



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Geografía

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LA VEGETACIÓN COMO INDICADORA DE LAS
ALTERACIONES AMBIENTALES INDUCIDAS POR LA ACTIVIDAD
TURÍSTICA EN LA RESERVA NATURAL ESPECIAL DE LAS DUNAS DE
MASPALOMAS**

Doctorando: Antonio I. Hernández Cordero

Las Palmas de Gran Canaria, octubre de 2012





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Geografía

TESIS DOCTORAL

PROGRAMA DE DOCTORADO: GEOGRAFÍA Y DINÁMICAS TERRITORIALES

**ANÁLISIS DE LA VEGETACIÓN COMO INDICADORA DE LAS
ALTERACIONES AMBIENTALES INDUCIDAS POR LA ACTIVIDAD
TURÍSTICA EN LA RESERVA NATURAL ESPECIAL DE LAS DUNAS DE
MASPALOMAS**

Doctorando: Antonio I. Hernández Cordero
Directora: Emma Pérez-Chacón Espino
Codirector: Luis Hernández Calvento

La Directora

El Codirector

El Doctorando

Las Palmas de Gran Canaria, octubre de 2012

A mi pequeña gran familia

Pero cuántos nacen, viven y mueren en un territorio como el nuestro sin conocer lo que ven, sin saber lo que pisan, sin detenerse en lo que encuentran! Para ellos las plantas más singulares no son sino yerbas; las piedras y las tierras casi todas una; los pájaros, los mismos que los de otras provincias; los peces, los de todos los mares.

José de Viera y Clavijo. Siglo XVIII

Agradecimientos

La tesis que ahora presento es el fruto de muchos años de esfuerzo y dedicación personal, pero en la que también han intervenido otras personas que, en mayor o menor grado, directa o indirectamente, han contribuido a conformarla como tal.

Por ello, quiero agradecer a todas las personas que de alguna forma han aportado su granito de arena para generar la “duna” que constituye esta tesis. De antemano pido disculpas a aquellas las personas que pueda olvidar en estos agradecimientos, pero a buen seguro que están en ellos de alguna forma.

En primer lugar, a los miembros del Grupo de Investigación de Geografía Física y Medio Ambiente de la ULPGC, por ser un gran equipo profesional y, sobre todo, unas grandísimas personas que siempre han estado ahí para lo que he necesitado. ¡¡Qué grandes momentos hemos pasado en ese despacho número 13 Pablo, Lidia y yo!!. También quiero agradecer el apoyo a Natalia, a Eli y a Emilio, con los que tantas campañas de campo y viajes he pasado, siempre de forma armoniosa y productiva y, por qué no decirlo, ¡¡pasándonoslo muy bien!!. Tampoco me quiero olvidar de Laura, Carolina y de la propia Eli, que me ayudaron en el diseño y en las correcciones de la tesis. A todos ellos gracias por estar también en los malos momentos personales que he pasado durante la redacción de la tesis.

A la FEDAC del Cabildo de Gran Canaria y, particularmente, a Fran Mujica Padilla, por el permiso concedido para poder reproducir las fotografías históricas de las dunas de Maspalomas que se insertan en esta tesis.

También quiero mostrar mi agradecimiento a la profesora Beatriz González Valcárcel, por su ayuda indispensable en la parte estadística de la tesis.

A la empresa pública GRAFCAN, S.A. por disponer de una fantástica Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), donde poder consultar y descargar la información geográfica de Canarias.

A Inmaculada Menéndez González, profesora de la Facultad de Ciencias del Mar, por su asesoramiento en los aspectos relacionados con la recogida de las muestras de suelo y por realizar el análisis de las muestras de aguas subterráneas.

Mis agradecimientos para José Luis Navarro Pérez, responsable del Centro de Interpretación de las Dunas de Maspalomas y un gran defensor de Maspalomas, por su apoyo logístico y ayuda incondicional en las campañas de campo realizadas por nuestro equipo.

Gracias a Pepe Mangas, por sus consejos y su predisposición constante a “echar una mano”, y por la revisión de la tesis realizada. Además, su eterno buen humor ha amenizado las campañas de campo y los viajes que hemos realizado juntos.

A mis dos queridos amigos Jose y Toni, por ser verdaderos y estar siempre apoyándome.

Al proyecto de investigación “Modelización de los Procesos Naturales y Análisis de las Consecuencias Ambientales Inducidas por el Turismo en la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)”, financiado a través de fondos FEDER y del Ministerio de Educación y Ciencia (REN2003-05947), gracias al cual pude tener los medios adecuados para el desarrollo de la tesis.

Al Cabildo de Gran Canaria, por concedernos los permisos necesarios para realizar las campañas de campo. También por facilitarnos los fotogramas aéreos del año 1977, aunque al final no le han podido sacar todo el partido que nos gustaría en esta tesis doctoral.

A la ULPGC por la beca de investigación que me concedió allá por el año 2004, gracias a la cual me inicié en esta fantástica aventura que ha supuesto la investigación y esta tesis. En especial, quiero destacar la figura de Alejandro González Rodríguez (subdirección de becas y ayudas), por su amabilidad y por las facilidades mostradas en todos los aspectos relacionados con esta beca.

A los miembros del Departamento de Geografía de la ULPGC, por haberme acogido de forma fantástica durante mi estancia en él. En especial a su Director, Alejandro González Morales, por las facilidades mostradas a la hora de realizar los trámites de la tesis.

A los botánicos Marcos Salas y Goyo Quintana, por ayudarme a identificar algunas especies de plantas de Maspalomas.

Finalmente, tengo que destacar a las personas que más significación han tenido en el desarrollo de esta tesis:

Mis directores de tesis, Emma Pérez-Chacón Espino y Luis Hernández Calvento, por su paciencia, ánimos, consejos, aportaciones y, sobre todo, por estar siempre ahí, tanto en lo personal como en lo profesional. Su sabiduría me ha sabido guiar de forma correcta por este camino de la investigación, ¡¡pese a mi cabezonería!!.

Y, por supuesto, quiero agradecer a mi querida familia, especialmente a mi madre y a mi mujer Carmen, su apoyo y comprensión y, sobre todo, por entender las ausencias físicas y mentales. A mis hermanos Sandra y Guillermo, por su apoyo en los malos momentos personales. También a mi padre, donde quiera que esté, que murió durante la elaboración de esta tesis.

Antonio I. Hernández Cordero
En Santa María de Guía a 14 de octubre de 2012

INDICE

Introducción-planteamiento del problema	1
Capítulo I: Los campos de dunas litorales y su vegetación asociada	5
1.1. Localización y características generales de los sistemas de dunas litorales.....	5
1.1.1. Las geoformas dunares.....	6
1.1.2. El movimiento de la arena.....	15
1.1.3. La agrupación de las dunas simples. Los campos de dunas litorales.....	18
1.1.4. Los contrastes internos de los campos de dunas litorales.....	19
1.1.4.1. Playa.....	20
1.1.4.2. Duna costera.....	21
1.1.4.3. Dunas interiores activas.....	26
1.1.4.4. Dunas interiores esrabilizadas.....	27
1.2. Características de la vegetación de los campos de dunas litorales.....	27
1.2.1. Variaciones en función de la latitud de la vegetación de los campos de dunas litorales.....	29
1.2.2. Los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación en los campos de dunas litorales.....	31
1.2.2.1. El spray marino.....	31
1.2.2.2. El enterramiento por arena.....	32
1.2.2.3. La topografía.....	32
1.2.2.4. Otros factores que influyen en la distribución de la vegetación...	33
1.2.2.5. ¿Existe un factor ambiental principal?.....	37
1.2.3. Mecanismos de adaptación de las plantas en los campos de dunas litorales.....	37
1.2.3.1. Adaptaciones al enterramiento por arena.....	38
1.2.3.2. Adaptaciones al spray marino.....	40
1.2.3.3. Otras adaptaciones.....	41
1.2.3.4. Adaptaciones de las plántulas.....	42
1.2.4. Papel de la vegetación en la formación de las dunas.....	44
1.2.5. Zonación de la vegetación de los campos de dunas litorales.....	49
1.2.5.1. Duna embrionaria (también denominada primaria).....	51
1.2.5.2. Duna amarilla (también denominada blanca o secundaria).....	52
1.2.5.3. Duna gris (también denominada estabilizada o terciaria).....	52
1.2.5.4. Dune slack (depresión interdunar húmeda).....	53
1.2.5.5. Otras zonaciones establecidas para la duna costera.....	57
1.2.5.6. Zonación en los sistemas de dunas transgresivos.....	58
1.2.6. La dinámica de la vegetación en los campos de dunas litorales.....	63
1.2.7. La vegetación de los campos de dunas litorales de las Islas Canarias.....	66
Capítulo II: Características ecoantrópicas del campo de dunas de Maspalomas	76
2.1. Localización, delimitación y descripción general del ámbito territorial.....	76
2.2. Características generales del medio físico de Maspalomas.....	79
2.2.1. Geología y geomorfología.....	81
2.2.1.1. El origen del campo de dunas de Maspalomas.....	82
2.2.1.2. Características geomorfológicas.....	84
2.2.1.3. Dinámica del sistema de dunas.....	90
2.2.2. Características climáticas.....	92
2.2.3. Vegetación y fauna.....	94
2.2.3.1. Vegetación.....	95
2.2.3.2. Fauna.....	99
2.2.4. Alteraciones ambientales.....	103

Capítulo III: Objetivos, hipótesis y metodología	109
3.1. Objetivos e hipótesis.....	109
3.2. Fuentes de información espacial.....	111
3.3. Integración de los datos en un Sistema de Información Geográfica.....	113
3.4. Antecedentes metodológicos.....	117
3.4.1. Caracterización y dinámica de la vegetación.....	117
3.4.1.1. Caracterización de la vegetación.....	117
3.4.1.2. Dinámica de la vegetación.....	119
3.4.2. Cálculo de la tasa de desplazamiento de las dunas.....	122
3.5. Metodología general.....	123
3.6. Caracterización de la vegetación.....	127
3.6.1. Digitalización de las unidades de vegetación actuales y definición de las comunidades vegetales.....	127
3.6.2. Inventarios de vegetación.....	129
3.6.3. Definición de las subcomunidades vegetales.....	135
3.6.4. Tratamiento de los datos de los inventarios de vegetación.....	136
3.7. Los factores ecoantrópicos que controlan la distribución de la vegetación.....	138
3.7.1. Caracterización climática.....	139
3.7.1.1. Los elementos climáticos.....	139
3.7.1.2. Índices climáticos.....	141
3.7.2. Metodología basada en el análisis mediante SIG.....	142
3.7.2.1. Cálculo de la distancia a la costa.....	144
3.7.2.2. Definición y digitalización de las geoformas.....	145
3.7.2.3. Análisis del factor global que condiciona la distribución de la vegetación.....	146
3.7.2.4. Cálculo de la tasa de desplazamiento de las dunas.....	146
3.7.2.5. Definición y digitalización de las zonas antropizadas.....	150
3.7.3. Metodología basada en el trabajo de campo.....	150
3.7.3.1. Litología y profundidad de la capa de agua.....	150
3.7.3.2. Características químicas del sustrato.....	152
3.7.3.3. Características químicas de las aguas subterráneas.....	156
3.8. Dinámica actual de la vegetación.....	158
3.8.1. Seguimiento de plántulas marcadas.....	158
3.8.2. Dinámica de la vegetación en función del desplazamiento de las dunas.....	159
3.8.3. Relación de la vegetación con la formación de superficies de deflación.....	160
3.8.3.1. Digitalización de las superficies de deflación y de las áreas con vegetación.....	161
3.8.3.2. Análisis de las precipitaciones 1995-2004.....	161
3.8.3.3. Parcelas de observación permanentes.....	162
3.8.4. Dinámica de la vegetación mediante la interpretación de inventarios de vegetación.....	167
3.8.5. Caracterización y dinámica de la duna costera.....	167
3.9. Evolución de la vegetación (1961-2003).....	168
3.9.1. Fuentes de información complementarias.....	168
3.9.2. Digitalización de las unidades de vegetación y definición de las comunidades vegetales de los años 60.....	169

3.9.3. Caracterización de las comunidades vegetales.....	170
3.9.4. Evolución de la vegetación.....	170
3.9.5. Causas de los cambios de la vegetación.....	171
3.9.6. Evolución de las poblaciones de <i>Traganum moquinii</i>	171
Capítulo IV: Caracterización de la vegetación actual.....	174
4.1. Flora del campo de dunas de Maspalomas.....	174
4.2. Cartografía de las unidades homogéneas de vegetación y definición de las comunidades vegetales actuales de Maspalomas.....	177
4.3. Características de las comunidades vegetales actuales de Maspalomas.....	181
4.3.1. Comunidades herbáceas.....	183
4.3.1.1. Comunidad de <i>Cyperus capitatus-Ononis serrata</i>	183
4.3.1.2. Comunidad de <i>Cyperus laevigatus</i>	192
4.3.1.3. Comunidad de <i>Juncus acutus</i>	197
4.3.1.4. Comunidad de <i>Mesembryanthemum crystallinum</i>	203
4.3.1.5. Comunidad de <i>Aizoon canariense</i>	208
4.3.1.6. Comunidad de <i>Salsola kali</i>	213
4.3.1.7. Comunidad de <i>Volutaria canariensis</i>	215
4.3.1.8. Comunidad de <i>Cenchrus ciliaris</i>	220
4.3.1.9. Comunidad de <i>Eremopogon foveolatus</i>	222
4.3.1.10. Comunidad de <i>Phragmites australis</i>	225
4.3.2. Comunidades arbustivas y arbóreas.....	226
4.3.2.1. Comunidad de <i>Traganum moquinii</i>	226
4.3.2.2. Comunidad de <i>Zygophyllum fontanesii</i>	231
4.3.2.3. Comunidad de <i>Suaeda mollis</i>	235
4.3.2.4. Comunidad de <i>Launaea arborescens</i>	241
4.3.2.5. Comunidad de <i>Schizogyne glaberrima</i>	251
4.3.2.6. Comunidad de <i>Plocama pendula</i>	253
4.3.2.7. Comunidad de <i>Heliotropium ramosissimum</i>	256
4.3.2.8. Comunidad de <i>Tamarix canariensis</i>	259
4.3.3. Plantaciones o zonas sin vegetación.....	275
4.3.3.1. Comunidad exótica.....	276
4.3.3.2. Vegetación escasa o ausente.....	276
Capítulo V: Factores ecoantrópicos que controlan la distribución de la vegetación...	278
5.1. Caracterización climática.....	278
5.1.1. Los elementos climáticos.....	278
5.1.2. Índices climáticos.....	280
5.1.2.1. Índice de Martonne.....	280
5.1.2.2. Ombrotérmico de Gaussen.....	281
5.2. Los factores ecoantrópicos que controlan la distribución de la vegetación.....	282
5.2.1. Distancia a la línea de costa.....	282
5.2.1.1. Características generales.....	283
5.2.1.2. Relación entre la vegetación y la distancia a la costa.....	283
5.2.2. Geoformas.....	291
5.2.2.1. Características generales.....	291

5.2.2.2. Definición y caracterización de las unidades geomorfológicas...	294
5.2.2.3. Relación entre la vegetación y las geoformas.....	299
5.2.3. Análisis del factor global que condiciona la distribución de la vegetación..	303
5.2.4. Actividades humanas.....	307
5.2.4.1. Características de las zonas antropizadas.....	307
5.2.4.2. Relación entre la vegetación y las zonas humanizadas.....	309
5.2.5. Tasa de desplazamiento de las dunas.....	312
5.2.5.1. Características generales.....	312
5.2.5.2. Relación entre la vegetación y las tasas de desplazamiento de las dunas.....	313
5.2.6. Litología y profundidad de la capa freática.....	315
5.2.6.1. Características generales.....	315
5.2.6.2. Relación entre la vegetación y la litología y la profundidad de la capa de agua.....	324
5.2.7. Características químicas de las aguas subterráneas.....	327
5.2.7.1. Características generales.....	327
5.2.7.2. Relación entre las características de las aguas subterráneas y la vegetación.....	329
5.2.8. Características químicas del sustrato.....	330
5.2.8.1. Características generales.....	330
5.2.8.2. Relación entre la vegetación y las características químicas del sustrato.....	335
5.3. Los factores ecoantrópicos que controlan la distribución de la vegetación en el campo de dunas de Maspalomas.....	347
5.3.1. La actividad sedimentaria eólica como factor ambiental primario.....	347
5.3.2. La geomorfología, las alteraciones ambientales, la salinidad ambiental y la tasa de desplazamiento de las dunas como factores ambientales secundarios...	349
5.3.3. Los factores ambientales terciarios.....	351
Capítulo VI: Dinámica actual y evolución de la vegetación entre 1961 y 2003.....	354
6.1. Dinámica actual de la vegetación.....	354
6.1.1. Evolución de las plántulas marcadas.....	354
6.1.1.1. Seguimiento de plántulas de <i>Traganum moquinii</i>	354
6.1.1.2. Seguimiento de plántulas de <i>Tamarix canariensis</i>	358
6.1.2. Dinámica de la vegetación en función del desplazamiento de las dunas.....	363
6.1.2.1. Comunidad de <i>Traganum moquinii</i>	363
6.1.2.2. Comunidad de <i>Tamarix canariensis</i>	368
6.1.2.3. Comunidad de <i>Cyperus laevigatus</i>	370
6.1.2.4. Comunidad de <i>Launaea arborescens</i>	373
6.1.3. Relación de la vegetación con la formación de depresiones interdunares en la zona en proceso de estabilización.....	376
6.1.3.1. Características de las precipitaciones.....	376
6.1.3.2. Evolución de la vegetación y las superficies de deflación.....	377
6.1.3.3. Relación entre el aumento de la superficie ocupada por la	

vegetación y las precipitaciones.....	381
6.1.3.4. Evolución de la vegetación en las parcelas permanentes.....	384
6.1.4. Dinámica de la vegetación mediante la interpretación de los inventarios de vegetación.....	395
6.1.4.1. Comunidad de <i>Cyperus capitatus-Ononis serrata</i>	395
6.1.4.2. Comunidad de <i>Launaea arborescens</i>	400
6.1.4.3. Comunidad de <i>Tamarix canariensis</i>	404
6.1.4.4. Comunidad de <i>Juncus acutus</i>	411
6.1.5. Caracterización y dinámica de la duna costera.....	412
6.1.5.1. Caracterización actual de la duna costera.....	413
6.2. Zonación de la vegetación del campo de dunas de Maspalomas.....	424
6.3. Modelo de colonización y sucesión de la vegetación del sistema de dunas de Maspalomas.....	437
6.3.1. Colonización asociada a la formación de la duna costera.....	439
6.3.2. Procesos de colonización vegetal vinculados a la formación de depresiones interdunares en las dunas transgresivas.....	442
6.3.2.1. Comunidad de <i>Tamarix canariensis</i>	442
6.3.2.2. Comunidad de <i>Cyperus laevigatus</i>	447
6.3.2.3. Comunidad de <i>Traganum moquinii</i>	449
6.3.2.4. Comunidad de <i>Launaea arborescens</i>	450
6.3.3. Colonización vegetal asociada a dunas en proceso de estabilización.....	451
6.3.4. Colonización de dunas estabilizadas.....	453
6.3.5. Procesos de colonización vegetal vinculados a la antropización.....	455
6.4. Evolución de la vegetación entre principios de los años 60 y la actualidad (1961-2003).....	458
6.4.1. La situación de partida: el sistema de dunas de Maspalomas antes del desarrollo turístico.....	458
6.4.2. Caracterización de la vegetación en el año 1961.....	460
6.4.2.1. Comunidades herbáceas.....	463
6.4.2.1.1. Comunidad de <i>Cyperus capitatus-Ononis serrata</i> ...	463
6.4.2.1.2. Comunidad de <i>Cyperus laevigatus</i>	464
6.4.2.1.3. Comunidad de <i>Juncus acutus</i>	465
6.4.2.2. Comunidades arbustivas y arbóreas.....	466
6.4.2.2.1. Comunidad de <i>Traganum moquinii</i>	467
6.4.2.2.2. Comunidad de <i>Launaea arborescens</i>	468
6.4.2.2.3. Comunidad de <i>Suaeda mollis</i>	469
6.4.2.2.4. Comunidad de <i>Plocama pendula</i>	470
6.4.2.2.5. Comunidad de <i>Euphorbia balsamifera</i>	471
6.4.2.3.1. Comunidad de <i>Tamarix canariensis</i>	471
6.4.3. Cambios experimentados por la vegetación entre 1961-2003.....	472
6.4.3.1. Tipología de cambios y procesos.....	477
6.4.3.1.1. Alteraciones ambientales.....	477
6.4.3.1.2. Colonización vegetal.....	478
6.4.3.1.3. Cambio de comunidad vegetal.....	481
6.4.3.1.4. Eliminación de la vegetación.....	487
6.4.3.2. Evolución de las poblaciones de <i>Traganum moquinii</i>	489

6.4.3.2.1. Evolución de <i>Traganum moquinii</i> en la playa del Inglés.....	489
6.4.3.2.2. Evolución de <i>Traganum moquinii</i> en la playa de Maspalomas.....	494
6.4.3.2.3. Causas de las modificaciones del número de individuos de <i>Traganum moquinii</i>	497
6.4.3.2.4. Otras posibles causas de la reducción del número de ejemplares de <i>Traganum moquinii</i>	500
Capítulo VII: Discusión y conclusiones	505
7.1. Discusión de los resultados.....	505
7.1.1. Cumplimiento de los objetivos.....	505
7.1.1.1. Objetivo 1: Caracterizar la vegetación actual del sistema de dunas.....	505
7.1.1.2. Objetivo 2: Determinar los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación.....	507
7.1.1.3. Objetivo 3: Conocer la dinámica actual de las comunidades vegetales.....	509
7.1.1.4. Objetivo 4: Caracterizar la vegetación existente antes del desarrollo turístico.....	511
7.1.1.5. Objetivo 5: Analizar la evolución experimentada por la vegetación desde los años sesenta del siglo pasado, tanto desde el punto de vista de su localización espacial como de su extensión superficial.....	512
7.1.1.6. Objetivo 6: Valorar el uso de las tecnologías de la información geográfica (TIGs) en el estudio de la vegetación.....	514
7.1.2. Demostración de las hipótesis.....	515
7.1.2.1. Hipótesis 1.....	516
7.1.2.2. Hipótesis 2.....	517
7.1.2.3. Hipótesis 3.....	519
7.1.3. La vegetación de Maspalomas en el contexto de los campos de dunas transgresivos áridos de otros ámbitos geográficos.....	520
7.2. Conclusiones.....	527
Bibliografía	534

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presente tesis se ha realizado dentro del Grupo de Investigación Geografía Física y Medio Ambiente del Departamento de Geografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y ha sido dirigida por los doctores Emma Pérez-Chacón Espino y Luis Hernández Calvento.

Su origen está asociado al proyecto de investigación “Modelización de los Procesos Naturales y Análisis de las Consecuencias Ambientales Inducidas por el Turismo en la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)”, financiado a través de fondos FEDER y del Ministerio de Educación y Ciencia (REN2003-05947), en el marco del Plan Nacional I + D + I, que constituye la continuación de la tesis desarrollada por Luis Hernández Calvento en el año 2002 como necesidad de completar algunos aspectos sobre el conocimiento de medio natural de este espacio geográfico y la incidencia del desarrollo turístico en el mismo. Estos trabajos se han desarrollado siguiendo una de las líneas de investigación del Grupo y que consiste en la realización de *estudios básicos del medio natural y del paisaje, y de las alteraciones inducidas por los cambios de uso del suelo*.

Las investigaciones previas desarrolladas han revelado que el sistema de dunas de Maspalomas ha experimentado importantes cambios ambientales (Hernández Calvento, 2002; 2006): la progresiva estabilización de las dunas interiores, la expansión de las áreas ocupadas por las superficies de deflación, la disminución de la altura de las acumulaciones arenosas, el alejamiento de la primera línea de dunas respecto a la trasplaya y el incremento generalizado de la cobertura vegetal. Estas modificaciones son en gran parte consecuencia del desarrollo turístico que se ha producido en los alrededores del mismo, tanto vinculadas a las propias zonas edificadas como a los usos derivados de la actividad turística. Una parte de estas alteraciones está relacionada con la urbanización de la terraza alta del Inglés, que ha producido la modificación de flujo eólico incrementando la velocidad del viento en la zona contigua al sur de la terraza del Inglés entre un 30-35%, lo que ha producido un aumento del transporte eólico del orden de un 200 o 300% lo cual explica el déficit sedimentario actual (Ministerio de Medio Ambiente, 2007).

Asimismo, la vegetación ha experimentado una serie de cambios específicos, produciéndose dos respuestas principales (Hernández Calvento, 2002; 2006). Por un lado, la reducción o desaparición de algunas comunidades vegetales. Así, se constata la total eliminación del tabaibal de *Euphorbia balsamifera* y *Euphorbia regis-jubae* presentes en la terraza alta del Inglés como resultado, primero de la implantación de cultivos y, posteriormente, por la edificación del complejo turístico del Inglés. Por otro lado, la comunidad de *Plocama pendula* se ha visto reducida a la existencia de individuos aislados al ser destruida la extensa población existente en la zona ocupada actualmente por el campo de golf. Por su parte, la comunidad de *Traganum moquinii* ha presentado un comportamiento diferente en función de su localización. De este modo, los ejemplares presentes en la playa del Inglés han aumentado de tamaño, mientras que

se ha producido una reducción de los mismos en la trasplaya de Maspalomas, tanto debido al avance de las dunas como al impacto ocasionado por los transeúntes.

Por otro lado, otras comunidades vegetales se han extendido de forma considerable e incluso han aparecido otras no citadas previamente por los primeros investigadores como Esteve (1967) y Sunding (1972). Este es el caso de los bosquetes de *Tamarix canariensis*, que se han densificado y expandido a gran parte de la zona central y norte del sistema dunar, donde la movilidad de las arenas es prácticamente nula. Los céspedes de *Cyperus laevigatus* también han aumentado su distribución como consecuencia del incremento de los espacios interdunares. Asimismo, los matorrales de *Suaeda mollis* también se han expandido. En este caso se debe al afloramiento del sustrato arcilloso infrayacente. Asimismo, existen una serie de comunidades no descritas por ninguno de los autores citados anteriormente y existentes en la actualidad en Maspalomas, como el aulagar de *Launaea arborescens*, comunidades ruderales y la comunidad de *Zygophyllum fontanesii*.

En definitiva, se han producido importantes modificaciones en el sistema de dunas de Maspalomas desde el inicio del desarrollo turístico a finales de los años 60. Todas estas alteraciones, especialmente los referentes a las comunidades vegetales, constituyen indicadores de los cambios y perturbaciones que esta experimentando este espacio geográfico. El desarrollo turístico del entorno de Maspalomas ha ocasionado profundas transformaciones, que la vegetación manifiesta a través de su propia dinámica, mediante la existencia de una serie de procesos. Desde el punto de vista estrictamente biótico, estas transformaciones hasta podrían considerarse “positivas”, pues la vegetación de esta zona siempre ha estado en lucha constante con su principal limitante, la movilidad de las dunas.

Sin embargo, como se ha dicho anteriormente, lo cual ya queda de manifiesto en los trabajos desarrollados previamente, la modificación de las comunidades vegetales del campo de dunas de Maspalomas da a entender que este sistema ecológico está cambiando por la antropización de este entorno geográfico, lo que puede llevar a la desaparición de algunas comunidades vegetales únicas en el contexto nacional y europeo. Sin embargo, al contrario que los cambios geomorfológicos que han sido tratado en mayor profundidad (Hernández Calvento, 2002 y 2006), las características, ecología, dinámica y evolución de la vegetación han sido únicamente analizadas superficialmente.

Este trabajo de investigación se justifica en función de los siguientes aspectos:

1. El conocimiento de estas alteraciones ha revelado la necesidad de trazar una nueva línea de investigación sobre uno de los componentes del medio natural menos tratados, tanto en Maspalomas como en el resto de Canarias, el estudio de la vegetación de los sistemas de dunas litorales. En primer lugar, se considera muy importante ampliar el conocimiento que se posee en la actualidad sobre las características, ecología y dinámica de la vegetación de las dunas de Canarias. Además, conociendo el carácter bioindicador de la vegetación, el análisis de los cambios inducidos por la actividad

turística a una escala de detalle se manifiesta como un trabajo de gran interés para poder determinar con mayor precisión las consecuencias ecológicas de las transformaciones experimentadas por el sistema de dunas de Maspalomas. Esto se antoja imprescindible como base de conocimiento para la adecuada gestión de este espacio natural protegido, así como la compatibilización del uso turístico que se desarrollan en la actualidad con la conservación del mismo.

2. En una segunda línea, se considera que el modelo metodológico que se plantea, basado en las tecnologías de la información geográfica (TIGs), supone una relativa novedad en cuanto que todavía en la actualidad su aplicación al estudio de la vegetación, al menos en España, es bastante tímido. A una escala global, la utilización de las TIGs en general, y de los sistemas de información geográfica en particular, han sido bastante utilizados para los estudios geomorfológicos de los campos de dunas costeros, pero son más escasos los que han abordado la vegetación asociada a estos sistemas. Las TIGs proporcionan nuevas herramientas y fuentes de datos que permiten un análisis integral del territorio estudiado, pero siempre de forma complementaria al trabajo de campo, que constituye el soporte básico de cualquier investigación relacionada con los elementos que componen el medio natural.

3. Finalmente, las características del campo de dunas de Maspalomas, que constituye uno de los sistemas activos más importantes de Canarias y de España, con una gran diversidad geomorfológica y de comunidades vegetales sumado a una gran presión antrópica, lo convierten en un excelente laboratorio natural donde estudiar la vegetación, sus interacciones con los factores ambientales y los cambios vinculados a las actividades humanas. La rapidez con la que se producen los mencionados cambios permite reducir el intervalo temporal necesario para desarrollar investigaciones científicas. En este sentido, es especialmente interesante como espacio geográfico donde buscar fórmulas de entendimiento para poder alcanzar un equilibrio entre conservación y explotación económica.

La tesis se estructura en 7 capítulos. El primero constituye un acercamiento a las características de los campos de dunas litorales, que sin duda constituyen unos sistemas complejos y con una serie de singularidades que los diferencia de forma clara de otros entornos naturales, lo cual obligaba a realizar una compilación más o menos exhaustiva de la terminología asociada, así como de los elementos y procesos que en ellos se desarrollan. En particular se han definido los aspectos geomorfológicos y, especialmente, las características de la vegetación asociada a estos sistemas litorales.

El segundo capítulo aborda las características ecoantrópicas del área de estudio, las dunas de Maspalomas, de forma que se pueda entender la actual configuración de este peculiar espacio geográfico.

En el tercer capítulo se expone los objetivos, las hipótesis y la metodología seguida a lo largo de la investigación. En los tres capítulos siguientes se desarrollan los resultados alcanzados. En el capítulo IV se realiza la caracterización de las comunidades

vegetales identificadas. El siguiente capítulo, el quinto, analiza los factores ecoantrópicos que controlan la distribución de las comunidades vegetales. Por su parte, el capítulo VI estudia, por un lado, la dinámica actual de la vegetación y, por otro, la evolución de las comunidades vegetales entre los años 1961 y 2003.

Finalmente, en el último capítulo se discuten los resultados alcanzados y se establecen las conclusiones oportunas.

CAPÍTULO I. LOS CAMPOS DE DUNAS LITORALES Y SU VEGETACIÓN

En este capítulo se realiza una síntesis del estado de conocimiento sobre las características geomorfológicas de los campos de dunas litorales y, en especial, de su vegetación. Teniendo en cuenta el gran número de trabajos desarrollados sobre estos sistemas en las últimas décadas, ya existe un amplio cuerpo de conocimiento, pero, en muchas ocasiones y pese a los esfuerzos de recopilación realizados (Chapman, 1964; Nordstrom *et al.*, 1990; Martínez y Psuty, 2004; Maun, 2009), éstos presentan cierta dispersión, o emplean una terminología un tanto ambigua, confusa e incluso contradictoria. Muchos de estos términos proceden del inglés, pues abunda la literatura anglosajona que ha sido más prolífica en el estudio de estos campos de dunas, los cuales han sido traducidos al castellano de varias maneras diferentes. En este sentido, hay que destacar el término inglés *foredune*, que en castellano posee diferentes acepciones, tales como anteduna, duna primera, duna delantera o duna costera (Alonso y Bassagoda, 2002; Vallejo, 2007), mientras que en francés se suele emplear *avant-dunes* (Paskoff, 2005). En el caso de otras geoformas no se ha encontrado un equivalente apropiado en castellano. Por lo tanto, en este capítulo se pretende definir de forma clara los diferentes términos asociados a los sistemas de dunas litorales y el significado que se empleará en esta tesis para cada uno de ellos. En definitiva, los términos que se utilizarán a lo largo de esta tesis serán en castellano, excepto que no exista una traducción adecuada en este idioma, en cuyo caso se ha mantenido en su idioma original. De cualquier forma, la primera vez que se menciona un determinado término se pondrá entre paréntesis la denominación según en el idioma en que se estableció.

Por último, también se plantea un marco de referencia para la posterior discusión de los resultados que se obtengan a partir de esta investigación. Este capítulo se subdivide en dos apartados principales: en el primero se abordan los aspectos geomorfológicos, mientras que en el segundo se realiza una aproximación al conocimiento de la vegetación asociada a los campos de dunas litorales.

1.1. Localización y características generales de los sistemas de dunas litorales

Pese a su aparente homogeneidad, los sistemas de dunas litorales poseen una gran diversidad y complejidad geomorfológica y ecológica. Esto se debe a su localización en un ámbito de transición entre dominios geomorfológicos marinos y terrestres, cuestión que les dota de unas características propias y diferenciada, pues se trata de espacios donde interactúan agentes muy dinámicos, como las corrientes y el oleaje marinos, además del viento, e intervienen elementos como la arena, el agua o la vegetación. Precisamente, los campos de dunas litorales constituyen uno de los sistemas naturales donde la relación entre las geoformas y la vegetación es más evidente.

Estos sistemas se caracterizan por ser acumulaciones sedimentarias arenosas que se desarrollan en espacios geográficos donde existe un suministro constante de arena, que es transportado hacia el interior por los vientos dominantes (Martínez *et al.*, 2004:

3). Estos sistemas se desarrollan en orillas de océanos, estuarios y lagos, abarcando todas las latitudes, desde el Ártico al Ecuador, por lo cual se desarrollan en tipos de climas y biomas muy diversos (Carter *et al.*, 1990a: 2; Martínez *et al.*, 2004: 3), siendo especialmente abundantes en las zonas templadas y tropicales (figura 1.1). Los sedimentos que forman estos sistemas son de origen diverso, pues incluyen cuarzo, partículas calcáreas, minerales pesados y materiales volcánicos, con un tamaño de grano que oscila entre los 0,063 a 2 mm (Pye y Tsoar, 1990: 1).

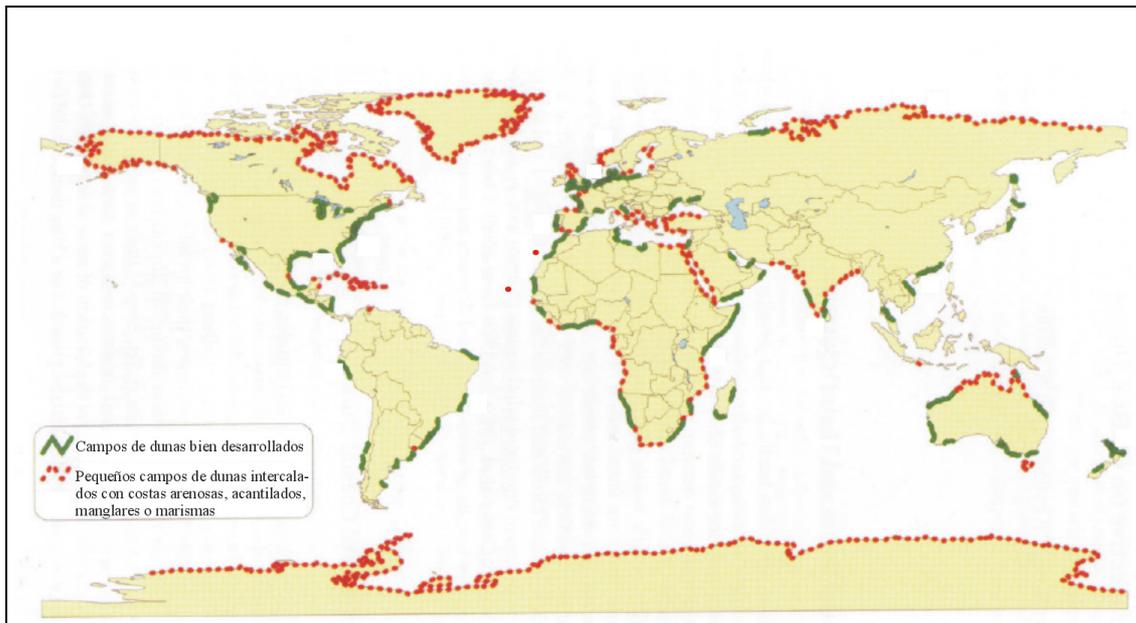


Figura 1.1. Distribución mundial de los principales campos de dunas litorales (modificado de Martínez *et al.*, 2004: 4).

Este apartado se divide en tres epígrafes, donde se abordan las geoformas dunares, las características de los campos de dunas litorales y los contrastes internos de los mismos. Hay que tener en cuenta que muchas geoformas están relacionadas con la vegetación, ya que ésta contribuye a la formación de dunas. Asimismo, las características de los sistemas de dunas condiciona el tipo de comunidades vegetales que se desarrollan en los mismos. Finalmente, las diferencias internas generan diferentes hábitats que también condiciona la distribución de la vegetación.

1.1.1. Las geoformas dunares

Los campos de dunas litorales están constituidos por geoformas acumulativas, las dunas, y otras erosivas, formadas como resultado de la deflación eólica sobre éstas. Las dunas pueden ser definidas como un montículo o cordón de arena acumulada por el viento que puede tener una longitud de entre un metro y kilómetros, así como una altura que puede oscilar entre unos pocos centímetros a más de 150 m (Pye y Tsoar, 1990: 160). Estas geoformas presentan una morfología característica (figura 1.2): la cara de barlovento o de acumulación posee una pendiente más suave que la de sotavento, de

deslizamiento o de avalancha. Esta última, que constituye el frente de avance de la duna, presenta una morfología más compleja, pues se pueden distinguir varias partes. Así, destacan el borde, que constituye la zona de cambio de pendiente entre la cresta (parte más alta de la duna) y la cara de deslizamiento, y el pie o frente de avance, donde la pendiente de la duna vuelve a cambiar hacia una posición casi horizontal (falda).

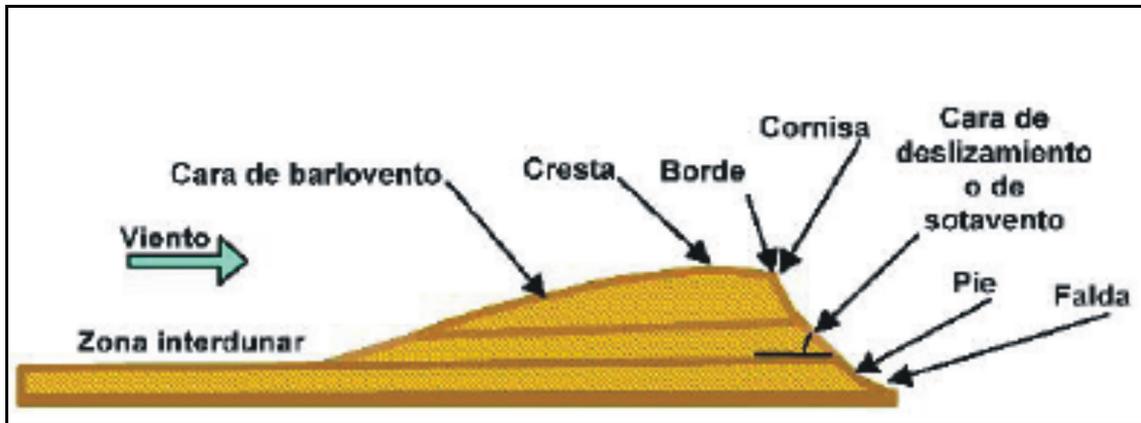


Figura 1.2. Morfología de una duna transversal simple (tomado de Ley *et al.*, 2007: 38).

Estas geoformas eólicas han sido clasificadas atendiendo a multitud de criterios, entre los que destacan los siguientes: según su complejidad (Holm, 1968; McKee, 1979), por el estado de desarrollo y el nivel de actividad (Pye y Tsoar, 1990), en función de la orientación general respecto al viento dominante (Cornish, 1897; Cooper, 1958), según la morfología (McKee, 1979), su génesis (Pye y Tsoar, 1990) y la geometría resultante (Flor, 1997). Los principales tipos de dunas reconocidos en la actualidad se muestran en la figura 1.3.

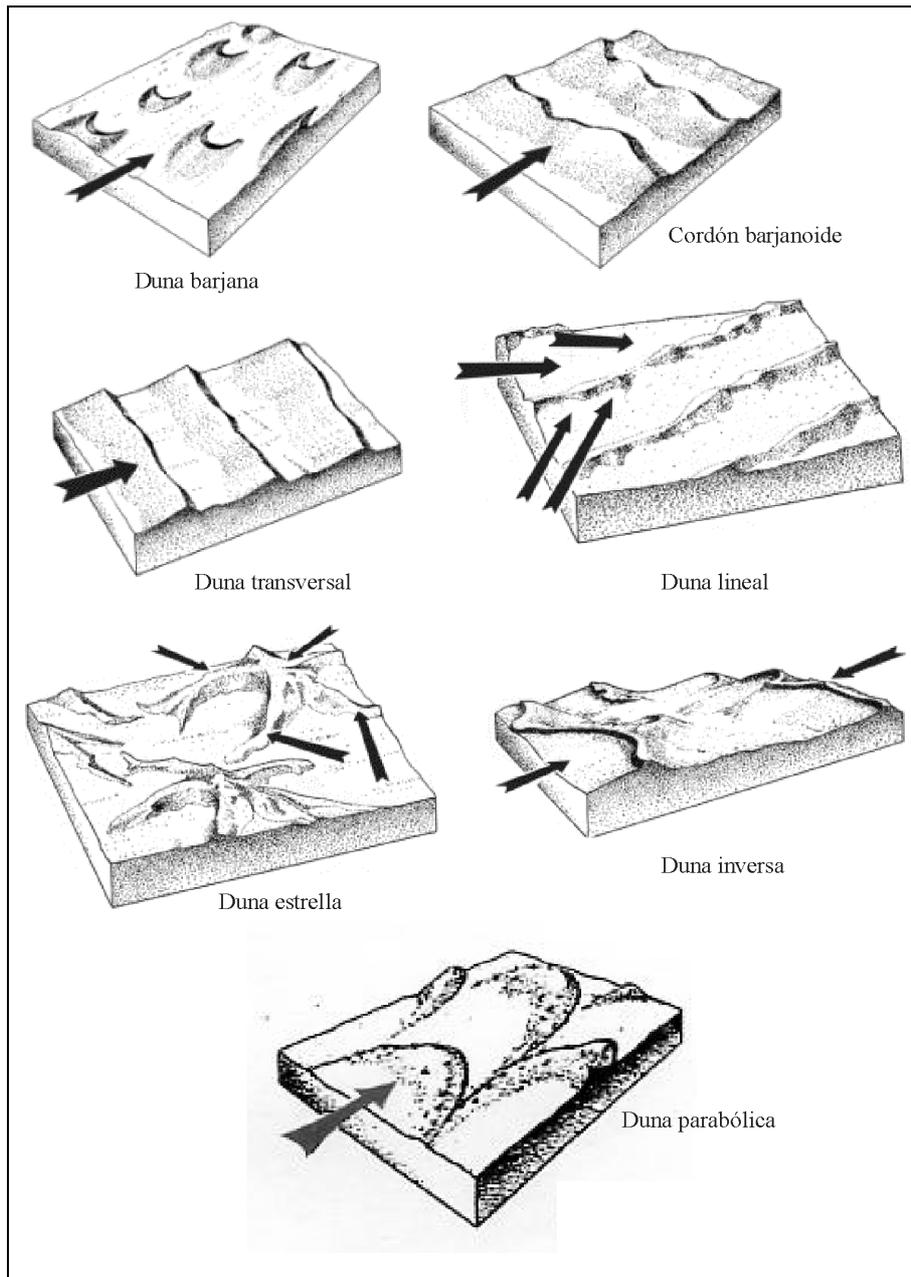


Figura 1.3. Principales tipos de dunas (tomado de McKee, 1979).

Vallejo (2007: 49) realiza una propuesta de clasificación de las dunas simples a partir de la información existente en la bibliografía, donde combina la actividad de las dunas, la orientación respecto al viento dominante y su génesis (figura 1.4). La actividad de las dunas se manifiesta en los procesos sedimentarios eólicos de erosión, transporte y acumulación, lo que da como resultado cambios en la morfología, disposición o ubicación de las mismas (Vallejo, 2007: 49). Normalmente se distinguen entre dunas activas, transgresivas o móviles y estabilizadas, fijas o inactivas, siendo las primeras aquellas que se desplazan de forma unitaria o en bloque en el plano horizontal. Sin embargo, para este autor, la ausencia de desplazamiento de una duna no tiene por qué implicar, necesariamente, la ausencia de procesos sedimentarios eólicos activos que produzcan, por ejemplo, un crecimiento vertical de la duna, un cambio en la orientación

de la cresta o el trasvase de sedimentos hacia otras zonas (Vallejo, 2007: 50). Así, este autor propone el término de duna posicional para aquella caracterizada por la ausencia de desplazamiento, pero con carácter activo, al producirse procesos sedimentarios eólicos significativos. Este término, por tanto, agruparía geoformas como las dunas eco, las dunas en estrella y la duna costera (*foredune*), entre otras. Por otra parte, la orientación respecto al viento dominante permite definir dos tipos de dunas principales: transversal y longitudinal, entre las cuales se establecen otras de carácter intermedio, como dunas en estrella, dunas domo, etc. Por último, también se pueden distinguir las dunas en función de su origen, diferenciando entre dunas libres, dunas vinculadas a obstáculos topográficos y dunas asociadas a la vegetación.

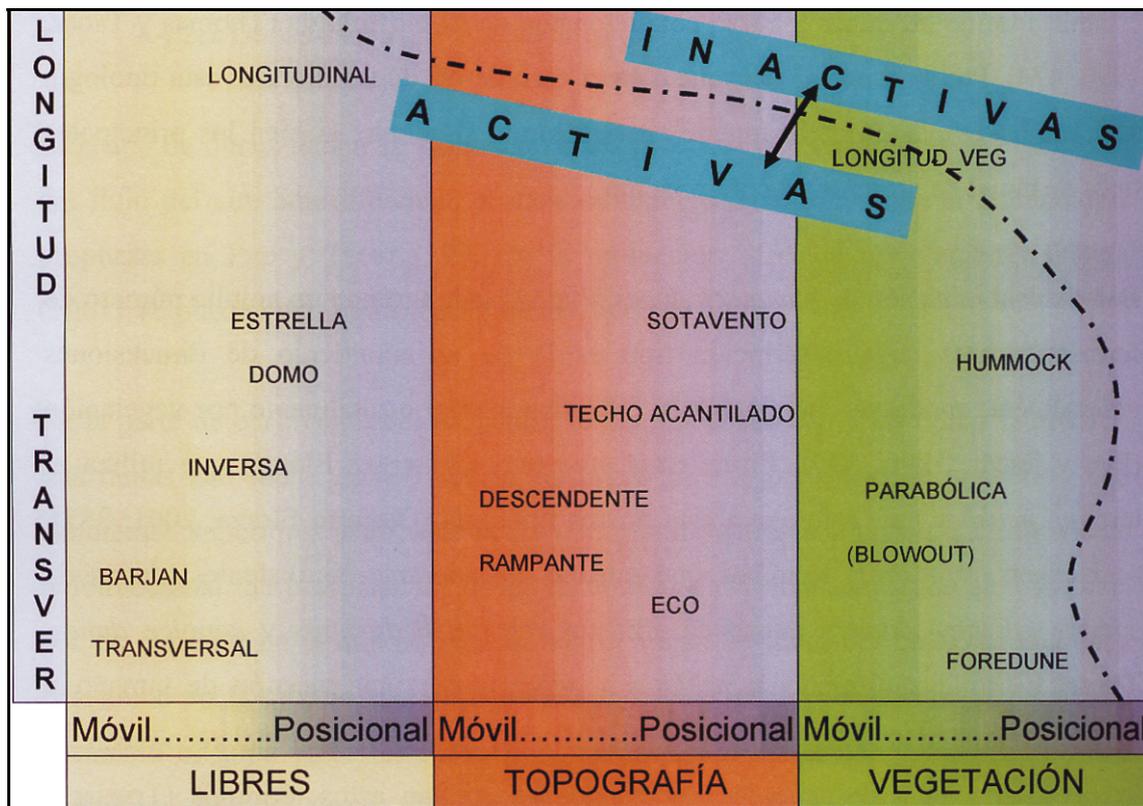


Figura 1.4. Clasificación de las dunas simples (tomado de Vallejo, 2007: 54).

Las dunas libres, como su propio nombre indica, se forman sin la necesidad de la existencia de obstáculos topográficos o de vegetación. La más característica es la duna barjana o de media luna, cuyo frente de avance está formado por dos brazos en el sentido del viento efectivo. Cuando varias dunas barjanas se unen dan lugar a una duna de mayor longitud, definida como cordón barjanoide, aunque también puede dar lugar a un cordón transversal. La diferencia entre ambos tipos de cordones está determinada por la mayor sinuosidad del frente de avance en el caso del primero. Otros tipos de dunas libres son las dunas domo (*dome dunes*), las dunas en estrella (*star dunes*), las dunas longitudinales o lineales (*linear dunes*) y las dunas inversas (*reversing dune*). Las dunas domo, cuya génesis se desconoce, son de forma circular o elíptica, de reducida altura, con una cresta achatada y, con frecuencia, carecen de caras de deslizamiento (Pye y

Tsoar, 1990: 194). Las dunas en estrella se caracterizan por su gran tamaño, morfología piramidal y brazos sinuosos (Lancaster, 1989a y b, citado por Pye y Tsoar, 1990: 191). Se forman bajo la acción de vientos con dos o más direcciones diferentes (Pye y Tsoar, 1990: 191). Las dunas longitudinales pueden ser clasificadas como simples, complejas o compuestas (Pye y Tsoar, 1990: 178). Las simples están formadas por un único y estrecho cordón con una cresta recta o sinuosa, las complejas consisten en cordones muy extensos que son distribuidos en picos, mientras que las compuestas están formadas por dos o más cordones de dunas muy juntos o superpuestos sobre la cresta de un amplio basamento (Pye y Tsoar, 1990: 178-180). Las dunas inversas son un tipo de duna transversal, fundamentalmente posicional, que se forma bajo la influencia de dos direcciones de vientos (Vallejo, 2007: 52). Otra morfología eólica, que no se considera como una verdadera duna, es la denominada como láminas de arena o mantos eólicos (*sand sheets*), caracterizadas por la ausencia de frentes de avances (Kocurek y Nielson, 1986: 795, citado por Pye y Tsoar, 1990: 213).

La existencia de obstáculos topográficos propicia la formación de algunos tipos de dunas (figura 1.5), como las dunas eco (*echo dunes*), las dunas rampantes (*climbing dunes*), las dunas descendentes (*falling dunes*), las dunas de techo de acantilado (*cliff-top dunes*) y las dunas a sotavento (*lee* o *shadow dunes*).



Figura 1.5. Algunos tipos de dunas generadas por obstáculos topográficos (la foto correspondiente a la duna rampante se ha obtenido de la dirección web <http://www.panoramio.com/photo/9718130>).

Las dunas eco se forman normalmente delante de obstáculos cuya pendiente supera los 60° , que actúan como barreras a un viento unidireccional, caracterizándose por la existencia de un pasillo entre la duna y el obstáculo donde por deflación no se deposita arena (Vallejo, 2007: 52). Cuando el ángulo de la pendiente es inferior a 60° , la arena es capaz de ascender por la ladera, formándose una duna rampante (Pye y Tosar, 1990: 166). Si la duna rampante consigue alcanzar la zona culminante del relieve, entonces se forma una duna de techo de acantilado (Pye y Tosar, 1990: 167). A sotavento del obstáculo se pueden formar dunas descendentes cuando las pendientes son más o menos suaves (Vallejo, 2007: 52). Cuando se produce la acumulación de arena detrás de un obstáculo topográfico, debido a la disminución de la velocidad del viento, se forman dunas a sotavento (Pye y Tsoar, 1990: 163). También detrás de otros obstáculos de distinta naturaleza (vegetación, infraestructuras humanas,...) se generan

estas dunas a sotavento. Todas las dunas indicadas anteriormente son posicionales, excepto las rampantes y descendentes (Vallejo, 2007: 52).

La vegetación también genera morfologías dunares diferentes a las anteriores (figura 1.6), como dunas en montículos (*hummock dune*), duna costera y dunas parabólicas (*parabolic dunes*).



Figura 1.6. Algunos tipos de dunas generadas por la vegetación.

Las dunas en montículos, en las que algunos autores incluyen *nebkhas*, *coppice dunes* y dunas a sotavento (*shadow dunes*), son montículos de arena de forma irregular cubiertos parcial o totalmente por la vegetación (Pye y Tsoar, 1990: 195). Sin embargo, Hesp y Thom (1990: 271-272) establecen diferencias entre las *coppice dunes* y las dunas a sotavento. Las *coppice dunes*, también denominadas *nebkhas* (Tengberg, 1995: 265), son definidas por estos autores como montículos cónicos semicirculares, formados frecuentemente sobre una superficie de deflación, mientras que las dunas a sotavento son acumulaciones de arena que se forman detrás de las plantas, o también de las propias *coppice dunes*, pero normalmente se originan sobre sustratos más ricos en arena. En esta tesis, se empleará el concepto de dunas en montículos, ya que consideramos que los restantes términos indican diferentes etapas evolutivas de una duna formada por la vegetación y la diferenciación puede resultar compleja. Además, las dunas a sotavento tienen un carácter temporal, apareciendo y desapareciendo o cambiando de dirección en función de la dinámica eólica, por lo que no siempre están presentes ni de la misma forma.

Por su parte, la duna costera se corresponde con cordones de dunas paralelas a la costa formados en la parte superior de la playa por la acumulación eólica de la arena entre la vegetación (Hesp, 2002: 245). Sin embargo, las dunas costeras también pueden ser tipo en montículos cuando la cobertura vegetal es escasa (Hesp, 1988: 24; McLachlan, 1990: 206; Pye, 1990: 357). Se trata de una duna posicional, caracterizada por su localización inmediata a la costa donde la vegetación juega un papel fundamental tanto en su formación como en su posterior desarrollo; asimismo presenta un perfil distinto a una duna típica (figura 1.2), ya que la cara de barlovento posee una mayor pendiente que la de sotavento (Vallejo, 2007: 54). Sin embargo, y aunque como se dijo anteriormente se considera una duna posicional, cuando existe un balance sedimentario ligeramente negativo la duna costera puede desplazarse (Paskoff, 2005: 252). Por lo tanto, la duna costera no presenta una forma específica, ya que como se ha visto puede

ser un cordón o un conjunto de montículos de arena, por lo que su diferenciación se basa en que constituye las primeras dunas que se forman por la acción de las plantas en las zonas de entrada de sedimentos al sistema cuyas características esenciales (forma, tamaño, actividad eólica, etc.) son controladas por las mismas.

Las dunas parabólicas tienen forma en U o V con dos brazos colgantes en contra del viento (Pye y Tsoar, 1990: 200), que con frecuencia se desarrollan a partir de un *blowout* (Flor *et al.*, 1983: 165; Hesp, 1991: 179).

También existen otras dunas asociadas a la vegetación como los cordones de precipitación (*precipitation ridges*), *lunette dunes*, dunas lineales vegetadas (*vegetated linear dunes*) (Pye y Tsoar, 1990), *bushpockets* y *transverse dune trailing ridges* (Hesp y Thom, 1990: 274; Hesp y Martínez, 2008). Los cordones de precipitación son dunas transversales transgresivas, con extensos frentes de avance laterales que se desarrollan en los márgenes interiores de los campos de dunas (Pye y Tsoar, 1990: 205), y que no siguen progresando debido a la existencia de una barrera vegetal. Por su parte, las *lunette dunes* son un tipo de duna parabólica en forma de arco (Pye y Tsoar, 1990: 207), mientras que las dunas lineales vegetadas son dunas longitudinales colonizadas por la vegetación (Pye y Tsoar, 1990: 208). Cuando las dunas avanzan sobre un núcleo de vegetación preexistente, desarrollado sobre una depresión interdunar, las plantas retienen arena, formándose amplios montículos vegetados denominados *bushpockets* (Hesp y Thom, 1990: 274). Finalmente, los *transverse dune trailing ridges* son un tipo de morfología dunar definido recientemente que será analizado posteriormente.

Los campos de dunas litorales no están formados únicamente por geoformas acumulativas (figura 1.7). Los procesos de deflación eólica sobre las dunas originan geoformas erosivas, escasamente tratadas en la bibliografía, integradas principalmente por superficies de deflación (*deflation surface*), depresiones interdunares (*slacks*), *blowout*, surcos de excavación eólica (*upwind scout bowl*), pináculos piramidales o dunas residuales (*remnant knobs*) y cordones de deflación (*deflation ridges*) (Carter *et al.*, 1990b; Hesp y Thom, 1990). Sin embargo, la formación de estas geoformas erosivas no siempre está asociada a la acción del viento, sino que pueden deberse también a la acreción de nuevas dunas (Gares y Nordstrom, 1988: 201).

Las superficies de deflación son zonas normalmente planas, donde suele aflorar el sustrato subyacente, como consecuencia del desmantelamiento de las dunas por la erosión eólica. Esto supone la formación de una superficie inmóvil que limita el arrastre eólico y el aporte de sedimentos (Carter *et al.*, 1990b: 223). La génesis de estas geoformas puede estar asociada a causas antropogénicas, como la interrupción de los aportes de arena por la construcción de infraestructuras humanas (Mitasova *et al.*, 2005; Hernández Calvento, 2006), a la realización de plantaciones forestales o introducción de especies exóticas con características diferentes a las autóctonas (Wiedemann y Pickart, 1996; Wiedemann y Pickart, 2004; Panario y Gutiérrez, 2005), pero también puede estar asociada a una reducción natural del aporte de sedimentos (Hernández Calvento, 2006). Cuando la capa freática aflora o se encuentra cerca de la superficie, tanto en este tipo de geoforma como en las depresiones que se forman entre dos dunas como consecuencia

de la dinámica de avance de las mismas, se le denomina *slack* (Hesp y Thom, 1990: 262). Este término que deriva de la palabra noruega *slakki*, referida a depresiones entre dos zonas de tierra elevadas (Ranwell, 1959: 571). Tansley (1949: 861) adaptó este término a los sistemas de dunas, definiéndolo como hoyos inundados o húmedos situados entre dos cordones de dunas, donde la capa freática aflora o está cerca de la superficie de la arena. Por lo tanto, el término *slack* posee un matiz ecológico, caracterizado por la existencia de agua al alcance de las plantas, pero que pueden ser el resultado de procesos geomorfológicos diferentes. Aunque las depresiones interdunares suelen estar asociadas a los procesos de deflación eólica (Carter *et al.*, 1990b: 227; Hesp y Thom, 1990: 262), también se pueden formar mediante la acreción de una nueva duna costera entre el mar y otra duna costera más interior sin la intervención de la erosión, generándose una depresión entre ambas (Gares y Nordstrom, 1988: 202) por la acumulación de sedimentos a ambos lados quedando la zona central a una cota menor.

