a composite beach with sediments ranging from sand to cobbles, shows a clear seasonal pattern, although the daily timescale is also very important. This shorter timescale can be clearly observed in the strong and quick erosions detected at the beginning of the winter when significant amounts of sand are moved offshore as a consequence of the first energy events of the winter season. Both timescales (days and seasons) are clearly correlated with wave conditions.

San Felipe Beach has a marked seasonal behaviour. Several authors have reported temporal and spatial variations in mixed beaches (e.g., McLean and Kirk, 1969; Pontee et al., 2004; Miller et al., 2011; Atkinson and Esteves, 2018), although there are only a few studies where these changes are associated with seasonality (e.g., Allan et al., 2006; Curtiss et al., 2009). One of the factors that clearly determines the seasonal morphological response of San Felipe Beach is the accumulation and erosion of sand, which mostly takes place during the summer in the mid and lower foreshore. This fact determines the strong change in the beach face slope and, subsequently, the morphodynamic behaviour of the beach which, according to the values of the surf scaling parameter ( $\epsilon$ ), ranges from reflective in winter to dissipative in summer (Figure 4.11).

This study shows that the morphodynamic pattern of the beach switches from reflective to dissipative depending on the seasonal inputs/ outputs of sand in the foreshore and the redistribution of gravels in the upper profile. Mason and Coates (2001) also report seasonal variations in the sand content of mixed beaches, though they state that it is unlikely that these changes could significantly affect the morphodynamic response of the beach. They base their conclusion on the influence of the proportion of sand in the hydraulic conductivity, which in turn determines the foreshore gradient. This is valid for mixed sand and gravel beaches where both types of sediment coexist across the entire beach profile but is not applicable to composite beaches where the proportion of sand in the upper foreshore is negligible as well as the amount of gravel in the lower foreshore.

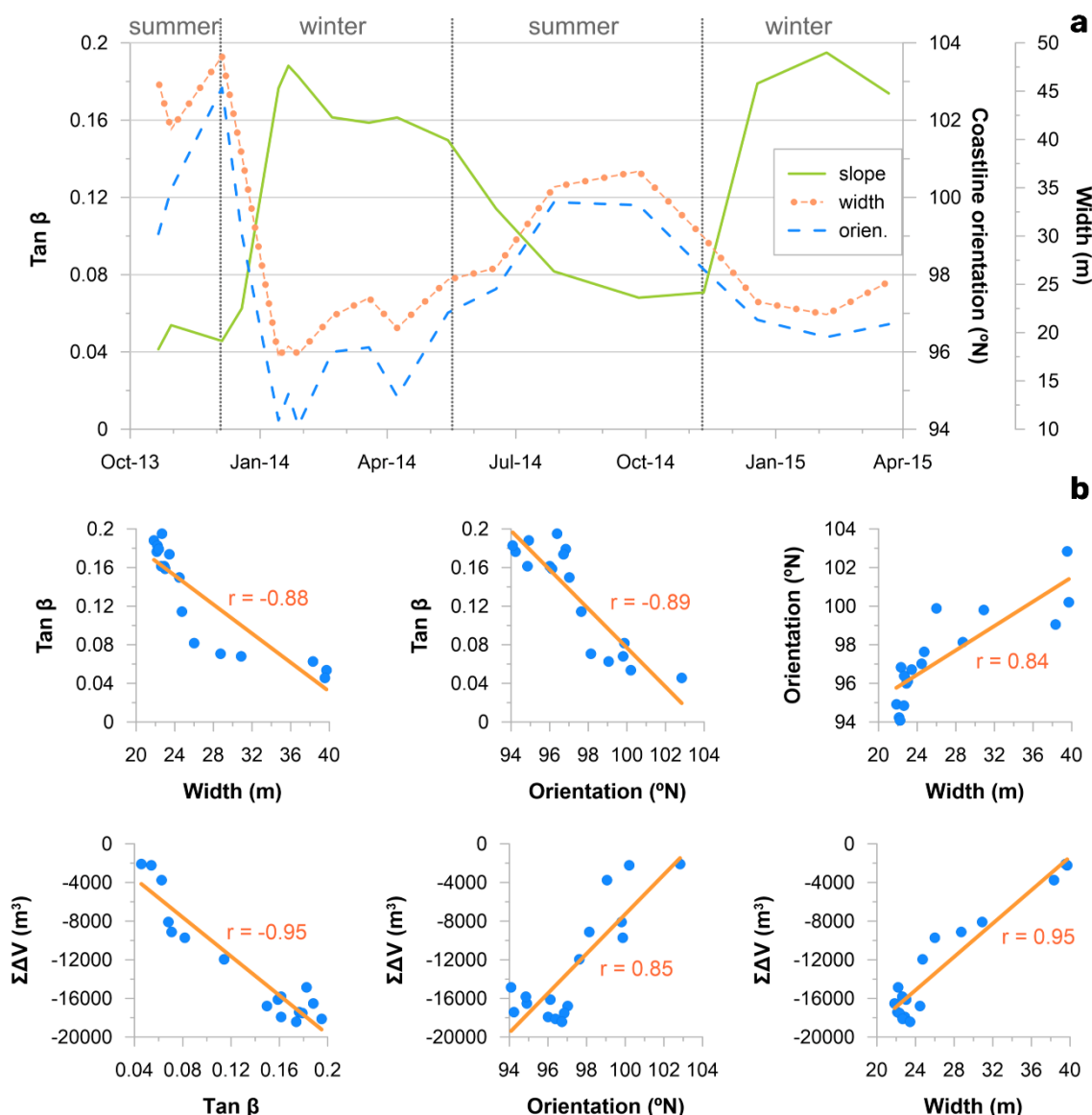


Figure 4.10. a) Evolution of morphological variables: slope ( $\tan \beta$ ), width and coastline orientation (orientation) during the study period. b) Correlation between these variables and the sediment volume.

Another important factor is the wave climate defined by Pontee et al. (2004) as one of the main factors in the profile variability of mixed beaches. In addition, Curtiss et al. (2009) found that morphologic changes depend on seasonal wave climate variations. The correlation analysis performed between significant wave height and volumetric changes shows a negative relationship: erosion with larger waves and accretion during low energy periods. However, the detailed analysis of the upper and lower part of the profile shows

that an onshore movement of coarse-grain sediments takes place with high-energy events, while the fine fraction of sediment is transported offshore.

This onshore transport is common on gravel beaches and leads to the formation of the berm (Buscombe and Masselink, 2006; Horn and Li, 2006; Pedrozo-Acuña et al., 2006; Bertoni and Sarti, 2011), whose position depends on the tidal regime (Orford and Anthony, 2013). Jennings and Shulmeister (2002) determined that the number and height of berms and storm berms shows certain variability, though no clear pattern could be established. According to Carter and Orford (1993), the run-up is the main process responsible for the onshore transport of gravel. This coincides with the results obtained in this study, since run-up is one of the parameters that best correlate with the morphological variables (Table 4.2). Conversely, some studies have reported that run-up expressions are not accurate predictors in mixed sand and gravel beaches due to the high temporal and spatial variability in the sand/gravel ratio of these systems (López-Ruiz et al., 2020).

The differences detected between the two run-up equations (Eqs. 4.4 and 4.5) used in this study are related to beach slope and therefore, the dissipative/reflective character of the beach. Although Stockdon's equation was provided for more reflective beaches, no data from gravel beaches were included in its development (Poate et al., 2016). Poate's equation arises from the need to include reflective beaches in the existent wave run-up equations, since Masselink et al. (2016) suggest that wave run-up obtained with Stockdon's equation does not present a good fit for gravel beaches of the UK under energetic conditions, since it significantly underestimates the run-up values. However, San Felipe Beach has a great seasonality and while in summer it behaves as a dissipative beach, in winter it is reflective. Therefore, correlation coefficients with Poate's equation are slightly weaker than those obtained with Stockton's equation. On the other hand, since the upper part of the beach profile has a completely reflective character throughout the year, correlation coefficients fit better with Poate's equation in intermediate and shallow waters. As with the hydrodynamic variables, both the volumetric changes of the upper part and the beach face slope have positive correlations with the run-up. In other words, the higher the run-up the greater the slope and the accumulation of sediments in the upper part (Table 4.2).

The approach followed in this study to define the limit between the upper and lower parts of the beach has not been used before. The most used division criterion in morphodynamic processes considers the vertical elevation and therefore  $\tan \beta$  derives from MLWS and the storm berm height. However, in composite beaches it is more adequate using the sediment budget to establish the limit, since the resulting zones implicitly incorporates the sediment grain-size characteristics; cobbles and pebbles that are much steadier through the year in the upper profile and the lower part where the sediment changes depending on the season (Figures 4.2 and 4.9).

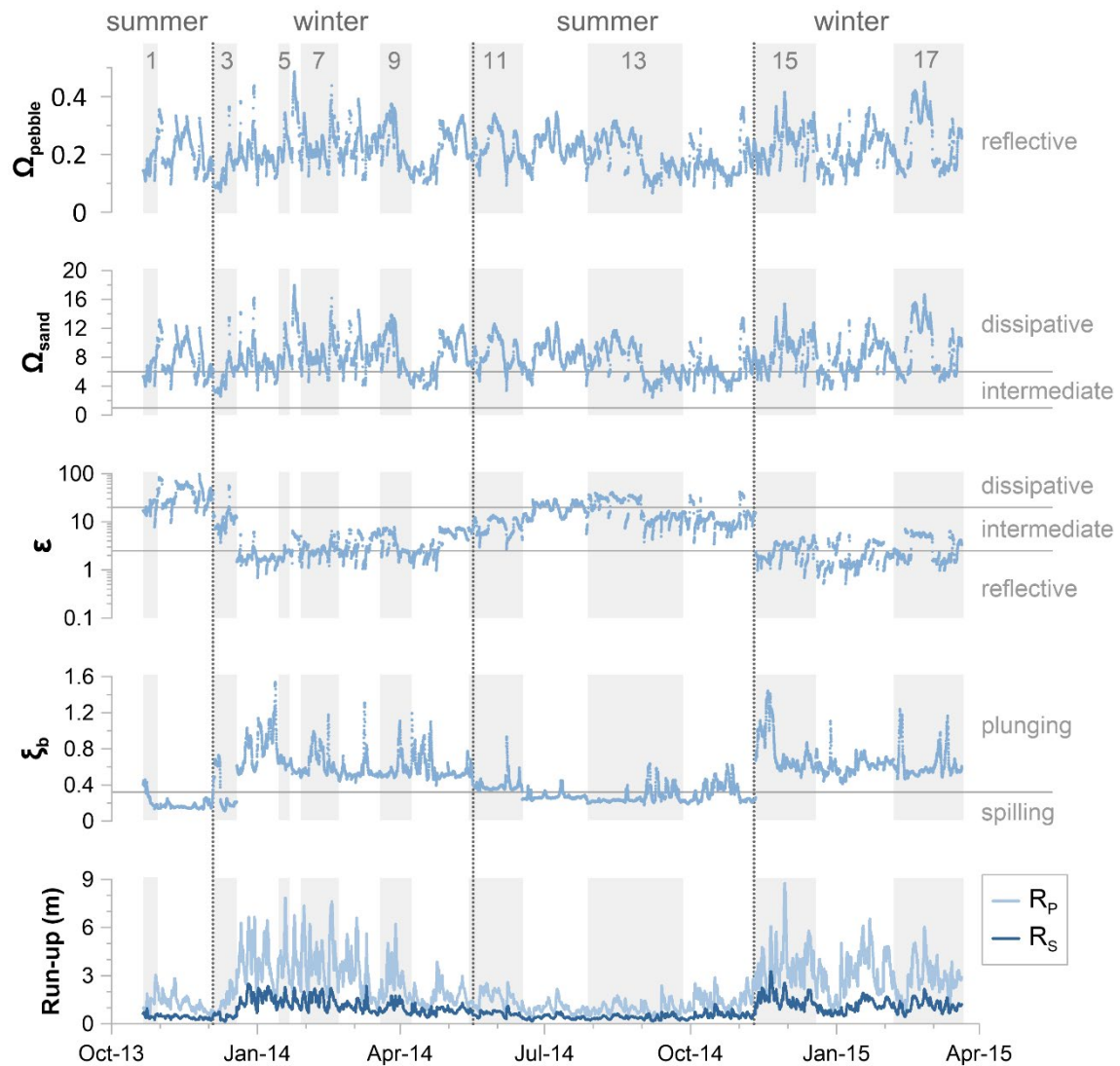


Figure 4.11. Temporal evolution of the morphodynamic parameters during the study period in the central offshore node (green triangle in Figure 4.1c).

Regarding the sedimentary balance encompassing the entire study period, the upper part of the beach can be considered in equilibrium whereas the net volume of the lower area is negative, resulting in an overall deficit of sediment over the course of the study period (Figure 4.8). The significant erosion that was found can be attributed to different factors. Firstly, the length of the study period (17 months) covers two whole winters and only one whole summer. If the following summer had been monitored, the volumetric difference between the initial and final situation would probably have been smaller. The second reason is directly related to the unusual wave heights recorded during the study period. The two winters monitored during this study were the second and third most energetic ones in the last 28 years (Figure 4.4). More specifically, the 2013/14 winter has been described by different authors as the most energetic season on the Atlantic coast of Europe in several decades (Castelle et al., 2015; Masselink et al., 2016; Flor-Blanco et al., 2021).

The Iribarren number led to the identification of two types of breaking waves that follow a strong seasonal variability for the particular case of San Felipe Beach: spilling and plunging (Figure 4.11). Plunging breakers prevail in winter while summer is characterized by spilling breakers. There is a clear relationship between this morphodynamic parameter and all the morphological variables analysed, but particularly with respect to volumetric changes in the lower beach face, and the foreshore gradient (Table 4.2). Pedrozo-Acuña et al. (2008) found that the wave impact of a plunging breaker is an important process in the morphological response of gravel beaches. In addition, Aagaard and Hughes (2010) concluded that plunging breakers generate strong vertical velocities that cause the suspension of bed sediment whereas under spilling breakers this effect is reduced. Hence, the sand erodes from the foreshore when the breaker is plunging type. This material will be gradually deposited on the beach when the breakers change again to spilling type the following summer.

Many hypotheses have been developed regarding beach cusp formation, although there are two models that are the most widely accepted: standing edge waves and the self-organisation model (Coco, 2017). There are still certain gaps in our understanding of cusps, such as cusps evolution timescales, the role played by grain size sorting or whether they are structures associated with erosive or accretion processes (Guest and Hay, 2019). Several authors have described these structures on steep beaches due to their reflective behaviour (e.g., Buscombe and Masselink, 2006; Curoy, 2012; López-Ruiz et al., 2020).



The cusps develop along the foreshore by swash flows and normally have a strong difference in sediment grain size, with the horns formed by coarse-grain sediments, while the bays contain finer materials (Buscombe and Masselink, 2006). One of the morphological structures identified in the DEMs is the presence of cusps during winter, since in summer with the sand entrance, San Felipe Beach turns into a dissipative beach, and cusps are only found in reflective and intermediate beaches (Wright and Short, 1984). In both edge wave and self-organisation theories wave period is a variable of the equations to calculate the cusp spacing (Masselink et al., 2004), which is also called cusps wave-length and is defined as the distance between two consecutive horns. According to López-Ruiz et al. (2020) the wavelength of horns is positively correlated with the wave period. In our case this relationship is difficult to evaluate, since cusps are normally present during the winter, but never during summer when sand accumulates on the foreshore.

Regarding the rotation of the coastline, few studies have described the processes behind this phenomenon on gravel and mixed beaches (Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010; Dolphin et al., 2011; Wiggins et al., 2019a, 2019b). Dolphin et al. (2011) identified a seasonal pattern in the rotation of a beach situated between two headlands. The key features were a bi-directional wave climate with sufficiently persistent episodes of each wave direction to allow longshore sediment transport to drive sediment from one end to the other. In San Felipe seasonal patterns were identified in wave height and wave period. In summer, smaller and shorter waves (Figure 4.5) favour the onshore transport of sand toward the beach. Sand accumulates all along the shoreline, but the accumulation is more intense in the western part of the beach where the lava flow is located. This sharp beach limit contributes to trap the sediments, while there is no equivalent boundary at the eastern side (see Figure 4.1d). The sandy deposit is eroded at the beginning of the winter, when higher and larger waves take place. Coastal retreat is more intense at the western part of the beach due to the larger amount of sand. Although beach rotation at San Felipe is related to the different boundary limits at the two ends of the beach, the results of this study show a negative correlation between the direction of the coastline and some of the wave climate parameters (Table 4.2). This coincides with the results of other studies which determine the strong influence of seasonal changes of wave climate on beach

rotation (e.g., Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010; Medellín and Torres-Freyermuth, 2019; Wiggins et al., 2020).

Table 4.2. Statistically significant ( $p$ -value  $< 0.01$ ) correlation coefficients ( $r$ ) of hydrodynamic variables of the central inshore node with respect to the morphological variables. Correlation between morphological and morphodynamic parameters correspond to values of the central offshore node, except for the run-up which was computed both from offshore and inshore node values (subscript off and in respectively). Empty cells and non-listed variables ( $T_p$ , wave direction, wave stepness, etc) correspond to non-statistically significant correlations ( $p$ -value  $> 0.01$ ). Gray values indicate directly related variables.

		Morphological variables					
		$\Sigma\Delta V$	$\Sigma\Delta V_{up}$	$\Sigma\Delta V_{low}$	$\tan \beta$	width	orientation
Hydrodynamic variables	$\overline{H_s}$	-0.62	0.79	-0.69	0.77		-0.71
	$\overline{H_b}$		0.81	-0.65	0.74		-0.70
	$\overline{E}$		0.77	-0.66	0.74		-0.70
	$\overline{P}$		0.76	-0.61	0.68		-0.65
	$E_{cum}$		0.81	-0.63	0.68		
	$P_{cum}$		0.79		0.64		
Morphodynamic variables	$\overline{R_{Soff}}$	-0.82	0.77	-0.87	0.90	-0.75	-0.84
	$\overline{R_{Poff}}$	-0.76	0.80	-0.82	0.87	-0.69	-0.82
	$\overline{R_{Sin}}$	-0.73	0.79	-0.78	0.83	-0.64	-0.78
	$\overline{R_{Pin}}$	-0.74	0.80	-0.79	0.85	-0.65	-0.79
	$\overline{\xi_b}$	-0.91	0.69	-0.94	0.93	-0.81	-0.87
	$\overline{\epsilon}$	0.86		0.86	-0.85	0.81	0.91
	$\overline{\Omega}$				0.64	-0.65	

Two main beach states can be identified on San Felipe Beach corresponding to the summer and winter situations. In summer, low-energy wave conditions prevail and sand

from the nearshore is transported onshore until it covers the lower and middle foreshore. This cross-shore transport produces several morphological changes: the beach width increases, the beach face slope considerably decreases and the shoreline rotates to the WNE-ESE direction. In summer the percentage of NNE waves increases significantly generating a westward alongshore transport that causes an accumulation of sand in the west due to the presence of the lava flow, which acts as an obstacle for the longshore sediment transport. Waves breaking tends to be the spilling type and the beach is mostly dissipative. In the upper foreshore run-up decreases, but it is still able to build a new berm from the pebbles and cobbles in the area. This berm is located in a lower elevation and closer to the shoreline than the storm berm. The storm berm, generated during the previous high-energy wave conditions, becomes partly dismantled due to the fall of pebbles from the berm crest, a process that is partially induced by beach users on their way to and from the coastline. Nevertheless, this storm berm is clearly recognizable, though both its length and gradient become reduced (Figure 4.12).

When the first high-energy event takes place, the sand erodes and is transported offshore, with the beach turning to its winter state. This erosion generates a coastal retreat which is more intense at the western part of the beach, and therefore the shoreline not only migrates onshore but also rotates to a W-E direction. The whole beach becomes covered by large sediments, mostly pebbles and cobbles, except for some sandy patches in the nearshore always below the MLWS. The profile is characterized by a steep slope with cusps along the beach face and a storm berm. The high gradient determines that the beach follows a reflective pattern. The high and long waves are plunging in type and the run-up reaches much higher positions, generating an onshore transport of pebbles. As a result, a storm berm becomes fully developed (Figure 4.12).

Following Jennings and Shulmeister (2002), a classification for composite beaches is suggested (Table 4.3). Although seasonal changes have also been described for other composite beaches (Allan et al., 2006), the seasonal variability described here has not been previously considered in mixed beach classifications. Jennings and Shulmeister (2002) identified daily variations on composite beaches, associated to their tidal-dependent morphodynamic behaviour: a reflective regime should dominate at high tide while a dissipative regime would prevail at low tide. However, these variations have no relation to wave climate or to seasonal variability.

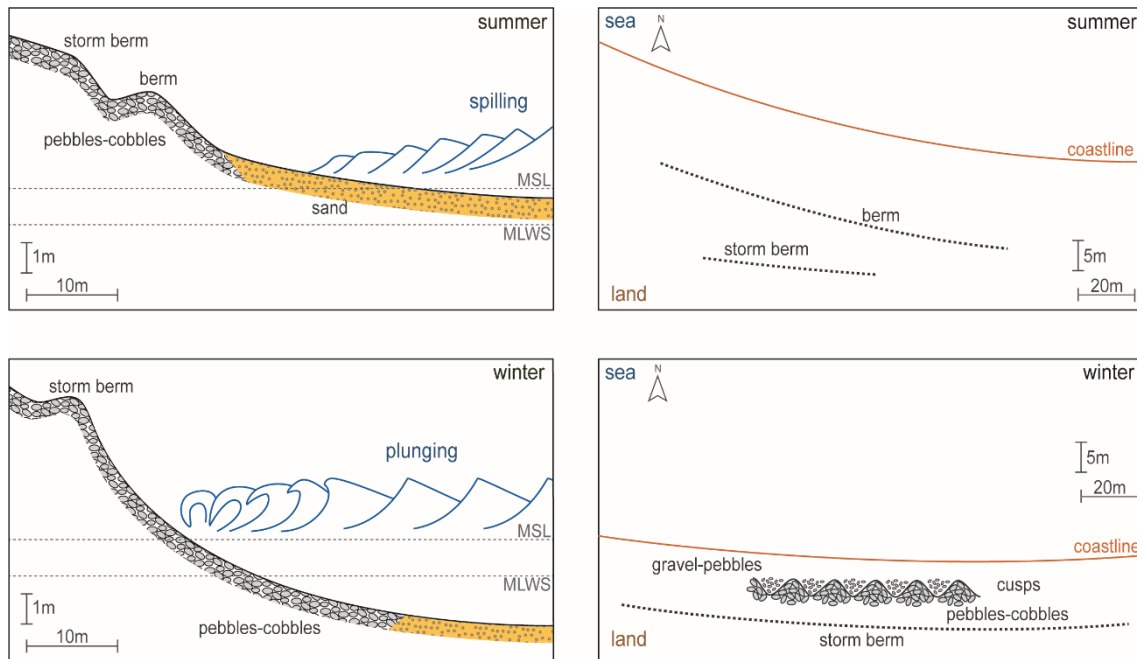


Figure 4.12. Schematic representation in cross-section (left) and plain view (right) of the two seasonal states identified at San Felipe Beach. MSL: mean sea level in Las Palmas; MLWS: mean low water spring.

