

Tecnologías de la información geográfica aplicadas al análisis de la relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento de dunas en Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)

*Application of geographic information technologies to the study of the
relationship between the vegetation and the displacement rates of dunes at
the Maspalomas system (Gran Canaria, Canary Islands)*

ANTONIO I. HERNÁNDEZ CORDERO

LEVÍ GARCÍA ROMERO

LUIS HERNÁNDEZ CALVENTO

EMMA PÉREZ-CHACÓN ESPINO

Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente.
Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCG)

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

RESUMEN

Se presenta una aplicación de tecnologías de la información geográfica al estudio de la relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento en el campo de dunas de Maspalomas (Gran Canaria, islas Canarias). La metodología se desarrolla en tres fases: caracterización de la vegetación y creación de una capa vectorial de comunidades vegetales; cálculo de las tasas de desplazamiento de las dunas; y estudio de la relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento mediante análisis espacial.

Los resultados indican que cuando las tasas de desplazamiento superan los 20 m/año, la vegetación no puede desarrollarse. La comunidad que resiste unas mayores tasas de desplazamiento es la de *Traganum moquinii*, seguida por la comunidad de *Salsola kali* (tasas entre 6-9 m/año). Las comunidades de *Cyperus laevigatus*, de *Launaea arborescens* y de *Cyperus capitatus-Ononis serrata* resisten tasas entre 1 y 3 m/año. La comunidad de *Tamarix canariensis* soporta una tasa máxima de 2 m/año. Las comunidades de *Suaeda mollis* y de *Heliotropium bacciferum* se localizan en zonas con menor movilidad.

Palabras clave: sistema dunar transgresivo árido, vegetación dunar, movilidad de las dunas, tecnologías de la información geográfica.

ABSTRACT

One application of geographic information technologies to the study of the relationship between the vegetation and the displacement rates of dunes at the Maspalomas system (Gran Canaria, Canary Islands) is presented. The methodology was developed in three phases: characterization of vegetation and creating a vector layer of plant communities; calculating dunes migration rates; and study of the relationship between vegetation and migration rates through spatial analysis. The main results are that when the migration rates exceed 20 m/year, the vegetation cannot grow. The *Traganum moquini* community resists the highest migration rate of displacement, followed by the community of *Salsola kali* (rates of 6-9 m/year). *Cyperus laevigatus*, *Launaea arborescens* and *Cyperus capitatus-Ononis serrata* communities resist rates between 1 and 3 m/year. *Tamarix canariensis* community supports a maximum rate of 2 m/year. The communities of *Suaeda mollis* and *Heliotropium bacciferum* are located in areas with lower mobility.

Keywords: arid transgressive dune system, dune vegetation, dune mobility, geographic information technologies.

1. ANTECEDENTES

La utilización de las tecnologías de la información geográfica (TIG) en el estudio de la vegetación está relativamente generalizada. Sin embargo, normalmente se ha reducido a la interpretación, visual o digital de documentos aéreos, como fotografías aéreas, ortofotos digitales, imágenes de satélite y, más recientemente, tecnología LiDAR, que permite cartografiar con precisión distintos aspectos relativos a las comunidades vegetales. En el caso concreto de la utilización de sistemas de información geográfica (SIG), son numerosos los trabajos sobre aplicaciones al estudio de la vegetación en diversos tipos de ecosistemas, como sabanas (Palmer y van Staden, 1992), bosques (Woodcock et al., 1994; Hall et al., 1998), zonas alpinas (Guisan et al., 1998), matorrales (Elmore et al., 2000; Schmidt y Karnieli, 2000; Underwood et al., 2003; Reisman-Berman, et al., 2006; Rango et al., 2010), zonas costeras (De Lange et al., 2004), o también combinando varios de ellos (Franklin, 1995; Lambin y Ehrlich, 1997; Zeng et al., 2013). Sin embargo, son escasos los realizados en los sistemas de dunas litorales (Droesen et al., 1995; Shanmugam y Barnsley, 2002; Kutiel et al., 2004a, b; Levin et al., 2006; García et al., 2012; Keijsers et al., 2015; Hernández-Cordero et al., 2015a, b), donde prevalecen los análisis estadísticos, como las técnicas de clasificación y ordenación (Martínez et al., 2001; Levin et al., 2008). La carencia de estudios sobre el análisis con TIG de los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación, puede estar motivado por las características particulares de las dunas, donde los factores que normalmente intervienen en la distribución de las comunidades vegetales son muy específicos. La vegetación, en líneas generales, está controlada por una jerarquía de factores ambientales, siendo las variables climáticas las que tienen un peso mayor si se considera una escala poco detallada (Nield y Baas, 2008). Le siguen las variables geológicas (que afectan a la química del suelo y

a la disponibilidad de nutrientes) y la topografía, que condiciona el régimen macroclimático (Franklin, 1995). En una escala de mayor detalle, los factores que controlan la distribución de las comunidades vegetales son principalmente la altitud, la pendiente, los tipos de suelo, la orientación y las precipitaciones (Palmer y Van Staden, 1992; Franklin, 1995; Guisan et al., 1998). Estas variables se pueden obtener o calcular de manera relativamente sencilla a partir de diferentes fuentes, como los mapas topográficos, los modelos digitales de elevaciones, etc. Sin embargo, en los campos de dunas litorales estos factores no intervienen de forma tan decisiva en la distribución espacial de la vegetación, participando otras variables ambientales, como la movilidad de la arena, el *spray* marino, la existencia de una topografía variable que no siempre se puede representar de forma adecuada en los mapas, y otros factores ambientales, tales como la profundidad del nivel freático, las características físicas y químicas de la arena, etc. (Oosting y Billings, 1942; Martin, 1959; Moreno-Casasola, 1986; Wilson y Sykes, 1999; Maun, 2004). Muchos de los aspectos señalados son difíciles de caracterizar, debido a la escasez de fuentes de información, directas o indirectas, o a que su propia naturaleza dificulta su representación.

En el marco de los sistemas de dunas litorales, los SIG se han utilizado con varias finalidades, entre las que destacan los estudios multitemporales. El análisis de la evolución temporal y espacial de las comunidades vegetales de los campos de dunas, mediante el método diacrónico, se ha utilizado con dos finalidades principales: por un lado, para estudiar los cambios en la vegetación como consecuencia de las actividades humanas (Curr et al., 2000; Muñoz-Reinoso, 2001; Kutiel et al., 2004a; Levin y Ben-Dor, 2004; Hernández-Cordero et al., 2012); y, por otro, para analizar los procesos de sucesión ecológica (Van der Maarel et al., 1985; Van der Dorp et al., 1985; Shanmugam; Droesen et al., 1995; Barnsley, 2002; Kutiel et al., 2004b). El estudio diacrónico se basa, sobre todo, en el seguimiento de las comunidades vegetales mediante fotografías aéreas y ortofotos digitales. No obstante, en los últimos tiempos la utilización de imágenes captadas por satélites artificiales, o por sensores aerotransportados multiespectrales, se ha incrementado enormemente, ya que permiten obtener datos muy valiosos: pues, al captar información en regiones no visibles del espectro electro-magnético (Levin et al., 2006), permiten conocer variaciones del estado de la vegetación y de su cobertura en función de la humedad que contengan. Los datos obtenidos con estas herramientas se han empleado en los sistemas de dunas, por ejemplo, para la realización de cartografía automática de la vegetación y de hábitats (De Lange et al., 2004; De Backer et al., 2004; Lucas et al., 2002; Shanmugam et al., 2003). Sin embargo, el uso de firmas espectrales tiene algunas limitaciones como, por ejemplo, que algunas comunidades vegetales de las dunas no pueden ser discriminadas en determinadas épocas del año (Van Til et al., 2004). En contrapartida, presenta la ventaja de permitir una precisión cercana al 60-70% en la clasificación de los diferentes tipos de vegetación (De Lange et al., 2004). Otras fuentes de datos que se han empezado a utilizar son los sensores LiDAR, que proporcionan información altimétrica digital y directa, lo que permite conocer la estructura de la bóveda de la vegetación (Lefsky et al., 2002).