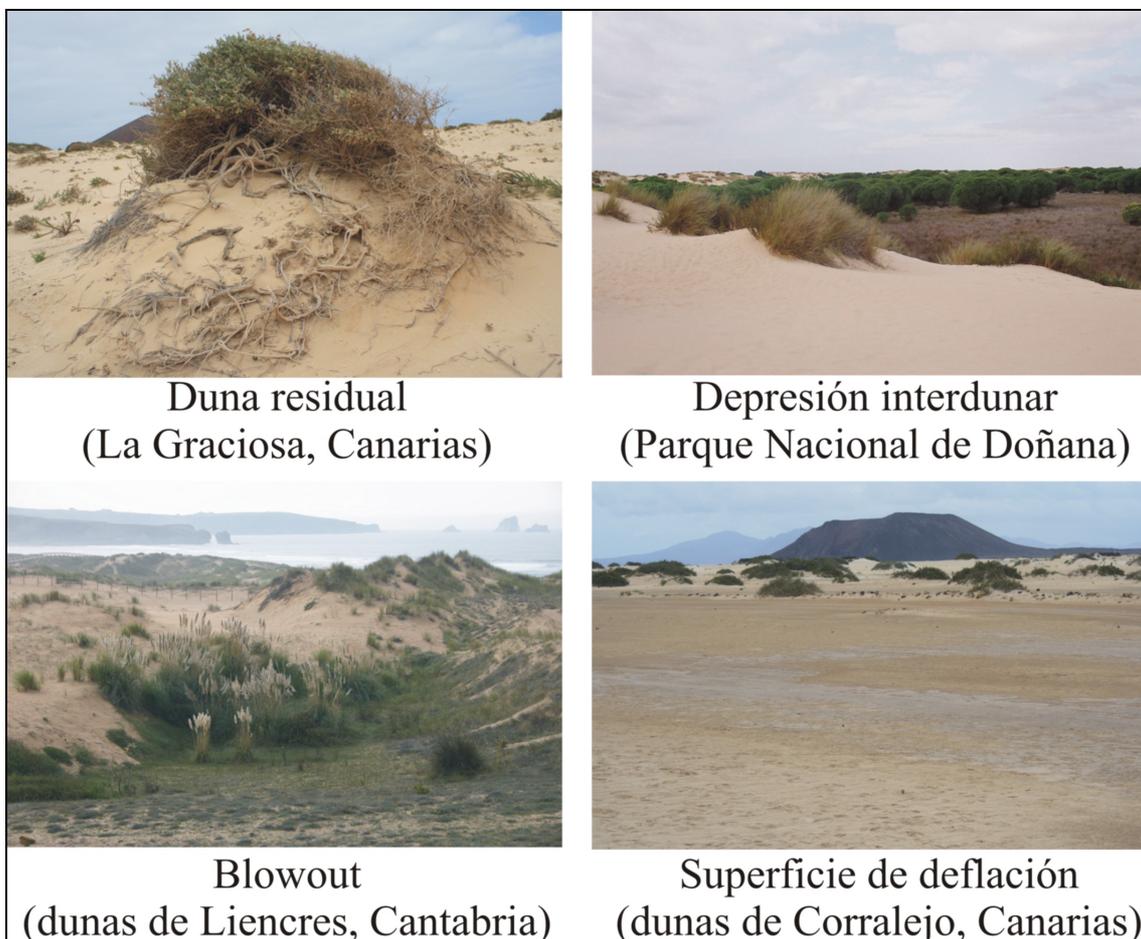


Figura 1.7. Algunos tipos de geoformas originadas por los procesos erosivos.

Por su parte, los *blowout* son hoyos formados por la erosión del viento sobre un depósito de arena preexistente en dunas vegetadas (Carter *et al.*, 1990b: 231; Hesp, 2002: 255). Los *blowout* también pueden ser considerados como tipos de dunas, debido a que representan el primer estadio en la formación de dunas parabólicas (Flor *et al.*, 1983: 165). Además, un *blowout* no constituye únicamente una geoforma erosiva, sino

que es un sistema que integra erosión, transporte y sedimentación, y representa un episodio de desestabilización de las dunas que poseen cierta cobertura vegetal (Vallejo, 2007: 94). Estos procesos se reflejan en las distintas partes del *blowout* (figura 1.8), donde se distingue una zona de acumulación del material removido (lóbulo de acumulación), una zona erosiva (cubeta de deflación) y las paredes laterales que lo delimitan. Existen dos tipos de *blowout*: tipo plato (*saucer*) y tipo pasillo (*through*) (Hesp, 2002: 255; Vallejo, 2007). El tipo plato presenta una forma semicircular, mientras que el segundo tiene una configuración más alargada y estrecha (figura 1.8). Los *blowout* pueden originarse por las siguientes causas (Hesp, 2002: 255): a) erosión del mar a lo largo de cara de la duna expuesta al mismo, b) aceleración del viento en la cresta de la duna, debido a la influencia de la topografía, c) cambio climático, d) variaciones espacio-temporales de la vegetación, e) erosión hídrica, f) erosión por alta velocidad del viento y g) actividades humanas.

Los surcos de excavación eólica (*upwind scout bowl*) constituyen una de las geoformas erosivas menos tratada en la bibliografía. Son estrechos pasillos de deflación que se forman alrededor de un obstáculo circular, normalmente una duna con vegetación, como consecuencia de la aceleración del viento cerca de la superficie alrededor de éste (Hesp y Thom, 1990: 268). Los surcos de excavación eólica normalmente están asociados a dunas residuales, que se definen como montículos de arena parcial o totalmente vegetados, resultantes de los procesos de deflación sobre una duna preexistente (Hesp y Thom, 1990: 267).

Finalmente, los cordones de deflación son paralelos a la costa y están cubiertos por guijarros asociados a superficies de deflación, que se forman como consecuencia de la erosión directa por tormentas y la acumulación de sedimentos por el mar, y se forman por el transporte selectivo de partículas (Hesp y Thom, 1990: 263).

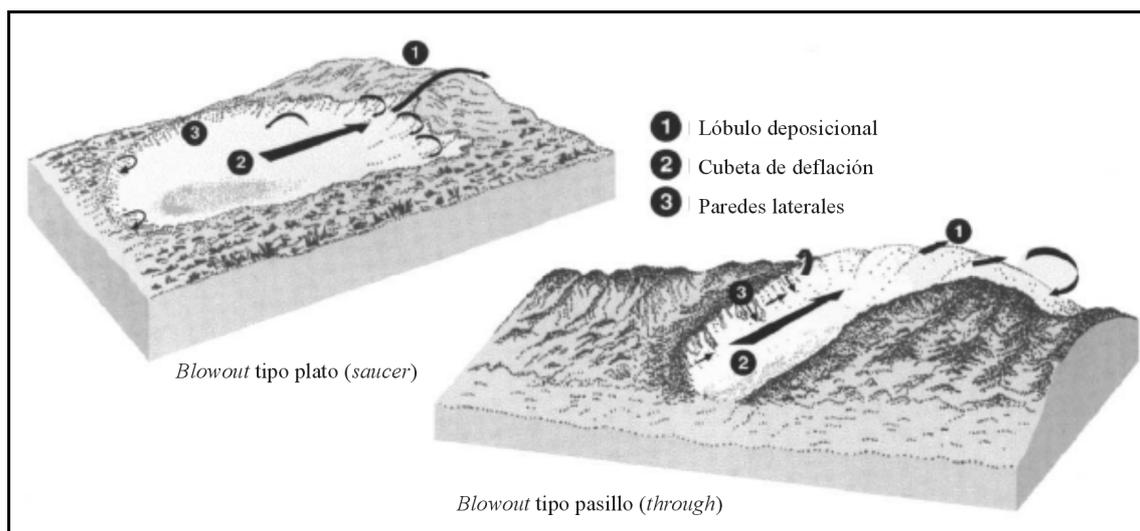


Figura 1.8. Tipos y partes de un *blowout* (modificado de Hesp, 2002: 257).

1.1.2. El movimiento de la arena

La movilidad de los sedimentos es el proceso geomorfológico más importante y característico de los sistemas de dunas litorales. La tasa de movimiento de las dunas depende de la velocidad media del viento, la temperatura, las precipitaciones, la altura de la cara de avalancha, el volumen de arena, el grado de cobertura vegetal, la estructura de la vegetación, el grado de protección que proporciona otras dunas, la presencia de obstáculos topográficos y las actividades humanas (Willis *et al.*, 1959a,b; Chapman, 1964; Moreno-Casasola, 1982; Yeaton, 1988; Hesp y Thom, 1990; Sherman y Hotta, 1990; Tsoar y Blumberg, 2002; Alcántara-Carrió, 2003; Arens *et al.*, 2004; Levin y Ben-Dor, 2004; Tsoar, 2005; Hernández Calvento, 2006; Cabrera, 2010). Las tasas calculadas para distintos sistemas de dunas del mundo se muestran en la tabla 1.1.

Lugar	Fuente	m/año	Autor
Indiana (Estados Unidos)	Trabajo de campo	1 - 2	Cowles (1911)
Lago Michigan (Estados Unidos)	Trabajo de campo	2 - 4	Gates (1950)
Kurische-Nehrung (Rusia)	Trabajo de campo	5,5 - 6,1	Carey y Oliver (1918)
Gascony (Reino Unido)	Trabajo de campo	9,1 (media)	Citado por Ranwell, 1958: 86
Morfa Harlech (Reino Unido)	Trabajo de campo	3,7 (máximo)	Steers (1939)
Morfa Dyffryn (Reino Unido)	Trabajo de campo	6,1 (máximo)	Citado por Ranwell, 1958: 86
Great Crosby (Reino Unido)	Trabajo de campo	1,1	Salisbury (1952)
Freshfield (Reino Unido)	Trabajo de campo	5,5 - 7,3	Citado por Ranwell, 1958: 86
Costa de Norfolk (Reino Unido)	Trabajo de campo	1,5	Citado por Ranwell, 1958: 86
Newborough Warren (Reino Unido)	Trabajo de campo	1,5 - 16,7	Ranwell (1958)
Morro de la Mancha (México)	Trabajo de campo	0,39 - 0,93	Moreno-Casasola (1982)
Alexandria (Sudáfrica)	-	1 - 10	McLachlan (1990)
Jericoacoara (Brasil)	Imágenes aéreas	9 - 11	Jiménez <i>et al.</i> (1999)
Pecem (Brasil)	Imágenes aéreas	14,6 - 21	Jiménez <i>et al.</i> (1999)
Ashdod (Israel)	Imágenes aéreas	1,07 - 5,92	Tsoar y Blumberg (2002)
Ashdod-Nizamin (Israel)	Imágenes aéreas	0,5 - 4	Levin y Ben-Dor (2004)
Maspalomas (Islas Canarias)	Trabajo de campo	0,76 - 12,33	Hernández Calvento (2002)
Cresmina (Portugal)	GPS diferencial	0,5 - 10	Rebêlo <i>et al.</i> (2002)
Kennemerland (Holanda)	Imágenes aéreas	0 - 12	Arens <i>et al.</i> (2004)
Doñana (España)	Imágenes aéreas	0 - 5,35	Ojeda <i>et al.</i> (2005)
Jockey's Ridge (Carolina del Norte)	Imágenes aéreas	2,8-10 (media)	Mitasova <i>et al.</i> (2005)
Maspalomas (Islas Canarias)	Imágenes aéreas	2,27 - 7,11	Hernández <i>et al.</i> (2006a)
Maspalomas (Islas Canarias)	GPS diferencial	2 - 4 (media)	Hernández <i>et al.</i> (2006a)
Maspalomas (Islas Canarias)	Imágenes aéreas	0,73 - 30	Pérez-Chacón <i>et al.</i> (2007)

Tabla 1.1. Tasas de desplazamiento en diferentes campos de dunas del mundo (ampliado de Ranwell, 1958: 86)

De igual forma el viento, el tiempo de exposición al sol y la humedad relativa son elementos climáticos importantes, ya que la arena para desplazarse tiene que estar seca (Chapman, 1960: 161; Sherman y Hotta, 1990:31). Una humedad relativa baja puede acelerar el secado de los sedimentos e incrementar las tasas de transporte,

mientras que la radiación solar controla las tasas de evaporación (Sherman y Hotta, 1990:31). Aunque con mayores velocidades de viento se producen las mayores tasas de movilidad de las dunas, esto puede ser minimizado o impedido por las precipitaciones (Arens *et al.*, 2004: 187). Sin embargo, cuando las precipitaciones coinciden con los periodos de mayores velocidades de viento su influencia no es significativa para determinar el movimiento de la arena, teniendo en este caso mayor importancia, aparte del régimen eólico, la topografía y la cobertura vegetal (Levin *et al.*, 2006: 711-712). De esta forma, las mayores tasas de desplazamiento de las dunas se producen cuando el viento alcanza las velocidades máximas, las temperaturas son altas y se registran las menores precipitaciones (Moreno-Casasola, 1982: 600). En contrapartida, en las zonas con precipitaciones elevadas las dunas presentan una menor movilidad (Yeaton, 1988: 756-757), siempre y cuando se supere la velocidad umbral de 4,5 m/s, indicada por Bagnold (1941), que es necesaria para transportar los granos de arena (Moreno-Casasola, 1982: 588).

La vegetación también cumple un papel muy importante en la dinámica sedimentaria eólica, ya que el incremento de la cobertura vegetal produce un descenso de las tasas de desplazamiento de las dunas, en especial cuando el viento presenta una escasa velocidad (Tsoar y Blumberg, 2002: 1158). La limitación que ejerce la vegetación en el movimiento de las dunas, aparte de la propia estabilización de la arena, produce cambios geomorfológicos sustanciales como la transformación de dunas barjanas en dunas parabólicas (Tsoar y Blumberg, 2002; Durán y Herrmann, 2006). Asimismo, la presencia de determinadas especies vegetales indican la existencia de diferentes procesos sedimentarios eólicos como la estabilización, el movimiento de la arena y la erosión (Levin *et al.*, 2008). El principal factor limitante para la vegetación dunar es la erosión producida por vientos de alta intensidad, de tal forma que los ecosistemas arenosos áridos parece que no están tan controlados por las precipitaciones, como por la acción eólica que, a su vez, regula el grado de movilidad de la arena (Pye y Tsoar, 1990: 291; Tsoar, 2005: 55). Más adelante se abordará con mayor profundidad el efecto de la vegetación sobre el transporte de sedimentos.

La relación teórica entre el poder erosivo del viento (DP) y el porcentaje de cobertura vegetal se muestra en la figura 1.9 DP constituye un índice que estima el poder erosivo potencial del viento en zonas arenosas (para más información sobre el cálculo de la DP ver Tsoar, 2005).

Este autor compara diferentes ámbitos geográficos y detecta que un descenso en el poder erosivo del viento por debajo de 100 DP permite un incremento de la cobertura vegetal en las dunas litorales de Israel, mientras que a partir de los 100 DP la cobertura vegetal descende de forma progresiva. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas de dunas litorales de Europa no se observa esta relación, como consecuencia de la estabilización de las dunas por las actividades humanas. Así, pese a existir un DP más alto en estos sistemas europeos que en Israel, la cobertura vegetal es mayor, debido a las plantaciones realizadas en las dunas en los últimos 200 años y a la existencia de precipitaciones abundantes. Por su parte, el descenso de la tasa de desplazamiento de las

dunas en algunas partes de Israel está relacionado con el incremento de la cobertura vegetal, como consecuencia del abandono de las actividades tradicionales desarrolladas por los beduinos (Tsoar y Blumberg, 2002; Levin y Ben-Dor, 2004).

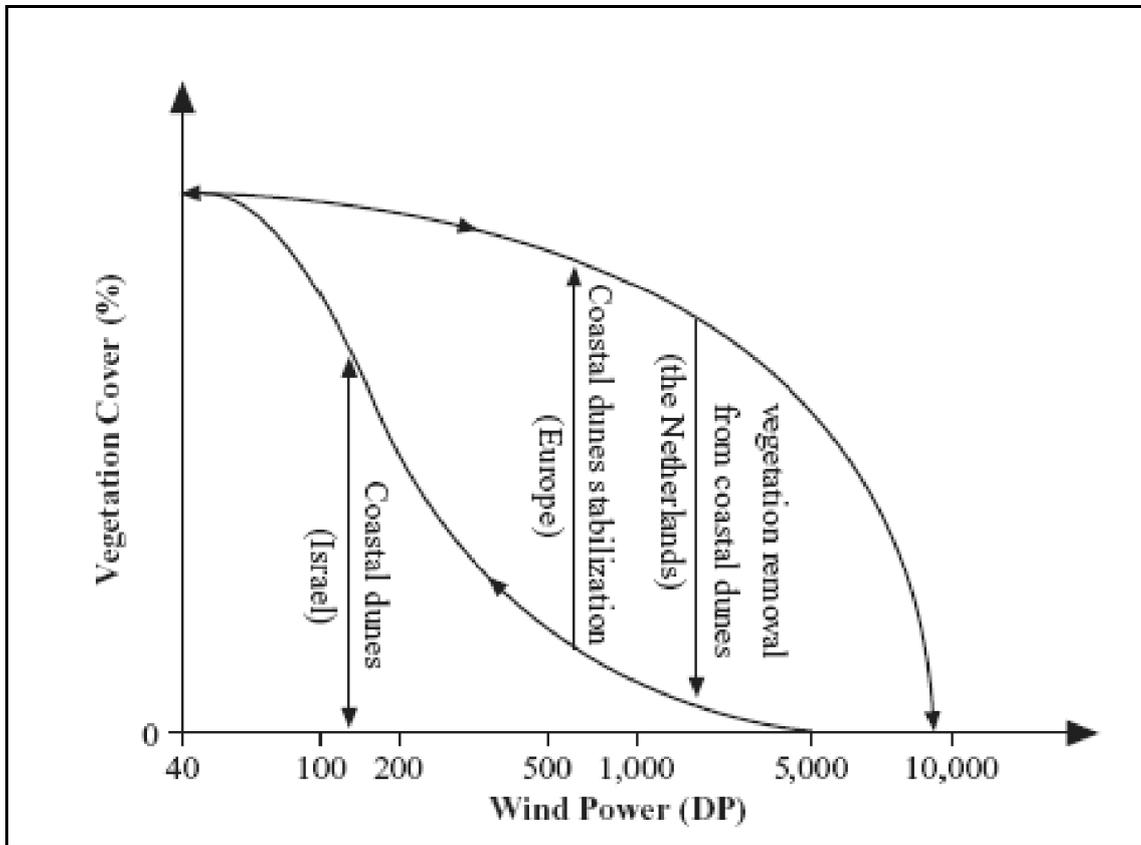


Figura 1.9. Relación hipotética entre la cobertura vegetal y la velocidad del viento (tomado de Tsoar, 2005: 54).

Por otro parte, la existencia de obstáculos topográficos o de otras dunas es otro factor que limita las tasas de desplazamiento, de tal forma que éstas se incrementan conforme las geformas se alejan de los obstáculos (Hernández Calvento, 2002: 195). Este hecho está relacionado con la formación de una zona de sombra eólica a sotavento del obstáculo, donde el viento no tiene capacidad para movilizar los sedimentos (Hernández Calvento, 2002: 22). Además, en la playa alta la duna costera altera la dinámica del viento, aumentando su velocidad en unos casos y disminuyéndola en otros (Hesp *et al.*, 2005b: 81). Por lo que respecta a la topografía considerada como base sobre la cual se desplazan las dunas, ésta puede favorecer o dificultar la movilidad en función de la dirección del viento (Alcántara-Carrió, 2003: 242).

Finalmente, la influencia de las actividades humanas, aparte del incremento de la cobertura vegetal señalado anteriormente (plantaciones), está relacionado con la construcción de diversas obras artificiales, como urbanizaciones turísticas, que alteran el flujo del viento de forma parecida a la ocasionada por los obstáculos topográficos, afectando a la movilidad de las dunas a sotavento de las edificaciones (Alcántara-Carrió

et al., 1996; Alcántara-Carrió, 2003; Hernández Calvento, 2002; Hernández Calvento, 2006).

1.1.3. La agrupación de las dunas simples: los campos de dunas litorales

Las dunas individuales están integradas normalmente en sistemas más amplios, denominados genéricamente campos de dunas litorales. En ellos se combinan diferentes tipos de geoformas, así como distintos estadios de su movilidad (dunas móviles y estabilizadas). La bibliografía anglosajona generalmente utiliza el término de duna costera (*coastal dunes*) para referirse únicamente a las dunas más cercanas a la costa, identificadas con la duna costera (*foredune*). Cuando se incluyen tanto las dunas situadas en la playa alta como las localizadas hacia el interior, reciben distintos nombres como por ejemplo sistema de dunas (*dune system*) (Ranwell, 1959; Willis *et al.*, 1959) o campos de dunas (*dunefields*) (Nordstrom *et al.*, 1990: 251), entre los más utilizados. Sin embargo, la mayor parte de los estudios existentes abordan únicamente las dunas costeras, a pesar de que éstas en ocasiones solo representan una parte de estos sistemas. Vallejo (2007) distingue entre dunas litorales, cuando se considera la totalidad del sistema dunar, y duna costera, cuando se refiere únicamente a la situada en la parte más cercana a la costa y que equivale a la duna costera. Este criterio es que se utilizará en esta tesis.

Existen algunas propuestas de clasificación de los campos de dunas litorales. Unos utilizan como criterio principal la morfología (Hesp, 1991) y otros la importancia de la vegetación en su desarrollo (Ley *et al.*, 2007). La clasificación de Hesp (1991: 167) diferencia 4 tipos o complejos principales: dunas costeras, dunas costeras relicticas planas (*relict foredune plains*), dunas parabólicas y campos de dunas transgresivos. En esta clasificación se integran tanto dunas simples como campos de dunas, lo que produce cierto grado de confusión. Asimismo, algunas de estas clases pueden formar parte de un mismo sistema dunar.

Por su parte, Ley *et al.* (2007: 43) clasifican los sistemas de dunas litorales españoles en dos tipos principales, en función del papel que desempeña la vegetación en ellos: los que están asociados a ambientes áridos no vegetados y los que se corresponden con sistemas vegetados. En los primeros, la vegetación no juega un papel determinante en la dinámica dunar, como sucede en los existentes en las islas Canarias. Por el contrario, en los vegetados la presencia de la vegetación es determinante para la formación y desarrollo del sistema.

La morfología de los campos de dunas litorales depende de 7 factores principales, según Flor (2004): naturaleza de las arenas, características del régimen de vientos y orientación de la playa respecto al mismo, aportación de arena, cubierta vegetal, topografía de la zona terrestre adyacente a la playa, posición del nivel freático y grado de humedad propio de la zona costera.

La naturaleza de las arenas está relacionada principalmente con su tamaño y origen. El tamaño del grano es una variable muy importante, ya que teóricamente

cuanto mayor sea éste, más pesará. Sin embargo, esto también está íntimamente ligado al origen de los sedimentos, de tal forma que los granos terrígenos normalmente son más densos que los de naturaleza organógena. Por lo tanto, las características granulométricas y la composición determinan la capacidad de la arena para ser transportada.

El viento, elemento que controla el transporte de los sedimentos, cumple un papel central en los sistemas de dunas litorales. La formación de dunas litorales está relacionada con la existencia de vientos perpendiculares a la costa, de forma que el transporte de la arena se produzca desde la orilla hacia el interior. En el caso de vientos paralelos a la costa, el efecto que produce es la formación de playas progradantes, pues se favorece el transporte por deriva litoral (Ley *et al.*, 2007: 36). Asimismo, la dirección y velocidad del viento condicionan el tipo de dunas existentes y la capacidad de transporte de los sedimentos. La proporción de los diferentes tamaños de granos de arena en cualquier parte del sistema depende principalmente de la velocidad media del viento (Chapman, 1964: 160).

Otro elemento muy importante es el aporte de sedimentos, ya que éstos son indispensables para la formación de un campo de dunas. Además, la arena existente en las dunas constituye una reserva necesaria para garantizar la permanencia de la playa en caso del predominio de procesos erosivos (Ley *et al.*, 2007: 36).

Aunque la contribución de la vegetación se analizará de forma más pormenorizada en un apartado específico, se puede adelantar que la morfología del sistema de dunas varía de forma sustancial en función de la fisionomía del tipo de plantas existentes (herbáceas, arbustivas o arbóreas) y del grado de cobertura de las mismas.

La existencia de una topografía adecuada en la zona adyacente a la playa, lo suficientemente amplia para permitir la acumulación de sedimentos, favorece la formación de campos de dunas y, sobre todo, que éste se pueda extender hacia el interior. Cuando la topografía es más abrupta, la extensión de estos sistemas se encuentra limitada, aunque la arena acumulada puede suavizar la pendiente cuando la tasa de sedimentación sea importante y los vientos tengan una capacidad de transporte muy alta (Ley *et al.*, 2007: 37).

Por otro lado, la existencia de un nivel freático próximo a la superficie condiciona la fijación de la arena y limita la erosión en profundidad, además de favorecer la formación de dunas parabólicas. Finalmente, el grado de humedad de la zona costera favorece la cohesión de las partículas arenosas y condiciona la colonización vegetal (Ley *et al.*, 2007: 37).

1.1.4. Los contrastes internos de los campos de dunas litorales

Los sistemas de dunas litorales no son uniformes ni desde el punto de vista geomorfológico ni ecológico. Con respecto a la geomorfología, se puede establecer una clasificación interna, diferenciando entre la duna primaria y la secundaria (Davies,

1972). Según este autor, la duna primaria se origina directamente desde la playa, mientras que la duna secundaria es el resultado de la erosión de la primaria. Por su parte, Vallejo (2007) propone una clasificación interna de las dunas litorales basándose en Servera (1997). Este modelo parte de la existencia de un balance sedimentario positivo, vientos oceánicos de orientación perpendicular a la costa y la inexistencia de barreras orográficas importantes hacia el interior. Según este esquema, el sistema dunar estaría formado por 4 zonas principales (figura 1.10): la playa, la duna costera, las dunas interiores activas y las dunas interiores inactivas. Esta clasificación coincide con la zonificación ecológica realizada por Cowles (1899a, b y c) en el lago Michigan (Estados Unidos), donde establece diferentes áreas en función de las distintas etapas en la sucesión ecológica, en consonancia con el estado evolutivo del sistema de dunas y sus características ambientales. Este autor distingue 4 zonas principales: la playa, las dunas embrionarias o dunas de playa temporales, las dunas activas o dunas nómadas y las dunas estabilizadas.

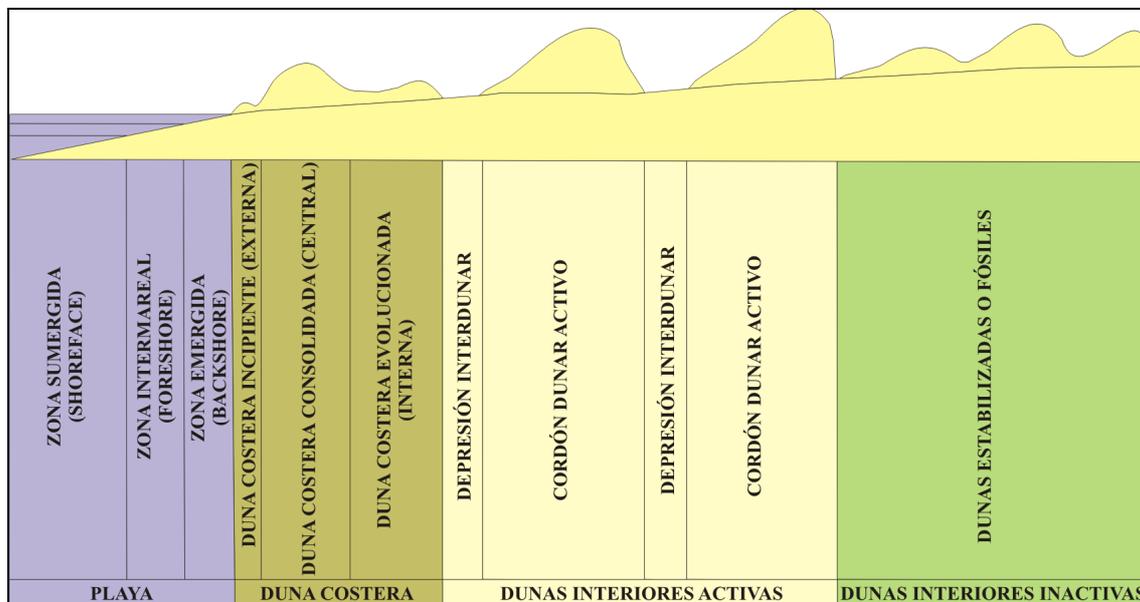


Figura 1.10. Zonas que componen un sistema de dunas litoral (modificado de Vallejo, 2007: 80).

1.1.4.1. Playa

La playa es un elemento fundamental para las dunas litorales, ya que constituye la zona de entrada de sedimentos al sistema. Básicamente existen dos tipos de playas (Martínez, 2009: 23): reflectivas y disipativas. Las primeras se caracterizan por ser estrechas, presentar sedimentos gruesos y la pendiente sumergida es muy abrupta, debido a que las olas tienen mucha energía. Las playas disipativas son anchas y el sedimento es fino y abundante. El oleaje presenta una menor energía. Además, se pueden encontrar playas mixtas que comparten las características de ambas. La formación de extensos sistemas de dunas está asociada a playas de tipo disipativo, con pendientes suaves y una playa alta de gran extensión, que garantice la existencia de

arena seca que potencialmente pueda ser transportada por el viento hacia el interior (Vallejo, 2007: 82). La playa tiene asociada dos geoformas, la berma (*berm*) y los cordones de playas (*beach ridges*), que han sido frecuentemente confundidos y sus términos utilizados indistintamente (Hesp *et al.*, 2005a: 494). La berma es una orilla paralela a la costa, no persistente al oleaje construida por cordones o terrazas formadas en el límite de la marea alta, mientras que el cordón de playa es un depósito formado por arena, guijarros, gravas o rocas grandes redondeadas, o una combinación de los mismos, que se forma por encima del nivel de marea de la primavera y generalmente es permanente (Hesp, 2005a: 500). Por lo tanto, para este autor, la diferencia entre estas geoformas es el carácter temporal que presenta la berma.

1.1.4.2. Duna costera

La duna costera constituye una de las zonas más estudiadas de los sistemas de dunas litorales. Sin embargo, carece de una definición precisa (Vallejo, 2007), lo cual desencadena confusiones y ambigüedades. Éstas derivan del dispar contenido que se ha dado al término anglosajón de *foredune*, dado que ha podido ser utilizado para denominar estrictamente al primer cordón de dunas (Labuz, 2004; Labuz y Grunewald, 2007), o incluso, como la cara de barlovento del mismo (Fernandes y Neves, 1997). Los equivalentes de este término en castellano son duna primera, duna delantera, anteduna, duna frontal o duna costera, entre los más utilizados. Se corresponde con la duna primaria (*primary dune*) definida por Davies (1972). En la figura 1.11 se expone un ejemplo real de la misma, donde se pueden apreciar, en la zona más cercana al mar, las primeras dunas formadas por *Ammophila arenaria* y, detrás de ésta, las dunas más antiguas colonizadas por vegetación arbustiva. Ambas se incluyen dentro de la duna costera, lo cual se explicará de forma más detallada en los párrafos posteriores.



Figura 1.11. Ejemplo de duna costera. Parque Nacional de Doñana (año 2006).

Psuty (2004), basándose en sus características morfodinámicas, distingue dos zonas dentro de la duna costera: la duna primaria, donde existe un intercambio activo de sedimentos entre la playa y la duna, y que es el único tipo de duna que depende totalmente de su localización costera, y la duna secundaria que, a su vez, es dividida en dos tipos: activa y estable. La duna secundaria activa se forma por modificación de la primaria, o por la transferencia de arena hacia el interior desde la misma. Se caracteriza por un transporte activo de sedimentos, representado por superficies de deflación y morfologías parabólicas o de media luna (barjanas). La duna secundaria estable, por su parte, está formada por dunas que formaban parte de la duna costera activa hasta no hace mucho, pero que no han progresado. Estas dunas pueden haber sido abandonadas por la progradación de la costa, o por el contrario haber empezado a estabilizarse por la acción de la vegetación. Su configuración es la de cordones lineales de dunas costeras, si ya no existe acreción, o puede haber algunas formas progresivas asociadas a una movilidad previa.

En la línea de este autor, Vallejo (2007) considera la duna costera, más que como un cordón o conjunto de éstos, como una entidad más compleja y extensa que denomina “complejo de la duna costera”. Siguiendo a este autor, el complejo de la duna costera está formado por dos zonas que, a su vez, se subdividen en sendas subzonas (figura 1.12): la duna costera primaria, que integra la duna costera incipiente y la duna costera consolidada, caracterizada por una mayor densidad de la vegetación (Vallejo, 2007: 166), y la duna costera secundaria, formada por la modificación de antiguas dunas consolidadas, o por la transferencia de sedimentos desde las actuales, y que integra la duna costera evolucionada.

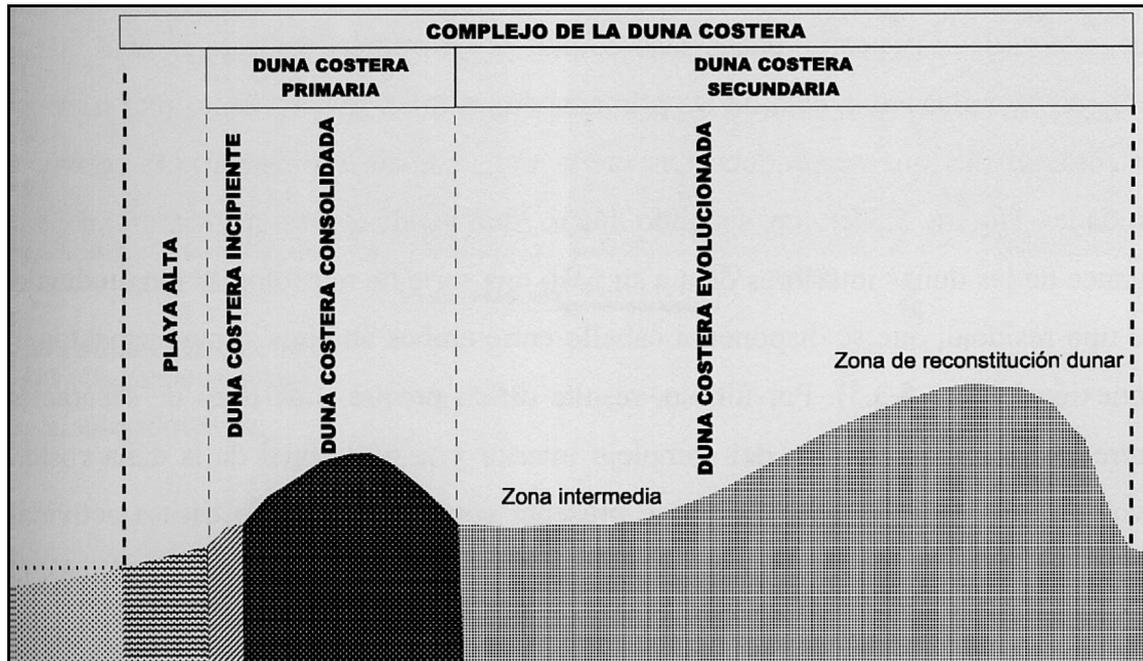


Figura 1.12. Zonificación del complejo de la duna costera (tomado de Vallejo, 2007: 133).

Así, dentro de la duna primaria, la duna costera incipiente está relacionada con el concepto de dunas embrionarias (*embryo dunes*) (Cowles, 1899; Chapman, 1964) o duna costera incipiente (*incipient foredune*) (Hesp, 2002), y constituye una parte integrante del sistema sedimentario playa-duna. Se trata, por tanto, de las primeras dunas generadas en la playa alta por la vegetación pionera herbácea (Hesp, 2002: 245-246), y que pueden desaparecer de forma temporal debido a la erosión marina (Vallejo, 2007: 136). Por su parte, la duna costera consolidada representa el elemento central del complejo y tiene un carácter permanente, siendo equivalente a la *established foredune*, etapa evolucionada de la anterior que se distingue por su crecimiento intermedio, por la mayor frecuencia de especies arbustivas, su mayor complejidad morfológica, altura, anchura, edad y posición geográfica (Hesp, 2002: 248). Esta unidad suele tener unos límites muy bien definidos, debido a un apreciable desnivel topográfico y a la intensa presencia de vegetación (Vallejo, 2007: 137). La duna costera consolidada puede ser clasificada en función de su estado de desarrollo morfoecológico, diferenciándose cinco fases evolutivas (Hesp, 1988: 20; figura 1.13):

El estado 1 representa dunas costeras en las que predomina la acreción de arena y la erosión marina es limitada. La amplia cobertura vegetal, así como la altura de la duna costera, permiten la existencia de una extensa área de acumulación de sedimentos, principalmente en la ladera de barlovento.

El estado 2 es similar al anterior, a excepción de la menor cobertura vegetal, además de la existencia de zonas erosivas. La arena se acumula en la ladera de barlovento y en la cresta.

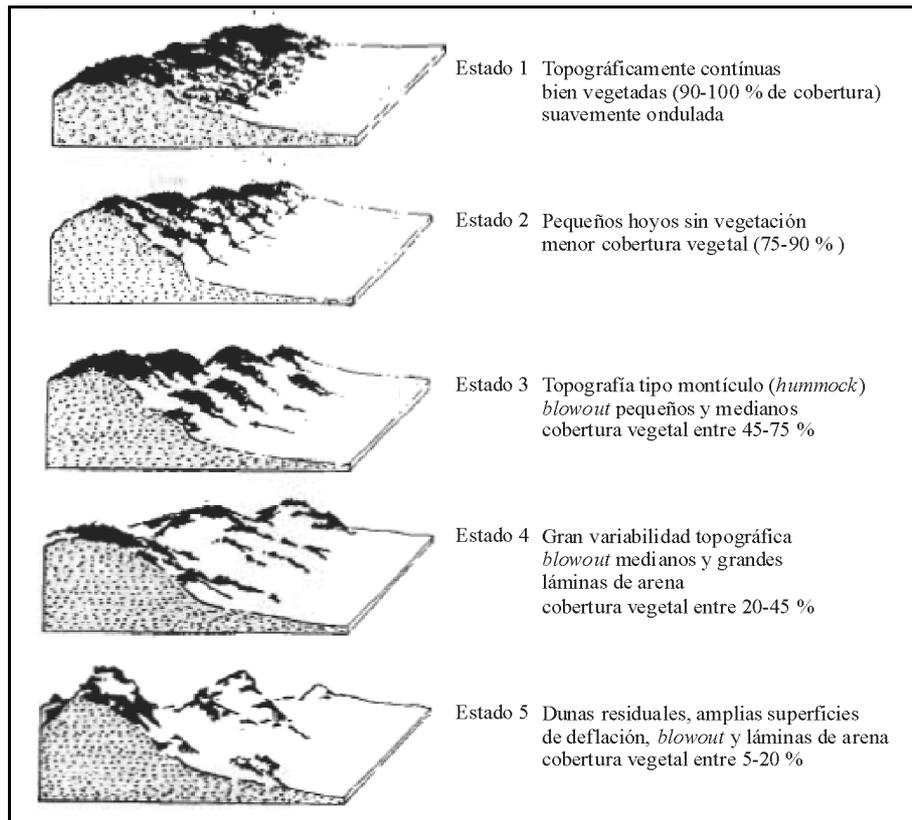


Figura 1.13. Clasificación morfológica de la duna costera consolidada (modificado de Hesp, 1988: 20).

El estado 3 se caracteriza por el predominio de una morfología tipo dunas en montículos, debido a la menor cobertura vegetal, la cual oscila entre poco y parcialmente vegetada. Asimismo, existe una mayor erosión, que se manifiesta en la existencia de *blowouts*. La morfología y evolución de esta fase depende del tipo de especies vegetales existentes. Las plantas que carecen de estolones o rizomas son susceptibles de ser erosionados durante los periodos de fuertes vientos, mientras que las especies que cuentan con estrategias de crecimiento vegetativo son más eficaces. Ello se debe a que, en los momentos de erosión de la superficie, los rizomas o estolones de la planta están en contacto con la arena, de forma que mantienen la rugosidad y reducen localmente la erosión (Hesp, 1988: 26). La acción erosiva del mar afecta de forma ocasional a la duna costera en este estado evolutivo.

En el estado 4 predominan los procesos erosivos, apareciendo *blowouts* de mayores dimensiones, superficies de deflación y láminas de arena. Estas geoformas se intercalan con cordones, montículos y depresiones parcialmente vegetados.

El estado 5 está representado por geoformas afectadas, de manera significativa, por la erosión marina. La duna costera se ve reducida a dunas residuales, predominando los *blowouts* y otras formas erosivas.

Según Vallejo (2007), dentro de la duna costera secundaria, la zona interior está formada por la duna costera evolucionada. Este enclave representa el conjunto de geoformas que pueden generarse por modificación de la duna costera consolidada, caracterizada por una menor densidad de vegetación que la duna costera primaria,

donde predominan las comunidades arbustivas y arbóreas (Vallejo, 2007: 166). Presenta una zona intermedia deprimida, donde los procesos de deflación son dominantes, y otra donde se produce la reconstitución dunar. La zona intermedia puede presentar dos configuraciones principales: por un lado, puede constituir una superficie de deflación sin vegetación, haciendo a veces de zona de transferencia de sedimentos entre la duna costera consolidada y la zona de reconstitución dunar; en otras ocasiones se encuentra colonizada por la vegetación higrófila, concretamente por *Juncus acutus*, debido al afloramiento del nivel freático, lo que indica una mayor desconexión entre ambas áreas; en otros casos, la zona intermedia se desdibuja, debido a la existencia de campos de *blowouts*. Por su parte, la zona de reconstitución dunar también posee diferentes morfologías. Así, puede adquirir la forma de una típica duna transversal, estar ausente, o aparecer con alguna otra tipología dunar como, lóbulos de acumulación, debidos a la formación de los mencionados campos de *blowouts*.

Por lo que respecta a la morfología de la duna costera, esta depende de tres factores (Pye, 1990): la tasa de suministro de arena a la costa, la energía del viento disponible para el transporte de arena hacia el interior y la efectividad de la vegetación en la captación de arena. La combinación de estos factores da lugar a seis tipos diferentes de duna costera (figura 1.14): a) Existencia de un balance positivo de arena y débil energía eólica. Como resultado se produce la progradación de un cordón de playa plano con un mínimo desarrollo dunar entre los intervalos t_1 y t_4 ; b) existencia de un balance sedimentario positivo y de vientos de alta energía que posibilitan el trasvase de parte de la arena a la playa alta, donde una parte es atrapada por la vegetación. De esta forma se originan varios cordones paralelos, formados en costas progradantes, aunque más lentamente que en el caso anterior; c) existencia de un balance de arena positivo y una energía eólica moderada, con una cubierta vegetal escasa o inefectiva. Como resultado se generan series irregulares de dunas en montículos con incipientes *blowouts* y dunas parabólicas; d) existencia de una tasa de suministro de arena semejante a la tasa de transferencia eólica a las dunas, donde toda la arena que llega es atrapada por la vegetación. El resultado es un cordón de duna costera simple con crecimiento vertical; e) existencia de una tasa de suministro de arena desde la orilla un poco más reducida que la tasa de transferencia eólica desde la playa a las dunas. En este caso la playa disminuye y la costa retrocede un poco hacia el interior, ocasionando daños a la vegetación litoral, por acción de la sal y el viento. En este caso las geoformas que se forman desde la orilla son *blowout* y pequeñas dunas parabólicas transgresivas; y f) existencia de un escaso o nulo aporte sedimentario suministrado por procesos marinos, y una alta energía eólica, de modo que la arena es transportada hacia el interior desde la playa. Como resultado la playa retrocede rápidamente, aumentando el riesgo de daños por temporales marinos e incrementándose la tasa de retroceso de la costa. La vegetación litoral es destruida y se desarrollan láminas de arenas transgresivas.

El límite interior de la duna costera, donde contacta con las dunas interiores activas, puede presentar tres situaciones básicas (Vallejo, 2007: 134): a) separación mediante una depresión interdunar con abundante vegetación, b) transición a través de

geoformas dunares o c) transición a través de una zona de escasa actividad sedimentaria donde predominan la deflación eólica.

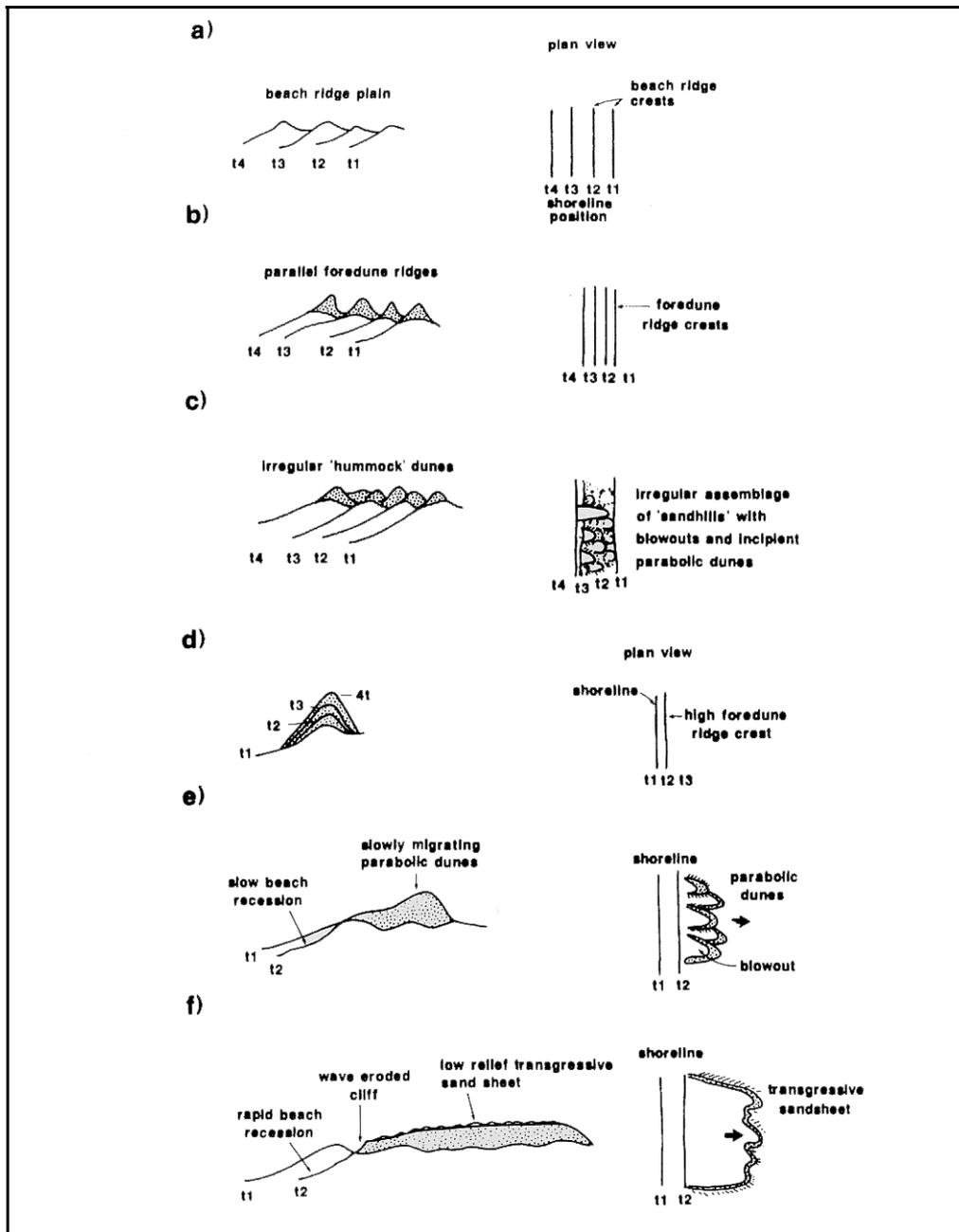


Figura 1.14. Modelo de la morfología de la duna costera en función de la dinámica de la costa, energía del viento y efectividad de la vegetación en la captación de arena (tomado de Pye, 1990: 356).

1.1.4.3. Dunas interiores activas

La tercera unidad, según el esquema establecido en la figura 1.10, está formada por las dunas interiores activas, que equivalen a los campos de dunas transgresivos definidos por Hesp y Thom (1990). Constituyen amplias superficies de dunas activas que se han movido de su posición original hacia el interior o a lo largo de la orilla (Hesp

y Thom, 1990: 254; Hellemaa, 1998: 18) y, sin duda, esta parte de los sistemas de dunas ha sido una de las menos estudiadas. Esta formación presenta una clara diferencia con la duna costera desde el punto de vista dinámico, morfológico y ecológico, pues los procesos sedimentarios eólicos son dominantes, frente a otros ambientes, como los costeros (Vallejo, 2007: 98). De hecho, en este ámbito la vegetación no tiene un papel tan destacado como en la duna costera. Con base en el grado de conocimiento actual existente sobre estas formaciones dunares (por ejemplo Hesp y Thom, 1990) se pueden establecer dos configuraciones principales (Vallejo, 2007): por un lado se encuentran grandes formaciones uniformes, que presentan un marcado frente de avance; el segundo tipo esta formado por dunas o cordones de dunas individuales separados por depresiones interdunares.

1.1.4.4. Dunas interiores estabilizadas

Por su parte, en las dunas interiores inactivas, los procesos sedimentarios eólicos poseen una escasa importancia, dado que la edafogénesis y la vegetación predominan sobre los aportes de arena y la deflación (Vallejo, 2007: 99). Este ambiente está formado por antiguas dunas transgresivas, que fueron estabilizadas posteriormente por procesos naturales de sucesión vegetal, o por la acción humana.

1.2. Características de la vegetación de los campos de dunas litorales

La vegetación desempeña un papel muy importante en la determinación de la morfología eólica (Hesp, 1984: 88; Carter, 1988: 311; Hesp, 1989: 182), aunque su presencia no es esencial para la formación de las dunas costeras, ejerciendo también un importante papel en el control del transporte de sedimentos a escala local (Sherman y Hotta, 1990: 24). Solamente en zonas con un clima hiperárido y sobrepastoreadas la vegetación está totalmente ausente (Pye y Tsoar, 1990: 195). La vegetación de los sistemas de dunas litorales se comenzó a estudiar principalmente a finales del siglo XIX, destacando en esta época la figura de Cowles (1899). Estos primeros trabajos sentaron las bases sobre los métodos de estudio, la caracterización de las comunidades vegetales y los procesos de sucesión ecológica. La existencia de estas investigaciones desde tan tempranas fechas se debe a la singularidad de estos ecosistemas, que se manifiesta en las características especiales de las plantas que viven en ellos y, sobre todo, en el hecho de que se trata de ecosistemas muy dinámicos. Esta dinámica se manifiesta, precisamente, en que se producen cambios muy significativos en intervalos temporales muy cortos. Ello ha permitido conocer los procesos de sucesión ecológica, y entender los patrones y estrategias de colonización vegetal que en otros ecosistemas suceden de forma lenta. En este sentido, el interés de los campos de dunas litorales es que se pueden encontrar diferentes etapas evolutivas de las comunidades vegetales en un mismo espacio geográfico sin intervención humana, lo que permite estudiar y comprender los procesos de sucesión ecológica. Asimismo, la vegetación está asociada

a gradientes ambientales muy marcados, lo que facilita el estudio de la relación entre la distribución de las comunidades vegetales y los factores ecológicos, así como la influencia de las actividades humanas.

Sin embargo, pese a la gran cantidad de estudios existentes sobre la vegetación en estos sistemas, la mayor parte de los mismos abordan los sistemas progradantes, o se limitan a la duna costera, mientras que los que también abordan las unidades interiores o la totalidad de campos de dunas transgresivos son más escasos (Ranwell, 1958; 1959; 1960; Martin, 1959; Willis *et al.*, 1959a, b; Judd *et al.*, 1977; Rivas-Martínez *et al.*, 1980; Moreno-Casasola *et al.*, 1982; Moreno-Casasola, 1986; Mclachlan, 1990; Talbot y Bate, 1991; Avis y Lubke, 1996; Kerley *et al.*, 1996; García-Novo, 1997; Bridget *et al.*, 2000; Musila *et al.*, 2001; Lubke, 2004; Hesp y Martínez, 2008). Además, y como se puede observar en la tabla 1.2, la mayor parte de los trabajos desarrollados se centran en las zonas templadas húmedas y tropicales húmedas, siendo más escasos los trabajos que abordan los campos de dunas litorales áridos.

Autores	Zona climática
Olson, 1958; Martin, 1959; Chapman, 1964; Kumler, 1969; McBride y Stone, 1976; Judd <i>et al.</i> , 1977; Costa y Mansanet, 1981; Doing, 1981; Doing, 1985; Van der Laan, 1985; Van der Maarel <i>et al.</i> , 1985a,b; Van Dorp <i>et al.</i> , 1985; Cordazzo y Seeliger, 1988; Cowling y Pierce, 1988; Piotrowska, 1988; Sykes y Wilson, 1991; Corre, 1991; Avis y Lubke, 1996; Bejarano, 1997; Hellemaa, 1998; Lichter, 1998; Maun y Perumal, 1999; Wilson y Sykes, 1999; Stallins y Parker, 2003; García-Novo <i>et al.</i> , 2004; Labuz, 2004; Maun, 2004; Wiedemann y Pickart, 2004; Pegman y Raspon, 2005; Dech y Maun, 2006; Labuz y Grunewald, 2007; Acosta <i>et al.</i> , 2007; Feagin y Wu, 2007	Templada húmeda
Gooding, 1947; Moreno-Casasola y Espejel, 1986; Espejel, 1987; Campbell <i>et al.</i> , 1988; Moreno-Casasola, 1988; Castillo <i>et al.</i> , 1991; Martínez y Moreno-Casasola, 1997; Castillo y Moreno-Casasola, 1998; Martínez y Moreno-Casasola, 1998; Martínez <i>et al.</i> , 2001; Musila <i>et al.</i> , 2001; Martínez, 2003; Hayasaka y Fujiwara, 2005	Tropical
Migahid <i>et al.</i> , 1971; Ayyad, 1973; El-Ghonemy, 1977; Abdel-Razik <i>et al.</i> , 1984; Yeaton, 1988; Bendali <i>et al.</i> , 1990; Shaltout <i>et al.</i> , 1995; Brown, 1997; El-Bana <i>et al.</i> , 2002; Toft y Elliott-Fisk, 2002; Migahid, 2003	Áridos

Tabla 1.2. Publicaciones en función de la zona climática donde se ubica el sistema de dunas litoral.

En este apartado se tratan los aspectos más relevantes que caracterizan a la vegetación de los campos de dunas litorales, su relación con los factores ambientales que controlan el funcionamiento de estos sistemas, así como los aspectos básicos sobre su dinámica y los procesos de sucesión vegetal. Se compone de siete epígrafes: las variaciones de la vegetación en función de la latitud, los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación, las adaptaciones de las plantas de las dunas, el papel de la vegetación en la formación de las dunas, la zonación de los campos de dunas litorales, su dinámica y, por último, la vegetación de los sistemas de dunas de Canarias.

1.2.1. Variaciones en función de la latitud de la vegetación de los campos de dunas litorales

Las adaptaciones de las plantas y las características de las comunidades vegetales (composición florística, estructura, riqueza de especies, etc.) varían en función de un gradiente latitudinal (Johnson, 1977; Johnson, 1982; Doing, 1985; Moreno-Casasola y Espejel, 1986; Espejel, 1987; Moreno-Casasola, 1988; Hesp, 1991; Eskuche, 1992; Wiedemann y Pickart, 2004). Esta relación con la latitud se debe a que ésta condiciona las características climáticas, sobre todo a escala zonal. Según Hesp (1991: 182-183; figura 1.15) las tendencias generales de la vegetación en función de la latitud son las siguientes:

a) La riqueza de especies desciende con el incremento del nivel de estrés, de forma que el menor número de especies se encuentra en las regiones más frías y secas. De este modo, la escasez de especies de plantas en las dunas costeras del noreste de África y, especialmente en Namibia, probablemente está relacionada con la escasez de precipitaciones de estas regiones (Hesp, 1991: 182). Hay que tener en cuenta que la escasez de precipitaciones reduce las tasas de germinación y establecimiento de las plantas, y favorece el asentamiento de las especies con sistemas de propagación vegetativos (Yeaton, 1988: 757).

b) La riqueza de especies decrece en aquellas zonas donde la movilidad de las dunas se incrementa y, en general, la movilidad potencialmente aumenta con la aridez.

c) El número de especies anuales decrece, y el dominio de plantas perennes tiende a incrementarse, desde las zonas mediterráneas a las áridas.

d) El grado de suculencia, esclerofilia y resistencia al calor, así como el número de especies decíduas se incrementa con el aumento de las condiciones de sequedad.

e) El número de especies C₄ (plantas que crecen durante la estación cálida) tiende a incrementarse con el aumento de la radiación solar y temperatura.

f) Las especies con raíces fibrosas xeromórficas predominan en regiones lluviosas, así como en regiones donde la formación externa o interna de rocío es favorable. Las especies con raíces duras tienden a predominar en áreas secas con aguas subterráneas dulces superficiales.

g) El grado de afinidad con especies de desiertos se incrementa hacia las regiones áridas.

h) El número de especies endémicas se incrementa con la aridez.

i) El número de adaptaciones a los factores de estrés y/o el grado de adaptaciones a los mismos aumenta hacia las zonas áridas y hacia las zonas polares.

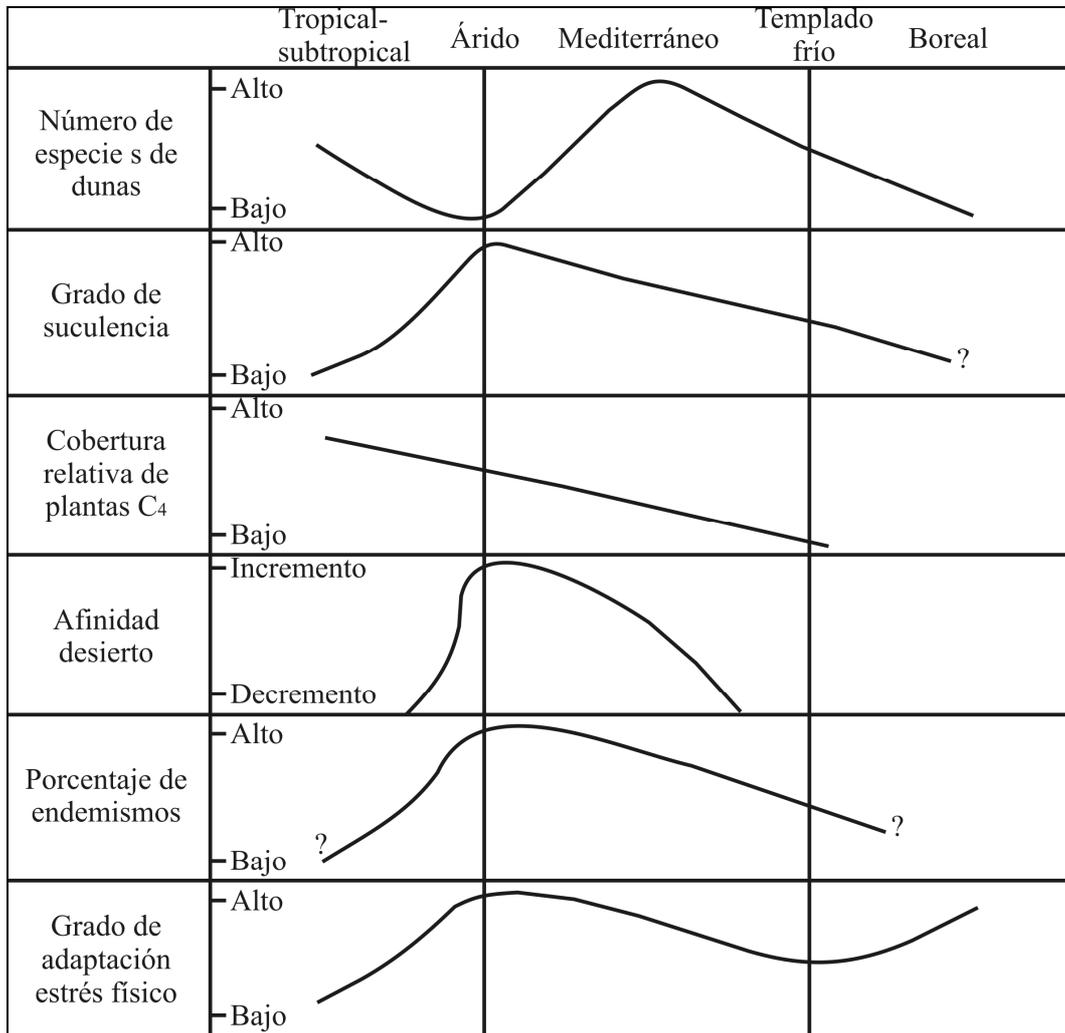


Figura 1.15. Tendencias ecológicas de los campos de dunas litorales en función de la latitud (modificado de Hesp, 1991: 183).

Por lo tanto, la selección primaria de las plantas de los sistemas de dunas litorales está relacionada con las características climáticas de cada región. Doing (1985: 72) establece algunas diferencias entre las dunas costeras de las zonas tropicales húmedas y las de las zonas templadas. En el primer caso, las plantas suelen ser de pequeño porte y dominan las especies herbáceas bajas en el cordón frontal, mientras que en el segundo cordón y en las zonas interiores predominan las leñosas. Por el contrario, en las zonas templadas predominan especies herbáceas altas como *Ammophila arenaria*, mientras que en las boreales la especie constructora de dunas más frecuente está formada por el género *Elymus*. Por su parte en las regiones áridas, con frecuencia, las especies existentes son halófilas (*Suaeda*, *Tamarix*, *Frankenia*) o hierbas que también se localizan en dunas desérticas, en áreas no litorales (Doing, 1985: 72). Un ejemplo claro de la gradación de la vegetación en función del clima sucede en el Golfo de California (México), donde las especies presentes en la duna costera varían desde formaciones

monoespecíficas de pequeños arbustos (*Atriplex barclayana*) en las zonas áridas del norte, a especies de suculentas (*Abronia maritima*, *Sesuvium portulacastrum*) en la zona central, más cálida y lluviosa, hasta especies rastreras (*Diodia crassifolia*, *Pectis multiflosculosa*, *Jouvea pilosa*) en el sur tropical húmedo (Johnson, 1982: 326). En la costa pacífica de Estados Unidos la distribución de las especies presentes en las dunas está en función de las variaciones de precipitaciones a lo largo de la misma (Wiedemann y Pickart, 2004: 57-60).

