

# Dinámica eólica y sedimentaria en el sistema dunar de Cala Tirant (costa N de Menorca)

Miquel Mir-Gual<sup>1</sup>, Guillem X. Pons<sup>1,2</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>1</sup>, Bernadí Gelabert<sup>3</sup> y Antonio Rodríguez-Perea<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma

<sup>2</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó

<sup>3</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma

## RESUMEN

El sistema dunar de Cala Tirant presenta hoy un estado de conservación en recuperación. Su alto dinamismo hace que del análisis fotométrico sea difícil la precisa identificación de morfologías *blowout*. No obstante, a lo largo de 350 m de frente se pueden apreciar un total de 7 morfologías erosivas. En este artículo, correspondiente a la salida de campo, se comentarán las tipologías de las distintas morfologías erosivas, así como el funcionamiento de un *blowout*: su dinámica eólica y el transporte sedimentario en condiciones de fuerte viento de Tramuntana.

**Palabras clave:** Cala Tirant, Menorca, *blowout*, dinámica eólica, transporte sedimento

## ABSTRACT

The dune system of Cala Tirant today presents a state of conservation in recovery. Its high dynamism makes accurate photometric identification of blowout morphologies difficult. However, along 350 m of dune front, a total of 7 erosive morphologies can be detected. In this article, corresponding to the field output, the typologies of the different erosive morphologies will be discussed, as well as the operation of a blowout: its aeolian dynamics and sedimentary transport in conditions of strong Tramuntana wind.

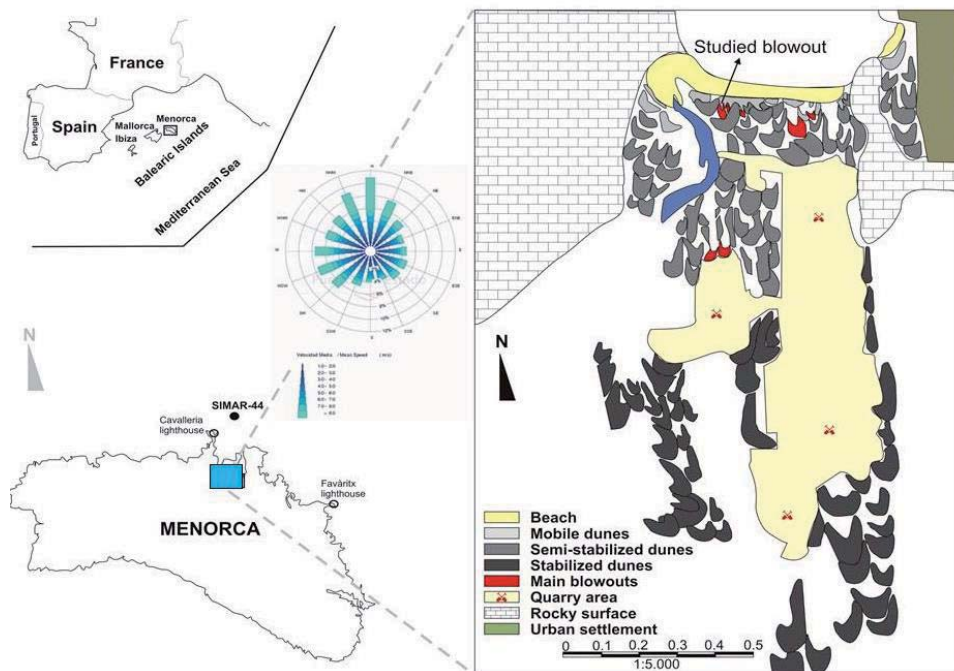
**Keywords:** Cala Tirant, Menorca, *blowout*, aeolian dynamics, sediment transport.

## 1 | Marco fisiográfico de Cala Tirant

El sistema playa-duna de Cala Tirant se sitúa en la zona central de la costa norte de la isla de Menorca, la más septentrional y oriental de las Islas Baleares (Figura 1). Forma parte de los límites del municipio de Es Mercadal y, desde el punto de vista físico, se localiza en la bahía de Tirant, situada entre la península occidental de Fornells y la costa oriental de cabo de Caballería. Sus características hacen de él un sistema muy activo, caracterizado por importantes vientos terrestres y por la canalización de los vientos de Tramontana –componente norte– los cuales condicionan el dinamismo apreciado en el sistema dunar aún activo, y su desarrollo tierra adentro.

A grandes rasgos el sistema dunar de Cala Tirant se desarrolla a partir de una playa arenosa de unos 350 m de longitud y entre 20-40 m de ancho, ocupando una superficie aproximada de 16.256 m<sup>2</sup>. La integridad del sistema cubre hoy una superficie ligeramente superior a las 13 ha, siendo muy inferior a su cobertura originaria como consecuencia de la industria extractiva existente en la zona en la segunda mitad del siglo XX.

Las características intrínsecas al sistema, ayudadas también por las condiciones eólicas que caracterizan la costa norte de Menorca, hacen que éste sea notablemente activo, principalmente en su parta delantera. La presión turística asociada a la playa y la falta de medidas de gestión s ostensibles a lo largo de muchos años supuso una total

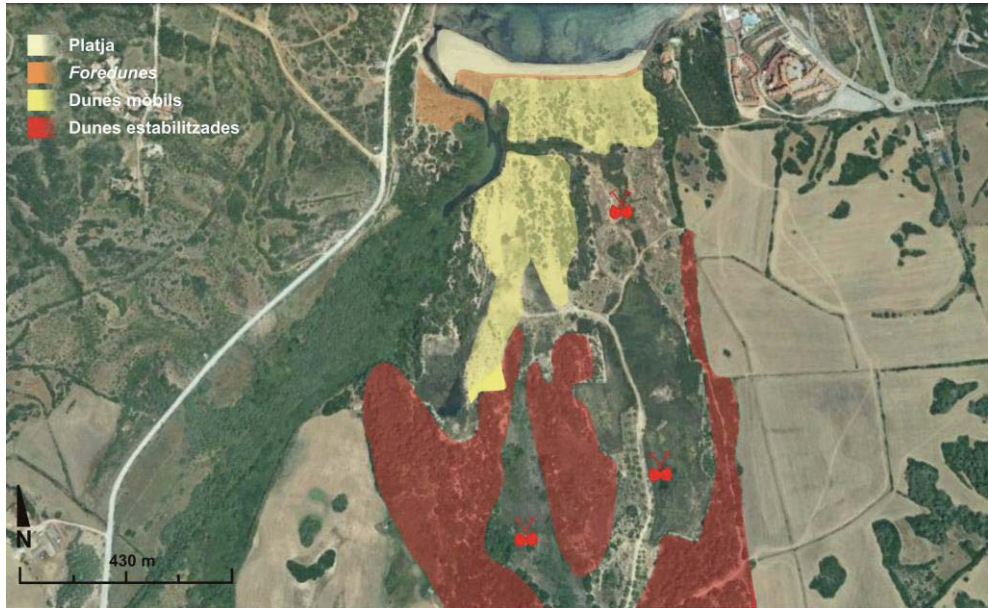


**Figura 1.** Localización geográfica del sistema playa-duna de Cala Tirant, y representación de las características geomorfológicas del sistema dunar (Mir-Gual, 2014).

**Figure 1.** Geographical location of the beach-dune system of Cala Tirant, and representation of the geomorphological characteristics of the dune system (Mir-Gual, 2014).

desaparición de la línea de *foredune*. No obstante, a lo largo de las últimas décadas los esfuerzos destinados a su recuperación parecen tener éxito, siendo hoy posible volver a diferenciar la existencia de un cordón embrionario de primera de una o *foredune* colonizado principalmente por *Ammophila arenaria* (Fig.2). Hoy todavía se percibe un cordón bien definido de dunas móviles las que participan muy activamente del balance sedimentario, y que se extienden, en la parte occidental del sistema, hasta unos 600 m tierra adentro. Finalmente, es posible diferenciar también la existencia de dunas estabilizadas. No obstante, del análisis fotométrico se percibe el alto grado de fragmentación en esta zona, derivando de ello con zonas degradadas las que han quedado desconectadas del funcionamiento natural del sistema playa-duna.