Jennings and Shulmeister (2002) used field data measured on forty-two gravel beaches from around the coastline of South Island, New Zealand, to define three different types of gravel beaches: pure gravel (PG) beaches, mixed sand and gravel (MSG) beaches and composite gravel (CG) beaches. The beaches they analysed covered a wide range of beach gradient, morphologies and grain size, but these measurements were taken only once at each beach. This study provides the temporal scale using a detailed analysis of the changes that occurred over the course of 17 months on a single mixed beach.

The proposed modification derives from seasonal wave climate variations, which in turn involve seasonal morphological changes on composite beaches. These seasonal changes determine the existence of two different beach states associated to summer and winter situations. The winter state is very similar to the description of PG beaches following the Jennings and Shulmeister (2002) classification, and can be summarised as a steep gravel beaches where cusps are normally present in the beach face and where built up accretion has been observed in the storm berm as a consequence of high-energy events. The summer state follows what Jennings and Shulmeister (2002) classify as CG beaches, with the main characteristic being a two-part profile. The seaward part shows a gentle slope and is sand

dominated, while the landward portion is much steeper and coarse-grain sediments dominate (Table 4.3).

Table 4.3. Newly proposed classification of coarse-grain beaches based on Jennings and Shulmeister (2002) and the results obtained in this study.

<b>Jennings and Shulmeister (2002)</b>		<b>Present study</b>	
Based on beach gradient and sediment size		Based on wave climate seasonal variability and associated morphological changes	
	Pure Gravel	Pure Gravel	
	Mixed Sand and Gravel	Mixed Sand and Gravel	
	Composite Gravel	Seasonal Composite	
		Pure Gravel (winter)	Composite Gravel (summer)

Although MSG and composite beaches have sediments within the same grain size range, their morphological response to wave climate is completely different due to the different sorting of the sediments. For this reason, a research line should be followed to monitor more composite beaches from different environments to confirm if the seasonal pattern described in this paper could be replicated elsewhere.

## 4.7. Conclusions

This study presents a detailed space-time analysis of the morphological changes of a composite beach that took place during a period of 17 months. Statistically significant correlations were obtained between several measured morphological variables, morphodynamic parameters and wave forcing conditions. Hence, results have revealed that:

- The method followed to limit the upper and the lower parts of the beach, based on the sediment budget equal to zero when comparing summer and winter DEMs, has shown to be perfectly valid to differentiate two parts of the beach with different morphologies and morphodynamic behaviours.

- San Felipe Beach is a composite beach that follows a marked seasonal behaviour. The seasonal variability that was found in San Felipe Beach enabled the definition of a clear pattern in the seasonal beach characteristics. This pattern differentiates between two different beach states which correspond to the prevailing summer and winter situations.
- The summer state is dominated by small and short spilling waves that favour the onshore transport of sand. The upper profile is steeper and is covered by pebbles and cobbles whereas the lower profile is dominated by sand and gentle gradients.
- The winter state is characterized by high energy wave conditions. Sand is transported offshore, the beach face slope increases and cusps are formed. The run-up reaches higher elevations and moves pebbles upwards, contributing to the creation of a larger storm berm.
- There is an opposite behaviour between the upper and the lower part of the beach. The positive correlation of  $H_s$ ,  $H_b$ ,  $E$  and  $P$  with the volumetric changes in the upper beach face should also be noted, confirming that the higher the wave energy the larger the volume of pebbles in the storm berm and the lower the volume of sand in the foreshore.
- The run-up obtained using Stockdon's equation with offshore wave data and the Iribarren number present very good correlation values with all morphological variables, which confirms their validity to describe morphological changes on composite beaches.
- Results demonstrate that San Felipe Beach does not behave as a composite beach throughout the year. Therefore, a modification of the existing gravel beaches classification is proposed to account for the seasonal morphodynamic changes in this type of beach. The addition of a new seasonal composite beach type allows to differentiate between pure gravel (winter) and composite gravel (summer) behaviours.

## 4.8. Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to all their colleagues who collaborated in the fieldwork and colleagues from the topography department for providing the total station. They are also grateful to three anonymous reviewers and the journal editor for their valuable comments that have greatly helped to improve this manuscript.



# Capítulo 5





# Discusión

## 5.1. Discusión general

En las últimas décadas ha aumentado el interés por las playas de cantos y mixtas y la comprensión de los procesos costeros y transporte sedimentario que experimentan (p.ej., Bluck, 1967; Carter and Orford, 1993; Mason and Coates, 2001; Jennings and Shulmeister, 2002; Allan et al., 2006; Buscombe and Masselink, 2006; Bertoni et al., 2012; López-Ruiz et al., 2020). Sin embargo, son escasos los estudios realizados sobre los procesos físicos y sedimentarios que tienen lugar en estas playas en el ámbito de Canarias. Por tanto, se carece de la información necesaria para realizar una gestión adecuada y sostenible en el tiempo que permita proteger la costa y todas las infraestructuras y población que reside en ella frente al escenario de cambio climático actual. Es por este motivo, que el objetivo principal de esta tesis doctoral es la caracterización oceanográfica y morfosedimentaria de la playa de San Felipe a diferentes escalas temporales (desde semanas hasta años). Para ello, se plantean una serie de objetivos específicos abordados a partir de los resultados obtenidos en cada uno de los

capítulos de este trabajo: (i) determinación de la importancia de las playas de cantos y mixtas en Canarias (Capítulo 3), (ii) evaluación de la monitorización del transporte de cantos con la tecnología RFID (Capítulo 2), (iii) caracterización del clima marítimo y el transporte de cantos (Capítulo 3), (iv) determinación de la respuesta morfológica de la playa de San Felipe (Capítulo 4) (v) definición del modelo de evolución morfodinámica de la playa (Capítulo 4).

A continuación, se discuten los resultados obtenidos durante los trabajos que engloba esta tesis doctoral teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados.

## 5.2. Playas de cantos y mixtas en Canarias

Las playas de cantos y mixtas están distribuidas en las costas de todo el mundo. En concreto, las playas de cantos están particularmente extendidas por las costas controladas por el oleaje en el norte de Europa, Canadá, Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda y América Latina (Buscombe and Masselink, 2006). En el Reino Unido este tipo de playas constituyen un tercio de la costa (Fuller and Randall, 1988). Las playas mixtas también se pueden encontrar alrededor de todo el mundo siendo más comunes en latitudes medias y altas (Holland and Elmore, 2008).

En el archipiélago canario, son escasos los trabajos que incluyan clasificaciones de playa en función de sus características geomorfológicas (p. ej., Ferrer-Valero et al., 2017; Ferrer-Valero, 2018). Los resultados de este trabajo determinan que la distribución espacial de las playas de cantos y mixtas de Tenerife y Gran Canaria está influenciados por las propias características geológicas de las islas, mientras que las playas artificiales se localizan preferentemente en entornos de alta densidad de instalaciones turísticas o núcleos poblacionales. En la isla de Tenerife, el 9,3% de la longitud de costa corresponden a playas, de las cuales el 57% son playas mixtas o de cantos. Estas playas tienen una longitud y anchura medias de 290 y 11 m, respectivamente. En la isla de Gran Canaria, el 13,6% de la longitud de costa son playas predominantemente de arena dado que se trata de una isla de mayor edad y por tanto ha estado más tiempo sometida a procesos erosivos, aunque el 50% de las playas son de cantos y mixtas. Sus dimensiones difieren mucho, pues las playas mixtas tienen longitudes medias de 380 m, mientras que las de cantos miden

un promedio de 830 m. No obstante, la anchura de ambos tipos de playas es similar (18 y 13 m, respectivamente).

Según Ferrer-Valero et al. (2017) el 33,5% del perímetro costero de la isla de Gran Canaria pertenecen a playas de cantos y bolos. Este valor es parecido al obtenido en este estudio donde se ha determinado que el 28,6% de la longitud total de playas corresponden a playas de cantos.

### 5.3. Monitorización del transporte de cantos con tecnología RFID

El sistema RFID fue diseñado como parte de un sistema de seguridad, pero rápidamente fue empleado en otros campos muy diversos como por ejemplo la biología donde se utilizó para el monitoreo de las migraciones de los peces (Lamarre et al., 2005). La aplicación de esta técnica para el estudio del transporte sedimentario en ambientes costeros supuso un gran impulso para la comprensión de los mecanismos de desplazamiento de cantos o bloques (p. ej., Allan et al., 2006; Bertoni et al., 2010; Gómez-Pazo et al., 2021). El sistema RFID ha resultado ser la tecnología más adecuada para el estudio a largo plazo del movimiento de los cantos en la playa de San Felipe.

No obstante, esta tecnología también es una fuente de incertidumbre con todos aquellos cantos que no son detectados (Miller et al., 2011). Otra de las limitaciones relevante del sistema RFID es la incapacidad de determinación de la profundidad a la que se encuentran los trazadores. Según los datos obtenidos en este trabajo cuando las partículas se encuentran en superficie, sobre todo en la zona intermareal, son mucho más susceptibles de ser transportadas que aquellas que se encuentran enterradas. Asimismo, Curtiss et al. (2009) destacan que la magnitud del transporte de los trazadores a corto plazo puede estar sobrestimada ya que en las dos primeras semanas después del despliegue tiene lugar una rápida recolocación de los trazadores a causa de los procesos hidrodinámicos que actúan en la playa. En la playa de San Felipe se realizó un seguimiento prácticamente semanal durante el primer mes desde la siembra de los cantos (14 de marzo de 2013 hasta el 10 de abril de 2013). El desplazamiento medio por día de los trazadores en cada uno de los intervalos analizados es similar (Figura 3.6), pues entre el 14 y el 19 de marzo los cantos se desplazaron un promedio de 1,4 m/día, entre el 19 de marzo y el 02 de abril de 2013

se mueven 1,8 m/día y finalmente, en el periodo del 02 al 10 de abril de 2013 la tasa de transporte es de 0,9 m/día. Las diferencias observadas están relacionadas con el oleaje incidente en cada uno de esos periodos.

### 5.3.1. Tasa de recuperación

Después de 17 meses de estudio la tasa de recuperación para la playa de San Felipe es de 34,1%. Existen distintos trabajos científicos que utilizan sistema RFID para el estudio del transporte sedimentario pero no todas las tasas de recuperación son comparables porque dependen fuertemente de la duración del experimento. Allan et al. (2006) y Curtiss et al. (2009) cuyos estudios tienen una duración similar a la de este estudio, de 17 y 14 meses respectivamente, obtuvieron tasas de recuperación del 18,0% en el primer estudio y de más del 80% en el segundo. A pesar de que las duraciones son similares a la desarrollada en este trabajo, las diferencias en la tasa de recuperación son significativas. En consecuencia, existen otros factores a parte de la duración del experimento que intervienen en la tasa de recuperación de los trazadores.

### 5.3.2. Factores que influyen en la tasa de recuperación

Curtiss et al. (2009) identificó otros dos factores que causan bajas tasas de recuperación durante el invierno. El primero de ellos es el elevado número de trazadores que permanecen enterrados después de un evento de tormenta, lo que es indicador de que la profundidad de mezcla o profundidad de activación de sedimentos, definida como el espesor de la capa de sedimentos móviles (Sherman et al., 1993b), es mayor durante las tormentas (Curtiss et al., 2009). Durante la época invernal debido a la elevada energía del oleaje existe una mayor removilización de cantos, lo que causa que parte de los cantos situados en superficie queden enterrados a una profundidad donde la antena no tenga suficiente alcance y por tanto no puedan ser detectados. El segundo de los factores es la dificultad de muestrear debido a que durante el invierno el oleaje tiene mayor energía, lo que reduce la amplitud de la zona muestreable de la playa. Asimismo, durante el verano, con la entrada de la arena, parte de los cantos situados en la zona intermareal inferior quedan cubiertos por la arena reduciendo la tasa de recuperación durante esta época del año (p.ej., Allan et al., 2006; Dickson et al., 2011).

En San Felipe a partir de los 9 meses de estudio el número de trazadores recuperados en cada una de las campañas permanece aproximadamente estable dentro un rango de variación de 40 a 65 partículas (Figura 5.1). La entrada de arena se produce de manera paulatina desde mayo alcanzado su máximo en septiembre de 2014 (Figura 4.8). Sin embargo, las tasas de recuperación más bajas normalmente se producen en invierno o coincidiendo con el periodo posterior a un evento con oleaje de elevada energía. Pero tal y como se observa en la Figura 5.1 las tasas de recuperación de las últimas dos campañas, ambas en invierno, son valores considerablemente altos con respecto al rango de variación de la tasa de recuperación. Por tanto, el incremento de la profundidad de mezcla durante episodios de fuerte oleaje puede originar dos tipos de efectos contrarios: el primero donde los cantos queden enterrados y por consiguiente se obtengan tasas de recuperación bajas o en segundo lugar, que la alta removilización de cantos generada por el oleaje permita la detección de trazadores que eran indetectables por estar enterrados a gran profundidad, generando un aumento de la tasa de recuperación.

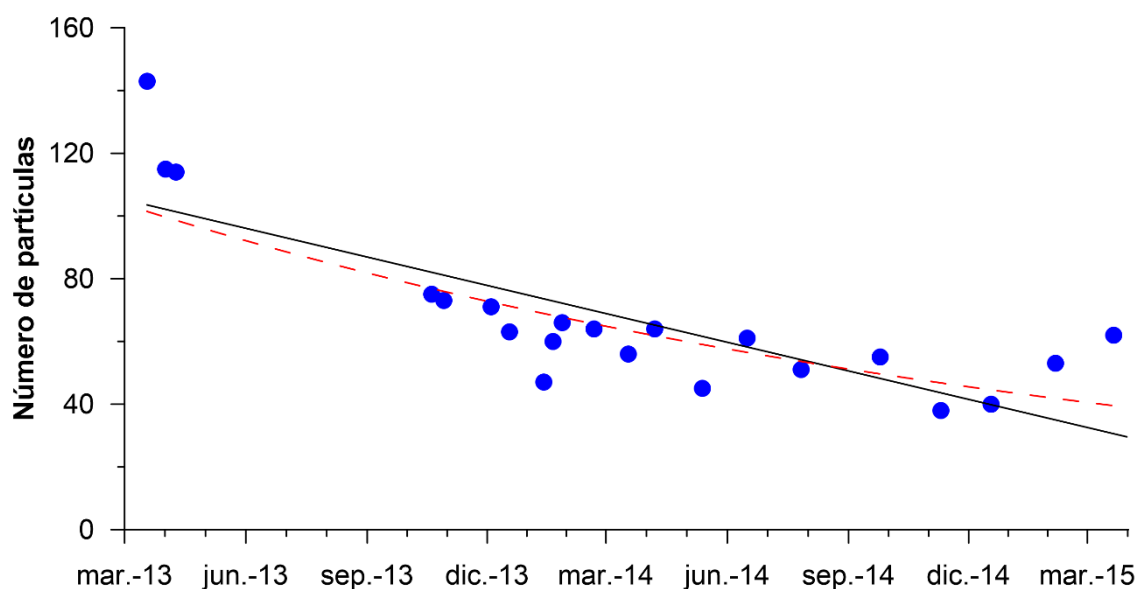


Figura 5.1. Número de partículas recuperadas en cada una de las campañas realizadas desde el 19 de marzo de 2013 hasta el 22 de marzo de 2015. La línea continua y la discontinua corresponden al ajuste lineal ( $R^2=0,64$ ) y exponencial ( $R^2=0,50$ ), respectivamente. Es análoga a la Figura 2.8 pero se han incluido los datos que faltaban hasta el final del periodo de estudio.

Otro de los aspectos importantes que afectan a la capacidad de detección del sistema RFID es la orientación del transpondedor con respecto a la antena (Curtiss et al., 2009). Aquellos transpondedores que presentan mayores tasas de recuperación se encuentran perpendiculares a la superficie de la playa y a la antena (Allan et al., 2006; Chapuis et al., 2014). A partir de los datos obtenidos en este estudio (Tabla 2.3 y Figura 2.9) se confirma que aquellos trazadores cuyo transpondedor se encuentra situado en el eje corto del canto son más eficientes y por tanto más fácilmente detectables cuando están enterrados y después de largos periodos. El principal motivo es porque normalmente la posición de mayor estabilidad de los cantos es cuando se encuentran apoyados sobre su eje largo y por tanto si el transpondedor está situado en el eje corto, entonces está perpendicular a la antena aumentando su capacidad de detección.

No se ha encontrado correlación estadísticamente significativa entre el tamaño y el peso de los trazadores con respecto a la capacidad de detección. Carter and Orford (1993) determinaron que los cantos de mayor tamaño son menos susceptibles a su enterramiento y por tanto están más expuestos al transporte, lo que podría significar que cuanto mayor sea el tamaño y peso de los trazadores mayor tasa de recuperación presentan. Sin embargo, en este estudio ni los cantos más grandes y pesados ni los más pequeños y ligeros presentan diferencias en sus tasas de recuperación, dado que en ambos casos la tasa de recuperación disminuye de forma análoga con el tiempo (Figuras 2.10 y 2.11).

Otra de las características morfométricas analizadas es la forma de los trazadores. A pesar de que no se ha encontrado correlación entre la forma y la tasa de recuperación, los cantos aplanados (*platy*) y alargados (*elongate*) presentan mayor estabilidad en sus tasas de recuperación (Figura 2.12). Los cantos en forma de disco son más fácilmente transportados que las esferas, y por tanto se suelen encontrar en las zonas altas del perfil de playa, mientras que las esferas por su parte son más susceptibles de rodar y por consiguiente son preferentemente arrastradas por el *backwash* (p.ej., Orford, 1975; Ciavola and Castiglione, 2009; Grottoli et al., 2015). Por tanto, y en función de los resultados obtenidos en este estudio, los discos situados en la parte alta del perfil de playa presentan mayores tasas de detección que las esferas que al ser más fácilmente transportadas también pueden ser más susceptibles de ser enterradas. Sin embargo, no todos los autores han obtenido los mismos resultados, ya que según Stark and Hay (2016) sucede lo contrario, los discos presentan tasas de recuperación más bajas que las esferas.

Finalmente, la ubicación de los trazadores en el perfil de playa es otro de los factores que ha resultado clave en la tasa de recuperación. Aunque la tasa de recuperación es independiente de la ubicación de los cantos en el momento de su siembra (Dickson et al., 2011), sí que influye la posición de los cantos en el perfil de playa. Los cantos que están localizados por encima de la cresta de la berma solo son susceptibles de desplazamiento en condiciones de oleaje de gran energía, mientras que los situados en la zona intermareal están mucho más expuestos a los procesos de *swash* y por tanto, son fácilmente transportados (Allan et al., 2006). De este modo, los cantos situados en la parte alta del perfil de playa presentan una tendencia ascendente en el número de trazadores detectados (Figura 2.14), lo que se explica por el movimiento hacia tierra de los trazadores que inicialmente estaba situados a cotas menores (Figuras 4.7b y 4.8).

#### 5.4. Caracterización hidrodinámica mediante la propagación del oleaje

La propagación del oleaje ha sido esencial para correlacionar las condiciones hidrodinámicas que había en la zona submareal de la playa y el transporte de cantos o la respuesta morfológica de la playa de San Felipe. En este trabajo se ha realizado la propagación del oleaje mediante el modelo de oleaje espectral de tercera generación SWAN (Booij et al., 1999), que se encuentra dentro del programa Delft3D. Una vez obtenidos los datos es primordial su calibración y validación (Guisado-Pintado, 2020). Para ello se requieren datos procedentes de mediciones reales, pero en el caso de San Felipe, esto no fue posible debido a que las dos boyas que hay en la isla de Gran Canaria están fuera de los dominios de la propagación., por lo que la validación se llevó a cabo con los datos del nodo SIMAR más próximo, que son datos procedentes del modelo numérico Wave-Watch III (Puertos del Estado, 2020). Los datos SIMAR son frecuentemente utilizados y el modelo que los produce ha sido validado en numerosas ocasiones (p. ej., Gómez Lahoz and Carretero Albiach, 2005), haciendo que la validación entre la propagación realizada en este estudio y los datos SIMAR sea fiable (Figura 4.3).

#### 5.5. Transporte de cantos

Los cantos se pueden mover básicamente por saltación o por carga de fondo, siendo este último el modo de transporte dominante en playas de cantos y mixtas (Jennings and

Shulmeister, 2002). El tipo de transporte es una función directa de los procesos hidrodinámicos de la zona de batida y de la conductividad hidráulica. El movimiento individual de cada clasto dependerá del tamaño y la forma de las partículas, de la heterogeneidad del fondo (Buscombe and Masselink, 2006) y también de la magnitud y duración de la energía del oleaje que incide sobre cada partícula de sedimento (Miller and Warrick, 2012).