1.2.2. Los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación en los campos de dunas litorales

En el apartado anterior, se analizó la influencia de las características climáticas de las diferentes regiones del planeta en la selección de las especies de plantas. A escala local, es decir, de cada campo de dunas y dado que estos sistemas presentan fuertes condicionantes para el establecimiento y desarrollo de la vegetación existen una serie de factores ambientales que condicionan la distribución de las plantas. Tres son los factores principales que se han considerado como responsables de la distribución de la vegetación: el spray marino, el enterramiento por arena y la topografía. Además, existen otros que, en general, son considerados de menor importancia.

1.2.2.1. El spray marino

Oosting y Billings (1942) consideraron, en un primer momento, que la salinidad ambiental (spray marino) era el principal factor ambiental que controla la distribución de la vegetación en la duna costera. Esta afirmación la fundamentan en los siguientes motivos: la existencia de un gradiente en la salinidad ambiental entre la playa y el interior de las dunas, y en el hecho de que la tolerancia a la sal de las especies dominantes en zonas sucesivas decrece con la distancia al mar. Otros estudios realizados posteriormente, en diversas partes del mundo, han mantenido la importancia de la salinidad ambiental como factor explicativo de la distribución de la vegetación (Boyce, 1954; Donnelly y Pammenter, 1982; Wilson y Sykes, 1999).

El efecto del spray marino está limitado espacialmente, ya que este factor disminuye de forma importante a 600-800 m de distancia de la orilla del mar (Rozema *et al.*, 1985: 517). Sin embargo, en su zona de influencia, es un factor limitante para la vegetación, seleccionando las especies que pueden desarrollarse principalmente en la duna costera. En este sentido, hay que considerar que las especies de las dunas muestran diferente tolerancia al spray marino, siendo las anuales las menos resistentes (Oosting, 1945: 88). Por otro lado, el spray marino también condiciona la morfología de las plantas, ya que según Boyce (1954: 64) el pequeño porte de las mismas en muchas zonas se debe a la selección directa impuesta por este factor ambiental. Los efectos del spray marino pueden ser atenuados por varias causas como, por ejemplo, una baja disponibilidad de N. Este factor incrementa la tolerancia de las plantas al spray marino,

por lo que un aumento de este elemento mineral provocaría un cambio en los patrones de zonación de la vegetación (Boyce, 1954: 63). Otro aspecto que incide en ello es la distribución de las precipitaciones, pues las altas y regulares reducen la concentración de sales en el sustrato (Sykes y Wilson, 1988: 164; Maun, 1999: 16).

Lo cierto es que la salinidad ambiental generada por el oleaje (spray marino) afecta a las plantas. Por una parte, puede producir la muerte de las hojas, tejidos y, en ocasiones, de la totalidad de los ejemplares (Boyce, 1954: 63; Sykes y Wilson, 1988: 160; Wilson y Sykes, 1999: 235). Pero, por otra parte, el spray marino aporta gran parte de los nutrientes a la playa y a las dunas (Van der Valk, 1974a: 1069). En definitiva, este factor puede ser un limitante para el asentamiento de las plantas, pero también contribuye al enriquecimiento de nutrientes en la duna costera, lo que facilita el desarrollo de la vegetación (Rozema *et al.*, 1985: 517). Así, por ejemplo, algunas especies dependen del spray marino para abastecerse de Mg (Rozema *et al.*, 1982: 209), y otras necesitan de éste como estímulo para su crecimiento; así sucede con *Cakile maritima* y *Salsola kali*, especialmente en condiciones de baja fertilidad del suelo (Rozema *et al.*, 1982: 206).

1.2.2.2. El enterramiento por arena

Otros trabajos han dado prioridad al enterramiento producido por la movilidad de la arena como factor estructurante de la distribución de la vegetación (Ayyad, 1973; Van der Valk, 1974a; Moreno-Casasola, 1986; Maun y Perumal, 1999; Maun, 2004).

Según Maun (2004: 119) el enterramiento genera una alteración completa de las características del suelo (temperatura, humedad, densidad, nutrientes, pH y nivel de oxígeno). Así, se produce un incremento de la humedad, de los nutrientes, de la densidad y de los microorganismos anaeróbicos, al tiempo que un descenso en la temperatura del suelo, en la aireación, en la intensidad de luz y en la competición (Maun, 1994: 61). Entre estas consecuencias, el mayor impacto del enterramiento es la suspensión de la fotosíntesis, y, por ello, la interrupción de la fabricación de carbohidratos (Perumal y Maun, 2006: 99). Los biotipos menos resistentes al enterramiento son las especies anuales y bianuales (Perumal y Maun, 2006: 102), lo que podría explicar la escasez de éstas en las dunas activas, tanto en las más cercanas a la costa como en las interiores. El enterramiento puede producirse por el movimiento de las partículas de arena o por el desplazamiento en bloque de las dunas. En el primer caso, el enterramiento es gradual, lo que permite a las plantas un mayor tiempo de adaptación.

1.2.2.3. La topografía

Otros autores le conceden mayor importancia a la topografía (Martin, 1959; Ranwell, 1959; Willis *et al.*, 1959a, b; Judd *et al.*, 1977), pues ésta determina la distribución de la vegetación mediante el control de factores ambientales limitantes,

como la movilidad de la arena, la humedad del suelo, la salinidad de las aguas subterráneas y la acumulación del spray marino (Martin, 1959: 34). Así, por ejemplo, la acumulación de spray marino varía desde el 55% en la cara de barlovento de la duna costera, al 31% en la cresta y al 14% en la cara de sotavento (Van der Valk, 1974b: 1351). De esta forma, en las dunas parabólicas la vegetación está bastante condicionada por la topografía, en estrecha relación con la movilidad de la arena, de forma que las comunidades varían en los brazos, pendientes externas (sotavento), pendientes internas (barlovento), cimas y hondonadas (Moreno-Casasola *et al.*, 1982: 493-494). Asimismo, la diferencia entre dunas y depresiones interdunares condicionan la distribución de las comunidades vegetales en los sistemas de dunas, debido a que controlan el acceso de las plantas al agua (Willis *et al.*, 1959b: 250; Ranwell, 1959: 575). Esto se intensifica en las zonas áridas, donde las diferencias ecológicas entre las laderas y depresiones interdunares alteran el gradiente ecológico entre la costa y el interior (Müller-Hohenstein, 1992: 15).

1.2.2.4. Otros factores que influyen en la distribución de la vegetación

Existen una serie de factores ambientales que han sido considerados de menor importancia en la distribución de la vegetación de los campos de dunas litorales: a) la intensidad del viento, b) la presencia de la capa freática cerca de la superficie, c) la erosión marina y d) las características físicas y químicas de la arena (Ranwell, 1959; Willis *et al.*, 1959a,b; Ranwell, 1960; Willis y Yemm, 1961; Willis, 1963; Chapman, 1964; Willis, 1965; Moreno-Casasola *et al.*, 1982; Van der Laan, 1985; Pye y Tsoar, 1990; Van der Putten, 1990; Hesp, 1991; Olff *et al.*, 1993; Maun, 2004; Yura y Ogura, 2006; Ley *et al.*, 2007).

El viento, aparte de su papel esencial en el movimiento de las dunas y su capacidad erosiva, produce un efecto directo y otro indirecto sobre las plantas (Ley *et al.*, 2007: 80). El efecto directo está relacionado con la acción mecánica que realiza, produciendo la rotura de ramas y limitando el crecimiento de las plantas, mientras que el indirecto se produce por la acción desecante y la abrasión de las partículas de arena transportadas, que incrementan las tasas de evaporación y generan daño en los tejidos vegetales, respectivamente (Yura y Ogura, 2006: 207; Ley *et al.*, 2007: 80). Estos efectos son más significativos en las áreas adyacentes a la playa, ya que la intensidad del viento y, por tanto, la carga de sólidos asociada al flujo eólico, disminuyen hacia el interior (Ley *et al.*, 2007: 80), siempre y cuando no se vea favorecido por la topografía o la tipología y escasa altura de las dunas.

La arena constituye un sustrato muy poroso, por lo cual las plantas que se desarrollan en los campos de dunas disponen de una escasa cantidad de agua (Pye y Tsoar, 1990: 288; Tsoar, 2005: 52). Por lo tanto, la vegetación normalmente se localiza en aquellas zonas donde la humedad edáfica es mayor, como ocurre en los espacios interdunares (Pye y Tsoar, 1990: 290). Sin embargo, esa misma porosidad es la que permite la acumulación del agua en grandes depósitos subterráneos. El acceso de las

plantas a la capa freática, cuando existe, depende de la topografía (Willis *et al.*, 1959a: 21). En aquellas zonas donde el volumen de arena es bajo, se produce un aumento del contenido de la humedad del suelo, lo que a su vez permite un incremento en la densidad de la vegetación (Levin y Ben-dor, 2004: 336). El nivel freático en los campos de dunas está asociado a las geoformas derivadas de los procesos de erosión eólica, como las superficies de deflación y depresiones interdunares. La existencia de una capa de agua cerca de la superficie de la arena constituye un factor de gran importancia, debido a que afecta al crecimiento de las plantas (Ranwell, 1959: 575), generándose un tipo de hábitat específico donde se desarrollan comunidades higrófilas, denominadas genéricamente “vegetación de depresiones interdunares” (*dune slack vegetation*). Sin embargo, la aparición de depresiones interdunares no implica necesariamente la existencia de una capa de agua cerca de la superficie. Por ello, se pueden diferenciar entre: a) asociaciones de duna (*dune associes*), cuando la capa de agua se encuentra a más de 2 m de profundidad, b) asociaciones de depresiones secas (*dry slack associes*), cuando en verano esta capa se encuentra entre 1 y 2 m de profundidad, y c) asociaciones de depresiones húmedas (*wet slack associes*), cuando el manto freático nunca desciende a más de 1 m de profundidad (Ranwell, 1959: 599). Las asociaciones de dunas y las asociaciones de depresiones secas no dependen del nivel freático para su supervivencia. Por otro lado, la salinidad del agua es un factor importante que también influye en el crecimiento y la distribución de la vegetación, hasta el punto de que en algunas zonas áridas una alta salinidad es suficiente para impedir completamente el crecimiento de las plantas (Pye y Tsoar, 1990: 291). Por ejemplo, en zonas secas de la península de Yucatán la salinidad de las aguas subterráneas es uno de los factores limitantes más importantes en la zonación de la vegetación (Espejel, 1987: 515).

También la magnitud de los temporales marinos condiciona la composición y abundancia de especies, hasta tal punto que la erosión marina, junto con la eólica constituyen el mayor problema al que se enfrentan las plantas existentes en la duna costera (Maun, 2004: 120; Ley *et al.*, 2007: 83). Sin embargo, el grado de afección del oleaje está relacionado con las características de la costa, por lo que es diferente según sean progradantes, estables o erosivas (Ley *et al.*, 2007: 83). En las costas progradantes, donde están representadas las comunidades de playa, las dunas incipientes y el primer cordón activo, los temporales tienen una escasa influencia, pues afectan normalmente sólo a la primera comunidad. Esto produce la desaparición total o parcial de las especies de la playa seca, debido al impacto del oleaje o a su inundación por agua marina. Por lo tanto, la composición de especies no se ve afectada debido a que permanecen las existentes en las dunas, pero sí condiciona que las especies que habitan en la playa sean resistentes o tolerantes a la salinidad. En las costas estables los temporales de gran intensidad afectan también al primer cordón dunar, socavándolo y produciendo la desaparición de la vegetación situada en el pie de éste y de la parte baja de la ladera expuesta al mar. Por último, en las costas erosivas la vegetación de la playa desaparece con pequeños temporales, y cuando éstos alcanzan cierta magnitud se produce una intensa erosión del primer cordón de dunas y la eliminación de la vegetación existente.

Por otra parte, también las características físicas y químicas de la arena influyen parcialmente en el establecimiento y evolución de la vegetación (Pye y Tsoar, 1990: 286). Entre estas características destacan la temperatura, la humedad edáfica y el contenido en nutrientes. La temperatura de la arena tiene una influencia significativa en la idoneidad de ésta como sustrato para el crecimiento de la vegetación (Pye y Tsoar, 1990: 286), ya que la temperatura de la arena normalmente es superior a la ambiental, de tal forma que en las zonas con menor cobertura vegetal se pueden alcanzar los 60°C durante el verano (Chapman, 1964: 166). La temperatura desciende con el aumento de la cobertura vegetal, dependiendo de las horas de sol recibidas, así como de la sombra producida por las plantas, de la lluvia y de la exposición al viento (Chapman, 1964: 166; Moreno-Casasola, 1982: 585). Sin embargo, como la arena es un pobre conductor del calor, la temperatura desciende rápidamente con la profundidad, por lo que las más elevadas se concentran en los primeros cinco centímetros (Chapman, 1964: 166). Gracias a ello, el calor normalmente no afecta a las raíces de las plantas.

Los nutrientes del suelo suponen un limitante para el desarrollo de la vegetación, especialmente cuando se produce escasez de N y P (Willis y Yemm, 1961: 388; Willis, 1963: 371), de tal forma que, por ejemplo, el vigor de *Ammophila arenaria* en la duna costera está relacionado con la existencia de altos niveles de algunos nutrientes, especialmente de K (Willis *et al.*, 1959b: 252), siendo el mayor limitante para esta especie el aporte de N (Willis, 1965: 742). El establecimiento de las plántulas de *Ammophila arenaria* se incrementan con la fertilización (Van der Putten, 1990: 197), lo que parece corroborar la importancia de la disponibilidad de nutrientes para esta especie. La escasez de nutrientes en los campos de dunas litorales probablemente está relacionada con la alta tasa de permeabilidad y lixiviado de la arena, que favorece la pérdida de los mismos (Tsoar, 2005: 52). Las zonas más cercanas a la playa presentan los mayores valores de Cl, Na y K, como consecuencia del spray marino (Moreno-Casasola, 1982: 601). Conforme se estabiliza la arena, el nivel de nutrientes se incrementa, debido al tiempo de mineralización y a la adición de material aerotransportado. También la presencia de materia orgánica aumenta la capacidad de retención de humedad de la arena, incrementando con el tiempo el porcentaje de mineralización (Pye y Tsoar, 1990: 292). La acumulación de N en el suelo va acompañada de un incremento de la biomasa, de forma que las especies anuales son reemplazadas por herbáceas altas y arbustos (Olf *et al.*, 1993: 704). Por lo tanto, las condiciones biotásicas se incrementan a medida que se estabiliza el sistema, de tal forma que en las zonas de mayor cobertura vegetal y en las depresiones interdunares húmedas se concentran la mayor cantidad de materia orgánica, humedad edáfica y nutrientes (Moreno-Casasola, 1982: 601). El incremento de nutrientes también puede estar asociado, en algunos casos, a la actividad humana, como se ha estudiado en algunos sistemas holandeses, donde especies vegetales características de suelos ricos en nutrientes están sustituyendo a otras calcícolas, debido a la polución del aire y la lluvia ácida (Van der Laan, 1985: 94).

También hay que considerar la salinidad del sustrato arenoso, a lo cual contribuyen el spray marino y las periódicas inundaciones por agua de mar (Sykes y Wilson, 1989; Hesp, 1991: 173; Ley *et al.*, 2007: 80). Según Paniza (2002) el efecto más importante de la presencia de sales en el suelo sobre las plantas es la reducción de su crecimiento y rendimiento, debido a cuatro causas fundamentales: a) El efecto osmótico, que consiste en la disminución del potencial osmótico de la solución del suelo. Esto dificulta la capacidad de las plantas para absorber el agua del suelo, lo que a su vez le supone un gasto extra de energía en la absorción del agua; b) El efecto específico, relativo a la toxicidad iónica específica, debido normalmente al exceso en la absorción de Cl, Na y B. Produce principalmente una disminución en el crecimiento y desarrollo de las plantas; c) El efecto nutricional, que consiste en la interferencia de algunas sales disueltas con nutrientes esenciales. Se produce de dos formas: primero se genera por la fuerza iónica del sustrato, que afecta directamente a la absorción y traslocación de los nutrientes, lo que a su vez se manifiesta en la absorción y acumulación de P en ciertas especies, y en segundo lugar hay que considerar la interferencia del Cl y del Na en la absorción y traslocación de los nutrientes dentro de la planta; d) Efectos fisiológico y bioquímico, por la combinación de los efectos anteriores sobre ciertos procesos de las plantas.

Aunque en las zonas templadas las precipitaciones reducen la concentración de sales en el suelo (Maun y Perumal, 1999: 16), en la estación seca el grado de salinidad edáfica se incrementa de forma significativa (Berger y Heurteaux, 1985: 330). Sykes y Wilson (1989: 175) demostraron que la mayor parte de las especies de las dunas de Nueva Zelanda disminuyen su crecimiento a partir de una concentración de sal en el suelo del 0,5%, y el grueso de las mismas murieron con un grado de salinidad del 1,5-2%. En esta línea, se ha demostrado que concentraciones de sal en el sustrato superiores al 2% son letales para *Ammophila arenaria* (Chapman, 1964: 140). En las regiones áridas la escasez de precipitaciones intensifica el efecto de la salinidad edáfica sobre las plantas, ya que en algunas zonas como en Baja California (México), la abundancia de especies halófilas en la duna costera coincide con una alta salinidad edáfica (Johnson, 1977: 96). Por otro lado, en las zonas templadas húmedas para ciertas especies presentes en la playa alta, como *Cakile maritima* y *Salsola kali*, el incremento de la salinidad edáfica favorece su crecimiento (Rozema *et al.*, 1982: 206). El diferente grado de tolerancia que presentan las especies de plantas a la salinidad del sustrato limita su localización a determinados hábitats dentro de las dunas (Seneca, 1972: 470). Aunque en general la salinidad edáfica ha sido escasamente valorada como factor que condiciona la distribución de la vegetación, ésta tiene una gran importancia en la zonación de los campos de dunas litorales de zonas áridas (Kassas y Zahran, 1967; Migahid *et al.*, 1971; Abdel-Razik *et al.*, 1984; Shaltout *et al.*, 1995; Toft y Elliott-Fisk, 2002; Migahid, 2003).

1.2.2.5. ¿Existe un factor ambiental principal?

La existencia de un único factor principal que determine la distribución de la vegetación probablemente es el resultado de un intento por simplificar una realidad mucho más compleja, donde esta distribución seguramente responde a la combinación de varios de ellos. En esta línea, algunos autores consideran que la acción conjunta del spray marino y del enterramiento por arena (Donnelly y Pammenter, 1982; McLachlan, 1990), o la acumulación de arena, la protección, la pedogénesis y la humedad del suelo (Carter y Wilson, 1990: 146), son los responsables principales de la zonación en la duna costera. Asimismo, en la zona templada el predominio de uno u otro factor varía en función de cada sistema de dunas litoral en particular (Wilson y Sykes, 1999: 236).

Para Maun y Perumal (1999: 16), la hipótesis de la salinidad como factor principal en la zonación de la vegetación no es válida por los siguientes motivos: a) la salinidad edáfica rara vez excede el nivel tóxico del 1,5%; b) varias especies muestran mucha más o mucha menos tolerancia a la salinidad que la esperada, según su posición en el gradiente del spray marino; c) en las zonas templadas, con inviernos fríos, la mayor salinidad ambiental y la inundación de agua de mar ocurre en otoño e invierno, cuando las plantas se encuentran en estado latente y, por lo tanto, los nuevos brotes no son dañados; d) la existencia de precipitaciones abundantes en la región templada produce el lavado de la sal de las plantas y reduce el nivel de salinidad edáfica; y e) la zonación también ocurre en los campos de dunas situados en la orilla de los Grandes Lagos, donde no existe spray marino o inundación por agua de mar.

La importancia de la totalidad de los factores ambientales contemplados depende de las características específicas de cada campo de dunas. Así, en aquellas zonas donde en la actualidad no existe movilidad del sustrato, evidentemente este factor no va a intervenir en la distribución de la vegetación. Por ejemplo, en las dunas costeras relicticas planas, son otros los factores que, como las variaciones edáficas, controlan la existencia de determinadas comunidades vegetales (Hesp, 1991: 178). Esto ocurre, por ejemplo, en Finlandia, donde los principales factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación lo constituyen los procesos de formación de suelo, en función del incremento de la riqueza de nutrientes entre la playa y las zonas interiores, con mayor cobertura vegetal (Hellemaa, 1998: 108).

1.2.3. Mecanismos de adaptación de las plantas en los campos de dunas litorales

Los factores ambientales señalados en el apartado anterior, especialmente la movilidad de la arena y la salinidad ambiental, limitan el tipo de especies vegetales que pueden asentarse en los campos de dunas litorales, tratándose normalmente de taxones especialistas, o con una gran capacidad de adaptación. Por este motivo suelen presentar un escaso número de especies, y estar dominados por unas pocas de ellas (Ley *et al.*, 2007: 78). La vegetación de las dunas ha desarrollado una serie de adaptaciones específicas para poder sobrevivir en estos ambientes, especialmente en la zona de playa

y duna costera (tabla 1.3). La mayor parte de estas adaptaciones están destinadas a resistir el enterramiento por arena y la salinidad ambiental y edáfica.

Factor ambiental	Adaptación	Ejemplos
Enterramiento por arena	Estimulación del crecimiento	<i>Chamaecrista chamaecristoides</i> ; <i>Spinifex sericeus</i> , <i>Traganum moquinii</i> , <i>Ammophila arenaria</i> ,
	Rizomas	<i>Elymus farctus</i> , <i>Spinifex sericeus</i> <i>Ammophila arenaria</i>
	Estolones	<i>Cyperus capitatus</i> , <i>Carex arenaria</i>
	Bulbos	<i>Pancremium maritimum</i>
	Suspensión de la fotosíntesis	<i>Elytrigia juncea</i>
	Raíces adventicias	<i>Picea glauca</i> , <i>Salix cordata</i> , <i>Populus balsamifera</i> , <i>Picea mariana</i>
Incremento de biomasa		<i>Salix cordata</i> , <i>Populus balsamifera</i>
Spray marino	Resistencia, tolerancia y preferencia por la sal	<i>Cakile maritima</i> (resistente) <i>Salsola kali</i> (preferencia)
Inundación por agua de mar	Resistencia a la inundación	<i>Cakile maritima</i> , <i>Spinifex spp.</i> , <i>Salsola kali</i> , <i>Elymus farctus</i> , <i>Traganum moquinii</i> , <i>Zygophyllum fontanesii</i> <i>Cakile spp.</i>
	Flotabilidad de los frutos	
Sequía	Orientación de las hojas	<i>Hydrocotyle bonariensis</i>
	Pilosidad de las hojas	<i>Spinifex spp.</i>
	Pérdida de hojas	<i>Ambrosia chamissonis</i>
	Suculencia	<i>Cakile maritima</i> , <i>Carpobrotus spp.</i>
	Adaptaciones de las raíces	Varias especies
	Eficiencia en el uso del agua	La mayoría de las especies
Alta intensidad de luz, altas temperaturas	Curvamiento de las hojas	<i>Ammophila arenaria</i>
	Colores claros y pubescencia	<i>Otanthus maritimus</i> , <i>Medicago marina</i>
	Adaptaciones osmóticas	Muchas especies
Exposición al viento	Resistencia mecánica	<i>Euphorbia paralias</i>
	Formas aerodinámicas	<i>Euphorbia peplis</i> (rastrera)
Salinidad edáfica	Resistencia a la sal	<i>Salsola kali</i>
	Acumulación de sal	<i>Salsola kali</i>
	Suculencia	<i>Cakile maritima</i> , <i>Carpobrotus ssp.</i> , <i>Traganum moquinii</i> , <i>Zygophyllum fontanesii</i>
	Adaptaciones osmóticas	<i>Cakile ssp.</i> , <i>Ammophila ssp.</i>
Pobreza en nutrientes	Fijación de nitrógeno	Leguminosas
	Relaciones micorrízicas	<i>Ammophila arenaria</i>
	Retraslocación de nutrientes	<i>Carex ssp.</i>
Erosión marina	Ciclo de vida anual	<i>Cakile maritima</i> , <i>Salsola kali</i> , <i>Linaria pedunculata</i>
	Dispersión de semillas por agua	<i>Pancremium maritimum</i>
	Dispersión semillas por el viento	<i>Ammophila arenaria</i>
	Rizomatosas	<i>Ammophila arenaria</i> , <i>Elymus farctus</i>
	Estoloníferas	<i>Cyperus capitatus</i> , <i>Carex arenaria</i>
	Bulbos	<i>Pancremium maritimum</i>

Tabla 1.3. Factores ambientales y adaptaciones de las plantas en la duna costera (playa-duna costera) (Adaptado de: Hesp, 1991: 168; Kent *et al.*, 2005; Dech y Maun, 2006; Ley *et al.*, 2007: 79).

1.2.3.1 Adaptaciones al enterramiento por arena

Según Maun (1998, 2004) las plantas presentan tres tipos de respuestas al enterramiento por arena:

- a) Respuesta inhibitoria negativa, cuando la planta no es capaz de sobrevivir al enterramiento.
- b) Respuesta neutra y posteriormente negativa, cuando la planta muestra una escasa o nula respuesta inicial, debido a que el enterramiento se produce a un nivel tolerable. Sin embargo, cuando el nivel de arena se incrementa, la respuesta se vuelve negativa y la planta muere.
- c) Respuesta de estimulación positiva, cuando las plantas incrementan su desarrollo después de ciertos niveles de enterramiento. A este respecto, las especies varían en su máximo nivel de tolerancia, a partir del cual empiezan a mostrar una respuesta negativa y finalmente mueren.

Para poder sobrevivir al enterramiento las plantas tienen que desarrollar adaptaciones que, en primer lugar, le permitan superar la suspensión de la actividad fotosintética. Posteriormente tienen que emerger de la arena y, finalmente, restaurar la actividad fisiológica lo antes posible (Perumal y Maun, 2006: 99). La tolerancia de las especies al enterramiento no sólo está relacionada con la cantidad de arena, sino que también depende de la velocidad a la que se produce el proceso (Hesp, 1991: 170; Ley *et al.*, 2007: 82). En Europa y América del Norte las especies herbáceas *Ammophila arenaria* y *Ammophila breviligulata*, respectivamente, constituyen dos de las más resistentes a este proceso ambiental. *Ammophila arenaria* es capaz de soportar una tasa de enterramiento de hasta 90 cm en el transcurso de un año (Ranwell, 1958: 96) y *Ammophila breviligulata* más de 100 cm, pero tiene su óptimo hasta unos 60 cm (Maun y Lapiere, 1984: 836). En Australia destacan también dos plantas herbáceas, *Spinifex sericeus* y *Spinifex hirsutus* (Hesp, 1989: 194; Hesp, 1991: 170). En contraste, en la zona tropical de México, los arbustos son más tolerantes al enterramiento que las especies herbáceas (Martínez y Moreno-Casasola, 1996: 417), destacando *Croton punctatus*, *Palafoxia lindenii* y *Chamaecrista chamaecristoides* (Moreno-Casasola, 1986: 73).

La mayor parte de estas especies están dotadas de rizomas y otros órganos vegetativos como los bulbos, los cuales constituyen reservas de nutrientes y agua. El predominio de especies herbáceas dotadas de rizomas en la duna costera puede estar relacionado con la necesidad de una rápida prolongación de los tallos debajo de la zona enterrada (Johnson, 1977: 96), ya que este tipo de propagación es más rápida y exitosa que la reproducción por semillas (Maun, 1984: 573). Además, los fragmentos de rizomas tienen una importante ventaja frente a las semillas, debido a la producción de retoños viables después del enterramiento (Harris y Davy, 1986: 1066). Asimismo, la reproducción vegetativa es importante para el mantenimiento de la población local y la dispersión a nuevas zonas de especies como *Ammophila breviligulata* (Maun, 1984: 573). Por otro lado, el enterramiento, aparte de constituir un limitante para la

vegetación, supone una perturbación necesaria para algunas especies, como *Ammophila arenaria*, *Ammophila breviligulata* y *Uniola paniculata*, que necesitan de la acumulación de arena para mantener su vigor y crecimiento, perdiendo vitalidad con la estabilización de las dunas (Martin, 1959: 25; Willis *et al.*, 1959b: 254; Wagner, 1964: 94; Hope-Simpson y Jefferies, 1966; Laing, 1967). Algunos estudios han confirmado la respuesta positiva al enterramiento de éstas y otras especies (Disraeli, 1984: 152; Hesp, 1989: 194; Sykes y Wilson, 1990a; Sykes y Wilson, 1990b; Hesp, 1991: 170; Zhang y Maun, 1992; Perumal y Maun, 2006), siempre que no se superen sus umbrales de resistencia (Ranwell, 1958; Maun y Lapierre, 1984; Maun, 1998; Maun, 2004).

Entre las adaptaciones para superar el enterramiento de forma positiva destacan las siguientes: el incremento de la biomasa total, del área y del espesor de las hojas, de la biomasa de las raíces, del número de ramas, del número de brotes por rama, de la longitud de los rizomas, del número de nuevas plantas, de la concentración clorofílica total, de la altura de la planta y de la cobertura (Disraeli, 1984: 152; Perumal y Maun, 2006). Las especies leñosas, carentes de sistemas de crecimiento vegetativo, presentan otras adaptaciones, como raíces adventicias, o incremento de la biomasa (Martínez y Moreno-Casasola, 1998: 172; Dech y Maun, 2006: 1104). Otra adaptación es la resistencia a la oscuridad, cuando las plantas son completamente cubiertas por la arena, ya que existen especies que solamente resisten el enterramiento parcial (Sykes y Wilson, 1990b: 801). Por otro lado, las adaptaciones al enterramiento no sólo pueden ser anatómicas, sino que también pueden existir otras fisiológicas. Así, por ejemplo Kent *et al.* (2005) han demostrado que algunas especies vegetales son capaces de suspender la actividad fotosintética como respuesta al enterramiento.

1.2.3.2. Adaptaciones al spray marino

Con respecto al spray marino, las principales adaptaciones de las plantas intentan evitar la acumulación de sales, como sucede con la succulencia (tolerancia), la formación de gruesas cutículas, la pubescencia y la orientación de las hojas (resistencia) (Rozema *et al.*, 1985; Ley *et al.*, 2007: 80). El incremento de la succulencia debido al spray marino ha sido demostrada para *Cakile maritima* y *Salsola kali*, aumentando más con ésta que con la salinidad edáfica (Rozema *et al.*, 1982: 206). Asimismo, las especies que, en su proceso evolutivo, no han estado expuestas al spray marino tienen una menor tolerancia, ya que, por ejemplo, la variedad marina de *Cakile edentula* tiene mayor resistencia a la salinidad ambiental que la variedad que se localiza en orillas de lagos de agua dulce (Boyd y Barbour, 1986: 239).

Las adaptaciones de las plantas a la salinidad edáfica son las siguientes (Hesp, 1991: 173):

- a) Desarrollo de resistencia a la sal, como por ejemplo *Salsola kali*.

- b) Desarrollo de altos requerimientos de sal. Por ejemplo, según Ignaciuk y Lee (1985: 320) el crecimiento de muchas plántulas anuales es estimulado por ciertas concentraciones de cloruro sódico (NaCl).
- c) Desarrollo de estructuras en el tejido externo que permiten la excreción de sal.
- d) Suculencia, como sucede con *Cakile maritima* y *Carpobrotus spp.*
- e) Adaptaciones osmóticas

Las especies más resistentes a la salinidad son normalmente las que colonizan la playa alta, como sucede con *Agropyrum junceiforme*, *Elymus farctus*, *Cakile maritima*, *Salsola kali* y *Honkenya peploides* (Huiskes, 1979: 369). Sin embargo, mientras que existen unas especies tolerantes al mismo tiempo a la salinidad edáfica y ambiental, otras únicamente resisten una de las dos o ninguna (Sykes y Wilson, 1988: 163). De este modo, es posible distinguir entre especies aerohalófilas, que tienen las partes aéreas adaptadas a la salinidad ambiental, y especies halófilas edáficas, que absorben sal mediante las raíces (Rozema *et al.*, 1982). Barbour (1970) definió tres tipos de plantas en función de su tolerancia a las concentraciones de sal en el sustrato: halófitas intolerantes, halófitas facultativas y halófitas obligadas. Las intolerantes son las que crecen mejor con bajas concentraciones; las facultativas tienen un crecimiento óptimo con concentraciones moderadas; y las obligadas necesitan más de un 0,1% de sal como media. En función de esta clasificación, las diferentes especies que se desarrollan en las dunas pueden ser incluidas en varias categorías (Sykes y Wilson, 1989).

1.2.3.3. Otras adaptaciones

Por lo que respecta a la erosión marina las adaptaciones de las plantas se basan en dos mecanismos principales (Maun, 2004: 121): el primero se refiere a la dispersión de propágulos a través del mar. En este caso la dispersión se debe a la flotabilidad de las semillas, o partes de las plantas, y a que no pierden la viabilidad (Maun, 2004: 121). Especies como *Cakile maritima*, *Calystegia soldanella*, *Pancratium maritimum*, *Ammophila arenaria*, *Honkenya peploides* entre otras, poseen semillas, rizomas, estolones o bulbos que tienen esta capacidad de dispersión (Ley *et al.*, 2007: 84); el segundo mecanismo se basa en la producción de rizomas y estolones. La reproducción vegetativa tienen las siguientes ventajas (Maun, 2004: 123):

- a) Necesita un breve periodo de tiempo para el establecimiento, debido a que los fragmentos de las plantas llegan en estado reproductivo, por las grandes reservas de carbohidratos de los mismos.

b) La tasa de establecimiento de las plantas es más alta, en comparación con la que se produce en el caso de la reproducción por semillas.

c) Rapidez en la recolonización de zonas desnudas.

Las adaptaciones de las plantas a la abrasión del viento con arena pueden ser morfológicas, como la adquisición de portes bajos o rastreros, como sucede con *Euphorbia peplis* o *Lotus creticus*; y anatómicas, mediante la formación de cutículas gruesas y esclerófilas, como ocurre con *Ammophila arenaria* y *Polygonum maritimum*, o pubescencia, como *Otanthus maritimus* (Ley et al., 2007: 80; Yura y Ogura, 2006: 207).

Excepto en las depresiones interdunares húmedas (*wet dune slacks*), en los sistemas de dunas litorales el agua es escasa o se encuentra a una profundidad inalcanzable para la mayor parte de las plantas. Por ello, las especies vegetales presentan diferentes adaptaciones a la escasez de agua, entre las que destacan (Hesp, 1991: 172): mecanismos para evitar la pérdida de agua (caída, enrollamiento, orientación y pilosidad de las hojas, secreción de ceras), almacenamiento de agua (suculencia), uso eficiente del agua, adaptaciones de las raíces, forma aerodinámica, incremento de la tolerancia al calor y adaptaciones osmóticas.

Las plantas de las dunas hacen frente a la pobreza de nutrientes mediante las siguientes adaptaciones (Hesp, 1991: 174): grandes desarrollos radiculares laterales, traslado de nutrientes desde las hojas y tallos viejos para el desarrollo de hojas y frutos, fijación de nitrógeno mediante bacterias, fijación de fósforo a través de hongos, mejoras de la actitud competitiva cuando existen grandes aportes de nutrientes, restricción o aumento del uso de varios iones y explotación de la variedad de fuentes de nutrientes existentes.

1.2.3.4. Adaptaciones de las plántulas

Las plántulas son más sensibles que las plantas adultas a los factores ambientales, produciéndose una alta mortalidad en los primeros días o semanas de vida (Maun, 1994: 61), debido principalmente al enterramiento, falta de agua, spray marino y erosión a pequeña escala (Laing, 1958: 216; Van der Valk, 1974a: 1072; Huiskes, 1977: 135). Las adaptaciones de las plántulas a las condiciones ecológicas de las dunas también han sido estudiadas por numerosos autores (Laing, 1958; Seneca, 1969; Seneca y Cooper, 1971; Seneca, 1972; Van der Valk, 1974a; Huiskes, 1977; Harris y Davy, 1986; Maun y Lapierre, 1986; Van der Putten, 1990; Zhang y Maun, 1990; Maun, 1994; Martínez y Moreno-Casasola, 1996; Chen y Maun, 1999).

Algunos estudios concluyen que la germinación de las semillas no está relacionada con la profundidad de enterramiento, excepto para *Ammophila breviligulata*, *Cirsium pitcheri* y para algunas especies típicas de playas, como *Cakile maritima*, *Atriplex laciniata* y *Salsola kali*, que poseen una disminución de la

germinación con el incremento de la profundidad (Lee y Ignaciuk, 1985: 321; Maun y Lapierre, 1986: 452; Chen y Maun, 1999: 55). En cambio, para otras especies la profundidad de enterramiento de las semillas es el principal factor limitante para la emergencia de las plántulas (Van der Valk, 1974a; Harris y Davy, 1986: 1059; Maun y Lapierre, 1986; Zhang y Maun, 1990; Chen y Maun, 1999). De este modo, la tasa de emergencia decrece con la profundidad, estableciéndose diferentes umbrales para las diferentes especies (tabla 1.4). Sin embargo, a la germinación de las semillas de algunas especies, como *Erigeron canadiensis*, *Solidago sempervirens* y *Physalis viscosa*, no les afecta la movilidad de la arena (Van der Valk, 1974a: 1070).

Especie	Profundidad (cm)	Autor
<i>Cakile edentula</i>	2 - 4 (máx. 10)	Maun y Lapierre, 1986
<i>Cirsium pitcheri</i>	2 - 4 (máx. 8)	Chen y Maun, 1999
<i>Corispermum hyssopifolium</i>	2 - 4 (máx. 10)	Maun y Lapierre, 1986
<i>Elymus canadiensis</i>	2 - 4 (máx. 10)	Maun y Lapierre, 1986
<i>Elymus farctus</i>	3,8 - 7,6 (máx. 17,8)	(Harris y Davy, 1986b)
<i>Panicum virgatum</i>	3 - 6 (máx. 11)	Zhang y Maun, 1990

Tabla 1.4. Profundidad a la que se produce un mayor porcentaje de emergencia para diferentes especies de dunas.

La respuesta de las plántulas al enterramiento es similar al de las plantas adultas, pero debido a sus limitadas reservas de nutrientes su tasa de supervivencia es baja (Maun, 1994: 62). El enterramiento total de las plántulas produce la muerte del individuo, pero el parcial, al igual que en las plantas adultas, estimula el crecimiento (Lee y Ignaciuk, 1985: 322; Maun, 1994: 69; Martínez y Moreno-Casasola, 1996: 417). Otras estrategias seguidas por las plántulas son: germinación cuando se dan las condiciones de humedad apropiadas, germinación en zonas donde las condiciones de humedad son mayores, germinación en zonas más protegidas, rápida tasa de crecimiento (1 cm/día), alto potencial por alargamiento mesocótico y capacidad para emerger en un amplio rango de profundidades (Willis *et al.*, 1959b: 255; Huiskes, 1977: 135; Zhang y Maun, 1990: 60; Maun, 1994: 69). Además, otra estrategia está relacionada con el tamaño de las semillas, ya que cuanto mayor sean éstas, su capacidad de germinación a mayores profundidades aumenta (Maun y Lapierre, 1986: 455). Para hacer frente a la acumulación de arena, algunas especies presentan bancos de semillas que pueden perdurar varios años, hasta que se den las condiciones apropiadas de disminución del volumen de sedimentos, que son necesarias para su germinación (Ley *et al.*, 2007: 82-83).

Con respecto a la salinidad ambiental y del sustrato, las semillas y plántulas tienen los siguientes mecanismos de resistencia (Maun, 1994: 65): a) la germinación es inhibida por ciertos niveles de salinidad edáfica, b) las plántulas de algunas especies desarrollan resistencia y son estimuladas por concentraciones inferiores a 200 mM NaCl en la concentración de nutrientes, c) la germinación de las semillas y el establecimiento de las plántulas se produce durante la estación húmeda, cuando la salinidad del suelo es

menor, debido al lavado producido por las altas precipitaciones, d) el espesor de las hojas (suculencia) se incrementa en respuesta al spray marino y e) la reducción de la absorción de iones de Na y Cl por algunas especies, como *Elymus farctus*. El incremento de la salinidad edáfica disminuye el porcentaje de germinación, siendo inhibida a concentraciones superiores al 1% (Seneca, 1969: 51). Las plántulas de algunas especies como *Scirpus nodosus* y *Ammophila arenaria* son más sensibles que los individuos adultos al spray marino, lo que puede limitar su establecimiento en aquellas zonas con un mayor grado de salinidad (Lubke y Avis, 1982: 164; Sykes y Wilson, 1988: 162). La mayoría de las plántulas de especies herbáceas resisten bien un grado de salinidad de hasta un 2%, a partir del cual empiezan a mostrar síntomas de estrés, y con un 4% de concentración de sal mueren (Seneca, 1972: 469).

Por lo que respecta a la escasez de agua, las plántulas de algunas especies, como *Chamaecrista chamaecristoides*, son capaces de resistir hasta 3 meses de sequía en México (Martínez *et al.*, 1994: 57).

1.2.4. Papel de la vegetación en la formación de las dunas

Como ya se indicó en el apartado 1.1.2, la vegetación que consigue adaptarse a las duras condiciones de estos sistemas juega un papel muy significativo en el transporte de sedimentos; así como en la formación de dunas, debido a que la forma de las plantas produce una rugosidad que desacelera el flujo eólico e incrementa la acumulación de arena (Chapman, 1970; Olson, 1958; Ranwell, 1972 citado por Moreno-Casasola, 1986: 68).

La protección ejercida por la vegetación produce una extensa sombra eólica que favorece la acumulación de arena a sotavento de la misma (Willis *et al.*, 1959b: 252). Como se puede observar en la figura 1.16, la velocidad del viento desciende aproximadamente a los 10 m de distancia, justo en la zona donde se concentra la vegetación, volviendo a aumentar a los 25 m, cuando la influencia de la misma no es efectiva. Además, la velocidad del viento decrece a sotavento con la altura de la duna, de forma que una mayor acumulación de arena implica, a su vez, una mayor reducción del flujo eólico.

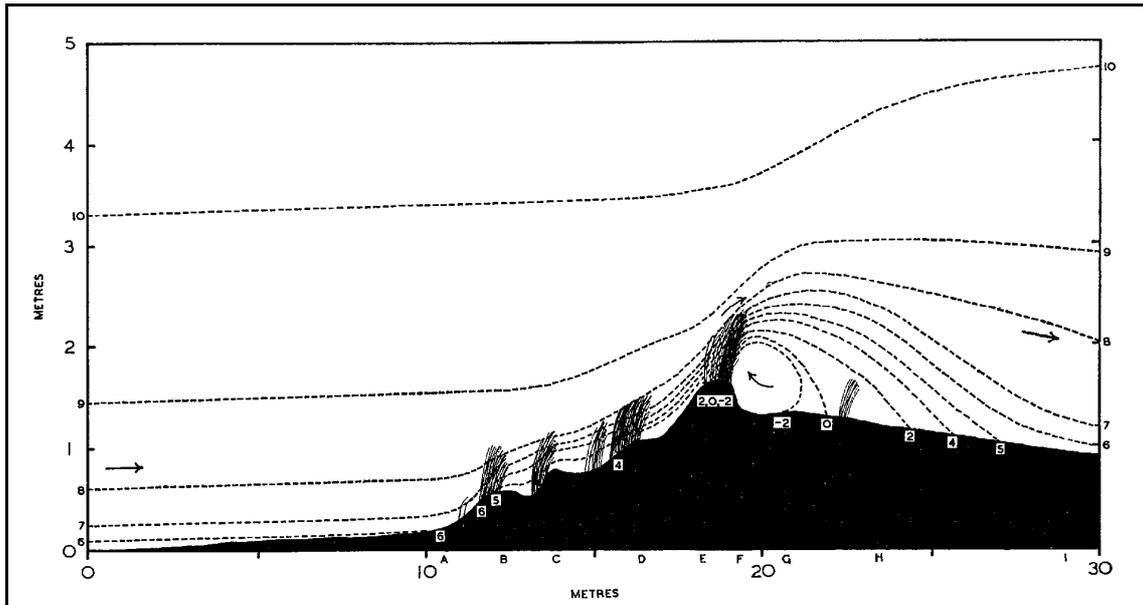


Figura 1.16. Efecto de la vegetación sobre la velocidad del viento (tomado de Willis *et al.*, 1959b: 253).

La modificación del flujo eólico a escala de una especie de planta en particular (figura 1.17), ha sido estudiada por Hesp (1981). A ras de suelo, región I, el flujo eólico es desviado alrededor de la planta, localmente acelerado cerca de la misma formando una estela triangular detrás que se estrecha hacia sotavento, lo que favorece la acumulación de arena. La estructura del flujo es similar en la Región II, a lo que se añade un viento vertical en la parte frontal de la planta. En la Región III su flujo vertical se combina con el de la Región II. Asimismo, el flujo se separa de la planta a una distancia que depende de la velocidad del viento.

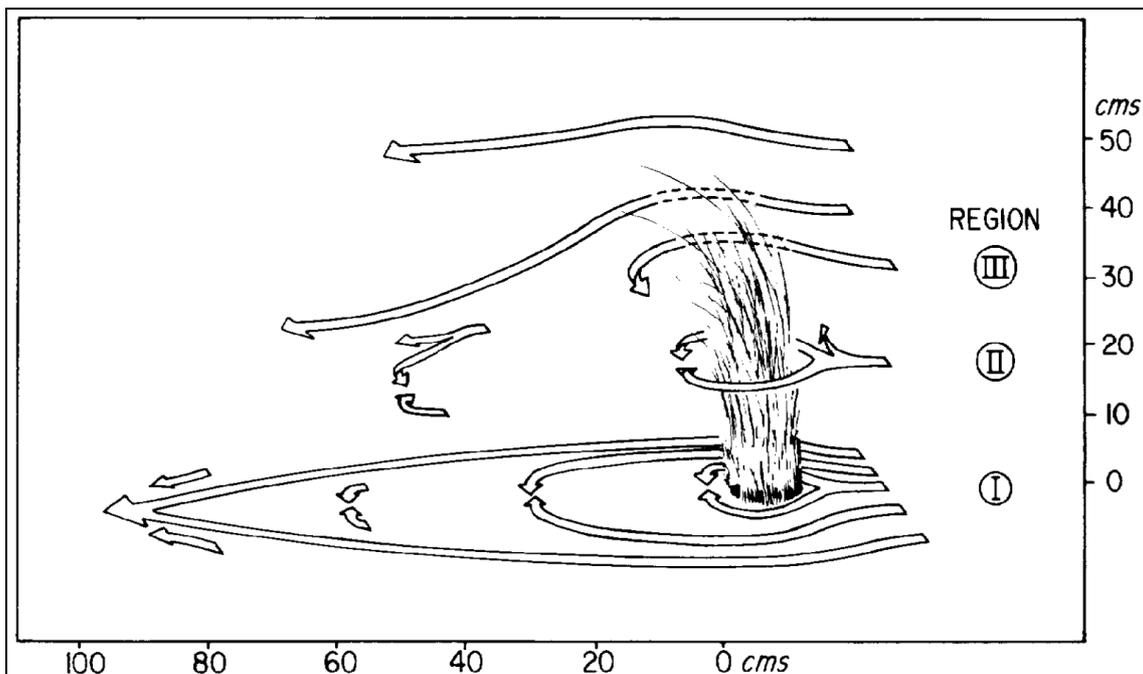


Figura 1.17. Modificación del flujo eólico por *Festuca* o *Ammophila* (tomado de Hesp, 1981: 104).

Según Hesp (1984: 88), la estructura del flujo aerodinámico sobre la vegetación formada por *Spinifex* cambia cerca de la superficie en función de las variaciones de la densidad y distribución de las plantas. De esta forma, la velocidad del flujo en el interior de la vegetación disminuye con el incremento de la densidad de plantas, lo que favorece la acumulación de arena. Sin embargo, y siguiendo a este autor, cuando la densidad de la vegetación es variable lateralmente se produce también variaciones laterales del flujo eólico, que influyen directamente en el transporte y acumulación de arena. Así, cerca de la superficie la velocidad del viento se incrementa rápidamente en áreas donde la densidad de plantas es baja y decrece donde ésta es alta. Por lo tanto, las variaciones en la morfología de la cresta y ladera de sotavento de la duna costera es un resultado primario de la densidad y distribución de las plantas. La altura de éstas puede tener un efecto similar a la densidad en la morfología de la duna costera (Hesp, 1989: 191). Para Alcántara-Carrió (2003: 241) la efectividad de la vegetación en la limitación de la movilidad de la arena y, por lo tanto, en la potenciación de la acumulación en las especies arbustivas, está más relacionada con la altura que con la cobertura de la misma. De este modo, las especies arbustivas cuyos portes sean inferiores a 0,4 m favorecen el transporte de arena, mientras que portes mayores producen una reducción del transporte. Por su parte, las especies herbáceas son más efectivas en la retención de los sedimentos conforme se incrementa la cobertura (Alcántara-Carrió, 2003: 241), produciéndose un decrecimiento exponencial en el flujo de arena con el aumento de esta cobertura (Lancaster y Baas, 1998: 81), hasta el punto de que el transporte se reduce en un 95% con un 28% de cobertura vegetal herbácea (Kuriyama *et al.*, 2005: 1130).

Esta importancia en la acumulación de la arena por parte de la vegetación queda de manifiesto al considerar que *Ammophila arenaria* captura entre el 50 y el 70 por ciento de la arena procedente de la playa (Carter y Wilson, 1990: 145). Estos datos son confirmados en estudios realizados en Chile, donde se ha calculado que la capacidad de retención de sedimentos que realiza *Ammophila arenaria* en aquellas zonas donde tiene una gran densidad es de hasta el 97% (Tavares, 2002). Cualquier obstáculo existente puede retener arena y, por consiguiente, formar una duna. Sin embargo, la morfología de la duna depende de las características del obstáculo en cuestión (Chapman, 1964: 186). La figura 1.18 muestra el efecto de un obstáculo sólido, uno rígido y abierto y otro flexible. Según Chapman (1964: 186-187) un obstáculo sólido (a) refleja el viento, formándose un montículo de arena y una depresión delante del mismo, que adquiere la morfología y dinámica de una pequeña duna eco. Cuando el obstáculo es rígido y abierto (b), por ejemplo una valla, el viento no se refleja, por lo que la acumulación de arena se produce a ambos lados del obstáculo, hasta que es finalmente enterrado, de tal forma que la duna deja de crecer. Las plantas, que son obstáculos flexibles y permeables (c), producen la acumulación de arena en primer lugar en el centro y posteriormente a sotavento.

La formación de las dunas en la playa alta tiene las siguientes fases (Ley *et al.*, 2007: 53):

- a) Se produce la germinación de semillas o se desarrollan fragmentos de plantas (rizomas o estolones), que han sido depositados por las mareas o el viento, y proceden de otras zonas o áreas del campo de dunas.
- b) Los granos de arena, que mayoritariamente se desplazan por saltación, son interceptados por las partes aéreas de las plantas y comienzan a acumularse, formando pequeños montículos que crecen a medida que lo hace la planta sobre la cual se formaron.
- c) Cuando la densidad de la vegetación es alta, los montículos previamente formados se unen y forman una pequeña duna, normalmente de 50-100 cm de altura, denominada duna embrionaria o incipiente.

En definitiva, la duna formada por una planta es un binomio dependiente mutuamente, al menos, temporalmente. Cuando la planta muere la duna desaparece o se transforma en otra tipología.

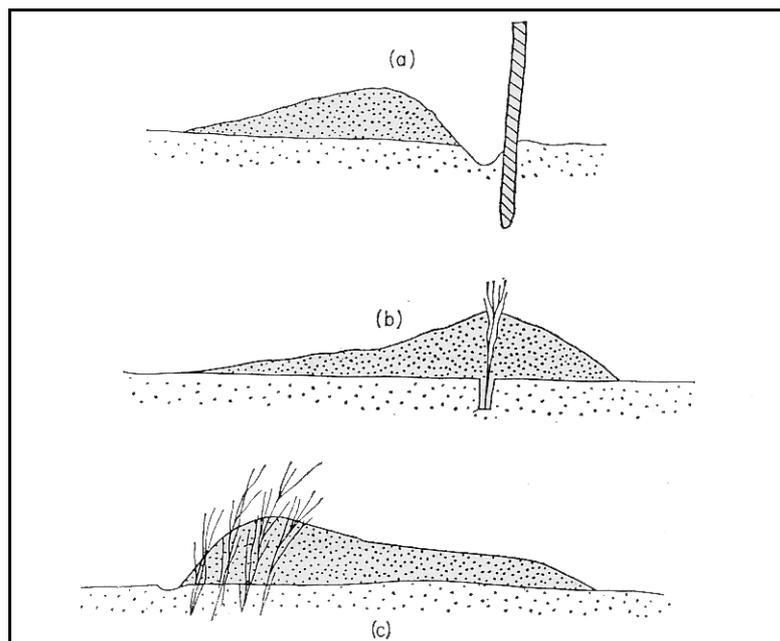


Figura 1.18. Efecto de diferentes obstáculos: a) sólido; b) rígido y abierto; c) flexible (tomado de Chapman, 1964: 186).

En la figura 1.19 se muestra la formación de una duna a partir de una planta con rizomas. Según Chapman (1964: 141), a partir de una plántula germinada, o un fragmento de rizoma, se forma un nuevo rizoma horizontal (figura 1.19A-D). En las primeras etapas los frondes generalmente no están ramificados, y no son suficientemente densos para producir una diferencia en la acumulación de arena. Cuando un fronde es colmatado por la arena, uno o más brotes crecen y producen un fronde vertical, que desarrolla hojas sobre la superficie (1.19F). Si la acumulación de la

arena continúa, se desarrollan más frondes, formándose un conjunto de dunas o un cordón (1.19G).

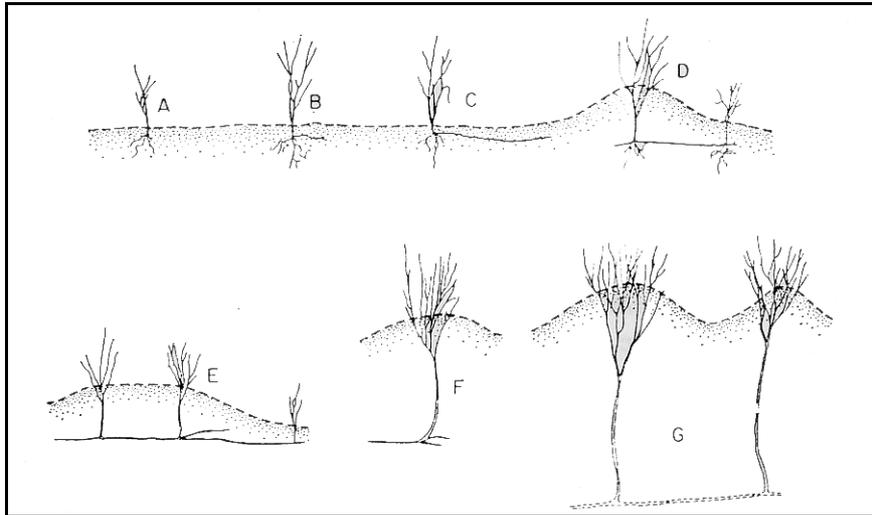


Figura 1.19. Etapas de formación de una duna por el desarrollo vegetativo de una planta con rizomas (tomado de Chapman, 1964: 141).

El desarrollo morfológico de la duna costera depende principalmente de la densidad, distribución, cobertura y altura de la vegetación, así como de la velocidad del viento y de las tasas de transporte de los sedimentos (Hesp, 2004: 34). Las plantas que poseen rizomas, como el ejemplo expuesto en la figura 1.19, permiten, además de incrementar la altura de la duna con su crecimiento, aumentar el área de la misma mediante la generación de nuevos ejemplares por reproducción vegetativa (Cowles, 1899b: 177). Por su parte, las especies de crecimiento no vegetativo no generan nuevos individuos, reteniendo la arena siempre en el mismo sitio (Cowles, 1899b: 184). Por lo tanto, las especies con rizomas tienden a formar cordones de dunas, mientras que las plantas que carecen de este tipo de desarrollo generan dunas aisladas (Cowles, 1899b: 184; Johnson, 1977: 94). De esta forma, un único individuo de una especie con reproducción vegetativa puede generar un cordón dunar, mientras que las especies sin este tipo de reproducción necesitan un mayor número de individuos para generarlo. En definitiva, la reproducción vegetativa es más rápida en la formación de un cordón de dunas, debido a que solamente se necesita un único individuo para aumentar rápidamente la densidad, y las nuevas plántulas que se desarrollan a partir del rizoma tienen mayores posibilidades de supervivencia que las que germinan por semillas. Las especies con rizomas pueden incrementar el área de la duna costera entre 5-15 m en pocos meses (Carter, 1988: 317).

Como ya se comentó en el apartado 1.1.4.2, en Europa los pequeños montículos de arena generados por la existencia de obstáculos se han llamado tradicionalmente dunas embrionarias. Por su parte, Hesp (1984; 1989; 2002) denomina a las primeras dunas formadas como duna costera incipiente, que define como un depósito de arena formado por especies de plantas pioneras. Los montículos aislados formados de esta forma reciben numerosos nombres en la bibliografía anglosajona, como *shadow dunes*,

nebkhas y *hummock dunes* entre otros. Se detecta, por tanto, la existencia de ciertas discrepancias a la hora de determinar con exactitud los términos relativos a las dunas embrionarias y a la duna costera. En la actualidad la comunidad científica tiende a seguir la definición propuesta por Hesp, aunque en algunos trabajos, sobre todo europeos, todavía se sigue utilizando el término de “embrionaria” para las dunas incipientes que se forman en la playa alta. Además, hay que considerar que cualquier duna, incluidas aquellas formadas por obstáculos diferentes a las plantas, pueden ser consideradas en sus etapas iniciales como embrionarias. Por el contrario, la duna costera siempre esta asociada a la vegetación litoral.

Siguiendo a Hesp (1984; 1989) las dunas costeras incipientes se pueden formar de cuatro maneras diferentes, que se agrupan en dos tipos: a) tipo 1, formada por la acumulación de arena dentro y a sotavento de plantas (1a) o de plántulas (1b); b) tipo 2, cuando la acumulación de arena se produce lateralmente dentro de extensas colonias o zonas de plántulas (2a) o rizomas (2b). La morfología de la duna costera incipiente está relacionada con el tipo de especies que la origina, de forma que las especies más altas, como *Ammophila*, tienden a formar dunas más elevadas y puntiagudas que las especies rastreras, como *Spinifex* o *Ipomoea*, que originan morfologías más bajas (Hesp, 2002: 246). Así, las primeras dunas costeras pueden ser de tres tipos morfológicos (Hesp, 2002: 247): rampas, terrazas y cordones. Normalmente, los cordones se forman a partir de especies vegetales altas, como es el caso de *Ammophila arenaria*, mientras que las rampas y terrazas están asociadas a especies rastreras, como *Ipomoea pes-caprae* (Hesp, 2004: 35-37). Por su parte, Arens (1996: 347) relaciona una mayor altura de las dunas costeras vegetadas con la presencia de vegetación en la ladera de barlovento de la misma, debido a que las plantas favorecen la acumulación de los sedimentos en la cresta.

La duna costera incipiente la pueden formar tanto plantas anuales como perennes. Sin embargo, las dunas formadas por especies anuales no son estables, ya que desaparecen con la muerte de la planta, de forma que se requiere de la colonización de especies perennes para garantizar su permanencia (Ley *et al.*, 2007: 76; Hesp, 2002: 246). La formación de nuevas dunas costeras incipientes y consolidadas continuará mientras la costa sea progradante, convirtiéndose las formadas anteriormente en dunas costeras planas relictas (Hesp, 1991: 178).

1.2.5. Zonación de la vegetación de los campos de dunas litorales

La vegetación de los campos de dunas litorales puede presentar dos tipos de disposiciones superpuestas: en zonación y en mosaico (Paz y Bassagoda, 2002). La primera esta relacionada con el gradiente ambiental que se produce entre la costa y el interior, mientras que la disposición en mosaico depende de las características hídricas del sustrato (Paz y Bassagoda, 2002).

Así, en los campos de dunas litorales, especialmente en los progradantes, existe un gradiente de variación de factores ambientales desde la costa hasta el interior (figura

1.20), que se traduce en un incremento del contenido en materia orgánica y de los nutrientes, mientras que desciende el pH del suelo, el porcentaje de CaCO_3 , el spray marino, el movimiento de la arena (Hesp 1991: 175, Martínez, 2009: 54).