Cala Tirant presenta un clima semi-árido, con una precipitación media anual en torno a los 630 mm. Los vientos principales son los de componente norte - Tramuntana -, aunque según Servera (1997), sólo el 33% de las dunas responde con una orientación sur. Los registros de los faros de Favàritx y Cavalleria (Figura 1) muestran cómo los vientos del norte son los más recurrentes y los que presentan un mayor número de días con velocidades superiores a los 12 km/h. Por otro lado la boya SIMAR-44 ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) indica que para el período desde 1960 hasta 2001 estos vientos se convierten en los más significantes en la zona, siendo los más incidentes en más del 15% de los días contemplados. En términos generales estos soplan a velocidades que oscilan entre los 1-8ms<sup>-1</sup>, llegando incluso a superar los 8ms<sup>-1</sup> en más



**Figura 2.** Sectorización del sistema playa-duna de Cala Tirant (Menorca). En la imagen se ilustra la actual desconexión física existente, sobre todo, entre el sector de dunas móviles y el sector de dunas estabilizadas consecuencia de las actividades extractivas llevadas a cabo en la zona a lo largo de muchos años.

**Figure 2.** Sectorization of the beach-dune system of Cala Tirant (Menorca). The picture illustrates the current physical disconnection, especially between the mobile dune sector and the stabilized dune sector resulting from the extractive activities carried out in the area over many years.

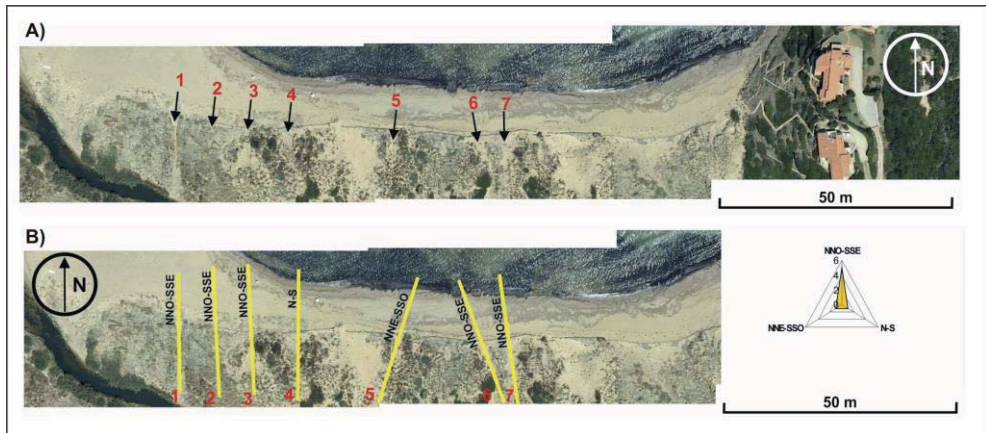
de un 10% de los días. No obstante, y de acuerdo a la irregular morfología presentada por la costa norte de Menorca, hay otras direcciones que no se pueden obviar tales como la NNE o NNO.

### **Morfologías blowout en el sistema de Cala Tirant**

El sistema dunar de Cala Tirant presenta hoy un estado de conservación en recuperación. Su alto dinamismo hace que del análisis fotométrico sea difícil la precisa identificación de morfologías *blowout*. No obstante, a lo largo de 350 m de frente se pueden apreciar un total de 7 morfologías erosivas (Fig. 3). Como queda reflejado en la Figura 3a las mayores densidades se localizan en la parte occidental del frente dunar, coincidiendo con la entrada principal a la playa por parte de los usuarios.

La zona central y oriental son más ajenas a la presencia de morfologías erosivas. Además, en la zona Este hay un área que, con menor potencia de duna, se vuelve mucho más dinámica desde el punto de vista sedimentario, suponiendo una zona topográficamente más deprimida la que ayuda a la dinámica sedimentaria desde la playa hacia el interior del sistema. En este caso la densidad expresada por la presencia de *blowouts* en el frente de dunas de Cala Tirant es notablemente baja, fijándose 0.02 *blowouts* / m.

La disposición estructural de Cala Tirant, así como también la de la propia bahía en la que está inmersa, tiene un papel clave tanto el desarrollo de todo el sistema dunar



**Figura 3.** Fotografía aérea de la playa y el frente de una de Cala Tirant (Menorca). En la parte superior (A) se grafica la localización de las 7 morfologías *blowout* existentes en primera línea, mientras que en la parte inferior (B) se hace lo mismo en tanto a la orientación seguida en cada caso. En cuanto a la localización y cartografía de *blowouts* en este caso la fotografía aérea no acontece como el mejor método ya que, a consecuencia de la baja cobertura vegetal, los contrastes pueden inducir errores en la hora de diferenciar entre *blowouts* o zonas de arena libre.

**Figure 3.** Aerial photography of the beach and the front of one of Cala Tirant (Menorca). In the upper part (A) the location of the 7 blowout morphologies in the first line is plotted, while in the lower part (B) the same is done in both the orientation followed in each case. As for the location and mapping of blowouts in this case aerial photography does not happen as the best method since, as a result of the low vegetation cover, the contrasts can induce errors in the time to differentiate between blowouts or areas of free sand.

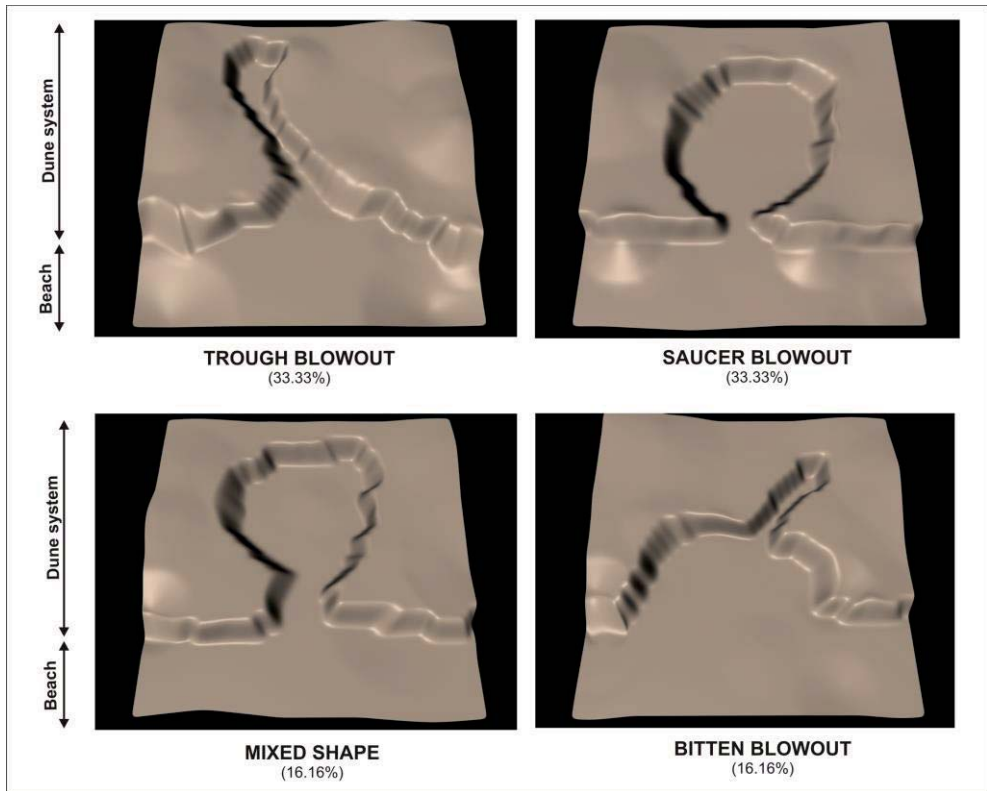
como en el de las morfologías *blowout* existentes. En cuanto a las direcciones de los 7 *blowouts* analizados (Fig. 3b) se ve un imperante predominio del trazo NNO-SSE, contemplado por 5 de las morfologías y suponiendo el 71.4% sobre el total de la muestra.

### Clasificación morfológica

Un total de cuatro tipologías de *blowout* se pueden diferenciar en el caso de Cala Tirant si se considera su forma en planta (Fig. 4). Destacan los *trough blowout* y los *saucer blowout* como las morfologías que más presencia tienen, ambas representando el 33.33%, mientras que por otro lado encontramos un *blowout* mixto - *Mixed shape* - y un *Bitten blowout*, ambas tipologías representando un 16.16% respectivamente. En cuanto a la estructura, todos la presentan simple.