Esto es de gran interés, ya que permite calcular con precisión, y de forma digital, la altura de la vegetación en toda la zona de estudio, algo que hasta el momento no era posible mediante fotografías aéreas o imágenes de satélites obtenidas con sensores óptico-electrónicos.

El análisis de la evolución de la vegetación, a través de documentos aéreos, puede basarse en la delimitación o asignación manual de las diferentes comunidades (Van der Maarel et al., 1985; Van Dorp et al., 1985; Muñoz-Reinoso, 2001; Shanmugam y Barnsley, 2002; García et al., 2012; Hernández-Cordero et al., 2015a); el procesamiento digital de imágenes (Kadmon y Harari-Kremer, 1999; Kutiel et al., 2004a; Levin y Ben-Dor, 2004), las clasificaciones utilizando aspectos texturales de las imágenes (Kutiel et al., 2004b; Berberoglu et al., 2010) y las clasificaciones sobre ortofotos de falso color (Droesen et al., 1995). En general, estas dos últimas posibilidades señaladas se corresponden con los dos modelos de datos existentes. La primera opción se identifica con el modelo de datos vectorial, mientras que la segunda lo hace con el *raster*. Uno de los limitantes más importantes en la utilización de las fotografías aéreas lo constituye su rectificación geométrica, ya que los errores que se pueden producir en este proceso ocasionan, a su vez, errores en los cálculos estadísticos de la superficie de las unidades de vegetación (Shanmugam y Barnsley, 2002).

El método vectorial consiste en la digitalización de polígonos, u otras entidades (líneas o puntos), que abarcan las unidades de vegetación diferenciadas para distintos periodos temporales. Posteriormente, los mapas realizados para cada fecha se cruzan mediante técnicas de superposición, obteniéndose nuevas unidades, que son el producto de la intersección de los diferentes polígonos correspondientes a cada periodo temporal. Existen algunas variantes de este modelo, como la asignación de valores puntuales a las unidades identificadas, con el fin de realizar posteriormente una superposición de *grids* de puntos de diferentes años (Van der Maarel et al., 1985; Van Dorp et al., 1985).

Con el método *raster* la reclasificación de cada píxel da la posibilidad de obtener datos de cobertura de forma automática, por lo que con esta metodología se estudia principalmente la evolución de la cobertura vegetal, y no de los diferentes tipos de comunidades vegetales existentes (excepto cuando se utilizan sensores hiperespectrales, con los que se pueden obtener firmas espectrales de diferentes comunidades vegetales).

Los SIG se han convertido en herramientas de apoyo muy importante en estos tratamientos, dado que permiten integrar distintas fuentes (fotografías aéreas, ortofotos digitales, imágenes de satélites, modelos digitales del terreno...), generar información espacial georreferenciada a partir de las mismas, analizar los cambios espaciales y cuantificar los procesos de sucesión vegetal. Un claro ejemplo del potencial de la aplicación de esta tecnología en el estudio de la vegetación en sistemas de dunas son los trabajos de Shanmugam y Barnsley (2002) y de Hernández-Cordero et al. (2015a,b).

El estudio de la dinámica de la vegetación relacionado con la sucesión ecológica, mediante documentos aéreos, permite ampliar las perspectivas de este tipo de investigaciones (Van Dorp et al., 1985; Kutiel et al., 2004b), ya que se pueden analizar los cambios

de la totalidad del área de estudio. Además, resulta un método apropiado cuando las comunidades vegetales se distinguen con facilidad en las fotografías aéreas, y las tasas de cambio de la vegetación son adecuadas al tiempo transcurrido entre las series de fotos (Van Dorp et al., 1985). El mayor problema está relacionado con los posibles errores de identificación de las comunidades originados por una mala interpretación de las fotografías aéreas (Van Dorp et al., 1985).

La dinámica de los sistemas de dunas litorales está controlada por los procesos sedimentarios eólicos, que generan una serie de geofomas características. Entre otros elementos, la vegetación juega un papel fundamental en la formación de sistemas de dunas, ya que participa de forma activa en la acumulación de sedimentos (Hesp, 1991). Así, las plantas suponen un añadido a la rugosidad de la superficie del terreno, lo que da como resultado la disminución de la velocidad del viento y, con ello, la reducción de las tensiones que soporta el transporte sedimentario eólico. De esta manera, las plantas captan los granos de arena que son transportados por saltación, favoreciendo su acumulación. Existe, por tanto, una relación directa entre las acumulaciones de arenas, la formación y desplazamiento de las dunas y la cubierta vegetal (Hesp, 1991; Moreno-Casasola, 1986).

Las tasas de desplazamiento también han sido estudiadas a partir de tecnologías de la información geográfica, mediante análisis diacrónicos. De nuevo el uso de imágenes aéreas permite el cálculo del movimiento de las dunas en distintos sistemas dunares litorales, combinando distintos métodos, *raster* o vectorial. (Danin y Nukrian, 1991; Gay, 1999; Tsoar y Blumberg, 2002; Kutiel et al., 2004a; Levin y Ben-Dor, 2004; Ojeda et al., 2005; Del Valle et al., 2008; Eastwood et al., 2011; Hernández-Cordero et al., 2015b).

Considerando estos antecedentes, el trabajo tiene un doble objetivo: analizar la relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento de las dunas, considerada como factor limitante y estructural en la distribución de las comunidades vegetales; e investigar la aportación de herramientas TIGs en este tipo de estudios. El trabajo se realiza en el campo de dunas de Maspalomas (Fig. 1), declarado como Reserva Natural Especial por el Decreto Legislativo 1/2000, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Texto Refundido de las Leyes de Ordenación del Territorio de Canarias y de Espacios Naturales Protegidos de Canarias. Se trata de un campo de dunas transgresivo que, en función de los procesos sedimentarios eólicos, presenta tres zonas (Hernández-Cordero et al., 2015a): una zona activa, una zona semiestabilizada y una zona estabilizada. La investigación se centra en la zona activa (Fig. 1).



Figura 1. Localización del sistema de dunas de Maspalomas. La línea en color negro delimita la zona activa, donde se desarrolla el estudio.