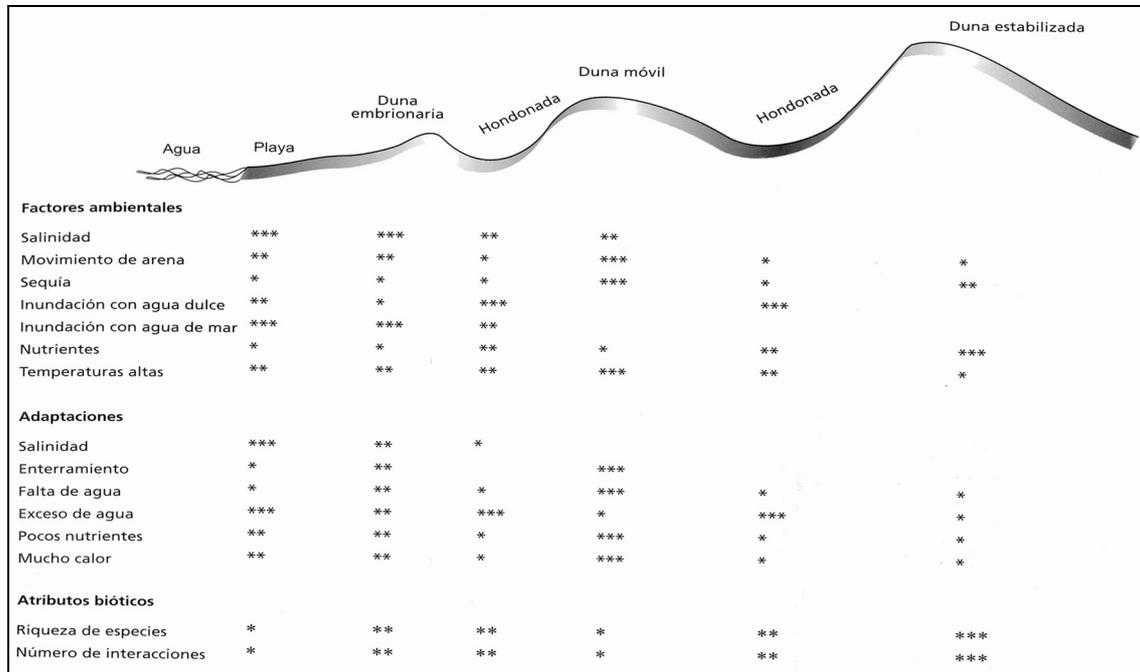


Figura 1.20. Gradientes de variación de los factores ambientales entre la costa y el interior de un campo de dunas progradante (tomado de Martínez, 2009).

Por su parte, Carter (1988: 320) asocia las variaciones de los factores ambientales, además de a un gradiente entre la costa y el interior, a la existencia de diferentes unidades fisiográficas o ambientes (figura 1.21). Estos factores operan a diferentes escalas espaciales y temporales, lo que produce dos resultados: que la vegetación forma un mosaico espacial complejo y que la sucesión vegetal sea con frecuencia rápida (Carter, 1988: 320-321).

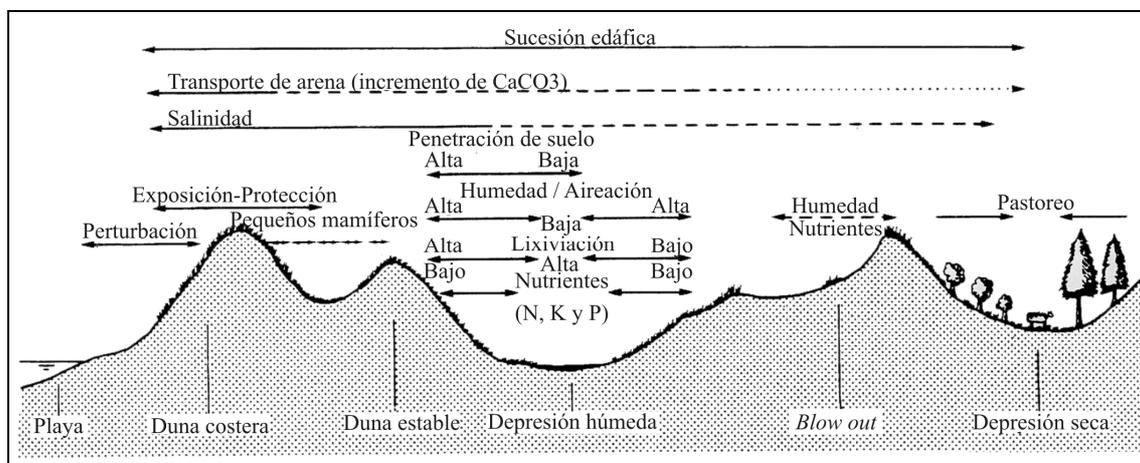


Figura 1.21. Gradientes ecológicos en las dunas costeras según diferentes unidades fisiográficas (modificado de Carter, 1988: 320).

El gradiente existente entre la costa y el interior determina la zonación de las comunidades vegetales. Las diferentes especies se distribuyen en función de sus relaciones con los factores ambientales dominantes en cada sistema de dunas. Esta zonación, a su vez, está vinculada con el proceso de sucesión ecológica, pues la vegetación se estructura en bandas paralelas a la línea de costa que marcan diferentes secuencias evolutivas. La zonación tradicional de las dunas europeas se ha basado en las etapas de sucesión ecológica de la vegetación, diferenciándose tres fases (Chapman, 1964: 139): duna embrionaria (*embryo dune*), duna amarilla (*yellow dune*) y duna gris (*grey dune*), además de las depresiones interdunares húmedas (*dune slack*). Esta clasificación está asociada a sistemas donde se han formado varios cordones de dunas paralelos a la orilla debido a la progradación de la costa. Conforme la playa se va ampliando hacia el mar, los cordones de dunas formados previamente se alejan de la misma.

1.2.5.1. Duna embrionaria (también denominada primaria)

Constituye la primera fase en la formación de la duna, y como ya se ha indicado se corresponde con la duna costera incipiente definida por Hesp (1984; 1989; 2002). Las plantas de esta zona toleran las duras condiciones ambientales existentes, tales como: alta exposición al viento, spray marino, enterramiento de la arena, bajo contenido en humedad, pobreza de nutrientes y altas temperaturas (Hesp, 1991: 180). Asimismo, deben de ser resistentes a la inundación temporal por agua de mar. Debido a las variaciones de las características de la vegetación en función del clima, señaladas en el apartado 1.2.1, las plantas pioneras en la formación de dunas varían en función de la latitud, de forma que existe una tendencia a la sustitución de las especies herbáceas y juncias presentes en las zonas templadas, por especies trepadoras en las tropicales (Hesp, 2004: 35). Normalmente las especies vegetales pioneras están formadas por especies anuales y herbáceas perennes dotadas de rizomas. En la zona templada de Australia son principalmente *Spinifex sericeus*, *Spinifex hirsutus* y *Spinifex longifolius*, pero también puede intervenir *Cakile maritima* y *Cakile edentula* entre otras (Hesp, 1989: 181). En Europa las habituales son especies más tolerantes a la salinidad, como *Agropyrum junceiforme*, *Honkenya peploides*, *Cakile maritima*, *Salsola kali*, *Elymus farctus* y, cuando las posibilidades de inundación por agua de mar disminuyen y la salinidad de la arena es menor, también interviene *Ammophila arenaria* (Chapman, 1964: 139). En América del Norte destacan *Ammophila breviligulata*, *Uniola paniculata*, *Calamovilfa longifolia* y *Leymus mollis* (Oosting y Billings, 1942: 141; Wagner, 1964; Maun, 2004: 123; Wiedemann y Pickart, 2004: 60), mientras que en Sudamérica lo hacen también especies dotadas de rizomas, como *Nolana paradoxa*, *Nolana divaricata* y *Panicum racemosum* y los caméfitos *Ambrosia chamissonis* y *Carpobrotus aequilaterus* (Ramírez *et al.*, 1992: 42; Eskuche, 1992: 26; Panario y Gutiérrez, 2005: 3). En las zonas tropicales de Australia, América y África predominan las especies

trepadoras, como *Ipomoea pes-caprae* (Müller-Hohenstein, 1992: 15; Doing, 1985; Hesp, 2004: 35).

A medida que se van formando más dunas embrionarias llega un momento en el que éstas se unen por coalescencia, dando lugar a una duna costera (Chapman, 1964). Las especies europeas que normalmente predominan en este ámbito son *Agropyrum junceiforme* o *Elymus farctus*, debido a la capacidad de ambas para resistir las inundaciones temporales de agua de mar. En determinadas situaciones *Ammophila arenaria* también puede colonizar estas zonas (Chapman, 1964).

1.2.5.2. Duna amarilla (también denominada blanca o secundaria)

Se localiza detrás de las dunas embrionarias y constituye una duna más alta y antigua. La colonización vegetal es mayor, pero aún pueden existir amplias zonas desnudas donde la arena mantiene la movilidad. Por ello, se suelen instalar únicamente las plantas capaces de resistir el enterramiento, destacando *Ammophila arenaria* por su importante papel colonizador en las costas arenosas europeas. Esta fase se corresponde con la duna costera consolidada establecida por Hesp (1988, 2002). Según Hesp (2002: 248) en algunas zonas las especies que intervienen en la formación de la duna costera incipiente también pueden dominar en la duna costera consolidada.

1.2.5.3. Duna gris (también denominada estabilizada o terciaria)

Se localiza en la zona más alejada de la línea de playa, por lo que nunca se ve afectada por el oleaje. Las dunas están totalmente ocupadas por la vegetación, siendo inexistentes los procesos relacionados con la dinámica sedimentaria eólica. El término “gris” con el que se denomina deriva de la importancia que cobran en estos ámbitos los líquenes del género *Cladonia*.

Las especies vegetales existentes no se corresponden con plantas exclusivas de las dunas, localizándose la mayoría también en otros hábitats. La duna gris puede tener comunidades vegetales diferentes en función de la situación geográfica, el clima regional y los factores fisiográficos, edáficos y bióticos. Así, se pueden distinguir las siguientes formaciones vegetales: a) pradera de duna (*dune grassland*); b) monte bajo (*dune scrub*) y c) duna arbolada (*dune woodland*).

En la pradera de dunas destaca *Festuca rubra* salvo en aquellas áreas donde la arena es de naturaleza ácida, pues entonces se forman praderas donde predominan *Carex arenaria* y *Corynephorus conescens*. Por su parte, en el matorral de dunas predomina principalmente *Hippophae rhamnoides*. En las zonas donde el carbonato cálcico contenido en la arena es reducido o inexistente domina *Empetrum nigrum* y se desarrollan brezales de *Calluna vulgaris*. Finalmente, la duna arbolada se caracteriza por la presencia de bosques, siendo la etapa final en el proceso de sucesión en los campos de dunas litorales europeos. En Gran Bretaña, debido al pastoreo, es muy difícil encontrar arbolado primario. En algunas zonas de Escocia se pueden encontrar bosques

secundarios de *Betula pendula* y en la zona mediterránea bosques de *Quercus suber*. Por su parte, en las áreas tropicales destacan las selvas de higueras (*Ficus*), zapotes (*Manilkara*), tamarindos (*Tamarix*) y cedros (*Cedrella*) (Martínez, 2009: 56).

1.2.5.4. Dune slack (depresión interdunar húmeda)

Normalmente los sistemas de dunas litorales tienen depresiones interdunares húmedas asociadas (*wet dune slacks*), que resultan de gran relevancia en la composición y distribución de la vegetación (Ranwell, 1959; Willis *et al.*, 1959a, b; Chapman, 1964). Los estudios sobre la vegetación de este hábitat se han desarrollado principalmente en las zonas templadas húmedas y tropicales húmedas (tabla 1.5).

Autores	Zona climática de la depresión interdunar
Ranwell, 1959; Willis <i>et al.</i> , 1959a, b; Ranwell, 1960; Crawford y Wishart, 1966; Jones y Etherington, 1971; Onyekwelu, 1972; Londo, 1974; Van der Laan, 1979; Sykes y Wilson, 1987; Avis y Lubke, 1996; McLachlan, 1996; Grootjans <i>et al.</i> , 1991; Zoladeski, 1991; Studer-Ehrensberger <i>et al.</i> , 1993; Roxburgh <i>et al.</i> , 1994; Noest, 1994; Muñoz-Reinoso, 1995; Grootjans <i>et al.</i> , 1997; Westhoff, 1997; Crawford <i>et al.</i> , 1997; Grootjans <i>et al.</i> , 1998; Lammerts <i>et al.</i> , 1999; Elliott <i>et al.</i> , 2000; Lammerts <i>et al.</i> , 2001; Muñoz-Reinoso, 2001; Grootjans <i>et al.</i> , 2002; Adema y Grootjans, 2003; Grootjans <i>et al.</i> , 2004; Sýkora <i>et al.</i> , 2004; Muñoz-Reinoso y De Castro, 2005; Muñoz-Reinoso y García-Novo, 2005; Smith <i>et al.</i> , 2008; Van der Hagen <i>et al.</i> , 2008	Templada húmeda
(Moreno-Casasola <i>et al.</i> , 1982; Vázquez <i>et al.</i> , 1998; Moreno-Casasola y Vázquez, 1999; Vázquez, 2004)	Tropical húmeda

Tabla 1.5. Publicaciones en función de la zona climática donde se ubica la depresión interdunar.

Se pueden diferenciar dos tipos de depresiones interdunares (Grootjans *et al.*, 1998: 96): las primarias, que se originan en las playas y han sido parcial o totalmente desconectadas de la influencia del mar. En ellas, con el tiempo, la salinidad se puede reducir, pero a veces se mantiene por las inundaciones de agua de mar durante los temporales; y las secundarias, que son el resultado de los procesos de deflación. Las depresiones interdunares se abastecen de agua de las precipitaciones, de las superficies de agua y del acuífero, siendo normalmente las de la primera fuente ácidas y las otras dos calcáreas (Grootjans *et al.*, 2004: 86). El régimen hidrológico de las depresiones interdunares es vital para el correcto funcionamiento de este hábitat (Grootjans *et al.*, 2004: 95).

Las tasas de desplazamiento de las dunas y la consecuente acreción de arena constituyen algunos de los principales factores que controlan el tipo de vegetación existente en este tipo de hábitats (Ranwell, 1959: 591; Willis *et al.*, 1959b: 273; McLachlan, 1996: 275; Elliot *et al.*, 2000). De esta forma, en el Reino Unido, *Salix repens* se desarrolla mejor en aquellas depresiones interdunares húmedas asociadas a dunas móviles si el enterramiento no supera los 40 cm/año (Ranwell, 1960: 131). Por su parte, McLachlan (1996: 275) concluye que la movilidad de la arena controla la

evolución de las depresiones interdunares, determinado la existencia de periodos de cinco años de sucesión vegetal y limitando el espectro de especies a aquellas más resistentes. En este sentido, el avance de las dunas sobre las depresiones interdunares genera una gradación de la vegetación, donde las especies más tolerantes al enterramiento se localizan en las zonas más cercanas al frente de las dunas y las menos en las más alejadas (Elliott *et al.*, 2000: 86).

Otros factores que afectan a la distribución de las comunidades vegetales, asociados principalmente a depresiones de regiones templadas y tropicales, son la profundidad de la capa de agua, el tiempo que las depresiones permanecen inundadas, la disponibilidad de nutrientes, las características del suelo, las características del agua y las perturbaciones asociadas a las actividades humanas (Ranwell, 1959; Willis *et al.*, 1959b; Crawford y Wishart, 1966; Jones y Etherington, 1971; Onyekwelu, 1972; Van der Laan, 1979; Moreno-Casasola *et al.*, 1982; Sykes y Wilson, 1987; Grootjans *et al.*, 1991; Zoladeski, 1991; Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993; Muñoz-Reinoso, 1995; Grootjans *et al.*, 1998; Moreno-Casasola y Vázquez, 1999; Lammers *et al.*, 2001; Muñoz-Reinoso, 2001; Grootjans *et al.*, 2002; Grootjans *et al.*, 2004; Sýkora *et al.*, 2004; Muñoz-Reinoso y De Castro, 2005). Además, Willis *et al.* (1959b: 273-274) sugieren que la protección y estabilidad que ejerce la vegetación, las partículas finas de la arena transportadas por el aire y la salinidad ambiental son también factores que influyen en la existencia de diferentes comunidades vegetales asociadas a las depresiones interdunares entre la costa y el interior. A este respecto, existe una gradación de las comunidades vegetales de las depresiones interdunares en función de la distancia al mar, asociada a la progradación de la costa (Crawford y Wishart, 1966: 737). Siguiendo a estos autores, las comunidades más cercanas a la orilla, donde se registran las mayores concentraciones en el suelo de sales de Na y de K, y el pH suele ser más básico, están formadas por especies halófilas. Asimismo, las aguas subterráneas de las depresiones más cercanas a la costa presentan una mayor concentración de ácido clorhídrico.

En función de la profundidad del nivel freático en verano, se pueden diferenciar entre comunidades de depresiones secas (*dry slacks*) y comunidades de depresiones húmedas (*wet slacks*), dependiendo de que la capa de agua se encuentre a una profundidad de entre 1 y 2 m o a menos de 1 m, respectivamente (Ranwell, 1959: 581). Además, dentro de las depresiones húmedas se puede distinguir otras llamadas semiacuáticas (*semi-aquatic habitat*), que se inundan en invierno, mientras que prácticamente durante todo el verano la zona de las raíces de las plantas permanece empapada (Ranwell, 1959: 581).

La profundidad de la capa freática de las depresiones interdunares húmedas es muy variable y depende de las precipitaciones. Por ello presenta un alto nivel en invierno, una caída en primavera y una recuperación del nivel en otoño (Ranwell, 1959: 577; Willis *et al.*, 1959b: 270). Un proceso asociado a estas fluctuaciones de la capa freática son las inundaciones estacionales que, en Europa, ocurren en invierno y primavera (Grootjans *et al.*, 2004: 86). Por su parte en verano la capa freática se

encuentra entre 50-100 cm de profundidad, y algunos años incluso a más de un metro (Ranwell, 1959: 577; Grootjans *et al.*, 2002: 182; Van der Hagen *et al.*, 2008: 2). Por el contrario, en las zonas tropicales las inundaciones se producen en verano (Moreno-Casasola y Vázquez, 1999: 515). Sin embargo, en este último caso la frecuencia de las inundaciones es muy variable y depende de las condiciones climáticas y los excepcionales periodos lluviosos (Moreno-Casasola y Vázquez, 1999: 520).

La profundidad de la capa de agua y la inundación son, en conjunto, el segundo parámetro más importante a considerar en distribución de la vegetación de las depresiones interdunares húmedas, después de la movilidad de las dunas, pues produce cambios en la composición de la vegetación y en la abundancia de cada especie (Willis *et al.*, 1959b: 271; Ranwell, 1960: 133; Jones y Etherington, 1971: 800; Van der Laan, 1979: 47; Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 165; Muñoz-Reinoso y De Castro, 2005: 673). Por ello, sus variaciones interanuales tienen una gran importancia en el desarrollo de la vegetación, ya que durante los periodos de sequía se puede producir una mortalidad masiva de algunas especies en las depresiones interdunares, especialmente de plántulas, como es el caso de *Pinus pinea* (Muñoz-Reinoso y De Castro, 2005: 676). Por lo que respecta a los periodos de inundación, y debido a la escasez de oxígeno que en ellas se produce, la supervivencia de las plantas depende de la capacidad para distribuirlo desde las partes aéreas a las raíces (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 165). Sin embargo, si las partes aéreas también se encuentran sumergidas, entonces el oxígeno no se puede redistribuir, siendo las especies que están dotadas de rizomas las que pueden sobrevivir a la privación prolongada del mismo (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 165). Por lo tanto, en las áreas templadas la distribución de las plantas está relacionada con la competencia interespecífica, en función de la tolerancia de las especies a la inundación invernal (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 167).

Asimismo, las inundaciones periódicas aportan nutrientes a las depresiones interdunares (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 162), lo que las convierten en zonas de mayor productividad que las dunas. Los nutrientes minerales, junto a las condiciones anaeróbicas, controlan el desarrollo de la vegetación, ya que los cambios en ésta son debidos a variaciones en la disponibilidad de nutrientes (Grootjans *et al.*, 1998: 97). La sucesión vegetal en las depresiones interdunares húmedas está regida por cambios en la disponibilidad de nutrientes y por los factores de estrés (Grootjans *et al.*, 1998: 97; Grootjans *et al.*, 2002: 185). La estrecha relación entre el pH del suelo y las comunidades vegetales (existen especies basófilas ligadas a un pH alto), además de una baja acumulación de materia orgánica y bajos niveles de N y P (Lammerts *et al.*, 1999: 120; Lammerts *et al.*, 2001: 41), tiene como consecuencia que los procesos de acidificación relacionados con periodos húmedos provoquen la sustitución de unas comunidades vegetales por otras, como un proceso natural de sucesión ecológica relacionada con el tiempo de desarrollo de la vegetación (Grootjans *et al.*, 1991: 552-553; Sýkora *et al.*, 2004: 214). De esta forma, existe una fuerte relación entre la edad, acumulación de materia orgánica, acidificación y enriquecimiento del suelo (Sýkora *et al.*, 2004: 214). La escasez de vegetación en algunas depresiones interdunares se asocia

a importantes deficiencias en la disponibilidad de N y P (Onyekwelu, 1972: 898; Lammerts *et al.*, 1999: 119), siendo el primer nutriente un limitante en el desarrollo del ecosistema de las depresiones húmedas calcáreas (Adema y Grootjans, 2003: 147). Finalmente, otro aspecto, poco estudiado, son las características químicas de las aguas subterráneas, donde la salinidad y mineralización de las mismas tienen una gran importancia en la distribución de la vegetación (Muñoz-Reinoso, 1995: 13).

Por su parte, los cambios hidrológicos debidos a las actividades humanas han producido alteraciones en la vegetación asociada a las depresiones interdunares húmedas (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993; Grootjans *et al.*, 1997; Grootjans *et al.*, 1998; Grootjans *et al.*, 2002; Muñoz-Reinoso, 2001). En Holanda la disminución de las depresiones interdunares húmedas está relacionada con las alteraciones antrópicas del régimen hidrológico. Esto se debe a la reducción de los niveles hídricos en los *polder* adyacentes debido a las extracciones de agua con destino a la agricultura. Asimismo, la disminución del pastoreo y del número de conejos ha favorecido el desarrollo de bosques. Esto junto a las plantaciones forestales realizadas y a la estabilización de dunas con *Ammophila arenaria* ha producido el incremento de la evapotranspiración y la consiguiente disminución del nivel freático (Grootjans *et al.*, 1998: 98; Grootjans *et al.*, 2002: 186). Estas alteraciones del sistema hidrológico local han ocasionado que los procesos de acidificación se hayan intensificado, lo cual ha provocado la desaparición de especies calcícolas raras (Grootjans *et al.*, 1997). En otros casos, el incremento de la duración de los procesos de inundación y el aporte de nutrientes ha producido la sustitución de unas comunidades vegetales por otras (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 165). Asimismo, la sustitución de comunidades higrófilas por otras xerófilas, en el Parque Nacional de Doñana, está relacionada con el descenso de la disponibilidad hídrica, debido a la extracción de agua subterránea para abastecer las urbanizaciones turísticas (Muñoz-Reinoso, 2001: 205). Por otro lado, el drenaje de las depresiones interdunares húmedas y las marismas ha causado la pérdida de las poblaciones de *Panicum racemosum* en las dunas costeras del sureste de Brasil, con la consiguiente formación de láminas de arena que han invadido todos los hábitats de las dunas (Seeliger, 2003: 53). Todas estas alteraciones ha conllevado la realización de planes de restauración de las depresiones interdunares húmedas (Van der Hegen *et al.*, 2008), con el fin de paliar los efectos negativos de las actividades humanas.

La combinación de estos factores, pero especialmente la tolerancia a la inundación (Studer-Ehrensberger *et al.*, 1993: 165; Moreno-Casasola y Vázquez 1999: 521-522), determinan la existencia de una zonación en las depresiones interdunares. Moreno-Casasola y Vázquez (1999: 521-522) diferencian 4 grupos de especies en función de su tolerancia a la inundación. El grupo 1 está formado por especies herbáceas dotadas de estolones, que son capaces de resistir largos periodos de inundación; el grupo 2 son hierbas que normalmente se localizan en zonas secas, pero pueden resistir alguna inundación; el grupo 3 está compuesto por matorrales y árboles que están adaptados a zonas secas; y el grupo 4 está formado por especies indiferentes. Normalmente, las especies más tolerantes a la inundación se localizan en la zona

central, desarrollándose las comunidades menos resistentes en los bordes. Asimismo, la vegetación de las diferentes depresiones interdunares que componen un sistema de dunas responde a secuencias evolutivas, similares y vinculadas a la de las propias dunas, relacionadas con la edad (Avis y Lubke, 1996: 251; Lubke, 2004: 74-75; Smith *et al.*, 2008), ya que en muchas ocasiones la formación de depresiones interdunares es paralela a la formación de los cordones de dunas.

1.2.5.5. Otras zonaciones establecidas para la duna costera

Por su parte, Doing (1985), con la intención de realizar una zonificación universal, propuso una tipología del complejo de la duna costera, distinguiendo seis zonas en función de las comunidades vegetales existentes: 1) comunidades efímeras de línea de marea, 2) comunidades perennes de línea de marea, 3) dunas embrionarias o cordón frontal, 4) cordón central de la duna costera, 5) zona protegida y 6) comunidades pioneras en zona estabilizada (figura 1.22).

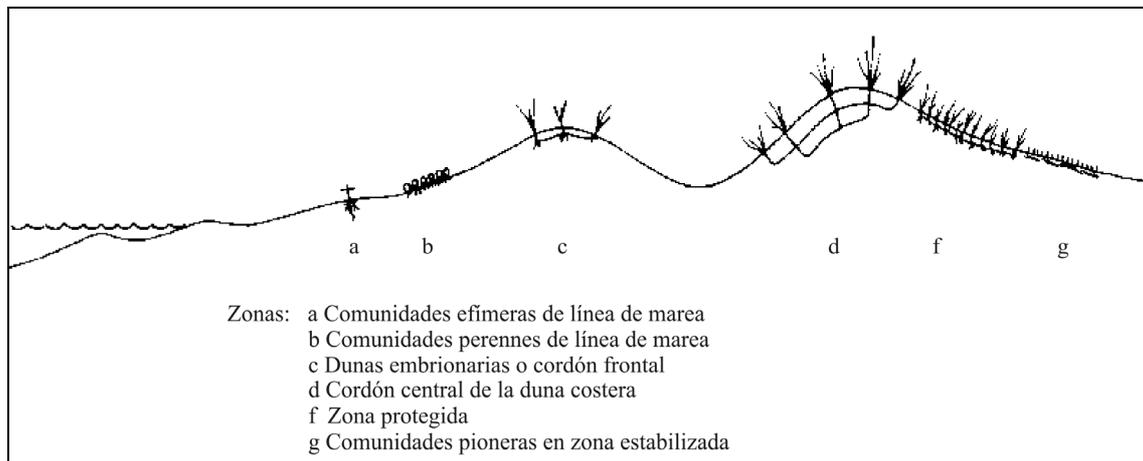


Figura 1.22. Propuesta de zonación del complejo de la duna costera (modificado de Doing, 1985: 66).

Las diferentes especies existentes en la duna costera pueden agruparse en tres tipos funcionales (García-mora *et al.*, 1999; tabla 1.6), cuya descripción se basa en la presencia o ausencia de adaptaciones específicas a los factores ambientales existentes en cada zona de la duna costera: las especies del tipo I se localizan en las zonas más estables y se caracterizan por ser especies anuales; las del tipo II se presentan en la parte de la duna costera afectada por la erosión, tratándose de especies perennes o bianuales que poseen una biomasa subterránea mayor; finalmente, el tipo III se desarrolla en lugares donde predomina la acumulación de sedimentos, estando dotadas de adaptaciones para resistir acumulaciones de arena, órganos de reproducción vegetativa como rizomas y estolones, biomasa aérea de más de 15 cm y capacidad de dispersión marina.

Tipo I	Tipo II	Tipo III
<ul style="list-style-type: none"> • Anual • Hojas méxicas • Biomasa subterránea axonomorfa de poco grosor o barbadilla • Altura biomasa aérea ≤ 15 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bianual o perenne • Hojas duras / suculentas / pubescentes • Biomasa subterránea gruesa y ramificada 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al enterramiento • Órganos de reserva subterráneos • Altura biomasa aérea >15 cm. • Dispersión marina
<i>Aetheoriza bulbosa</i> <i>Cynodon dactylon</i> <i>Rumex tingitanus</i> <i>Cutandia maritima</i> <i>Pseudorlaya pumilla</i> <i>Senecio vulgaris</i> <i>Anacyclus radiatus</i> <i>Bromus rigidus</i> <i>Bromus diandrus</i> <i>Carduus meonanthus</i> <i>Emex spinosa</i> <i>Erodium cicutarium</i> <i>Hedypnois cretica</i> <i>Hypochoeris glabra</i> <i>Lagurus ovatus</i> <i>Medicago littoralis</i> <i>Medicago minima</i> <i>Sonchus oleraceus</i> <i>Sonchus tenerrimus</i> <i>Scolymus maculatus</i> <i>Paranychia argentea</i> <i>Plantago coronopus</i> <i>Vulpia alopecurus</i>	<i>Artemisia crithmifolia</i> <i>Armeria pungens</i> <i>Crucianella maritima</i> <i>Helichrysum picardii</i> <i>Malcolmia littorea</i> <i>Linaria lamarckii</i> <i>Thymus carnosus</i> <i>Lotus creticus</i> <i>Pycnocomon rutifolium</i> <i>Reichardia gaditana</i> <i>Silene ramosissima</i> <i>Linaria pedunculata</i> <i>Ononis variegata</i>	<i>Cyperus capitatus</i> <i>Sporobolus pungens</i> <i>Calystegia soldanella</i> <i>Ammophila arenaria</i> <i>Elymus farctus</i> <i>Medicago marina</i> <i>Othantus maritimus</i> <i>Pancratium maritimum</i> <i>Eryngium maritimum</i> <i>Euphorbia paralias</i> <i>Polygonum maritimum</i> <i>Cakile maritima</i> <i>Salsola kali</i> <i>Euphorbia peplis</i>

Tabla 1.6. Principales características y especies de los tipos funcionales de plantas de las dunas costeras del Golfo de Cádiz (tomado de García-Mora *et al.*, 1999: 30; Ley *et al.*, 2007: 85).

La zonación expuesta refleja un incremento de la complejidad de las comunidades vegetales conforme aumenta la edad de las dunas (Lubke, 2004: 73). De esta forma, se establece una clara relación entre la distancia al mar y el estado sucesional de la vegetación, que progresa desde especies pioneras de plantas herbáceas en la playa, hasta matorrales o árboles en las áreas interiores, y que se refleja en el incremento de la riqueza de especies, cobertura, talla y biomasa (Lubke, 2004: 70), en función del grado de estabilización de la arena. En definitiva, cada cordón de dunas constituye una etapa en la secuencia de desarrollo o, en palabras de Ranwell (1960: 140): “*la sucesión espacial coincide de forma aproximada con la sucesión temporal*”.

1.2.5.6. Zonación en los sistemas de dunas transgresivos

Sin embargo, no siempre se presentan las secuencias expuestas anteriormente, debido a dos causas principales: en primer lugar, cuando la disposición de las dunas es

perpendicular a la línea de costa, dado que los cordones dunares no actúan como elementos reguladores, por lo que la influencia del mar y el viento penetran hacia el interior, produciendo una disposición irregular de los hábitats no acordes con la distancia al mar (Fraga y Roig-Munar, 2007: 143); y en segundo lugar, las dunas en ocasiones mantienen su carácter móvil en las zonas interiores (dunas transgresivas), de forma que los diferentes tipos de vegetación existentes no se corresponden con una secuencia de desarrollo del sistema (Willis *et al.*, 1959b: 280-281; Ranwell, 1960: 130; Avis y Lubke, 1996: 250; Lubke, 2004: 73). En este caso, la costa no es progradante de forma uniforme y con frecuencia es erosionada (Lubke, 2004: 73). Así, en algunos campos de dunas litorales no se observa un incremento regular de las especies perennes en las comunidades de *Ammophila arenaria* conforme se estabiliza la arena, estando controlada la composición florística por la redistribución y acumulación sedimentaria (Willis *et al.*, 1959b: 281). Por lo tanto, la zonación clásica establecida para las dunas europeas y otras partes del mundo, referida a sistemas de dunas progradantes, basado en la existencia de bandas de vegetación paralelas a la orilla, definidas por diferentes etapas de desarrollo (Hepburn, 1945; Gooding, 1947; Olson, 1958; Martin, 1959; Ayyad, 1973; Doing, 1981; Doing, 1985; Van der Maarel *et al.*, 1985a; Moreno-Casasola y Espejel, 1986; Espejel, 1987; Castillo *et al.*, 1991; Sykes y Wilson, 1991; Bejarano, 1997; Hellemaa, 1998; Lubke y Hertling, 2001; Lubke, 2004; Pegman y Rapson, 2005, entre otros), no parece ser válida para aquellos sistemas que presentan extensas dunas móviles hacia el interior. Además, la movilidad de estos sistemas de dunas les dota de una mayor capacidad de resistencia y recuperación ante las alteraciones producidas por las actividades humanas, frente a los bien vegetados (Rust e Illenberger, 1996: 168). Por todo ello, Lubke (2004) diferencia, en lo que respecta a la zonación y sucesión de los campos de dunas litorales, entre sistemas progradantes y sistemas transgresivos (figura 1.23).

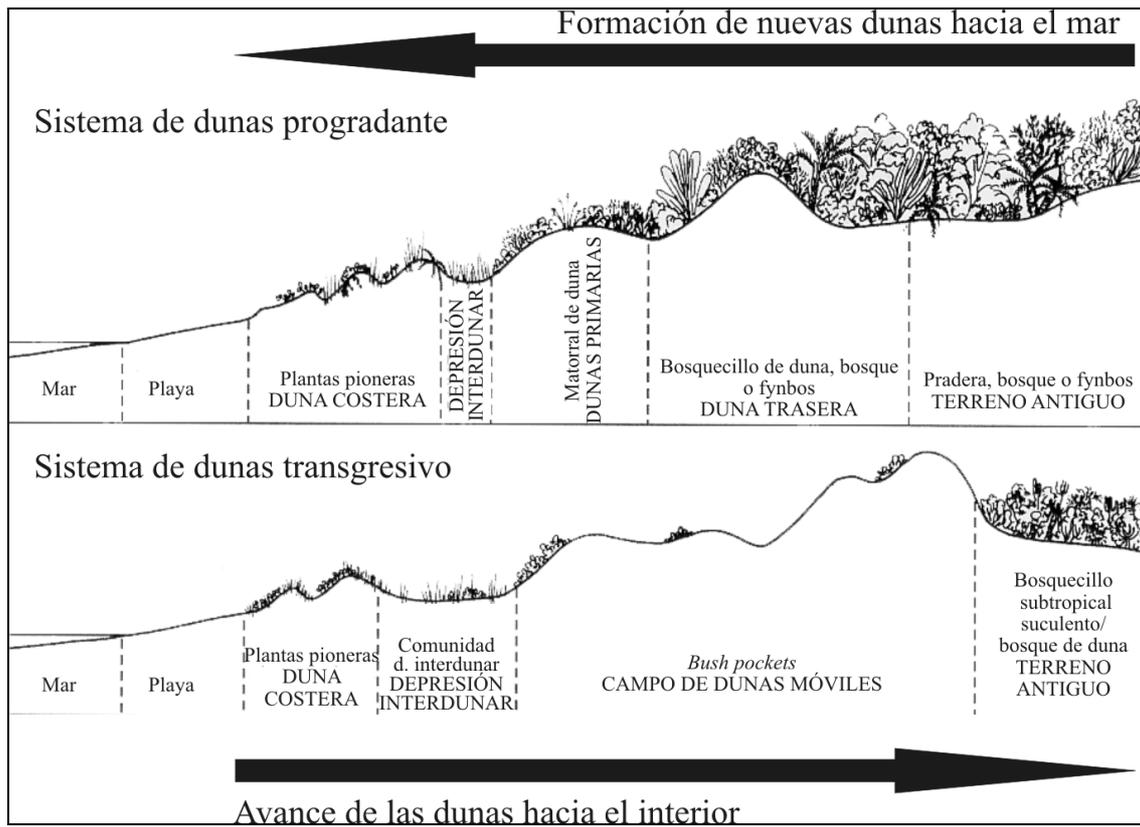


Figura 1.23. Zonación en sistemas de dunas progradante y transgresivo (modificado de Lubke, 2004: 69).

Las dunas transgresivas se pueden originar de diferentes formas (Hesp, 2007: 14): a) en zonas tropicales, templadas y áridas con playas de moderada a alta energía, fuertes vientos y alto suministro de sedimentos; b) por retroceso del nivel del mar; c) por erosión de depósitos arenosos costeros (barras y orilla); d) por desestabilización de dunas costeras; e) por pulsos en el suministro de sedimentos; f) por cambio climático; g) por acción del fuego, animales o actividades humanas y h) por tsunamis.

En los campos de dunas transgresivos, donde la vegetación está limitada por el avance de las dunas, que es el principal factor de estrés en todo el sistema (Hesp, 1991: 180), las plantas pueden establecerse en las depresiones interdunares, debido a la existencia de una capa freática y a la protección que proporciona la duna costera, que actúa interceptando el spray marino y reduciendo la movilidad de las dunas (Avis y Lubke, 1996: 251; Lubke, 2004: 74).

Avis y Lubke (1996: 250) sugieren que en las depresiones interdunares se inicia el proceso de sucesión ecológica, de forma que en los periodos secos el incremento de la movilidad de la arena produce el retroceso de las comunidades a etapas pioneras, mientras que en los periodos húmedos son colonizadas por especies propias de bosques, generando comunidades arbustivas. En los campos de dunas litorales más secos, el papel de las depresiones interdunares en la dinámica y sucesión de las comunidades vegetales es más importante que en los más húmedos (Avis y Lubke, 1996: 251) debido a la escasez de las precipitaciones. Por este motivo, las depresiones interdunares actúan como centros de diversidad, ya que un gran número de especies pueden desarrollarse en ellas por la existencia de unas mejores condiciones (Avis y Lubke, 1996: 251; Lubke,

2004: 74). A partir de estas depresiones la vegetación puede colonizar las dunas móviles cuando se producen unas condiciones de precipitaciones suficientes (Lubke, 2004: 75). La importancia de las depresiones interdunares en la colonización de los campos de dunas transgresivos se puede ejemplificar con la formación de *bushpockets* en Sudáfrica, fragmentos de vegetación aislados, esparcidos por las dunas y rodeados de arena desnuda, que se originan de forma primaria en una depresión interdunar, como resultado del avance de las dunas (Kerley *et al.*, 1996; figura 1.19). Estos fragmentos de vegetación mantienen una alta biodiversidad de plantas y animales en relación con otros hábitats de estos sistemas (Kerley *et al.*, 1996; figura 1.19). En definitiva, los *bushpockets* son etapas maduras de la vegetación de las depresiones interdunares, cuya diversidad florística y complejidad estructural se incrementa con la cercanía al frente de avance de la duna (Avis y Lubke, 1996: 250; Kerley *et al.*, 1996: 257). Un ejemplo similar ocurre en el Reino Unido, donde las dunas con *Salix repens* tienen su origen en la colonización de esta especie sobre una depresión interdunar húmeda, que posteriormente es invadida por las dunas móviles (Ranwell, 1960: 129; figura 1.24). En este sentido, las depresiones interdunares húmedas pueden evolucionar a secas por la acreción de arena y, si el enterramiento continúa, se produce la sustitución de la comunidad de *Agrostis stolonifera* por la de *Salix repens*. Finalmente, si el volumen de arena supera la tolerancia de esta última especie, también ella será sustituida por *Ammophila arenaria* (Ranwell, 1960: 129-130). Ranwell (1960: 137) concluye que la sucesión vegetal de las dunas móviles se basa en un ciclo de erosión y acumulación, en el que existe una relación entre las comunidades de las dunas y las depresiones, de tal forma que la colonización se inicia en la segunda y, conforme avanzan las dunas, se produce un cambio hacia comunidades psamófilas.

Por otro lado, según Hesp (2007), la colonización vegetal de los campos de dunas transgresivos depende de las características climáticas. Así, en las zonas áridas las plantas únicamente colonizan las superficies de deflación, mientras que en las semiáridas, además de las superficies de deflación, colonizan también áreas interdunares y cordones de precipitación. En las zonas templadas, además de las zonas anteriores, también colonizan las depresiones interdunares, mientras que en las regiones subtropicales y tropicales la vegetación se puede desarrollar adicionalmente en los flancos de las dunas, en los cordones de dunas transversales y en las laderas y crestas de las dunas.

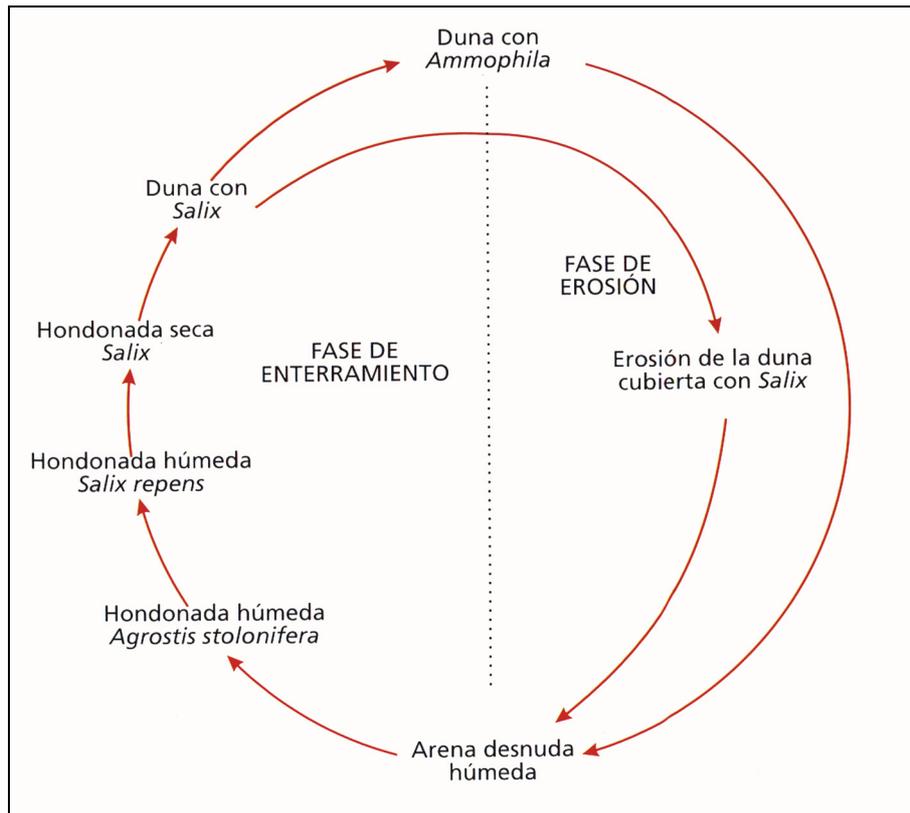


Figura 1.24. Fases de erosión y enterramiento por arena y consecuencias en la topografía y la vegetación según Ranwell (1960) (tomado de Martínez, 2009).

En la zona tropical de México, las especies primocolonizadoras de las zonas con mayor movilidad de los sistemas transgresivos, como las crestas y laderas de las dunas, son las especies más tolerantes al enterramiento, como *Chamaecrista chamaecristoides*, *Croton punctatus* y *Palafoxia lindenii* (Martínez *et al.*, 2001: 368-369; Hesp y Martínez, 2008). La colonización, encabezada por las especies anteriormente mencionadas, que responden de forma positiva al enterramiento, normalmente comienza en, o cerca, de la base del flanco de la ladera, de forma que la vegetación bloquea el movimiento del flanco exterior de la duna. Esto permite la colonización posterior de especies tolerantes al enterramiento, pero no estimuladas por éste. Finalmente, tras la progresiva estabilización aparecen especies no adaptadas al enterramiento (Hesp y Martínez, 2008). La zona sin vegetación es erosionada cuando la duna continúa avanzando, dando origen a un cordón asimétrico denominado *transverse dune trailing ridges*, donde la diversidad de especies y la cobertura vegetal se incrementa con la edad de la duna o con la distancia, de forma contraria al viento (Hesp y Martínez, 2008). Por otra parte, en la zona templada europea prevalece *Ammophila arenaria* formando masas puras, denominadas *pure Ammophiletum arenariae* (Ranwell, 1958; Ranwell, 1960; Willis *et al.*, 1959a y b).

1.2.6. La dinámica de la vegetación en los campos de dunas litorales

Los cambios en la vegetación de los campos de dunas litorales se producen de forma muy rápida. Seguramente esta gran dinámica es la responsable de que los inicios de los estudios sobre sucesión ecológica se desarrollaran en estos sistemas naturales. Así, el norteamericano Henry Cowles en 1898 centró sus investigaciones sobre la vegetación de las dunas ubicadas en los márgenes del lago Michigan, donde pudo comprobar el dinamismo de estos ecosistemas. El trabajo desarrollado por Cowles fue fundamental para la teoría de la sucesión de las comunidades vegetales propuesta por Frederic E. Clements en 1916. Posteriormente esta teoría fue modificada por Gleason en 1926.

La sucesión ecológica está compuesta por una serie de complejos procesos y mecanismos específicos que controlan la sustitución de unas especies por otras. Existen dos tipos de sucesión: la primaria que se desarrolla sobre superficies desnudas (dunas, coladas de lava, etc.) y la secundaria, que ocurre cuando una comunidad ha sido afectada por una perturbación, como un incendio, una tala, etc. (Pintó, 2000: 151). La dinámica de los sistemas de dunas litorales responde en unos casos a causas naturales, mientras que en otros se debe a las alteraciones ambientales producidas por las actividades humanas.

Normalmente, la sucesión está relacionada con los factores ambientales que operan en los sistemas de dunas, pero algunos autores consideran que las interacciones bióticas, como la competencia y la facilitación, también son importantes (Kellman y Kading, 1992; Olf *et al.*, 1993; Vázquez *et al.*, 1998; Lichter, 2000; El-Bana *et al.*, 2002; Martínez, 2003; Franks y Peterson, 2003; Martínez y García-Franco, 2004; Vázquez, 2004; Koske *et al.*, 2004; Van aarde *et al.*, 2004; Gallego *et al.*, 2006; Dellafiore *et al.*, 2006). Por ejemplo, Lichter (2000: 837) establece que los factores ambientales son limitantes importantes en las primeras etapas de sucesión, pero en las posteriores etapas adquiere una mayor significación la competencia. En esta línea, según Olf *et al.* (1993: 704), en las primeras etapas de sucesión la escasez de nitrógeno limita la productividad, por lo que las especies primocolonizadoras son terófitos. Conforme aumenta la concentración de nitrógeno en el suelo se produce un incremento en la biomasa, lo que determina que llegue una menor cantidad de luz al suelo y, por ello, produce la sustitución de las especies anuales por herbáceas y arbustos (Olf, 1993: 704). Por lo tanto, en las etapas sucesivas, cuando la disponibilidad de nutrientes en el suelo está garantizada, el incremento de la altura de la vegetación provoca que la competencia por la luz sea un factor significativo en la sucesión vegetal (Olf *et al.*, 1993: 705). Sin embargo, cuando existe movilidad de la arena, en las primeras etapas de sucesión las especies neocolonizadoras están compuestas por hierbas altas, ya que las plantas más pequeñas, como las anuales, son enterradas (Olf *et al.*, 1993: 704). Por otra parte, las variaciones interanuales de las precipitaciones producen cambios en la composición de especies, de forma que las que requieren condiciones de mayor humedad prosperan en

los años húmedos, mientras que las típicas de zonas más expuestas se incrementan en los años secos (Van der Maarel, 1981: 262-263).

Centrándonos en los procesos de interacción entre especies, la facilitación, como ya se indicó anteriormente, parece ser un factor importante en la sucesión de las comunidades vegetales (Martínez, 2003: 343), y normalmente ocurre durante las primeras etapas de sucesión (Martínez y García-Franco, 2004: 207). Por ejemplo, en México, en las zonas donde se desarrolla *Chamaecrista chamaecristoides*, se observa que las plántulas y adultos de especies herbáceas se concentran donde está presente esta especie, de forma que este arbusto altera de forma significativa las condiciones microambientales, y solamente sobreviven y se establecen aquellas plántulas situadas bajo su bóveda (Martínez, 2003: 338). Resultados similares han sido obtenidos para el caso de la facilitación de *Quercus rubra* con las plántulas de *Pinus strobus* y *Pinus resinosa* en Canadá, aunque este proceso sucede cuando la edad de la primera especie es de unos 35 años (Kellman y Kading, 1992: 686). En esta misma línea, la formación de *nebkhas* por *Retama raetam* modifica las condiciones microclimáticas y físicas, funcionando a modo de islas de vegetación que juegan un papel muy importante en la dinámica de los ecosistemas dunares áridos y semiáridos (El-Bana *et al.*, 2002: 290). Asimismo, la facilitación en las dunas litorales se incrementa con el aumento de las perturbaciones por el enterramiento (Franks y Peterson, 2003: 18). En las depresiones interdunares húmedas, las algas que se desarrollan durante las inundaciones facilitan la germinación y establecimiento de diferentes especies vegetales (Vázquez *et al.*, 1998: 415; Vázquez, 2004: 201). La presencia de hongos en las raíces de las plantas (micorrizas) también pueden establecer mecanismos de facilitación (Koske *et al.*, 2004). Sin embargo, estos procesos no sólo ocurren entre plantas, ya que los animales también pueden favorecer la expansión de las especies vegetales. Éste es el caso de la dispersión de *Retama monosperma* en el sistema de dunas de El Rompido (Huelva), favorecida por el conejo (Gallego *et al.*, 2006: 121; Dellafiore *et al.*, 2006: 8). Las semillas consumidas por este mamífero incrementan las tasas de germinación y, además, permiten su dispersión a larga distancia (Dellafiore *et al.*, 2006: 8). Hasta 10 especies de plantas son dispersadas por los conejos mediante endozoocoria en las dunas móviles jóvenes de El Rompido, lo cual sugiere que se trata de un importante mecanismo que determina la estructura y composición de la vegetación (Dellafiore *et al.*, 2007: 2-3). También las aves inducen a cambios sucesionales en la composición y estructura de la vegetación (Van Aarde *et al.*, 2004: 113).

Por su parte, los cambios en la dinámica de la vegetación como consecuencia de las actividades humanas se han producido por diferentes tipos de usos, los cuales se han sucedido a lo largo del tiempo. Las primeras modificaciones de los sistemas de dunas se han derivado de los usos tradicionales, principalmente la agricultura y el pastoreo. Debido a que la intervención del ser humano en los campos de dunas litorales se ha producido desde hace siglos, ha contribuido a modelar de forma significativa estos sistemas. Así, por ejemplo, en el Parque Nacional de Doñana las actividades tradicionales desarrolladas desde el siglo XVII como el pastoreo, el uso del fuego y la

explotación de especies vegetales, ha favorecido la movilización de las dunas, lo que a su vez a producido la alteración de la topografía original mediante el relleno de las depresiones interdunares, lo que ha originado la sustitución de comunidades arbóreas por las arbustivas (Granados *et al.*, 1988). Además, según estos autores el uso del fuego y el pastoreo han reducido los bosques a pequeños relíctos, a la vez que los matorrales seriales dominan las zonas estabilizadas. Sin embargo, en la actualidad el pastoreo sigue afectando a algunos campos de dunas litorales, especialmente en las zonas estabilizadas de los mismos (Hobbs y Grace, 1981; De Bonte *et al.*, 1999; Kutiel *et al.*, 1999; Kutiel *et al.*, 2001), lo que produce cambios en la composición florística y estructura de la vegetación (De Bonte *et al.*, 1999: 65).

Posteriormente, la eliminación de estas actividades tradicionales desarrolladas en las dunas litorales, como por ejemplo en el caso de Israel (Tsoar y Blumberg, 2002; Kutiel *et al.*, 2004; Levin y Ben-Dor, 2004), han generado variaciones en la dinámica de la vegetación. Estos trabajos reflejan interesantes relaciones entre la movilidad de las dunas, el desarrollo de la vegetación y los usos humanos que merecen ser comentadas. Tsoar y Blumberg (2002) aprecian que, entre 1944 y 1990, las tasas de avance de las dunas disminuyen, a la vez que se incrementa la cobertura vegetal. Además, las dunas transversales y barjanas existentes en 1944 evolucionan a formas parabólicas, debido a que la vegetación coloniza la cresta de éstas, que hasta el momento se mantenían desnudas. El establecimiento principalmente de *Ammophila arenaria* en las crestas produce la ruptura del equilibrio de las dunas barjanas y transversales, debido a que las plantas impiden que la arena erosionada en la cara de barlovento se deposite en la de sotavento. De esta forma, se genera una acumulación de arena en la cresta en forma de *nebkhas* y la erosión del viento provoca que la cara de barlovento cambie su forma de convexa a cóncava. Por su parte, Kutiel *et al.* (2004) también observan un incremento de la cobertura vegetal entre 1956 y 1999, cambio también apreciado por Levin y Ben-Dor (2004), junto con una disminución de las tasas de desplazamiento de las dunas de 3 a 0,5 m/año entre 1945 y 1999. Los tres estudios relacionan la progresiva estabilización de las dunas litorales de Israel con el abandono del pastoreo y el desbroce de la vegetación por parte de los beduinos, ya que la escasa velocidad del viento existente en esta región facilita la colonización vegetal. Por lo tanto, la movilidad de las dunas se debía al control de la vegetación que ejercían estas poblaciones humanas.

Más recientemente, las actividades vinculadas al uso turístico de estos sistemas han alterado los procesos de sucesión y la formación de dunas (Muñoz-Vallés y Gallego, 2003; Roig-Munar, 2004; Hernández Calvento, 2006; Gallego *et al.*, 2006). En este sentido, la utilización de maquinaria en las labores de limpieza de la arena produce una desestructuración de las morfologías de playa, impide el buen crecimiento y colonización de especies vegetales, desestabiliza la base de la duna costera y favorece la erosión (Roig-Munar, 2004: 99). De igual forma, el pisoteo constante por parte de los usuarios de las playas provoca daños en la vegetación, molestias a la fauna y la fragmentación de la duna costera (Muñoz-Vallés y Gallego, 2003: 199; Gallego *et al.*, 2006: 127). Asimismo, en las zonas más estabilizadas, los principales impactos están

asociados a las actividades recreativas, que determinan la existencia de pistas. Tanto el tránsito peatonal como el tráfico de vehículos reducen la cobertura de la vegetación y aumentan la compactación del suelo (Kutiel *et al.*, 1999: 1056; Kutiel *et al.*, 2001: 87).

La introducción de especies vegetales en los campos de dunas litorales constituye otro factor que puede modificar los procesos de sucesión. Las especies introducidas pueden ocasionar profundas transformaciones en los sistemas de dunas invadidos. Por ejemplo, la introducción en Nueva Zelanda y Australia de *Ammophila arenaria* y *Thinopyrum junceiforme*, respectivamente, ha producido cambios en la morfología de la duna costera, la posible reducción de la frecuencia e intensidad del desarrollo de *blowouts*, la limitación en la formación de dunas transgresivas, el desplazamiento de especies nativas, como *Desmoschoenus spiralis* en Nueva Zelanda y *Spinifex sericeus* en Australia y la estabilización de algunas dunas (Hilton *et al.*, 2005; Hilton *et al.*, 2006). En Estados Unidos *Ammophila arenaria* ha producido impactos similares, como el desplazamiento de *Leymus mollis*, la especie típica de las dunas costeras de la costa oeste a 38° N, la transformación de las dunas costeras en montículos por cordones, impidiendo el aporte de sedimentos hacia el interior, con la consecuente formación de superficies de deflación que la vegetación estabiliza rápidamente (Wiedemann y Pickart, 1996: 291; Wiedemann y Pickart, 2004: 60). Contrariamente, en Sudáfrica, *Ammophila arenaria* no parece haber provocado alteraciones significativas, ya que la diversidad de especies encontrada en las comunidades dominadas por ella son similares a la compuesta por las especies nativas, por lo que no ha alterado de forma significativa los procesos de sucesión vegetal (Hertling y Lubke, 1999: 165; Lubke y Hertling, 2001: 181). Asimismo, hay que considerar que las perturbaciones creadas por las actividades humanas en los sistemas dunares incrementan la invasión de las especies exóticas (Kim, 2004: 363), aunque en la duna costera estas perturbaciones son mitigadas por las condiciones de estrés, como la salinidad ambiental (Castillo y Moreno-Casasola, 1996: 20; Rodgers y Parker, 2003: 395). Seguramente por este motivo las zonas estabilizadas presentan un mayor número de especies ruderales e introducidas (Castillo y Moreno-Casasola, 1996: 18).

1.2.7. La vegetación de los campos de dunas litorales de las islas Canarias

En Canarias, los principales campos eólicos se localizan en las islas de La Graciosa, Lanzarote (El Jable), Fuerteventura (Corralejo y Jandía), Gran Canaria (Maspalomas) y Tenerife (El Médano), existiendo otros arenales, con superficie y/o dinámica reducidas, en estas islas, además de en La Gomera, El Hierro y los islotes de Lobos y Alegranza (figura 1.25). Los estudios de la vegetación en los sistemas de dunas de Canarias son en general muy escasos, reduciéndose en la mayor parte de los casos a trabajos fitosociológicos descriptivos. Con menor frecuencia se han desarrollado trabajos que abordan la dinámica y ecología de la vegetación de estos campos de dunas.

Las primeras investigaciones fitosociológicas en estos ámbitos aparecen en los trabajos de Esteve (1968) y Wildpret (1970), que estudian las comunidades psamófilas

del sur de la isla de Tenerife y la clase *Ammophiletea* de las islas orientales, respectivamente. Sunding (1972), en un trabajo amplio sobre la vegetación de Gran Canaria, describe las nuevas asociaciones *Euphorbio-Cyperetum kalli* y *Traganetum moquinii*, aportando además interesantes observaciones ecológicas sobre estas asociaciones. Posteriormente se han desarrollado otros trabajos sobre la vegetación psamófila o sobre especies de estos hábitats, normalmente en el marco de estudios más amplios, también de carácter fitosociológico, como Kunkel (1971), Esteve (1983), Del Arco y Wildpret (1990), Marrero (1991), Santos (1993), García *et al.* (1996), Barry y Luque (1998), Reyes-Betancort *et al.* (2001), Ministerio de Medio Ambiente (2002), Rodríguez (2003), Salas y Naranjo (2003) y Del Arco (2006). Además de estos trabajos más descriptivos, Del Arco *et al.* (1983) realiza un estudio sobre la colonización de la playa artificial de las Teresitas (Tenerife) por las especies psamófilas *Cyperus capitatus* y *Ononis tournefortii*, describiendo la nueva asociación fitosociológica *Ononido-Cyperetum capitati*.

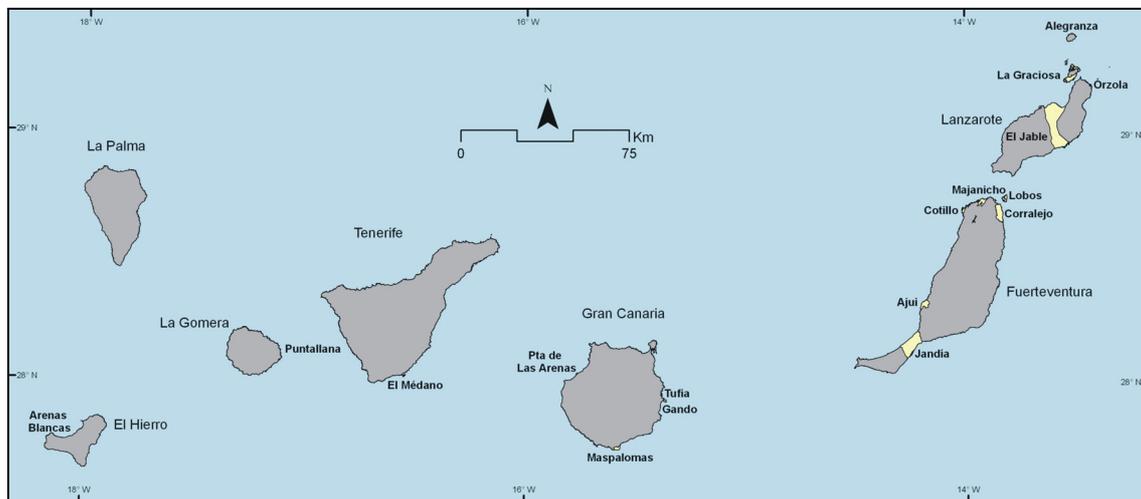


Figura 1.25. Principales sistemas sedimentarios eólicos de Canarias.