Los cantos son capaces de transportarse tanto de manera longitudinal como transversal (Bertoni and Sarti, 2011). Por ello, Bergillos et al. (2016) demuestran la importancia de considerar ambos tipos de transporte para la modelización de la respuesta de las playas de cantos y mixtas frente a una tormenta. A pesar de que existen estudios donde se concluye que el transporte transversal neto es similar al longitudinal (Stark and Hay, 2016), normalmente el transporte transversal es menor que el transporte longitudinal (p. ej., Curtiss et al., 2009; Bertoni et al., 2010; Bertoni et al., 2012). El experimento llevado cabo desde la siembra de los trazadores, del 14 de marzo de 2013 hasta el 10 de abril de 2013 (Figura 3.6), concluye que el transporte principal de los cantos en la playa de San Felipe tiene lugar en la zona baja del intermareal. Asimismo, este transporte se produce principalmente de manera longitudinal. De hecho, entre el 19 de marzo de 2013 y el 02 de abril de 2013, el transporte longitudinal máximo registrado es de 127 m mientras que el transversal es de 22 m hacia el mar (Figura 5.2). Esta diferencia entre ambos tipos de transporte es debida fundamentalmente a la propia configuración de la playa, pues San Felipe tiene una longitud de 450 m mientras que su anchura varía de 22 a 45 m en función de la estación del año (véase Figura 4.10), lo que implica una diferencia de un orden de magnitud. Según Walker et al. (1991) el agente responsable de este transporte longitudinal no estaría causado por las corrientes de deriva sino por las diferencias entre el transporte oblicuo y el perpendicular a la costa debido al movimiento de *backwash*.

Por el contrario, en el transporte transversal intervienen factores como la energía del *swash*, la marea o los efectos de la gravedad y/o pendiente (Curtiss et al., 2009). Durante el invierno los cantos se desplazan hacia tierra debido a los eventos de oleaje más energéticos, siendo este transporte el principal responsable de la formación de la berma (Buscombe and Masselink, 2006; Horn and Li, 2006; Pedrozo-Acuña et al., 2006; Bertoni and Sarti, 2011). Este hecho ha quedado documentado en la playa de San Felipe (Figuras 4.8 y 4.9d), y se asocia al transporte de cantos hacia tierra, fruto de la alta energía del



oleaje incidente. Asimismo, también son frecuentes los movimientos de las partículas de sedimento hacia el mar. La pendiente de la playa favorece los procesos de gravedad que experimentan los cantos por el movimiento de *backwash*. Durante los periodos de oleaje poco energético, los cantos situados en la fuerte pendiente del frente de playa se desestabilizan y se mueven preferentemente hacia el mar, es decir, pendiente abajo (Bertoni et al., 2013). En los tres intervalos de tiempo estudiados, entre el 14 de marzo de 2013 y el 10 de abril de 2013 (Figura 3.6) se pueden apreciar como algunos de los trazadores situados inicialmente en la zona intermareal superior con oleajes no significativos se han desplazado hacia el mar estando a continuación mucho más expuestos al oleaje y a las mareas y por tanto experimentando un transporte longitudinal importante.

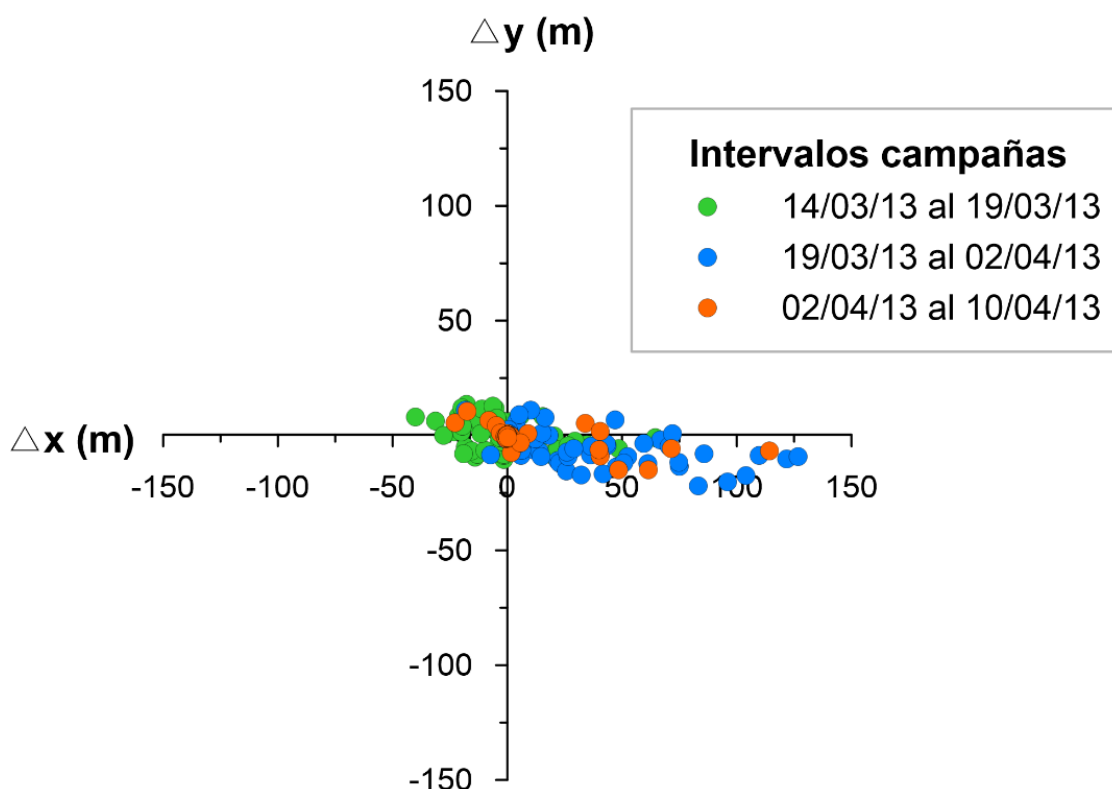


Figura 5.2. Transporte de cantos dividido en la componente longitudinal ( $\Delta x$ ) y la transversal ( $\Delta y$ ) en los diferentes intervalos de tiempo entre las campañas representadas en la Figura 3.6.

### 5.5.1. Factores que intervienen en el transporte de cantos

El transporte de cantos está afectado por la marea y la altura de ola que influyen directamente en el *run-up* (p.ej., Van Wellen et al., 2000; Pedrozo-Acuña et al., 2006). Los resultados expuestos por Miller and Warrick (2012) sugieren que existe una fuerte correlación entre el transporte sedimentario y la altura de ola significativa durante la pleamar máxima, presentando un ajuste polinomial de segundo orden. Por tanto, estos resultados confirman que el transporte sedimentario está asociado a oleajes energéticos durante condiciones de pleamar. Este es el mismo patrón que se ha observado en la playa de San Felipe (Figura 3.6), donde los cantos se desplazan en función de las condiciones oceanográficas. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que no es necesario un evento de tormenta para que los cantos se muevan, sino que también existe movimientos de partículas con oleajes poco energéticos (p.ej., Bertoni et al., 2013; Grottoli et al., 2015; Stark and Hay, 2016).

Por otro lado, son varios los trabajos que han tratado de averiguar cómo afectan las características morfométricas de los trazadores en el transporte sedimentario, aunque no existe mucha homogeneidad en los resultados publicados. Algunos autores como Osborne (2005) o Allan et al. (2006) concluyen que las partículas de mayor tamaño recorren mayor distancia porque son menos susceptibles de quedar atrapadas que las de menor tamaño. Por el contrario, en otros trabajos no se ha encontrado ninguna tendencia clara entre el transporte y la forma de los cantos (p.ej., Allan et al., 2006; Curtiss et al., 2009; Dickson et al., 2011; Miller et al., 2011). Asimismo, son varios los autores que determinan que no existe correlación estadísticamente significativa entre el peso y el transporte de cantos (p.ej., Allan et al., 2006; Bertoni et al., 2012). En el experimento llevado cabo desde la siembra de los trazadores, entre el 14 de marzo de 2013 y el 10 de abril de 2013 (Figura 3.6) tampoco se observa un patrón claro entre las principales características de los trazadores y su transporte. Por tanto, aunque el tamaño o el peso son factores que interfieren directamente en la resistencia que ejerce un cuerpo frente al movimiento, en este trabajo no se ha encontrado ninguna evidencia de la relación entre el transporte de cantos y el tamaño o peso de las partículas.

## 5.6. Respuesta morfológica de la playa compuesta de San Felipe

### 5.6.1. Elementos geomorfológicos

Muchos de los elementos geomorfológicos típicos de playas de cantos (berma, *beach cusps* o *step*) también son comunes en playas mixtas (Curoy, 2012). A lo largo del periodo de estudio en la playa compuesta de San Felipe se han identificado tanto bermas como *beach cusps*.

La berma es una de las características más distintivas de las playas de cantos. La formación de la berma está directamente relacionada con el transporte de sedimentos hacia tierra (Pedrozo-Acuña et al., 2006) debido a la asimetría del movimiento de *swash* dada la elevada tasa de infiltración que tiene lugar en la zona de batida (Anthony, 2008). Cuanto menor es la proporción de arena, mayor permeabilidad y por tanto mayor asimetría. Normalmente las bermas se encuentran en la parte superior del perfil de playa dependiendo de las condiciones de oleaje o el nivel de la marea (Orford and Anthony, 2013), ligeramente por debajo del máximo valor de *run-up* en condiciones de pleamar (Curoy, 2012). Durante los episodios de oleaje energético los cantos son transportados a mayores distancias hacia tierra generando lo que se conoce como berma de tormenta en la parte más alta del perfil de playa haciendo que todos aquellos cantos que se encuentran por detrás de la berma se pierdan del sistema de playa activo hasta que tenga lugar una tormenta de características análogas (Buscombe and Masselink, 2006). Por este motivo, los trazadores utilizados en la playa de San Felipe localizados en la parte superior del perfil de playa son los más estables (Figuras 2.14 y 3.6).

Otra característica destacable encontrada en este estudio es que en invierno predomina una única berma a lo largo de la playa, aunque ésta puede estar fragmentada ya que a veces en condiciones de pleamar pueden producirse eventos grandes de *run-up* que provocan que las olas sobrepasen la cresta de la berma provocando su fragmentación, lo que también ha sido documentado por Blenkinsopp et al. (2022). Por el contrario, en verano es normal que haya dos bermas a diferentes elevaciones, siendo la que está más tierra adentro los restos de la berma de invierno (Figuras 4.7 y 4.12). Blenkinsopp et al. (2022) exponen la coexistencia de diversas bermas dentro de una misma playa debido a

que unas son formas relictas formadas en condiciones extremas pasadas mientras que las que están más cerca de la orilla son resultado de las pleamares más recientes.

Respecto a los *beach cusps*, en ocho de las campañas realizadas en la playa de San Felipe se encontraron estas geoformas, mayoritariamente en invierno. Ello se debe a que los *beach cusps* están asociados a las condiciones después de las tormentas que se caracterizan por oleajes con elevados periodos (Sherman et al., 1993a). En San Felipe los *beach cusps* los encontramos mayoritariamente en la zona central del área de estudio entre la cota 0 y 1,5 m, pero varían su ubicación entre campañas consecutivas dado que se desarrollan durante distintos ciclos mareales. Autores como Nolan et al. (1999) determinaron que la elevación a la que se encontraban los *beach cusps* en el frente de playa está controlada por la altura de ola en rotura mientras que el espaciado entre ellos es una función de la variabilidad de la altura de ola en rotura sobre la longitud de onda. En San Felipe, la distancia media entre *horns* es de 12 m (Figura 4.7) y se han identificado variaciones granulométricas entre los *horns* y las bahías, siendo los cantos predominantes en ambas morfologías pero encontrando presencia de arena gruesa y grava en las bahías. Estos resultados coinciden con lo establecido por Sherman et al. (1993a), que concluyeron que los cantos más grandes y angulosos se depositaban preferiblemente en la zona de mayor pendiente de los *horns*, mientras que las partículas más esféricas y de menor tamaño se encontraban en las bahías. No obstante, en la mayoría de los trabajos de *beach cusps* en playas mixtas no se ha podido establecer la distribución superficial por tamaños de grano ni los cambios morfológicos que tienen lugar en los *beach cusps* (Pitman et al., 2019).

#### 5.6.2. Cambios morfológicos estacionales

De acuerdo con la clasificación establecida por Jennings and Shulmeister (2002) San Felipe es una playa compuesta que presenta un marcado patrón estacional (Figura 4.8). Aunque son varios los autores que han registrado variaciones temporales y espaciales en playas mixtas (p.ej., McLean and Kirk, 1969; Pontee et al., 2004; Miller et al., 2011; Atkinson and Esteves, 2018) solo unos pocos han asociado estas variaciones morfológicas a cambios estacionales (p.ej., Allan et al., 2006; Curtiss et al., 2009). Este trabajo demuestra que las variaciones morfológicas, completamente condicionadas por los cambios volumétricos, varían estacionalmente. Durante los primeros eventos de oleaje

energético la arena situada en la zona intermareal se erosiona (-13.672 m<sup>3</sup> en el primer invierno y -8.415 m<sup>3</sup> en el segundo). A lo largo del invierno se producen procesos de ganancia y erosión de sedimento. Con la entrada del verano y por tanto de la disminución de la energía del oleaje, la arena se va desplazando hacia tierra llegando a cubrir los cantos de la zona intermareal baja (acumulación neta desde mayo hasta septiembre de 8.679 m<sup>3</sup>), hasta que aparece de nuevo un evento importante de oleaje muy energético que causa la erosión de la arena. Asimismo, este trabajo ha determinado que existen variaciones entre estaciones análogas de dos años consecutivos (Figura 4.8)

McLean and Kirk (1969) determinaron que existe una relación entre el tamaño de grano medio y la pendiente de la playa. Se trata de una relación creciente que muestra una tendencia lineal, aunque en playas mixtas donde la distribución granulométrica es bimodal, esta relación presenta importantes desviaciones que empeoran el ajuste lineal (Bujan et al., 2019). En las playas compuestas como San Felipe, es difícil determinar cuál es el tamaño de grano medio, sobre todo en verano que se caracteriza por una distribución bimodal del sedimento con dos clases predominantes la arena con un tamaño medio de 0,23 mm y los cantos de 59,90 mm. A pesar de ello, en San Felipe existe una correlación clara entre el cambio volumétrico acumulativo y la pendiente de la playa ( $r = -0,95$ , Figura 4.10). En verano con la entrada de la arena, la pendiente de la playa se suaviza, mientras que en invierno con la aparición de los primeros temporales la arena de la playa se erosiona y los cantos son empujados hacia tierra causando un aumento significativo de la pendiente de la playa.

En la literatura científica son varios los trabajos que han abordado la rotación de la línea de costa en playas de cantos y mixtas (p. ej., Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010; Dolphin et al., 2011; Wiggins et al., 2019a). En la playa de San Felipe se ha identificado una rotación estacional de la línea de costa debida principalmente a la acumulación y erosión de la arena y a la lengua de lava situada en el extremo oeste del área de estudio. La acumulación de la arena es más intensa en el extremo oeste de la playa porque la lengua de lava genera un obstáculo al transporte longitudinal de arena provocando una mayor acumulación en esa zona. Esta distribución irregular de la arena genera una pequeña modificación de la orientación de la línea de costa siendo en verano de ONO-ESE y en invierno de O-E. Este patrón estacional en la rotación de la línea de costa está estadísticamente correlacionado tanto con las condiciones hidrodinámicas,

(correlación con  $H_s$ ,  $r = -0,71$ ), como morfodinámicas (correlación con  $\varepsilon$ ,  $r = 0,91$ ) (Tabla 4.2), coincidiendo con los resultados establecidos por otros autores (p.ej., Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010; Medellín and Torres-Freyermuth, 2019; Wiggins et al., 2020).

### 5.6.3. Efecto del clima marítimo en los cambios morfológicos

Pontee et al. (2004) establecieron que el clima marítimo es uno de los principales factores de la respuesta morfológica de las playas. En concreto, encontraron que en playas mixtas de arena y cantos existe una correlación positiva y estadísticamente significativa entre la altura de ola y el porcentaje de arena, mientras que no es estadísticamente significativa entre el periodo del oleaje y el volumen de arena. Por el contrario, en San Felipe y en general en las playas compuestas esta correlación entre los cambios volumétricos acumulativos y la altura de ola significativa es de signo opuesto ( $r = -0,62$ , Tabla 4.2.), siendo mayor la erosión cuanto mayor es la altura de ola, lo que confirma los resultados de Allan et al. (2006) y Grottoli et al. (2017). Sin embargo, tampoco se ha encontrado correlación estadísticamente significativa entre el periodo del oleaje y cualquiera de las variables morfológicas analizadas (cambios volumétricos, pendiente, anchura de la playa u orientación de la línea de costa).

La respuesta morfológica que origina un oleaje energético no depende únicamente de las características del oleaje y de la marea, sino que también depende de la morfología previa de la playa (Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010). Los antecedentes morfológicos de una playa influyen significativamente en los cambios que pueda causar un evento de tormenta en el perfil de playa (p.ej., Forbes et al., 2004; Aagaard et al., 2005). Este fenómeno se aprecia perfectamente al inicio del periodo invernal, donde el primer evento de oleaje energético es capaz de erosionar un enorme volumen de arena, mientras que temporales posteriores de igual o mayor magnitud, apenas producen cambios significativos en cuanto al volumen de material en la playa (Figuras 4.4 y 4.8). También se puede apreciar con las variaciones en los cambios volumétricos estacionales entre años consecutivos (véase sección 5.6.2). El primer año de estudio el volumen de arena era mucho mayor que el que se alcanzó durante el verano de 2014, por tanto, la erosión que experimentó la playa el primer año fue mayor que el segundo, una diferencia de  $5.257 \text{ m}^3$  entre ambos inviernos.

Cuando tienen lugar varios eventos de tormenta consecutivos cuyo tiempo de recuperación, definido como el periodo de calma entre dos tormentas consecutivas, es menor que el tiempo necesario para la recuperación del sistema, pueden generar grandes déficits de volumen sedimentario (Sénéchal et al., 2017). Los dos inviernos registrados dentro del periodo de estudio corresponden al segundo y tercer evento más energético de los últimos 28 años (Figura 4.6), y específicamente el invierno del 2013/2014 que ha sido descrito por varios autores como uno de los inviernos más energéticos de las últimas décadas en el Noroeste Atlántico (Castelle et al., 2015; Masselink et al., 2016; Flor-Blanco et al., 2021). Por este motivo, la playa de San Felipe presenta un déficit sedimentario a lo largo del periodo de estudio, comprendido entre octubre de 2013 y marzo de 2015. Por otro lado, este déficit sedimentario también puede ser atribuible a que el inicio y final del periodo de estudio no corresponden a la misma estación, sino que el inicio corresponde con un perfil de playa de verano mientras que el final es un perfil de invierno.

#### 5.7. Principales parámetros morfodinámicos

En el ámbito de la geomorfología costera está muy extendido el uso de los parámetros morfodinámicos para relacionar las características morfológicas e hidrodinámicas de las playas. Uno de los objetivos de esta tesis doctoral es establecer cuáles son los parámetros morfodinámicos que mejor describen la respuesta morfológica de las playas compuestas. Los resultados del análisis estadístico han determinado que el *run-up* ( $R_p$  y  $R_s$ ), el número de Iribarren ( $\xi_b$ ) y el *surf scaling parameter* ( $\varepsilon$ ) son los que mejor correlación (estadísticamente significativa) muestran con los cambios estacionales del perfil de playa (Tabla 4.2).

El *run-up* es la posición vertical variable en el tiempo del límite del agua en la playa y es el principal responsable de las condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas del frente de playa (Elfrink and Baldock, 2002). La mayor parte de las mediciones de *run-up* realizadas en el campo de las últimas décadas se han llevado a cabo en playas de arena (p.ej., Guza and Thornton, 1982; Nielsen and Hanslow, 1991; Ruggiero et al., 2001) debido principalmente a las dificultades logísticas que implican las playas de cantos y en especial bajo condiciones energéticas (Poate et al., 2016). En este trabajo se han empleado dos ecuaciones diferentes para el cálculo del *run-up*, una de las más utilizadas (Ec. 4.4)

que fue obtenida para un amplio rango de condiciones (Stockdon et al., 2006) y otra (Ec. 4.5) que fue establecida para playas de cantos bajo condiciones extremas (Poate et al., 2016). Teniendo el fuerte carácter estacional que presenta la playa de San Felipe, siendo disipativa en verano y reflectiva en invierno (Figura 4.11), la ecuación que presenta correlaciones ligeramente superiores es la determinada por Stockdon et al. (2006). No obstante, la ecuación de Poate (Ec. 4.5) presenta un mejor ajuste con los cambios volumétricos de la parte superior del perfil de playa ( $r = 0,80$ ) dado que requiere condiciones de oleaje mucho más energéticas para que esta zona de mayor elevación pueda experimentar cambios.

En las playas de cantos y mixtas el oleaje rompe cerca de la costa, lo que genera un impacto directo sobre la morfología de la playa. Son varios los trabajos científicos que han tratado de estudiar la rotura del oleaje en estos ambientes sedimentarios, como por ejemplo Baldock and Holmes (1999), que determinaron que la rotura del oleaje se produce de modo relativamente uniforme a lo largo de una línea de rotura paralela a la línea de costa. Por su parte, Pedrozo-Acuña et al. (2008) estudiaron la influencia del tipo de rotura del oleaje en la morfodinámica de las playas de cantos. Una de sus principales conclusiones fue que cuanto mayor es el peralte de la ola, mayor es el impacto que produce en el perfil de playa. Por tanto, el número de Iribarren y el peralte de las olas proporcionan información relevante sobre la hidrodinámica de la zona de batida y del movimiento de los sedimentos en el frente de playa. Sin embargo, otros autores como Bramato et al. (2012) concluyeron que el peralte del oleaje no es un criterio adecuado para definir el transporte transversal neto en playas de cantos y mixtas. Los resultados de este trabajo reflejan que el peralte no presenta correlación estadísticamente significativa con ninguno de los parámetros morfológicos analizados mientras que el número de Iribarren que define el tipo de rotura del oleaje o el *surf scaling parameter* tienen coeficientes de correlación elevados (Tabla 4.2).

