

# Análisis de la capacidad real de transporte eólico en el sistema dunar de Valdevaqueros (Tarifa)

## *Actual aeolian sand drift power in the Valdevaqueros dune system (Tarifa)*

M. Navarro<sup>1</sup>, J.J. Muñoz-Pérez<sup>1</sup>, J. Román-Sierra<sup>1</sup>, A. Ruiz-Cañavate<sup>1</sup> y G. Gómez-Pina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept. Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Polígono Río San Pedro, s/n. marina.navarro@uca.es; juanjose.munoz@uca.es; jorge.roman@uca.es; antonio.ruiz@uca.es.

<sup>2</sup> Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico. C/ Marianista Cubillo, 7. Cádiz. ggomez@magrama.es

**Resumen:** La duna de Valdevaqueros está situada en uno de los puntos más ventosos de Europa. Su elevada movilidad y la frecuente aparición de vientos de levante de gran intensidad han provocado un serio problema de invasión masiva y continua de arena sobre la carretera autonómica, que lleva a la población de Punta Paloma (Tarifa). En el cálculo de transporte eólico de sedimentos, se suelen utilizar varias formulaciones, pero que parecen no ajustarse a la situación real de Valdevaqueros. Por ello, se han colocado una torre de anemómetros y una trampa de arena de fabricación propia, capaz de recoger arena a distintas alturas o niveles. La tasa media de transporte in situ para un viento de intensidad moderada ha sido de hasta 3 veces superior a la obtenida teóricamente. Los resultados granulométricos obtenidos han sido de gran ayuda para la comprensión de la distribución de los granos de arena a diferentes alturas.

**Palabras clave:** movilidad dunar, transporte eólico, trampa de arena, anemómetros, tamaño medio de grano.

**Abstract:** Valdevaqueros dune is located in one of the windiest points of Europe. The high dune mobility and the frequent occurrence of strong east winds have caused a serious problem of a massive and continuous sand invasion over a regional road towards the village of Punta Paloma (Tarifa). Despite the existence of various formulations to compute aeolian sand drift power, they seem not to fit with the actual situation of Valdevaqueros. To determine real transport rates in Valdevaqueros dune system, an anemometer tower and a hand-made sand trap have been placed to retain the drift sands at different heights or levels. The in-situ average transport rate for moderate wind power has been up to 3 times higher than the theoretical computation. Grain-size results have been of great help for the understanding of the sand grain distribution at different heights.

**Key words:** dune mobility; aeolian sand drift; sand trap; anemometer; average grain size.

## INTRODUCCIÓN Y MÉTODOS

El sistema dunar de Valdevaqueros (Tarifa), situado en el sector más meridional de la costa atlántica gaditana y a 10 km del estrecho de Gibraltar (36° 4' 15''N; 5° 41' 30''O) es un campo dunar transgresivo especial, con una situación geográfica y condiciones meteorológicas particulares, donde el transporte eólico sedimentario domina sobre otros procesos. Su crecimiento se produce desde el SE hacia el NO, desarrollando unas crestas orientadas perpendicularmente a la dirección del flujo de viento dominante (Navarro et al., 2011). La duna presenta altas tasas de migración debido al fuerte y frecuente viento de levante y a la gran longitud de la ensenada que encuentra antes de llegar a la duna, sólo interrumpida cuando la laguna del río Valle comunica con el mar durante las grandes riadas.

De este modo, la duna de Valdevaqueros sepulta la carretera autonómica A-2325 cada vez que soplan vientos de levante de moderada a alta intensidad, desde junio de 2004, siendo esta carretera, la única vía de comunicación del pueblo de Paloma Baja con la N-340 (Fig. 1). Desde entonces, se han sucedido las campañas

de retirada de arena con medios mecánicos para impedir su colapso (Román-Sierra et al., 2004). Los sedimentos que alcanzan la cresta dunar de Valdevaqueros pertenecen a arenas medias compuestas principalmente de cuarzo, tratándose de materiales bien clasificados (Muñoz-Perez et al. 2009).



FIGURA 1. Perspectiva de la duna de Valdevaqueros desde la carretera autonómica A-2325, que queda sepultada tras cada temporal de levante.

La dimensión de la duna de Valdevaqueros hace que se trate de una de las más grandes de España, con una altura media de 40 m por encima del nivel de la bajamar máxima viva equinoccial. Este hecho es debido a que Tarifa es uno de los puntos de mayor intensidad eólica de toda Europa.