Por su parte, Fernández *et al.* (1982) para las Dunas de Corralejo (Fuerteventura) diferencia tres tipos de vegetación de dunas: la de arenas sueltas, la de arenas arcillosas y la de grandes dunas. La de arenas sueltas, que caracterizan las áreas de entrada de sedimentos y las sendas existentes entre las grandes dunas, están formadas por especies herbáceas como *Euphorbia paralias*, *Cyperus capitatus* y *Ononis natrix*. La vegetación de arenas arcillosas, más variada por la mayor fertilidad del suelo, tiene como especie diferencial a la especie endémica de las islas orientales *Androcymbium psammophilum*, acompañado de terófitos como *Ononis serrata* y *Erodium neuradifolium* y algunos arbustos como *Launaea arborescens*. Las grandes dunas normalmente carecen de vegetación a excepción de la especie exótica *Nicotiana glauca* y, cerca de la costa, *Traganum moquinii*. Criado (1987) completa la caracterización de la vegetación anterior relacionándola con la geomorfología. De este modo, distingue las áreas de entrada de sedimentos, donde predomina especies como *Euphorbia paralias*, que genera pequeñas dunas, y *Traganum moquinii* que genera dunas de mayor tamaño. Luego aparecería el

campo de dunas propiamente dicho, formado por dunas barjanas principalmente, carente prácticamente de vegetación. Por último, distingue las áreas de salidas de sedimentos donde vuelven a predominar *Euphorbia paralias* y *Traganum moquinii*.

Finalmente, González *et al.* (1996) abordan la vegetación de los sistemas de dunas de la isla de La Graciosa, relacionándola con la movilidad de la arena y sus características granulométricas. Estos autores distinguen entre: a) la vegetación de los campos de dunas activos, es decir, de aquellos enclaves que reciben aportes de sedimentos desde el mar, con granulometrías finas. Se caracteriza por la presencia de *Traganum moquinii*, acompañada de otras especies, como *Euphorbia paralias*, *Zygophyllum fontanesii* y *Cakile maritima*. A medida que aumenta la distancia a la costa, continúa predominando *Traganum moquinii*, pero la composición florística cambia, debido a la sustitución de las especies anteriores por *Polycarpaea nivea*, *Atriplex halimus* y *Suaeda mollis*; b) la vegetación de los campos de dunas estabilizados, sin aportes actuales de arena, pero con cierta movilidad, debido a la removilización de los sedimentos existentes, más groseros. En estos ámbitos *Traganum moquinii* prácticamente está ausente, predominando *Suaeda mollis*, *Suaeda vera*, *Polycarpaea nivea* y *Launaea arborescens*. La preponderancia de unas u otras especies está relacionada con el tamaño del grano, de forma que las dos primeras dominan en las zonas que tienen un tamaño mayor, mientras que, conforme la arena se hace más fina, domina *Polycarpaea nivea*, acompañada de *Suaeda mollis* y *Suaeda vera*. En las zonas de grano más fino predomina *Polycarpaea nivea* junto a *Suaeda mollis* y *Launaea arborescens*, estando ausente *Suaeda vera*; c) la vegetación de los campos de dunas semiestabilizados, con presencia de materiales volcánicos en el substrato arenoso y escasa potencia de sedimentos, los cuales están entremezclados con materiales volcánicos, principalmente piroclastos. En estos enclaves predominan *Suaeda mollis*, *Suaeda vera* y *Polycarpaea nivea*, apareciendo *Euphorbia obtusifolia*, debido probablemente a la mayor humedad por la presencia de piroclastos.

Actualmente la vegetación de los campos de dunas de Canarias presentan el siguiente esquema sintaxonómico (Del Arco y Rodríguez, 2006):

- TUBERARIETEA GUTTATAE** (Br.-Bl., Roussine & Nègre 1952) Rivas Godoy & Rivas-Martínez 1963 nom. mut. propos.
- +**MALCOLMIETALIA** Rivas Godoy 1958
- ***Ononidion tournefortii** Géhu, Biondi, Géhu-Frank, Hendoux & Mossa 1996
- Ononido tournefortii-Cyperetum capitati* Wildpret, Del Arco & Acebes in Del Arco, Acebes & Wildpret 1983
- STELLARIETEA MEDIAE** Tüxen, Lohmeyer & Preising ex von Rochow 1951
- CHENOPODIO-STELLARIENEA** Rivas Godoy 1956
- +**THERO-BROMETALIA** (Rivas Godoy & Rivas-Martínez ex Esteve 1973) O. Bolós 1975
- ***Resedo lanceolatae-Moricandion** F. Casas & M.E. Sánchez 1972
- Bupleuro semicompositi-Mairetum microspermae* Reyes, Wildpret & León 2001
- POLYCARPAEO NIVEAE-TRAGANETEA MOQUINI** A. Santos ex Rivas-Martínez & Wildpret in Rivas-Martínez, T.E. Díaz, Fernández González, Izco, Loidi, Lousa & Penas 2002
- +**ZYGOPHYLLO FONTANESII-POLYCARPAEETALIA NIVEAE** A. Santos ex Géhu, Biondi, Géhu-Frank, Hendoux & Mossa 1996
- ***Traganion moquini** Sunding 1972
- Frankenio-Zygophylletum gaetuli* Del Arco & Wildpret 1991
- Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis* Esteva 1968
- Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis ononidetosum hesperiae* (Biondi, Allegrezza, Taffetani & Wildpret 1994) Reyes, Wildpret & León 2001
- Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis* variante con *Salsola divaricata*
- Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis* facies de *Cyperus capitatus*
- Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis* facies de *Zygophyllum fontanesii*
- Traganetum moquini* Sunding 1972
- Traganetum moquini* *zygophylletosum fontanesii* nom. prov.
- Traganetum moquini* variante con *Salsola vermiculada*
- ***Policarpaeo niveae-Euphorbion paraliae** Rivas-Martínez & Wildpret in Rivas-Martínez, T.E. Díaz, Fernández González, Izco, Loidi, Lousa y Penas 2002
- Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati* Sunding 1972 nom. mut. propos
- Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati cyperetosum capitati*
- Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati atriplicetosum glaucae* Biondi, Allegrezza, Taffetani y Wildpret 1994
- Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati zygophylletosum fonyanesii* Biondi, Allegrezza, Taffetani y Wildpret 1994 [nom. inval.]
- CAKILETEA MARITIMAE** Tüxen & Preising ex Br.-Bl. & Tüxen 1952
- +**CAKILETALIA INTEGRIFOLIAE** Tüxen ex Oberdorfer 1949 corr. Rivas-Martínez, M. Costas & Loidi 1992
- ***Cakilion maritimae** Pignatti 1953
- Salsolo kali-Cakiletum maritimae* M. Costas & Mansanet 1981 nom. mut. Propos

La descripción de estas comunidades se presenta a continuación (Del Arco y Rodríguez, 2006):

***Salsola kali-Cakiletum maritimae* (herbazal de rábano marino):** está formada principalmente por terófitos, que pueden ser perennes. Se localiza en la franja de las

playas donde se depositan restos orgánicos arrojados por el mar. Las especies características son: *Cakile maritima*, *Polygonum balansae*, *Salsola kali* y *Suaeda maritima*. Se localiza en las islas de Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife.

***Euphorbia paraliae-Cyperetum capitati* (comunidad de lechetrezná de playa y juncia marina):** se ubica en dunas móviles embrionarias y otros sustratos arenosos más o menos llanos, generalmente próximos al mar, donde está condicionada por la movilidad del sustrato y la maresía, hasta una altitud de entre 5 y 6 m (Sunding, 1972). En las zonas más inestables domina *Cyperus capitatus*, mientras que en las más estabilizadas pueden aparecer *Zygophyllum fontanesii*, *Polycarpaea nivea* y *Suaeda mollis* (Sunding, 1972: 38). También aparece *Neurada procumbens*, especie sahariana introducida a través de dromedarios en el sistema de dunas de Maspalomas (Sunding, 1972: 38). No forma dunas altas, y las zonas donde se desarrolla tienen un escaso contenido en materia orgánica y un pH de 7,3 (Sunding, 1972: 39-40). Las especies características son: *Cyperus capitatus* y *Euphorbia paralia*, además de *Medicago marina*, *Polygonum balansae* y *Polygonum maritimum*. Se distribuye por las islas de Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife y La Gomera.

***Ononido tournefortii-Cyperetum capitati* (pastizal de melosa de arenas y juncia marina):** herbazal anual no nitrófilo que crece sobre arenas marítimas móviles. Las especies características son *Ononis tournefortii* y *Cyperus capitatus*. Se localiza únicamente en la isla de Tenerife.

***Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis* (comunidad de saladillo blanco y corazoncillos):** es una comunidad nitropsamófila formada por caméfitos que se desarrolla sobre sustratos arenosos pedregosos o arenosos compactos de diversa profundidad. Las especies características son: *Polycarpaea nivea* y varias especies del género *Lotus*, endémicas de distintas islas, como *L. kunkelii*, *L. lancerottensis*, *L. arinagensis* y *L. sessilifolius*. Se localiza en Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife y La Gomera.

***Traganetum moquinii* (balanconal):** asociación psamófila, más o menos nitrófila, oligoespecífica y propia de dunas altas litorales o interiores. Esteve (1968: 315) sugiere que esta comunidad sustituye a *Polycarpaeo niveae-Lotetum lancerottensis* en aquellas zonas donde la acumulación de arena es mayor. Esta comunidad tiene un mayor contenido de materia orgánica y el pH es de 6,3 (Sunding, 1972: 42). En las dunas más desarrolladas, que pueden alcanzar los 4 m de altura y hasta 40 m de circunferencia (Sunding, 1972: 41), la única especie presente es *Traganum moquinii* (García *et al.*, 1996: 84). Las especies acompañantes son caméfitos, como *Atriplex glauca* subsp. *ifniensis*, *Launaea arborescens*, *Polycarpaea nivea* o *Zygophyllum fontanesii*. Sunding (1972: 41) destacó la importancia de *Traganum moquinii* en la generación de dunas, explicando su formación de la siguiente manera: “se comienza con la acumulación de arena alrededor de las plántulas de *Traganum moquinii*, inicialmente sobre superficies arenosas más o menos llanas. El sistema de tallos ramificados de esta especie intercepta eficazmente la arena arrastrada por el viento. La capacidad de esta especie de crecer y ramificarse rápidamente posibilita que no quede

enterrada por la acumulación de arena y el crecimiento de la duna, continuando con la producción de nuevos tallos aéreos que contribuyen a una mayor acumulación de la arena. Finalmente, cuando las dunas han alcanzado su máxima altura alrededor de los 4 m, las pendientes pueden tener una inclinación alrededor de los 30°, que es el límite donde la arena está en equilibrio”.

Se distribuye en las islas de La Graciosa, Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife.

***Bupleuro semicompositi-Mairetum microspermae* (herbazal efímero):** pastizal xerofítico efímero que se desarrolla en las arenas de origen orgánico, donde destacan especies como *Bupleurum semicompositum*, *Cuthamdia memphitica* y *Mairetis microsperma*, entre otras. Se localiza en Lanzarote y Fuerteventura.

En la bibliografía se describen otras comunidades vegetales, no incluidas en el esquema anterior, que además de localizarse en otros ámbitos también pueden hacerlo en los sistemas de dunas de Canarias:

***Cenchrus ciliaris-Launaeetum arborescentes* (aulagar con gramillo):** comunidad que se desarrolla sobre suelos recubiertos por arenas organógenas o volcánicas de la isla de Lanzarote (Del Arco y Rodríguez, 2006: 69). Además de *Cenchrus ciliaris* y *Launaeo arborescens*, pueden aparecer *Heliotropium ramosissimum*, *Lotus lancerottensis*, *Polycarpaea nivea*, *Salvia aegyptiaca* y *Cyperus capitatus*.

***Launaeo arborescentes-Schizogynetum sericeae* (aulagar-saladar blanco):** comunidad de sustitución de los tabaibales dulces que se desarrolla sobre sustratos removidos de textura arenosa, campos de cultivos abandonados, derrubios, cunetas (Del Arco y Rodríguez, 2006: 71-72), así como en campos de dunas (García *et al.*, 1996: 87). Las especies más características son: *Launaea arborescens*, *Schizogyne sericea*, *Schizogyne glaberrima*, *Lotus sessilifolius*, *Lycium intricatum* y *Salsola divaricata*. Se localiza en las islas de Gran Canaria, Tenerife y La Gomera.

***Chenoleoideo tomentosae-Suaedetum mollis* (matorral de algoaera y brusquilla):** matorral camefítico bajo y halonitrófilo, que se desarrolla sobre suelos haplocálcicos y petrocálcicos, a veces con cierta cobertura de arenas (Del Arco y Rodríguez, 2006: 74). Las especies características son: *Chenoleoides tomentosa*, *Frankenia capitata* y *Suaeda mollis*. Se extiende por las islas de Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria.

***Cenchrus ciliaris-Hyparrhenietum sinaicae* (cerrillal-panascal):** asociación caracterizada por la presencia de los hemicriptófitos *Asistida adscensionis*, *Cenchrus ciliaris* y *Hyparrhenia sinaica*, que constituye una etapa de sustitución de los tabaibales dulces, cardonales y bosques termoesclerófilos, pero que también se puede localizar en arenales interiores producidos por la acumulación eólica de la arena de playa (Del Arco y Rodríguez, 2006: 81). Se puede encontrar en todas las islas.

***Cyperetum laevigati* (comunidad de juncias):** asociación halófila dominada por *Cyperus laevigatus*, que crece sobre sustrato arenoso en las depresiones planas situadas entre las dunas altas de Maspalomas (Del Arco y Rodríguez, 2003: 99). El sustrato donde se desarrolla tiene una costra de sal y un pH muy alcalino (9,6), probablemente debido a las inundaciones de agua de mar (Sunding, 1972: 44). Únicamente se localiza en Gran Canaria.

La primera zonificación de los sistemas de dunas de Canarias es definida por Sunding para Maspalomas (1972: 36; figura 1.26). En ella destaca la ausencia de vegetación en la playa y establece una secuencia que parte de la asociación *Traganetum moquinii*, en las dunas más cercanas a la costa, continúa por las depresiones interdunares (*lows*), que ocasionalmente se inundan, donde se desarrolla *Cyperetum laevigati* y, finalmente, concluye con la asociación *Euphorbio-Cyperetum kalli* en las dunas interiores (actualmente *Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati*).

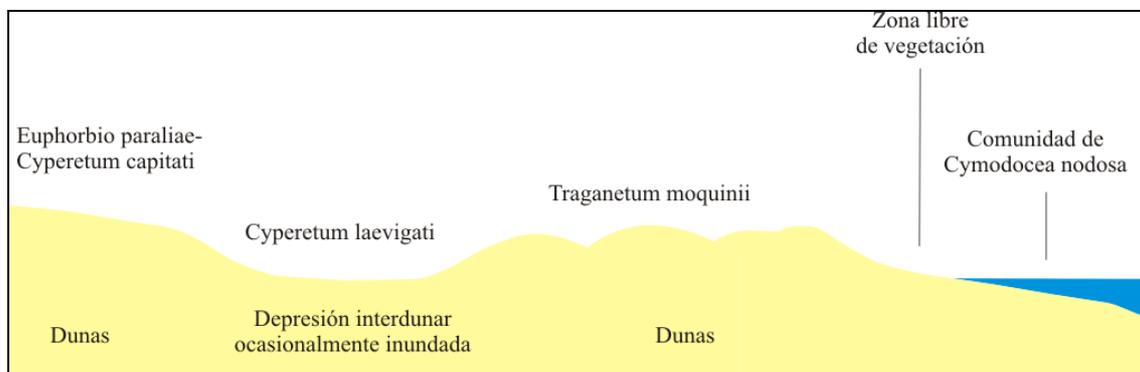


Figura 1.26. Zonación de una playa de arena con dunas (modificado de Sunding, 1972: 36).

Para Santos (1993: 53), la vegetación de las dunas se puede dividir en dos zonas, en función del volumen de arena: las dunas pequeñas, con alturas inferiores a los 80 cm, y las dunas altas (figuras 1.27 y 1.28). Según este autor, las primeras se caracterizan por la presencia de las asociaciones *Polycarpeo niveae-Lotetum lancerottensis* y *Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati*. Por su parte, las dunas altas están formadas principalmente por *Traganetum moquinii*.

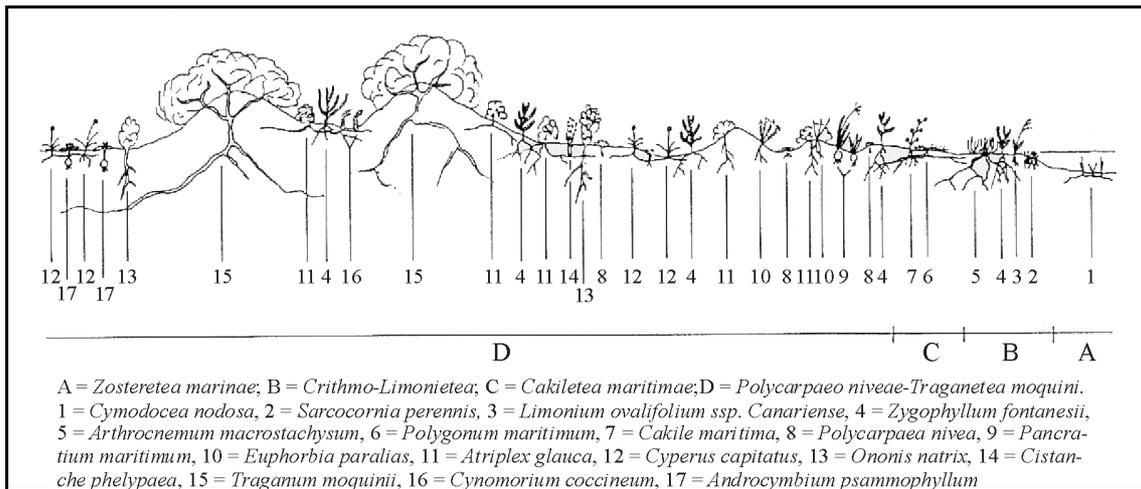


Figura 1.27. Zonación en un sistema de dunas pequeñas (modificado de Santos, 1993: 54).

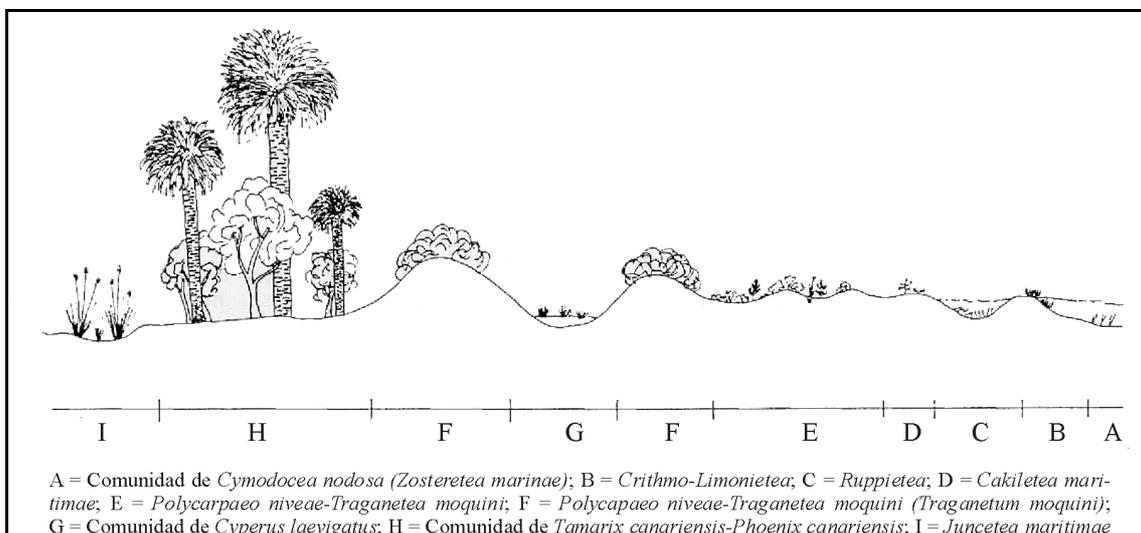


Figura 1.28. Zonación en un sistema de dunas altas (modificado de Santos, 1993: 55).

Más recientemente Hernández Calvento (2002, 2006) ha establecido dos tipos de zonación para el sistema de dunas de Maspalomas. Una norte-sur, entre la playa de Maspalomas y el interior del campo de dunas (figura 1.29), y otra noreste-suroeste que abarca todo el interior del sistema (figura 1.30). En el primer caso, este autor considera que la zonación de la vegetación está condicionada por la distancia al mar y por el volumen de sedimentos. De esta forma, en las zonas más interiores, con mayor volumen de arena y estabilizadas, predomina una paradera estacional de especies psamófilas compuestas por *Cyperus capitatus* y *Ononis serrata* entre otras. En las depresiones interdunares y en las dunas más antiguas se localizan bosquetes y ejemplares de *Tamarix canariensis* respectivamente. En la zona central del sistema, donde disminuye la altitud y el sustrato tiene una alta salinidad y estabilidad, predominan matorrales de especies halófilas como *Suaeda vermiculata* (actualmente *Suaeda mollis*). En las áreas más cercanas a la costa, en las depresiones interdunares existentes entre las dunas móviles, aparecen céspedes de *Cyperus laevigatus*, adaptadas a la dinámica dunar, y matorrales de *Traganum moquinii* en entornos muy salinos.

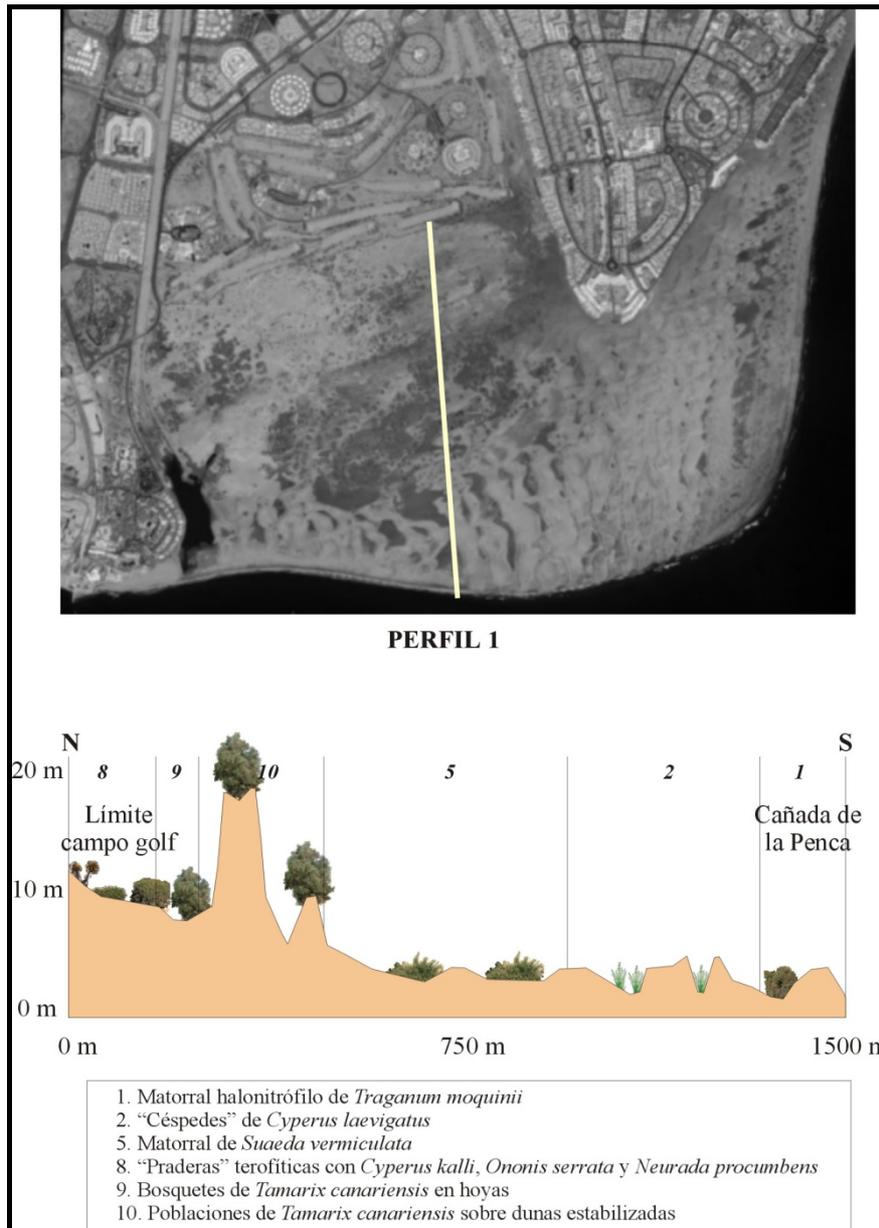


Figura 1.29. Zonación norte-sur de la vegetación del sistema de dunas de Maspalomas (tomado de Hernández Calvento, 2006).

La zonación noreste-suroeste, que atraviesa únicamente dunas estabilizadas, se caracteriza por la alternancia entre comunidades de *Tamarix canariensis* y praderas terofíticas estacionales. El primer tipo de vegetación ocupa tanto las depresiones interdunares, donde forma bosquetes, como culminando grandes dunas. Las praderas xerofíticas se instalan en el resto de la zona aprovechando la estabilidad de los sedimentos.

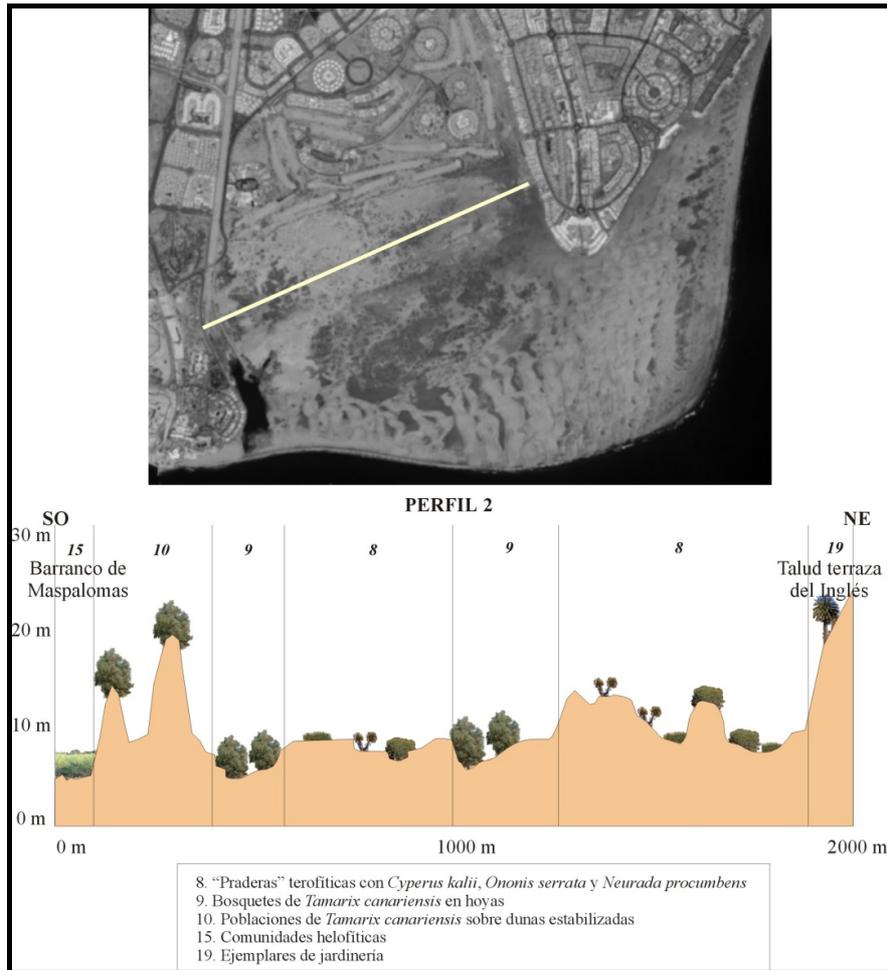


Figura 1.30. Zonación noreste-suroeste de la vegetación del sistema de dunas de Maspalomas (tomado de Hernández Calvento, 2006).

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS ECOANTRÓPICAS DEL CAMPO DE DUNAS DE MASPALOMAS

Este capítulo se realiza una presentación general de los principales factores naturales y humanos que caracterizan el campo de dunas de Maspalomas. Se ha estructurado siguiendo un esquema en el que se consideran los siguientes apartados: la localización, delimitación y descripción del área de estudio; la geología y geomorfología; las características climáticas; la vegetación y la fauna y, finalmente, las alteraciones ambientales producidas por las actividades humanas.

2.1. Localización, delimitación y descripción general del ámbito territorial

La Reserva Natural Especial (RNE) de las Dunas de Maspalomas está situada en el extremo sur de la isla de Gran Canaria, en el término municipal de San Bartolomé de Tirajana (figura 2.1). Su extensión es de 403,9 ha. Concretamente está delimitada entre las siguientes coordenadas UTM: los 441.400 y 444.500 E y los 3.067.750 y 3.070.500 N. Al norte limita con el campo de golf de Maspalomas y la urbanización de Playa del Inglés, al oeste con la desembocadura del barranco de Fataga y la urbanización Oasis de Maspalomas, y al sur y al este con la bajamar escorada unos 75 m tierra adentro, por lo que las playas asociadas al sistema de dunas, la del Inglés y la de Maspalomas, están excluidas del área protegida por la categoría de RNE. El espacio protegido comprende varios sistemas con un alto grado de naturalidad, como el campo de dunas, la desembocadura del barranco de Fataga y una laguna litoral denominada charca de Maspalomas, pero también aparecen áreas fuertemente antropizadas, como un palmeral asociado a la urbanización turística Oasis de Maspalomas y un centro comercial (Anexo II) vinculado a la urbanización de playa del Inglés.

Maspalomas fue uno de los primeros espacios naturales declarados en Canarias, si excluimos a los Parques Nacionales, cuya protección provisional es establecida en el Boletín Oficial del Estado nº 121, de 30 de julio, donde se publica el Real Decreto 1.741/1982, de 25 de junio. La Ley 12/1987, de 19 de junio, de Declaración de Espacios Naturales de Canarias, declara a Maspalomas como Paraje Natural de Interés Nacional. Posteriormente es reclasificada como Reserva Natural Especial a partir de la ley 12/1994, de 19 de diciembre, de Espacios Naturales de Canarias, como adaptación a la Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres. Finalmente, 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 de Canarias, mantiene la denominación de Reserva y los límites establecidos por la ley anterior. Además, la totalidad de la Reserva, junto al campo de golf, una parte de la urbanización Oasis de Maspalomas y las aguas aledañas a 200 m mar adentro de la bajamar escorada es considerada como Área de Sensibilidad Ecológica (ASE) por el Texto Refundido, a efectos de lo indicado por la Ley 11/1990, de 13 de julio, de Prevención del Impacto Ecológico. Los fundamentos de su

protección, que aparecen recogidos en la memoria informativa del Plan Director (2004: 1), son los siguientes:

a) El carácter representativo a nivel del archipiélago de los ecosistemas dunar y lacustre.

b) La presencia de hábitats naturales amenazados de desaparición, como el ecosistema lacustre de aguas salobres de la charca de Maspalomas, incluíble en la categoría de hábitats costeros prioritarios de la Directiva 92/43/CEE del Consejo de Europa, de 21 de mayo de 1992, de Conservación de los Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestres.

c) Elevado interés ornitológico de este humedal, donde aves limícolas y acuáticas, sedentarias y especialmente migratorias, encuentran un lugar adecuado para su aprovisionamiento, descanso y nidificación en muchos casos. La charca de Maspalomas es la única localidad del archipiélago donde se ha constatado la nidificación de la Cerceta Pardilla (*Marmaronetta angustirostris*), especie catalogada en peligro de extinción, recogida en el Real Decreto 439/1990, así como en el Anexo I de la Directiva 91/244/CEE que modifica la Directiva 79/409/CEE del Consejo relativa a la Conservación de las Aves Silvestres.

También el sistema dunar posee un elevado interés desde el punto de vista ornitológico, al ser el hábitat potencial de especies de avifauna desértica, como los alcaravanes (*Burthinus oecdinemus*) y corredores (*Cursorius cursor*), observados hasta los años sesenta del pasado siglo en la Reserva, así como área potencial de cría del Charrán Común (*Sterna hirundo*) cuyos huevos, en número superior a 400, se recolectaban en la zona dunar hasta finales del siglo XIX (Bolle, 1857:341-343).

d) La presencia de poblaciones animales y vegetales catalogadas como especies amenazadas, con buena representación de elementos endémicos, algunos locales como *Schizogyne glaberrima*, y especies que en virtud de instrumentos internacionales o disposiciones específicas requieren una especial protección como son: *Limonium tuberculatum*, *Traganum moquinii*, *Phoenix canariensis*, *Neochamaelaea pulverulenta*, *Tamarix canariensis*, *Ruppia maritima* y *Zygophyllum fontanesii*, entre las especies vegetales. De la fauna se puede enumerar un grupo de más 11 especies de aves nidificantes y más de 20 especies migratorias clasificadas como de “Interés Especial”, según el Anexo II del Catálogo Nacional de Especies Amenazadas.

e) La presencia de zonas de vital importancia para determinadas fases de la biología de especies animales, en especial de la avifauna, tales como áreas de reproducción y cría, como es el caso del chorlitejo patinegro (*Charadrius alexandrinus*), chorlitejo chico (*Charadrius dubius*) y la gallineta común (*Gallinula chloropus*); así como áreas de alimentación y refugio de gran número de especies migratorias.

f) Albergar estructuras geomorfológicas representativas de la geología insular, como el mayor campo de dunas móviles de la isla, con su peculiar proceso de génesis y dinámica, con una superficie aproximada de 3-4 km², en buen estado de conservación así como la presencia de paleobarras litorales en el interior del campo, indicativos de antiguos niveles marinos.

g) La presencia de una rica entomofauna ligada al ecosistema dunar de Maspalomas, que alberga un alto número de insectos de hábitos halófilos-psamófilos, muchos de ellos de gran interés zoogeográfico, existiendo además algunos endemismos exclusivos del área.

h) La existencia de un paisaje natural de espectacular belleza y singularidad.

El área de estudio considerada en esta tesis no abarca toda la reserva, sino que se limita al área ocupada actualmente por el campo de dunas. Por lo tanto, quedan excluidos el barranco y la charca de Maspalomas, así como el palmeral, que forma parte hoy de los jardines de la urbanización Oasis de Maspalomas y del Parque Tony Gallardo. El centro comercial Anexo II, localizado en la playa del Inglés, tampoco se incluye en el área de estudio, aunque se tienen en cuenta sus efectos ambientales.

Teniendo en cuenta que se trata de un sistema playa-duna, lo que, sí se ha considerado en este estudio, aunque no forman parte de la reserva, es el área ocupada por las dos playas que limitan el sistema: la del Inglés, al este, con una orientación N-S y la de Maspalomas, al sur, con una orientación E-O. En definitiva, la superficie ocupada por el área de estudio es de 360,9 hectáreas, que se corresponde con el 89,4% de la superficie clasificada como Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas.

En conclusión el objeto de estudio constituye una zona de gran valor ecológico y singularidad, ya que se corresponde con uno de los sistemas de dunas más significativo de Canarias, donde existe una gran diversidad de hábitats. Además de su riqueza ambiental, posee un indudable interés económico, ya que constituye el principal recurso natural de la zona turística más importante de Gran Canaria que, a su vez, se sitúa entre las áreas turísticas más dinámicas de Canarias y España.



Figura 2.1. Localización y vista aérea oblicua del campo de dunas de Maspalomas (Año 2006).

2.2. Características generales del medio físico de Maspalomas

Las singulares características de este espacio vienen determinadas por la concurrencia de un sistema de dunas, un palmeral y un humedal de gran importancia ornitológica, cuestiones que han convertido a Maspalomas en objeto de numerosos estudios científicos desde el siglo XIX. Desde esa época hasta la actualidad algunos trabajos se han centrado en diversos aspectos ambientales como la geología y geomorfología (Klug, 1968; Martínez, 1985; Martínez, 1986; Martínez *et al.*, 1986; Martínez, 1990; Martínez, 1994; Balcells *et al.*, 1990), mientras que otros lo han hecho en la vegetación terrestre (Esteve, 1968; Sunding, 1972; Esteve, 1983), las comunidades vegetales acuáticas asociadas a la charca de Maspalomas (González, 1977; González y Betancort, 1995), el ecosistema de la charca de Maspalomas (Almunia, 1998; González *et al.*, 1999) y la avifauna (Bolle, 1857; Bannerman, 1922; Trujillo, 1996). Asimismo,

se han desarrollado otros en los que se analizan los aspectos ambientales desde enfoques más integrales (Martín *et al.*, 1978; Nadal y Guitián, 1983; Naranjo, 1999). En los años 70 algunos trabajos comienzan a denunciar los impactos de la actividad turística, al tiempo que reclaman su protección como espacio natural protegido (Bernard, 1970; Montelongo *et al.*, 1978). Será a partir de la protección de este espacio cuando se aborden propuestas de recuperación, como la de la charca de Maspalomas (Suárez, 1994). También se inicia el estudio de impactos concretos, como los ocasionados por los quioscos de playa en la dinámica sedimentaria eólica (Suárez y Hernández Calvento, 1998).

Profundizando en el estudio de las consecuencias ambientales de la actividad turística, Hernández Calvento (2002; 2006) realiza un análisis exhaustivo del sistema de dunas, en el que estudia su evolución entre los años 60 del pasado siglo y el 2000. De este trabajo se derivan numerosas publicaciones (Hernández Calvento *et al.*, 2002a; Hernández Calvento *et al.*, 2002b; Hernández Calvento *et al.*, 2003a; Hernández Calvento *et al.*, 2003b; Hernández Calvento y Mangas, 2004; Hernández Calvento *et al.*, 2006; Hernández Calvento, 2006) que, entre otras cuestiones, ponen de manifiesto la problemática ambiental de este ecosistema. Posteriormente, continúan desarrollándose varios estudios, donde se abarcan aspectos geomorfológicos y geológicos (Alonso *et al.*, 2001; Díaz y Hernández Calvento, 2004; Díaz, 2005; Hernández Cordero *et al.*, 2006a; Hernández Calvento *et al.*, 2007a; Hernández Calvento *et al.*, 2007b; Ojeda *et al.*, 2007; Alcántara-Carrió *et al.*, 2007; Fontán *et al.*, 2007a; Fontán *et al.*, 2007b; Sánchez-Pérez *et al.*, 2008; Alonso *et al.*, 2008a; Alonso *et al.*, 2008b; Alonso *et al.*, 2011; Criado *et al.*, 2011); sobre el papel de los foraminíferos en el sistema de dunas (Sánchez-Pérez, 2004; Sánchez-Pérez *et al.*, 2004; Sánchez-Pérez *et al.*, 2005), hidrogeológicos (Melián *et al.*, 2005), biogeográficos, tanto caracterizando la vegetación actual terrestre (Hernández Cordero *et al.*, 2006b; Hernández Cordero *et al.*, 2006c), como analizando su influencia en el transporte eólico (Alonso *et al.*, 2007). También se han realizado estudios de carácter más integral (Cabildo de Gran Canaria, 2007; Pérez-Chacón *et al.*, 2007; Ministerio de Medio Ambiente, 2007), especialmente orientados al diagnóstico de la problemática ambiental de carácter antropogénica.

Por lo que respecta a la documentación de carácter espacial, el campo de dunas de Maspalomas ha sido cartografiado desde el siglo XIX. Tienen un gran interés, como se mostrará más adelante, los documentos realizados por Webb y Berthelot en 1838 (figura 2.2) y Juan de León y Castillo hacia 1862 (figura 2.3). El segundo documento citado es especialmente detallado, y en él se observa una configuración del sistema de dunas muy similar a la actual. También se representan las variaciones estacionales de la punta de la Bajeta (indicada por el autor en el mapa en línea discontinua).



Figura 2.2. Detalle de Maspalomas obtenido a partir de la ampliación de la carta topográfica de la isla de Canaria (Webb y Berthelot, 1838).



Figura 2.3. Mapa de Maspalomas (Juan de León y Castillo, 1862).

2.2.1. Geología y geomorfología

El área de estudio se localiza en la denominada “Paleocanaria” (Hausen, 1962), que se corresponde con la parte más antigua de la isla. Se formó durante el Mioceno con materiales volcánicos de las fases magmáticas de construcción en escudo (14,5 a 14,1 Ma) y de declive alcalino (14,1 a 7,2 Ma), Ciclo Antiguo o I, y en la fase de reactivación volcánica pliocena con materiales del Ciclo Roque Nublo o II (5,5 y 2,8 Ma) (Balcells *et al.*, 1990). Por su parte, los materiales volcánicos del último ciclo eruptivo pliocuaternario (ciclo Post-Roque Nublo o III) no aparecen en el sur de la isla, aunque si lo hacen los materiales sedimentarios generados por procesos erosivos durante esa etapa (Pliocuaternario) como, por ejemplo, los depósitos pertenecientes al Miembro superior de la Formación Detrítica de Las Palmas, junto a otros depósitos

terrestres y marinos de diversa índole. En este marco geológico general, las dunas de Maspalomas y su entorno inmediato constituyen un ámbito diferenciado donde predominan los materiales de origen sedimentario (figura 2.4) debido entre otros factores, a su localización en la desembocadura de la Cuenca de Fataga. No obstante, éstos aparecen rodeados por materiales volcánicos miocenos y pliocenos de los ciclos I y II.

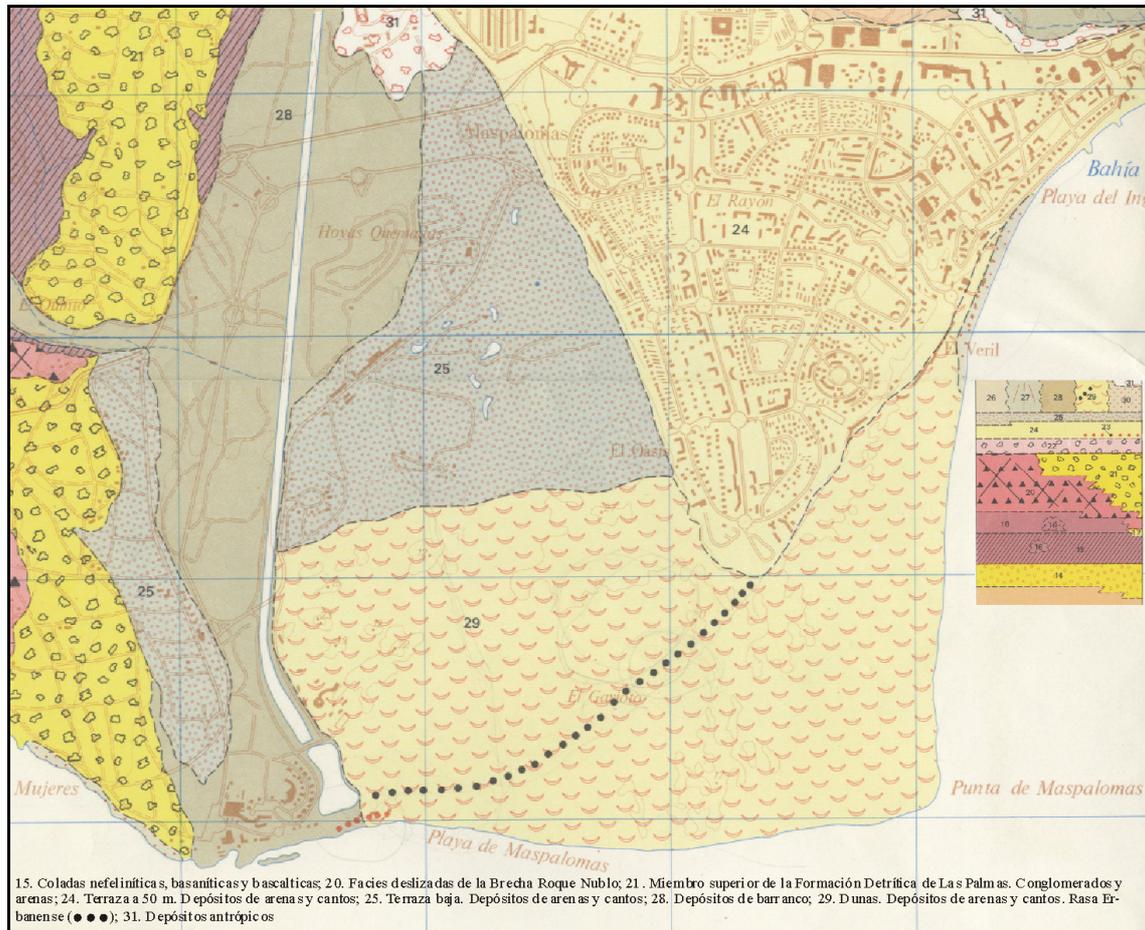


Figura 2.4. Mapa Geológico de Maspalomas modificado de Balcells *et al.* (1990).

2.2.1.1. Origen del campo de dunas de Maspalomas

El origen geológico de Maspalomas se puede dividir en dos etapas fundamentales. Por un lado, la formación de un abanico aluvial durante el Pleistoceno, como consecuencia de la erosión de la cuenca de Fataga. El descenso del nivel del mar durante las glaciaciones favoreció la formación de una serie de terrazas aluviales de naturaleza conglomerática, incididas por la erosión del barranco. El ascenso del mar en el Interglacial Presente (MIS-1) permitió la formación de la amplia superficie llana que conforma el sustrato subyacente de la mayor parte de campo de dunas, formado por depósitos sedimentarios aluviales y marinos.

La segunda etapa comienza con la acumulación de arena sobre el abanico aluvial. Hasta 2007 se consideraba que la acumulación de los sedimentos sobre la

llanura aluvial se produjo a partir de una regresión marina a finales de la glaciación Würn (Klug, 1968), si bien la actividad eólica se vio interrumpida durante el máximo Flandriense, reactivándose hace escasamente unos 2000 años. Sin embargo, hay otras investigaciones que han abordado otra hipótesis genética del campo de dunas de Maspalomas. En este sentido, algunos autores opinan que su formación debió producirse entre 1785 y 1838, en un evento que generó la acumulación de gran cantidad de arena en esta área (Ministerio de Medio Ambiente, 2007; Alonso *et al.*, 2008; figura 2.5). De cualquier forma, este estudio reciente no contradice totalmente los trabajos de Klug (1968), pues también en Maspalomas se localizan rocas sedimentarias y sedimentos originados durante el Holoceno.

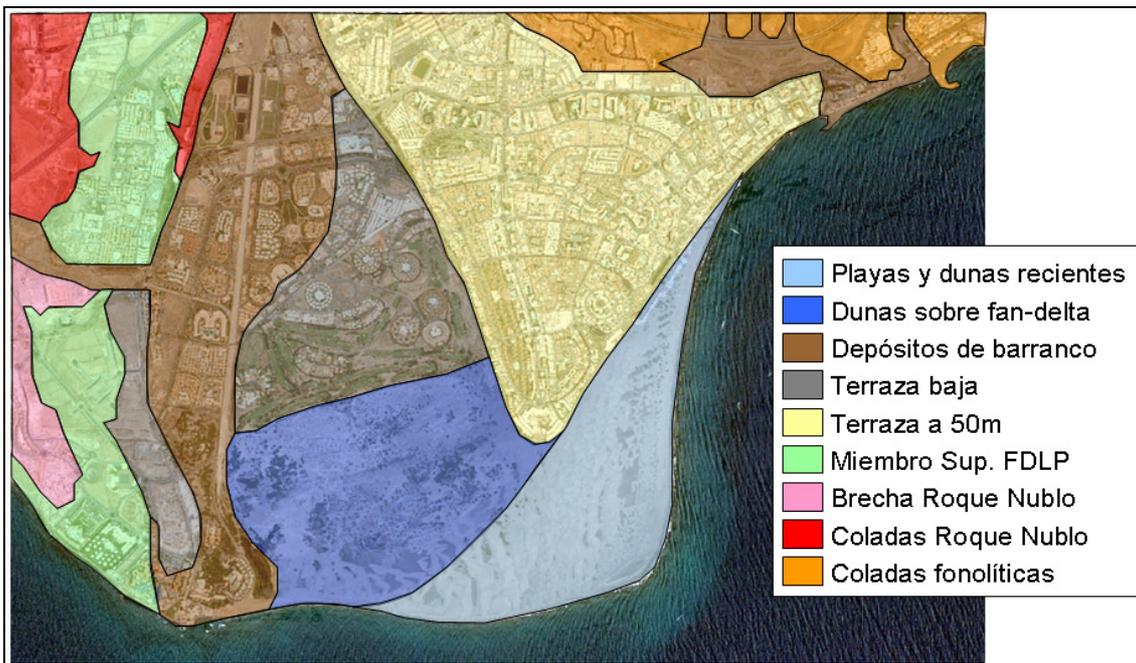


Figura 2.5. Mapa geológico de Maspalomas (tomado de Alonso *et al.*, 2008: 123).

La hipótesis de la formación reciente del campo de dunas de Maspalomas se sustenta en estudios sedimentológicos de muestras obtenidas a partir de un sondeo de 19 m de potencia realizado en la playa del Inglés (Ministerio de Medio Ambiente, 2007; Alonso *et al.*, 2008). El sondeo muestra una ruptura a una profundidad de 8-9 m debido a la existencia de dos tipos de materiales con características muy diferentes. Estos resultados, junto con la consulta de fuentes históricas, llevan a los autores de esta hipótesis a plantear las siguientes fases de formación:

- 1) Fase I: Acumulación subacuática: la plataforma preexistente en la playa del Inglés se fue colmatando por aportes de arenas aluviales y marinas, fundamentalmente con granos de bioclastos y litoclastos, lo que produjo la reducción desde los 20 m iniciales de profundidad a unos 8-9 m entre los años 1785-1838.

- 2) Fase II: Acumulación repentina: entre 1785-1838 se produjo una acumulación de gran cantidad de material, lo que permitió la formación del campo de dunas y la costa con una configuración similar a la actual, al menos hacia 1876. Por lo tanto, en un periodo máximo de 91 años (1785-1876) o mínimo de 38 años (1838-1876) se acumuló entre 8-9 m de potencia de sedimentos arenosos.

- 3) Fase III: Pérdida natural de sedimentos: a partir del siglo XIX los aportes de nuevos sedimentos son muy escasos. Además, la nueva configuración costera produce un cambio en la dinámica sedimentaria. Frente a la punta de la Bajeta existe un talud sumergido (veril) que conecta las zonas intermareales y submareales con los ambientes de plataforma, de tal manera que en los temporales de SO una importante cantidad de sedimentos arenosos se pierde por este talud. Debido a la profundidad en la que se depositan las arenas, ya no regresan a los ambientes submareales, intermareales o supramareales. En definitiva, se establece un balance sedimentario negativo que no se compensa con las escasas aportaciones de arena que proceden del banco situado al suroeste de Maspalomas o por los aluviales del barranco de Fataga.

Este estudio del MMA también incluye otros capítulos sobre la intervención humana en el sistema playa-duna, pero serán explicadas posteriormente cuando se comente la incidencia del desarrollo turístico en el sistema de dunas.

2.2.1.2. Características geomorfológicas

Con respecto a las características de los sedimentos arenosos es importante recordar la localización del campo de dunas de Maspalomas en la desembocadura del barranco de Fataga. Este emplazamiento determina que la arena tenga una composición mixta. Así, predominan los granos de bioclastos constituidos por fragmentos de mallas de algas y de moluscos marinos y en, menor proporción, aparecen granos de litoclastos volcánicos. Entre estos litoclastos aparecen fragmentos de rocas sálicas de composición fonolítica, aunque hay también terrígenos de rocas básicas basálticas, y minerales de naturaleza variada como, por ejemplo, olivinos, feldespatos, opacos, entre otros (Hernández Calvento y Mangas, 1984; Ministerio de Medio Ambiente, 2007). Los materiales terrígenos constituyen el 39%, mientras que los de origen organógenos representan el 61% (Ministerio de Medio Ambiente, 2007). Sin embargo, las características sedimentológicas de las arenas varían de forma significativa en función de su localización (figura 2.6). Además de las arenas eólicas, en el interior del sistema de dunas afloran materiales rocosos pleistocenos y holocenos, que han quedado exhumados como consecuencia de un déficit sedimentario que se ha visto potenciado por procesos de deflación eólica. Entre estos materiales sedimentarios se han

identificado depósitos de conglomerados, calcarenitas, eolianitas, paleosuelos y gravas aluviales (Hernández Calvento, 2002; Hernández Calvento y Mangas, 2004; Hernández Calvento, 2006; Pérez-Chacón *et al.*, 2007). Asimismo, en las depresiones interdunares de las dunas móviles afloran barras de cantos que marcan antiguas líneas de costa (Nadal y Guitián, 1983: 33-34).

Los sedimentos arenosos forman diferentes tipologías de dunas como: barjanas, cordones barjanoides, cordones transversales, dunas en vórtice, dunas eco, láminas de arena, así como distintos tipos de dunas vegetadas (Hernández Calvento, 2006). Estas geoformas poseen velocidades de desplazamiento diferentes en función de su localización, que oscilan entre los 0,76 y 12,33 m (Hernández Calvento, 2002: 191). Según este autor, las tasas de desplazamiento de las dunas están relacionadas, en general, con la posición que éstas ocupan con respecto a la terraza alta del Inglés y a las zonas colonizadas por la vegetación. A medida que las dunas están más alejadas de estos obstáculos, y más cercanas a la costa, éstas adquieren mayores velocidades de desplazamiento. Estudios más recientes han detectado tasas de avance de dunas móviles superiores a los 30 m en la playa del Inglés (Ojeda *et al.*, 2007: 225).

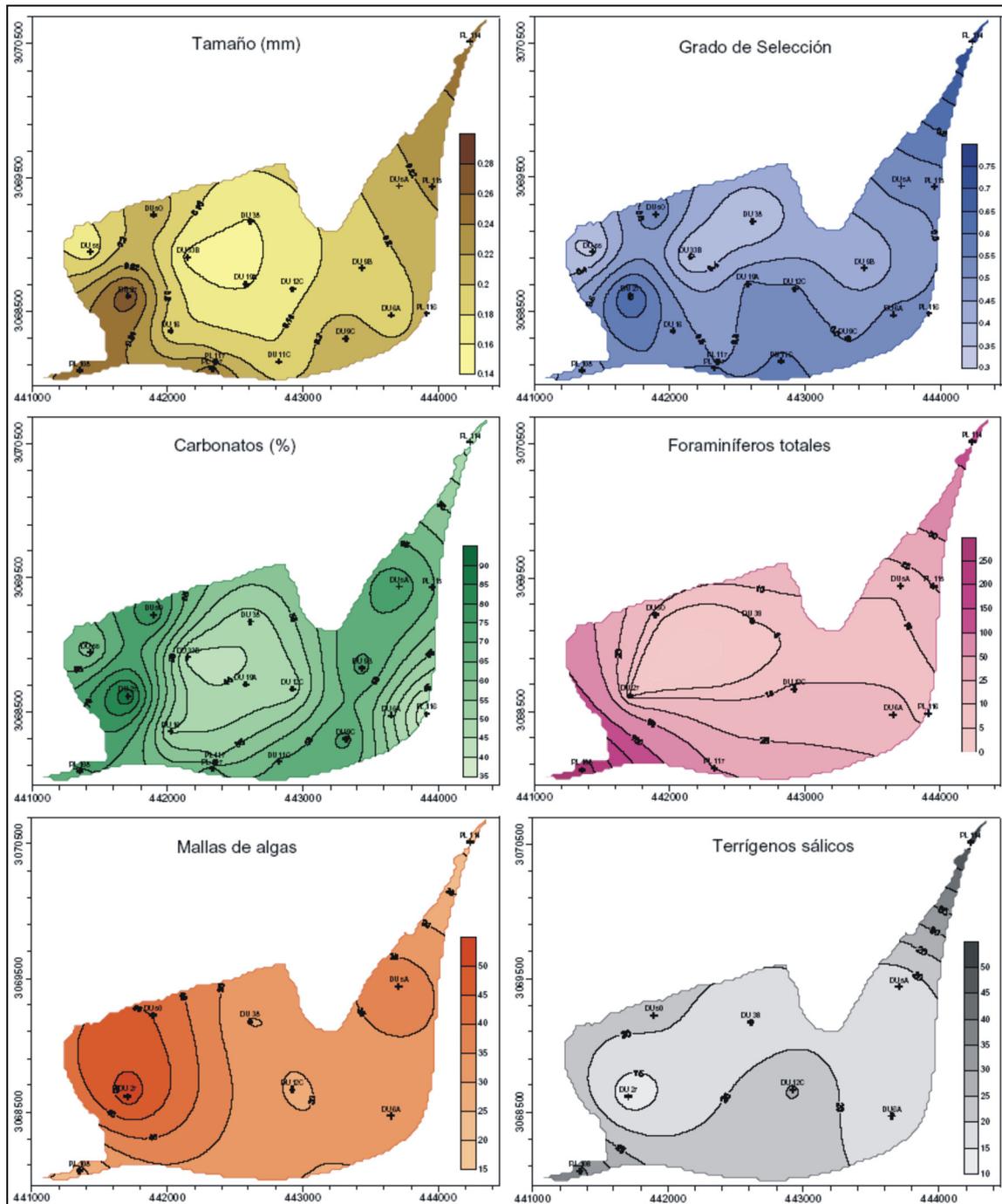


Figura 2.6. Distribución espacial de las características sedimentológicas, petrológicas y micropaleontológicas de los sedimentos de las dunas (tomado de Ministerio de Medio Ambiente, 2007).

La geomorfología de Maspalomas ha sido estudiada por diferentes autores, que han identificado diferentes unidades. Desde el punto de vista geológico-geomorfológico (Nadal y Guitián, 1983; Balcells *et al.*, 1990; figura 2.4), la zona sedimentaria se puede dividir en tres unidades principales: las terrazas sedimentarias, ocupadas actualmente por el campo de golf y las urbanizaciones turísticas; la desembocadura del barranco de Maspalomas, constituida por materiales aluviales, que representa una antigua área de marismas y lagunas litorales formadas por las crecidas del barranco de Maspalomas y las inundaciones marinas, de la que en la actualidad queda como único testigo la charca

de Maspalomas; y, finalmente, el campo de dunas y sus playas asociadas. Como se indicó anteriormente, el área de estudio considerada en esta tesis se limita a la última unidad. Los contrastes internos del campo de dunas fueron descritos inicialmente por Nadal y Guitián (1983), quienes diferenciaron tres unidades, atendiendo a su fisonomía y su grado de evolución (figura 2.7):

- Zona externa: abarca el sector de dunas móviles que se extiende desde playa del Inglés hasta el faro de Maspalomas. Está caracterizada por la presencia de arena con un color más oscuro que la del interior, debido a la alta proporción de minerales pesados, los cuales ofrecen una mayor resistencia al transporte que los de origen organógeno.
- Zona intermedia: se sitúa al norte de la Zona externa y limita al este con la terraza del Inglés y al oeste con el barranco de Maspalomas. Las dunas presentan una menor actividad debido al obstáculo que ofrece la terraza del Inglés, y la cobertura vegetal es mayor.
- Zona interna: situada al norte de la unidad anterior. La movilidad de las dunas es muy baja, predominando los procesos de estabilización del sedimento. La arena de esta unidad presenta un color más claro y luminoso debido a su mayor contenido organógeno. Las especies vegetales más abundantes son *Cyperus capitatus* y *Neurada procumbens*.

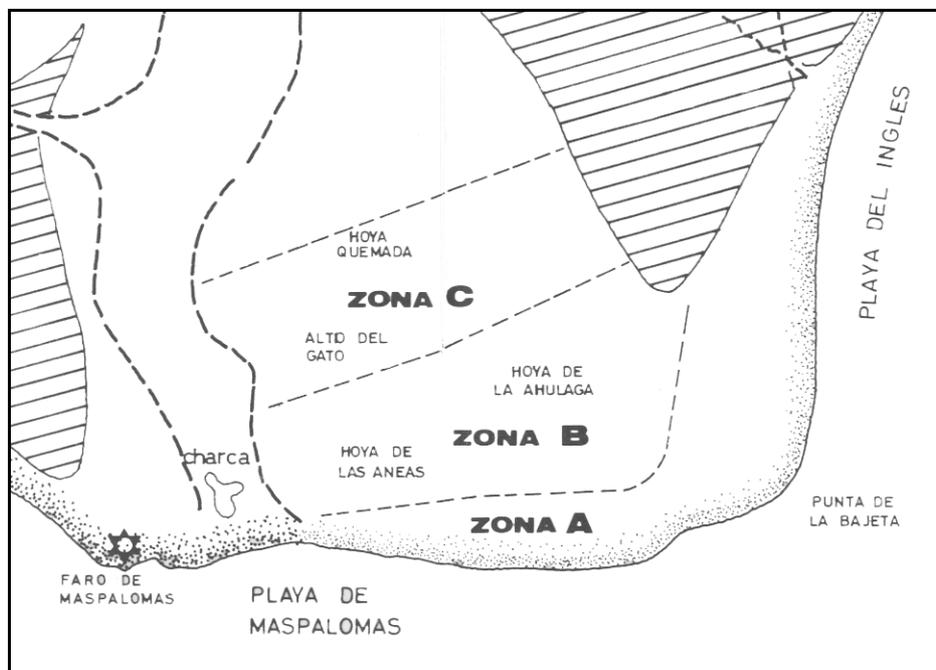


Figura 2.7. Zonificación del campo de dunas de Maspalomas según su fisonomía (tomado de Nadal y Guitián, 1983).