El número de Iribarren (Ec. 4.6) también refleja la marcada estacionalidad anteriormente descrita para otras variables. En verano prevalece la rotura tipo *spilling* que permite que la arena se deposite paulatinamente hasta la llegada del invierno cuando el impacto del oleaje con rotura tipo *plunging* genera fuertes velocidades que causan la suspensión del sedimento (Aagaard and Hughes, 2010), generando la erosión de la arena situada en la franja intermareal baja (Figura 4.11).



## 5.8. Modelo de evolución morfodinámica de la playa de San Felipe

Desde los años 60 hasta la actualidad se han realizado distintos trabajos cuyo objetivo era la clasificación de las playas de cantos y mixtas (p.ej., Bluck, 1967; Orford, 1975; Caldwell and Williams, 1985; Williams and Caldwell, 1988; Carter and Orford, 1993; Pye, 2001; Jennings and Shulmeister, 2002; Aragonés et al., 2015). Estas clasificaciones se basaban en distintas variables, como pudiera ser el tamaño de grano, el tipo de oleaje o el régimen mareal. Sin embargo, ninguno de ellos menciona el fuerte carácter estacional que ha sido descrito en la playa de San Felipe, diferenciando claramente dos estados: verano e invierno, fruto de la variabilidad natural del clima marítimo y que determina regímenes morfodinámicos claramente diferenciados: disipativo en verano y reflectivo en invierno (Figura 4.11). Por esta razón se propone una modificación de la clasificación establecida por Jennings and Shulmeister (2002) que se sintetiza en la Tabla 4.3 y la Figura 4.12.

# Capítulo 6

A photograph of a wave crashing onto a pebbly beach. The wave is breaking over a large number of dark, smooth pebbles. The water is white with foam, and the sky is bright. The text 'Capítulo 6' is overlaid in the upper center in a bold, orange font.

# Conclusiones y perspectivas

## 6.1 Conclusiones generales

Las conclusiones generales que se extraen de los trabajos realizados en esta tesis doctoral, agrupadas en función de los objetivos específicos inicialmente establecido, son las siguientes:

### *a) Playas de cantos y mixtas en Canarias*

1. La distribución espacial de las playas de cantos y mixtas en Tenerife y Gran Canaria está determinada por las características geológicas de las islas.
2. En Tenerife hay 93 playas mayores de 100 m de largo, el 57% de las cuales son playas de cantos y mixtas. En Gran Canaria, de las 62 playas identificadas y con longitudes superiores a 100 m, el 50% son playas de cantos y mixtas.

b) *Sistema RFID*

3. Las tasas de recuperación del sistema RFID de este estudio son similares a las obtenidas en otros trabajos. Por tanto, valida la aplicación de esta tecnología para la medición del transporte de cantos a largo plazo.
4. Los principales factores que intervienen en la tasa de recuperación de los trazadores son:
  - i. La duración del periodo de estudio; después de la siembra la tasa de recuperación disminuye consecutivamente los primeros 9 meses, momento a partir del cual se estabiliza presentando pequeñas variaciones en un rango comprendido entre el 20% y 33%.
  - ii. El enterramiento de los trazadores: todos aquellos trazadores que están sometidos al transporte sedimentario son susceptibles de quedar enterrados a profundidades mayores al umbral de detección del sistema, lo que impide su detección.
  - iii. La orientación del transpondedor: los trazadores cuyo transpondedor se encuentra situado en el eje corto son más eficientes y por tanto más fácilmente detectables cuando están enterrados y después de largos periodos de estudio.
  - iv. La ubicación de los trazadores en el perfil de playa: los trazadores situados en la parte alta del perfil de playa requieren condiciones de fuerte oleaje en pleamares vivas para ser transportados, por lo que son más susceptibles de ser detectados.
5. Las limitaciones más relevantes y que afectan a la cuantificación del transporte de cantos son:
  - i. La incapacidad del sistema de determinar la profundidad a la que se encuentran los trazadores.
  - ii. La incertidumbre que generan todos aquellos trazadores que no son detectados principalmente por dos motivos: (i) porque se encuentran

enterrados fuera del rango de detección y (ii) porque han salido del área de estudio.

c) *Caracterización hidrodinámica*

6. La propagación de oleaje realizada con el modelo SWAN representa adecuadamente las condiciones de oleaje en la zona de estudio y permiten correlacionar adecuadamente las condiciones de oleaje en profundidades someras con el transporte de cantos y la respuesta morfológica de la playa.

d) *Monitorización del transporte de cantos*

7. El transporte de cantos en San Felipe es tanto longitudinal como transversal, siendo mayor el primero de ellos debido a la propia configuración de la playa.
8. El transporte transversal de cantos es función de:
  - i. Procesos de gravedad: la pendiente de la playa favorece los procesos de gravedad que experimentan los cantos debido al arrastre de las partículas hacia el mar por el movimiento de *backwash*, que con poca energía se desestabilizan y se transportan transversalmente hacia el mar.
  - ii. Transporte hacia tierra por oleaje: en condiciones de oleaje de alta energía en las playas compuestas existe un transporte neto de cantos hacia tierra, causando acumulaciones de sedimento en la parte superior del perfil de playa y dando lugar a la formación de la berma de tormenta.

e) *Respuesta morfológica de la playa de San Felipe*

9. Los principales elementos geomorfológicos identificados en la playa de San Felipe son los siguientes:
  - i. Berma: la formación de la berma está directamente relacionada con el transporte de sedimentos hacia tierra. La berma de tormenta se sitúa en la parte más elevada del perfil de playa en función del valor del *run-up* y de pleamar en condiciones extremas de oleaje. En invierno predomina una única berma a lo largo de la playa, aunque a veces esta puede estar

fragmentada, mientras que en verano aparecen múltiples bermas a diferentes elevaciones incluyendo los restos de la berma de tormenta situada tierra adentro.

- ii. *Beach cusps*: mayoritariamente aparecen en invierno en la zona intermareal de la parte central del área de estudio. Se han identificado variaciones granulométricas entre los *horns* y las bahías, siendo los cantos predominantes en ambas morfologías pero encontrando presencia de arena gruesa y grava en las zonas más deprimidas.

10. La respuesta morfológica de la playa puede verse afectada por los siguientes factores:

- i. Altura de ola significante: existe una correlación estadísticamente significativa entre los cambios acumulativos de volumen y la altura de ola significante. Cuanto mayor es la altura, la playa experimenta mayor erosión. Por el contrario, cuando la altura de ola disminuye, la arena se acumula en la zona intermareal.
- ii. Tipo de rotura del oleaje: en invierno predomina el oleaje con rotura de tipo *plunging* que genera una mayor suspensión de la arena causando su erosión. Por el contrario, en verano predomina el oleaje con rotura de tipo *spilling* que favorecen la acumulación de la arena.
- iii. Morfología previa de la playa: los primeros temporales del invierno tienen mucha más capacidad erosiva que los últimos.

11. Los cambios morfológicos más destacables que se han identificado en la playa de San Felipe son:

- i. Cambios volumétricos: la parte inferior del perfil de playa es la que está sometida a mayores cambios debido a la acumulación de arena durante la época estival y la erosión de esta en invierno hacia el mar. La parte superior del perfil de playa permanece mucho más estable, aunque con los oleajes más energéticos experimenta pequeñas acumulaciones de cantos.

- ii. Cambio de la pendiente: los cambios volumétricos generan modificaciones de la pendiente de playa siendo más suave en verano y con mayor pendiente en invierno no solo por la erosión de la arena sino también por el propio transporte de cantos hacia tierra.
  - iii. Variación estacional de la anchura de playa: esta variable morfológica también está fuertemente correlacionada con el volumen de arena. En verano con la entrada de la arena, la anchura de la playa aumenta mientras que en invierno disminuye.
  - iv. Rotación de la línea de costa; la línea de costa experimenta una pequeña modificación de la orientación siendo en verano predominantemente de ONO-ESE y en invierno O-E. La lengua de lava es la principal responsable de esta rotación dado que supone un obstáculo para el transporte longitudinal de arena originado por el oleaje procedente del NNE que genera una acumulación mayor en el extremo oeste.
12. El *run-up* obtenido a partir a partir de la ecuación de Stockdon, el número de Iribarren y el *surf scaling parameter* son los parámetros morfodinámicos que mejor describen los cambios morfológicos de las playas compuestas.

f) *Modelo estacional de la playa*

13. La playa de San Felipe presenta un marcado carácter estacional en el que se identifican dos estados fundamentalmente:
- i. Verano: con condiciones de baja energía la arena de la zona submareal migra hacia tierra cubriendo parte de la zona intermareal. Esta acumulación de arena causa varios cambios morfológicos como un aumento de la anchura de playa, una disminución de la pendiente y una rotación de la línea de costa en dirección ONO-ESE. Predomina el oleaje procedente del NNE con rotura de tipo *spilling* y la playa es principalmente disipativa. Se crean múltiples bermas situadas por debajo de la berma de tormenta que es parcialmente desmantelada por el transporte transversal de cantos causado por los procesos de gravedad.

- ii. Invierno: cuando tiene lugar el primer evento de alta energía, la arena se erosiona migrando hacia el mar. Este cambio volumétrico tan destacable produce una disminución de la anchura de playa y una rotación de la línea de costa en dirección O-E. El perfil de playa se caracteriza por pendientes pronunciados con presencia de *beach cusps* y una única berma de tormenta que puede aparecer parcialmente segmentada y que es formada por el transporte hacia tierra de los cantos debido a los altos valores de *run-up*. Se trata de una playa reflectiva donde predomina el oleaje con rotura de tipo *plunging* y procedente del N.
14. Se propone una modificación de la clasificación establecida por Jennings and Shulmeister (2002) donde se incluyen las playas compuestas estacionales que durante el invierno son playas de cantos puras mientras que en verano se comportan como playas compuestas.

## 6.2. Perspectivas de futuro

Esta tesis estudia los procesos que tienen lugar en la playa de San Felipe analizando la respuesta morfológica y el transporte de sedimentos frente a las condiciones hidrodinámicas. Los resultados obtenidos en esta investigación ponen de manifiesto la necesidad de abordar nuevos objetivos específicos que permitan completar el presente trabajo y obtener una comprensión total de todos los mecanismos que intervienen en este tipo de playas y así poder realizar una gestión sostenible de estos recursos naturales tan valiosos para afrontar el cambio climático. Entre estos objetivos cabe destacar:

- Mejora del sistema RFID para la reducción de incertidumbre sobre la profundidad a la que se encuentran los trazadores.
- Estudio más detallado de los principales procesos que interfieren en la creación y destrucción de las morfologías típicas de playas mixtas como son los *beach cusps* y las bermas. Para ello, se requiere reducir el lapso temporal entre campañas.



- Análisis de las corrientes de deriva y de resaca (*rip currents*) que generan grandes variaciones morfológicas en la playa y en la franja submareal, así como su efecto en el transporte sedimentario.
- Replicación de este estudio en otras playas de tipo compuestas para la confirmación de los patrones estacionales y validación de la nueva propuesta de clasificación de este tipo de playas. Las playas seleccionadas deberían estar expuestas a diferentes condiciones hidrodinámicas.

## Referencias

- Aagaard, T., and Hughes, M. (2010). Breaker turbulence and sediment suspension in the surf zone. *Marine Geology*, 271(3–4), 250–259. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEО.2010.02.019>
- Aagaard, T., Kroon, A., Andersen, S., Sørensen, R. M., Quartel, S., and Vinther, N. (2005). Intertidal beach change during storm conditions; Egmond, The Netherlands. *Marine Geology*, 218(1–4), 65–80. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEО.2005.04.001>
- Allan, J. C., Hart, R., and Tranquili, J. V. (2006). The use of Passive Integrated Transponder (PIT) tags to trace cobble transport in a mixed sand-and-gravel beach on the high-energy Oregon coast, USA. *Marine Geology*, 232(1–2), 63–86. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.07.005>
- Allan, J. C., and Komar, P. D. (2004). Environmentally compatible cobble berm and artificial dune for shore protection. *Shore Beach*, 72(1), 9–18.
- Alonso, I., Sánchez-García, M.J., Rodríguez, S., and Casamayor, M. (2015). *Estudio del cálculo del balance sedimentario en la playa de Las Canteras*.
- Alonso, I., Vilas, F., and Alcántara-Carrió, J. (2000). Importancia de la escala temporal en estudios de dinámica litoral. In J. R. de Andrés and F. J. Gracia (Eds.), *Geomorfología litoral. Procesos activos* (pp. 31–43). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).
- Alonso, I. (1993). *Procesos sedimentarios en la playa de Las Canteras (Gran Canaria)* [Doctoral dissertation]. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

- Alonso, I., Alcántara-Carrió, J., and Cabrera, L. (2002). Tourist Resorts and their Impact on Beach Erosion at Sotavento Beaches, Fuerteventura, Spain. In *Journal of Coastal Research* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.1>
- Alonso, I., Casamayor, M., Sánchez-García, M. J., and Montoya-Montes, I. (2019). Classification and characteristics of beaches at Tenerife and Gran Canaria Islands. In J. A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management* (pp. 361–383). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_16)
- Alonso, I., and Vilas, F. (1994). The influence of boundary conditions on beach zonation. In A. S. Arcilla, S. J. F. Marcel, and N. C. Kraus (Eds.), *Coastal Dynamics '94: Proceedings of an International Conference on the Role of the Large Scale Experiments in Coastal Research Held in Barcelona, Spain, February 21-25., p. 417-431* (pp. 417–431). American Society of Civil Engineers (ACE).
- Anthony, E. (2008). Gravel Beaches and Barriers. In E. J. Anthony (Ed.), *Developments in Marine Geology* (Vol. 4, pp. 289–324). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(08\)00406-5](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(08)00406-5)
- Aragonés, L., López, I., Villacampa, Y., Serra, J. C., and Saval, J. M. (2015). New Methodology for the Classification of Gravel Beaches: Adjusted on Alicante (Spain). *Journal of Coastal Research*, 314, 1023–1034. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00140.1>
- Atkinson, J., and Esteves, L. S. (2018). Alongshore variability in the response of a mixed sand and gravel beach to bimodal wave direction. *Geosciences (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences8120488>
- Austin, M. J., and Masselink, G. (2006). Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach. *Marine Geology*, 229(1–2), 59–77. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2006.02.003>
- Balcells, R., and Barrera, J. L. (1990). *Mapa Geológico de España 1:25.000, hoja 1101-III-IV (Aruca)*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

- Baldock, T. E., and Holmes, P. (1999). Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach. *Coastal Engineering*, 36(3), 219–242. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00011-3)
- Battjes, J. A. (1974). Surf Similarity. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(14), 466–480. <https://doi.org/10.9753/icce.v14.26>
- Bellido Mulas, F., and Pineda Velasco, A. (2008). *Mapa Geológico Digital continuo E. 1:25.000, Zona Canarias - Gran Canaria (Zona-2912)*. GEODE (online). <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z2912>
- Benelli, G., Pozzebon, A., Bertoni, D., and Sarti, G. (2012). An RFID-Based Toolbox for the Study of Under- and Outside-Water Movement of Pebbles on Coarse-Grained Beaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(5), 1474–1482. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2196499>
- Bergillos, R. J., Ortega-Sánchez, M., Masselink, G., and Losada, M. A. (2016). Morphosedimentary dynamics of a micro-tidal mixed sand and gravel beach, Playa Granada, southern Spain. *Marine Geology*, 379, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.05.003>
- Bertoni, D., Sarti, G., Benelli, G., Pozzebon, A., and Raguseo, G. (2012). Transport trajectories of “smart” pebbles on an artificial coarse-grained beach at Marina di Pisa (Italy): Implications for beach morphodynamics. *Marine Geology*, 291–294, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.08.004>
- Bertoni, D., Grottoli, E., Ciavola, P., Sarti, G., Benelli, G., and Pozzebon, A. (2013). On the displacement of marked pebbles on two coarse-clastic beaches during short fair-weather periods (Marina di Pisa and Portonovo, Italy). *Geo-Marine Letters*, 33, 463–476. <https://doi.org/10.1007/s00367-013-0341-3>
- Bertoni, D., and Sarti, G. (2011). On the profile evolution of three artificial pebble beaches at Marina di Pisa, Italy. *Geomorphology*, 130(3–4), 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.002>

- Bertoni, D., Sarti, G., Benelli, G., Pozzebon, A., and Raguseo, G. (2010). Radio Frequency Identification (RFID) technology applied to the definition of underwater and subaerial coarse sediment movement. *Sedimentary Geology*, 228(3–4), 140–150. <https://doi.org/10.1016/J.SEDGEO.2010.04.007>
- Blair, T. C., and McPherson, J. G. (1999). Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 6–19. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.6>
- Blenkinsopp, C. E., Bayle, P. M., Martins, K., Foss, O. W., Almeida, L.-P., Kaminsky, G. M., Schimmels, S., and Matsumoto, H. (2022). Wave runup on composite beaches and dynamic cobble berm revetments. *Coastal Engineering*, 104148. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2022.104148>
- Bluck, B. J. (1967). Sedimentation of beach gravels; examples from South Wales. *Journal of Sedimentary Research*, 37(1), 128–156. <https://doi.org/10.1306/74D71672-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Bolaños, A., and Santana, S. (1997). *Batimetría y topografía de la playa de Las Canteras* [Technical report].
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Bramato, S., Ortega-Sánchez, M., Mans, C., and Losada, M. A. (2012). Natural Recovery of a Mixed Sand and Gravel Beach after a Sequence of a Short Duration Storm and Moderate Sea States. *Journal of Coastal Research*, 28(1), 89–101. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00019.1>
- Bray, M. J., Workman, M., Smith, J., and Pope, D. (1996). Field measurements of shingle transport using electronic tracers. *Proceedings of the 31st MAFF Conference of River and Coastal Engineers*, 10, 1–10.

- Bujan, N., Cox, R., and Masselink, G. (2019). From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size. *Marine Geology*, 417, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106012>
- Buscombe, D., and Masselink, G. (2006). Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 33–52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.003>
- Caldwell, N. E., and Williams, A. T. (1985). The Role of Beach Profile Configuration in the Discrimination between Differing Depositional Environments Affecting Coarse Clastic Beaches. *Journal of Coastal Research*, 1(2), 129–139. <http://www.jstor.org/stable/4297032>
- Cantagrel, J. M., Fuster, J. M., Pin, C., Renaud, U., and Ibarrola, E. (1993). Lower Miocene carbonatites from Fuerteventura (23 Ma: U-Pb, zircon) and the early magmatism of an oceanic island, Canary Islands | Age Miocene inferieur des carbonatites de Fuerteventura (23 Ma: U-Pb zircon) et le magmatisme precoce d'une ile oceanique. *Comptes Rendus - Academie Des Sciences, Serie II*, 316(8), 1147–1153.
- Carr, A. P. (1971). Experiments on longshore transport and sorting of pebbles; Chesil Beach, England. *Journal of Sedimentary Research*, 41(4), 1084–1104. <https://doi.org/10.1306/74D7240A-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Carracedo, J. C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S., Pérez Torrado, F. J., Paris, R., Fra-Paleo, U., and Hansen, A. (2007). Eruptive and structural history of Teide Volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands. *Geological Society of America Bulletin*, 119(9–10), 1027–1051. <https://doi.org/10.1130/B26087.1>
- Carracedo, J. C., Day, S., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Canas, J. A., and Pérez Torrado, F. J. (1998). Hotspot volcanism close to a passive continental margin: The Canary Islands. *Geological Magazine*, 135(5), 591–604. <https://doi.org/10.1017/S0016756898001447>
- Carter, R. W. G., and Orford, J. D. (1984). Coarse Clastic Barrier Beaches: A Discussion of the Distinctive Dynamic and Morphosedimentary Characteristics. *Developments in Sedimentology*, 39(C), 377–389. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)70155-9](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)70155-9)

- Carter, R. W. G., and Orford, J. D. (1993). The Morphodynamics of Coarse Clastic Beaches and Barriers: A Short- and Long-term Perspective. *Journal of Coastal Research*, 158–179. <http://www.jstor.org/stable/25735728>
- Casamayor, M, Alonso, I., Cabrera, J., Rodríguez, S., and Sánchez-García, M.J. (2015). Long term recovery rates obtained using RFID technology at a mixed beach. *Geologica Acta*, 13(2), 85–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2015.13.2.1>
- Casamayor, M., Alonso, I., Sánchez-García, M. J., Montoya-Montes, I., and Rodríguez, S. (2017). Procesos de acumulación y erosión en playas mixtas en relación con el oleaje. *Geo-Temas*, 17, 83–86.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K. D., Robinet, A., Sénéchal, N., and Ferreira, S. (2015). Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238, 135–148. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2015.03.006>
- Chadwick, A. (1989). Field measurements and numerical model verification of coastal shingle transport. *Advances in Water Modelling and Measurement*, 381–402.
- Chapuis, M., Bright, C. J., Hufnagel, J., and MacVicar, B. (2014). Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15), 2109–2120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3620>
- Ciavola, P., and Castiglione, E. (2009). Sediment dynamics of mixed sand and gravel beaches at short time-scales. *Journal of Coastal Research*, 1751–1755. <http://www.jstor.org/stable/25738090>
- Coco, G., Huntley, D. A., and O’Hare, T. J. (2001). Regularity and randomness in the formation of beach cusps. *Marine Geology*, 178(1–4), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00187-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00187-6)