Aplicando la formulación de Fryberger (1979), se extrajo una rosa de transporte potencial de arena para la zona de Tarifa (Tsoar, 2005), corroborando que la zona de estudio posee un elevado potencial de deriva sedimentaria cercano a 10.000 unidades vector (Navarro et al., 2011) y que casi el 75% de los vientos de levante superan la velocidad de corte umbral de inicio de movimiento. A pesar de los datos teóricos de que se dispone a partir de la estación meteorológica de Tarifa, situada a varios kilómetros hacia el sureste de la zona de estudio, se hace necesario obtener más datos sobre la capacidad real de transporte que posee la duna de Valdevaqueros, como han aplicado Rodríguez Santalla et al. (2009) en las dunas del delta del Ebro.

Se han colocado una torre de anemómetros (Fig. 2) y una trampa de arena de diferentes niveles (Fig. 3), que recoge la arena transportada en varios puntos del perfil dunar (en la cresta, a unos 40 m por encima del nivel medio del mar y en el pie, a unos 10 m). Se ha determinado, por un lado, el perfil vertical de velocidades, así como la tasa de transporte eólico de sedimentos in situ. La trampa de arena, de creación propia, consta de diez cajoneras de 10 cm × 40 cm cada una con una malla posterior para permitir la salida del aire. De este modo, el sedimento queda retenido en función de su granulometría a diferentes alturas por encima de la superficie dunar.

Asimismo, el análisis granulométrico ha resultado de gran utilidad en la identificación de fuentes de arena transportadas por el viento, como hicieron Alcántara-Carrió et al. (2010) en las dunas de Fuerteventura (Canarias), teniendo en cuenta tanto el tamaño medio de grano, como la desviación típica, la simetría y el apuntamiento de la distribución granulométrica de las muestras obtenidas. Alonso et al. (2006) utilizaron un parámetro de disponibilidad eólica de sedimentos (*ASA: aeolian sediment availability*), que determina la disponibilidad de sedimentos para el transporte eólico en ambientes costeros donde las características texturales del sedimento superficial y la presencia de vegetación, más que el volumen de arena, determinan la disponibilidad de sedimentos. Cuando los vientos soplan paralelos a la línea de costa, la cantidad de sedimentos que entra al sistema se compensa con las salidas y las variaciones morfológicas son, por tanto, mínimas (Davidson-Arnott, 1988). Sin embargo, cuando los vientos son perpendiculares a la línea de costa, el *fetch* está limitado por el ancho de la playa emergida, mientras que en el caso de vientos soplando desde el mar oblicuamente a la costa, como sucede en la playa de Valdevaqueros, las variaciones

morfológicas y aportes de sedimento resultan más intensos, del orden de 20 veces superior al transporte medido para el caso anterior (Nordstrom y Jackson, 1992). De este modo, la finalidad última será comparar las tasas de transporte reales obtenidas in situ con las tasas de transporte potenciales calculadas a partir de formulaciones teóricas.



FIGURA 2. Vista de la torre de anemómetros en la cresta dunar.



FIGURA 3. Colocación de la trampa de arena de 10 niveles de altura.

En condiciones de estabilidad atmosférica, el perfil de velocidad por encima de la subcapa viscosa de las superficies aerodinámicamente rugosas viene dado por la ecuación logarítmica de Prandtl-Von Karman, también denominada ley de la pared o muro (*law of the wall*), en la que puede obtenerse la velocidad media del viento ( $u_z$ ) a una determinada altura  $z$ :

$$\frac{u_z}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \forall z > z_0 \quad [\text{ec.1}]$$

Donde  $u_*$  es la velocidad de corte o fricción,  $k$  es la constante universal de Von Karman que define la capa límite turbulenta ( $k=0,40$ ),  $z$  es la altura por encima de la superficie y  $z_0$  es la altura de rugosidad aerodinámica ( $z_0=d/30$ ), siendo  $d$  el tamaño de grano. Esto quiere decir que, si se incrementa la velocidad del viento a una determinada altura  $z$ , la velocidad de corte también aumenta.

Así, observaciones llevadas a cabo por Bagnold (1954) demostraron que la tasa de transporte ( $q_B$ ) depende del tamaño de grano ( $d$ ), relativa al diámetro de referencia de 0,25 mm ( $D$ ), y del cubo de la velocidad de corte del viento ( $u_*$ ):

$$q_B = C \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3$$

Donde la constante  $C$  es 1,5 para arenas uniformes, 1,8 para arenas naturales de dunas, 2,8 para arenas pobremente clasificadas y 3,5 para gravas. Para el cálculo de dicha tasa de transporte, se ha utilizado la Muestra Compuesta (MC), calculada a partir de los pesos retenidos en cada tamiz de cada una de las muestras recogidas.