2. METODOLOGÍA

La metodología se realiza en tres fases: i) caracterización de la vegetación y creación de una capa vectorial de las comunidades vegetales; ii) cálculo de las tasas de desplazamiento de las dunas; iii) estudio de la relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento de las dunas mediante análisis espacial.

2.1. Caracterización de la vegetación y generación de la capa vectorial de comunidades vegetales

La caracterización de las comunidades vegetales parte de la delimitación de unidades homogéneas de vegetación sobre documentos aéreos. Estas unidades son herramientas cartográficas claves en el análisis, pues en ellas se basa la estrategia de muestreo. Es decir, cada unidad permite un primer acercamiento a la vegetación del área de estudio, mediante la división sistemática del espacio a analizar en función de las características fisionómicas y estructurales de la cubierta vegetal. Siguiendo un muestreo estratificado se determinan las comunidades vegetales existentes, identificando las especies que las componen. Se siguió la siguiente secuencia:

1. En una primera etapa, se fotointerpretaron ortofotos digitales a escala 1:5.000 de los años 2002 y 2003, utilizando variables visuales para la identificación de la vegetación, como el color, el tamaño, la densidad, la textura y el patrón espacial. Ello permitió delimitar unidades homogéneas de vegetación en función de su fisionomía, definiéndose diferentes formaciones vegetales, como matorrales, bosquetes y comunidades herbáceas, así como aquellas zonas que carecían de vegetación. Además, dentro de cada grupo fisionómico se distinguieron diferentes tipos, en función de sus características concretas, de forma que, por ejemplo, se identificaron varios tipos de formaciones arbustivas, debido a sus características (forma de las plantas, tono, textura, etc.), siendo individualizadas como unidades de vegetación diferenciadas.
2. En una segunda etapa, realizada a través del trabajo de campo, se verificaron las unidades delimitadas previamente, considerando la especie o especies dominantes. Esto se vio facilitado por el escaso número de especies dominantes (normalmente entre una y tres) de la mayor parte de las unidades de vegetación. Para ello se determinó el estrato con mayor peso específico por biotipo, atendiendo al modelo de Raunkiaer (1905), para seguidamente identificar la especie o especies dominantes del mismo, que se utilizan para definir y denominar a la comunidad vegetal, estableciéndose diferentes tipos, que coinciden con el concepto de consociación (Ferrerías y Fidalgo, 1991). En aquellos casos en los que varios estratos tienen una importancia similar, se considera como dominante el superior (el estrato arbustivo sobre el herbáceo y el arbóreo sobre el arbustivo).
3. Las unidades correspondientes a cada comunidad fueron subdivididas, a su vez, en otras, atendiendo a su composición florística y estructura, según los biotipos, estableciéndose diferentes subcomunidades vegetales. Esto permite detectar de forma preliminar variantes de cada comunidad, que posteriormente puedan ser inventariadas.
4. La delimitación definitiva de las unidades de vegetación obtenidas a partir del trabajo de campo se realizó sobre la ortofoto digital del año 2003, mediante un programa SIG, generándose una capa de información espacial georeferenciada en formato

shapefile con una tabla de atributos asociada. En la tabla de atributos se crearon cuatro campos: i) comunidad vegetal; ii) subcomunidad vegetal; iii) superficie (en metros cuadrados) y iv) superficie (en hectáreas).

5. Las comunidades vegetales fueron caracterizadas mediante la realización de inventarios de vegetación. La vegetación fue inventariada, además de por estratos de altura, por estratos en función de los biotipos establecidos por Raunkiaer (1905). Los inventarios mediante estratos de altura proporcionan información de la dinámica de la vegetación, mientras que los estratos por biotipos indican la estructura general de la vegetación (Arozena y Molina, 2000). De esta forma, se pudo determinar de forma precisa la comunidad vegetal de cada unidad de vegetación, así como sus características.

2.2. Cálculo de las tasas de desplazamiento de las dunas

Las dunas existentes, tanto en la zona activa como en proceso de estabilización, se desplazan de su posición original, por lo que son dunas transgresivas. La importancia de la movilidad de las dunas en la distribución de la vegetación ya ha sido indicada, así como el hecho de que en esta investigación únicamente se analizarán las de la zona activa. Hay que considerar que el avance de las dunas móviles produce el enterramiento de las plantas, lo que limita su desarrollo e, incluso, ocasiona su muerte. Esto es especialmente importante en Maspalomas, donde las dunas móviles presentan alturas de hasta 14 metros, lo cual produce el enterramiento completo, al menos durante un tiempo, de la mayor parte de las especies vegetales (Hernández-Cordero et al., 2015b). Por todo ello, se puede cuantificar su importancia como factor ambiental estructurante en la distribución de las comunidades vegetales. Las tasas de desplazamiento de la zona activa fueron calculadas a través del método propuesto por Gay (1999). En primer lugar, se extrajeron los frentes de las dunas de las ortofotos correspondientes a los años 2002 (enero y febrero) y 2003 (noviembre) mediante digitalización en pantalla. Entre ambos frentes se trazaron una serie de vectores equidistantes, para los cuales se calculó su longitud en metros (Fig. 2). Las tasas de desplazamiento de las dunas se determinaron dividiendo la longitud de cada vector entre el periodo de tiempo que transcurre entre las dos ortofotos, 1,9 años. El siguiente paso consistió en extrapolar las tasas de avance calculadas en estos puntos a toda la superficie de estudio, obteniéndose un modelo digital de las tasas de desplazamiento de las dunas en la zona activa del sistema de Maspalomas (en adelante MDTD). Este paso se resolvió mediante un ejercicio de interpolación espacial. Se optó por un método de interpolación regularizado *spline* con tensión (Mitasova et al., 2005; Ojeda et al., 2007). Los valores de las tasas de avance de los vectores previamente trazados fueron asignados a puntos, correspondientes a los centroides de cada vector. Se obtuvieron un total de 1.481 puntos, a partir de los cuales se abordó la interpolación *spline* utilizando un tamaño de celdilla de 5 x 5 m. y un número de puntos de 12.