- Coco, G. (2017). Beach Cusps. In J. Guillén, J. Acosta, F. L. Chiocci, and A. Palanques (Eds.), *Atlas of Bedforms in the Western Mediterranean* (pp. 55–57). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33940-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33940-5_10)
- Cooper, J. A. G., and Alonso, I. (2006). Natural and anthropic coasts: challenges for coastal management in Spain. *Journal of Coastal Research*, 1–7. <http://www.jstor.org/stable/25737374>
- Copernicus Marine Service. (2020). *Product user manual for Atlantic -Iberian Biscay Irish-Wave Reanalysis: IBI\_MULTIYEAR\_WAV\_005\_006*. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-IBI-PUM-005-006.pdf>
- Criado, C., Yanes, A., Hernández-Calvento, L., and Alonso, I. (2011). Origen y formación de los depósitos eólicos en Canarias. In E. Sanjaume Saumell and F. J. Gracia Prieto (Eds.), *Las dunas en España* (pp. 447–465). Sociedad Española de Geomorfología.
- Curoy, J. (2012). *Morphological and longshore sediment transport processes on mixed beaches* [Doctoral dissertation]. University of Sussex.
- Curtiss, G. M., Osborne, P. D., and Horner-Devine, A. R. (2009). Seasonal patterns of coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes, wind waves, and tidal currents. *Marine Geology*, 259(1–4), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.12.009>
- Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Cambridge University Press.
- Dawe, I. N. (2006). *Longshore Sediment Transport on a Mixed Sand and Gravel Lakeshore*. [Doctoral dissertation]. University of Canterbury.
- Dean, R. G. (1973). Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone*, 208–214.
- Dickson, M. E., Kench, P. S., and Kantor, M. S. (2011). Longshore transport of cobbles on a mixed sand and gravel beach, southern Hawke Bay, New Zealand. *Marine Geology*, 287(1–4), 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.009>



- Dolphin, T. J., Vincent, C. E., Wihsgott, J., Belhache, M., and Bryan, K. R. (2011). Seasonal rotation of a mixed sand-gravel beach. *Journal of Coastal Research, (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium)*, SI 64(SPEC. ISSUE 64), 65–69. <https://hdl.handle.net/10289/5741>
- Dornbusch, U., Williams, R. B. G., Moses, C., and Robinson, D. A. (2002). Life expectancy of shingle beaches: measuring in situ abrasion. *Journal of Coastal Research*, 36(sp1), 249–255. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.249>
- Elfrink, B., and Baldock, T. (2002). Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45(3–4), 149–167. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00032-7)
- Ferrer-Valero, N. (2018). Measuring geomorphological diversity on coastal environments: A new approach to geodiversity. *Geomorphology*, 318, 217–229. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2018.06.013>
- Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L., and Hernández-Cordero, A. I. (2017). Human impacts quantification on the coastal landforms of Gran Canaria Island (Canary Islands). *Geomorphology*, 286, 58–67. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2017.02.028>
- Flor-Blanco, G., Alcántara-Carrió, J., Jackson, D. W. T., Flor, G., and Flores-Soriano, C. (2021). Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology*, 387, 107767. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2021.107767>
- Flor, G. (2004). *Geología Marina*. Servitec.
- Flor, G., Flor-Blanco, G., Flores-Soriano, C., Alcántara Carrió, J., and Montoya-Montes, I. (2015). Efectos de los temporales de invierno de 2014 sobre la costa asturiana. *Geo-Temas*, 15, 17–20.
- Forbes, D. L., Parkes, G. S., Manson, G. K., and Ketch, L. A. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210(1–4), 169–204. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2004.05.009>

- Fuller, R. M., and Randall, R. E. (1988). The Orford Shingles, Suffolk, UK—Classic conflicts in coastline management. *Biological Conservation*, 46(2), 95–114. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(88\)90094-8](https://doi.org/10.1016/0006-3207(88)90094-8)
- García-Rodríguez, J. L., García-Rodríguez, F., and Castilla-Gutiérrez, C. (2016). Human heritage and sustainable development on arid islands: the case of the Eastern Canary Islands. *Island Studies Journal*, 11(1), 113–130. <https://doi.org/10.24043/isj.337>
- García-Romero, L., Hernández Cordero, A., Fernandez-Cabrera, E., Peña Alonso, C., Hernández-Calvento, L., and Pérez-Chacón, E. (2016). Urban-touristic impacts on the aeolian sedimentary systems of the Canary Islands: Conflict between development and conservation. *Island Studies Journal*, 11(1), 91–112. <https://doi.org/10.24043/isj.336>
- Garín-Muñoz, T. (2006). Inbound international tourism to Canary Islands: a dynamic panel data model. *Tourism Management*, 27(2), 281–291. <https://doi.org/10.1016/J.TOURMAN.2004.10.002>
- Geyer, A., and Martí, J. (2010). The distribution of basaltic volcanism on Tenerife, Canary Islands: Implications on the origin and dynamics of the rift systems. *Tectonophysics*, 483(3–4), 310–326. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2009.11.002>
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., and Trenhaile, A. (2021). Tracking clast mobility using RFID sensors on a boulder beach in Galicia, NW Spain. *Geomorphology*, 373, 107514. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2020.107514>
- Gómez Lahoz, M., and Carretero Albiach, J. C. (2005). Wave forecasting at the Spanish coasts. *Journal of Atmospheric & Ocean Science*, 10(4), 389–405. <https://doi.org/10.1080/17417530601127522>
- Gonçalves, M., Martinho, P., and Guedes Soares, C. (2014). Assessment of wave energy in the Canary Islands. *Renewable Energy*, 68, 774–784. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.017>

- Graham, D. J., and Midgley, N. G. (2000). Graphical representation of particle shape using triangular diagrams: an Excel spreadsheet method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(13), 1473–1477. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200012\)25:13<1473::AID-ESP158>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200012)25:13<1473::AID-ESP158>3.0.CO;2-C)
- Grottoli, E., Bertoni, D., and Ciavola, P. (2017). Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches. *Geomorphology*, 295, 738–748. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.007>
- Grottoli, E., Bertoni, D., Ciavola, P., and Pozzebon, A. (2015). Short term displacements of marked pebbles in the swash zone: Focus on particle shape and size. *Marine Geology*, 367, 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.06.006>
- Grottoli, E., Bertoni, D., Pozzebon, A., and Ciavola, P. (2019). Influence of particle shape on pebble transport in a mixed sand and gravel beach during low energy conditions: Implications for nourishment projects. *Ocean and Coastal Management*, 169, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.014>
- Guest, T. B., and Hay, A. E. (2019). Timescales of beach cusp evolution on a steep, megatidal, mixed sand-gravel beach. *Marine Geology*, 416, 105984. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.105984>
- Guisado-Pintado, E. (2020). Shallow water wave modelling in the nearshore (SWAN). In D. Jackson and A. D. Short (Eds.), *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 391–419). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00017-5>
- Guza, R T, and Thornton, E. B. (1982). Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C1), 483–491. <https://doi.org/10.1029/JC087iC01p00483>
- Guza, R. T, and Inman, D. L. (1975). Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 80(21), 2997–3012. <https://doi.org/10.1029/JC080i021p02997>
- Hamylton, S. M. (2017). *Spatial Analysis of Coastal Environments*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781107707412>

- Hastewell, L. J., Schaefer, M., Bray, M., and Inkpen, R. (2019). Intertidal boulder transport: A proposed methodology adopting Radio Frequency Identification (RFID) technology to quantify storm induced boulder mobility. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(3), 681–698. <https://doi.org/10.1002/esp.4523>
- Hattori, M., and Suzuki, T. (1978). Field experiment on beach gravel movement. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(16 SE-Conference Proceedings). <https://doi.org/10.9753/icce.v16.101>
- Herbich, J. B. (2000). *Handbook of Coastal Engineering*. McGraw-Hil.
- Hernández-Calvento, L., Ruíz, P., Alonso, I., Alcántara-Carrió, J., Pérez-Chacón, E., and Suarez, C. (2005). Transformaciones ambientales en ecosistemas dunares producidas por el desarrollo turístico: el ejemplo de Maspalomas (Gran Canaria Islas Canarias). In E. Sanjaume & J. F. Mateu (Eds.), *Geomorfología litoral y Cuaternari* (pp. 203–214).
- Holland, K. T., and Elmore, P. A. (2008). A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth-Science Reviews*, 89(3–4), 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.003>
- Holland, K. T., and Holman, R. A. (1996). Field observations of beach cusps and swash motions. *Marine Geology*, 134(1–2), 77–93. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(96\)00025-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(96)00025-4)
- Horn, D. P., and Li, L. (2006). Measurement and modelling of gravel beach groundwater response to wave run-up: Effects on beach profile changes. *Journal of Coastal Research*, 22(5), 1241–1249. <https://doi.org/https://doi.org/10.2112/06A-0006.1>
- Horn, D. P., and Walton, S. M. (2007). Spatial and temporal variations of sediment size on a mixed sand and gravel beach. *Sedimentary Geology*, 202(3), 509–528. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.023>
- Hughes, M., and Cowell, P. J. (1987). Adjustment of Reflective Beaches to Waves. *Journal of Coastal Research*, 3(2), 153–167. <http://www.jstor.org/bibproxy.ulpgc.es/stable/4297271>

- ISTAC. (2018). *Instituto Canario de Estadística*. Gobierno de Canarias. <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/>
- Ivamy, M. C., and Kench, P. S. (2006). Hydrodynamics and morphological adjustment of a mixed sand and gravel beach, Torere, Bay of Plenty, New Zealand. *Marine Geology*, 228(1–4), 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.01.002>
- Jackson, N. L., and Nordstrom, K. F. (2020). Trends in research on beaches and dunes on sandy shores, 1969–2019. *Geomorphology*, 366, 106737. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2019.04.009>
- Jennings, R., and Shulmeister, J. (2002). A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186(3–4), 211–228. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00314-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00314-6)
- Johnson, M. (2010). The use of Passive Integrated Transponder (PIT) systems for tracing particles and organisms in rivers. In *Geomorphological Techniques* (p. 6). British Society for Geomorphology. [https://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/chapters/3.3.9\\_TracingParticles&OrganismsInRivers.pdf](https://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/chapters/3.3.9_TracingParticles&OrganismsInRivers.pdf)
- Jolliffe, I. P. (1964). An experiment designed to compare the relative rates of movement of different sizes of beach pebble. *Proceedings of the Geologists' Association*, 75(1), 67–86. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(64\)80012-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(64)80012-2)
- Kirk, R. M. (1970). *Swash zone processes: An examination of water motion and the relations between water motion and foreshore response on some mixed sand and shingle beaches, Kaikoura, New Zealand* [Doctoral dissertation]. University of Canterbury. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26021/5620>
- Kirk, R. M. (1992). Experimental beach reconstruction-renourishment on mixed sand and gravel beaches, Washdyke Lagoon, South Canterbury, New Zealand. *Coastal Engineering*, 17(3–4), 253–277. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(92\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90054-X)
- Komar, P. D. (1998). *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall.

- Komar, P. D., and Allan, J. C. (2010). “Design with Nature” Strategies for Shore Protection: The Construction of a Cobble Berm and Artificial Dune in an Oregon State Park. In H. Shipman, M. N. Dethier, G. Gelfenbaum, K. L. Fresh, and R. S. Dinicola (Eds.), *Proceedings of a State of the Science Workshop* (pp. 117–126). U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. [https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5254/pdf/sir20105254\\_chap12.pdf](https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5254/pdf/sir20105254_chap12.pdf)
- Komar, P. D., and Gaughan, M. K. (1972). Airy wave theory and breaker height prediction. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(13 SE-Conference Proceedings). <https://doi.org/10.9753/icce.v13.20>
- Komen, G. J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. PHYS. OCEANOGR.*, 14(8, Aug. 1), 1271–1285. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1271:oteoaf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:oteoaf>2.0.co;2)
- Kraus, N. C. (1987). Application of Portable Traps for Obtaining Point Measurements of Sediment Transport Rates in the Surf Zone. *Journal of Coastal Research*, 3(2), 139–152. <http://www.jstor.org/stable/4297270>
- Krumbein, W. C. (1936). Application of logarithmic moments to size-frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 6(1), 35–47. <https://doi.org/10.1306/D4268F59-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Krumbein, W. C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 11(2), 64–72. <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Lamarre, H., MacVicar, B., and Roy, A. G. (2005). Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75(4), 736–741. <https://doi.org/10.2110/jsr.2005.059>
- López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., and Losada, M. A. (2020). Mixed sand and gravel beaches. In D.Jackson and A.D.Short (Eds), *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 317–341). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102927-5.00014-x>

- López de San Román-Blanco, B., Coates, T. T., Holmes, P., Chadwick, A. J., Bradbury, A., Baldock, T. E., Pedrozo-Acuña, A., Lawrence, J., and Grüne, J. (2006). Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental procedure, data documentation and initial results. *Coastal Engineering*, 53(4), 349–362. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.021>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., and Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8, 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Maestro-González, A., Medialdea-Cela, T., Llave-Barranco, E., Somoza-Losada, L., and León-Buendía, R. (2005). El margen continental de las Islas Canarias. In A. Martín Serrano (Ed.), *Mapa Geomorfológico de España y del margen continental a escala 1:1000000* (pp. 229–232). IGME.
- Mangas Viñuela, J. (2020). Génesis y evolución geológica de Gran Canaria: un buen ejemplo de la geodiversidad de una isla volcánica intraplaca oceánica. In J. M. Afonso Carrillo (Ed.), *Actas de la XV Semana Científica Telesforo Bravo: Gran Canaria. Las huellas del tiempo* (pp. 61–113). Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/75225#.YAq7YZcnFyk.mendeley>
- Marrero, N., Montoya Montes, I., and Alonso, I. (2017). Evolución de la línea de costa de Tazacorte entre 1964 y 2015 (La Palma, Islas Canarias). *Geo-Temas*, 17, 247–250.
- Mason, T., and Coates, T. T. (2001). Sediment Transport Processes on Mixed Beaches: A Review for Shoreline Management. *Journal of Coastal Research*, 17(3), 645–657. <http://www.jstor.org/stable/4300216>
- Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M., and Conley, D. (2016). The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(3), 378–391. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3836>

- Masselink, G., and Hughes, M. (1998). Field investigation of sediment transport in the swash zone. *Continental Shelf Research*, 18(10), 1179–1199. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00027-2)
- Masselink, G., Russell, P., Blenkinsopp, C., and Turner, I. (2010). Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach. *Marine Geology*, 274(1–4), 50–68. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE0.2010.03.005>
- Masselink, G., Russell, P., Coco, G., and Huntley, D. (2004). Test of edge wave forcing during formation of rhythmic beach morphology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JC002339>
- Masselink, G., and 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. <http://www.jstor.org/stable/4298129>
- Masson, D. G., Watts, A. B., Gee, M. J. R., Urgeles, R., Mitchell, N. C., Le Bas, T. P., and Canals, M. (2002). Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth-Science Reviews*, 57(1–2), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00069-1)
- Mattews, E. (1983). Measurements of beach pebble attrition in Palliser Bay, southern North Island, New Zealand. *Sedimentology*, 30(6), 787–799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00711.x>
- McLean, R. F., and Kirk, R. M. (1969). Relationships between grain size, size-sorting, and foreshore slope on mixed sand - shingle beaches. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 12(1), 138–155. <https://doi.org/10.1080/00288306.1969.10420231>
- McLean, R. F. (1970). Variations in grain-size and sorting on two kaikoura beaches. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 4(2), 141–164. <https://doi.org/10.1080/00288330.1970.9515334>
- Medellín, G., and Torres-Freyermuth, A. (2019). Morphodynamics along a micro-tidal sea breeze dominated beach in the vicinity of coastal structures. *Marine Geology*, 417, 106013. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE0.2019.106013>



- Medina, R., Bastón, S., Cánovas, V., Torres, A., Luque, A., and Alonso, I. (2006). *Estudio Integral de la Playa de Las Canteras* [Technical report].
- Menéndez, I., Silva, P. G., Martín-Betancor, M., Pérez-Torrado, F. J., Guillou, H., and Scaillet, S. (2008). Fluvial dissection, isostatic uplift, and geomorphological evolution of volcanic islands (Gran Canaria, Canary Islands, Spain). *Geomorphology*, 102(1), 189–203. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2007.06.022>
- Miller, I. M., and Warrick, J. A. (2012). Measuring sediment transport and bed disturbance with tracers on a mixed beach. *Marine Geology*, 299–302, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.01.002>
- Miller, I. M., Warrick, J. A., and Morgan, C. (2011). Observations of coarse sediment movements on the mixed beach of the Elwha Delta, Washington. *Marine Geology*, 282(3–4), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.02.012>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2008). *Estudio Ecocartográfico de la zona norte del litoral de la isla de Gran Canaria (Las Palmas)* [Technical report].
- Morales, G., and Santana, A. (1993). Procesos de construcción y transformación del espacio litoral grancanario inducido por el fenómeno turístico. *Ería*, 0(32 SE-), 225–246. <https://doi.org/10.17811/er.0.1993.225-246>
- Moreno Gil, S. (2003). Tourism Development in the Canary Islands. *Annals of Tourism Research*, 30(3), 744–747. [https://doi.org/10.1016/S0160-7383\(03\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0160-7383(03)00050-1)
- Nielsen, P., and Hanslow, D. J. (1991). Wave Runup Distributions on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research*, 7(4), 1139–1152. <http://www.jstor.org/stable/4297933>
- Nolan, T. J., Kirk, R. M., and Shulmeister, J. (1999). Beach cusp morphology on sand and mixed sand and gravel beaches, South Island, New Zealand. *Marine Geology*, 157(3–4), 185–198. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00150-9)

- Oglialoro, E., Frezzotti, M. L., Ferrando, S., Tiraboschi, C., Principe, C., Groppelli, G., and Villa, I. M. (2017). Lithospheric magma dynamics beneath the El Hierro Volcano, Canary Islands: insights from fluid inclusions. *Bulletin of Volcanology*, 79(10), 70. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1152-6>
- Orford, J.D., and Anthony, E. (2013). Coastal Gravel Systems. In J. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology* (Vol. 10, pp. 245–266). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00280-3>
- Orford, J. D. (1975). Discrimination of particle zonation on a pebble beach. *Sedimentology*, 22(3), 441–463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1975.tb01640.x>
- Osborne, P. D. (2005). Transport of gravel and cobble on a mixed-sediment inner bank shoreline of a large inlet, Grays Harbor, Washington. *Marine Geology*, 224(1–4), 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.08.004>
- Parra-López, E., and Baum, T. (2004). An analysis of supply-side relationships in small island destinations: The role of tour operators, travel agencies and tourism transport in the Canary Islands. *Tourism and Hospitality Planning & Development*, 1(3), 201–218. <https://doi.org/10.1080/1479053042000314485>
- Payo, A., Wallis, H., Ellis, M. A., Barkwith, A., and Poate, T. (2020). Application of portable streamer traps for obtaining point measurements of total longshore sediment transport rates in mixed sand and gravel beaches. *Coastal Engineering*, 156, 103580. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2019.103580>
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Chadwick, A. J., and Silva, R. (2007). A numerical-empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand-gravel beaches. *Marine Geology*, 241(1–4), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.02.013>
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Otta, A. K., and Chadwick, A. J. (2006). On the cross-shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*, 53(4), 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.019>

- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., and Reeve, D. E. (2008). Wave-impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches. *Marine Geology*, 253(1–2), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.04.013>
- Pitman, S., Hart, D., and Katurji, M. (2019). Beach cusp morphodynamics on a composite beach observed using UAV structure from motion. *Australasian Coasts & Ports*.
- Poate, T., McCall, R. T., and Masselink, G. (2016). A new parameterisation for runup on gravel beaches. *Coastal Engineering*, 117, 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.003>
- Pontee, N. I., Pye, K., and Blott, S. J. (2004). Morphodynamic Behaviour and Sedimentary Variation of Mixed Sand and Gravel Beaches, Suffolk, UK. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 256–276. <http://www.jstor.org/stable/4299281>
- Powell, K. A. (1990). *Predicting short term profile response for shingle beaches* [Technical report]. Hydraulics Research. Wallingford.
- Puertos del Estado. (2018). *Clima medio de oleaje. Nodo SIMAR 4035011* [Technical report]. [https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/medios/MED\\_1\\_8\\_4035011.pdf](https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/medios/MED_1_8_4035011.pdf)
- Puertos del Estado. (2019). *REDMAR: Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria* [Technical report]. [https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/globales/GLOB\\_2\\_3\\_3450.pdf](https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/globales/GLOB_2_3_3450.pdf)
- Puertos del Estado. (2020). *Conjunto de datos SIMAR*. [https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT\\_8.pdf](https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT_8.pdf)
- Pye, K. (2001). The nature and geomorphology of coastal shingle. In J. Packham, R. Randall, R. S. K. Barnes, and A. Neal (Eds.), *Ecology and Geomorphology of Coastal Shingle* (pp. 2–22). Smith Settle.