## 2 | Dinámica eólica y sedimentaria

Los resultados que se presentan a continuación provienen de un experimento que se hizo en Cala Tirant durante los días 17 y 18 de enero de 2013, bajo unas fuertes condiciones energéticas. En cuanto al estudio de la dinámica eólica éste se llevó a cabo a partir de 7 anemómetros Davis 2D distribuidos de forma transversal a lo largo de la



**Figura 4.** Clasificación morfológica de las morfologías *blowout* en el sistema de Cala Tirant.  
**Figure 4.** Morphological classification of blowout morphologies in the Cala Tirant system.

morfología *blowout* seleccionada (Fig. 1 y 5), desde la playa alta hasta el lóbulo interior de deposición sedimentaria. Cada uno de los anemómetros está compuesto por dos sensores diferentes; a) un sensor de 3 cubetas -3 cups- el cual mide la velocidad del viento, y b) una pluma -veleta-, la cual mide la dirección del flujo. Los sensores de viento fueron dispuestos en superficie, con la ayuda de un mástil de hierro galvanizado de 60 cm de longitud, de los que 20 cm fueron enterrados y los 40 cm restantes dispuestos por encima de la superficie. Se tomaron medidas de forma continuada a lo largo de 24 horas con una frecuencia de muestreo de 1 min y en la que se obtenían datos máximos y medianos de dirección y velocidad en cada uno de los puntos.

En cuanto a la dinámica sedimentaria fueron utilizadas un total de 12 trampas verticales basadas en el modelo y diseño postulado por Leatherman (1978). Al tratarse de morfologías tan complejas desde el punto de vista geomorfológico las trampas se colocaron en grupos de 4 trampas individuales, cada una de ellas orientadas -su apertura de sotavento- a los 4 principales puntos cardinales (N, S, E, O) para conseguir trampas multidireccionales. Un primer grupo (TA) se localiza en la parte superior de la playa emergida, un segundo (TB) en la zona posterior a la *foredune* y un tercero (TC) en el lóbulo de deposición sedimentaria. Cada grupo de

trampas muestreaba el transporte durante 20 min cada hora. La metodología se desarrolla en Mir-Gual (2014).

### **Localización y caracterización física del *blowout***

La morfología estudiada se ampara en la primera línea del sistema, en su parte más móvil y dinámica (Fig. 5). En cuanto a su caracterización física nos encontramos con un *bowl blowout*, siguiendo la clasificación llevada a cabo por Hesp y Walker (2012) y Smyth et al. (2012). Éste presenta una forma circular o semicircular, profunda sobre todo en su parte central la que coincide con la plataforma de erosión. Ésta se desarrolla tierra adentro desde la primera línea, la *foredune*. La parte central del *blowout* presenta una profundidad aproximada a 5.5 m respecto al lóbulo de deposición, el cual se convierte en la parte topográficamente más elevada. Su anchura es variante, oscilando desde el mínimo localizado en la boca *-throat-* con 10.6 m hasta el máximo, situado en la parte central, con 15.5 m. Partiendo de su boca la longitud total del *blowout* se sitúa en los 56 m, de los que 34 m formarían la zona de erosión, mientras que los 22 m restantes conforman el lóbulo de deposición situado en la parte más interior (Figura 5). Siguiendo la tendencia direccional de la cala en general, y también del desarrollo integral del sistema dunar, presenta una orientación NNO-SSE (355º) condicionada por la incidencia de los vientos predominantes incidentes sobre la primera línea de duna. Un último apunte desde el punto de vista geomorfológico es que, tal y como apuntan Smyth et al. (2012), a pesar de ser considerado un *bowl blowout* se debe tener en cuenta la presencia de una brecha en su boca *-throat-* la que determinará el comportamiento del flujo eólico incidente en su interior.

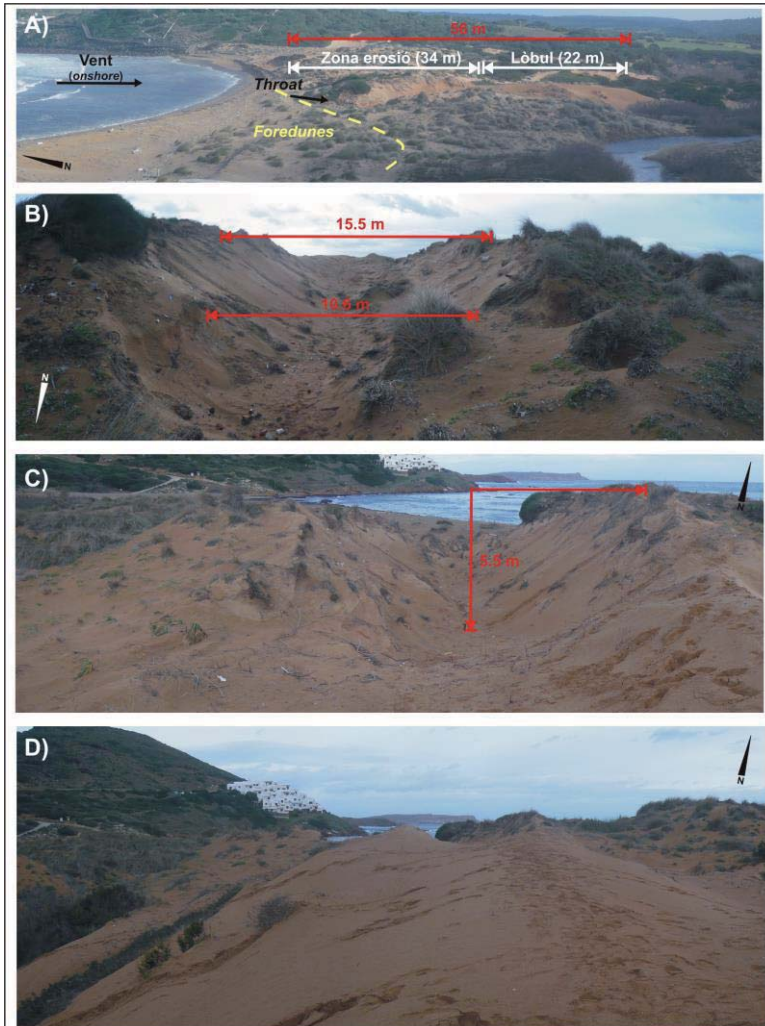
La línea de *foredune* existente se encuentra todavía con signos de degradación y fragmentación. Sin embargo, las políticas de gestión y recuperación aplicadas en la zona a lo largo de los últimos años permiten ver una incremento de morfologías arenosas incipientes *-shadow dunes* y *echo dunes-* fijadas por vegetación herbácea, principalmente *Ammophila arenaria* (Fig. 5a), y con potencias máximas entorno a los 1.5 m de altura. En cuanto a la vegetación, ésta no tiene una presencia notable. El alto dinamismo energético el cual caracteriza la Tramontana menorquina hace que sean sistemas muy dinámicos desde el punto de vista sedimentario, lo que dificulta un establecimiento firme de vegetación. Ésta se limita pues, tal y como se ha comentado, en la parte delantera, principalmente dominada por individuos con características herbáceas. La zona interior del *blowout* - plataforma de deflación - y el lóbulo deposicional, tal y como refleja la Fig. 5c y d, se muestran casi sin presencia de una cobertura vegetal apreciable.

### **Dinámica eólica. Situación bajo altas condiciones energéticas**

Para reflejar la dinámica eólica y sedimentaria del sistema dunar de Cala Tirant se presentan los datos obtenidos de un experimento llevado a cabo a lo largo de 24 horas con muestreos sobre las condiciones eólicas con frecuencias de muestreo de 1 min y su relación con el transporte sedimentario.

- **Velocidad del viento. Datos máximos y medianos**

Las velocidades del viento registradas a lo largo del experimento se muestran variables tanto en tiempo como en espacio (Tabla 1 y Fig. 6). Las máximas velocidades -tanto si analizamos las velocidades medias como las máximas- se registraron a lo largo de la mañana de día 17, coincidiendo al mismo tiempo con el periodo en que la



**Figura 5.** Panorámicas del *blowout* en el sistema de Cala Tirant (Menorca). El primer panel (A) ofrece una visión integral de la morfología, integrada dentro de la primera línea del sistema dunar. Se indican también sus dimensiones longitudinales, así como la presencia de *foredunes* en su parte delantera. En el segundo (B), el cual ofrece una vista de hacia el interior, se remarcan las anchuras, primero de su boca - *throat* -, y después de su parte central. El tercer panel (C) indica la profundidad máxima, alcanzada en la parte central de la zona de erosión. Finalmente, en último (D) muestra una imagen parcial de las dimensiones alcanzadas por el lóbulo de deposición asociado a su parte más interior.

**Figure 5.** View of *blowout* in the Cala Tirant system (Menorca). The first panel (A) offers an integral view of the morphology, integrated into the first line of the dune system. Their longitudinal dimensions are also indicated, as well as the presence of *foredunes* in their front part. In the second (B), which offers a view towards the interior, the widths, first of its mouth - *throat* -, and after its central part, are marked. The third panel (C) indicates the maximum depth, reached in the central part of the erosion zone. Finally, (D) shows a partial image of the dimensions reached by the deposition lobe associated with its innermost part.