Por su parte, y basándose en la fotografía aérea del año 1991, Martínez (1994: 467) diferencia cuatro zonas en función de los procesos sedimentarios eólicos (figura 2.8):

1. Zona de actividad sedimentaria incipiente
2. Zona activa
3. Zona de actividad sedimentaria amortiguada
4. Zona de actividad terminal

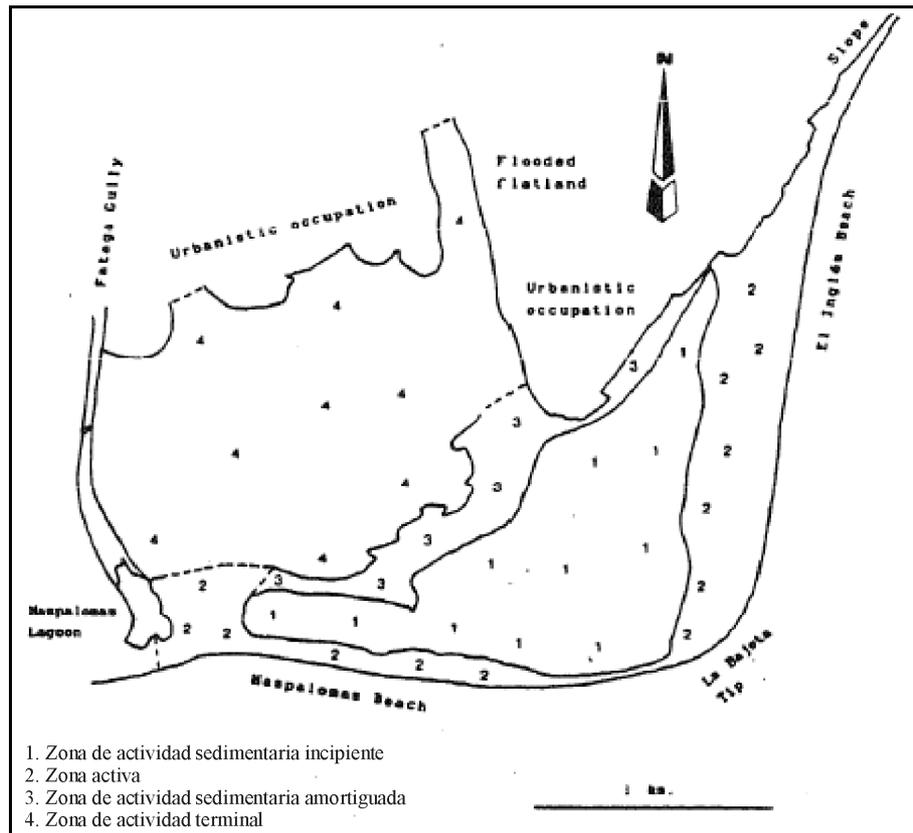


Figura 2.8. Cartografía de los procesos sedimentarios eólicos en el campo de dunas de Maspalomas (tomado de Martínez, 1994: 475). Nota: la zona 1 del mapa en realidad se corresponde con la 2 y viceversa.

Posteriormente, Hernández Calvento (2006: 61-64) diferenció las siguientes unidades sedimentarias eólicas (figura 2.9):

A. Franja del Inglés: ocupa el área más oriental de la zona de estudio. Constituye el área de entrada de sedimentos en el sistema. Esta unidad está subdividida en otras dos en función de su exposición a los vientos efectivos, la incidencia de la terraza sedimentaria, la variación fisionómica de los ejemplares de *Traganum moquinii*, la distribución de los equipamientos de playa y la evolución de los impactos ocasionados por éstos:

- Sector Norte (A1): corresponde con la zona de entrada de las arenas y las acumulaciones dunares resultantes de la parte norte de la Franja. Es la zona donde los ejemplares de *Traganum moquinii* alcanzan un mayor tamaño.

- Sector Sur (A2): ocupa el sector sur de la franja y constituye una zona de formación de dunas. Los ejemplares de *Traganum moquinii* tienen un porte considerablemente menor.

B. Terraza sedimentaria: es donde se asienta la urbanización del Inglés. Está formada por sedimentos aluviales antiguos, compuestos por depósitos de arenas y cantos de procedencia lávica (principalmente fonolitas), unidos por una matriz arcillosa con cemento carbonatado. Se divide en tres unidades:

- Sector sur de la terraza (B3): corresponde a la zona por donde los sedimentos accedían al interior del sistema en el pasado, antes de que la terraza fuera urbanizada.

- Sector oeste de la terraza (B4): representó el banco de sedimentos para las unidades interiores (C6 y C7). Se utilizó como zona de extracción de arena.

- Vértice sur de la terraza (B5): esta unidad adquiere importancia tras la construcción de la urbanización del Inglés, ya que en ella se desarrollan algunas geoformas peculiares. A partir de ese momento se convertirá en la zona de provisión de sedimentos a un sector intermedio del sistema (o “de las hoyas”) (C7).

C. Interior del sistema: es la zona de mayor acumulación de sedimentos. Una parte considerable de esta unidad está colonizada por la vegetación, lo que ha ocasionado la paralización del movimiento de las arenas. Se ha dividido en tres subunidades:

- Área norte (C6): limita con el campo de golf. Es un área de dunas fijas, con algunos enclaves residuales que mantienen cierta movilidad. La zona esta ocupada en gran parte por la vegetación.

- Sector de “las hoyas” (C7): esta situada al sur del área norte. En él afloran materiales aluviales. La zona central es un área deprimida donde se forman llanuras salitrosas por el ascenso por capilaridad del agua subálvea. Es la zona donde se ha producido un mayor incremento de la vegetación desde los años sesenta del pasado siglo.

- Área sur (C8): se trata de una zona de dunas móviles, donde se produce el tránsito del mayor volumen de sedimentos.

D. Sector occidental del sistema: constituye el final del tránsito de sedimentos. Se ha subdividido en dos zonas:

- Área oriental del barranco de Maspalomas (D9): tiene una dinámica sedimentaria eólica residual, presentando importantes procesos de deflación. Antiguamente en esta zona se asentaron dos equipamientos turísticos, el Hotel Dunas y el Centro Helioterápico, demolidos en los años ochenta del siglo pasado.

- Entorno de la playa de Maspalomas (D10): se corresponde con la desembocadura del barranco de Maspalomas y es un área residual de tránsito de sedimentos.

- Barranco y Oasis de Maspalomas (D11): en el pasado esta unidad estaba formada por una zona húmeda, con marismas y lagunas costeras, si bien en la actualidad se encuentra parcialmente urbanizada.

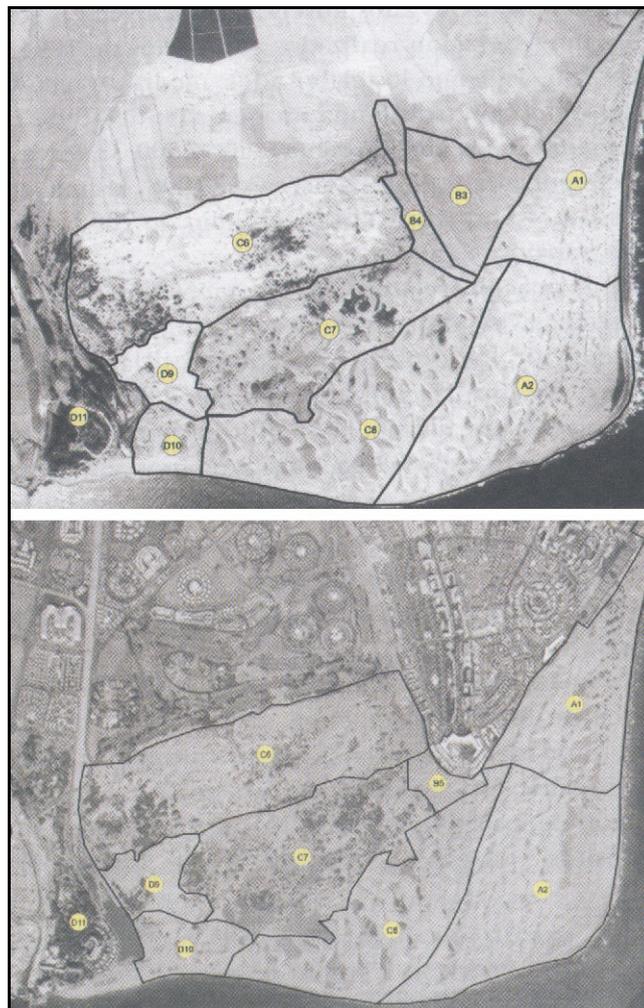


Figura 2.9. Unidades sedimentarias eólicas a principio de los años sesenta (arriba) y en el año 2000 (abajo) (tomado de Hernández Calvento, 2006: 60).

2.2.1.3. Dinámica del sistema de dunas

La dinámica dunar fue caracterizada en sus aspectos básicos por Nadal y Guitián (1983) y Martínez (1986; 1990). El segundo autor define la que denomina “provincia morfodinámica de Morro Besudo-Faro de Maspalomas”, donde establece el siguiente

ciclo sedimentario: los sedimentos acceden al campo de dunas por la playa del Inglés, por la incidencia de los vientos alisios del NE, y posteriormente salen por la playa de Maspalomas. Cuando se forman temporales de suroeste una parte de estos sedimentos vuelven a la zona de entrada de forma que el ciclo se retroalimenta.

Posteriormente este planteamiento fue ampliado y matizado por Hernández Calvento (2006), que definió el siguiente funcionamiento: los sedimentos acceden al sistema por la playa del Inglés bajo el dominio de los vientos alisios del NE. Una vez secada la arena en el estrán, se moviliza, originándose acumulaciones a sotavento en la playa alta, debido a la presencia de ejemplares de *Traganum moquinii*. Los equipamientos turísticos, principalmente quioscos de playa, hamacas y sombrillas además de estructuras cortaviento construidas por los usuarios de la playa (denominadas coloquialmente “goros”), también condicionan el recorrido de la arena, reteniéndola y formando pasillos de deflación eólica.

En su avance hacia el interior del sistema, estas primeras dunas se convierten en barjanas, que posteriormente se unen para formar dunas coalescentes y cordones barjanoides y transversales. Las dunas libres se desplazan en el sector sur sobre amplias superficies de deflación, constituidas por un sustrato formado por arena humedecida por capilaridad y conteniendo eflorescencias salinas.

En el sector norte, por su parte, estas geoformas presentan un mayor volumen, y no se identifican formas erosivas significativas, pues la terraza del Inglés posibilita la acumulación de sedimentos a barlovento. La influencia de la terraza del Inglés en la dinámica sedimentaria eólica también afecta al transporte sedimentario en otras áreas. Así, en el sector sur las dunas se desplazan en sentido NNE-SSO, mientras que en el vértice sur de la terraza (B5) los depósitos móviles se orientan en dirección contraria a los vientos efectivos, adquiriendo la típica forma de dunas de herradura o de vórtice.

Considerando el avance de las dunas hacia el SO, en la unidad intermedia del sistema (C7) la arena es retenida en mayor medida, debido a la existencia de vegetación arbórea y arbustiva, que se ve favorecida en su desarrollo por la mayor disposición de superficies de deflación donde afloran materiales aluviales, o por la proximidad a la superficie del nivel freático.

Por su parte, el sector septentrional (C6) se caracteriza por estar totalmente estabilizado, con la excepción de algunas zonas residuales móviles, mientras que la zona occidental (D9) constituye un arenal relicto. Al sur de las hoyas (C7) se desarrollan las mayores dunas en tránsito del sistema (C8). En esta unidad confluyen los sedimentos procedentes de las unidades A1 y A2. Las dunas avanzan en dirección NE-SO hasta el lugar conocido como la cañada de la Penca, donde una parte de los sedimentos continúan su recorrido hacia el barranco de Maspalomas, contribuyendo a mantener la zona oeste de la playa del mismo nombre.

Finalmente, los sedimentos vuelven al inicio del ciclo debido a la dinámica marina. El oleaje del oeste moviliza la arena de la playa de Maspalomas, donde las dunas aparecen acantiladas por la erosión marina. En ocasiones, el agua de mar penetra en el interior del sistema a través de las depresiones interdunares. La transferencia de

los sedimentos de oeste a este se materializa en el crecimiento hacia el mar de la punta de la Bajeta. A partir de la segunda mitad del otoño, tanto el viento como el oleaje vuelven a ser de componente NE, produciéndose nuevamente la entrada de sedimentos al sistema, lo que da lugar a la formación de un pequeño *lagoon* en la punta de la Bajeta.

2.2.2. Características climáticas

El anticiclón de las Azores, que es el origen de los vientos dominantes (alisios del NE), es el que rige el clima de las islas Canarias. Durante el verano los alisios tienen una frecuencia del 90% y el resto del año del 65% (Marzol, 2000: 87). Sin embargo, los desplazamientos de este centro de acción permite la llegada de las masas de aire marítimas, que producen las precipitaciones, o la penetración de las masas de aire continentales, vientos del SE que transportan a las islas tierra en suspensión desde África, y que suelen estar acompañados por altas temperaturas y una baja humedad relativa.

Por su parte, los factores geográficos locales que condicionan el clima del sistema de dunas de Maspalomas son la exposición, la altitud y la humedad relativa. Su situación en la zona de sotavento de la isla, la denominada Xerocanaria (Santana y Pérez-Chacón, 1991:487), lleva consigo dos consecuencias directas. En primer lugar, la baja nubosidad, debido a que el mar de nubes transportado por los vientos alisios queda retenido en la vertiente norte por la barrera montañosa existente en el centro de la isla, que oscila entre los 1500-1950 m.s.n.m. Este fenómeno ocurre sobre todo en verano, cuando la inversión térmica está situada a una menor altitud, lo que produce la existencia de una mayor insolación en el sur. La ausencia de mar de nubes también impide la existencia de lloviznas y reduce la humedad ambiental. Y, en segundo lugar, que tampoco se beneficia de las lluvias procedentes de las borrascas del noreste, que son las más frecuentes en Canarias, pues las barreras orográficas ya mencionadas lo impiden, junto a aspectos vinculados a la dinámica atmosférica.

La localización de Maspalomas en una altitud inferior a los 100 m.s.n.m favorece, a su vez, que las precipitaciones sean escasas y las temperaturas medias anuales cálidas.

Las precipitaciones registran una media anual inferior a los 100 mm y se caracterizan por su irregularidad interanual y torrencialidad (Marzol, 1988: 60), mientras que la temperatura media anual es de 23,5°C, y las máximas absolutas oscilan entre los 18°C y 24°C en invierno y los 30°C y 44°C en verano.

La humedad relativa es elevada debido a la cercanía al mar, con promedios que oscilan entre el 71 y 75% (Pérez-Chacón *et al.*, 2007: 5).

El viento constituye el elemento climático de mayor importancia en Maspalomas. La localización del sistema de dunas en el extremo sur de la isla de Gran Canaria provoca que los vientos tengan dos direcciones en esta zona. Esto se debe a que rodean la isla por ambos lados, de forma que en Maspalomas se encuentran (figura 2.10) los que proceden de bordear la costa oeste y los de la costa este (Hernández Calvento,

2006). Según Hernández Calvento (2006: 142-153), el viento de la zona presenta tres variaciones estacionales y diarias: la primera está relacionada con la dirección y viene determinada por la estacionalidad. Se caracteriza por la alternancia de dos direcciones: oeste y noreste (ENE). Los vientos del noreste predominan durante finales del otoño y principios de la primavera, mientras que los vientos del oeste abarcan principalmente los meses de verano. Entre ambos se establecen dos épocas de transición (meses de abril y mayo, por un lado, y los de septiembre y octubre, por otro) en las que se alternan ambas situaciones. Teniendo esto en cuenta, no se entendería por qué las dunas se desplazan hacia el suroeste, ya que no hay un claro predominio del viento de esta dirección. Esto se explica por la segunda variación, ya que las velocidades medias mensuales son mayores cuando se producen vientos del noreste. Finalmente, la tercera variación también contribuye a explicar que los sedimentos se desplacen de NE-SO. Se trata de la variación y velocidad diaria: las mayores velocidades coinciden con las horas centrales del día, y los vientos son más fuertes cuando domina la componente NE.

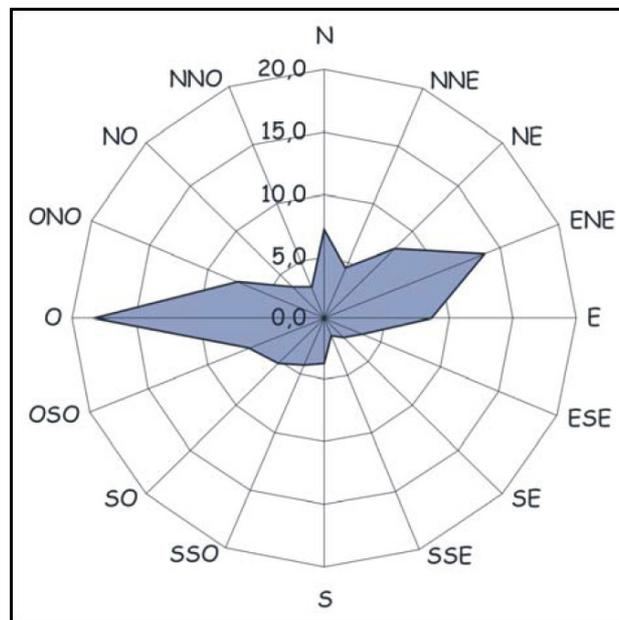


Figura 2.10. Frecuencia anual de las direcciones de viento en Maspalomas entre 1997-2005 (tomado de Pérez-Chacón *et al.*, 2007: 5).

En general, las mayores velocidades del viento se producen en los meses de invierno, sobre todo en febrero con una media de 4,9 m/s, mientras que en verano la media se reduce a 3,1 m/s (Pérez-Chacón *et al.*, 2007). Según estos mismos autores, los vientos de más de 5,1 m/s (vientos efectivos), con capacidad para movilizar los sedimentos, predominan durante el invierno, especialmente en el mes de febrero (figura 2.11). En verano el porcentaje se reduce de forma significativa hasta un mínimo del 11,7% en julio.

Asimismo la dirección de los vientos efectivos es predominantemente de componente NE, ENE y E, abarcando el 54,5%, mientras que los de OSO, O y ONO agrupan al 30,8% restante (Pérez-Chacón *et al.*, 2007; figura 2.12).

En definitiva, las dunas tienen una mayor movilidad durante el invierno, que es cuando los vientos de más de 5,1 m/s son más frecuentes, y lo hacen siguiendo la dirección NE-SO, que es la predominante durante este periodo.

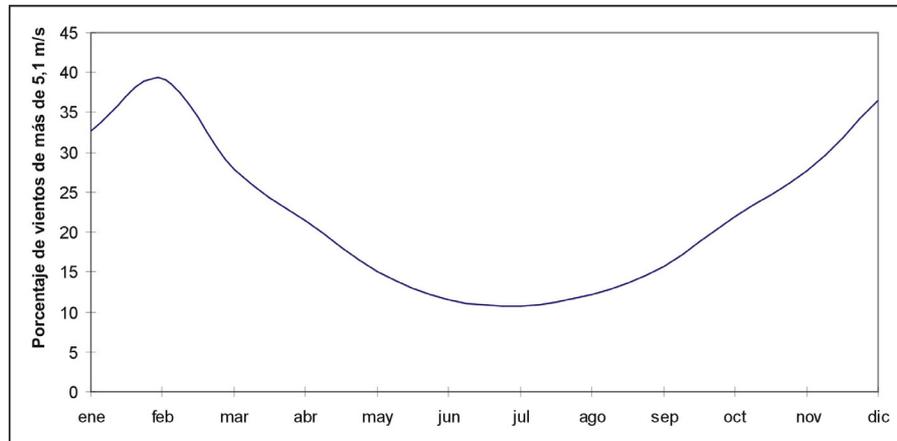


Figura 2.11. Porcentaje mensual de los vientos de más de 5,1 m/s en Maspalomas (1997-2005) (tomado de Pérez-Chacón *et al.*, 2007: 6).

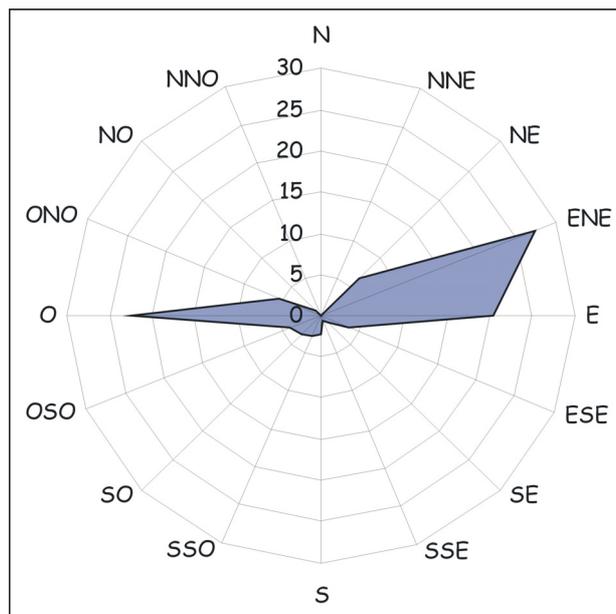


Figura 2.12. Dirección del viento con velocidades superiores a 5,1 m/s (tomado de Pérez-Chacón *et al.*, 2007: 7).

2.2.3. Vegetación y fauna

Dentro del contexto insular, la biocenosis del sistema de dunas de Maspalomas presenta unas características singulares y diferenciables. Ya Bannerman (1922) la identificó como un área con identidad propia dentro de las zonas de fauna definidas para la isla de Gran Canaria. El predominio de sustratos arenosos, donde se incluyen áreas móviles, y la existencia de un humedal de cierta importancia que ha sobrevivido desde

la colonización europea, la convierte en un espacio único para la flora y fauna terrestre insular.

2.2.3.1. Vegetación

La vegetación de Maspalomas está condicionada por las características bioclimáticas de la zona. Desde el punto de vista fitosociológico se incluye dentro del denominado “macrobioclima mediterráneo, bioclima xérico-oceánico, termotipo inframediterráneo y ombrotipo hiperárido superior” (Del Arco *et al.*, 2002; Del Arco y González, 2003). Por lo tanto, se corresponde con el piso bioclimático inframediterráneo desértico hiperárido, donde la serie de vegetación climatófila es la correspondiente al Tabaibal de *Euphorbia balsamifera* incluida fitosociológicamente en *Euphorbia balsamiferae sigmetum* (Del Arco *et al.*, 2002). Sin embargo, la existencia de sustratos arenosos determina la presencia de comunidades vegetales azonales formada por especies psamófilas (Del Arco *et al.*, 2002: 28).

Los primeros trabajos desarrollados en Maspalomas (Esteve, 1968; Sunding, 1972) estudian la vegetación antes de la construcción de las urbanizaciones turísticas. Estos estudios se centraron principalmente en la definición y descripción de las asociaciones fitosociológicas *Euphorbio-Cyperetum kalli*, *Traganetum moquinii*, *Cyperetum laevigati*, y de los juncales de las marismas de Maspalomas (asociación *Schizogyno-Juncetum acuti*). Junto a ellos, otros trabajos posteriores (Martín *et al.*, 1978; Nadal y Guitián, 1983), permiten la identificación de los siguientes conjuntos de vegetación:

1. Franja costera desde playa del Inglés hasta la charca de Maspalomas. Caracterizada por la Asociación *Traganetum moquinii*, formada únicamente por esta especie vegetal. En la playa del Inglés se sitúan a distancias de entre 50 y 150 m metros de la línea de costa. En la playa de Maspalomas el número de ejemplares es menor, localizándose en los llanos interdunares asociados a otras especies como *Suaeda mollis*.
2. Vegetación que ocupa las áreas deprimidas con llanos elípticos entre las dunas barjanas cercana a la costa. En esta zona se localiza la Asociación *Cyperetum laevigati*, que constituye una comunidad estrictamente halófila. A *Cyperus laevigatus* le acompañan otras especies menos frecuentes como, por ejemplo, *Launaea arborescens*, *Salsola kali*, *Suaeda mollis* y, en las zonas más próximas al mar, *Traganum moquinii*.
3. Zona interior del sistema de dunas, formada por una extensa zona deprimida dominada por *Tamarix canariensis*. En función de las condiciones ecológicas locales distinguen tres tipos de vegetación: matorral de *Launaea arborescens* (As. *Launaetum arborescentis*, Sunding, 1972); matorral de *Suaeda mollis* (As.

Chenoleo-Suaedetum vermiculatae, Sunding, 1972) y, finalmente, macizos de las herbáceas *Juncus acutus*, localizados en las cercanías de la laguna costera. También es posible encontrar palmeras canarias (*Phoenix canariensis*) de pequeño porte.

4. Zona septentrional del campo de dunas, que está caracterizada por la presencia de dunas fijas sobre las que se asienta la Asociación *Euphorbio-Cyperetum kalli*, dominada por *Cyperus capitatus* y acompañada por *Ononis serrata* y *Neurada procumbens*. Esta última especie parece haber sido introducida desde el norte de África a través de los dromedarios (Sunding, 1972). Asimismo, a partir de la instalación del campo de golf han aparecido diferentes especies ruderales, debido a la existencia de una mayor humedad edáfica y a la introducción de semillas de nuevas especies.

5. La charca de Maspalomas, cuya vegetación está caracterizada por dos especies de plantas acuáticas *Ruppia rosetella* y *Chara fragilis* (González, 1977).

6. En el margen oeste de la charca de Maspalomas aparece un palmeral formado por *Phoenix canariensis*, *Phoenix dactylifera* e híbridos de ambas especies.

Posteriormente Hernández Calvento (2006), completando los trabajos de inventario del Plan Director de la Reserva Natural, de 1996, señala que la flora del campo de dunas costero de Maspalomas está compuesta por 79 especies vegetales. Asimismo las comunidades vegetales más significativas presentes en Maspalomas según este autor son las siguientes (figura 2.13):

Matorral halonitrófilo de *Traganum moquinii* (As. *Traganetum moquinii*): comunidad monoespecífica formada por el matorral halófilo-psamófilo *Traganum moquinii*. Es la más cercana al litoral (50-150 m de la línea de costa), localizándose desde la playa del Inglés hasta la punta de la Bajeta. Cuenta también con un enclave en la playa de Maspalomas, en la Cañada de la Penca. Constituye el primer obstáculo a la dinámica sedimentaria eólica, conformando la primera línea de dunas estables del sistema (duna costera o *foredune*).

Céspedes de *Cyperus laevigatus* (As. *Cyperetum laevigati*): característica de los espacios interdunares, donde es dominante *Cyperus laevigatus*. En ocasiones puede estar acompañada de otras especies como *Launaea arborescens*, *Tamarix canariensis* y *Suaeda mollis*.

Comunidad de *Zygophyllum fontanesii*: esta comunidad se ha expandido recientemente sobre una de las principales llanuras de deflación. Está dominada por la halófila *Zygophyllum fontanesii* a la cual la acompañan otras dos especies: *Tamarix canariensis* y *Suaeda mollis*.

Matorrales de *Suaeda vermiculata* (As. *Chenoleo-Suaedetum vermiculatae*): matorral en ocasiones monoespecífico, que se localiza en aquellas zonas donde el sustrato posee mayor contenido en arcillas y sales. Su expansión ha aumentado con la disminución del aporte de arena.

Matorrales de *Juncus acutus*, *Schizogyne glaberrima* y *Launaea arborescens* (As. *Schizogyno-Juncetum acuti*): se localizan en el interior del sistema dunar, allí donde el nivel freático está cercano a la superficie. Es la comunidad con mayor densidad y vigorosidad en esa zona.

Matorrales de *Launaea arborescens*: comunidad monoespecífica que se desarrolla en los espacios interdunares, ya sea entre dunas móviles o entre dunas fijas. En el primer caso suelen terminar sepultadas, debido al avance de las dunas. En cambio, las que se distribuyen entre las dunas fijas son relativamente estables y se localizan en zonas con presencia de arcillas.

Bosquetes de *Tamarix canariensis*: se distribuyen por todo el interior del sistema dunar. La composición florística y porte de los ejemplares de *Tamarix canariensis* es variable en función de las características ambientales locales. De este modo, podemos encontrar desde individuos aislados sobre dunas móviles a bosquetes con ejemplares de considerable tamaño y antigüedad. Se distinguen cuatro tipos distintos: bosquetes en hoyas, poblaciones sobre dunas estabilizadas, poblaciones culminantes en dunas móviles y poblaciones culminantes en dunas terminales.

Praderas terofíticas de *Cyperus capitatus*, *Ononis serrata* y *Neurada procumbens* (As. *Euphorbio-Cyperetum kali*): se localizan en las dunas estabilizadas y están formadas por geófitos (*Cyperus capitatus*) y terófitos con predominio de *Ononis serrata*. En los años húmedos aparecen también *Eragrostis barrelieri*, *Schimus barbatus*, *Mairetis microsperma* y *Lobularia lybica*, además de la especie exótica anual *Neurada procumbens*.

Matorral de *Plocama pendula*: comunidad relictica que indica la presencia de un paleobarranco cubierto posteriormente por las dunas. Está formada únicamente por individuos alineados de *Plocama pendula*.

Comunidades helofíticas: formadas por especies como *Phragmites australis*, *Thypha domingensis* y *Arundo donax*, y otras hidrofíticas como *Juncus acutus* y *Juncus maritimus*, que ocupan la zona comprendida entre el cauce del barranco de Maspalomas y el sistema dunar, donde posiblemente se formaban encharcamientos temporales en el pasado. Están principalmente vinculados al entorno de la charca de Maspalomas.

Comunidades ruderal-nitrófilas: ocupa las zonas más alteradas por las actividades humanas, como las que han sido removidas y los bordes de carreteras. Podemos encontrar numerosas especies, entre las que destacan *Mesembryanthemum crystallinum*, *Mesembryanthemum nodiflorum*, *Nicotiana glauca* y *Ricinus communis*.

altas y juncos, 92D0-Arbustedas, tarajales y espinares de corrientes, ramblas y lagunas, y 9370-Palmerales de *Phoenix*. Sin embargo, en la cartografía oficial del Gobierno de Canarias solamente se identifican dos hábitats, siendo el primero las *dunas costeras fijas con vegetación herbácea (dunas grises)*, que se asocia a los matorrales de *Traganum moquinii* existentes en la playa alta del Inglés, y el segundo el hábitat de *Arbustedas, tarajales y espinares de corrientes, ramblas y lagunas*, que aparece ocupando la totalidad del sector norte del sistema de dunas.

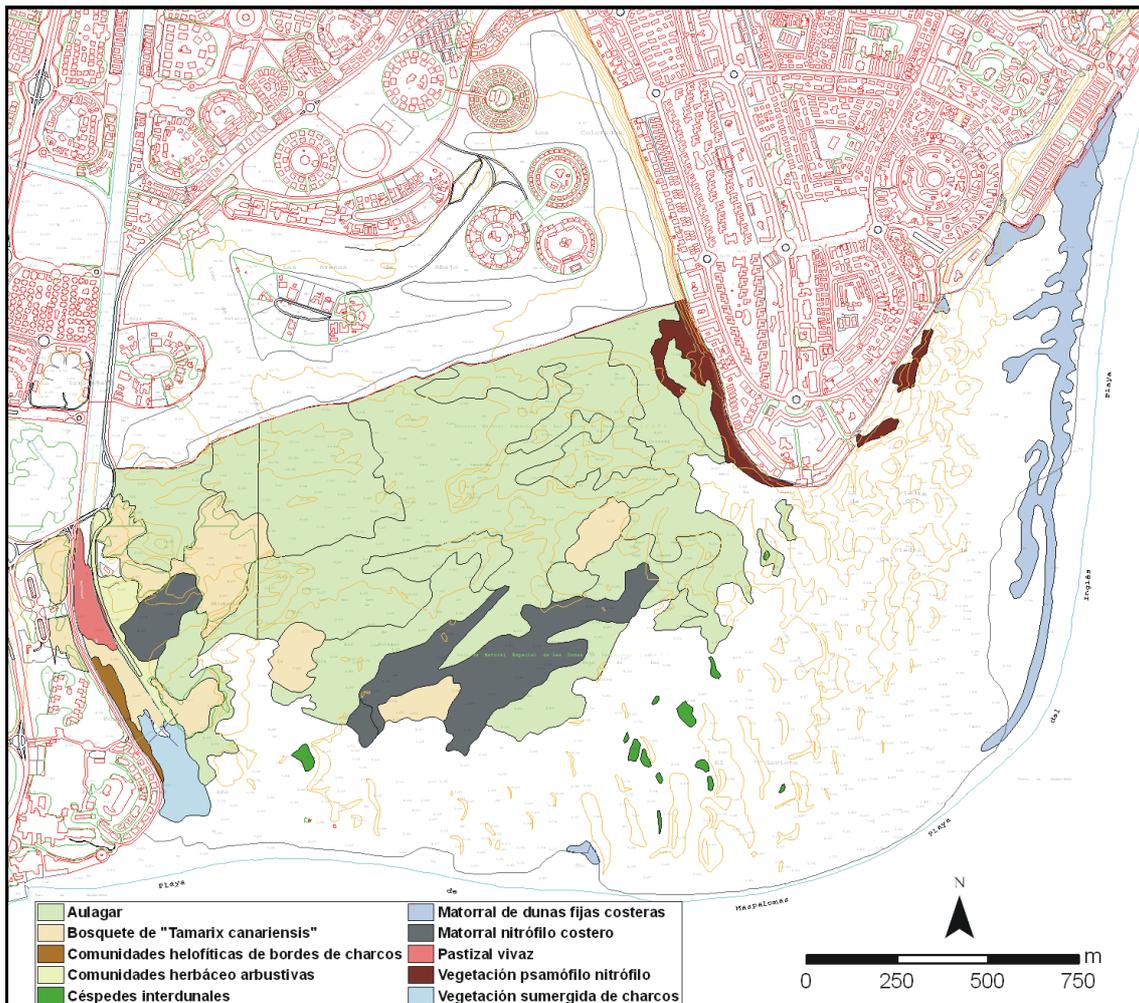


Figura 2.14. Mapa de vegetación de Maspalomas (tomado de Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

2.2.3.2. Fauna

La fauna de la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas, como consecuencia de estar situada en un territorio insular, está compuesta principalmente por invertebrados, reptiles y aves, siendo los mamíferos muy escasos y, los que existen, han sido mayoritariamente introducidos. Los invertebrados hasta el momento están poco estudiados, si bien cabe mencionar la presencia de interesantes coleópteros vinculados a los sistemas de dunas, de los cuales en Maspalomas se pueden encontrar hasta 59 especies (Naranjo, 1999: 206). Destaca la especie endémica local *Pimelia sparsa*

albohumeralis, la cual se restringe a un área de 1.000 m² en las dunas cercanas a la Charca (García y Peña, 1995 citado en Naranjo, 1999: 206). Otro escarabajo típico de dunas litorales presente en Maspalomas es *Pimelia granulicollis*, endemismo de la isla de Gran Canaria y cuyo hábitat se encuentra cada vez más reducido debido a la expansión urbanística. Asimismo habitan la zona diversas especies de escarabajos acuáticos, cuya área de distribución en Canarias se restringe a la charca de Maspalomas.

Precisamente esta laguna también es el hábitat de una comunidad de peces constituida por 20 especies, todas ellas menos una, el guppy (*Poecilia reticulata*) que es introducido, son típicas de los fondos marinos aledaños (Naranjo, 1999: 217).

En cuanto a los reptiles, destaca principalmente la presencia abundantísima del lagarto gigante de Gran Canaria (*Gallotia stehline*). Este larcétido alcanza la mayor longitud de los presentes en Canarias, llegando a los 80 cm en los ejemplares más longevos. Además, podemos encontrar otras dos especies de reptiles, el perenqué (*Tarentola boettgeri*) y la lisa variable (*Chalcides sexlineatus*). Las tres especies son endémicas de Canarias, siendo la primera y la última exclusivas de Gran Canaria.

Las aves son -con diferencia- el grupo animal vertebrado mejor representado. La avifauna está compuesta por dos conjuntos bien diferenciados, las nidificantes y las migratorias. Según Martín y Lorenzo (2001), Trujillo (2002) y Lorenzo (2007) y observaciones personales, la avifauna nidificante está formada en la actualidad por un total de 28 especies, de las cuales al menos tres han sido introducidas por el ser humano: cotorra argentina (*Myiopsitta monachus*), cotorra de Kramer (*Psittacula krameri*) y estrilda común (*Estrilda astrild*). Estas especies conviven en un espacio caracterizado por ser una zona de interfaz entre un área fuertemente humanizada y otra natural. De este modo, la avifauna de este espacio geográfico es una combinación de especies antropógenas y otras que prefieren hábitats con un mayor grado de naturalidad. Asimismo, la zona natural es una combinación única en el contexto regional de aves típicas de zonas húmedas, de dunas móviles y de dunas estabilizadas. Por su parte, las aves migratorias se componen de al menos 39 especies. De éstas, unas 11 especies se detectan todos los años, mientras que las restantes son irregulares o accidentales. Las aves migratorias están vinculadas principalmente a la charca de Maspalomas, aunque algunas utilizan el interior de las dunas como zona complementaria de alimentación.

Las aves están asociadas a determinados hábitats, de tal forma que se pueden distinguir diferentes ambientes en función de las especies que los utilizan como lugar de nidificación, alimentación o descanso:

Laguna litoral: la charca de Maspalomas se corresponde con lo que ha pervivido de una antigua área de marismas y lagunas costeras. Actualmente constituye una laguna litoral de aguas salobres, en cuyos márgenes se detecta vegetación helofítica caracterizada por la presencia de carrizos (*Phragmites australis*), cañas (*Arundo donax*), y enneas (*Thypha domingensis*), además de tarajales (*Tamarix canariensis*) y juncos (*Juncus acutus*). Asimismo se puede encontrar una comunidad de plantas acuáticas sumergida constituida por *Ruppia maritima* y el alga *Lamprothamnium succinctum*. Su

importancia ornitológica es considerable, ya que es prácticamente el único ecosistema de este tipo que existe en el archipiélago Canario. Su avifauna está compuesta por especies nidificantes y otras migratorias (invernantes o de paso). Las aves acuáticas nidificantes en la charca de Maspalomas son dos especies de limícolas, el chorlito chico (*Charadrius dubius curonicus*) y el chorlito patinegro (*Charadrius alexandrinus alexandrinus*), además de la gallineta común (*Gallinula chloropus chloropus*) y la focha común (*Fulica atra*). En el pasado también nidificaron la cerceta pardilla (*Marmaronetta angustirostris*) y, posiblemente, la garza real (*Ardea cinerea*).

Especie	Hábitat preferente en Maspalomas
Abubilla (<i>Upupa epops</i>)	Dunas
Alcaudón real (<i>Lanius excubitor koenigi</i>)	Dunas
Bisbita caminero (<i>Anthus berthelotii berthelotii</i>)	Dunas
Búho chico (<i>Asio otus canariensis</i>)	Dunas
Canario (<i>Serinus canaria</i>)	Dunas
Cernícalo común (<i>Falco tinnunculus canariensis</i>)	Dunas y zonas humanizadas
Cotorra argentina (<i>Myiopsitta monachus</i>)	Zonas humanizadas
Cotorra de Kramer (<i>Psittacula krameri</i>)	Zonas humanizadas
Curruca cabecinegra (<i>Sylvia melanocephala leucogastra</i>)	Dunas
Curruca capirotada (<i>Sylvia atricapilla heineken</i>)	Zonas humanizadas
Curruca tomillera (<i>Sylvia conspicillata orbitalis</i>)	Dunas
Chorlito chico (<i>Charadrius dubius curonicus</i>)	Laguna litoral
Chorlito patinegro (<i>Charadrius alexandrinus alexandrinus</i>)	Laguna litoral
Estornino pinto (<i>Sturnus vulgaris</i>)	Zonas humanizadas
Estrilda común (<i>Estrilda astrild</i>)	Laguna litoral
Focha común (<i>Fulica atra</i>)	Laguna litoral
Gallineta común (<i>Gallinula chloropus chloropus</i>)	Laguna litoral
Gorrion molinero (<i>Passer montanus</i>)	Zonas humanizadas
Gorrion moruno (<i>Passer hispaniolensis hispaniolensis</i>)	Zonas humanizadas
Jilguero (<i>Carduelis carduelis parva</i>)	Dunas
Lavandera cascadeña (<i>Motacilla cinerea canariensis</i>)	Laguna litoral
Mirlo común (<i>Turdus merula</i>)	Dunas
Mosquitero canario (<i>Phylloscopus canariensis</i>)	Dunas
Tótopa europea (<i>Streptopelia turtur turtur</i>)	Dunas
Tótopa turca (<i>Streptopelia decaocto</i>)	Zonas humanizadas
Vencejo común (<i>Apus apus</i>)	Zonas humanizadas
Vencejo unicolor (<i>Apus unicolor</i>)	Zonas humanizadas
Verderón común (<i>Carduelis chloris</i>)	Zonas humanizadas

Tabla 2.1. Listado de las aves nidificantes en Maspalomas y sus alrededores inmediatos. Fuente: Martín y Lorenzo (2001); Trujillo (2002) y Lorenzo (2007). Elaboración propia.

Las especies invernantes o de paso son más abundantes en número de especies. Destacan las limícolas con 8 especies: correlimos tridáctilo (*Calidris alba*), que suele venir en bandos relativamente numerosos, correlimos común (*Calidris alpina*), correlimos zarapitín (*Calidris ferruginea*), chorlito grande (*Charadrius hiaticula*), andarríos chico (*Tringa hypoleucos*), archibebe claro (*Tringa nebularia*), archibebe común (*Tringa totanus*), y zarapito trinador (*Numenius phaeopus*). Además, se pueden observar dos especies de ardeidas, garza real (*Ardea cinerea*) y garceta común (*Egretta*

garzetta), la anátida cerceta común (*Anas crecca*) y la golondrina común (*Hirundo rustica*). Otras 25 especies han sido citadas como visitantes irregulares o esporádicos o accidentales.

Dunas: en la actualidad tienen una ornitocenosis muy empobrecida, debido a las molestias producidas por el tránsito indiscriminado y desordenado de personas y a las alteraciones del ecosistema. Las zonas estabilizadas con alta cobertura vegetal y formada por bosquetes de *Tamarix canariensis*, matorrales y praderas terofíticas son el hábitat preferente para algunas especies de paseriformes. Es el caso de la curruca cabecinegra (*Sylvia melanocephala leucogastra*), curruca tomillera (*Sylvia conspicillata orbitalis*), bisbita caminero (*Anthus berthelotii berthelotii*), alcaudón real (*Lanius excubitor koenigi*), mosquitero canario (*Phylloscopus canariensis*), mirlo común (*Turdus merula*), tórtola europea (*Streptopelia turtur turtur*), abubilla (*Upupa epops*), canario (*Serinus canaria*) y jilguero (*Carduelos carduelos parva*), además de las dos únicas especies de rapaces nidificantes en la zona, el búho chico (*Asio otus canariensis*) y el cernícalo común (*Falco tinnunculus canariensis*).

También las dunas son utilizadas como lugar de alimentación o descanso de diversas especies, como el vencejo unicolor (*Apus unicolor*), y diversas limícolas como, por ejemplo, el zarapito trinador, el chorlito chico y el chorlito patinegro, principalmente.

Las dunas móviles, donde la vegetación es escasa y dispersa, poseen una avifauna muy pobre, formada principalmente por algunas de las especies citadas anteriormente, como el bisbita caminero (*Anthus berthelotii berthelotii*), la curruca tomillera (*Sylvia conspicillata orbitalis*), la abubilla (*Upupa epops*) y el alcaudón real (*Lanius excubitor koenigi*).

En el pasado otras especies, características de ecosistemas esteparios y dunares, habitaban en Maspalomas. Es el caso del alcaraván común (*Burthinus oedicephalus distinctus*), el corredor (*Cursorius cursor bannermani*), la terrera marismeña (*Calandrella rufescens polatzeki*) y el camachuelo trompetero (*Bucanetes githagineus amantum*), siendo las tres primeras especies de hábitos terrestres y nidificantes en el suelo. Si bien algunas de ellas fueron citadas por Bannerman (1922), desaparecieron después, probablemente por las transformaciones experimentadas en el sistema de dunas. Sin embargo, el alcaraván común (*Burthinus oedicephalus distinctus*) ha sido visto en los últimos años en la zona, aunque no se ha establecido de forma definitiva. En la actualidad las condiciones de este hábitat son aparentemente adecuadas para la nidificación de algunas de estas especies, pero seguramente el tránsito constante de personas condiciona su presencia, pues en época de nidificación se necesitan lugares tranquilos.

Asimismo, sobre las dunas más cercanas al litoral, concretamente en la Punta de la Bajeta o Maspalomas, nidificaban dos especies de aves marinas: el charrán común (*Sterna hirundo*) y la gaviota patiamarilla (*Larus canchinnans*). Bolle (1857) descubrió una colonia de charrán común (*Sterna hirundo*), constituida por al menos 500 parejas, según se deduce de sus palabras, y los lugareños que lo acompañaron le aseguraron que

la gaviota patiamarilla criaba entre arbustos de Quenopodiáceas, probablemente balancones (*Traganum moquinii*), presentes en la zona.

Zonas Humanizadas: los alrededores de este espacio protegido están fuertemente edificados, de tal forma que la Reserva se mantiene como una isla dentro de un entorno con una fuerte impronta humana. Algunas especies de aves, la mayoría introducidas, nidifican en las zonas urbanas, pero utilizan el sistema dunar como zona de alimentación. Estas especies son: el gorrión moruno (*Passer hispaniolensis hispaniolensis*), el gorrión molinero (*Passer montanus*), la cotorra argentina (*Myiopsitta monachus*), la cotorra de Kramer (*Psittacula krameri*), el vencejo unicolor (*Apus unicolor*), el vencejo común (*Apus apus*), el estornino pinto (*Sturnus vulgaris*) y la tórtola turca (*Streptopelia decaocto*), entre otras. En los últimos años se han observado ejemplares del tejedor amarillo (*Euplectes afer*), del lorito senegalés (*Poicephalus senegalus*) y del estornino metálico (*Lamprotornis purpureus*), pero no se ha podido confirmar si estas especies se han asentado con éxito.

Otras especies nidificantes en la isla utilizan Maspalomas como zona de descanso o de alimentación. Éste es el caso de la gaviota patiamarilla (*Larus canchinnans*), el halcón de tagorote (*Falco pelegrinoides*), que visita la Charca con la intención de cazar las aves que llegan agotadas de sus largas rutas migratorias, e incluso el águila pescadora (*Pandion haliaetus*).

2.2.4. Alteraciones ambientales

El sistema de dunas de Maspalomas y sus alrededores fue utilizado tradicionalmente como zona de pastoreo y recogida de leña (Naranjo, 1999: 74; Hernández Calvento, 2006: 326). Con anterioridad a 1930 las fincas existentes en los alrededores del actual campo de dunas de Maspalomas, donde se incluye la zona ocupada por el campo de golf y la terraza alta del Inglés conocida como Llanos de Maspalomas, tenían un uso agrícola escaso y eran explotadas de forma extensiva, dedicándose fundamentalmente al cultivo de cereales (Nadal y Guitián, 1983: 57). A partir de 1930 el cultivo de tomate se extiende por la zona de forma que, desde finales de los años cincuenta del pasado siglo, la terraza alta del Inglés va siendo ocupada progresivamente por cultivos de tomates, los cuales produjeron una interrupción parcial del tránsito de sedimentos hacia el interior del sistema de dunas (Hernández Calvento, 2006: 296). Asimismo, el tramo final del barranco es desviado con la finalidad de ganar terreno agrícola (Hernández Calvento, 2006: 296). Los cultivos se expandieron hacia la mayor parte de la terraza en los años sesenta, excepto el extremo sur debido a que constituía la zona por donde las dunas accedían al interior del sistema (Hernández Calvento, 2006: 215). También en los años sesenta, se observa un incipiente uso turístico de las playas por la población local, materializado en la construcción de casetas de madera en los alrededores de la charca de Maspalomas (figura 2.16). En esta década

aparecen los primeros hoteles y apartamentos en San Agustín, al noreste de la playa del Inglés.

A finales de los años sesenta los usos del sistema de dunas de Maspalomas se intensifican con la construcción de urbanizaciones turísticas, cambiando de forma radical el modelo de explotación de este espacio geográfico (figura 2.16). En el año 1961 se redactan las bases de un concurso de ideas para la urbanización de los alrededores del campo de dunas (Nadal y Guitián, 1983: 79). En 1962 se declaró ganador del citado proyecto al equipo francés SETAP, que le concedió especial importancia a la valoración del medio natural. Planteaban aprovechar el relieve sin modificarlo y mantener el campo de dunas en su estado original. También proponían una baja ocupación del suelo, donde la superficie edificable no fuese superior al 50% (Nadal y Guitián, 1983: 85-86).

Sin embargo, las urbanizaciones finalmente construidas no respondieron a las características planificadas por el citado proyecto, superándose con creces los límites de ocupación con la finalidad de obtener la máxima rentabilidad (Nadal y Guitián, 1983: 120). Las urbanizaciones turísticas empiezan a construirse en el Oasis y en la terraza alta del Inglés a partir de 1964 y 1967 respectivamente, mientras que el campo de golf se inaugura en noviembre de 1969 (Nadal y Guitián, 1983). A finales de los años ochenta la terraza alta del Inglés está totalmente construida, a excepción de su vértice sur, que es finalmente ocupado por edificaciones a principios de los noventa. A partir de la primera década del siglo XXI, el desarrollo de las urbanizaciones e instalaciones turísticas terminan por cercar el campo de dunas, esta vez por su parte occidental (Meloneras).

Según datos procedentes de la Consejería de Turismo del Gobierno de Canarias, en 2007 el número total de camas turísticas en esta zona era de 100.471, cifra que equivale al 69,8% de las plazas existentes en la isla de Gran Canaria, y al 23,6% de la totalidad del archipiélago (ISTAC, 2008). Teniendo en cuenta estos datos, las urbanizaciones turísticas del entorno del campo de dunas de Maspalomas concentran la mayor parte de los cerca de tres millones de turistas extranjeros que recibe Gran Canaria cada año (ISTAC, 2008: 228). Asimismo, constituye un destino continuo a lo largo del año, lo cual lo diferencia de otros españoles y europeos (islas Baleares, costa de Andalucía, levante español, costa Italiana, etc.), donde esta actividad se concentra principalmente durante los meses de verano. Por lo tanto, la incidencia de las actividades turísticas sobre el campo de dunas de Maspalomas es permanente a lo largo del año, lo que tiende a intensificar sus repercusiones ambientales.

El desarrollo turístico de los alrededores de este espacio geográfico ha producido una serie de alteraciones ambientales muy significativas (Hernández Calvento, 2002; y Hernández Calvento 2006): la progresiva estabilización de las dunas interiores, la expansión de las áreas ocupadas por las superficies de deflación, la disminución de la altura de las acumulaciones arenosas, el alejamiento de la primera línea de dunas móviles respecto a la trasplaya y el incremento generalizado de la cobertura vegetal.

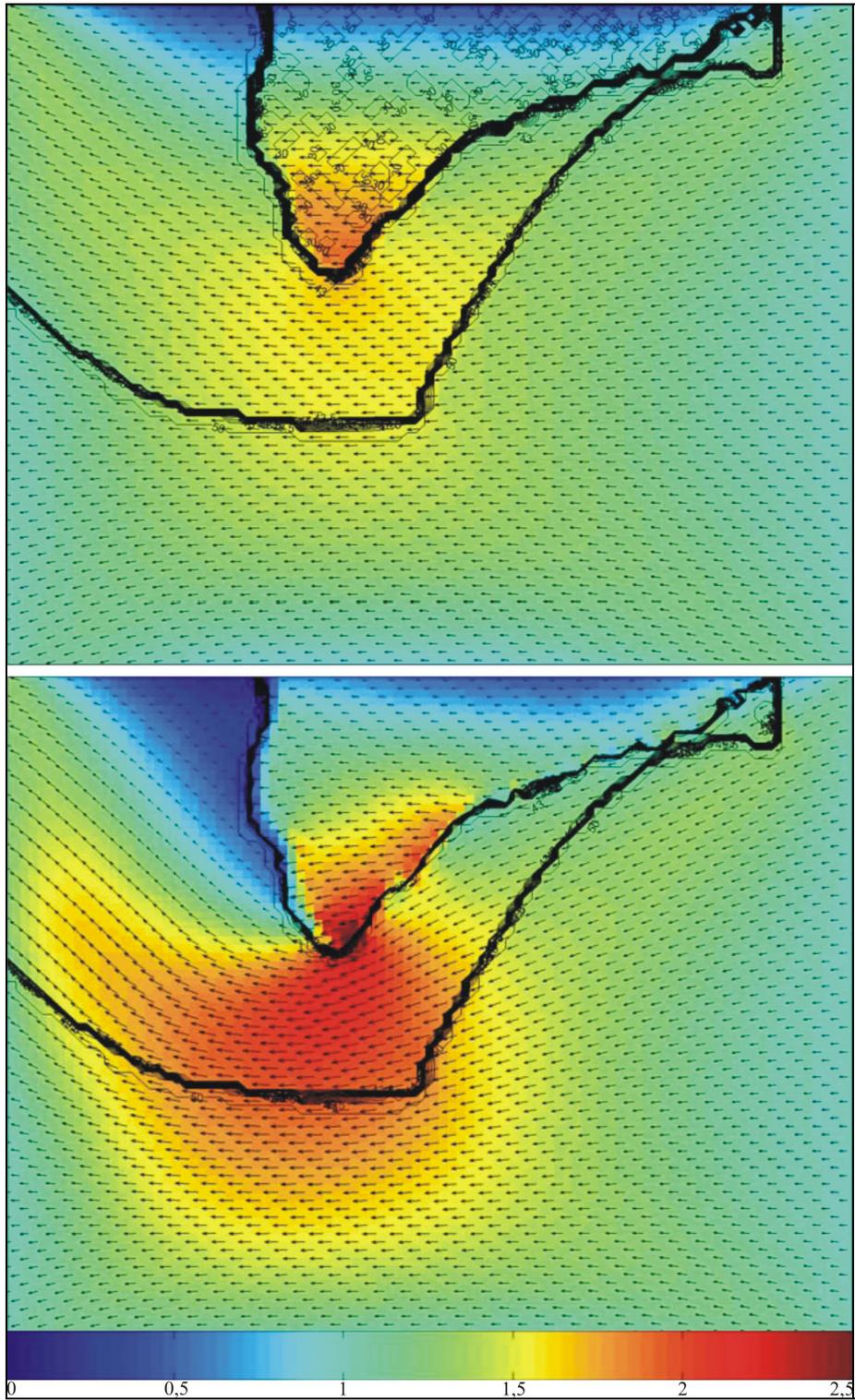


Figura 2.15. Modelo de flujos eólicos antes de la urbanización de la terraza alta del Inglés (arriba) y después (abajo) (tomado del Ministerio de Medio Ambiente, 2007).

En estas alteraciones juega un papel destacado la edificación de la terraza alta del Inglés, obstáculo natural a la circulación de los sedimentos, porque se intensifica el efecto barrera, modificando así el flujo eólico y, por lo tanto, el transporte de sedimentos. Los últimos estudios (Ministerio de Medio Ambiente, 2007) revelan que el transporte de sedimentos se acelera en el sector meridional (figura 2.15), con un

incremento que se estima oscila entre 1,5 m/s, antes de 1960, y 2,2 m/s en la actualidad. En definitiva, las tasas de transporte se han triplicado desde la urbanización de la terraza alta del Inglés, lo que ha acelerado la pérdida de sedimentos que se producía de forma natural. Esto explica –parcialmente- el aumento exponencial de la distancia del primer cordón de dunas móviles a la playa del Inglés, y la generación de amplias superficies de deflación en la zona central del campo de dunas (Hernández Calvento, 2006; Hernández Calvento *et al.*, 2007).

La figura 2.16 refleja los radicales cambios que ha experimentado el sistema de dunas y sus alrededores. A su vez, la zona del Oasis y charca de Maspalomas, ha visto desaparecer gran parte de la laguna costera (aún visible sin alterar en la foto del año 1940-45) por las urbanizaciones turísticas construidas a partir de los años setenta.



Figura 2.16. Desarrollo turístico en el oasis y charca de Maspalomas entre los años 40 del pasado siglo y la actualidad (Fuente: Archivo de Fotografía Histórica de Canarias (FEDAC, Cabildo de Gran Canaria) y Emma Pérez-Chacón).

Como consecuencia de la transformación turística de este espacio, la vegetación ha experimentado una serie de cambios específicos (figura 2.17), produciéndose dos respuestas principales (Hernández Calvento, 2006). Por un lado, la reducción o desaparición de algunas comunidades vegetales. Así, se constata la total eliminación del tabaibal de *Euphorbia balsamifera* y *Euphorbia regis-jubae* presentes en la terraza alta del Inglés como resultado, primero de la implantación de cultivos y posteriormente por la edificación del complejo turístico del Inglés. Por otro lado, la comunidad de *Plocama pendula* se ha visto reducida a la existencia de individuos aislados, pues la extensa población anterior se redujo drásticamente al construir el campo de golf. Por su parte, la comunidad de *Traganum moquinii* ha presentado un comportamiento diferente en

función de su localización. De este modo, los ejemplares de la playa del Inglés han aumentado de tamaño, mientras que se ha producido una reducción de los mismos en la trasplaya de Maspalomas, tanto debido al avance de las dunas como al impacto ocasionado por los transeúntes.

Por otro lado, otras comunidades vegetales se han extendido de forma considerable e incluso han aparecido otras no citadas previamente por los primeros investigadores como Esteve (1967) y Sunding (1972). Este es el caso de los bosquetes de *Tamarix canariensis*, que se han densificado y expandido a gran parte de la zona central y norte del sistema dunar, donde la movilidad de las arenas es prácticamente nula. Los céspedes de *Cyperus laevigatus* también han aumentado su distribución, como consecuencia del incremento de los espacios interdunares. Asimismo, los matorrales de *Suaeda mollis* (anteriormente denominada *Suaeda vermiculata*) también se han incrementado. En este caso se debe al afloramiento del sustrato arcilloso infrayacente. Asimismo, existen hoy una serie de comunidades vegetales que no habían sido descritas antes de la transformación turística de la zona, como es el aulagar de *Launaea arborescens*, comunidades ruderales y la comunidad de *Zygophyllum fontanesii*.

Comunidad descrita	Esteve (1967)	Sunding (1972)	Actualidad
Matorral halonitrófilo de balancón	Poblaciones de <i>Tragamum moquinii</i> . Extendidas	<i>Ass. Traganeum moquinii</i> . Extendida en el litoral de Maspalomas y bahía de playa del Inglés	Reducida en Maspalomas. Presente en playa del Inglés.
Céspedes de <i>Cyperus laevigatus</i>	Céspedes de <i>Cyperus laevigatus</i> ssp. <i>Dystachios</i> . Presente	<i>Ass. Cyperetum laevigati</i> . Coberturas entre 5 y 30% según inventarios	En progresión
Matorral de <i>Suaeda vermiculata</i>	No la describe	<i>Ass. Chenoleo-Suaedetum vermiculatae</i> . Escasa presencia en las Dunas. Tan solo un inventario	En progresión, formando comunidades cada vez más extensas
Matorrales salinos / juncuales	<i>Ass. Schizogynojuncetum acuti</i> . Extendida en el entorno de la Charca	No la describe	Extinta en el oasis. En progresión en el sector de las hoyas
Matorrales de <i>Launaea arborescens</i>	No la describe	No la describe	Desarrollo en hoyetas arcillosas. Progresión en dunas estabilizadas.
Bosquetes de <i>Tamarix canariensis</i>	Bosquetes de <i>Tamarix gallica</i> v. <i>Canariensis</i> , <i>Launaea arborescens</i> y <i>Neurada procumbens</i> . Extensión reducida	No la describe	En progresión. Recolonizan e invaden tanto las dunas fijas, como las áreas centrales que pierden arenas
“Praderas” terofíticas sobre dunas fijas	No la describe	<i>Ass. Euphorbio-Cyperetum kalli</i> . Cobertura de los inventarios inferiores al 5%	Muy extendida. Coberturas superiores al 40%
Comunidades ruderal-nitrófilas	No la describe	No la describe	En progresión en las áreas alteradas (límites del sistema)

Figura 2.17. Cambios experimentados por la vegetación en el campo de dunas de Maspalomas entre 1962 y 2000 (tomado de Hernández Calvento, 2006: 275).

En definitiva, entre el conjunto de alteraciones antropogénicas de Maspalomas, la vegetación, que constituye el objeto de esta tesis, como elemento de síntesis de los factores que inciden en el territorio, ha experimentado significativas modificaciones. Éstas son el resultado combinado del impacto directo sobre la vegetación y de la

alteración del medio físico que la sustenta. A lo largo de la tesis se relacionarán los cambios detectados con la evolución de la vegetación, ya que unos se derivan de los otros en ambos sentidos.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

Una vez expuesto el estado de la cuestión relativo a la vegetación de los campos de dunas litorales, así como a las características específicas del sistema de Maspalomas, se plantean ahora los objetivos, las hipótesis, así como la metodología general y específica diseñadas para desarrollar esta investigación.