- Rivera, J., Hermida, N., Arrese, B., González-Aller, D., Sánchez de Lamadrid, J. L., Gutiérrez de la Flor, D., and Acosta, J. (2014). Bathymetry of a new-born submarine volcano: El Hierro. Canary Islands. *Journal of Maps*, 10(1), 82–89. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.849620>
- Roberts, T. M., Wang, P., and Puleo, J. A. (2013). Storm-driven cyclic beach morphodynamics of a mixed sand and gravel beach along the Mid-Atlantic Coast, USA. *Marine Geology*, 346, 403–421. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.001>
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J., and Beach, R. A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. *Journal of Coastal Research*, 17(2), 407–419. <http://www.jstor.org/stable/4300192>
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., and Masselink, G. (2010). Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. *Marine Geology*, 278(1–4), 77–99. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.09.004>
- Sánchez-García, M. J., Quartao, R., Alonso, I., Montoya-Montes, I., Casamayor, M., and Rodríguez, S. (2017). Rasgos morfológicos del margen insular de la isla de Gran Canaria. In G. Pons Buades, J. Lorenzo-Lacruz, & L. Gómez Pujol (Eds.), *Geotemas* (pp. 331–334). Sociedad Geológica de España.
- Schmincke, H.U. (1982). Volcanic and Chemical Evolution of the Canary Islands. In von Rad Ulrich, K. and Hinz, and S. Michael, and S. Eugen (Eds.), *Geology of the Northwest African Continental Margin* (pp. 273–306). Springer Berlin Heidelberg.
- Sear, D., Lee, M. W. E., Oakley, R. J., Carling, P., and Collins, M. B. (2002). Coarse sediment tracing technology in littoral and fluvial environments a review. In I. Foster (Ed.), *Tracers in the environment* (pp. 21–55). Wiley and Sons.
- Sénéchal, N., Castelle, B., and Bryan, K. R. (2017). Storm Clustering and Beach Response. In P. Ciavola and G. Coco (Eds.), *Coastal Storms: Processes and Impacts* (pp. 151–174). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118937099.ch8>

- Sherman, D.J. (2013). Perspectives on Coastal Geomorphology: Introduction. In J. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology* (Vol. 10, pp. 1–4). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00269-4>
- Sherman, D. J, Orford, J. D., and Carter, R. W. G. (1993a). Development of cusp-related, gravel size and shape facies at Malin Head, Ireland. *Sedimentology*, 40(6), 1139–1152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1993.tb01384.x>
- Sherman, D. J, Short, A. D., and Takeda, I. (1993b). Sediment Mixing-Depth and Bedform Migration in RIP Channels. *Journal of Coastal Research*, 39–48. <http://www.jstor.org/stable/25735722>
- Short, A. D. (1999). Beaches. In A. D. Short (Ed.), *Handbook of beach and shorface morphodynamics* (pp. 3–20). John Wiley.
- Sneed, E. D., and Folk, R. L. (1958). Pebbles in the Lower Colorado River, Texas a Study in Particle Morphogenesis. *The Journal of Geology*, 66(2), 114–150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1086/626490>
- Sonu, C. J., Murray, S. P., Hsu, S. A., Suhayda, J. N., and Waddell, E. (1973). Sea breeze and coastal processes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 54(9), 820–833. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/EO054i009p00820>
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/10.1680/doms.25844>
- Stark, N., and Hay, A. E. (2016). Pebble and cobble transport on a steep, mega-tidal, mixed sand and gravel beach. *Marine Geology*, 382, 210–223. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE0.2016.10.012>
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

- Stokes, C., Russell, P., and Davidson, M. (2016). Subtidal and Intertidal Three-Dimensionality at a High Energy Macrotidal Beach. In A. Vila-Concejo, E. Bruce, D. M. Kennedy, & R. J. McCarroll (Eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium* (Vol. 75, Issue 10075, pp. 472–476). Journal of Coastal Research. <https://doi.org/https://doi.org/10.2112/SI75-095.1>
- Urgeles, R., Canals, M., Baraza, J., Alonso, B., and Masson, D.G. (1997). The most recent megalandslides of the Canary Islands: El Golfo debris avalanche and Canary debris flow, west El Hierro Island. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20305–20323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/97JB00649>
- Valiente, N. G., McCarroll, R. J., Masselink, G., Scott, T., and Wiggins, M. (2019). Multi-annual embayment sediment dynamics involving headland bypassing and sediment exchange across the depth of closure. *Geomorphology*, 343, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.020>
- Van Wellen, E., Chadwick, A. J., and Mason, T. (2000). A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering*, 40(3), 243–275. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00031-4)
- Voulgaris, G., Workman, M., and Collins, M. B. (1999). Measurement Techniques of Shingle Transport in the Nearshore Zone. *Journal of Coastal Research*, 15(4), 1030–1039. <http://www.jstor.org/stable/4299022>
- Walker, J. R., Everts, C. H., Schmelig, S., and Demirel, V. (1991). Observations of a tidal inlet on a shingle beach. *Proceedings of Coastal Dynamics '91*, 975–989.
- Watt, T., Robinson, D. A., Moses, C. A., and Dornbusch, U. (2008). Patterns of surface sediment grain size distribution under the influence of varying wave conditions on a mixed sediment beach at Pevensey Bay, southeast England. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 52(3), 63–77. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2008/0052S3-0063>
- Wiggins, M., Scott, T., Masselink, G., McCarroll, R. J., and Russell, P. (2020). Predicting beach rotation using multiple atmospheric indices. *Marine Geology*, 426, 106207. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE.2020.106207>

- Wiggins, M., Scott, T., Masselink, G., Russell, P., and McCarroll, R. J. (2019a). Coastal embayment rotation: Response to extreme events and climate control, using full embayment surveys. *Geomorphology*, 327, 385–403. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2018.11.014>
- Wiggins, M., Scott, T., Masselink, G., Russell, P., and Valiente, N. G. (2019b). Regionally-Coherent Embayment Rotation: Behavioural Response to Bi-Directional Waves and Atmospheric Forcing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/jmse7040116>
- Williams, A. T., and Caldwell, N. E. (1988). Particle size and shape in pebble-beach sedimentation. *Marine Geology*, 82(3–4), 199–215. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90141-7](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90141-7)
- Wright, L. D., and Short, A. D. (1983). Morphodynamics of Beaches and Surf Zones in Australia. In P. D. Komar (Ed.), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion* (p. 30).
- Wright, L. D., and Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1–4), 93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)
- Wright, L. D., and Thom, B. G. (1977). Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1(3), 412–459. <https://doi.org/10.1177/030913337700100302>

# Lista de símbolos y abreviaturas

$\rho$	Water density / <i>Densidad del agua</i>
$g$	Gravity / <i>Gravedad</i>
$\pi$	Pi number / <i>Número pi</i>
$D_{10}$	10th percentile of grain size distribution / <i>Percentil 10 de la distribución de tamaño de grano</i>
$D_{50}$	Median sediment size / <i>Tamaño medio de grano</i>
$D_{90}$	90th percentile of grain size distribution / <i>Percentil 90 de la distribución de tamaño de grano</i>
$\phi$	Phi sediment size / <i>Tamaño de grano en unidades phi</i>
$W$	Particle weight / <i>Peso de la partícula</i>
$\phi_w$	Phi-weight / <i>Peso de las partículas en unidades phi de peso</i>
$\tan \beta$	Beach face slope / <i>Pendiente del frente de playa</i>
$\Sigma \Delta V$	Cumulative volume change of the beach / <i>Cambios volumétricos acumulativos de la playa</i>
$\Sigma \Delta V_{low}$	Cumulative volume change of the lower part of the beach / <i>Cambios volumétricos acumulativos de la parte inferior de la playa</i>
$\Sigma \Delta V_{up}$	Cumulative volume change of the upper part of the beach / <i>Cambios volumétricos acumulativos de la parte superior de la playa</i>



$\Delta x$	Longshore transport component / <i>Componente longitudinal del transporte</i>
$\Delta y$	Cross-shore transport component / <i>Componente transversal del transporte</i>
$H_s$	Significant wave height / <i>Altura de ola significativa</i>
$H_b$	Breaking wave height / <i>Altura de ola en rotura</i>
$T_p$	Peak period / <i>Periodo de pico</i>
$T_e$	Energy period / <i>Periodo de energía</i>
$Dir$	Wave direction / <i>Dirección de procedencia del oleaje</i>
$L$	Wavelength / <i>Longitud de onda</i>
$L_0$	Wavelength in deep water / <i>Longitud de onda en aguas profundas</i>
$E$	Wave energy / <i>Energía del oleaje</i>
$P$	Wave power / <i>Potencia del oleaje</i>
$E_{cum}$	Cumulative integral of wave energy / <i>Energía acumulativa del oleaje</i>
$P_{cum}$	Cumulative integral of wave power / <i>Potencia acumulativa del oleaje</i>
$R_p$	Poate's run-up / <i>Run-up calculada con la ecuación de Poate</i>
$R_s$	Stockdon's run-up / <i>Run-up calculada con la ecuación de Stockdon</i>
$\xi_b$	Breaking Iribarren number / <i>Número de Iribarren en la zona de rompiente</i>
$\varepsilon$	Surf scaling parameter / <i>Parámetro de surf scaling</i>
$\Omega$	Dean's parameter / <i>Parámetro de Dean</i>

$\Omega_{sand}$	Sand Dean's parameter / <i>Parámetro de Dean para sedimento tipo arena</i>
$\Omega_{pebble}$	Pebbel Dean's parameter / <i>Parámetro de Dean para sedimento tipo cantos</i>
$\omega_s$	Sediment fall velocity / <i>Velocidad de caída del sedimento</i>
r	Correlation coefficient / <i>Coeficiente de correlación</i>
RMSE	Root-mean-square error / <i>Error cuadrático medio</i>
GDP / PIB	Gross domestic product / <i>Producto interior bruto</i>
MLWS	Mean low water spring / <i>Bajamar media en mareas vivas</i>
MSL	Mean sea level / <i>Nivel medio del mar</i>
SWAN	Simulating waves nearshore model / <i>Modelo de propagación de aguas someras</i>
IBI	Iberia – Biscay – Irish Region / <i>Región Ibérica – Vizcaína - Irlandesa</i>
RFID	Radio Frequency Identification / <i>Identificación de frecuencia de radio</i>
PIT	Passive Integrated transponder / <i>Transpondedores pasivos</i>
GIS / SIG	Geographic information system / <i>Sistemas de información geográfica</i>
DEM / MDE	Digital elevation model / <i>Modelo digital de elevaciones</i>
DTM / MDT	Digital terrain model / <i>Modelo digital del terreno</i>
CG	Composite gravel beach / <i>Playa compuesta</i>
MSG	Mixed sand and gravel beach / <i>Playa mixta de arena y cantos</i>
PG	Pure gravel beach / <i>Playa pura de cantos</i>



# Anexo I

## Otras contribuciones

### Artículos indexados

- Marrero-Rodríguez, N., **Casamayor, M.**, Sánchez-García, M.J. and Alonso, I. (2021). Can long-term beach erosion be solved with soft management measures? Case study of the protected Jandía beaches. *Geomorphology*, 314, 105346. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105946>
- Montoya-Montes, I., Sánchez-García, M.J., Alonso, I., **Casamayor, M.**, and Rodríguez Santalla, I. (2018). Rocky Coast in Catalonia. In: J. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems* (pp. 93-113). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_5)
- Sánchez-García, M.J., Montoya-Montes, I., **Casamayor, M.**, Alonso, I., and Rodríguez Santalla, I. (2018). Coastal Dunes in the Ebro Delta. In: J. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems* (pp. 611-630). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_26)

## Otras publicaciones

**Casamayor, M.,** Alonso, I., Sánchez-García, M.J., Montoya-Montes, I. and Rodríguez, S. (2017). Procesos de acumulación y erosión en playas mixtas en relación con el oleaje. In: G. Pons Buades, J. Lorenzo-Lacruz and L. Gómez Pujol (Eds.), *Geo-Temas*, 17, (pp. 83-86). Sociedad Geológica de España. ISSN: 1576-5172.

**Casamayor, M.,** Alonso, I., Sánchez-García, M.J., Cabrera, J. and Rodríguez, S. (2015). Medición del transporte transversal de canto en la playa de San Felipe (Gran Canaria). In: G. Malvárez, F. Navas and E. Guisado Pintado (Eds.), *Geo-Temas*, 15, (pp. 5-8). Sociedad Geológica de España. ISSN: 1576-5172.

**Casamayor, M.,** Alonso, I. and Mangas, J. (2013). Caracterización morfométrica de los cantos en la playa de San Felipe, Gran Canaria. In: G. Flor Rodríguez, G. Flor-Blanco and L. A. Pando González (Eds.), *Geo-Temas*, 14, (pp. 83-86). Sociedad Geológica de España. ISSN: 1576-5172.

## Anexo II

# Caracterización morfométrica de los cantos en la playa de San Felipe, Gran Canaria

Geo-Temas, julio 2013

ISSN: 1576-5172

---

*Mariona Casamayor<sup>a,\*</sup>, Ignacio Alonso<sup>a</sup> and José Mangas<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

\*marionacasamayor@gmail.com

---

**Resumen:** Este trabajo describe las principales características morfológicas y composicionales de 200 cantos recogidos en la playa de San Felipe, en la costa norte de Gran Canaria. Los cantos analizados se han clasificado según su naturaleza en dos tipos de rocas, félsicas y máficas, lo cual depende tanto de los materiales que delimitan la playa como de los aportes del barranco de San Felipe que desemboca en esta misma playa. Las densidades medias obtenidas son de 2,6 g/cm<sup>3</sup>, para los materiales félsicos y 3,0 g/cm<sup>3</sup>, para los máficos. En función de la clasificación de Zingg, las formas predominantes son la tabular u oblada, equidimensional y alargada. El área de estudio presenta una distribución uniforme, respecto a la morfología y composición de los cantos, lo que es debido al oleaje incidente. Sin embargo, existe una pequeña diferenciación entre la zona oriental y occidental, que puede ser originada por la presencia de una deriva de playa este-oeste.

**Palabras clave:** playa mixta, densidad, morfología, composición, oleaje

## INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se encuentra en la costa norte de la isla de Gran Canaria (Fig. 1). Tiene una longitud aproximada de 170 m, y se encuentra en el límite occidental de la playa de San Felipe, cuya longitud total es de 460 m. Los materiales presentes en la playa son arenas y cantos, aunque también se pueden encontrar grandes bloques redondeados.

### Marco geológico

La playa de San Felipe es una playa mixta que está constituida mayoritariamente por cantos de tipo fonolítico y basáltico. Además, hay arenas finas de color negro, principalmente originadas por la erosión de los basaltos (Balcells y Barrera, 1990). Los cantos están distribuidos entre el supramareal y el intermareal, mientras que las arenas predominan en la zona submareal.

En un contexto general, la playa se encuentra rodeada por depósitos coluviales y derrubios de laderas procedentes del acantilado que limita la playa por el

sur. El extremo oeste está delimitado por una colada de lavas basálticas olivínico-piroxénicas, pertenecientes al ciclo del Roque Nublo, Plioceno, que se adentra en el mar. Asimismo, existen coladas fonolíticas del Mioceno.

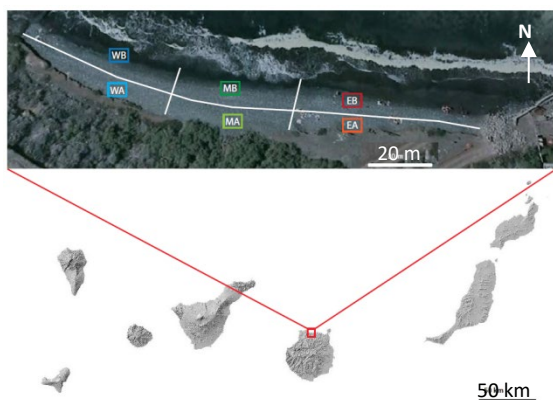


FIGURA 1. Localización del área de estudio. Las líneas blancas representan la división de las seis zonas. A: por encima de la berma, B: por debajo de la berma, W: oeste, E: este, M: zona media.

Dichas coladas han sido erosionadas por el mar, dando lugar a la formación de rasas marinas, que en su gran mayoría están cubiertas por cultivos y núcleos poblacionales. En el sector oriental de la playa desemboca el barranco de San Felipe (también conocido como Calabozo), cuya longitud es de 8.600 m, con un desnivel máximo de 817 m (Menéndez *et al.*, 2008). El barranco discurre por distintos materiales donde destacan las lavas basálticas olivínico-piroxénicas y tefríticas (ciclo post Roque Nublo, Plioceno y

Pleistoceno), así como lavas fonolíticas e ignimbritas del Mioceno Superior.

### Régimen medio de oleaje y temporales

El oleaje dominante en el área de estudio procede del NNE. El valor medio de altura de ola significativa es 1,67 m en verano y 1,17 m en invierno, mientras que el periodo de pico presenta una estacionalidad mucho más marcada, con valores medios de 8,06 s en verano y 9,84 s en invierno (Fig. 2).

Sin embargo, de octubre hasta marzo es frecuente la presencia de temporales que generan alturas ola máxima superiores a 5 m. En el periodo comprendido entre 01/07/2010 y 31/07/2012 se registraron dos temporales: el primero tuvo lugar el 10/10/10, y alcanzó alturas de ola máxima de 6,1 m, valores de  $T_p = 14,16$  s y dirección de aproximación  $344^\circ N$ . El segundo se presentó el 05/02/2012 y presentó valores de  $H_{max} = 8,1$  m,  $T_p = 9,34$  s y dirección  $41^\circ N$ .

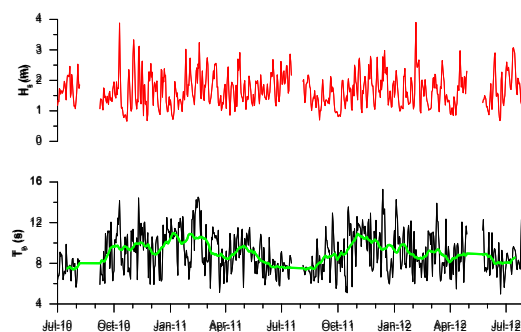


FIGURA 2. Valores medios diarios de altura de ola significativa y periodo de pico desde julio de 2010 hasta julio 2012. La línea verde representa la media móvil con una ventana de 33 datos. Valores registrados en la boya Gran Canaria, situada al oeste del área de estudio (Datos cedidos por Puertos del Estado).

El objetivo de este trabajo es la caracterización morfométrica de los cantos de la playa de San Felipe, y las variaciones espaciales en forma, tamaño y composición que existen.

## METODOLOGÍA

El área de estudio se ha sectorizado en seis zonas, en función de la berma (arriba y abajo) y de la longitud (oeste, medio y este). Se tomaron 33 ó 34 cantos distribuidos de forma aleatoria en cada uno de estos sectores previamente establecidos. En total se recogieron 200 cantos cuyo peso oscilaba entre 82,3 y 2.836,76 g, siendo el peso medio de 450,6 g.

### Composición

La composición básica de cada uno de los cantos fue determinada mediante análisis *a visu* con apoyo de una lupa de mano.

#### Morfología

La medición de los tres ejes (largo, l; intermedio, i y corto, c) se realizó mediante un pie de rey con precisión de 0,1 mm (Fig. 3a).

#### Densidad

El procedimiento establecido para el cálculo de la densidad está basado en el método descrito por Hughes (1963), cuya finalidad es obtener la densidad de los cantos a través de la pesada. Para ello, es necesario calcular la densidad del agua mediante picnómetros.

Una vez hallada la densidad del agua, se realizan tres pesadas (Fig. 3b, c, d), con precisión de 0,01 g. En la primera se pesa el canto, previamente remojado en agua para colmar los espacios vacuolares. La segunda consiste en enrasar con agua el vaso de precipitado, mientras que en la tercera se pesa el canto dentro del vaso y se enrasa con agua.



FIGURA 3. a) Medición de los ejes con un pié de rey. b) Primera pesada: canto. c) Segunda pesada: vaso enrasado de agua. d) Tercera pesada: vaso con el canto en su interior y enrasado con agua.

La pérdida de peso que experimenta el canto es igual al peso del agua desplazada, y conociendo la densidad del agua, se establece el

volumen del agua desplazada, que a su vez es igual al volumen del canto. Es necesario adaptar la capacidad del vaso de precipitado en función del tamaño del canto, para mejorar la precisión de los resultados.

Una vez conocido el volumen del canto la determinación de la densidad es automática a partir del peso de cada partícula. No se puede calcular la densidad de los tres cantos de mayor tamaño, dado que no pudo obtenerse el valor de la tercera pesada al superarse el límite de detección de la báscula (4,2 kg).

## RESULTADOS

### Composición

La Tabla I sintetiza las características composicionales observadas para el total de los 200 cantos analizados. Existen dos tipos de rocas, las félsicas y las máficas. Dentro de las félsicas destacan por su abundancia las fonolitas, con gran presencia en el área de estudio, que presentan un color gris verdoso muy característico. Por el contrario, los basaltos son rocas máficas que tienen colores más oscuros. En los basaltos olivínicos se especifica el tipo de olivino, si se encuentra alterado (colores amarillentos) o fresco (colores verdosos), ya que en función de esta característica es posible establecer su edad aproximada. Los basaltos con olivinos alterados proceden del ciclo del Roque Nublo (Plioceno), mientras que los frescos pertenecen al ciclo post Roque Nublo (Plioceno y Pleistoceno).

Tipo roca	Categoría	Cantidad
Félsica	Fonolita	92
Félsica	Fonolita con cristales de feldespato	3
Félsica	Tefrita-fonolita	4
Félsica	Tefrita-fonolita con cristales de feldespato	1
Félsica	Ignimbrita	2
Máfica	Basalto olivínico (olivino alterado o fresco)	42
Máfica	Basalto olivínico (a o f) ligeramente vacuolar y vacuolar	4
Máfica	Basalto olivínico (a)-plagioclásico con xenolitos de roca plutónica	1
Máfica	Basalto olivínico (a o f)-piroxénico	31
Máfica	Basalto olivínico (a o f)-piroxénico ligeramente vacuolar y vacuolar	15
Máfica	Basalto olivínico (alterado) con zeolitas	3
Máfica	Basalto olivínico-piroxénico-plagioclásico	1
Máfica	Basalto ligeramente vacuolar y afanítico	1



TABLA I. Resumen de las principales características composicionales de los cantos. El olivino puede ser fresco (f) o alterado(a).

**Morfología**

Una de las técnicas de clasificación de cantos es el índice de Zingg (Zingg, 1935; citado por Curtiss *et al.*, 2009), basado en la representación de los índices de aplanamiento (eje corto/eje intermedio) vs elongación (eje intermedio/eje largo).

La Fig. 4 muestra la representación gráfica del valor medio de los índices de aplanamiento y elongación para cada uno de los seis sectores considerados.

**Densidad**

Los valores de densidad obtenidos muestran claramente dos intervalos muy bien definidos: el primero de 2,5 a 2,7 g/cm<sup>3</sup>, y el segundo de 2,8 a 3,0 g/cm<sup>3</sup>, correspondiendo a los dos tipos de rocas existentes en la playa, félsicas y máficas, respectivamente (Fig. 5).