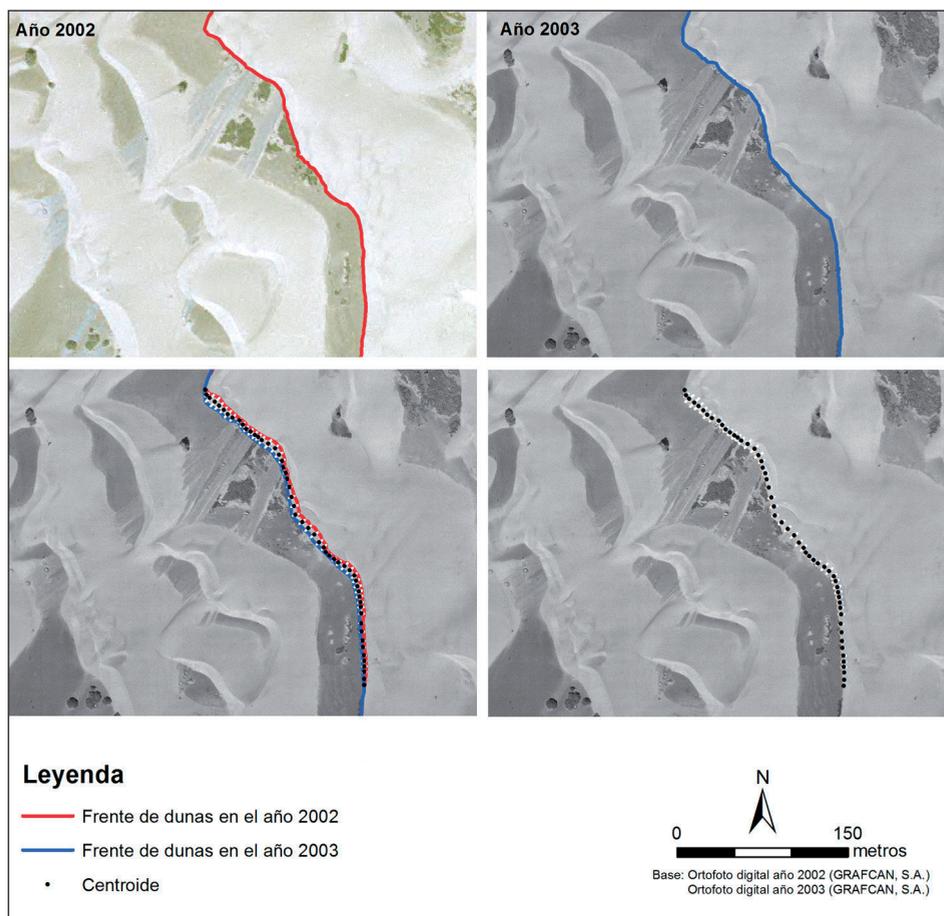


Figura 2. Ejemplo de la técnica utilizada para calcular las tasas de desplazamiento de las dunas.

Una vez obtenido el MDTD de las dunas, se convirtieron los datos a formato vectorial (Tabla I), con el fin de poder cruzar esta capa con la de la vegetación obteniendo una nueva capa en formato *shapefile*. Finalmente, siguiendo el procedimiento explicado en apartados anteriores, se procedió a superponer esta capa y la correspondiente a las comunidades vegetales, de forma que se obtuvo la relación entre las tasas de desplazamiento y la distribución de la vegetación.

Tabla I
Reclasificación de las tasas de avance de las dunas

Valores	Reclasificación	Valores	Reclasificación
-37 - 0	0	15 - 16	16
0 - 1	1	16 - 17	17
1 - 2	2	17 - 18	18
2 - 3	3	18 - 19	19
3 - 4	4	19 - 20	20
4 - 5	5	20 - 21	21
5 - 6	6	21 - 22	22
6 - 7	7	22 - 23	23
7 - 8	8	23 - 24	24
8 - 9	9	24 - 25	25
9 - 10	10	25 - 26	26
10 - 11	11	26 - 27	27
11 - 12	12	27 - 28	28
12 - 13	13	28 - 29	29
13 - 14	14	29 - 30	30
14 - 15	15		

2.3. Relación entre vegetación y las tasas de desplazamiento de las dunas

La metodología sustentada en el SIG se basó en el cruce (*overlay*) de la capa correspondiente al mapa de vegetación del año 2003 con la capa de tasas de desplazamiento de las dunas entre 2002-2003. Consiste en un proceso de análisis espacial, que supone la extracción de información nueva a partir del cruce de las capas vectoriales. De esta forma, se obtuvo una nueva capa de información vectorial en la que se recogen las combinaciones posibles.

El siguiente paso fue la creación de un nuevo campo en la tabla de atributos, donde se calculó la superficie ocupada por los nuevos polígonos. La superficie de cada comunidad, que se asocia a cada tasa de desplazamiento de las dunas, se interpretó como un indicador de la vinculación entre ambos. De esta forma, cuanto más superficie de una comunidad vegetal se relacione con una determinada velocidad de desplazamiento, se considera mayor su preferencia por desarrollarse dentro de esos umbrales de movilidad de las dunas, o su capacidad para tolerar esas tasas.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de la vegetación y creación de una capa vectorial de comunidades vegetales

Pese a su reducida extensión, el campo de dunas de Maspalomas posee una significativa diversidad de comunidades vegetales. Las características naturales específicas de este enclave geográfico determinan la existencia de especies y tipos de vegetación diferentes en el contexto insular, y de distribución restringida, como es el caso de los matorrales de *Traganum moquinii*, de los bosquetes de *Tamarix canariensis*, o incluso de las comunidades casi exclusivas de este espacio, como los céspedes de *Cyperus laevigatus*. Se han definido y cartografiado 530 unidades de vegetación, las cuales se han agrupado en 19 tipos de comunidades vegetales diferentes. La superficie ocupada por la vegetación es de 125,1 ha, del total de las 360,9 ha que forman el campo de dunas actual (Hernández-Cordero et al., 2015a). Es decir, el 34,7% del campo de dunas está ocupado por vegetación, mientras que en la zona activa sólo supone el 4,5%. En la zona activa están presentes siete comunidades vegetales: comunidad de *Traganum moquinii*, comunidad de *Tamarix canariensis*, comunidad de *Launaea arborescens*, comunidad de *Heliotropium bacciferum*, comunidad de *Cyperus laevigatus*, comunidad de *Salsola kali* y comunidad de *Cyperus capitatus-Ononis serrata* (Fig. 3).

3.2. Tasas de desplazamiento de las dunas

Estudios precedentes han demostrado que el sistema de dunas de Maspalomas presenta diferentes tasas de desplazamiento de las dunas, en función de la localización de esas geoformas (Hernández Calvento, 2006). El MDTD realizado muestra que las tasas de desplazamiento en la zona activa tienen diferencias sustanciales en función de su localización y del tipo de unidad geomorfológica (Tabla II; Fig. 4). Así, en la playa del Inglés, que funciona como zona de entrada de sedimentos al sistema, no se observan geoformas dunares significativas, por lo que son difícilmente cartografiables. Al mismo tiempo, las dunas detectadas se desplazan a una gran velocidad, por lo que resulta imposible estudiar su evolución mediante ortofotos consecutivas que presenten más de un año de diferencia. En consecuencia, no ha podido calcularse las tasas de desplazamiento de todas las dunas identificadas, por lo que los datos obtenidos para la zona de playa del Inglés son incompletos. Detrás de la playa del Inglés, en la duna costera, las tasas de desplazamiento son las más bajas, tanto considerando las máximas, como la media. Las mayores tasas de avance se producen en las dunas transgresivas bajas y en las dunas transgresivas altas. En la primera zona, que presenta los mayores valores en las máximas y la media, estas altas tasas se relacionan con la existencia de dunas barjanas y láminas de arena, que se adentran en el sistema a gran velocidad. En las dunas transgresivas altas las tasas disminuyen, aunque en algunos sectores se mantienen considerablemente altas. De esta forma, entre

la zona inmediata a las dunas transgresivas bajas y la terraza alta del Inglés, las dunas presentan mayores tasas. Éstas disminuyen conforme se desplazan hacia el oeste, aunque pueden aumentar ocasionalmente en algunos lugares.