3.1. Objetivos e hipótesis

El punto de inicio de esta investigación lo constituye la necesidad de dar respuesta a algunas lagunas existentes en relación con las alteraciones ambientales inducidas por la actividad turística en el Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas. Como se ha explicado con anterioridad, es necesario afrontar un análisis en profundidad sobre la evolución de las comunidades vegetales en relación con el desarrollo del turismo en la zona de estudio. Para abordar esta tarea se considera indispensable conocer previamente el objeto específico de estudio, es decir, la propia vegetación, y más concretamente sus características, patrones de distribución y dinámica actual.

Por ello, el objetivo general esta investigación es *analizar y explicar los cambios que han experimentado las comunidades vegetales de la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas entre 1961, antes del desarrollo turístico, y la actualidad.*

Para alcanzar este objetivo general es necesario dar respuesta a los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar la vegetación actual del sistema de dunas. Hasta el momento, el conocimiento sobre la vegetación de Maspalomas queda enmarcado en los trabajos generales de Esteve (1968; 1983), Sunding (1972), los más específicos de Nadal y Guitián (1983), el Plan Director de la Reserva Especial de las Dunas de Maspalomas (2004), los resultados del proyecto del Ministerio de Medio Ambiente (2002) y los trabajos de Hernández Calvento (2002 y 2006). Todos estos trabajos constituyen una primera aproximación valiosa que ahora, a través de esta investigación, se pretende completar. Como punto de partida se considera que el análisis de las transformaciones de la vegetación, tanto las vinculadas al desarrollo turístico, como a procesos de sucesión vegetal asociados a la propia dinámica del sistema, requiere previamente el conocimiento en profundidad de la vegetación actual. Es por ello primordial, como punto de partida, una caracterización de detalle de las comunidades vegetales actuales.

2. Determinar los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación. Desde esta investigación también se considera imprescindible comprender

la estructura espacial de la vegetación, determinando los factores ecoantrópicos que controlan su distribución. Ello permitirá conocer, además, la ecología de las comunidades vegetales existentes en Maspalomas.

3. Conocer la dinámica actual de las comunidades vegetales. Se pretende determinar la dinámica de las comunidades vegetales de Maspalomas, lo que a su vez permitirá explicar los procesos de sucesión ecológica asociados tanto a la evolución natural del sistema, como a las actividades humanas. En este sentido, el conocimiento existente sobre la ecología y la dinámica de la vegetación de los campos de dunas de Canarias todavía limitado en la actualidad. En un contexto más amplio, el estudio de la vegetación en la totalidad de un campo de dunas transgresivo, como el de Maspalomas, representa una mejora del conocimiento de la vegetación de este tipo de ambientes, ya que la mayor parte de los trabajos se han centrado en la duna costera o *foredune* y en sistemas progradantes. Además, esas investigaciones se han desarrollado principalmente en las zonas templadas y tropicales, siendo muy escasos los que abordan regiones áridas costeras.

4. Caracterizar la vegetación existente antes del desarrollo turístico. Se pretende determinar las características básicas de las comunidades vegetales existentes en los años sesenta del siglo pasado, antes del desarrollo del turismo. Esta información resulta fundamental en la investigación, pues constituye el primer paso para el análisis de la evolución de la vegetación.

5. Analizar la evolución experimentada por la vegetación desde los años sesenta del siglo pasado hasta la actualidad, tanto desde el punto de vista de su localización espacial como de su extensión superficial. Este objetivo resulta de la combinación de los anteriores, de tal forma que el contraste entre la información obtenida en el periodo temporal que se plantea analizar, dará como resultado la generación de un mapa con los cambios experimentados por la vegetación. Estos cambios permitirán conocer las alteraciones producidas en el sistema de dunas de Maspalomas como consecuencia del desarrollo turístico y las actividades humanas asociadas al mismo.

6. Valorar el uso de las tecnologías de la información geográfica (TIGs) en el estudio de la vegetación. En general, el estudio de la vegetación continúa basándose en métodos clásicos, siendo todavía limitado el uso de las TIGs en general, y de los sistemas de información geográfica, en particular. En esta investigación se pretende analizar la potencialidad de estas herramientas, especialmente de los SIG, en estudios sobre vegetación.

Finalmente, como hipótesis general de esta investigación se plantea que *las variaciones espaciales y temporales experimentadas por las comunidades vegetales*

pueden ser indicadoras de los cambios ambientales inducidos por la actividad turística en el sistema de dunas de Maspalomas.

Esta hipótesis general se ha subdividido en otras tres específicas:

- 1) Las actividades relacionadas con el turismo podrían haber producido la reducción de algunas comunidades vegetales, especialmente las vinculadas a las zonas con una mayor intensidad de uso, como es el caso de la playa alta y la duna costera, donde se desarrollan poblaciones de *Traganum moquinii*. Además, los cambios experimentados por esta comunidad vegetal han podido desencadenar transformaciones geomorfológicas significativas en el sistema de dunas.
- 2) Los cambios ecológicos del sistema de dunas, vinculados a la actividad turística, habrían favorecido en unos casos la expansión de numerosas comunidades vegetales y, en otros, la aparición de otras nuevas, especialmente de aquellas que están vinculadas a los procesos de estabilización, deflación y antropización.
- 3) Las TIGs pueden contribuir de forma relevante al estudio de la vegetación, constituyendo una herramienta complementaria a los métodos clásicos basados en el trabajo de campo y los análisis estadísticos, permitiendo una visión conjunta de la totalidad del área de estudio, así como la realización de análisis espaciales complejos.

3.2. Fuentes de información espacial

Las fuentes de información espacial, donde se incluyen fotografías aéreas, ortofotos digitales, imágenes de satélites, modelos digitales de elevaciones (MDE) y datos LiDAR (tabla 3.1), constituyen la base fundamental en la que se sustenta esta investigación. Por un lado, se ha utilizado para el análisis de la vegetación actual (caracterización, factores ecológicos condicionantes y dinámica), empleándose en las tareas de digitalización, así como en la planificación, realización y localización de los muestreos de campo. Por otro lado, han constituido la fuente principal en el análisis de la evolución de la vegetación entre los años 60 y la actualidad.

Desde finales de los años 40 existen un significativo número de fotografías aéreas realizadas de Maspalomas, por lo que *a priori* la realización de una cartografía de la vegetación de esta zona en distintas fechas no debería plantear ningún inconveniente. Sin embargo, existen dos cuestiones que condicionan la realización de la mencionada cartografía. Por un lado, los documentos aéreos más antiguos (años 40 y 50) no poseen la geometría apropiada para su corrección espacial (Hernández Calvento, 2002). Otro inconveniente es la variada gama de escalas de las fotografías aéreas, lo que no permite tener el mismo nivel de detalle para todos los periodos temporales. De hecho, muchas de las imágenes disponibles no presentan escalas apropiadas para abordar este tipo de trabajos. A todo esto hay que añadir la dificultad que en ocasiones hemos tenido para

conseguir determinados documentos debido a la burocracia. Por lo tanto, se han seleccionado aquellas fuentes de información geográfica que tuvieran una resolución espacial similar, que tuvieran escalas adecuadas para generar mapas de vegetación de detalle y, finalmente, que se pudieran adquirir. La escala de trabajo que finalmente se ha considerado idónea para poder cartografiar la vegetación y estudiar su evolución, ha sido la 1:5.000. Por este motivo no se ha podido analizar la vegetación correspondiente a los años 70, pues si bien es conocida la existencia de un vuelo fotogramétrico de 1976 a escala 1:6.500, no se ha podido acceder a sus fotogramas a tiempo para ser analizados en profundidad. Asimismo, pese a disponer de fuentes de información geográfica adecuadas, finalmente no se caracterizó las comunidades vegetales de los años 80 por motivos de tiempo.

Este hecho contrasta con la abundancia de fuentes de información espacial que existen desde los años 90, de tal forma que a partir de esa década se dispone de ortofotos digitales e imágenes de satélites de gran resolución espacial, que permiten un alto grado de precisión a la hora de realizar la cartografía de la vegetación. Asimismo, la disponibilidad de un vuelo LiDAR de octubre de 2006 ha permitido una mejor caracterización de la duna costera (*foredune*), ya que además de la calidad de la imagen (cuya resolución espacial es 10 cm), dispone de datos altimétricos de gran precisión, que facilitan abordar análisis exhaustivos de la topografía de la misma. No fue posible hacer uso de este documento para la caracterización de las comunidades vegetales del resto de la Reserva, pues se accedió a él cuando la tesis se encontraba avanzada.

La selección de estos documentos gráficos ha sido fundamental para la realización del estudio de la evolución de la vegetación entre los años 60 y la actualidad, así como para analizar las comunidades vegetales actuales. Hay que tener en cuenta que la utilización de ortofotografía supone una ventaja adicional, que dota al trabajo de una gran calidad y precisión en la elaboración cartográfica (Gonzalo *et al.*, 2001).

Fecha	Escala	Características
1961	1: 5.000	Ortofoto obtenida de la ortorectificación de fotografías aéreas de un vuelo analógico 1:5.000 en escala de grises. Resolución de 12,5 cm/píxel. Documento básico para realizar la cartografía de las comunidades vegetales de los años 60.
1977	1: 6.500	Fotografías en blanco y negro. Utilizadas para verificar la evolución de la vegetación entre el año 1961 y el año 2003.
Mayo de 1987	1: 5.000	Ortofoto digital en blanco y negro. Utilizada como apoyo para analizar los procesos de cambios entre los años 60 y la actualidad. Básica para estudiar la evolución de las poblaciones de <i>Traganum moquinii</i> .
Diciembre de 1995	1: 5.000	Ortofoto digital en color. Documento utilizado para analizar varios aspectos de la dinámica de la vegetación.
Noviembre y diciembre de 1998	1: 5.000	Ortofoto digital en color. Documento utilizado para analizar varios aspectos de la dinámica de la vegetación.
Enero y febrero de 2002	1: 5.000	Ortofoto digital en color. Documento utilizado para calcular varios aspectos de la dinámica de la vegetación y las tasas de desplazamiento de las dunas.
Noviembre de 2003	1: 5.000	Ortofoto digital en blanco y negro. Documento básico para realizar la cartografía de las comunidades vegetales correspondiente a la actualidad y analizar la evolución de las poblaciones de <i>Traganum moquinii</i> .
Marzo de 2004	0,65 m resolución espacial nominal	Imagen del satélite Quickbird pancromática. Se ha utilizado para analizar algunos aspectos de la dinámica de la vegetación.
Octubre de 2006	1: 5.000	Ortofoto y Modelo Digital de Elevaciones (MDE) obtenido a partir de datos LiDAR. Documento utilizado para la caracterización de la duna costera (<i>foredune</i>)

Tabla 3.1. Fuentes de información espacial utilizadas.

3.3. Integración de los datos en un Sistema de Información Geográfica

Las fuentes de información espacial, así como los datos recogidos mediante el trabajo de campo, han sido integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Atendiendo únicamente a la componente tecnológica de los SIG, herramientas cuyo uso se ha generalizado en el desarrollo de trabajos de carácter territorial, se trata de programas informáticos diseñados para capturar, almacenar, exponer, comunicar, transformar, analizar y archivar información georreferenciada, que está ligada a localizaciones específicas de la superficie de la Tierra (Goodchild, 2005: 107). Según el *National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA)* los SIG están formados por varios elementos: el hardware, el software, los datos y los procedimientos. Una de sus principales características de los SIG es la existencia de una base de datos asociada a los elementos geográficos representados, lo que permite a estos programas establecer relaciones espaciales entre diferentes entidades. En resumen, los SIG poseen

una serie de prestaciones de gran utilidad, que permiten realizar los trabajos de cartografía y análisis de la información geográfica con una gran precisión, entre las que destacan: capacidad para manejar gran cantidad de información georreferenciada, elaboración automática de mapas temáticos, integración de ficheros de diferentes formatos, realización de análisis espaciales complejos, capacidad de integrar diferentes fuentes de información (cartografía, imágenes de satélites, fotografías aéreas, etc.) y posibilidad de exportar la cartografía a otros formatos con el fin de mejorar su edición, facilitar su lectura o la salida de documentos cartográficos.

Existen dos formas principales de conceptualizar la realidad geográfica (Goodchild, 2003): como un campo continuo y como objetos discretos. En los campos continuos, la superficie de la Tierra puede ser descrita por la cartografía de un conjunto de variables, mientras que el segundo caso la superficie de la Tierra es un espacio lleno de objetos. Estos dos tipos de conceptualizaciones pueden ser asociadas con los modelos de datos raster y vectorial respectivamente. Los campos continuos son con frecuencia asociados al raster y los objetos discretos al vectorial, pero esta asociación probablemente tiende más a confundir que a aclarar (Goodchild, 2003). En el caso concreto de la cartografía de la vegetación, el error asociado al modelo raster está relacionado con la sustitución de un valor verdadero de un punto por el valor dominante en un píxel o en un conjunto de píxeles, mientras que en el vectorial el error viene impuesto por la sustitución de un valor verdadero de un punto por el valor dominante de un polígono de un tamaño y forma arbitraria (Goodchild, 1994: 619-620).

El sistema de información geográfica desarrollado en esta tesis doctoral ha tenido una importancia capital, ya que ha permitido integrar las fuentes de información espacial (ortofotos digitales, fotografías aéreas, imágenes de satélites y datos LiDAR), la localización de los puntos de muestreo y su información alfanumérica asociada, así como generar datos a partir de estas fuentes, mediante digitalización en pantalla, realizar análisis espaciales y, finalmente, generar las salidas cartográficas. Aparte de la información espacial, algunos análisis estadísticos también se han realizado mediante el SIG. El formato de la nueva información espacial generada, ha sido vectorial (*shapefile* de ArcGIS). En definitiva el SIG se ha utilizado como archivo espacial, donde se almacenan toda la información geográfica recopilada y obtenida durante la tesis, y como herramienta de generación de nueva información espacial y estadística.

La selección del modelo de datos vectorial estuvo motivada por varias razones: en primer lugar, porque este modelo de datos permite un mayor nivel de precisión en la delimitación de los elementos representados, conforme con el espacio que esta información digital ocupa en el disco duro del ordenador; por otro lado, hay que tener en cuenta, que el modelo raster, que se basa en la celdilla como elemento de representación y almacenamiento de los datos, no expresa de forma tan adecuada los objetos discretos del mundo real, ya que sus límites están definidos por los propios píxeles; en tercer y último lugar, un aspecto a considerar es la gestión de la base de datos y la manipulación de la información espacial: en el modelo raster, una vez creada la base de datos, ésta no se puede modificar tan fácilmente como en el vectorial, lo que

limita la incorporación de nuevos datos o la modificación de los existentes. Además, en cada mapa raster únicamente se puede almacenar los datos de una variable (un campo en la tabla de atributos), por lo que hay que crear tantas capas como variables se quieran representar.

Sin embargo, en algunos casos se han tenido que convertir algunas variables discretas en continuas para poder representar de forma adecuada la realidad, lo que ha obligado a recurrir al modelo raster, pues es precisamente aquí donde tiene una de sus grandes potencialidades. El programa utilizado, ArcGIS 9.x., permite convertir los datos de un formato a otro con ciertas garantías de exactitud, lo que posibilita la combinación de ambos modelos.

La cartografía realizada utiliza el sistema de referencia oficial del Estado en Canarias, que tiene las siguientes características técnicas:

Sistema geodésico

El sistema geodésico de referencia es el ITRF93, que es el adoptado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Tiene las siguientes características:

- Elipsoide WGS84.
Semieje mayor $a = 6.378, 137$ m.
Aplanamiento $f = 298, 257223563$ m.

- Marco geodésico de referencia: REGCAN95 (coordenadas abril de 1995).
- Origen de las coordenadas geodésicas:
Latitudes referidas al ecuador
Longitudes referidas al meridiano de Greenwich

- Origen de las altitudes:
Referidas al nivel medio del mar definido por el mareógrafo o escala de mareas del puerto principal de cada una de las islas.

Sistema cartográfico de representación

Proyección conforme Universal Transversa Mercator (UTM). La totalidad de las islas Canarias se localizan en los husos 27 y 28, aunque la isla de Gran Canaria se ubica en este último.

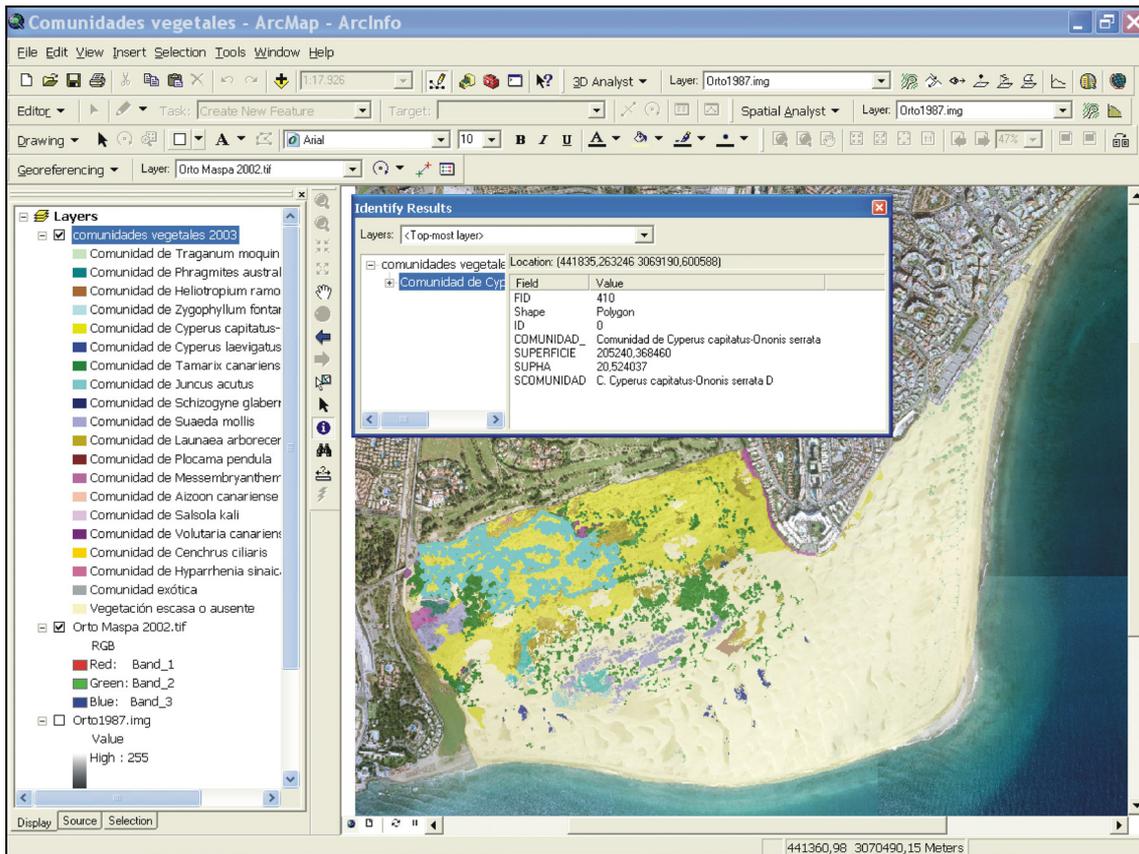


Figura 3.1. Vista de un mapa en el marco del sistema de información geográfica utilizado.

Aunque la digitalización de la información geográfica se realizó a escala 1:5.000, las salidas cartográficas se han representado a escala 1:10.000, ya que es la adecuada para un tamaño de papel DIN A3. Las fuentes de información espacial son la base sobre la que se han representado los diferentes mapas elaborados. En este sentido, se ha considerado que la utilización como imagen de fondo de los mosaicos derivados de las fotografías aéreas y de las ortofotos digitales permite una mejor comprensión del espacio geográfico, además de constituir la realidad existente, sin matices, frente a los mapas topográficos, usados habitualmente. Se entiende, de esta forma, que los mapas topográficos constituyen modelos de la realidad, resultado de un proceso de elaboración selectivo por parte de un cartógrafo, que por motivos de simplificación, escala de trabajo u otras razones tienden a ignorar o generalizar algunos elementos existentes en el territorio, dificultando en ocasiones su interpretación. Esto es más evidente en los sistemas de dunas, donde los elementos de referencia que se representan en los mapas topográficos suelen ser escasos, a excepción de los antrópicos (caminos, carreteras, edificaciones, etc.). Además, la topografía, si existe cierto desfase temporal entre el mapa y el elemento representados, varía de forma significativa en las zonas activas del campo de dunas.

3.4. Antecedentes metodológicos

En este apartado se exponen las corrientes metodológicas que se han aplicado en esta tesis o que han servido de base para diseñar otras derivadas.

3.4.1. Caracterización y dinámica de la vegetación

3.4.1.1. Caracterización de la vegetación

El estudio de la vegetación de cualquier ámbito geográfico puede tener tres aproximaciones principales (Ferrerías y Fidalgo, 1991): una basada en la fisionomía, donde se definen formaciones vegetales en función del porte de las plantas (arbóreo, arbustivo y herbáceo); otra consiste en la definición de la totalidad de las especies que conforman las diferentes agrupaciones vegetales; y la tercera se basa en la definición de las especies vegetales dominantes de cada comunidad vegetal, y que puede ser considerada como una metodología intermedia entre las dos anteriores.

Las formaciones se pueden definir como una agrupación de vegetales que presentan unos caracteres biológicos y unas facies análogas, de forma que se definen por su fisionomía como bosque, pradera, matorral, etc. (Ferrerías y Fidalgo, 1991: 80). Por lo tanto, esta clasificación de la vegetación se basa fundamentalmente en el estudio de la estructura. Existen diversas formas de determinar la estructura de la vegetación, siendo seguramente la más utilizada en la actualidad la propuesta por Raunkiaer (1905). De esta forma, se clasifican las plantas en función de la morfología que utilizan para sobrevivir durante la estación desfavorable (biotipo), distinguiendo así entre fanerófitos, caméfitos, hemicriptófitos, geófitos y terófitos. Existen diversas clasificaciones de la vegetación en función de la fisionomía, entre las que destacan las siguientes: clasificación estructural de Dansereau (1957), sistema estructural de Kùchler (1967), sistema de formaciones estructurales de Fosberg (1961 y 1967), clasificación de las formaciones ecológico-estructurales de la UNESCO, clasificación de Brockmann-Jerosch (1937), clasificación de Allorge y Jovet y clasificación de Elhaï (1968).

La caracterización de vegetación en función de la composición florística, donde se definen comunidades vegetales, se basa en una metodología relativamente antigua, la fitosociología sigmatista, que fue propuesta por Braun-Blanquet. Este método estructura las comunidades vegetales de forma jerárquica, estableciendo clases, órdenes, alianzas y, finalmente, asociaciones, que constituye la unidad básica. La nomenclatura se basa en una o dos especies importantes o indicativas de la asociación y se le añade un sufijo, según el nivel jerárquico visto anteriormente: clase (*etea*), orden (*alia*), alianza (*ion*) y asociación (*etum*).

El método fitosociológico se divide en dos etapas: una analítica, que consiste en la recogida de los datos, y otra sintética donde se realiza la comparación de los mismos.

La etapa analítica se basa en la realización de inventarios de vegetación. Para ello, en primera instancia se debe delimitar el área de muestreo, la cual tiene que

cumplir dos premisas: debe ser una superficie, la denomina área mínima, tal que se esté seguro de que en ella se haya podido desarrollar plenamente toda la comunidad, es decir, que puedan aparecer todas las especies que la componen; debe tratarse de un área homogénea, al menos a priori, es decir, que solamente incluya un tipo de vegetación. Los inventarios de vegetación recogen los siguientes datos:

Abundancia/dominancia: señala la importancia de cada especie dentro de la asociación. Se mide la cobertura de dicha especie sobre la superficie inventariada. Los índices de abundancia/dominancia son los siguientes:

- 5: superior al 75% independientemente del número de individuos
- 4: entre 50 y 75% independientemente del número de individuos
- 3: entre 25 y 50% independientemente del número de individuos
- 2: muy abundante y menos del 5% de cobertura o menos abundante y entre 5 y 25% de cobertura
- 1: abundante, pero con cobertura muy baja; o menos abundante y con mayor cobertura, pero ésta siempre menor al 5%
- + individuos aislados uno o pocos individuos

Sociabilidad: mide la tendencia que pueden presentar los individuos de una especie a aparecer juntos. Los índices de sociabilidad son los siguientes:

- 5: poblamiento continuo
- 4: rodales o colonias extensas
- 3: grupos numerosos o pequeños rodales
- 2: pequeños grupos
- 1: individuos aislados

Una vez realizados los inventarios, se procede a compararlos entre sí a fin de obtener las semejanzas florísticas, que son las que definen la comunidad. La comparación de los inventarios en un principio fue manual, es decir, enfrentándolos uno a uno, pero en la actualidad se suelen utilizar métodos de agrupación estadística, como, por ejemplo, los índices de afinidad de Sorensen, índices de afinidad de Jacard, análisis diferencial de Czekanowski, entre otros. Los inventarios que resultan ser similares representan la misma asociación. Ordenando los inventarios por sus semejanzas, y las especies por su grado de presencia, se observa la limitación de las especies a determinadas comunidades. Esto es lo que se denomina grado de fidelidad, que no tiene tratamiento estadístico. Según el grado de fidelidad existen los siguientes tipos de especies:

a) Características: definen un tipo de asociación; se denominan *exclusivas* si se limitan casi a una sola comunidad, *electivas* si presentan su óptimo en una comunidad, o *preferentes* si tienden a aparecer en una comunidad aunque pueden tener presencia en otras.

b) Acompañantes o compañeras: son indiferentes, pero tienden a comunidades determinadas.

c) Accidentales: provienen de otras comunidades, bien por dispersión, bien por sucesión.

En la tabla fitosociológica final se habrá identificado la comunidad, debiéndose indicar la jerarquía fitosociológica en la que se encuadra o proponer una nueva clasificación, si la asociación no está previamente estudiada.

Finalmente, el estudio de la vegetación basado en las especies dominantes se fundamenta en el concepto de consociación. Esta metodología es seguramente la menos utilizada y desarrollada. Al igual que el método fitosociológico, estudia la composición florística, pero utiliza únicamente las especies más abundantes en la definición de las unidades vegetales. También muestra proximidad al estudio de las formaciones, ya que son las especies dominantes las que definen la fisionomía de la vegetación y determinan el tipo de formación.

Otra metodología intermedia entre la fisionomía y la composición florística es el método geográfico de G. Bertrand (1966), que permite el estudio de las formaciones vegetales a partir de un análisis florístico, estructural y dinámico y su correspondiente expresión gráfica (Ferrerías y Fidalgo, 1991: 108).

3.4.1.2. Dinámica de la vegetación

El estudio de la dinámica de la vegetación se puede abordar a partir de dos métodos principales: el diacrónico y el sincrónico.

El método sincrónico se basa en la observación simultánea, en un periodo de tiempo corto, de comunidades vegetales en diferentes estadios evolutivos de diversas parcelas ecológicamente uniformes (Pintó, 2000: 169). En los sistemas de dunas se ha utilizado tradicionalmente el procedimiento del transecto. Los datos se van tomando desde la costa hacia el interior como hace, por ejemplo, Willis *et al.* (1959a). A partir de este transecto se localizan las diferentes parcelas donde se realizan inventarios de vegetación, y las anotaciones sobre las condiciones ambientales.

El método diacrónico consiste en el seguimiento de los cambios que se producen en la vegetación durante un período de tiempo y en una zona concreta (Pintó, 2000: 156). Este método se fundamenta en el análisis de la evolución de la cubierta vegetal a través de técnicas de observación remotas, fundamentalmente fotografías aéreas y ortofotos digitales, constituyendo la única forma de cartografiar la vegetación de épocas anteriores. Sin embargo, la disponibilidad de mapas de vegetación elaborados a partir del trabajo de campo de varios años, a una escala apropiada, permite su comparación, de cara a plasmar la evolución de la vegetación (Londo, 1974).

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 (Ales y Martin, 1997; Curr *et al.*, 2000; Muñoz-Reinoso, 2001; Tsoar y Blumberg, 2002; Kutiel *et al.*, 2004; Levin y Ben-Dor, 2004); y, por otro, para analizar los procesos de sucesión ecológica (Londo, 1974; Van der Maarel *et al.*, 1985b; Van der Dorp *et al.*, 1985; Carter y Wilson, 1990; Shanmugam y Barnsley, 2002).

Como se señaló anteriormente, el estudio diacrónico se basa, sobre todo, en el seguimiento 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, por cuanto captan información en regiones no visibles del espectro electro-magnético, donde se detectan variaciones que experimentan la vegetación, conforme a su estado, y las coberturas, en general, conforme a 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; Provoost *et al.*, 2002; Lucas *et al.*, 2002; Shanmugam *et al.*, 2003), o para cartografiar especies exóticas (Underwood *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: 163). En contrapartida, tiene la ventaja principal de permitir una precisión cercana al 60-70% en la clasificación de los diferentes tipos de vegetación (De Lange *et al.*, 2004: 152). Otras fuentes de datos que se han empezado a utilizar son los sensores LiDAR, que proporcionan información altimétrica digital y directa, que permite conocer la estructura de la bóveda de la vegetación (Lefsky *et al.*, 2002: 24). Esto presenta un gran interés, ya que permite calcular con precisión 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 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.*, 1985b; Van Dorp *et al.*, 1985; Ales y Martin, 1997; Muñoz-Reinoso, 2001; Tsoar y Blumberg, 2002; Shanmugam y Barnsley, 2002); o el procesamiento digital de imágenes (Kadmon y Harare-Kremer, 1999; Kutiel *et al.*, 2004; Levin y Ben-Dor, 2004). En general, estas dos posibilidades 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: 67).

El método vectorial consiste en la delimitación manual de polígonos, u otras entidades (líneas o puntos), que abarcan las unidades de vegetación diferenciadas para distintos periodos temporales. Posteriormente, los mapas obtenidos 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.*, 1985b; Van Dorp *et al.*, 1985).

El método raster se basa en el procesamiento de imágenes digitales. En este caso se utiliza el valor de los niveles de gris o de color de cada píxel con la finalidad de obtener datos de cobertura, por lo que es un método automático. Por lo tanto, lo que se estudia mediante esta metodología es la evolución de la cobertura vegetal, y no de los diferentes tipos de comunidades vegetales existentes.

Ambos métodos poseen ventajas e inconvenientes. Así, el método basado en la vectorización de unidades tiene una mayor precisión en la definición de las diferentes comunidades vegetales existentes en un determinado espacio geográfico, sobre todo cuando se apoya en el trabajo de campo, y la calidad y escala de las fotografías son las más óptimas. Además, se adapta de forma más precisa a las características de los elementos representados. Sin embargo, posee tres inconvenientes principales: por un lado, existen determinadas comunidades que no se pueden cartografiar, debido a que están constituidas por especies no detectables mediante fotografías aéreas, como es el caso de las comunidades formadas por terófitos. Esto es especialmente crítico para los periodos temporales anteriores, debido a la imposibilidad de realizar trabajo de campo, o cuando la fecha de la fotografía coincide con el estado de semilla de este biotipo. Por otro lado, la delimitación de las unidades es menos objetiva y no está basada en un procedimiento de medida definido explícitamente (Kadmon y Harare-Kremer, 1999: 164). Por último, este método normalmente tiene un mayor coste en cuanto al tiempo empleado para la extracción de las unidades, lo que lo convierte en un procedimiento prohibitivo (Kadmon y Harare-Kremer, 1999: 164). Por su parte, el segundo método es más objetivo y requiere menor tiempo, pero a su vez posee también tres inconvenientes principales: en primer lugar, no permite diferenciar comunidades o formaciones vegetales distintas, llegando como máximo nivel de detalle a identificar estructuras arbóreas, arbustivas y herbáceas. El segundo inconveniente consiste en que los límites entre tipos de vegetación diferentes son más difusos, ya que están definidos por los propios píxeles. En este sentido, para una buena resolución se hace necesario el menor tamaño de píxel posible, pero esto supone el incremento de la ocupación del espacio físico en los ordenadores. Finalmente, se suele asumir que cada píxel está ocupado por un tipo de cobertura determinado (Fisher, 1997: 680), lo que supone la simplificación de la posible variación de la misma, lo que, a su vez, limita la comprensión de la variedad ecológica y los procesos de sucesión de los campos de dunas (Lucas *et al.*, 2002: 266; Shanmugam *et al.*, 2003: 73). En este sentido, una de las soluciones a este problema consiste en el uso de algoritmos de sub-píxeles, donde se obtiene la información sobre la densidad y tipo de vegetación y la proporción de arena (Shanmugam *et al.*, 2003: 70). La utilización del procesamiento digital de imágenes, con la finalidad de interpretar de

forma más precisa los niveles de gris de los documentos, se puede apoyar también en la utilización de correcciones radiométricas (Levin y Ben-Dor, 2004: 341).

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 es el trabajo de Shanmugam y Barnsley (2002).

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: 134), 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 cambios de la vegetación son adecuadas al tiempo transcurrido entre las series de fotos (Van Dorp *et al.*, 1985: 134-135). El mayor problema está relacionado con los posibles errores de identificación de las comunidades por una mala interpretación de las fotografías aéreas (Van Dorp *et al.*, 1985: 135). Por otro lado, los procesos de sucesión vegetal en los sistemas de dunas litorales son diferentes en las depresiones interdunares y en las propias dunas (Willis *et al.*, 1959b: 283; Van Dorp *et al.*, 1985: 133).

3.4.2. Cálculo de la tasa de desplazamiento de las dunas

La movilidad de las dunas se han calculado mediante diferentes procedimientos, como, por ejemplo, las técnicas de campo, utilizando varillas o estacas (Ranwell, 1958; Moreno-Casasola, 1982; Moreno-Casasola, 1986; Hernández Calvento, 2002) o GPS diferencial (Rebêlo *et al.*, 2002; Hernández Cordero *et al.*, 2006a); o la interpretación de imágenes aéreas (Jiménez *et al.*, 1999; Tsoar y Blumberg, 2002; Arens *et al.*, 2004; Levin y Ben-Dor, 2004; Ojeda *et al.*, 2005; Hernández Cordero *et al.*, 2006a; Vallejo, 2007; Pérez-Chacón *et al.*, 2007). La tasa de desplazamiento de las dunas también han podido ser modelizadas creando una superficie continua mediante la interpolación de datos puntuales en un SIG. Esto ha permitido la obtención de superficies de gran exactitud, incluso en zonas donde se dispone de pocos datos (Mitasova *et al.*, 2005: 210). De esta forma, se genera un MDT que permite disponer de datos de tasas de desplazamiento para todo el área de estudio.

Unas fuentes de datos novedosas son los sensores LiDAR (*Light Detection and Ranking*) y la fotogrametría digital, que permiten incorporar la variable altimétrica (Ojeda *et al.*, 2007: 229). En este sentido, la utilización de la tercera dimensión (z) tiene gran utilidad en las zonas dunares, debido al gran dinamismo de las formas y procesos, a su enorme variabilidad espacial, así como a la importancia que la altimetría adquiere en el control de diferentes procesos geomorfológicos como, por ejemplo, la deflación (Ojeda *et al.*, 2007: 229). Los sensores LiDAR permiten calcular con precisión las

zonas de acumulación y erosión y, por lo tanto, analizar los cambios topográficos (Mitasova y Hofierka, 2003: 6).

3.5. Metodología general

Para demostrar las hipótesis de partida se ha diseñado una metodología (figura 3.2) que se desarrolla a través de los seis objetivos específicos propuestos. La metodología se estructura mediante dos líneas de investigación principales: por un lado el estudio de la vegetación actual y, por otro lado, el análisis de la evolución de las comunidades vegetales entre los años 60 y la actualidad. La primera línea parte del estudio de las características florísticas y estructurales de la vegetación actual. Luego se determinan los factores ambientales que explican la distribución espacial de la vegetación, así como la dinámica actual de las comunidades vegetales. En la segunda línea de investigación se caracteriza la vegetación existente en los años 60 del pasado siglo y, tras la comparación de los cambios producidos con respecto a la de 2003, se determina la evolución experimentada por la vegetación en el periodo de estudio. La información necesaria para el desarrollo de esta investigación se ha basado en dos fuentes de datos principales: los documentos aéreos y el trabajo de campo. Como herramienta de integración, de generación de datos, tanto espaciales como alfanuméricos, de análisis espacial y de representación cartográfica se ha utilizado el programa SIG ArcGIS, en sus versiones 9.x. Asimismo, para el análisis y la representación de ciertos parámetros estadísticos más complejos, se han utilizado los programas Microsoft Excel y SPSS.

El desarrollo de los tres primeros objetivos de la investigación, que son la caracterización de la vegetación actual, la determinación de los factores ambientales que controlan la distribución de la vegetación y el estudio de su dinámica actual, es clave para entender la configuración y funcionamiento de las comunidades vegetales en el sistema de dunas de Maspalomas. Constituye el fundamento para analizar e interpretar con mayor fundamento los cambios de la vegetación y, finalmente, las alteraciones ambientales vinculadas al desarrollo turístico. Esta primera fase de la investigación es la que ha abarcado una mayor cantidad de tiempo y esfuerzo.

La caracterización de las comunidades vegetales constituye el punto de partida básico, por cuanto permite definir los aspectos esenciales de la vegetación del área de estudio. Hay que considerar previamente que el estudio de la vegetación se basa en el análisis de la comunidad vegetal como conjunto de plantas asociadas y vinculadas a un espacio geográfico común, y no al tratamiento de las coberturas de cada una de las especies por separado. Por otro lado, determinar los patrones de distribución de las comunidades vegetales se considera muy importante para comprender las relaciones entre éstas y los factores ambientales. De esta forma, saber qué factores ambientales condicionan la distribución de las comunidades vegetales permite determinar con mayor precisión la responsabilidad de la actividad turística en las alteraciones ambientales del conjunto del sistema y, por lo tanto, en los cambios en las mismas. Además, contribuye

a conocer los requerimientos ecológicos de las comunidades vegetales. Por su parte, la dinámica actual de la vegetación se plantea como una forma de estudiar el funcionamiento actual de la vegetación en relación a los elementos naturales que la condicionan. Esto puede permitir comprender de forma más exhaustiva las estrategias de supervivencia desarrolladas por las comunidades vegetales para enfrentarse a los condicionantes naturales y, de este modo, determinar los umbrales de desarrollo de las mismas. Conociendo estos umbrales se pueden determinar mejor las respuestas que la vegetación adopta ante las modificaciones del sistema, tanto las asociadas al funcionamiento de éste, como las inducidas por las actividades humanas. Además, junto a los otros dos aspectos, permite establecer modelos de sucesión ecológica.

En esta etapa las fuentes de información se han basado tanto en los documentos aéreos, como en el trabajo de campo. La ortofoto del año 2003 a escala 1: 5.000 ha constituido la fuente básica, ya que ha permitido cartografiar las comunidades vegetales existentes en la actualidad, así como otros elementos necesarios para determinar los factores que controlan la distribución de las comunidades vegetales. Es el caso, por ejemplo, de la elaboración de una cartografía detallada de unidades geomorfológicas, o el cálculo de la distancia a la costa. Asimismo, la utilización de esta ortofoto, conjuntamente con la correspondiente al año 2002, ha permitido calcular la tasa de desplazamiento de las dunas. Por otro lado, la comparación de las ortofotos de los años 1987 y 2003 y las fotografías aéreas del año 1961, se han utilizado para definir las áreas alteradas por la actividad turística. Además de estas ortofotos, en el caso específico de la dinámica actual de la vegetación, también se ha utilizado una imagen del satélite QuickBird del año 2004 y la ortofoto digital y los MDE obtenidos a partir de un vuelo LiDAR realizado en el año 2006.

El trabajo de campo también ha constituido una fuente de datos fundamental para la consecución de los tres primeros objetivos de la investigación, desarrollándose principalmente entre los años 2005 y 2007, si bien la etapa inicial, de reconocimiento y prospección del área de estudio, se desarrolló durante el año 2004, y una pequeña parte del propio estudio se mantuvo hasta el 2008. La caracterización florística y estructural de las comunidades vegetales se ha basado en los datos recogidos mediante inventarios de vegetación. Asimismo, ha permitido recoger información sobre otros factores ambientales que controlan la distribución de las comunidades vegetales que no se pueden obtener mediante documentos aéreos. Las técnicas específicas utilizadas para la obtención de información mediante el trabajo de campo han sido las siguientes: extracción de muestras de suelo, extracción de muestras de agua subterránea y análisis de variaciones litológicas, mediante la realización de minitransectos. Finalmente, la dinámica de la vegetación también se ha basado de forma parcial en los datos recogidos en el campo, donde destaca el seguimiento de algunas especies de plantas en relación con la dinámica de las dunas.

La caracterización de la vegetación en periodos temporales anteriores al actual ha permitido reconstruir el paisaje biótico del sistema de dunas de Maspalomas de los años 60, antes de que tuviera lugar el desarrollo turístico. Las fotografías aéreas y

ortofotos digitales han sido la fuente fundamental para la caracterización de la vegetación en el periodo temporal considerado y para analizar la evolución experimentada entre los años 60 y la actualidad, debido a la obvia ausencia del trabajo de campo. Asimismo, también se han empleado ortofotos digitales de otros años, como 1977 y 1987, que han servido de apoyo para determinar el tipo de vegetación existente y otros aspectos, como, por ejemplo, la aparición de infraestructuras asociadas a la actividad turística. También se ha utilizado la información recogida por diferentes autores, como Esteve (1962), Sunding (1972) y Nadal y Guitián (1983). De igual forma se ha hecho uso fotografías históricas recopiladas por la Fundación para la Etnografía y el Desarrollo de la Artesanía Canaria (FEDAC) del Cabildo de Gran Canaria. Toda esta información ha permitido la realización de una cartografía de detalle de las comunidades vegetales existentes, que se ha volcado en el SIG, utilizando como base de referencia distintos documentos aéreos georreferenciados. En esta etapa ha sido fundamental la utilización de la cartografía actual de las comunidades vegetales generada previamente. En este aspecto, hay que tener en cuenta que existe un significativo grado de incertidumbre a la hora de establecer límites y asignar algunas unidades a un tipo u otro de comunidad vegetal, especialmente para los años 60.

Finalmente, la superposición de la cartografía de la vegetación generada para los dos años de referencia, 1961 y 2003, ha permitido estudiar la evolución de la vegetación, lo cual se materializa en el mapa de cambios para el periodo temporal establecido. Este mapa de cambios permite interpretar las variaciones espaciales y temporales de la vegetación, cuantificándolas, de forma que actúen como bioindicadoras de las alteraciones ambientales derivadas del desarrollo turístico. En esta relación final, el conocimiento acerca de las características, los patrones de distribución y la dinámica actual de la vegetación, desarrollados previamente, se convierte en una referencia básica para entender y vincular sus cambios a las actividades turísticas o no.

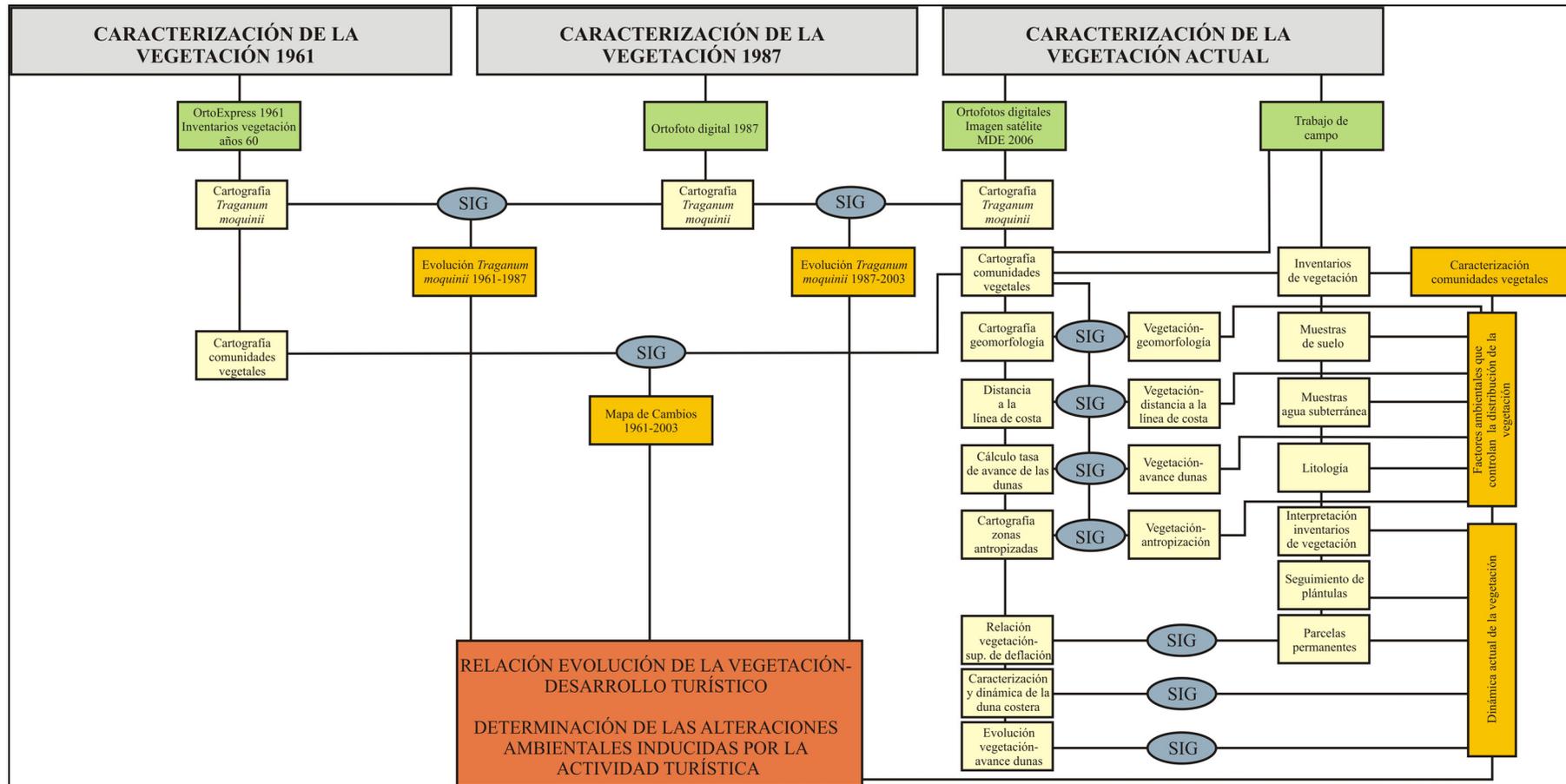


Figura 3.2. Esquema metodológico.

3.6. Caracterización de la vegetación

La metodología específica seguida para la caracterización de las comunidades vegetales (figura 3.3) se ha basado, en primer lugar, en la delimitación de las unidades de vegetación existentes, para posteriormente inventariarlas y determinar, en función de sus características, el tipo de comunidad. Finalmente, dentro de cada comunidad vegetal, con base en sus variaciones florísticas y estructurales, se han diferenciado diferentes subtipos, que se han determinado a partir de análisis estadísticos de los inventarios de cada comunidad específica.

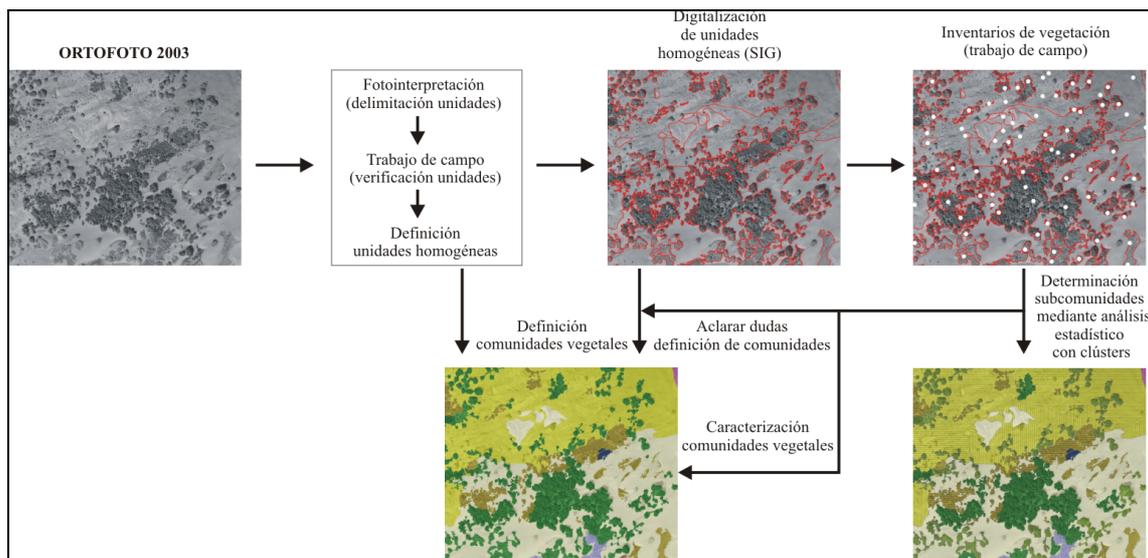


Figura 3.3. Metodología seguida para la caracterización de la vegetación.

3.6.1. Digitalización de las unidades de vegetación actuales y definición de las comunidades vegetales

La caracterización de las comunidades vegetales parte de la delimitación de unidades homogéneas de vegetación sobre documentos aéreos. Estas unidades son consideradas como herramientas cartográficas claves en esta investigación, pues resultan ser la base de la estrategia de muestreo, dependientes de la escala de análisis considerada. Es decir, cada unidad permite un primer acercamiento a la vegetación del área de estudio, mediante la división sistemática del mismo en función de las características fisionómicas y estructurales de la cubierta vegetal. Posteriormente se realiza para cada una de estas unidades un muestreo estratificado que permita determinar las comunidades vegetales existentes, mediante la identificación de las especies que las componen. Se han seguido la siguiente secuencia:

- 1) En una primera etapa, se fotointerpretaron las fotografías aéreas a escala 1:8.000 del año 2000 y las 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. La disponibilidad de varios documentos ha permitido aclarar dudas que se tenían en alguno de ellos, debido, por ejemplo, a la existencia de sombras proyectadas por las mismas plantas. La fotointerpretación de las fotografías aéreas se ha llevado a cabo a través de dos tipos de estereoscopios, Geoscope y Aviopret. Este segundo permite una visión muy detallada, pero al mismo tiempo limita la observación del conjunto, por lo que fue utilizado para aclarar dudas, principalmente. Con base en estas herramientas se delimitaron las unidades de vegetación homogéneas, 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, pueden existir varios tipos de formaciones arbustivas, debido a la existencia de características determinadas (forma de las plantas, tono, textura, etc.), por lo cual se individualizan en unidades de vegetación concretas.

- 2) Posteriormente, en una segunda etapa, desarrollada a través del trabajo de campo, se han verificado las unidades delimitadas, basándonos en la especie o especies dominantes. Esto se ha visto facilitado por el escaso número de especies dominantes, normalmente entre una y tres, de la mayor parte de las unidades de vegetación. Esta verificación se realizó unos meses después de la estación húmeda, con la finalidad de que estuvieran presentes todas las especies vegetales, y que éstas se encontraran en las mejores condiciones posibles (con presencia de flores y/o frutos, por ejemplo) para poder ser identificadas. Se considera que las especies dominantes son las que conforman la identidad de una comunidad vegetal concreta, al determinar su aspecto externo general, permitiendo su reconocimiento visual, que además son fácilmente diferenciables por la mayor parte de las personas (por ejemplo si es un matorral espinoso de aulagas, un bosquete de tarajales, una comunidad herbácea de juncos, etc.). Para ello se determinó el estrato por biotipo, atendiendo al modelo de Raunkiaer (1905), con mayor peso específico, 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: 79; González, 2004: 37). En aquellos casos en 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). La denominación de los diferentes tipos de vegetación se basa en la palabra *comunidad*, seguido del nombre de la especie o especies dominantes. Sin embargo, esta primera definición de

las comunidades vegetales se considera provisional, a la espera de la realización de los inventarios de vegetación que las confirmen definitivamente o, por el contrario, las modifiquen.

- 3) Las unidades correspondientes a cada comunidad fueron subdivididas, a su vez, en otras, atendiendo a la composición florística y la estructura, según los biotipos, estableciéndose diferentes subcomunidades vegetales. Esto permite detectar de forma preliminar variantes de cada comunidad, que posteriormente puedan ser inventariadas. Su denominación se basa en la palabra *subcomunidad*, seguida del nombre de una de las especies que la diferencia. Al igual que las comunidades vegetales, las subcomunidades establecidas en esta etapa son provisionales, pues deben ser confirmadas por los análisis estadísticos de los inventarios de vegetación que se detallarán posteriormente.
- 4) La delimitación definitiva de las unidades de vegetación obtenidas a partir del trabajo de campo se ha realizado sobre la ortofoto digital del año 2003 mediante el programa ArcGIS 9.x., generándose una capa de información espacial georreferenciada 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. De esta forma, se ha realizado una cartografía provisional de la vegetación del sistema de dunas de Maspalomas correspondiente al año 2003 a escala 1:5.000, que será definitiva cuando se realicen los inventarios que confirmen los tipos de vegetación.

3.6.2. Inventarios de vegetación

Los inventarios de vegetación son una herramienta fundamental para la determinación y caracterización de las comunidades vegetales de cualquier espacio geográfico. Sin embargo, la estructura e información recogida en estos inventarios varía de forma significativa en función del objetivo del estudio y del tipo de metodología utilizada. En el caso de la presente investigación, la metodología utilizada está basada en el método geográfico de estudio de la vegetación, creado por el geógrafo francés George Bertrand en 1966, que verdaderamente constituye una adaptación del inventario fitosociológico de Braun-Blaquet, aunque dando mayor importancia a la fisionomía de la vegetación (Arozena y Molina, 2000: 110). Así, la metodología consiste en la elaboración de inventarios de vegetación en los que se toman datos de la abundancia/dominancia y de la sociabilidad por estratos de altura y especie. Se clasifican las plantas por estrato, atendiendo a las siguientes características:

Estratos

- 5: arbóreo (altura media más de 7 m)
- 4: arborescente (altura media de 3-7 m)
- 3: arbustivo (altura media de 1-3 m)
- 2: subarbustivo (altura media de 0,5-1 m)
- 1: herbáceo (menos de 0,5 m)

La abundancia/dominancia se entiende como el grado de recubrimiento de cada especie y la global del estrato. Los índices de recubrimiento utilizados son iguales a los definidos para el método fitosociológico de Braun-Blanquet:

- 5: superior al 75% independientemente del número de individuos
- 4: entre 50 y 75% independientemente del número de individuos
- 3: entre 25 y 50% independientemente del número de individuos
- 2: muy abundante y menos del 5% de cobertura o menos abundante y entre 5 y 25% de cobertura
- 1: abundante, pero con cobertura muy baja; o menos abundante y con mayor cobertura, pero ésta siempre menor al 5%
- + individuos aislados uno o pocos individuos

La sociabilidad por especie es la relación espacial que guardan entre sí los distintos ejemplares de una misma especie de un mismo estrato. En definitiva, es la forma de agruparse que tienen las plantas. Los índices de sociabilidad son los siguientes:

- 5: poblamiento continuo
- 4: rodales o colonias extensas
- 3: grupos numerosos o pequeños rodales
- 2: pequeños grupos
- 1: individuos aislados

El método expuesto anteriormente fue adaptado a los objetivos de esta tesis y a las nuevas líneas de investigación biogeográfica. Se optó por un modelo de ficha (tabla 3.2.) donde la vegetación fue inventariada, además de por estratos de altura, según la abundancia/dominancia y sociabilidad, por estratos en función de los biotipos existentes. Esto se debe a que el método de Bertrand no proporciona información sobre el recubrimiento y la sociabilidad de cada especie en el conjunto de la zona inventariada, lo que es sumamente importante para la definición de la estructura de la vegetación (Arozena y Molina, 2000: 111). Se han considerado los siguientes biotipos, basados en la clasificación propuesta por Raunkiaer (1905): arbóreo (macrofanerófitos), arbustivo (nanofanerófitos y caméfitos), herbáceo (hemicriptófitos, geófitos y terófitos) y muscinal (talófitos).

La información basada en los biotipos es la que se ha utilizado para caracterizar la estructura vertical (estratificación) de la vegetación, ya que la definición de dicha estructura vertical debe basarse en que cada estrato tiene una composición florística diferente y propia (Arozena y Molina, 2000: 87). Para valorar la existencia de diferentes estratificaciones dentro de cada estrato se anotó la altura máxima y mínima del mismo. Por otro lado, considerando que la caracterización según la altura no manifiesta un carácter estructural sino que indica una coyuntura derivada de la dinámica de la vegetación (Arozena y Molina, 2000: 86), se ha utilizado para determinar el estado de desarrollo y los procesos de sucesión de la vegetación (estable, regresivo o progresivo). Por ejemplo, la existencia de numerosas plántulas de nanofanerófitos en el estrato herbáceo indica un carácter progresivo de la comunidad arbustiva, lo cual adquiere un gran significado en la sucesión vegetal si este incipiente estrato arbustivo aparece en una comunidad herbácea. Sin embargo, en el caso de las especies herbáceas de escaso porte, la dinámica no puede basarse en este aspecto, debido a que tanto las plántulas como los individuos adultos se encuentran en el mismo estrato de altura.

También se han recogido datos localizadores y ecológicos (nº de inventario, fecha, superficie estudiada, coordenada del punto central de la zona del inventario, tipo de comunidad vegetal, geoforma y sustrato, orientación, dinámica de la vegetación, cobertura global y presencia de actividades antrópicas; además de anotarse en el apartado de observaciones otros aspectos que pudieran ser útiles para la interpretación de la estructura, fisionomía y dinámica de la vegetación). Se descartaron datos típicos recogidos en los inventarios, como la altitud, debido a la homogeneidad de esta variable en este espacio geográfico, y por lo tanto, a su poca importancia en la explicación de la localización y ecología de las comunidades vegetales.

La interpretación de estos inventarios ha permitido, aparte de la caracterización de la vegetación, confirmar las comunidades vegetales definidas de forma preliminar, tal y como se expuso en el apartado 3.6.1. De esta forma, también ha sido posible en esta etapa modificar los límites de dichas unidades, teniendo en cuenta los datos semicuantitativos de la vegetación recogidos en los inventarios. Finalmente los datos obtenidos fueron utilizados para expresar gráficamente la estructura y composición florística de la comunidad vegetal analizada. Este gráfico se denomina *pirámide de vegetación*, y constituye un método que permite visualizar muy rápidamente la estructura de la formación (aspecto fisionómico, altura, densidad, estratificación) y su dinámica interna (estado actual de equilibrio y sentido de la evolución). En estas pirámides, a los datos proporcionados por el inventario, se añade la dinámica previsible por estrato, y esto facilita las comparaciones entre las distintas formaciones (Ferrerías y Fidalgo, 1991).

Nº inventario: 80
 Fecha: 14/04/05
 Superficie estudiada: 100 m²
 Alteraciones humanas: camino
 Orientación: todas
 Otros (presencia de excrementos animales, pedregosidad, pendiente, etc.):
 Observaciones:

Geoforma: depresión interdunar
 Coordenada: 441987/3068992
 Comunidad vegetal: C. de *Launaea arborescens*
 Cobertura global: 60%
 Dinámica: progresiva

ESTRUCTURA POR ESTRATOS DE ALTURA

Estrato	Por especie		Por estrato
	Abundancia/Dominancia	Sociabilidad	Abundancia/Dominancia
Arbóreo (> 7m.)			
Arborescente (3 - 7 m.)			
Arbustivo (1 - 3 m.)			
<i>Launaea arborescens</i>	3	2	3
Subarbustivo (0,5 - 1 m.)			
<i>Launaea arborescens</i>	1	2	1
Herbáceo (0 - 0,5 m.)			
<i>Launaea arborescens</i>	1	1	
<i>Heliotropium ramosissimum</i>	2	4	
<i>Cyperus capitatus</i>	2	3	2
<i>Neurada procumbens</i>	1	2	

ESTRUCTURA POR BIOTIPOS

Biotipo	Por especie		Por estrato
	Abundancia/Dominancia	Sociabilidad	Abundancia/dominancia
Arbóreo (Macrofanerófitos)			
Recubrimiento:			
Altura:			
Arbustivo (Nanofanerófitos y caméfitos)			
Recubrimiento: 50%			
Altura: 5 - 160 cm			
<i>Launaea arborescens</i>	3	3	3
<i>Heliotropium ramosissimum</i>	2	4	
Herbáceo (Hemicriptófitos, geófitos y terófitos)			
Recubrimiento: 10%			
Altura: 2 - 50 cm			
<i>Cyperus capitatus</i>	2	3	2
<i>Neurada procumbens</i>	1	2	

Tabla 3.2. Ficha modelo de inventario de vegetación.