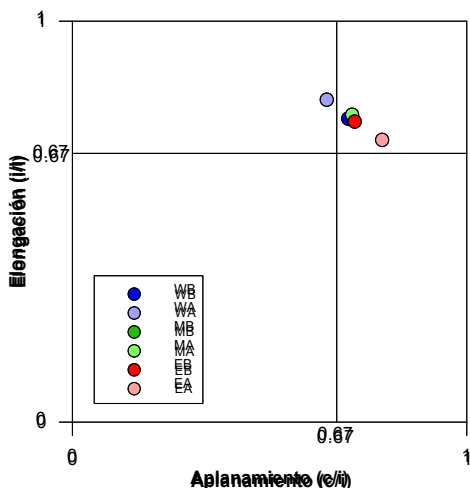


FIGURA 4. Clasificación de Zingg para cada una de las subdivisiones del área de estudio. A: por encima de la berma, B: por debajo de la berma, W: oeste, E:este, M: zona media.

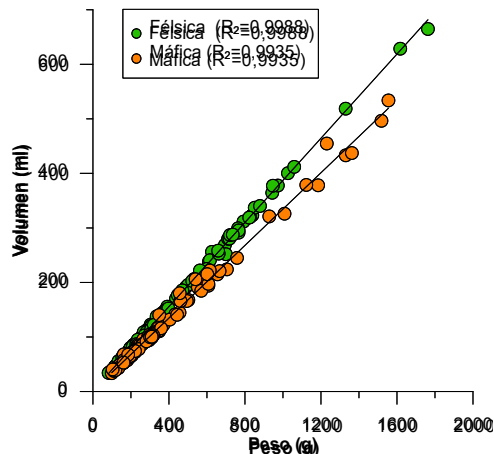


FIGURA 5. Representación del peso (g) frente al volumen (ml) de cada canto.

**DISCUSIÓN**

La naturaleza de los cantos que se encuentran en la playa depende fundamentalmente de los materiales de la cuenca del barranco de San Felipe. Los materiales más destacables son las lavas basálticas olivínico-piroxénicas y tefríticas (ciclo post Roque Nublo, Plioceno y Pleistoceno), lavas fonolíticas e ignimbríticas (Mioceno superior), todos ellos presentes en las muestras analizadas. Los basaltos olivínicos y los olivínicos-piroxénicos pueden pertenecer a dos ciclos diferentes, al ciclo Roque Nublo y al post Roque Nublo. Los que poseen olivino alterado proceden de las lavas basálticas olivínico-piroxénicas que se encuentran en el extremo oeste de la playa, mientras los cantos con olivinos frescos proceden de las lavas olivínico-piroxénicas por las que discurre el barranco.

El índice de Zingg que presentan todos los cantos es bastante parecido, siendo la mayoría de ellos equidimensionales. No obstante, existen pequeñas diferencias cuando se realiza la media por áreas (Fig. 4). Dichas diferencias se pueden apreciar en las zonas situadas por encima de la berma del este y el oeste. Los cantos del oeste presentan valores mayores en elongación que en aplanamiento, mientras que para los del este es a la inversa. En consecuencia, los del oeste tienen formas más tabulares mientras que los del oeste son más alargados.

En cuanto a la relación entre el índice de Zingg y la composición de los cantos (Fig. 6) se observa el mismo patrón de homogeneidad que en la morfología. Todos los cantos corresponden a formas tabular, equidimensional y alargada, mientras que no hay ninguno que corresponda a formas laminares. Por otra parte, no hay ningún tipo de diferenciación entre partículas máficas y félsicas.

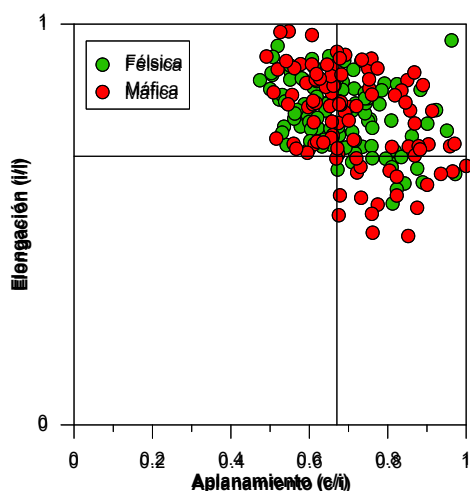


FIGURA 6. Clasificación de Zingg en función de la composición básica de cada uno de los cantos muestreados.

Esta homogeneidad, tanto de forma como de composición puede ser debida al oleaje. En la playa de San Felipe el oleaje dominante procede del NNE y por tanto incide de forma directa, lo que produce una distribución uniforme de los cantos.

La tabla II muestra los valores medios para cada una de las zonas (este, centro y oeste) en las que se cogieron las muestras. A partir de esta tabla, es llamativa la tendencia a la disminución de volumen hacia el oeste, lo que podría ser indicativo de una cierta deriva litoral en ese sentido.

Además, dicha deriva permite explicar la presencia de los grandes bloques redondeados que hay en la zona más oriental del área de estudio, al tiempo que podría ser la responsable de la gradación morfológica observada en la Fig. 4.

	Peso (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Este</b>	498,68	171,36	2,80
<b>Centro</b>	401,64	150,09	2,67
<b>Oeste</b>	451,57	140,18	2,80

Tabla II. Valores medios del peso, volumen y densidad para las tres zonas de la playa. Nótese que cada zona engloba las muestras situadas arriba y debajo de la berma.

La relación entre el peso (g) y el volumen (ml) es claramente diferente para los dos tipos de

cantos predominantes en el área de estudio (Fig. 5). Los máficos pesan más y tienen volúmenes más pequeños. Mientras que los félsicos presentan mayores volúmenes y menores pesos. Esta relación es fuerte para ambos casos, presentando un coeficiente de determinación de 0,999, para las félsicas, y de 0,993, para las máficas. La densidad media de estos dos tipos de rocas es de 2,59 y 3,00 para las partículas félsicas y máficas respectivamente.

## CONCLUSIONES

En la playa de San Felipe fundamentalmente existen dos tipos de cantos, félsicos y máficos, cuya composición se explica por la naturaleza de los materiales que se encuentran en la misma playa, y por los que discurre el barranco de San Felipe. Estos dos tipos de rocas tienen densidades medias de 2,6 g/cm<sup>3</sup> y 3,0 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

El área de estudio presenta una distribución uniforme, respecto a la morfología y composición de los cantos, con una pequeña diferenciación entre la zona oriental y occidental, que puede ser debida a la presencia de una cierta deriva litoral hacia el oeste.

## REFERENCIAS

- Curtiss, G.M., Osborne, P.D., Horner-Devine, A.R. (2009): Seasonal patterns of coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes, wind waves, and tidal currents. *Marine Geology*, 259: 73-85.
- Hughes, R.J. (1963): A method of comparing volume measurements on pebbles. *Journal of sedimentary petrology*, vol. 33, 3: 609-615.
- Balcells, R., Barrera, J.L. ITGE (1990): *Mapa Geológico de España 1:25.000, hoja 1101-III-IV (Aruca)*. ITGE, Madrid.
- Menéndez, I., Silva, P.G., Martín-Betancor, M., Pérez-Torrado, F.J., Guillou, H., Scaillet, S. (2008): Fluvial dissection, isostatic uplift, and geomorphological evolution of volcanic islands (Gran Canaria, Canary Islands, Spain). *Geomorphology*, 102: 189-203.
- Zingg, T. (1935): Beiträge zur Schotteranalyse. *Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen*, 15: 39-140.



## Anexo III

# Medición del transporte transversal de cantos en la playa de San Felipe (Gran Canaria)

Geo-Temas, junio 2015  
ISSN: 1576-5172

---

*Mariona Casamayor<sup>a,\*</sup>, Ignacio Alonso<sup>a</sup>, María José Sánchez-García<sup>a</sup>,  
Jorge Cabrera<sup>b</sup> and Silvia Rodríguez<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,  
Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

\*marionacasamayor@gmail.com

<sup>b</sup> Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería, IUSIANI,  
IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario Tafira, 35017 Las  
Palmas de Gran Canaria, Spain.

---

**Resumen:** San Felipe es una playa mixta situada al norte de la isla de Gran Canaria. El estudio del transporte de los cantos se ha llevado a cabo mediante la tecnología RFID que permite identificar las partículas de manera individualizada. Para ello se han marcado 198 cantos y se ha monitorizado su transporte en 15 ocasiones a lo largo de un año. Si bien el transporte de cantos se produce principalmente paralelo a la costa, también se dan movimientos relevantes en sentido transversal. De éstos, los que representan mayor desplazamiento tienen lugar por debajo de la berma de tormenta mientras que los menores desplazamientos corresponden a cantos situados por encima de la berma. No obstante, algunas de dichas partículas recorren distancias superiores a 20 m tanto hacia el mar como hacia tierra.

El factor principal responsable de este transporte parece ser la migración de la cresta de la berma, que a su vez depende del oleaje incidente y de las condiciones de marea. En general no se aprecia ningún patrón claro de transporte, pues en las mismas condiciones hay partículas que se mueven hacia tierra y otras hacia el mar. Tampoco se aprecia ningún patrón estacional en el transporte.

**Palabras clave:** berma, desplazamiento transversal, RFID, oleaje, cantos.

## INTRODUCCIÓN

En la última década, el interés por el estudio del transporte de partículas en playas de cantos y mixtas, compuestas por arena y cantos, ha ido en aumento, ya que poseen una alta eficacia de protección frente al fuerte oleaje debido su grado de estabilidad. En muchos sitios se está considerando como una herramienta de protección natural frente a la erosión costera (Komar y Allan, 2010).

Además, los avances en el campo de la tecnología han permitido superar las dificultades logísticas que conllevan este tipo de playas. Actualmente, la metodología más empleada para el estudio de este tipo de sistemas es la tecnología RFID (Allan et al., 2006; Bertoni et al., 2013; Curtiss et al., 2009) que permite realizar una monitorización del transporte de cantos en una playa utilizando partículas nativas. Así mismo, esta técnica maximiza el ratio de eficiencia y costes comparado con el resto de metodologías empleadas en otros estudios (pintura, introducción de litologías exóticas, trazadores radioactivos, de aluminio o activos).

En general, los trabajos existentes sobre transporte de cantos en playas de gravas son tanto en ambientes de alta energía (Allan et al., 2006; Buscombe y Masselink, 2006; Curoy, 2010) como de baja energía (Bertoni et al., 2013), pero la gran mayoría de ellos estudian el transporte que ocurre paralelo a la costa. Por tanto, el objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los desplazamientos transversales de los cantos en la playa de San Felipe, tratando de establecer patrones espaciales y temporales de transporte.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la costa norte de la isla de Gran Canaria, en el límite occidental de la playa de San Felipe (Fig. 1). Es una playa mixta constituida mayoritariamente por cantos de tipo fonolítico y basáltico, y arenas procedentes de la erosión de los mismos. Tiene una longitud de 200 m y una amplitud variable en función de la estación del año, desde 20 m durante el invierno hasta 40 m en el verano. El fuerte oleaje incidente produce grandes cambios morfológicos. Durante la época invernal la playa está constituida por cantos y en la zona sumergida se forma una barra de arena. Cuando los vientos alisios se intensifican, alrededor del mes de mayo, la barra migra hasta llegar a cubrir por completo los cantos situados en la zona inferior del perfil de playa.



FIGURA 1. Localización del área de estudio. El punto indica la ubicación de la boya Gran Canaria de Puertos del Estado donde fueron registrados los datos de oleaje utilizados.

El oleaje dominante en la zona de estudio procede del N-NNE. Además, muestra una clara estacionalidad debido a que presenta periodos de calma, entre los meses de abril y octubre, donde el promedio de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) es de 1,52 m, y periodos de tormenta, entre noviembre y marzo, donde el promedio de  $H_s$  es de 1,97 m. Así mismo, es en este último donde tienen lugar los eventos de tormenta que han llegado a generar valores de altura de ola máxima ( $H_{m\acute{a}x}$ ) de hasta 8 m en algunas ocasiones. Canarias tiene un régimen mareal con una amplitud que oscila entre 2,8 m en mareas vivas y 0,8 m en mareas muertas.

## METODOLOGÍA

El sistema RFID usado para llevar a cabo dicho estudio se basa en el descrito por Allan *et al.* (2006) donde existen principalmente tres componentes; *tag* (sensor pasivo de radio frecuencia utilizado para la identificación de los cantos), el equipo base (ordenador y estación total) y móvil (lector y antena) (Fig. 2).

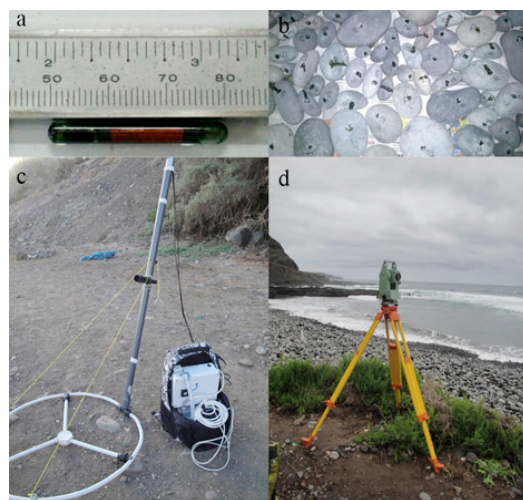


FIGURA 2. a) Tag utilizado para la identificación de los cantos con un código único. Mide 30,2 mm de largo y 3,8 mm de diámetro. b) Trazadores utilizados para el desarrollo de este estudio. c) Antena y lector RFID. d) Estación total Leica T306, utilizada para la toma de datos topográficos.

La principal limitación de esta metodología es el tamaño de las partículas ya que no se pudieron utilizar cantos cuyos ejes fueran inferiores a 42 mm ni tuviesen un peso superior a los 3 kg.

El 14 de marzo de 2013 se depositaron los 198 trazadores en el área de estudio de manera aleatoria a lo largo de toda la superficie de la playa. La posición de cada una de estas partículas se tomó con una estación total Leica T306. En total se realizaron 15 campañas distribuidas según indica la Tabla I. Dado que en este estudio se analizan los datos a partir de la campaña del 21 de octubre de 2013, se utilizan las coordenadas de los cantos de dicha fecha como la posición de partida de cada uno de ellos.

Fecha	Intervalo (días)
21 octubre 2013	Inicio
30 octubre 2013	9
05 diciembre 2013	36
19 diciembre 2013	14
14 enero 2014	26
21 enero 2014	7
28 enero 2014	7
21 febrero 2014	24
19 marzo 2014	26
08 abril 2014	20
14 mayo 2014	36
17 junio 2014	34
28 julio 2014	41
26 septiembre 2014	60
11 noviembre 2014	46

TABLA I. Resumen de las campañas realizadas en la playa de San Felipe.

La monitorización del transporte consiste en realizar un barrido de la playa con la antena hasta que se localiza uno de los trazadores (emisión de una señal sonora) y cuya información se transmite vía radio a la estación base, donde queda almacenada. Finalmente se posiciona la detección con la ayuda de una estación total. Además, en cada una de las campañas también se lleva a cabo un levantamiento topográfico de la playa que permitirá establecer los cambios morfodinámicos que experimenta la zona de estudio entre cada una de ellas.

El rango de error de la antena es de  $\pm 1$  m, por tanto, todos aquellos movimientos inferiores a dicho valor se consideran nulos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todo el periodo de estudio, desde el día 21 de octubre de 2013 hasta 11 de noviembre de 2014, el desplazamiento de los trazadores se

produce mayoritariamente paralelo a la costa, con valores superiores a 100 m. Sin embargo, también se dan movimientos relevantes en sentido transversal que alcanzan valores de hasta  $\pm 20$  m (Fig. 3).

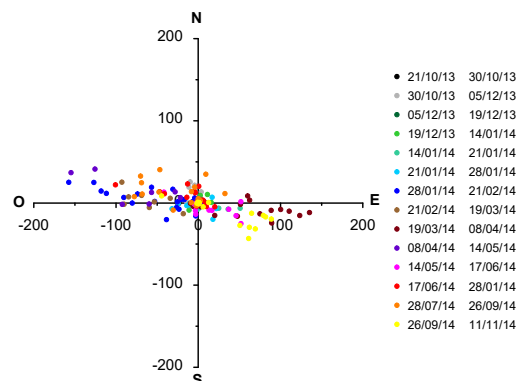


FIGURA 3. Valores de transporte longitudinal (eje X) y transversal (eje Y) (expresados en m) de los trazadores detectados en las campañas realizadas.

Estos resultados coinciden con los obtenidos con la gran mayoría de autores (Allan et al., 2006; Curtiss et al., 2009; Bertoni et al., 2012) a excepción de Bertoni et al. (2013) donde la componente del transporte transversal domina claramente a la componente longitudinal.

Generalmente, los cambios morfológicos de la berma, tanto en su formación como erosión, son los responsables de gran parte de los movimientos transversales de los cantos. A su vez, dichos cambios se producen a consecuencia del oleaje y las mareas. Para ello, se han analizado los datos obtenidos en la boya y el mareógrafo cercanos al área de estudio (Fig. 4), para tratar de establecer un patrón de respuesta.

La tasa de transporte transversal (expresada de metros/día) se obtiene para comparar los valores de desplazamiento entre cada una de las campañas debido a que estas no están espaciadas en el tiempo con el mismo intervalo. Por tanto, se han dividido las distancias por el tiempo transcurrido entre cada periodo.

Cuando todos los cantos detectados se encuentran ubicados en la zona superior de la berma y, además, el promedio de Hs es de 1,75 m, la tasa de transporte que se obtiene es pequeña, 0,013 m/día para el periodo entre 21/10/2013 y el 30/10/2013. No obstante, en condiciones de oleaje parecidas, promedio Hs 1,71 m, pero cuando no todos los cantos se encuentran por encima de la berma, la tasa de transporte transversal del periodo entre 08/04/2014 y 14/05/2014 es de 0,13 m/día, siendo la tasa máxima de  $\pm 0,2$  m/día a lo largo



de todo este estudio. Sin embargo, las condiciones de marea no son las mismas en ambos casos debido a que el tiempo transcurrido en el segundo periodo es mayor. Por tanto, a pesar de que el responsable del movimiento de los cantos y la berma sea el oleaje y las mareas, también es importante la ubicación de los trazadores en función de la berma.

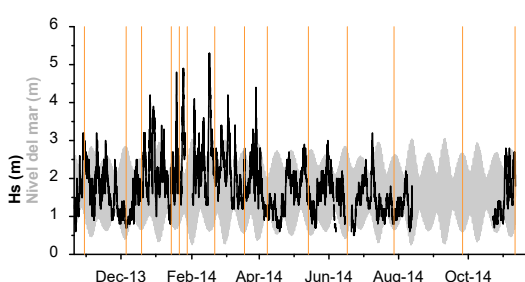


FIGURA 4. Datos de altura de ola significativa (línea negra) y del nivel del mar (línea gris) obtenidos por la boya de Gran Canaria y el mareógrafo Las Palmas 2, respectivamente. Las franjas naranjas y verticales corresponden a las fechas en las que se ha llevado a cabo una campaña (ver Tabla 1).

A fin de determinar la relación entre la berma y el transporte transversal se ha llevado a cabo el cálculo del promedio del desplazamiento transversal (m) para cada uno de los intervalos entre las campañas realizadas. Los cambios de la berma se han establecido mediante el promedio de la distancia de la berma para 5 perfiles repartidos a lo largo de toda el área de estudio (Fig. 5).

El promedio del desplazamiento transversal y el de la distancia a la berma tienen un comportamiento parecido a lo largo de todas las campañas. Sin embargo, existen diferencias entre ellos porque la berma no se comporta del mismo modo en todas las zonas de la playa. Por ejemplo, como sucede en la campaña del día 26/9/2014 donde la berma discurre paralela a la costa en el oeste y en la zona centro es oblicua. Esto produce que al hacer el promedio de dicha berma el dato final no se ajuste con exactitud al comportamiento de los cantos. Además, al tratarse de una playa muy activa a veces los cantos detectados se encuentran en abundancia en una misma zona y menos representados en otras.

Aunque en ocasiones el transporte perpendicular a la costa se produce hacia tierra, los desplazamientos más comunes son los generados por la gravedad que provocan un movimiento de los cantos desde la zona superior de la berma hacia la inferior. Esto se debe a los elevados valores de pendiente que tienen las playas de cantos y mixtas. Además, si los cantos

se encuentran cerca de la cresta de la berma en condiciones de oleaje de baja energía pueden desestabilizarse y moverse hacia el mar. Sin embargo, los valores de desplazamiento hacia tierra y hacia mar son parecidos, llegando a alcanzar los  $\pm 20$  m. Estos resultados coinciden con lo establecido por Allan et al. (2006) quien determinó que existía un fuerte transporte transversal, consistente en movimientos hacia arriba y hacia abajo de la berma. No obstante, según Curoy (2010) los cantos de la zona superior de la berma en general muestran mayores desplazamientos hacia el mar en comparación con los de la zona baja que sufren desplazamientos transversales más pequeños.

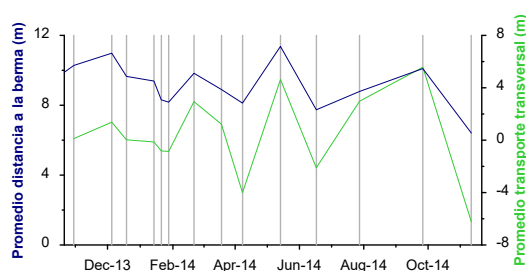


FIGURA 5. Respuesta del promedio de la distancia a la berma y del promedio de los desplazamientos transversales frente al tiempo. Las líneas verticales indican cada una de las campañas realizadas.

## CONCLUSIONES

Los mayores valores de desplazamiento de cantos se producen paralelos a la costa, aunque también existen movimientos transversales importantes. Uno de los principales agentes responsables de dicho transporte son los cambios morfológicos que experimenta la berma a lo largo del tiempo, y que a su vez son inducidos por el oleaje y las mareas. En general, se puede apreciar como el comportamiento de la berma y el transporte transversal de cantos es muy similar. Sin embargo, no se ha podido determinar la existencia de un patrón estacional del transporte debido a que en las mismas condiciones hay partículas que se mueven hacia tierra y otras hacia el mar.

## AGRADECIMIENTOS

Los datos de oleaje han sido cedidos por Puertos del Estado permitiendo el desarrollo de dicho trabajo.