Tabla II

Estadísticas básicas de las tasas de desplazamiento de las dunas de las geoformas de la zona activa

Geoformas	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Playa (playa del Inglés)	0	15,9	2,1	4,0
Duna costera	0	11,6	1,2	2,3
Dunas transgresivas bajas	0	31,3	7,4	6,2
Dunas transgresivas altas	0	20,3	4,8	3,6

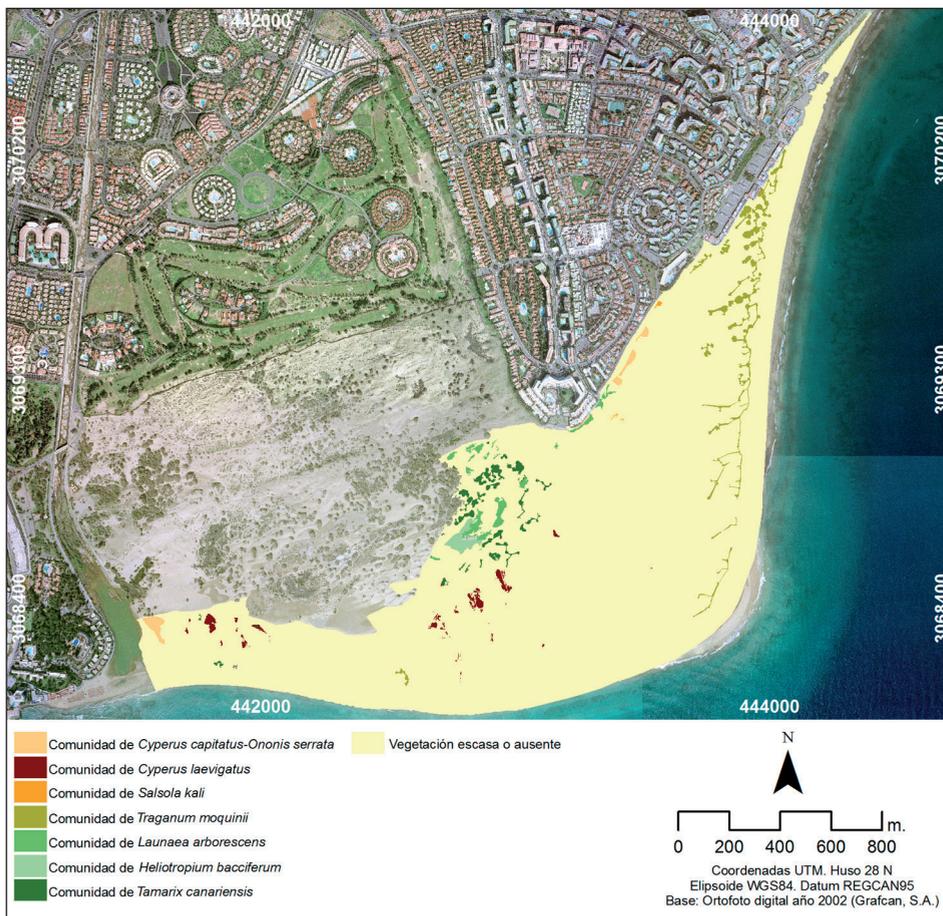


Figura 3. Comunidades vegetales de la zona activa del sistema de dunas de Maspalomas (año 2003).

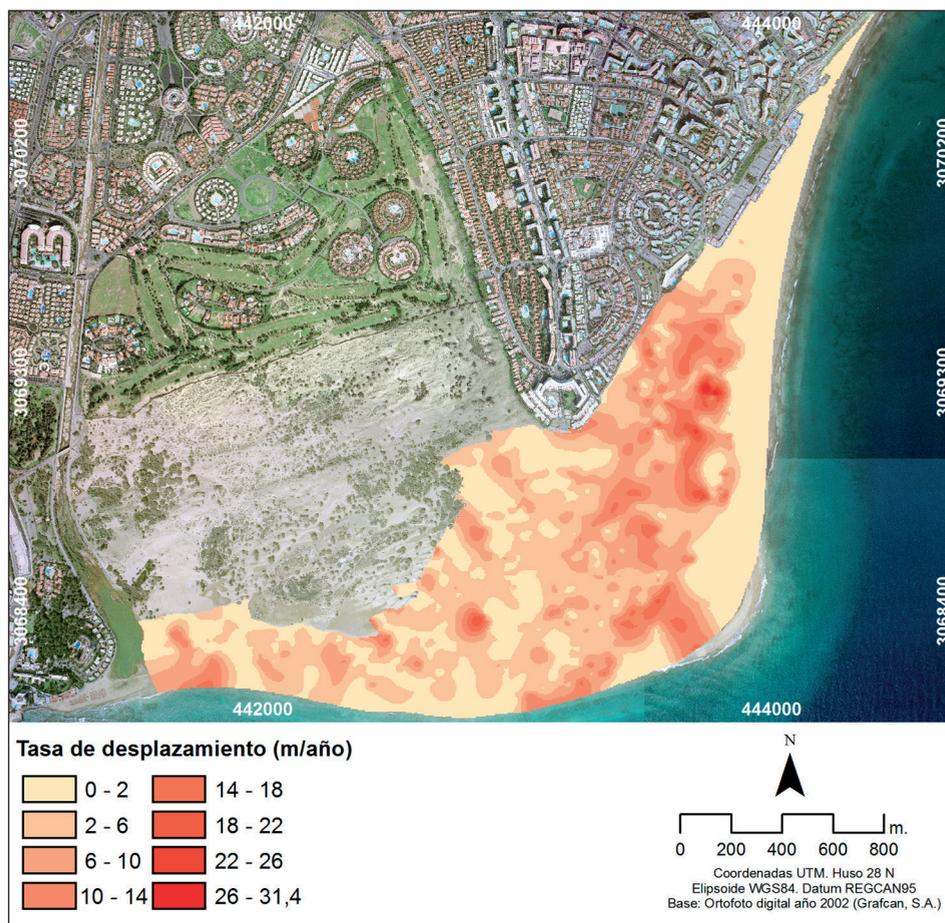


Figura 4. Modelo digital de tasas de desplazamiento de las dunas (MDTD) entre 2002 y 2003.

3.3. Relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento de las dunas

Considerando el conjunto de la vegetación, es decir, la totalidad de las comunidades vegetales presentes en la zona activa, se observa una disminución gradual de su superficie conforme se incrementan las tasas de desplazamiento de las dunas (Fig. 5), presentando una correlación logarítmica muy significativa.

En las zonas donde las dunas no se mueven, la superficie ocupada por la vegetación es la más extensa, disminuyendo de forma muy significativa a partir de velocidades de desplazamiento de 1 m/año. El umbral crítico se sitúa entorno a los 12-13 m/año, a partir del cual la vegetación desaparece paulatinamente, cuestión que se produce de manera definitiva a partir de los 20 m/año. Esto explica la carencia absoluta de vegetación en torno

a los primeros cordones de dunas transgresivas altas y a la alineación con la terraza alta del Inglés, así como en una parte significativa de las dunas transgresivas bajas, donde las tasas de avance son muy altas. Sin embargo, también se observan zonas sin vegetación en áreas donde las tasas son muy bajas, incluso nulas. Apparently esto se relaciona con la ausencia de depresiones interdunares (*slacks*), que son muy importantes para la distribución de la vegetación en la zona activa (Hernández-Cordero et al., 2015a).