	Velocidad media (ms <sup>-1</sup> )	Velocidad máxima (ms <sup>-1</sup> )
Anemómetro 1	4,6	5,7
Anemómetro 2	3,9	4,9
Anemómetro 3	4,7	5,5
Anemómetro 4	<b>5,0</b>	<b>6,1</b>
Anemómetro 5	<i>3,8</i>	5,0
Anemómetro 6	4,8	5,8
Anemómetro 7	5,4	6,4

**Tabla 1.** Valores medios de las velocidades de viento medias y máximas para cada anemómetro a lo largo de las 24 horas de muestreo. En negrita aparecen los valores máximos, y en cursiva los mínimos.

**Table 1.** Mean values of mean and maximum wind speeds for each anemometer over the 24-hour sampling period. In bold they appear the maximum values, and in italics the minimums.

riodo en que la temperatura ambiente fue más elevada. En este sentido además se percibe una clara correlación entre la disminución de la velocidad del viento y la disminución de la temperatura ambiental, principalmente a partir de las 05:00 - ya de día 18 -.

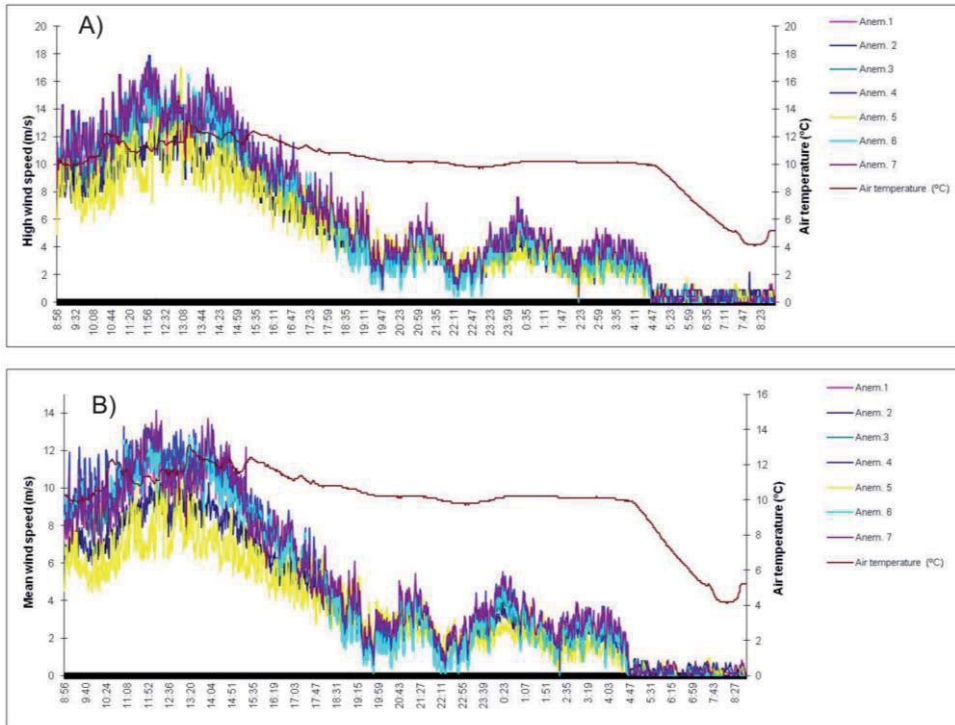
Desde el punto de vista espacial los vientos más fuertes - tanto en valores medios como máximos - se dieron en la rampa interior del *blowout* (Anem. 4) y en las paredes laterales (Anem. 6 y 7). Contrariamente las velocidades más bajas sucedieron justo en la parte posterior de la *foredune* (Anem. 2) y en el principio del lóbulo de deposición, topográficamente la zona más elevada de la morfología (Anem. 5). En términos generales los anemómetros que experimentaron los valores medios más elevados fueron el Anem. 7 (medias = 5.4 ms<sup>-1</sup>; máximas = 6.4 ms<sup>-1</sup>) y el Anem. 4 (medias = 5.0 ms<sup>-1</sup>; máximas = 6.1 ms<sup>-1</sup>). Por otra parte los valores mínimos fueron registrados por el Anem. 5 (medias = 3.8 ms<sup>-1</sup>; máximas = 5.0 ms<sup>-1</sup>) y por el Anem. 2 (medias = 3.9 ms<sup>-1</sup>; máximas = 4.9 ms<sup>-1</sup>). Finalmente los Anem. 1, 3 y 6 muestran valores medio que se sitúan en 4.6 ms<sup>-1</sup>, 4.7 ms<sup>-1</sup>, y 4.8 ms<sup>-1</sup> respecto a las velocidades medias, y 5.7 ms<sup>-1</sup>, 5.5 ms<sup>-1</sup>, y 5.8 ms<sup>-1</sup> respecto a las máximas (Tabla 1).

Desde el punto de vista temporal la máxima velocidad registrada se fijó con 17.9 ms<sup>-1</sup>, concretamente a las 12:02 h por el Anem. 4 - situado en la rampa interior del *blowout* -. En términos generales, tal y como muestra la Figura 6, las velocidades del viento comenzaron a menguar progresivamente a partir de las 14:00 h, llegando a los valores mínimos (cerca de 0 ms<sup>-1</sup>) entre las 04:30 y las 08: 56 h del día 18. Cabe apuntar que el comportamiento y la tendencia seguida a lo largo de la campaña fue muy similar entre los distintos anemómetros dispuestos, todos indicando de manera unánime una bajada de velocidades generalizadas a partir de las 14:00 h de día 17 , y hasta llegar a vientos casi inexistentes desde las 05:00 h del día 18.

Las condiciones topográficas tienen incidencia en cuando a la direccionalidad del viento, sobre todo, dentro de la morfología *blowout* estudiada. La Figura 7 ilustra gráficamente las direcciones obtenidas en cada uno de los sensores desplegados.

En este caso la dirección predominante en el Anem. 1 - tomándolo como sensor de referencia hacia a el input de viento dentro del *blowout* - es claramente de NO, aunque mostrando también algunas ligeras desviaciones hacia el ONO y NNO. A continuación, el Anem. 2, situado en la parte posterior de la *foredune* y con presencia de vegetación herbácea en sus inmediaciones (principalmente *Ammophila arenaria*), registra una dirección del flujo predominante de NNO, con flujos secundarios de N y NE.

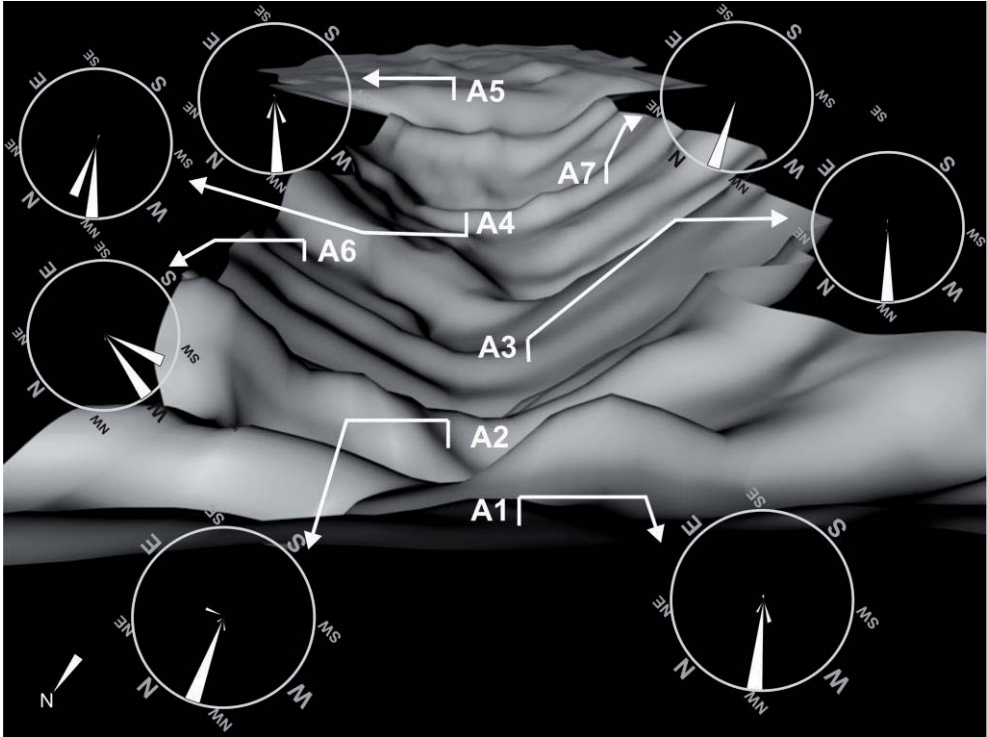




**Figura 6.** Velocidad del viento a lo largo de las 24 horas de muestreo. (A) hace referencia a la distribución temporal de las velocidades máximas registradas por cada anemómetro, mientras que el inferior (B) hace lo propio con las velocidades medias.