## REFERENCIAS

- Allan, J.C., Hart, R. y Tranquili, J.V. (2006): The use of Passive Integrated Transponder (PIT)
- Bertoni, D., Grottoli, E., Ciavola, P., Sarti, G., Benelli, G. y Pozzebon, A. (2013): On the displacement of marked pebbles on two coarse-clastic beaches during short fair-weather periods (Marina di Pisa and Portonovo, Italy). *Geo-Marine Letters*, 33 (6): 463-476.
- Bertoni, D., Sarti, G., Benelli, G., Pozzebon, A. y Raguseo, G. (2012): Transport trajectories of “smart” pebbles on an artificial coarse-grained beach at Marina di Pisa (Italy): Implications for beach morphodynamics. *Marine Geology*, 291-294: 227-235.
- Buscombe, D. y Masselink, G. (2006): Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79: 33-52.
- tags to trace cobble transport in a mixed sand-and-gravel beach on the high-energy Oregon coast, USA. *Marine Geology*, 232: 63-86.
- Curoy, J. (2010): *Morphological and longshore sediment transport processes on mixed beaches*. Tesis Doctoral, University of Sussex, 448 p.
- Curtiss, G.M., Osborne, P.D. y Horner-Devine, A.R. (2009): Seasonal patterns of coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes, wind waves, and tidal currents. *Marine Geology*, 259: 73-85.
- Komar, P.D. y Allan, J.C. (2010): “Design with Nature” strategies for shore protection- The construction of a cobble berm and artificial dune in an Oregon State Park. En: *Proceedings of a State of the Science Workshop*, 2010-5254: 117-126.





## Anexo IV

# Procesos de acumulación y erosión en playas mixtas en relación con el oleaje

Geo-Temas, septiembre 2017  
ISSN: 1576-5172

---

*Mariona Casamayor<sup>a,\*</sup>, Ignacio Alonso<sup>a</sup>, María José Sánchez-García<sup>a</sup>,  
Isabel Montoya-Montes<sup>a</sup> and Silvia Rodríguez<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,  
Campus Universitario Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.*

*\*marionacasamayor@gmail.com*

---

**Resumen:** Las playas mixtas, de cantos y arenas, presentan patrones estacionales muy diferenciados. Por este motivo, el presente trabajo trata de determinar los patrones estacionales de la playa mixta de San Felipe (Gran Canaria) mediante el cálculo de volúmenes y su relación con el oleaje desde septiembre de 2013 hasta marzo de 2015. La cuantificación del volumen se llevó a cabo mediante la comparación de 12 perfiles en los MDE obtenidos a partir de levantamientos topográficos. Los perfiles muestran claramente un punto de inflexión entre verano e invierno, lo que permite diferenciar una zona superior (compuesta por cantos durante todo el año) y otra inferior (arena y cantos en función de la estación). Los volúmenes se calcularon por separado para ambas zonas a lo largo del tiempo. Los resultados muestran que los cambios volumétricos en la zona superior son claramente menores que en la inferior, y que además presentan un patrón opuesto: mientras en la superior se observa acumulación en los inviernos y erosión en la época estival, la inferior muestra una intensa erosión a principio del invierno y una prolongada acumulación desde mayo a septiembre.

**Palabras clave:** playas mixtas, patrones estacionales, perfiles, cambios volumétricos, San Felipe.

## INTRODUCCIÓN

Los perfiles de playa son una herramienta para entender y cuantificar los procesos que tienen lugar en la zona costera (Sorensen, 1997). La respuesta de los perfiles depende fundamentalmente del clima marítimo aunque también está influenciada por otros factores como la configuración inicial de la playa, anchura y elevación, o distribución del tamaño de grano (Caldwell y Williams, 1986).

En el transcurso de los años, varios autores han tratado de clasificar las playas en función de las características de sus perfiles (Caldwell y Williams, 1986; Orford, 1986; Jennings y Shulmeister, 2002). En la literatura se establece que existen dos tipos de perfiles, los de verano y los de invierno (Powell, 1990; Sorensen, 1997; Allan y Hart, 2007). En playas mixtas ambos perfiles presentan diferencias estacionales muy marcadas determinadas por el clima marítimo (Allan y Hart, 2007). Durante la época estival, el perfil de playa está compuesto por dos partes morfológicamente distintas. La parte superior, formada principalmente por cantos, se caracteriza por poseer una gran pendiente que le confiere carácter reflectivo. Sin embargo, en la parte inferior, donde predomina la arena, la pendiente es mucho más suave y el perfil de playa se comporta de manera disipativa. Cuando tienen lugar los temporales en invierno la arena se erosiona causando que la pendiente aumente y todo el perfil sigue un patrón reflectivo (Jennings y Shulmeister, 2002).

A pesar de que el número de trabajos científicos sobre playas de cantos y mixtas ha aumentado considerablemente en los últimos 20 años, son escasos los centrados en el litoral canario. Por ello, el objetivo de este trabajo es determinar los patrones estacionales de la playa de San Felipe (Gran Canaria) mediante los cambios en los perfiles de playa y su relación con el oleaje.

## ÁREA DE ESTUDIO

La playa de San Felipe está en la costa norte de la isla de Gran Canaria (Fig. 1). La zona de estudio tiene una longitud aproximada de 220 m y está constituida fundamentalmente por cantos de tipo fonolítico y basáltico con un tamaño medio de 64 mm. No obstante, durante los meses de verano se produce una entrada de arena considerable que cubre parte de los cantos de la zona intermareal, dando lugar a un importante aumento en la anchura de playa.

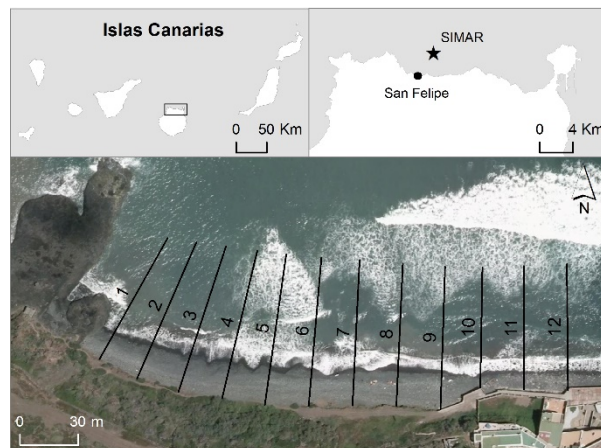


FIGURA 1. Localización del área de estudio en la costa norte de Gran Canaria y del punto SIMAR (4035011) del que se obtuvieron los datos del oleaje. Se indica la numeración de los distintos perfiles.

El litoral canario posee un régimen mesomareal, con un rango de marea de 2,95 m en mareas equinocciales. El oleaje presenta una clara estacionalidad entre las épocas de tormenta y los de calma, que se traduce en cambios en la altura, periodo y dirección de procedencia del oleaje. En invierno los valores medios de altura de ola significativa son de 1,68 m y un periodo de pico de 11,41 s, mientras que en verano son de 1,37 m y 8,37 s respectivamente. Durante los periodos de calma el oleaje dominante procede del NNE, mientras que en invierno la procedencia varía desde NNE hasta NNO, pero los oleajes de mayor altura y periodo proceden del NNO (Fig. 2).

## METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo 18 campañas desde octubre de 2013 hasta marzo de 2015. La secuencia temporal entre las campañas dependió de las mareas y de la ocurrencia de eventos de tormenta. En ellas se medía la zona supramareal e intermareal, mientras que la extensión de la zona submareal variaba en función de las condiciones de oleaje y marea.

Los levantamientos topográficos se realizaron mediante una estación total (Leica TCR 307). A partir de los datos obtenidos se construyeron los modelos de elevaciones (MDE) con una resolución espacial de 0,1 m. La cuantificación de los cambios volumétricos se obtuvo a partir de la comparación de 12 perfiles, separados 20 m y con una longitud de 60 m, para cada una de las campañas con respecto a la anterior.

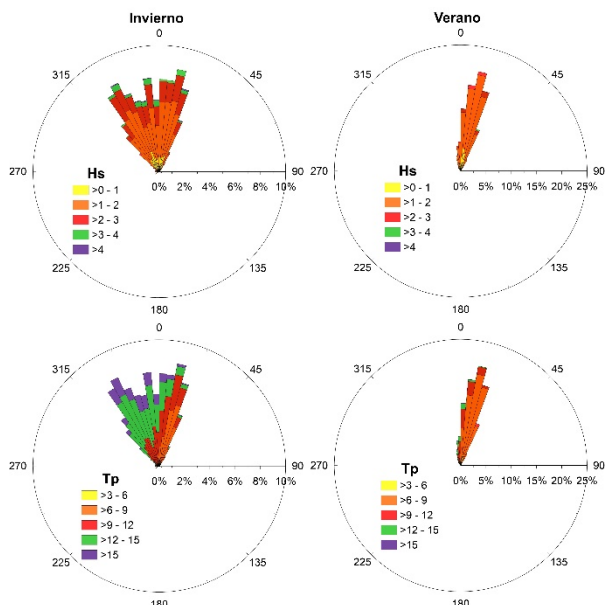


FIGURA 2. Rosas de dirección del oleaje con los valores de Hs (parte superior) y Tp (parte inferior).

El análisis del clima marítimo se realizó con los datos de un punto SIMAR (4035011) de Puertos del Estado (Fig. 1 y 2). A pesar de que se disponía de datos de la boya “Gran Canaria”, estos fueron descartados porque durante el transcurso de este estudio la boya estuvo inoperativa durante grandes intervalos. A partir de los datos horarios de altura de ola significativa (Hs) y periodo de pico (Tp) se calculó la energía del oleaje en aguas profundas (E) y los valores medios y máximos de cada uno de estos parámetros. Una vez obtenidas los datos volumétricos y los datos de oleaje se calcularon los coeficientes de correlación.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La playa de San Felipe tiene un carácter estacional muy marcado que viene determinado por la entrada y salida de arena, que determina cambios muy significativos en los perfiles de playa entre verano e invierno (Fig. 3). Para tratar de diferenciar estos dos comportamientos se ha dividido la playa en dos zonas; superior e inferior. El límite entre ambas se ha obtenido a partir del cálculo del punto de corte medio de los 12 perfiles entre la campaña del 26/09/2014 (verano) y la del 06/02/2015 (invierno), que se ha establecido en 13,8 m.

En la figura 3 se puede observar el brusco cambio de pendiente que experimenta la playa a lo largo del año. Durante el invierno, coincidiendo con la época de temporales, la arena de la zona baja se erosiona y el fuerte oleaje empuja los cantos hacia la zona superior, creando una o varias bermas de tormenta. El efecto combinado de ambos procesos genera un aumento de la pendiente de la playa. Por el contrario, en las épocas de calma la situación se invierte, de modo que la zona superior se erosiona mientras que en la inferior hay una

importante acumulación de sedimento, con lo que la pendiente disminuye.

Asimismo, los perfiles representados muestran diferencias significativas en el desarrollo del perfil, ya que en los perfiles de los extremos la zona supramareal apenas está desarrollada. En función de esta característica los perfiles se agrupan por sectores: perfiles 1-4 (oeste), 5-8 (centro) y 9-12 (este). Los perfiles del este son los menos desarrollados y solo en una de las campañas se pudo observar la formación de una berma. El escaso desarrollo se debe a la propia configuración de la playa, pues según Bertoni y Sarti (2011) cuando el perfil tiene una pared en el límite superior impidiendo su crecimiento hacia tierra, el sedimento se mueve hacia el mar como un proceso de reflexión.

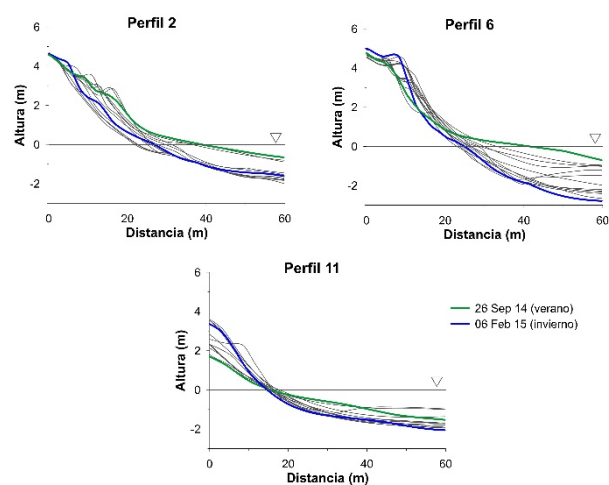


FIGURA 3. Perfiles topográficos de la playa de San Felipe desde enero de 2014 hasta febrero 2015. Ambos perfiles coinciden en el punto de corte. La línea horizontal corresponde al nivel medio del mar en Las Palmas.

Los 12 perfiles de cada campaña se compararon con los de la campaña anterior y se obtuvieron los cambios volumétricos a lo largo del periodo de estudio y para cada una de las dos zonas de cada perfil, por encima y por debajo del punto de corte. (Fig. 4). Los cambios de volumen que experimenta la zona superior de los perfiles a lo largo de un año y medio de mediciones son próximos a cero. No obstante, durante la época invernal cabe destacar tres eventos puntuales de acumulación de cantos. Aunque en todos ellos predomina el transporte transversal, también hay movimientos longitudinales importantes. Durante el primer pico correspondiente al periodo del 19/12/2013 al 14/01/2014, los perfiles del oeste se erosionan con un valor medio de 4 m<sup>3</sup>/m mientras que el resto de perfiles acumulan un promedio de 8 m<sup>3</sup>/m. Entre el 19/03/2014 y el 08/04/2014, los perfiles orientales poseen el doble de acumulación que los valores de erosión que tienen los centrales. Por el contrario, en el último evento de acumulación que se puede observar, entre 11/11/2014 y el 19/12/2014, mayoritariamente todos los perfiles presentan valores positivos de diferencia de volumen. Por tanto, en los dos

primeros picos la acumulación se explica por un movimiento mixto transversal y longitudinal, mientras que en el tercero únicamente se aprecia movimiento onshore.

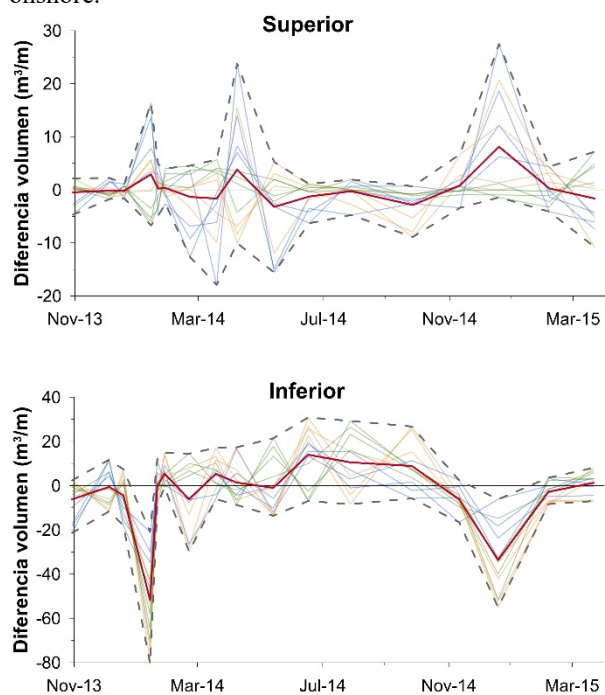


FIGURA 4. Diferencias de volúmenes de los 12 perfiles con respecto a la campaña anterior. La línea roja representa el valor medio de todos los perfiles y las líneas discontinuas corresponden al valor máximo y mínimo de diferencia de volumen entre cada campaña. Las líneas de colores representan los 12 perfiles por sectores, verde=oeste, naranja=centro y azul=este. (Nótese que las escalas verticales de la zona superior e inferior no son iguales.).

En la zona inferior los cambios volumétricos son mucho más significativos. Durante el periodo de estudio se han registrado dos grandes procesos erosivos por transporte offshore en todos los perfiles coincidentes con los dos inviernos que tuvieron lugar: del 19/12/2013 al 14/01/2014 y el segundo periodo es del 11/11/2014 al 19/12/2014. Ambos casos coinciden con dos de los eventos acumulativos que experimenta la parte superior de la playa. La entrada de arena se produce de forma paulatina desde el 14/05/2014 hasta 26/09/2014 como consecuencia de un transporte neto onshore. No obstante, también hay movimientos longitudinales que están mayormente marcados por el patrón inverso entre los perfiles del sector oeste y los del resto de la playa.

Los resultados obtenidos en el análisis del oleaje frente a los cambios de volumen (valores medios para cada campaña) determinan que existe una correlación estadísticamente significativa entre ellos, a excepción de los valores medios de  $T_p$  cuya relación con las diferencias volumétricas de la zona superior se deben al azar ( $p\text{-val}>0,05$ ). En estas correlaciones se evidencia un patrón muy marcado, de modo que cuanto mayor es la altura de ola, el periodo o la energía del oleaje la parte superior de la playa acumula sedimento mientras que la inferior se erosiona (Fig. 5). Esto coincide con lo

expuesto por Buscombe y Masselink (2006), que determinaron que el transporte onshore tiene lugar durante las tormentas desplazando material hasta la parte alta del perfil de playa para la creación de las bermas de tormenta.

Este mismo análisis se hizo para los tres sectores (este, centro y oeste) en los que se dividió la playa, pero las correlaciones entre las variables del oleaje con los cambios volumétricos por sectores no muestran patrones de respuesta diferenciados. Por tanto, no se ha podido determinar con precisión cual es el factor responsable de que, durante el verano, los perfiles del sector oeste se comporten de modo opuesto al resto. Powell (1990) observó que aproximadamente 80% de los cambios volumétricos tenían lugar durante el primer 1/6 del total del tiempo de acción del oleaje. Sin embargo, el análisis con esa fracción de tiempo del oleaje y los cambios volumétricos en nuestra área de estudio muestran que los valores de correlación son inferiores a los obtenidos inicialmente con todo el conjunto de datos de oleaje.

## CONCLUSIONES

Los cambios volumétricos y los perfiles de la playa de San Felipe presentan dos patrones claramente diferenciados, de verano y de invierno. Durante la época estival la altura, periodo y energía del oleaje son menores, generando un transporte onshore cuyo resultado es la acumulación del sedimento más fino en la zona inferior de la playa. Además, la berma de cantos de la zona superior se desmantela. Todo ello produce un cambio de pendiente, confiriendo un carácter disipativo a la playa. Por el contrario, durante el invierno tienen lugar varios eventos de tormenta generados por olas de mayor altura, periodos más largos y en definitiva mayor energía. La respuesta de la playa es distinta para las zonas inferior y superior: mientras en la franja inferior la arena se erosiona por transporte offshore, el fuerte oleaje en la zona de swash produce un movimiento onshore de los cantos que da lugar a la formación de una o varias bermas de tormenta, dependiendo de la configuración de la playa.

Las correlaciones realizadas entre las variables del oleaje y las diferencias de volumen permiten identificar cualitativamente los procesos dominantes en las zonas superior e inferior del perfil, pero los bajos valores de correlación obtenidos parecen indicar que hay otros procesos que también son en mayor o menor medida responsables de los cambios de volumen en la playa. Entre ellos cabría indicar la marea, las corrientes de retorno y la propia configuración de la playa.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado mientras M.C. era estudiante de doctorado en el Programa de doctorado en Oceanografía y Cambio Global del IOCAG. Los autores agradecen a Puertos del Estado la cesión de los datos de oleaje y al Dr. Gómez-Pujol los comentarios realizados.

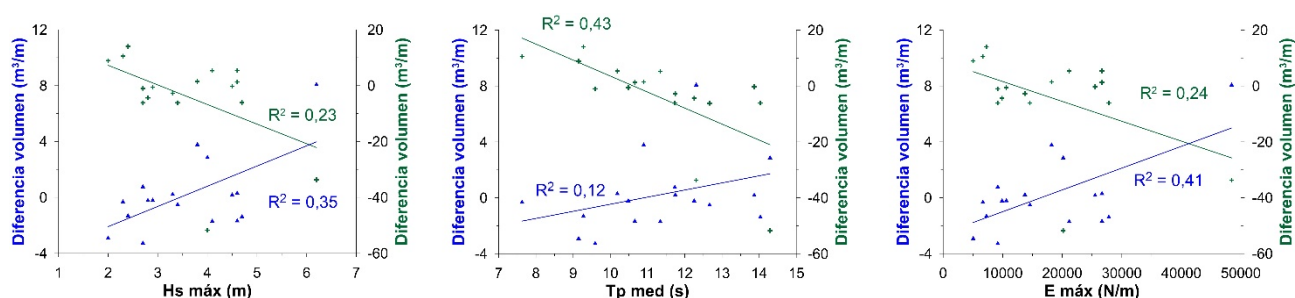


FIGURA 5. Relación entre la altura de ola significativa máxima ( $H_s$  max), periodo de pico medio ( $T_p$  med) y energía del oleaje máxima ( $E$  max) con los valores medios por campaña de los cambios volumétricos, tanto de la zona superior (azul) como la inferior (verde).

## REFERENCIAS

- Allan, J.C. y Hart, R. (2007): Profile dynamics and particle tracer mobility of a cobble berm constructed on the Oregon coast. En: *VI International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes*. Comunicaciones: 1-14.
- Bertoni, D y Sarti, G. (2011): On the profile evolution of three artificial pebble beaches at Marina di Pisa, Italy. *Geomorphology*, 130: 244-254.
- Buscombe, D. y Masselink, G. (2006): Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79: 33-52.
- Caldwell, N.E. y Williams, A.T. (1986): Spatial and seasonal pebble beach profile characteristics. *Geological Journal*, 21: 127-138.
- Jennings, R. y Shulmeister, J. (2002): A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186: 211-228.
- Orford, J.D. (1986): Discussion: Gravel Beach Profile Characterization and Discrimination. *Journal of Coastal Research*, 2: 205-210.
- Powell, K.A. (1990): *Predicting short term profile response for shingle beaches*. Hydraulics Research Limited, Wallingford.
- Sorensen, R.M. (1997): *Basic Coastal Engineering*. Springer, New York, 301 p.