## RESUMEN DE RESULTADOS

En la Fig. 4, se desglosan los pesos de sedimento retenidos por la trampa de arena en la cresta dunar a diferentes alturas o niveles (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm, 70-80 cm, 80-90 cm y finalmente 90-100 cm) tras 15 minutos de exposición. Las velocidades medias y máximas de viento fueron de 42 km/h y 66 km/h en la cresta y de 31 km/h y 55 km/h en el pie dunar, respectivamente.

En total, la trampa de arena captó 209 g de arena en el pie dunar, mientras que en la parte más elevada de la duna se recogieron más de 7,4 kilos de arena en el mismo intervalo de tiempo, de los cuales casi un 90% se vio transportado en los primeros 20 cm de altura por encima de la superficie dunar. Asimismo, se han realizado análisis granulométricos de la arena retenida en cada nivel, según metodología descrita por Román-Sierra et al. (2013).

Muestra nivel (cm)	D50 (mm)	$\sigma$ ( $\phi$ )	$\alpha$ ( $\phi$ )	$\kappa$ ( $\phi$ )
100 - 90	0,27	0,75	0,50	0,79
90 - 80	0,33	0,78	-0,17	0,89
80 - 70	0,28	0,74	0,48	0,79
70 - 60	0,26	0,65	0,28	0,96
60 - 50	0,29	0,76	0,37	0,91
50 - 40	0,27	0,57	-0,24	0,91
40 - 30	0,27	0,56	-0,26	0,88
30 - 20	0,26	0,50	-0,29	0,83
20 - 10	0,25	0,51	-0,25	0,84
10 - 0	0,29	0,58	-0,53	1,22

TABLA I. Parámetros estadísticos calculados tras el análisis granulométrico de las muestras de arena recogidas en cada nivel de la trampa colocada en la cresta dunar. D50: Diámetro medio de grano;  $\sigma$ : Desviación típica (sorting);  $\alpha$ : Simetría (skewness);  $\kappa$ : Apuntamiento de la distribución granulométrica (kurtosis).

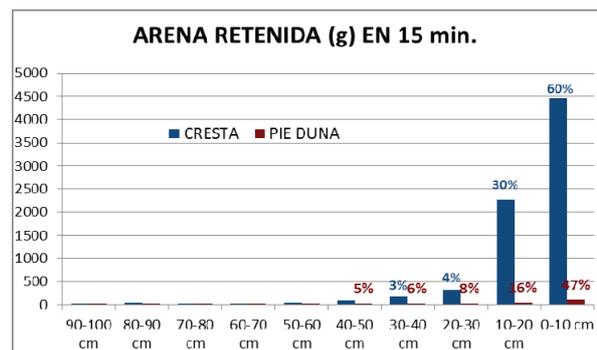


FIGURA 4. Arena retenida por la trampa colocada en la cresta y pie de la duna de Valdevaqueros durante 15 minutos.

El tamaño medio de grano ( $D_{50}$ ) hallado en las muestras retenidas en la trampa de arena confirman que se trata de arenas de granulometría media, siendo algo más fina en la cresta que en el pie dunar, donde el tamaño medio ronda los 0,3 mm. En la cresta, los análisis granulométricos de la arena retenida en cada nivel muestran resultados variables, entre 0,25 mm y 0,33 mm (Tabla I). En general, hay una tendencia a aumentar el tamaño medio de grano en los primeros 50 cm por encima de la superficie dunar, lo que sugiere la presencia de granos y bioclastos de morfología alargada, que quedan retenidos en los tamices superiores y que, debido a su forma, son transportados por suspensión durante más tiempo.

Utilizando la muestra compuesta ( $MC = 0,28$  mm), característica de toda la arena transportada en la cresta, y siendo la velocidad media de corte del viento de 42 km/h, se ha obtenido una tasa media de transporte teórico de  $6,72 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , es decir,  $133,19 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Por otra parte, teniendo en cuenta los pesos retenidos por la trampa de arena, la tasa total de transporte in situ es igual a  $2,08 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , i.e.  $412 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

La desviación estándar de la cresta desvela valores moderadamente bien clasificados para cada muestra, donde las mejor clasificadas corresponden a las situadas a menor altura. Según el parámetro de simetría, las muestras de mayor altura se encuentran, en general, muy sesgadas en material fino, mientras que las situadas más cerca de la superficie dunar están sesgadas en gruesos. Cabe resaltar el cambio de tendencia que se sucede, en este sentido, a partir de los 50 cm de altura. Este dato parece diferenciar un cambio en el tipo de arena transportada por el viento.