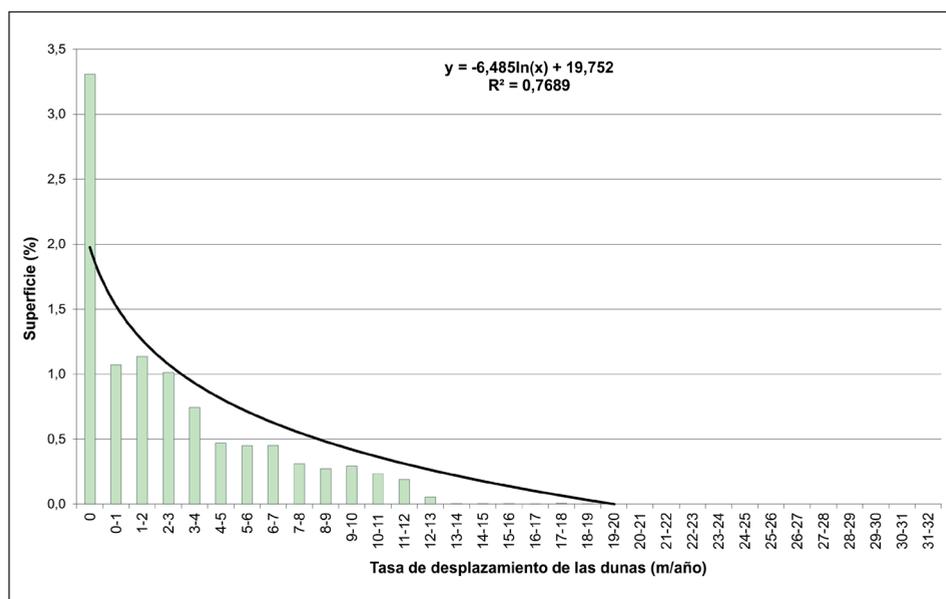


Figura 5. Distribución de las comunidades vegetales en relación con las tasas de desplazamiento de las dunas.

Existe una relación bastante significativa entre la superficie que ocupa cada comunidad vegetal y las tasas de desplazamiento de las dunas (Fig. 6). Un grupo de ellas presenta la mayor parte de su superficie en las zonas donde las dunas no se mueven, es decir, donde las tasas de avance son nulas. Éste es el caso de la comunidad de *Traganum moquinii*, que posee más del 60% de su superficie en áreas sin aparente movilidad. Hay que tener en cuenta que en esta zona no se han podido identificar las mismas dunas en las dos ortofotos utilizadas, por lo que no se ha podido calcular las tasas de desplazamiento de todas las dunas detectadas en la ortofoto del año 2002, siendo, por lo tanto, la información incompleta. Además, es donde predominan dunas en montículo, que carecen de desplazamiento horizontal significativo, aunque la ausencia de movilidad no implica la inexistencia de procesos sedimentarios eólicos activos (deflación, crecimiento vertical de la duna, etc.). Sin embargo, esta comunidad es la que también presenta una mayor tolerancia a este fac-

tor, al tener una parte de su superficie en las dunas transgresivas bajas, donde se presentan las mayores tasas de avance registradas, que pueden alcanzar hasta 19 m/año.

Las restantes comunidades presentan la mayor parte de su superficie en áreas móviles, pero dentro del límite indicado anteriormente. Se distribuyen principalmente en las zonas donde las tasas de avance se sitúan entre 1 y 3 m/año. Las comunidades de *Cyperus laevigatus*, de *Launaea arborescens* y de *Cyperus capitatus-Ononis serrata* incrementan la superficie ocupada en áreas con unas tasas de desplazamiento comprendidas entre 1 y 3 m/año, límite a partir del cual su distribución disminuye gradualmente. En el caso de la última comunidad, su distribución en la zona activa es muy reducida, pues sólo hay algunos pequeños enclaves en zonas periféricas cercanas a la terraza alta del Inglés (zona bastante alterada por el desarrollo turístico).

La comunidad de *Tamarix canariensis* presenta un patrón similar en función de las tasas de desplazamiento, aunque su superficie comienza a disminuir a partir de 2 m/año. La comunidad de *Salsola kali* es la que presenta una mayor superficie en zonas con tasas de desplazamiento muy altas, entre 6 y 9 m/año. En contrapartida, las comunidades de *Suaeda mollis* y *Heliotropium bacciferum* se localizan principalmente en zonas con menor movilidad.

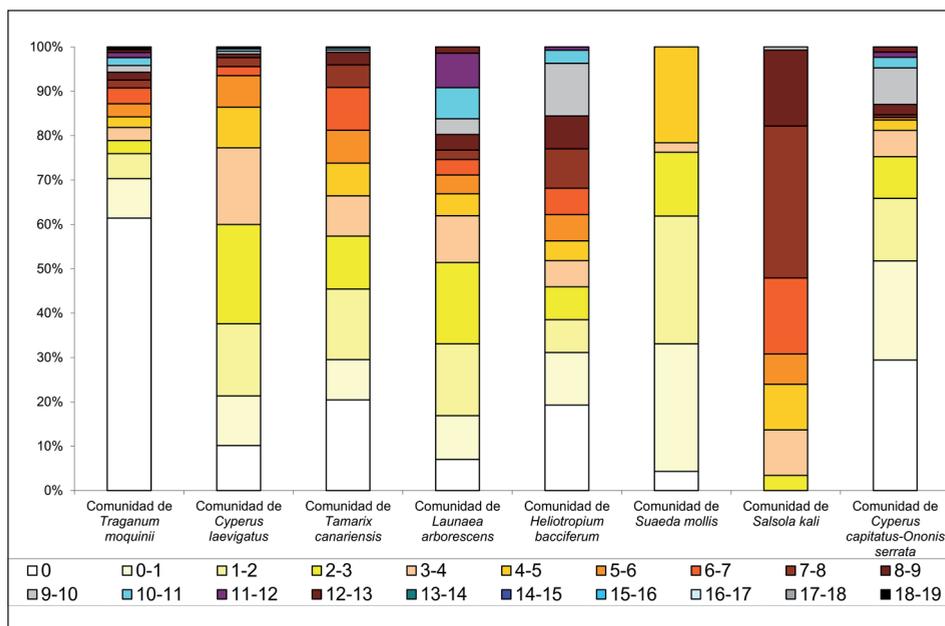


Figura 6. Distribución de las comunidades vegetales en relación con las tasas de desplazamiento de las dunas (m/año).