**Figure 6.** Wind speed over the 24-hour sampling. (A) refers to the temporal distribution of the maximum speeds recorded by each anemometer, while the lower one (B) does the same with the average speeds.

En términos de divergencia, si lo comparamos con los otros sensores, este es el punto que mayor grado muestra, no tanto en grado de importancia de las distintas direcciones registradas, sino en tanto en su diversidad. Una de las situaciones con las que ningún fijarse ocurre dentro de la morfología en sí, concretamente a lo largo del canal de deflación y la rampa interior. Fijémonos pues con la tendencia marcada por los Anem. 3 y 4. En cuanto al primer caso se ve un predominio absoluto del flujo con componente NO, indicando una clara canalización de éste condicionada por la presión estática de la topografía existente - en este caso las paredes laterales del *blowout* -. Esta tendencia se extiende claramente hasta la rampa interior, donde se localiza el Anem. 4, el cual muestra también un claro predominio del flujo bajo la misma componente, NO. No obstante, en este caso también se registra una cierta importancia de la componente NNO, respondiendo a la reagrupación del flujo proveniente de la fricción con la pared lateral Este del *blowout*. Este último comportamiento se incrementa ya al inicio del lóbulo de deposición, registrado por el Anem. 5. En este caso el flujo predominante, siguiendo la tendencia iniciada en la cubeta de deflación, es también de componente NO, dando si cabe más apoyo al proceso de canalización existente. No obstante se perciben evidencias de flujos secundarios de NNO y ONO,



**Figura 7.** Rosas de direcciones del viento a lo largo de las 24 horas de muestreo para cada uno de los 7 sensores desplegados.

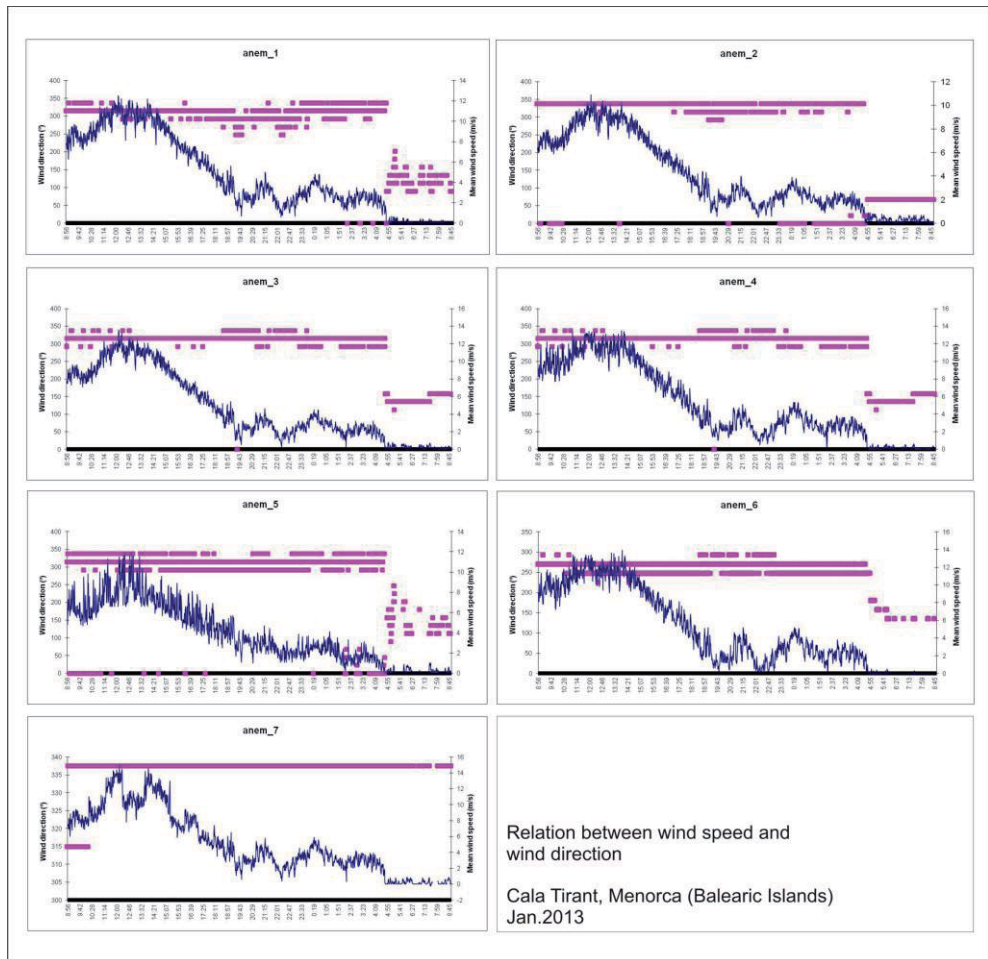
**Figure 7.** Wind direction roses along the 24-hour sampling for each of the 7 sensors deployed.

ambos indicando el reagrupamiento del flujo ahora proveniente de ambas paredes laterales. El comportamiento indicado por la direccionalidad registrada en los anemómetros 3, 4 y 5 invita claramente a verificar la influencia de la topografía hacia el comportamiento del flujo dentro de la morfología *blowout*. En este caso, con una topografía escarpada hacia la pendiente de las dos paredes laterales, el flujo queda controlado por lo que explica el principio de Bernoulli o el efecto Venturi. Lo que nos indican ambas teorías es la canalización - e incremento de velocidad - del flujo cuando éste se ve controlado por la presión estática de algún elemento sólido, en este caso la topografía.

Finalmente cabe hacer mención especial a lo que sucede en las paredes laterales. En primer lugar, la pared lateral Oeste es la que registra el flujo más homogéneo (Anem. 7), dominado notablemente por la componente NNO, y el que se muestra casi paralelo a la orientación seguida por la propia pared. Una situación distinta se da en el caso de la pared Este (Anem. 6) - ambas separadas por menos de 5 m -. En este caso el flujo incidente predominante es de componente O, y en menor medida OSO. Sea como sea ambas direcciones se muestran casi perpendiculares a la orientación de la pared. Este hecho tendrá consecuencias notables en tanto a los patrones de transporte sedimentario seguidos al interior del *blowout*. Como primera aproximación la incidencia recurrente del flujo perpendicular a la pared Este, sobre todo a lo largo de las horas de mayor intensidad eólica (09:00 - 14:00 h), supondrá gran número de

deslizamientos de arena que por gravedad depositarán sobre el canal de deflación, al tiempo que modificarán la topografía interna del *blowout*. Al contrario, en el caso de la pared oeste, la incidencia paralela del flujo derivará en una erosión laminar.

En tanto la dirección registrada individualmente por cada uno de los anemómetros en este caso la tendencia se muestra ligeramente homogénea. No obstante cabe apuntar algunas consideraciones, reflejadas gráficamente por la Figura 8. En términos generales la tendencia seguida es notablemente homogénea desde el inicio del experimento (08:56 h del día 17) hasta aproximadamente las 04:00 h (día 18), con direcciones de viento *onshore* que se mueven entre los 300°-350° (aproximadas al cuadrante NNO-ONO). Dentro de esta línea, el que más alteraciones direccionales presenta es el Anem. 1, sobre todo entre las 19:00 y las 23:30 h, con direcciones que se



**Figura 8.** Relación existente, en escala temporal, entre la velocidad y la dirección registrada por cada uno de los anemómetros utilizados.

**Figure 8.** Existing relationship, on a time scale, between speed and direction recorded by each of the anemometers used.

mueven en torno a los 250° (próximas a la componente 0), y que se corresponden a una bajada en la fuerza del viento incidente. Una tendencia de variación similar se puede apreciar de igual manera en el Anem. 5. De esta manera pues, si se hace una visión general, los puntos de input (Anem. 1) y output (Anem. 5) de viento son los que mayor variabilidad direccional muestran. Si bien la tendencia registrada se muestra homogénea a lo largo de buena parte del experimento, la situación cambia notablemente, y también de forma generalizada, desde las 04:00 h hasta el final. Tal y como refleja la Fig. 6a y b, y también para cada caso la Fig. 8, es a partir de esta hora cuando la velocidad del viento cae en picado, casi sin ejercer influencia energética. Así pues, y ligándose a dicha bajada, las direcciones de viento cambian sustancialmente, variando entre los 135°- 225°, sobre todo en los Anem. 1 y 5. Así, la bajada de la velocidad del viento en este caso supone un cambio en la dirección, ahora de componente S, y que nos indica vientos *offshore* (terral). Al binomio bajada de velocidad - cambio de dirección le podemos añadir la variable atmosférica, ya que como se muestra en la Figura 6a y b, la bajada de la velocidad del viento se corresponde con una disminución significativa de la temperatura atmosférica registrada.