En cuanto al apuntamiento o kurtosis, las muestras siguen una distribución platicúrtica con tendencia a ser mesocúrtica, lo que da una idea de que el contenido alberga diferentes tipos de tamaño de grano. Comparando los resultados de las desviaciones estándar con los datos de simetría, se comprueba que las muestras bien clasificadas, situadas en los primeros

50 cm de altura, tienen una simetría negativa, es decir, sesgada hacia los gruesos.

## CONCLUSIONES

Tras la colocación de la trampa de arena, se han hallado datos muy llamativos del transporte de sedimentos en la duna de Valdevaqueros. Mientras que en el pie dunar se recogieron 0,84 kg de arena por hora, el transporte en la cresta fue masivo, llegando a ser hasta 35 veces mayor (casi 30 kg/h), el 90% del cual fue captado en los primeros 20 cm de altura.

En este sentido, la tasa de transporte real calculada para la cresta dunar ha sido 3 veces mayor a la obtenida teóricamente a partir de la formulación de Bagnold, teniendo en cuenta velocidades medias de viento de 42 km/h para ambos casos.

Pese a que lo esperado sería obtener una distribución de arenas con tendencia a la disminución progresiva del tamaño medio de grano, se ha comprobado que, en este caso y con un régimen de vientos tan intenso, el diámetro medio retenido por encima de 50 cm es mayor que el obtenido a menor altura. De este modo, para conocer fielmente la distribución granulométrica de las muestras de arena, no es suficiente con estudiar el tamaño medio de grano, sino que cabría considerar parámetros como la desviación típica, la simetría o la kurtosis, así como la morfología de los granos y la composición bioclástica de la arena, especialmente en estudios de transporte eólico de sedimentos.

## REFERENCIAS

Alcántara-Carrió, J. y Alonso, I. (2001): Aeolian sediment availability in coastal areas defined from sedimentary parameters. Application to a case study in Fuerteventura. *Scientia Marina* 65(IS): 7-20.  
Alonso, I., Sánchez, I., Cabrera, L., Benavides, A., Alcántara-Carrió, J. y Usera, J. (2006): Decadal

evolution of a coastal dune field and adjacent beaches at North of Fuerteventura (Canary Islands, Spain). *Journal of Coastal Research*, SI 39: 198-203.  
Bagnold, R.A. (1954): *The Physical Aspects of Dry Deserts*. In: J.C. Cloudsley-Thompson, Ed. *Biology of Deserts*. Institut of Biology, London (1954): 7-12.  
Fryberger, S.G. (1979): Dune forms and wind regime. In: *A study of global sand seas* (E.D. McKee, ed.), U.S. Geological Survey Professional Paper 1052: 137-169. Washington.  
Muñoz-Pérez, J.J., Navarro, M., Román-Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G. (2009): Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphology*, 112: 167-177.  
Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Tsoar, H., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G. (2011): Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphology* 129 (1-2): 14-28.  
Nordstrom, K.F. y Jackson, N.L. (1992): Two dimensional change on sandy beaches in estuaries. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 36 (4): 465-478.  
Rodríguez Santalla, I., Sánchez García, M.J., Montoya Montes, I., Gómez Ortiz, D., Martín Crespo, T. y Serra Raventos, J. (2009): Internal structure of the aeolian sand dunes of El Fangar spit, Ebro Delta (Tarragona, Spain). *Geomorphology*, 104: 238-252.  
Román-Sierra, J., Navarro Pons, M., Muñoz-Pérez, J.J., Gomez-Pina, G. y Fages Antiñolo, L. (2004): Ecosistemas dunares en la provincia de Cádiz. Estabilizaciones en Bolonia y Valdevaqueros, T.M. Tarifa. *Revista de Obras Públicas*, 151, 3450: 65-76.  
Román-Sierra, J., Muñoz-Perez, Juan J., Navarro-Pons, M. (2013): Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* (in press). doi: 10.1111/sed.12040.  
Tsoar, H. (2005). Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 357 (1): 50-56.