4. CONCLUSIONES

La utilización de las TIG en el estudio de la vegetación dunar constituye una herramienta muy útil, pues facilita el análisis de los factores ambientales que controlan la distribución de las comunidades vegetales. Esto es especialmente relevante cuando el factor analizado presenta cambios muy significativos en cortos periodos de tiempo, como es el caso de las tasas de desplazamiento de las dunas en los sistemas transgresivos. En este contexto, la aplicación de las TIG permite realizar estudios que, de otra forma, requerirían mucho tiempo de trabajo de campo, y la realización de controles en cortos intervalos temporales, debido a la rápida dinámica que presentan las dunas en estos sistemas. Sin embargo, también tienen algunas limitaciones, como el tiempo transcurrido entre las fuentes de información que se utilicen (ortofotos en este caso) para el cálculo de las tasas de desplazamiento de las dunas. De esta forma, en las dunas con mayor movilidad, como las situadas en los alrededores de la playa del Inglés, se deben utilizar documentos aéreos con un intervalo de tiempo inferior al año, de forma que se puedan detectar las dunas identificadas en las dos ortofotos utilizadas en el cálculo de las tasas de desplazamiento de las dunas. En definitiva, la resolución temporal de las ortofotos empleadas es un aspecto crítico para el análisis de variables tan dinámicas como la movilidad de las dunas de los sistemas transgresivos áridos. Otro aspecto a tener en cuenta, que también está relacionado con el clima árido, es la variación interanual que tiene las tasas de desplazamiento de las dunas, ya que éstas depende de otros factores, como la precipitación anual registrada cada año o el número e intensidad de los temporales de mar y viento.

Las tasas de desplazamiento de las dunas es un factor ambiental significativo en la distribución de la vegetación en sistemas de dunas transgresivos. En aquellas zonas donde las tasas de desplazamiento superan los 20 m/año, la vegetación es incapaz de desarrollarse. En las áreas potencialmente aptas para el desarrollo de la vegetación, se establece una distribución de las diferentes comunidades vegetales en función de su tolerancia a la movilidad de las dunas. De esta forma, la comunidad que resiste una mayor tasa de desplazamiento es la de *Traganum moquinii*. Le sigue la comunidad de *Salsola kali*, que se localiza en zonas donde las tasas oscilan entre 6 y 9 m/año. Las comunidades de *Cyperus laevigatus*, de *Launaea arborescens* y de *Cyperus capitatus-Ononis serrata* resisten unas tasas de desplazamiento comprendidas entre 1 y 3 m/año. Por su parte, la comunidad de *Tamarix canariensis* soporta una tasa de desplazamiento máxima de 2 m/año. Finalmente, las comunidades de *Suaeda mollis* y de *Heliotropium bacciferum* se localizan principalmente en zonas con menor movilidad.

AGRADECIMIENTOS

Esta es una contribución de los proyectos REN2003-05947, SEJ2007-64959, CSO2010-18150 y CSO2013-43256-R del Plan Nacional I+D+i, cofinanciados con fondos FEDER.

BIBLIOGRAFÍA

- Arozena, M.E., Molina, P. (2000): "Estructura de la vegetación", En G. Meaza (Coord.), Metodología y práctica de la biogeografía, Ediciones del Serval, Barcelona, pp. 77-146.
- Berberoglu, S., Akin, A., Atkinson, P.M., Curran, P.J. (2010): "Utilizing image texture to detect land-cover change in Mediterranean coastal wetlands". *International Journal of Remote Sensing*, 31, pp. 2793-2815.
- Curr, R.H.F., Koh, A., Edwards, E., Williams, A.T., Davies, P. (2000): "Assessing anthropogenic impact on Mediterranean sand dunes from aerial digital photography", *Journal of Coastal Research*, 6, pp. 15-22.
- Danin, A., Nukrian, R. (1991): "Dynamics of dune vegetation in the southern coastal area of Israel since 1945", *Documents Phytosociologiques* 13, pp. 281-296.
- De Lange, R., Van Til, M., Dury, S. (2004): "The use of hyperspectral data in coastal zone vegetation monitoring", *EARSeL eProceedings*, 3 (2), pp. 143-153.
- Del Valle, H.F., Rostagno, L.M., Coronato, F.R., Bouza, P.J., Blanco, P.D. (2008): "Sand dune activity in north-eastern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 72, pp. 411-422.
- Droesen, W. J., Van Til, M., Assendorp, D. (1995): "Spatio-temporal modelling of the vegetation structure in the Amsterdam water works dunes using digital false colour orthophotos". *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4 (1), pp. 106-114.
- Eastwood, E., Nield J. M., Baas A. C. W., Kocurek G. (2011): "Modelling controls on aeolian dune-field pattern evolution", *Sedimentology*, 58, pp. 1391-1406.
- Elmore, A. J., Mustard, J.F., Manning, S. J., Lobell, D. B. (2000): "Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index". *Remote Sensing of Environment*, 73, pp. 87-102.
- Ferreras, C., Fidalgo, C.E. (1991): "Biogeografía y edafogeografía", Ed. Síntesis. Madrid, 262 pp.
- Franklin, J. (1995): "Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients", *Progress in Physical Geography*, 19 (4), pp. 474-499.
- Gay, S.P. (1999): "Observations regarding the movement of barchan sand dunes in the Nazca to Tanaca area of Southern Peru", *Geomorphology*, 27, pp. 279-293.
- García, L., Pérez-Chacón, E., Hernández, A. y Fernández, E. (2012): "Distribución espacial de la cobertura vegetal en el sistema sedimentario eólico de la isla de La Graciosa (islas Canarias, España)". In: Cunill, Raquel; Pelachs, Albert; Pérez-Obiol, Ramón; Soriano, J. Manuel. (Eds.), *Las zonas de montaña: Gestión y Biodiversidad*. Fundació Catalunya Caixa, Barcelona, pp. 139-144. ISBN: 978-84-616-0354-1. In: VII Congreso Español de Biogeografía. Pirineos 2012.
- Guisan, A., Theurillat, J-P., Kienast, F. (1998): "Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment", *Journal of Vegetation Science*, 9, pp. 65-74.

- Hall D. K., Foster J. L., Verbyla D. L., Klein A. G. y Benson C. S. (1998): "Assessment of Snow-Cover Mapping Accuracy in a Variety of Vegetation-Cover Densities in Central Alaska", *Remote sensing of Environment*, 66, pp. 129-137.
- Hernández Calvento, L. (2006): "Diagnóstico sobre la evolución del sistema de dunas de Maspalomas (1960-2000)", Cabildo de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 361 pp.
- Hernández-Cordero, A.I., Pérez-Chacón Espino, E., Hernández-Calvento, L. (2012): "La investigación como soporte de la gestión: el ejemplo de la duna costera (foredune) de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)", En A. Rodríguez-Perea, G.X. Pons, F.X. Roig-Munar, J.A. Martín-Prieto, M. Mir-Gual, J.A. Cabrera (eds.), *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*, Palma de Mallorca, Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 19, pp. 289-306.
- Hernández-Cordero, A.I., Pérez-Chacón Espino, E., Hernández-Calvento, L. (2015a): "Vegetation, distance to the coast, and aeolian geomorphic processes and landforms in a transgressive arid coastal dune system", *Physical Geography*, 36(1), pp. 60-83.
- Hernández-Cordero, A.I., Hernández-Calvento, L., Pérez-Chacón Espino, E. (2015b): "Relationship between vegetation dynamics and dune mobility in an arid transgressive coastal system, Maspalomas, Canary Islands", *Geomorphology*, 238, pp. 160-176.
- Hesp, P.A., (1991): "Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes". *Journal of Arid Environments* 21, pp. 165-191.
- Kadmon, R., Harari-Kremer, R. (1999): "Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs", *Remote Sensing of Environment*, 68, pp. 164-176.
- Keijsers, J.G.S., De Groot, A.V., Riksen, M.J.P.M. (2015): "Vegetation and sedimentation on coastal foredunes", *Geomorphology*, 228, pp. 723-734.
- Kutiel, P., Cohen, O., Shoshany, M., Shub, M. (2004a): "Vegetation establishment on the southern Israeli coastal sand dunes between the years 1965 and 1999", *Landscape and Urban Planning*, 67, pp. 141-156.
- Kutiel, P., Cohen, O., Shoshany, M. (2004b): "Invasion rate of the alien species *Acacia saligna* within coastal sand dune habitats in Israel". *Israel Journal of Plant Sciences*, 52(2), pp. 115-124.
- Lambin, E. F., Ehrlich, D. (1997): "Land-Cover changes in Sub-Saharan Africa (1982-1981): Application of a change index Based on Remotely Sensed Surface Temperature and Vegetation Indices at a Continental Scale". *Remote Sensing of Environment*, 61, pp. 181-200.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J. (2002): "Lidar remote sensing for ecosystem studies", *BioScience*, 52 (1), pp. 19-30.
- Levin, N., Ben-Dor, E. (2004): "Monitoring sand dune stabilization along the coastal dunes of Ashdod-Nizanim, Israel, 1945-1999", *Journal of Arid Environments*, 58, pp. 335-355.