- **Flujo eólico interno**

La relación manifiesta entre la dirección del viento registrada por cada anemómetro y la topografía existente queda simulada en la Fig. 9, la cual establece una aproximación del comportamiento eólico dentro de la morfología *blowout* analizada bajo condiciones medias - altas de viento (situación de invierno). Bajo este escenario las condiciones del flujo eólico experimentado a lo largo de las 24 horas de experimento se muestran homogéneas dentro de la propia morfología. Si bien la dirección inicial predominante fue de componente NO (ver Anem. 1 en la Fig. 7), el flujo eólico en primera línea se presenta un tanto irregular, atribuible a una mayor rugosidad superficial asociada a la presencia de vegetación, principalmente herbácea, y de formaciones arenosas embrionarias; echo dunas y *shadow dunes*. Una vez el flujo llega a la boca del *blowout - throat-*, entre los Anem. 2 y 3, éste se canaliza notablemente, lo que por extensión se da a lo largo de todo el canal de deflación y la rampa interior. Esta tendencia es homogénea hasta el margen superior del *blowout*, justo donde se da inicio el lóbulo deposicional en el cual, una vez se pierde la presión de la topografía, el flujo diverge de nuevo.

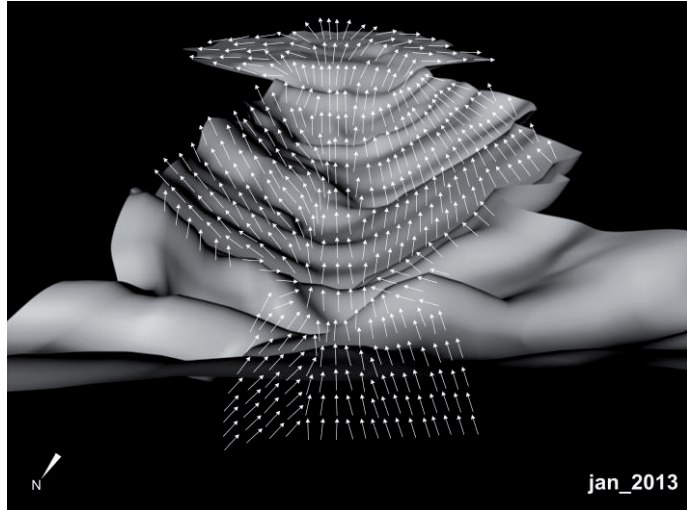
Finalmente destacar la situación registrada en ambas paredes laterales. En tanto en la pared lateral Este la presión ejercida por el viento generó una desestabilización importante del sedimento provocando continuos deslizamientos de arena que por gravedad fueron depositadas a lo largo de la cubeta de deflación. (Figura 10a). En el caso de la pared lateral Oeste la incidencia del viento se dio paralela a la orientación de la misma pared (Fig. 7), suponiéndose una erosión laminar la que, de acuerdo con la orientación del *blowout*, transportaba el sedimento directamente hacia el lóbulo de deposición (Fig. 10b).

- **Variación longitudinal; Fractional Speed-up ratio**

La aplicación del *fractional speed-up ratio* ( $\delta_s$ ) se muestra a partir de 13 momentos de muestreo - *runs* - de 20 min de duración cada uno. Los perfiles longitudinales del viento son resultados de los datos de los Anem. 1, 2, 3, 4 y 5, tomando como referencia el Anem. 1 (Tabla 2 y Figura 11).

**Figura 9.**  
Modelización extrapolada del flujo interno dentro de la morfología *blowout*.

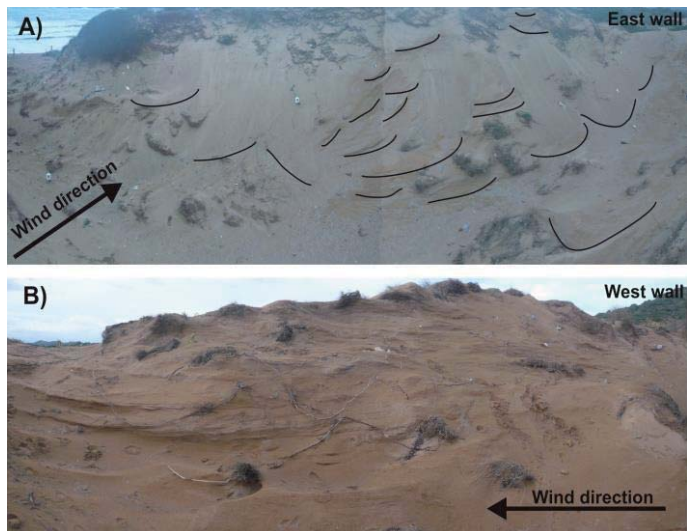
**Figure 9.**  
*Extrapolated internal flow modeling within the blowout morphology.*



La Figura 11 muestra las notables variaciones que el flujo sufre a lo largo de su recorrido dentro del *blowout*. Justo en la parte posterior a la línea de *foredune* por un lado (Anem. 2), y en el lóbulo de deposición por la otra (Anem. 5) la velocidad del viento es generalmente más suave que no aquella registrada en la parte superior de la playa alta (Anem. 1) y en la cubeta de deflación (Anem. 3 y 4). La mayor variabilidad del *speed-up ratio ratio* ( $\delta s = 12:17 / -0.28$ ) se da en el margen superior del *blowout* (Anem. 5), mientras que la más baja se manifiesta en la línea de *foredune*, registrada por el Anem. 2 ( $\delta s = -0.15 / -0.22$ ). Además cabe destacar la variación que se contempla en la rampa interior del *blowout*, registrada por el Anem. 4 ( $\delta s = 12:14 / -0.11$ ) y en la cubeta de deflación, Anem. 3 ( $\delta s = 12:07 / -0.12$ ) (Tabla 2 y Figura 11). Considerando la desviación estándar ( $\sigma$ ) resultante, el valor más elevado coincide con el punto donde se da la máxima reducción del *speed-up ratio*, justo en el margen superior del *blowout* (Anem. 5) con un valor de  $\sigma = 12.15$ , mientras que en este caso, el

**Figura 10.**  
Imágenes panorámicas de las paredes laterales del *blowout* y la dirección de los vientos principales incidentes.

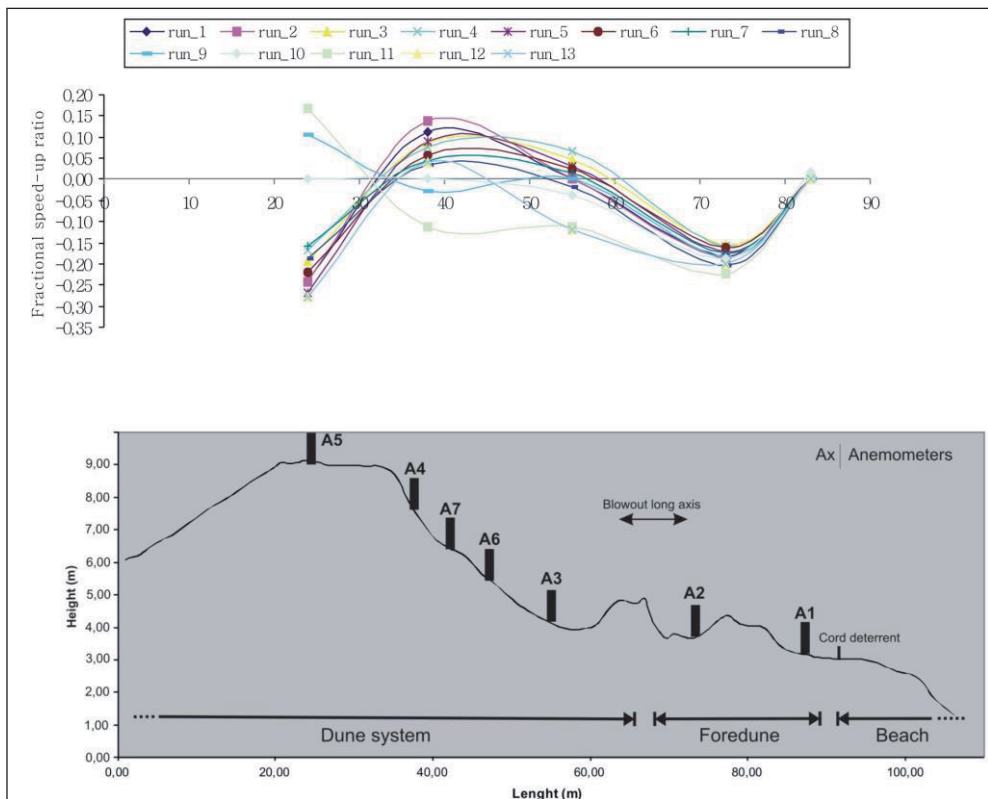
**Figure 10.**  
*Panoramic views of the side walls of the blowout and the direction of the incident main winds*



valor mínimo coincide de nuevo con la línea de *foredune* (Anem. 2) con  $\sigma = 12.02$  (Tabla 2). Desde el punto de vista temporal los valores máximos alcanzados se dan a lo largo del *run 3* ( $\delta s \chi = 0.01$ ) y *run 2* ( $\delta s \chi = 0.00$ ), mientras que las mínimas se contemplan en los *run 11* ( $\delta s \chi = -0.08$ ), y *runs 1, 12 y 13* ( $\delta s \chi = -0.06$ ) (Tabla 2). Si los datos obtenidos se comparan con la distribución de las velocidades absolutas del viento a lo largo de las 24 horas de muestreo (Fig. 6), los valores máximos del *fractional speed-up ratio* coinciden temporalmente con las máximas velocidades, registradas.

### Transporte de sedimento

A grandes rasgos, cantidades muy pequeñas de sedimento fueron captadas con velocidades de viento inferiores a  $2.5 \text{ ms}^{-1}$ . La cantidad más alta de transporte fue



**Figura 11.** *Fractional speed-up ratio* dentro de la morfología *blowout* de Cala Tirant. Los perfiles longitudinales están hechos a partir de los Anem. 1, 2, 3, 4 y 5, tomando como referencia el Anem. 1. Los Anem. 6 y 7 no se incluyen en la gráfica ya que no estaban dispuestos en el mismo transepto longitudinal.

**Figure 11.** *Fractional speed-up ratio* within the *blowout* morphology of Cala Tirant. The longitudinal profiles are made from the Anem. 1, 2, 3, 4 and 5, taking as reference the Anem. 1. The Anem. 6 and 7 are not included in the graph since they were not arranged in the same longitudinal transect.

Run	Long. (m)	An. 1 83	An.2 73	An. 3 55	An. 4 38	An. 5 24	An. 6 47	An. 7 42	$\delta s \chi$	$\delta s \sigma$	An. 1 (ref)
RUN1 (09:14- 09:34)	$u_z$	8,8	7,2	8,8	9,8	6,7	10	9,5			8,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	0,11	-0,24	0,14	0,08	-0,06	0,15	
RUN2 (10:13- 10:33)	$u_z$	8,7	7,1	8,7	9,9	6,6	10,1	9,7			8,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	0,14	-0,24	0,16	0,11	0,00	0,16	
RUN3 (11:12- 11:32)	$u_z$	10,4	8,8	10,9	11,3	8,4	11,3	12,1			10,4
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,15	0,05	0,09	-0,19	0,09	0,16	0,01	0,13	
RUN4 (12:28- 12:48)	$u_z$	10,7	9	11,4	11,5	8,9	11,5	11,2			10,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,16	0,07	0,07	-0,17	0,07	0,05	-0,01	0,11	
RUN5 (14:20- 14:40)	$u_z$	10	8,3	10,3	10,9	7,3	10,8	12			10,0
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,17	0,03	0,09	-0,27	0,08	0,20	-0,01	0,16	
RUN6 (15:16- 15:36)	$u_z$	8,6	7,2	8,8	9,1	6,7	9,1	8,9			8,6
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,16	0,02	0,06	-0,22	0,06	0,03	-0,03	0,11	
RUN7 (16:19- 16:39)	$u_z$	6,9	5,7	7	7,2	5,8	7,2	8,1			6,9
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,17	0,01	0,04	-0,16	0,04	0,17	-0,01	0,12	
RUN8 (17:23- 17:43)	$u_z$	5,9	4,7	5,8	6,1	4,8	6	5,9			5,9
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,02	0,03	-0,19	0,02	0,00	-0,05	0,10	
RUN9 (18:25- 18:45)	$u_z$	3,8	3,1	3,8	3,7	4,2	3,2	4,4			3,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	-0,03	0,11	-0,16	0,16	-0,02	0,13	
RUN10 (20:27- 20:47)	$u_z$	2,74	2,19	2,6	2,7	2,7	2,2	3,2			2,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,02	-0,19	-0,04	0,00	0,00	-0,19	0,19	-0,03	0,13	
RUN11 (22:25- 22:45)	$u_z$	1,8	1,4	1,6	1,6	2,1	1	2,1			1,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,22	-0,11	-0,11	0,17	-0,44	0,17	-0,08	0,22	
RUN12 (00:26- 00:46)	$u_z$	2,5	2	2,2	2,6	1,8	2,3	3			2,5
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,12	0,04	-0,28	-0,08	0,20	-0,06	0,16	
RUN13 (03:26- 03:46)	$u_z$	2,5	2	2,2	2,6	1,8	2,3	3			2,5
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,12	0,04	-0,28	-0,08	0,20	-0,06	0,16	
	$\delta s \chi$	0,00	-0,18	-0,02	0,04	-0,15	-0,02	0,13			
	$\delta s \sigma$	0,00	0,02	0,06	0,06	0,15	0,17	0,07			

**Tabla 2.** Velocidad media del viento para cada uno de los anemómetros desplegados ( $u_z$ ) y sus respectivos valores estandarizados de la aplicación del fractional speed-up ratio ( $\delta s$ ) calculados a partir de 13 momentos de muestreo - runs - de 20 min de duración. Adicionalmente se presenta la media ( $\delta s \chi$ ) y la desviación estándar ( $\delta s \sigma$ ) por cada sensor y para cada momento de muestreo.

**Table 2.** Average wind speed for each of the deployed anemometers ( $u_z$ ) and their respective standard values of the application of the fractional speed-up ratio ( $\delta s$ ) calculated from 13 sampling moments - runs - of 20 min duration. Additionally, the mean ( $\delta s \chi$ ) and the standard deviation ( $\delta s \sigma$ ) are presented for each sensor and for each sampling moment.

registrada bajo una velocidad media de  $12 \text{ ms}^{-1}$  (Anem. 5), concretamente por TC5 con  $Q_{\text{trap}} = 46.95 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . Temporalmente existe una relación positiva entre los runs de mayor captación sedimentaria y aquellos con las velocidades de viento más altas. El transporte fue más importante a lo largo de la mañana, concretamente entre los runs

Run	TA (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	TB (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	TC (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )
1	5,14	0,99	41,41
2	6,13	0,92	42,64
3	16,62	11,13	46,46
4	15,71	16,02	42,17
5	6,40	3,43	46,95
6	0,71	0,88	28,21
7	0,16	0,15	5,61
8	0,05	0,07	3,00
9	0,04	0,05	2,49
10	0,03	0,03	1,81
11	0,01	0,01	0,54
12	0,01	0,035	1,494
13	0,006	0,009	0,268

**Tabla 3.** Cantidad de arena captada por cada grupo de trampas a lo largo de los 13 runs (momentos de muestreo).

**Table 3.** Amount of sand captured by each set of traps throughout the 13 runs (sampling times).

1 y 6 (09:14-14:45 h), y menor entre los runs 7 y 13 (Figura 12 y Tabla 3). Esta tendencia se relaciona directamente con la disminución de la fuerza del viento a partir de las 14:00 h aproximadamente (Fig. 6).

La cantidad media de transporte a lo largo de la mañana fue TA\_Qtrap = 10 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, TB\_Qtrap = 6.5 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> y TC\_Qtrap = 43.9 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, con las máximas localizadas en los runs 3, 4 y 5 (Tabla 3). Aunque el máximo valor de sedimento transportado a lo largo de la tarde se fijó en Qtrap = 28.21 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> a TC6, en términos generales los valores fueron sustancialmente más bajos que los registrados a lo largo de la mañana (Tabla 3); TA\_Qtrap = 12.24 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, TB\_Qtrap = 12.28 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> y TC\_Qtrap = 39.3 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. Finalmente apuntar que el transporte registrado a lo largo de la noche fue prácticamente inexistente (runs 10-13) debido a que las velocidades medias en este período fueron inferiores a los 3 ms<sup>-1</sup>. Las cantidades medias para este periodo fueron de TA\_Qtrap = 0.014 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, TB\_Qtrap = 0.021 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> y TC\_Qtrap = 0.102 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>.