- Levin, N., Kidron, G.J., Ben-Dor, E. (2006): "The spatial and temporal variability of sand erosion across a stabilizing coastal dune field". *Sedimentology*, 53, pp. 697-715.
- Levin, N., Kidron, G.J., Ben-Dor, E. (2008): "A field quantification of coastal dune perennial plants as indicators of surface stability, erosion or deposition". *Sedimentology* 55 (4), pp. 751-772.
- Lucas, N.S., Shanmugam, S., Barnsley, M. (2002): "Sub-pixel habitat mapping of a coastal dune ecosystem", *Applied Geography*, 22, pp. 253-270.
- Martin, W.E. (1959): "The vegetation of Island Beach State Park, New Jersey", *Ecological Monographs*, 29 (1), pp. 1-46.
- Martínez, M.L., Vázquez, G., Sánchez Colón, S. (2001): "Spatial and temporal variability during primary succession on tropical coastal sand dunes", *Journal of Vegetation Science*, 12, pp. 361-372.
- Maun, M.A. (2004): "Burial of plants as a selective force in sand dunes", En M.L. Martínez, N.P. Psuty (eds.), *Coastal dunes. Ecology and Conservation. Ecological Studies* 171, Springer, pp. 119-135.
- Mitasova, H., Overton, M., Harmon, R.S. (2005): "Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina", *Geomorphology*, 72, pp. 204-221.
- Moreno-Casasola, P. (1986): "Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system", *Vegetatio*, 65, pp. 67-76.
- Muñoz-Reinoso, J.C. (2001): "Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain", *Journal of Hydrology*, 242, pp. 197-209.
- Nield, J.M., Baas, A.C.W. (2008): "The influence of different environmental and climatic conditions on vegetated aeolian dune landscape development and response". *Global and Planetary Change*, 64, pp. 76-92.
- Oosting, H.J., Billings, W.D. (1942): "Factors effecting vegetational zonation on coastal dunes", *Ecology*, 23 (2), pp. 131-142.
- Ojeda, J., Vallejo, I., Malvarez, G.C. (2005): "Morphometric evolution of the active dunes system of the Doñana National Park, southern Spain (1977-1999)", *Journal of Coastal Research*, SI 49, pp. 40-45.
- Ojeda, J., Vallejo, I., Hernández, L., Álvarez, J. (2007): "Fotogrametría digital y lidar como fuentes de información en geomorfológica litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG", *Boletín de la A.G.E.*, 44, pp. 215-233.
- Palmer, A.R., van Staden, J.M. (1992): "Predicting the distribution of plant communities using annual rainfall and elevation: an example from southern Africa", *Journal of Vegetation Science*, 3 (2), pp. 261-266.
- Rango, A., Chopping, M., Ritchie, J., Havstad, K., Kustas, W., Schmutge, T. (2000): "Morphological Characteristics of Shrub Coppice Dunes in Desert Grasslands of Southern New Mexico derived from Scanning LIDAR". *Remote Sensing of Environment*, 74, pp. 26-44.

- Reisman-Berman, O., Kadmon, R., Shachak, M. (2006): "Spatio-temporal scales of dispersal limitation in the recolonization of a semi-arid Mediterranean old-field". *Eco-graphy*, 29, pp. 418-426.
- Shanmugam, S., Barnsley, M. (2002): "Quantifying landscape-ecological succession in a coastal dune system using aerial photography and GIS", *Journal of Coastal Conservation*, 8, pp. 61-68.
- Shanmugam, S., Lucas, N., Phipps, P., Richards, A., Barnsley, M. (2003): "Assessment of remote sensing techniques for habitat mapping in coastal dune ecosystems", *Journal of Coastal Research*, 19 (1), pp. 64-75.
- Schmidt, H., Karnieli A. (2000): "Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment". *Journal of Arid Environments*, 45, pp. 43-59.
- Tsoar, H.A., Blumberg, D.G. (2002): "Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast". *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, pp. 1147-1161.
- Underwood, E., Ustin, S., Dipietro, D. (2003): "Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery". *Remote Sensing of the Environment*, 86, pp. 150-61.
- Van der Maarel, E., Boot, R., Van Dorp, D., Rijntjes, J. (1985): "Vegetation succession on the dunes near Oostvoorne, The Netherlands; a comparison of the vegetation in 1959 and 1980", *Vegetatio*, 58, pp. 137-187.
- Van Dorp, D., Boot, R., Van der Maarel, E. (1985): "Vegetation succession on the dunes near Oostvoorne, The Netherlands, since 1934, interpreted from air photographs and vegetation maps", *Vegetatio*, 58, pp. 123-136.
- Van Til, M., Bijlmer, A., De Lange, R. (2004): "Seasonal variability in spectral reflectance of coastal dune vegetation", *EARSel eProceedings*, 3 (2), pp. 154-165.
- Wilson, J.R., Sykes, M.T. (1999): "Is zonation on coastal sand dunes determined primarily by sand burial or by salt spray? A test in New Zealand dunes", *Ecology letters*, 2, pp. 233-236.
- Woodcock, C.E., Collins, J.B., Gopal, S., Jakabhazy, V.D., Li, X., Macomber, S., Ryherd, S., Harward, V.J., Levitan, J., Wu, Y., Warbington, R. (1994): "Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model", *Remote Sensing of Environment*, 50, pp. 240- 254.
- Zeng, Z.Y., Cao, J.Z., Gu, Z.J., Zhang, Z.L., Zheng, W., Cao, Y.Q., Peng, H.Y. (2013): "Dynamic Monitoring of Plant Cover and Soil Erosion Using Remote Sensing, Mathematical Modeling, Computer Simulation and GIS Techniques", *American Journal of Plant Sciences*, 4, pp. 1466-1493.