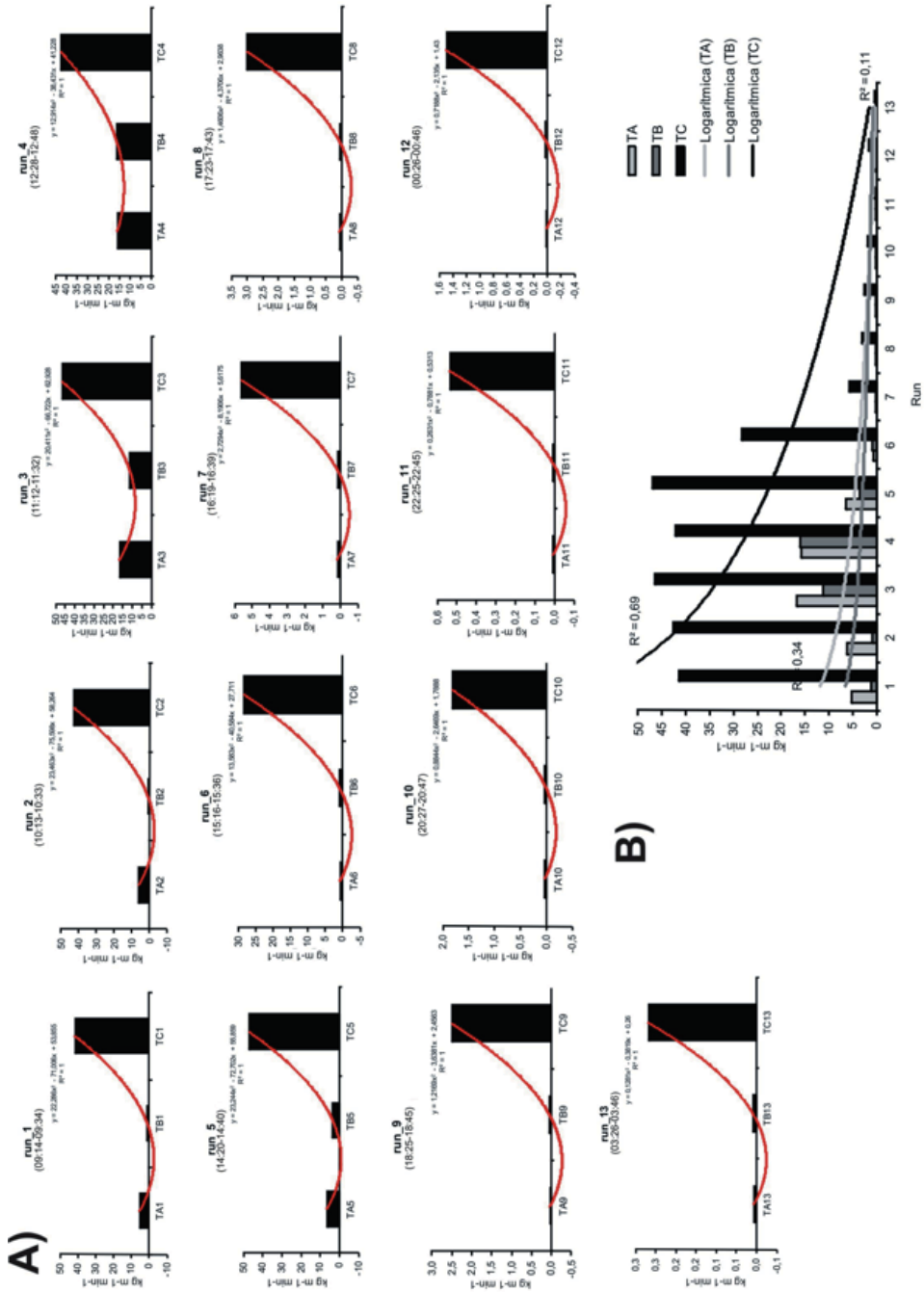
Si se analizan los datos de manera concreta el transporte más alto fue registrado por TC5 con un total de Qtrap = 46.95 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, mientras que los mínimos se localizan en TA11, TB11 y TA12 con Qtrap = 0.01 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> respectivamente (Tabla 3). Espacialmente no se percibe ninguna relación entre las velocidades más altas de viento y los puntos con mayor captación sedimentaria. El transporte capturado fue muy significativo en TC, justo al inicio del lóbulo deposicional, coincidiendo con la zona de expansión del flujo eólico. No obstante los ratios de transporte fueron notablemente inferiores en TA y TB (Figura 3 y Tabla 3).

(página siguiente)

**Figura 12.** Distribución espacial del transporte de sedimento experimentado en cada uno de los runs para cada grupo de trampas. En el panel A) se muestra la situación específica para cada run, mientras que en B) se da la visión general.

**Figure 12.** Spatial distribution of sediment transport experienced in each of the runs for each group of traps. Panel A) shows the specific situation for each run, while in B) the overview is given.





La configuración espacial de los patrones de transporte sedimentario fue sostenida y homogénea a lo largo de todo el experimento, tal como nos muestra la Figura 12. La tendencia polinómica (Fig. 12a) se presenta bastante similar para cada uno de los *runs*, con un transporte moderado a TA, el cual decrece ligeramente a TB, para finalmente crecer exponencialmente a TC.

La Figura 12b nos resume la tendencia de transporte sedimentaria seguida a lo largo del experimento. De nuevo, puede ser de manera más clara, quedan de nuevo patentes las grandes diferencias entre el transporte captado por TC por un lado, y TA-TB por la otra, sobre todo a lo largo de la mañana (*runs* 1-6). Sintetiza de nuevo como las mayores cantidades de transporte se dieron en los *runs* 3, 4 y 5, con valores superiores a los  $45 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . El transporte comenzó a disminuir notablemente entre el *run* 6 (15:16-15:36 h;  $29.79 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) y *run* 7 ( $5.92 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) (Tabla 3), coincidiendo con el momento en el que el viento empezó también a perder intensidad (Figura 6). Concluyendo, el transporte total muestreado a lo largo del experimento se fija con TA =  $51 \text{ kg m}^{-1}$ , TB =  $33.71 \text{ kg m}^{-1}$  and TC =  $263 \text{ kg m}^{-1}$ .

Finalmente, para concluir con la caracterización del transporte a lo largo de la campaña de enero de 2013 hacia volver a la Fig. 9. La recurrente incidencia de un flujo perpendicular a la orientación de la pared lateral este, principalmente a lo largo del periodo de mayor intensidad eólica (entre las 9:00-14:00 h) supuso continuas deslizamientos de arena que, por gravedad se depositaban sobre el canal de deflación. En cuanto a la situación de la pared oeste, la incidencia del flujo en este caso era paralela a la orientación de la misma, suponiendo una erosión sedimentaria de carácter laminar. Ambos casos derivaron con palpables modificaciones morfológicas dentro de la morfología *blowout*, al tiempo que condicionaron los patrones de transporte. En el primer caso, la arena era depositada en el canal de deflación que, bajo la canalización del flujo y su intensificación energética, era consecuentemente transportado hacia el lóbulo de deposición. En el segundo caso este transporte era directo. En este caso la relación entre la direccionalidad del viento y la captura de sedimento hacia la misma orientación es notablemente positiva en cada uno de los casos, tal y como queda reflejado en la Tabla 3. En el caso de TA, con una dirección media fijada en  $312^\circ$ ; NO, las máximas cantidades retenidas se dieron a las trampas N, con  $13.623 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  y O, con  $0.704 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . No obstante, destacar también la cantidad registrada por la trampa S, incluso ligeramente superior al caso anterior, con  $0.785 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

### Agradecimientos

La elaboración de este artículo ha sido posible gracias a la ayuda del proyecto "Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español" (CS02015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

### Bibliografía

- Hesp, P. A. y Walker, I.J. (2012): Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research*, 3: 389-399.
- Leatherman, S.P. (1978): A new aeolian sand trap design. *Sedimentology*, 25: 303-306.

- Mir-Gual, M. (2014): *Anàlisi, caracterització i dinàmica de les formes erosives blowout en sistemes dunars de Mallorca i Menorca (Illes Balears)*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears: 425 pp.
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Palma: 904.
- Smyth, T.A.G., Jackson, D.W.T. y Cooper, J.A.G. (2012): High resolution measured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout. *Geomorphology*, 177- 178: 62-73.