Estos inventarios se han llevado a cabo mediante un muestreo estratificado sobre las unidades de vegetación previamente establecidas, tanto de las definidas en función de las comunidades vegetales, como de las subcomunidades. De esta forma se puede

confirmar su validez, e incluso determinar la existencia de otras no detectadas en el análisis previo realizado. Los inventarios se realizaron preferentemente en las zonas interiores de cada unidad de vegetación muestreada, evitando en lo posible el efecto borde. Asimismo, los inventarios se realizaron unos meses después de que tuvieran lugar las lluvias, de forma que estuviera presente la mayor parte de las especies, especialmente los terófitos, con sus principales características anatómicas desarrolladas (flores, frutos, etc.) para facilitar su identificación. Los primeros inventarios se realizaron en las zonas más estabilizadas, donde se localizan especies que presentan importantes variaciones morfológicas estacionales, llegando incluso a desaparecer, como los terófitos, los geófitos y los hemicriptófitos. Con posterioridad los inventarios se desarrollaron en las dunas móviles, donde estos biotipos no están presentes o son muy poco significativos, de forma que pueden ser inventariados al principio del verano, debido a que están presentes todos los taxones existentes en condiciones aceptables de desarrollo.

En cada unidad delimitada se ha realizado al menos un inventario de vegetación, pero en aquellas unidades de mayor tamaño se han realizado un número superior de inventarios para garantizar su homogeneidad y pertenencia a una determinada comunidad. Se ha optado por utilizar una superficie estándar de 100 m cuadrados para cada inventario, aunque en ocasiones su tamaño ha sido inferior o superior, dependiendo del propio tamaño de la unidad inventariada y las características propias de algunas comunidades vegetales. De igual forma, algunas unidades no fueron inventariadas, debido a la similitud que presentaba con otras unidades cercanas.

Se han realizado un total de 404 inventarios entre abril y julio del año 2005, aunque dos de ellos se realizaron en los años 2006 y 2007 (figura 3.4), desarrollándose un total de 25 campañas de campo.



Figura 3.4. Localización de los inventarios de vegetación.

Para facilitar la ubicación de los inventarios se han definido una serie de unidades (figura 3.5), que no responden a criterio geográfico alguno, a las cuales se hace referencia en el capítulo correspondiente a la descripción de las comunidades vegetales. Estas unidades se han identificado con las siguientes letras, según su localización: A (norte-oeste), B (norte-centro), C (norte-este), D (centro-oeste), E (centro), F (centro-este), G (sur-oeste), H (sur-este) e I (este).

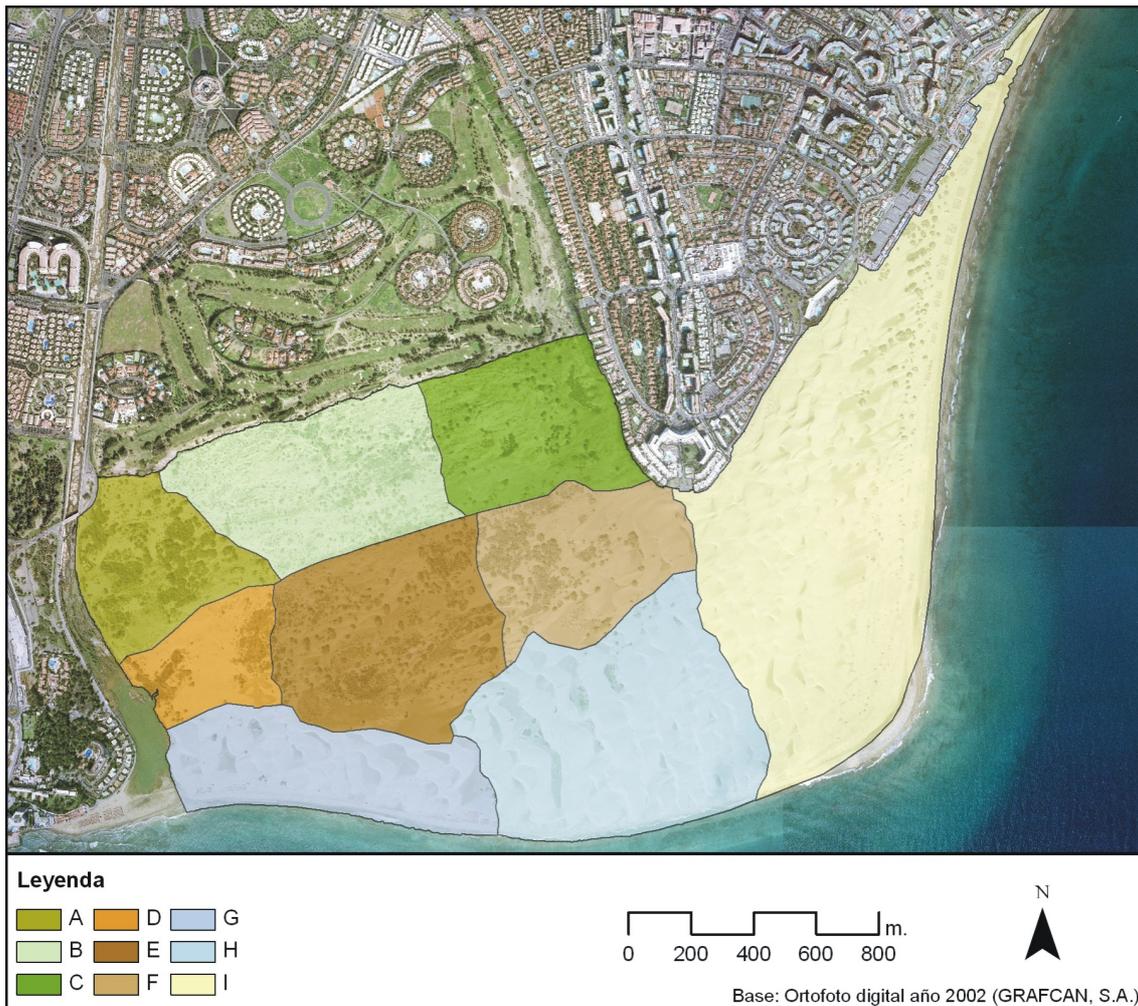


Figura 3.5. Unidades creadas para la localización de los inventarios de vegetación.

3.6.3. Definición de las subcomunidades vegetales

La interpretación de los inventarios de vegetación, aparte de utilizarse para caracterizar las comunidades vegetales y solventar las dudas sobre la asignación de determinadas unidades a un tipo u otro, se han empleado, tras un análisis estadístico previo, para determinar las variantes existentes de cada comunidad vegetal, que hemos definido como subcomunidad. Se ha considerado a estas subcomunidades como combinaciones de taxones específicas dentro de cada comunidad vegetal, que determinan la existencia de variaciones significativas en la estructura, cobertura y/o composición florística. Estas subcomunidades se consideran indicadores de la existencia de variaciones sustanciales en las condiciones ambientales y la influencia de las actividades humanas. Por lo tanto, las subcomunidades permiten entender los procesos de sucesión vegetal, ecología, factores ambientales y modificaciones antrópicas existentes.

La determinación de las diferentes subcomunidades se realizó mediante un análisis cluster de los inventarios de vegetación de cada comunidad vegetal con el programa SPSS. Se realizaron numerosas pruebas con diferentes métodos y valores de

datos, analizando los resultados obtenidos con las características de cada inventario. Finalmente, se ha utilizado la clasificación jerárquica aglomerativa, utilizando como método de conglomeración el de Ward y como medida de disimilaridad la distancia euclídea al cuadrado.

La realización de la clasificación de los inventarios ha requerido, en primer lugar, de la transformación de los índices utilizados en los mismos en una escala ordinal (tabla 3.3). Para ello, se ha utilizado la escala propuesta por Van der Maarel (1979).

Braun-Blanquet Bertrand	+	1	2	3	4	5
Van der Maarel	2	3	5	7	8	9

Tabla 3.3. Transformación de los valores obtenidos en los inventarios de vegetación.

Para la realización de los clústers no se consideraron los valores de las especies dominantes de cada comunidad vegetal, ya que se observó que estas especies tergiversaban de forma significativa el resultado, debido a que los grupos tendían a formarse principalmente en función del índice de cobertura de los mismos. De esta forma, teniendo en cuenta que las especies dominantes siempre están presentes, las subcomunidades son el resultado de las variaciones en la composición florística.

Finalmente, las unidades de vegetación fueron adscritas a determinadas subcomunidades, en función de los resultados obtenidos en el análisis clústers.

Una vez definidas conceptualmente y espacialmente los diferentes tipos de vegetación existentes, se elaboraron dos mapas, uno correspondiente a las comunidades y otro a las subcomunidades vegetales. El mapa de comunidades vegetales se ha estructurado considerando en primer lugar la fisonomía. De esta forma, la vegetación se ha agrupado en comunidades herbáceas, arbustivas y arbóreas, además de otro grupo que recoge las comunidades artificiales y las áreas desnudas (plantaciones o sin vegetación). Las comunidades de cada grupo fisonómico tienen colores de una misma gama. Así, las comunidades herbáceas se representan con colores marrones y naranjas, mientras que las arbustivas y arbóreas con colores verdes. Finalmente, las plantaciones son de color gris y las áreas sin vegetación son amarillas. Por su parte, el mapa de subcomunidades se basa en las tramas. Se mantiene el color específico de cada comunidad vegetal y las diferentes facies se representan por tramas de líneas o puntos.

3.6.4. Tratamiento de los datos de los inventarios de vegetación

Los inventarios de vegetación proporcionan una información muy valiosa sobre la composición florística, estructura y dinámica de la vegetación. Por ello, estos inventarios han sido objeto de un exhaustivo análisis e interpretación. Se han obtenido la siguiente información: riqueza florística, espectro biológico, frecuencia de las especies vegetales y cobertura de cada comunidad vegetal.

La riqueza florística constituye el número de especies integrantes de una comunidad vegetal, pudiéndose considerar distintos tipos de riqueza (Arozena y Molina, 2000: 120):

- Riqueza total: número total de especies existentes en todos los inventarios realizados.
- Riqueza media: Normalmente se obtiene de la división entre el número total de especies detectadas en los inventarios (riqueza total) y el número de inventarios realizados. Sin embargo, se ha establecido que es más representativo considerarla como la media del número total de especies existentes en cada uno de los inventarios realizados.
- Riqueza máxima: número de especies de la unidad de muestreo de mayor riqueza.
- Riqueza mínima: número de especies de la unidad de muestreo de menor riqueza.

El análisis del espectro biológico permite una caracterización más precisa de la fisionomía de las comunidades vegetales, ya que está definida por el predominio de unos biotipos sobre otros, y proporciona un fundamento interpretativo de sus variaciones en el espacio de forma que se puedan comparar unas con otras (Arozena y Molina, 2000: 84). Indirectamente los biotipos permiten comprender mejor la relación existente entre los factores ambientales y la vegetación, ya que la dominancia de unos sobre otros normalmente son indicadores de las características ecológicas del espacio geográfico donde la vegetación se encuentra asentada. La caracterización de los biotipos se ha realizado a partir del grado de cobertura del conjunto de especies integrantes de los inventarios pertenecientes a la misma comunidad vegetal, ya que de esta forma se obtiene una caracterización fisionómica más real que considerando únicamente el número de especies perteneciente a cada tipo biológico (Arozena y Molina, 2000: 85). Para ello, lo primero que se ha tenido en cuenta es convertir el dato de cobertura de cada especie de los inventarios de vegetación en un valor lineal y proporcional en tanto por ciento, quedando de la siguiente forma: 5%, 10%, 25%, 50%, 75% y 100% (Arozena y Molina, 2000: 121).

Por su parte, la frecuencia permite conocer las especies vegetales que dominan cada comunidad vegetal y las de mayor fidelidad a las mismas. Se ha calculado porcentualmente atendiendo a la presencia de cada especie en el conjunto de inventarios de vegetación realizados para cada comunidad vegetal, según la fórmula (Matteucci y Colma, 1982):

$$F_i = (m_i / M_t) \times 100$$

donde:

m_i = número de veces que se registra la especie i

M_t = número total de inventarios.

En función de la frecuencia las especies, se han definido cuatro categorías principales (Marrero *et al.*, 2003): constantes (C), cuando están presentes en más de un 75% de los inventarios, siendo las especies fieles a la comunidad; frecuentes (F), cuando están presentes en el 25-75% de los inventarios; esporádicas (E), cuando su presencia es del 10-25% de los inventarios; y raras (R), cuando se localizan en menos del 10% de los inventarios.

Finalmente, se calculó la cobertura media de cada comunidad vegetal en función de los valores estimados anotados en la ficha de campo de los inventarios.

3.7. Los factores ecoantrópicos que controlan la distribución de la vegetación

En primer lugar, se ha considerado importante analizar las características climáticas del área de estudio. Hay que tener en cuenta que existen diferencias significativas entre los campos de dunas en función de su localización latitudinal, debido al clima reinante, especialmente en relación con las características ecológicas de los mismos (Doing, 1985; Hesp, 1991).

El análisis de los patrones de distribución de las comunidades vegetales se ha basado tanto en el estudio de las relaciones espaciales en el entorno del SIG, como en los datos obtenidos mediante el trabajo de campo.

Para la determinación de los factores que *a priori* podrían controlar la distribución de las comunidades vegetales se ha realizado un análisis global del área de estudio, además de consultar la bibliografía existente.

Se ha optado por un análisis a diferentes escalas de detalle, donde en cada nivel se analizan el factor o conjunto de ellos que aparentemente controlan los patrones de distribución de las comunidades vegetales, considerando que ciertos factores están determinados o condicionados por otros. Es el caso, por ejemplo, del afloramiento del nivel freático cerca de la superficie, cuya presencia depende de la existencia de depresiones interdunares o superficies de deflación para que se encuentre a disposición de las plantas. Asimismo, las posibles comunidades vegetales que pueden colonizar este hábitat están condicionadas a su vez por la existencia de procesos sedimentarios eólicos activos, como por ejemplo la movilidad de la arena, que limita el asentamiento de unas especies y permite el desarrollo de otras adaptadas a esta perturbación. Esta estructuración jerárquica de los factores ambientales constituye un planteamiento inicial que debe ser verificado.

En una primera escala de análisis, que abarca la totalidad del área de estudio, se han considerado como factores la distancia al mar y los procesos sedimentarios eólicos activos. El factor principal que se considera que controla la distribución de la vegetación en los sistemas de dunas transgresivos es la movilidad de la arena (Hesp, 1991), puesto que *a priori* se observa un incremento gradual de la superficie de la vegetación conforme se reduce la actividad sedimentaria eólica. Atendiendo a esto, se ha considerado que la existencia de procesos sedimentarios eólicos activos constituye el primer factor ambiental que condiciona la distribución de la vegetación en el sistema de dunas de Maspalomas. Si consideramos la totalidad del área de estudio, se han delimitado diferentes zonas en función de la actividad sedimentaria eólica que presenta el sistema. Dentro de cada una de estas unidades se ha valorado otros factores que son la geomorfología, el grado de antropización y la tasa de desplazamiento de las dunas. Finalmente, a una escala más detallada se han analizado otros factores ambientales subordinados a los anteriores, como son la litología y la profundidad de la capa de agua, las características químicas del sustrato y las características químicas de las aguas subterráneas.

Por su parte, la distancia a la costa, como indicador de la influencia del spray marino, constituye uno de los factores más significativos, sobre todo en sistemas de dunas progradantes (Wilson y Sykes, 1999). Sin embargo, se ha considerado interesante analizarlo en Maspalomas.

3.7.1. Caracterización climática

El clima de Maspalomas se estudió de dos formas. En primer lugar, se analizaron los registros pluviométricos y térmicos de forma separada. Por otra parte, se calcularon dos índices para determinar de forma integrada las características del clima de la zona de estudio y su influencia en la vegetación.

3.7.1.1. Los elementos climáticos

Las estaciones meteorológicas existentes en el entorno de Maspalomas presentan ciertos problemas, al tener lagunas significativas en sus registros pluviométricos o no estar actualizadas. Así por ejemplo, la estación meteorológica localizada en el Faro de Maspalomas tiene registros de temperatura y precipitaciones desde los años 40 del pasado siglo hasta la actualidad, incluyendo los del Servicio Hidráulico de Las Palmas (032 Maspalomas) entre 1948 y 1996, y los de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (C689E Faro de Maspalomas) entre 1997 y 2008. Sin embargo, entre 1995 y 2008 existen bastantes lagunas. Por otro lado, la estación de Maspalomas-Pueblo (158) carece de datos para ciertos años y además sus registros solamente llegan hasta el año 2003. Finalmente, la estación de El Berriel (153) está completa, pero muy alejada del área de estudio.

En primer lugar, se ha realizado un análisis de regresión lineal simple con los datos de precipitaciones medias anuales entre la estación del Faro de Maspalomas con las de Maspalomas-Pueblo y El Berriel. Los resultados (figuras 3.6 y 3.7) indican que la de Maspalomas-Pueblo presenta una mayor significación estadística que la de El Berriel. Sin embargo, la existente con la última estación es también muy alta. Para rellenar las lagunas de la estación del Faro de Maspalomas entre 1994 y 2003 se ha utilizado la ecuación obtenida en el análisis de regresión con la estación de Maspalomas-Pueblo, excepto para aquellos datos que ya existieran. Los datos entre el 2004 y el 2008 se obtuvieron de la ecuación de regresión con la estación de El Berriel.

Con los datos de precipitaciones disponibles para el periodo 1952-2008, se calcularon estadísticas básicas, como las medias anuales y mensuales. Además, para clasificar los años en función de si fueron muy lluviosos, lluviosos, normales, secos o muy secos, se calcularon los quintiles.

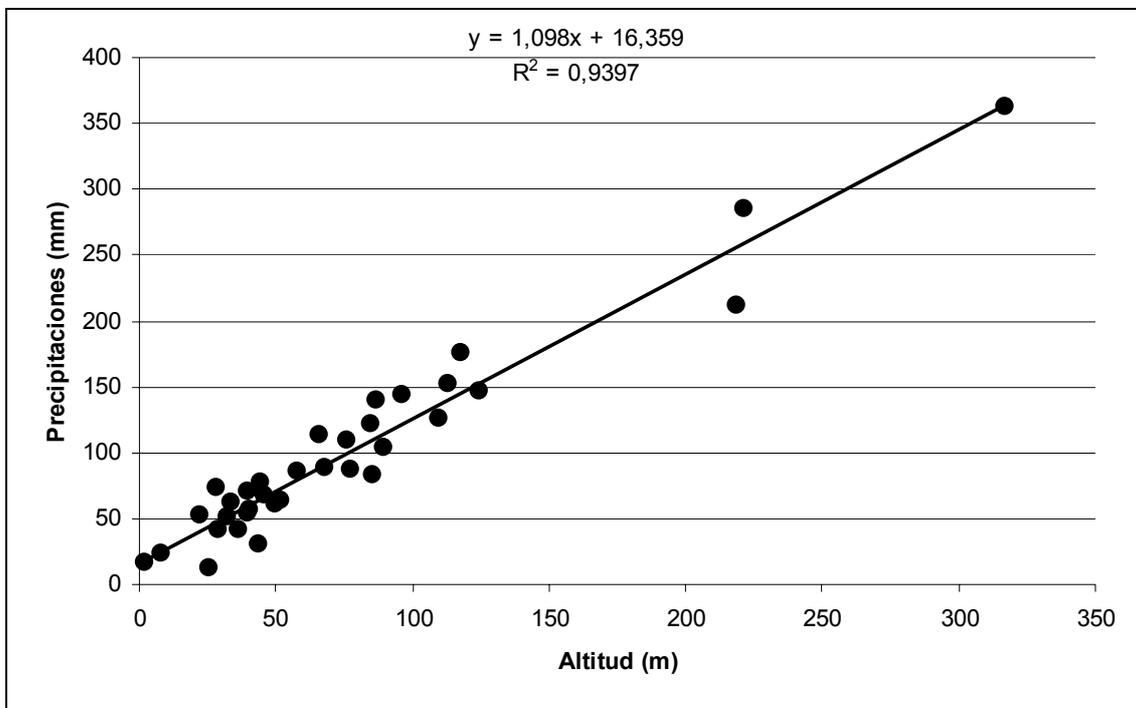


Figura 3.6. Análisis de regresión de las precipitaciones entre la estación Faro de Maspalomas y Maspalomas-Pueblo.

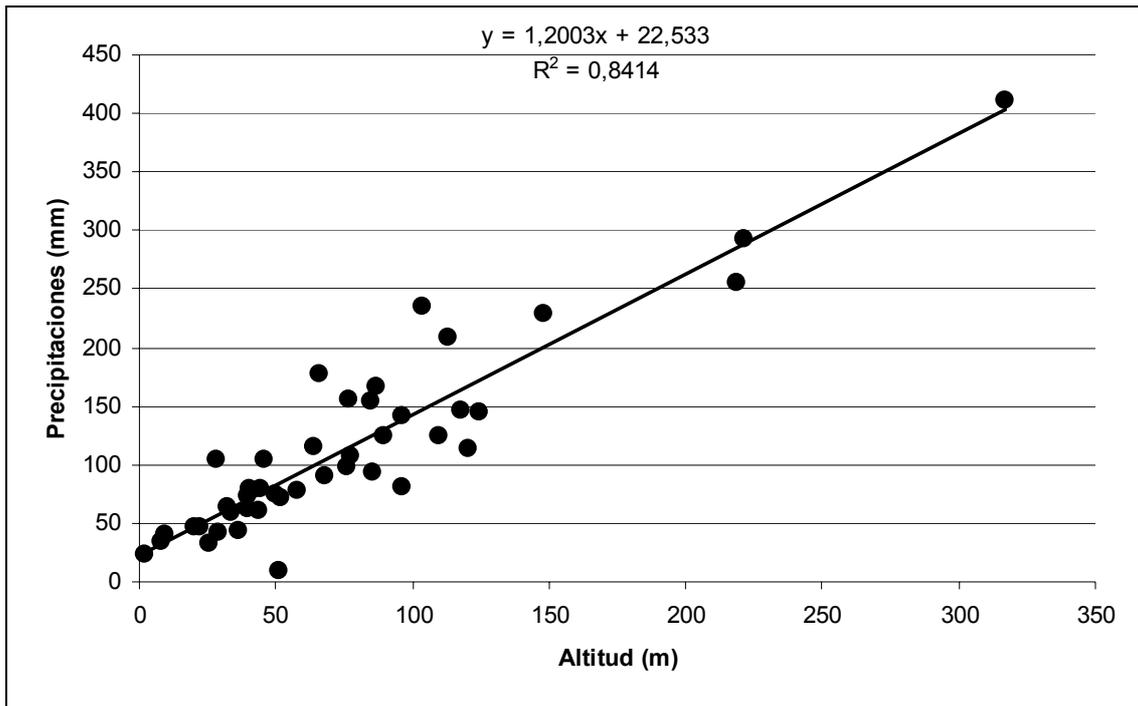


Figura 3.7. Análisis de regresión de las precipitaciones entre la estación Faro de Maspalomas y El Berriel.

Las temperaturas se han analizado mediante el tratamiento estadístico de los datos de la estación C689E de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), localizada al oeste del campo de dunas, a 12 m sobre el nivel del mar. Los registros de temperaturas abarcan el periodo 1997-2007.

3.7.1.2. Índices climáticos

Los datos obtenidos por las dos estaciones mencionadas han permitido calcular los siguientes índices:

Índice de Martonne

Este índice fue ideado por el geógrafo francés Emmanuel de Martonne en 1926 con fines hidrológicos. Básicamente define la aridez del clima. Para ello estableció la siguiente fórmula:

$$A = P/T+10$$

donde:

P = precipitación media anual en mm
T = temperatura media anual en ° C

El índice también se ha calculado para cada mes utilizando la siguiente fórmula:

$$a = 12p/t+10$$

donde:

p = precipitación media mensual en mm

t = temperatura media mensual en ° C

En función del resultado se establece la siguiente clasificación:

A > 20 clima con humedad suficiente

10-20 clima con tendencia a la sequedad

5-10 clima árido

A ≤ 5 clima hiperárido

Ombrotérmico de Gaussen

En 1952 Gaussen estableció un índice que, además de evaluar la aridez del clima, se representaba de forma gráfica, mediante el llamado ombrotérmico. Según este índice un mes es árido cuando las precipitaciones en mm son inferiores al doble de las temperaturas: $P < 2t$.

Por su parte, el ombrotérmico consiste en la representación conjunta de las temperaturas (°C) y precipitaciones (mm) medias mensuales, donde la escala de las precipitaciones es el doble de la de las temperaturas. El periodo seco corresponde al área comprendida entre ambas curvas cuando la de precipitaciones quede por debajo de la de temperaturas.

El ombrotérmico lleva asociado información de las características de la estación meteorológica utilizada (nombre, altitud, años de observación) y de los datos registrados (T = temperatura media anual, P = precipitación anual, M' = temperatura máxima absoluta del mes más calido, M = temperatura media de las máximas del mes más cálido, m = temperatura media de las mínimas del mes más frío, m' = temperatura mínima absoluta del mes más frío, Mm = temperatura media de las máximas del mes más frío, Osc = oscilación térmica (M-m) y PAV = periodo de actividad vegetal).

3.7.2. Metodología basada en el análisis espacial mediante SIG

La metodología sustentada en el SIG se basa en el cruce (*overlay*) de la capa correspondiente al mapa de vegetación del año 2003 con la capa del factor ambiental específico. Para ello, dentro del programa ArcGIS 9.x., se ha utilizado la herramienta *union* de geoprociamiento, contenida en la aplicación ArcToolbox. 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 obtiene una nueva capa de información geográfica con las combinaciones posibles. La tabla de atributos de la nueva capa generada mantiene los atributos temáticos de las dos que se han cruzado (tabla 3.4), además de conservar la totalidad de los polígonos de ambas capas, incluidos aquellos que no son el resultado del cruce de las mismas (figura 3.8).

FID	Geoforma	Comunidad	Superficie	SupHa
8	Dunas barjanas y láminas de arena	<i>C. Cyperus capitatus-Ononis serrata</i>	806,38	0,08
25	Superficie de deflación	<i>C. Juncus acutus</i>	1838,15	0,18
75	Duna costera	<i>C. Traganum moquinii</i>	19343,76	1,93
692	Dunas estabilizadas	<i>C. Cyperus capitatus-Ononis serrata</i>	194554,04	19,45
822	Dunas en montículos	<i>C. Tamarix canariensis</i>	8780,18	0,87

Tabla 3.4. Tabla de atributos parcial resultante del cruce de la capa de vegetación con la de factores ambientales (geoformas).

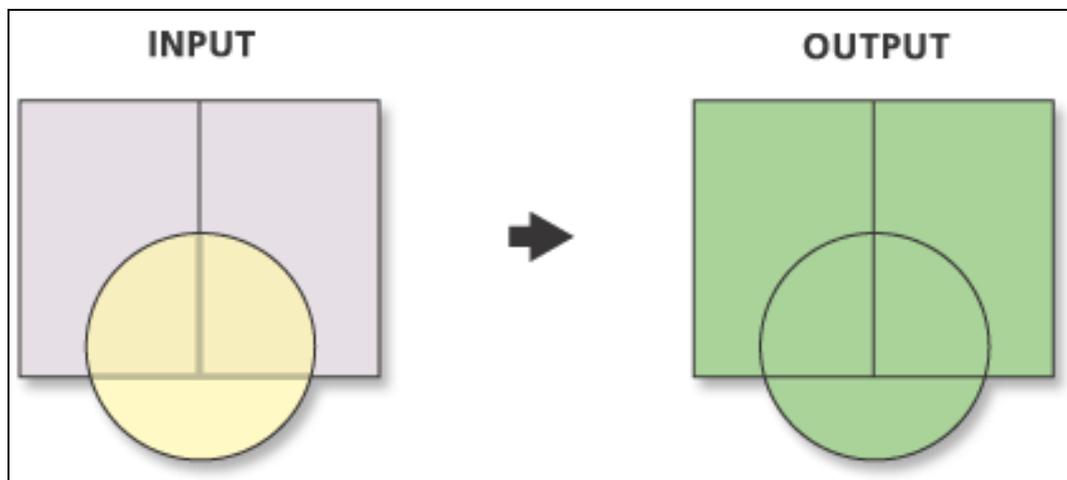


Figura 3.8. Esquema de la función de geoprocesamiento *union* en ArcGis 9.x. Fuente: [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=1102&pid=1096&topicname=Union_\(Analysis\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=1102&pid=1096&topicname=Union_(Analysis)).

Este proceso de superposición puede implicar la generación de polígonos ficticios (*slivers*), debido a problemas en la digitalización de las entidades geográficas. Así, puede ocurrir que la capa realizada dos veces genere contornos que no coinciden exactamente (Bosque, 1992: 257), lo que tergiversaría el cálculo de las superficies de los polígonos resultantes de la superposición. Además, los polígonos ficticios también se pueden generar entre los espacios vacíos (*gap*) que pudieran quedar entre dos de ellos por errores en la digitalización (figura 3.9). En este caso, todas las entidades creadas de esta forma tienen en el campo FID (identificador) el valor -1. De todas maneras, normalmente los polígonos ficticios son de escaso tamaño (Bosque, 1992: 258), por lo que no suelen afectar de forma significativa al resultado final, pero en cambio pueden ocasionar problemas estéticos no deseados, además de suponer una incoherencia en la información geográfica que es necesaria eliminar. Para solventar este problema, posteriormente a la superposición se procedió a la eliminación los polígonos ficticios, para lo cual se utilizó como criterio el tamaño, la existencia del valor -1 en el campo

FID y la inexistencia de atributos en la tabla de atributos, que suelen ser otra característica de los mismos. Una vez eliminados estos polígonos ficticios se procedió a asignar los espacios ocupados por los mismos a otros polígonos adyacentes a ellos, atendiendo a las particularidades de cada caso.

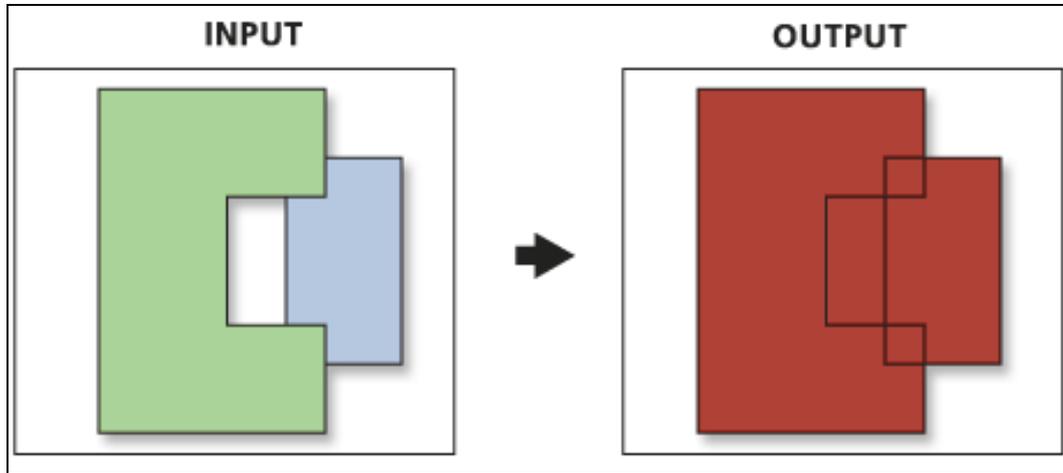


Figura 3.9. Ejemplo de generación de un polígono ficticio debido a la existencia de un hueco (*gap*) entre los polígonos de las capas. Fuente: [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=How%20Union%20\(Analysis\)%20works](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=How%20Union%20(Analysis)%20works).

El siguiente paso es la creación de un nuevo campo en la tabla de atributos donde se calcule la superficie ocupada por los nuevos polígonos generados. La superficie de cada comunidad que se asocia a cada categoría del factor analizado se interpreta como un indicador de la vinculación entre ambos. De esta forma cuanto más superficie se relacione con una determinada categoría, se considera que la comunidad vegetal tiene preferencia por desarrollarse en la misma, o que es capaz de tolerar esas condiciones ambientales.

Los factores que se han analizado mediante el SIG son: las geoformas, la distancia al mar, la tasa de desplazamiento de las dunas y el grado de antropización.

3.7.2.1. Cálculo de la distancia a la costa

Con el objetivo de analizar la relación entre el spray marino y la distribución de la vegetación se ha utilizado indirectamente la distancia al mar. Una vez extraída la línea de costa de la ortofoto digital del año 2003, esta distancia se calculó en el SIG, mediante la realización de un *buffer* o área de influencia cada 100 m de la misma, hasta completar la totalidad del área de estudio. Posteriormente, mediante un análisis de superposición, se ha cruzado el *buffer* resultante con el mapa de vegetación del año 2003. De esta forma, se puede calcular la superficie de cada comunidad vegetal en función de la distancia al mar y determinar si existe algún patrón de distribución.

Para determinar si existe relación lineal entre la vegetación y la distancia al mar, se realizaron análisis de regresión entre el porcentaje de superficie de cada comunidad vegetal en función de la distancia a la costa. Para cada caso se aplicó el modelo de regresión lineal que mejor se ajustaba a la distribución de los datos.

Además, también se analizó la relación entre la distancia a la costa y la riqueza florística de las comunidades vegetales. El procedimiento consistió en cruzar la capa de inventarios de vegetación (utilizando el campo de número de especies) con la capa de distancia a la costa. Para ello, se utilizó la herramienta de ArcToolbox *Zonal Statistics as table*, que genera una tabla con diferentes estadísticos, como la media, el máximo, el mínimo y la desviación estándar. En definitiva, para cada distancia a la costa se obtuvo el número medio, mínimo y máximo de especies asociadas a las mismas.

3.7.2.2. Definición y digitalización de las geoformas

Se realizó una cartografía de la geomorfología eólica atendiendo a dos escalas de análisis diferentes. En una primera, abarcando la totalidad del área de estudio, sobre la ortofoto digital del año 2003 se digitalizaron diferentes unidades en función de la actividad sedimentaria eólica que aparentemente presentaban, puesto que se considera el factor principal que controla la distribución de la vegetación en los sistemas de dunas transgresivos. Para ello se utilizaron los siguientes criterios:

- Evidencias de procesos sedimentarios eólicos activos: para su identificación se ha utilizado tanto las ortofotos digitales como el trabajo de campo. En las imágenes se han considerado, por un lado, el tipo de geoforma existente, ya que la presencia de determinadas formas indica la existencia de procesos sedimentarios eólicos activos, como las dunas libres, las dunas condicionadas por la vegetación y la formación de superficies de deflación, entre otros. Por otro lado, se han comparado diferentes ortofotos recientes (años 1995, 1998, 2002 y 2003) en el entorno del SIG, para determinar el desplazamiento de las dunas, así como para detectar la formación o ampliación reciente de las superficies de deflación. Por lo que respecta al trabajo de campo, se ha considerado la presencia de microgeoformas, como rizaduras (*ripples*), u otros indicios de la existencia de procesos sedimentarios eólicos activos, como la acumulación de arena y la deflación a escala de detalle, la exhumación de raíces, la formación de pequeñas dunas, los cambios en la orientación de las crestas de las dunas, las variaciones en el volumen de arena y el afloramiento de sustratos subyacentes, para lo cual se han utilizado referencias fijas naturales o artificiales (plantas, balizas de los senderos, etc.).

- Aportes de sedimentos: un aspecto que se ha considerado muy importante es la existencia de un aporte continuo de arena hacia las áreas adyacentes. Esto se ha definido en función de las siguientes variables: existencia de una continua sucesión de dunas de una tipología o varias tipologías determinadas y la presencia de obstáculos (vegetación, infraestructuras humanas, etc.), que interrumpan o reduzcan el tránsito de arena. Esto último permite detectar si determinadas zonas se han quedado aisladas, de tal forma que ya no reciben aportes de sedimentos externos y, en consecuencia, la movilidad actual responde a la simple removilización de los sedimentos depositados con anterioridad.

Las unidades definidas en función de los procesos sedimentarios eólicos constituyen el marco de referencia espacial a partir del cual delimitar las diferentes geoformas existentes en cada una de ellas. Por una parte se han diferenciado las geoformas acumulativas, como, por ejemplo, las dunas; y, por otra, las erosivas, como las depresiones interdunares y las superficies de deflación, entre otras. A su vez, los diferentes tipos de dunas se ha agrupado en dos clases principales: dunas libres y dunas condicionadas por la vegetación.

Posteriormente, el mapa de unidades geomorfológicas se ha cruzado con el de vegetación del año 2003 de la forma detallada anteriormente. Así se obtuvo la superficie de cada comunidad vegetal que se desarrolla en función del tipo de geoforma existente para cada una de las zonas definidas.

El número de especies existentes en función de los procesos sedimentarios eólicos se calculó de igual forma que para la distancia a la costa. De esta forma, se utilizaron la capa de inventarios de vegetación y la capa correspondientes a las geoformas asociadas a cada una de las tres zonas definidas en función de los procesos sedimentarios eólicos. Así se obtuvieron tres tablas con el número medio, mínimo y máximo de especies asociadas a las diferentes geoformas y procesos sedimentarios eólicos.

3.7.2.3. Análisis del factor global que condiciona la distribución de la vegetación

La determinación de la preponderancia de la distancia a la costa o del tipo de geoforma, en combinación con los procesos sedimentarios eólicos existentes en la distribución de las comunidades vegetales se ha realizado de la siguiente forma: en primer lugar, se ha realizado una superposición de las capas de comunidades vegetales, distancia a la costa y geoformas. Posteriormente se ha calculado la superficie de las combinaciones resultantes en la capa generada con el análisis espacial.

3.7.2.4. Cálculo de la tasa de desplazamiento de las dunas

Las dunas existentes en la zona activa y en proceso de estabilización se desplazan de su posición original. La importancia de la movilidad de las dunas en la distribución de la vegetación ya ha sido indicada, pero en el caso específico de esta investigación únicamente se analizará las de la zona activa. Esto es debido a que en la zona en proceso de estabilización la existencia de dunas que se desplazan no abarca toda su extensión, sino que se encuentra en áreas muy localizadas. Por este motivo no se puede obtener una superficie continua por interpolación.

De este modo, las diferentes tasas de desplazamiento que presentan las dunas en la zona activa se han analizado para conocer la relación entre la vegetación y el movimiento de las dunas. Así, se puede cuantificar su importancia como factor ambiental estructurante en la distribución de las comunidades vegetales. Para ello se han calculado las tasas de desplazamiento de la zona activa a través del método propuesto

por Gay (1999), aplicado por Tsoar y Blumberg (2002) en Israel y por Ojeda *et al.* (2005) en el Parque Nacional de Doñana (España).

En primer lugar, se extrajeron los frentes de las dunas de las ortofotos correspondientes a los años 2002 (meses de enero y febrero) y 2003 (mes de noviembre) mediante digitalización en pantalla. Entre ambos frentes se trazan una serie de vectores equidistantes, para los cuales se calcula su longitud en metros (figura 3.10). La tasa de desplazamiento de las dunas se calcula dividiendo la longitud de cada vector entre el periodo de tiempo que transcurre entre las dos ortofotos, en este caso 1,9 años. Con este método únicamente se obtiene la tasa de avance para zonas puntuales. El siguiente paso consiste en extrapolar las tasas de avance a toda la superficie de estudio, de tal forma que se obtenga un modelo digital del terreno (MDT) de la tasa de desplazamiento de las dunas en la zona activa del sistema de dunas de Maspalomas. Por lo tanto, el siguiente paso para generar una superficie continua de tasa de avance de las dunas es la interpolación espacial. Un problema fundamental es la selección del método apropiado de interpolación, en función de las características específicas del desplazamiento de las dunas, ya que existen varios procedimientos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Con base en otros trabajos realizados, se ha optado por el método de interpolación regularizado *spline* con tensión (Mitasova, 2005). Para ello, en primer lugar para cada vector se calcula el punto intermedio (centroide), obteniéndose un total de 1481 puntos, y a partir de estos se realiza la interpolación *spline* utilizando los siguientes parámetros:

Tamaño de celdilla: 5 x 5 m.

Tipo de *spline*: Tension

Número de puntos: 12

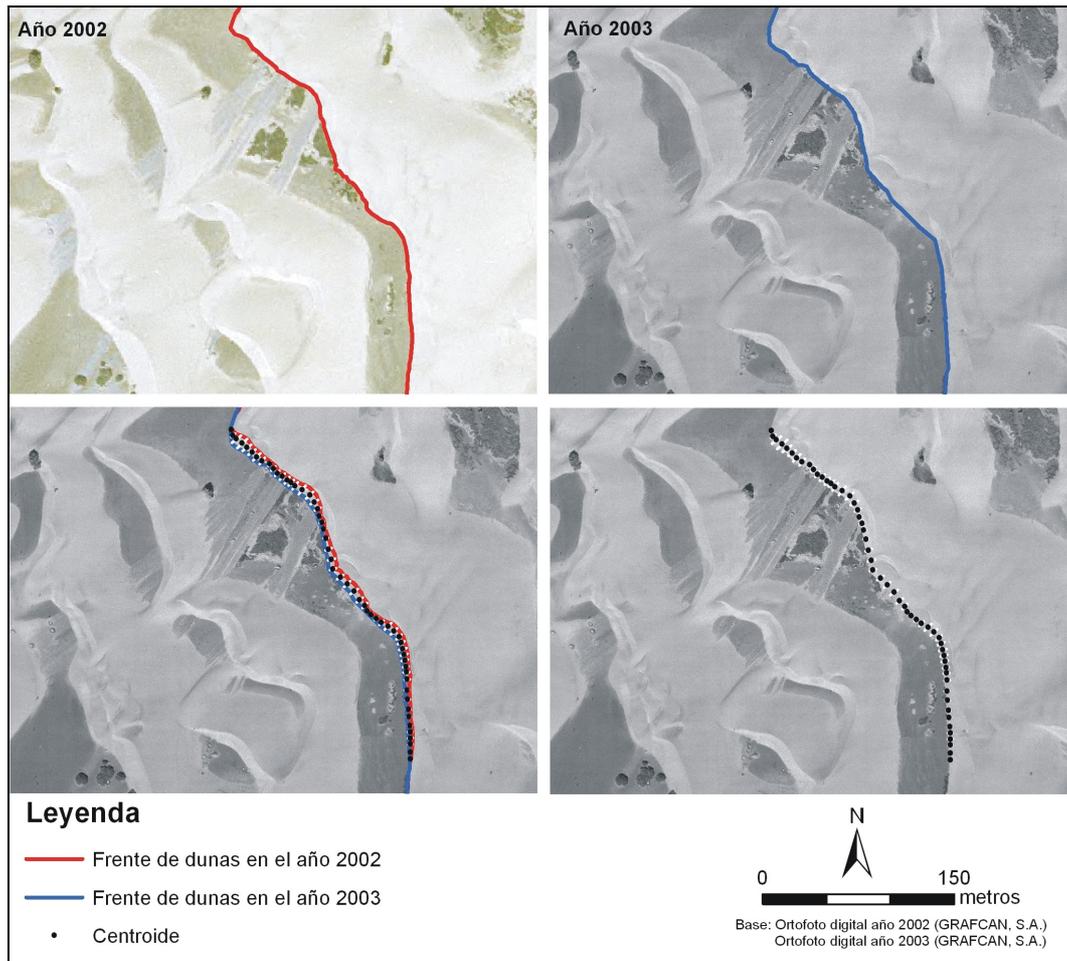


Figura 3.10. Ejemplo de la técnica utilizada para calcular la tasa de desplazamiento de las dunas.

Una vez obtenido el MDT de la tasa de desplazamiento de las dunas, el siguiente paso consiste en convertir los datos a formato vectorial, de forma que pueda cruzarse con la de vegetación. La capa raster resultante contiene valores decimales (*float*), lo que impide su vectorización automática mediante el SIG. Por este motivo, se ha reclasificado en intervalos de un metro (tabla 3.5), lo que a su vez permite simplificar la gran cantidad de información generada en la interpolación y eliminar los valores negativos (asignándoles valor 0). Una vez la capa reclasificada, es vectorizada de forma automática en el SIG, obteniendo una capa en formato *shapefile*, sobre la que se calculan la superficie de todos los polígonos. Finalmente, siguiendo el procedimiento explicado en apartados anteriores, se superpone esta capa y la correspondiente a la de comunidades vegetales, de forma que se obtiene la relación entre la tasa de desplazamiento y la distribución de la vegetación.

Valores	Reclasificación
-37 - 0	0
0 - 1	1
1 - 2	2
2 - 3	3
3 - 4	4
4 - 5	5
5 - 6	6
6 - 7	7
7 - 8	8
8 - 9	9
9 - 10	10
10 - 11	11
11 - 12	12
12 - 13	13
13 - 14	14
14 - 15	15
15 - 16	16
16 - 17	17
17 - 18	18
18 - 19	19
19 - 20	20
20 - 21	21
21 - 22	22
22 - 23	23
23 - 24	24
24 - 25	25
25 - 26	26
26 - 27	27
27 - 28	28
28 - 29	29
29 - 30	30
30 - 31	31
31 - 32	32

Tabla 3.5. Reclasificación de las tasas de avance de las dunas.

Además, también se calculó las estadísticas básicas (mínimo, máximo, media y desviación estándar) de la tasa de desplazamiento para cada unidad geomorfológica de la zona activa. De este modo y de forma complementaria a la información espacial, se pueden conocer las variaciones espaciales de la movilidad de las dunas. Para ello, se ha utilizado la herramienta *Zonal Statistics as table*. Esta estadística se ha calculado para las unidades principales (playa, duna costera, dunas transgresivas bajas y dunas transgresivas altas). Las superficies de deflación se han incluido en las dunas transgresivas bajas y las depresiones interdunares en las dunas transgresivas altas, ya que, aunque se han diferenciado por su importancia en la distribución de la vegetación, constituyen partes integrales de las mismas. Por lo tanto, aunque en la tabla resultante

aparecen de forma independiente, la media y la desviación estándar se han calculado hallando el promedio de las diferentes geoformas que han sido unificadas.

3.7.2.5. Definición y digitalización de las zonas antropizadas

El objetivo de este apartado es relacionar el grado de antropización del espacio objeto de estudio y la vegetación existente en el mismo. La metodología empleada parte de la identificación de las zonas afectadas por las actividades turísticas entre los años 60 y la actualidad. Para ello se han analizado la ortofoto del año 1961 y las ortofotos digitales correspondiente a los años 1987 y 2003, generándose una cartografía de las zonas alteradas. El paso siguiente es la creación de una tipología de alteraciones en función de las características de las mismas.

Posteriormente se superpone el mapa obtenido de esta forma y el de la vegetación correspondiente al año 2003. Así, se pretende analizar dos cuestiones: por un lado, la contribución de las alteraciones humanas en la distribución de las comunidades vegetales y, por otro lado, conocer las comunidades vegetales que están vinculadas a un determinado tipo de transformaciones.

3.7.3. Metodología basada en el trabajo de campo

Otros factores, como la litología y la profundidad de la capa de agua, las características químicas del sustrato y las características químicas de las aguas subterráneas, se han obtenido mediante el trabajo de campo y análisis en laboratorio. La información extraída se ha analizado estadísticamente, comparando las comunidades vegetales del lugar muestreado con los parámetros específicos del factor estudiado.

Se tomaron coordenadas con un GPS de cada punto de muestreo. Para cada parámetro analizado se ha generado una capa vectorial en formato *shapefile* de geometría de puntos. La tabla de atributos de esta capa contiene las características obtenidas en los análisis realizados y los datos recogidos en el trabajo de campo.

3.7.3.1. Litología y profundidad de la capa de agua

Con la finalidad de conocer las variaciones que presenta la vegetación, atendiendo a las características litológicas y a la profundidad del nivel freático, se realizaron catas a través de minitransectos que atravesaban varias comunidades vegetales, aunque también se hicieron algunas catas aisladas. Las mencionadas catas se realizaron mediante una barrena manual (1,25 cm de largo; figura 3.11). Para cada minitransecto se realizó un perfil de suelo sobre cada una de las catas existentes en el mismo. Asimismo, se hizo un inventario de vegetación de la zona muestreada.



Figura 3.11. Utilización de la barrena manual.

En total se realizaron 38 catas a lo largo de 17 minitranssectos, además de otras 9 aisladas (figura 3.12). Todo esto se llevó a cabo en un total de 5 campañas de campo desarrolladas entre el 17 de abril y el 26 de mayo de 2006. En total se han realizado un total de 47 catas, las cuales se localizan en todas las zonas definidas en función de los procesos sedimentarios eólicos. No se tomaron datos en la duna costera debido a que en esta zona solamente existe una comunidad vegetal. De cada zona de muestreo se tomaron datos de los diferentes tipos de sustratos existentes y de su profundidad, del tipo de comunidad vegetal y de la abundancia/dominancia de cada especie vegetal.



Figura 3.12. Localización de los minitransectos y catas realizadas.

3.7.3.2. Características químicas del sustrato

Otros factores que condicionan la distribución de las comunidades vegetales son las características químicas del sustrato. En este sentido, se pretende conocer si la presencia o carencia de ciertos elementos, el grado de salinidad, el contenido de materia orgánica o el porcentaje de humedad podría condicionar el predominio de unas u otras comunidades vegetales. Para ello se han extraído muestras de suelo.

El procedimiento básico ha consistido en limpiar la capa superficial de sedimento (2-3 cm) en una superficie de 50 por 30 cm, recogiéndose posteriormente una muestra de unos 500 gramos (figura 3.13). Las muestras se obtuvieron para todas las comunidades vegetales de Maspalomas, utilizando como referencia las unidades previamente cartografiadas. De la mayoría de ellas se han obtenido al menos dos muestras de sustrato, pero en algunos casos únicamente se recogió una muestra, puesto que la superficie que ocupaba la comunidad vegetal era pequeña, a que se localizaba en una única zona o porque existía uniformidad en las condiciones edáficas de su hábitat. Las muestras se tomaron una sola vez, ya que en medios arenosos hay poca variación estacional de las características edáficas.



Figura 3.13. Recogida de muestras de sustrato.



Figura 3.14. Localización de las muestras de sustrato realizadas.

En total se han recogido 90 muestras de sustrato (figura 3.14) entre el 14 de junio y el 28 de julio de 2006 en 9 campañas de campo. Se anotaron las características de la vegetación (tipo de comunidad y abundancia/dominancia de cada especie), el tipo de geoforma (duna, depresión interdunar, superficie de deflación o zona antropizada) y el tipo de sustrato (arena seca, arena húmeda o material aluvial).

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio por el Departamento de Edafología de la Universidad de La Laguna. Para cada muestra, se calculó la conductividad eléctrica, el pH, el contenido de humedad, el contenido en nitrógeno, en fósforo, en sodio, en potasio, en carbonato cálcico activo y en materia orgánica.

Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas con una malla de 2 mm de diámetro, obteniéndose *tierra fina*, sobre la que se realizaron los diferentes análisis de laboratorio (Porta *et al.*, 1986). Cada parámetro se calculó de la siguiente forma:

Contenido de humedad

Para poder referir los resultados de todos los análisis químicos a peso de muestra seca, se determinó gravimetricamente el contenido de humedad, en las muestras de los suelos tamizados (Porta *et al.*, 1986).

pH del suelo

El pH del suelo se determinó en una suspensión con relación 1:2,5 suelo/agua, realizándose las mediciones con electrodo de vidrio mediante un pHmetro Radiometer PHM 82 Standard (Porta *et al.*, 1986).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se calculó en una suspensión con relación suelo/agua 1:5. La solución se extrajo por centrifugación y se filtró, determinándose en el extracto la conductividad eléctrica mediante un conductímetro CRISON Mod. 522 a 25°C (Vargas, 2001; Porta *et al.*, 1986).

Carbonato cálcico activo

Se evaluó utilizando un calcímetro de Bernard (MAPA, 1974; Barahona, 1984). Este dispositivo mide el desplazamiento de una solución salina saturada de CO₂ por parte del CO₂ desprendido por una muestra de suelo finamente triturada tratada con HCl al 50%, siendo el contenido en carbonato cálcico proporcional al volumen desplazado.

Materia orgánica

Se determinó por oxidación con dicromato potásico en presencia de ácido sulfúrico. El exceso de oxidante que no ha reaccionado se valora por retroceso empleando sulfato ferroso amónico y ferroína como indicador (Walkley y Black, 1934). Las muestras que sobrepasaban los 0,365 dS m⁻¹ en extracto 1:5 se consideran salinas y se tratan con sulfato de plata para evitar la interferencia del cloro en la determinación (Walkley, 1947; Quinn & Salomón, 1964).

Nitrógeno total

Se valoró por el método Kjeldahl (Benton, 1991). La mineralización se realizó atacando la muestra con una mezcla de H₂SO₄ concentrado y ácido acetilsalisílico utilizando Se metálico como catalizador. La digestión se realizó en un digestor TECATOR Mod. 1007 y la destilación en un aparato de destilación TECATOR Mod. Kjeltec 1026. Para la valoración se empleó ácido clorhídrico 0,1 N y verde bromocresol como indicador.

Bases de Cambio

Se determinaron según el método de Bower *et al.* (1952) (Thomas, 1982) con acetato amónico 1N pH 7 y acetato sódico 1N pH 8,2. El Na⁺ y el K⁺ se determinaron por fotometría de emisión de llama.

Fósforo asimilable

Se utilizó la extracción con una disolución de NaHCO₃ 0,5 M a pH 8,5 (Watanabe & Olsen, 1965; Olsen *et al.*, 1954). Los fosfatos del extracto se midieron colorimétricamente con molibdato amónico y ácido ascórbico como agente reductor (Murphy & Riley, 1962).

Una vez analizadas las muestras se han agrupado en función de las zonas definidas en función de los procesos sedimentarios eólicos activos y se han relacionado con la distancia a la costa, el tipo de geoforma y la litología. De esta forma, se pretende conocer los patrones espaciales de las características químicas del sustrato.

En primer lugar, se ha relacionado cada elemento químico de las diferentes muestras de cada zona con la distancia al mar, ya que teóricamente es el que proporciona la mayor parte de los elementos químicos a los sistemas de dunas litorales. Para ello se calculó la distancia a la línea de costa de cada punto de muestreo en el SIG, utilizando la herramienta *Analysis Tools/Proximity/Near*, que agrega a la tabla de atributos de la capa un campo más, relativo a esta distancia. Luego se han ordenado las muestras de forma ascendente, en función de la distancia a la costa. Los resultados de las muestras junto a la distancia al mar, el tipo de geoforma y el tipo de sustrato se han representado gráficamente, de forma que se facilita la observación de las relaciones entre estas variables.

En segundo lugar, se ha procedido a relacionar directamente cada característica del sustrato con los diferentes tipos de vegetación. En este caso, las muestras se han agrupado en función del tipo de geoforma que ocupan dentro de cada una de las zonas definidas en función de los procesos sedimentarios eólicos activos.

Para determinar la importancia de cada elemento del suelo en la distribución de cada tipo de comunidad vegetal se procedió a realizar un análisis factorial con el programa SPSS. Para ello, en primer lugar, no se consideró la humedad del suelo, debido al tiempo transcurrido entre la toma de las muestras y el análisis en laboratorio.

Asimismo, no se incluyó en el análisis estadístico la muestra número 60, debido a que los elevados valores de conductividad eléctrica y sodio desequilibraban los resultados obtenidos. Finalmente, se excluyeron aquellas comunidades vegetales que tuvieran un número de muestras inferior a cuatro, de forma que no se contemplaron la de *Heliotropium ramosissimum*, la de *Zygophyllum fontanesii*, la de *Schizogyne glaberrima*, la de *Plocama pendula*, la de *Volutaria canariensis*, la de *Aizoon canariense* y la de *Mesembryanthemum crystallinum*. El método de extracción factorial utilizado es el de componentes principales, además de seleccionarse la rotación varimax.

3.7.3.3. Características químicas de las aguas subterráneas

Con el fin de conocer el pH y la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas de las depresiones interdunares, de forma que se pueda establecer la relación existente entre vegetación y estos parámetros, se han seleccionado 7 puntos de muestreo para la extracción del agua contenida en la capa freática (figura 3.15; tabla 3.6). Las zonas seleccionadas tenían que constituir una superficie de arena húmeda, con el fin de permitir una fácil extracción de las muestra. Además, el número de puntos estaba condicionado por motivos presupuestarios. En cada uno de estos puntos, en primer lugar, se realizaron perforaciones a diferente profundidad con una barrena manual (ver apartado 3.7.3.1) y se instalaron 6 lisímetros con tensión (a 0,2 MPa), 3 para extraer agua de la zona saturada y otros 3 para la no saturada (figura 3.16). Los datos se recogieron cada 2-4 meses, abarcando el periodo de estudio desde noviembre de 2004 hasta abril de 2006.

Una vez obtenidas las muestras de agua se analizó la salinidad y pH de las mismas en el campo, tanto en la zona saturada como en la no saturada. Asimismo, se anotó el tipo de comunidad vegetal existente, lo cual se apoyó en la información obtenida de la cartografía y caracterización de las comunidades vegetales realizada para el año 2003 (apartado 3.6). El resultado de las muestras de agua se relacionó con la distribución de las comunidades vegetales.



Figura 3.15. Localización de los puntos de muestreo de las aguas subterráneas.



Figura 3.16. Detalle de una de las zonas muestreadas y de los lisímetros utilizados.

Coordenadas UTM	Nº	Superficie (m ²)	Geoforma	Vegetación
441828/3068693	1	19217	Depresión interdunar	Comunidad de <i>Juncus acutus</i>
441276/3068387	2	20248	Superficie de deflación	Comunidad de <i>Zygophyllum fontanesii</i>
442761/3068114	3	7346	Depresión interdunar	Comunidad de <i>Cyperus laevigatus</i>
442928/3068681	4	4056	Depresión interdunar	Comunidad de <i>Tamarix canariensis</i>
443729/3069399	5	2822	Superficie de deflación	Comunidad de <i>Traganum moquinii</i>
443707/3068486	6	474	Superficie de deflación	Comunidad de <i>Traganum moquinii</i>
441697/3068297	7	4055	Depresión interdunar	Comunidad de <i>Cyperus laevigatus</i>

Tabla 3.6. Características de los puntos de muestreo de agua.

3.8. Dinámica actual de la vegetación

El tercer pilar que sostiene el estudio de la vegetación actual es su dinámica, considerándola como las variaciones que la vegetación experimenta en periodos de tiempo relativamente cortos. Este análisis ha permitido, por un lado, actualizar la información obtenida en la caracterización de la vegetación y, por otro, analizar algunos procesos que se han considerado interesantes para profundizar el conocimiento de las comunidades vegetales, como su relación con la tasa de desplazamiento de las dunas, los patrones de colonización vegetal de las superficies de deflación y la dinámica de la duna costera (*foredune*). La dinámica se analizó tanto mediante la utilización de SIG, como con técnicas de campo.

3.8.1. Seguimiento de plántulas marcadas

El objetivo básico de este apartado es el de evaluar la relación entre la vegetación y el movimiento de las dunas, por medio del seguimiento a dos especies con una vinculación muy directa con la dinámica dunar: *Tamarix canariensis* y *Traganum moquinii*. Se seleccionaron 7 ejemplares juveniles de *Tamarix canariensis* presentes en las dunas móviles y 13 plántulas de *Traganum moquinii*. Su localización con un GPS permitió realizar un seguimiento regular de las plantas, que tuvo lugar entre el 5 de mayo de 2006 y el 23 de enero de 2008 para *Traganum moquinii*, y entre el 15 de diciembre de 2005 y el 23 de enero de 2008 para *Tamarix canariensis*, tomándose los siguientes datos: distancia a la duna (desde la base de la duna al tallo de la planta),

altura, diámetro mayor y diámetro menor de la planta. En el caso concreto de *Traganum moquinii* no se tomó la distancia a la duna porque normalmente no estaban asociadas a frentes determinados.

Para evaluar los cambios morfológicos de las plantas en relación con el enterramiento se calculó la tasa de crecimiento, donde se incluye la altura y ambos diámetros. Esta tasa se calculó para cada uno de los periodo que transcurre entre dos tomas de datos. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$Tc = ((Mp - Ma) / N) \times 100$$

Donde:

Tc = tasa de crecimiento

Mp = Altura, diámetro mayor o diámetro menor en fecha posterior del periodo

Ma = Altura, diámetro mayor o diámetro menor en fecha anterior del periodo

N = número de días del periodo

3.8.2. Dinámica de la vegetación en función del desplazamiento de las dunas

La dinámica de la vegetación en la zona activa presenta variaciones espaciales muy significativas en cortos periodos temporales. Con base en esta cuestión, se ha considerado de mucho interés conocer la dinámica de las comunidades vegetales presente en este ambiente mediante ortofotos digitales, como complemento a los datos obtenidos directamente mediante el trabajo de campo. El objetivo fundamental que se persigue con este análisis es conocer las estrategias de supervivencia de las comunidades vegetales en relación con el movimiento de las dunas. Además, de esta forma se han podido estudiar otras comunidades, de las cuales no se realizó seguimiento en el campo, como la de *Cyperus laevigatus* y la de *Launaea arborescens*.

Este estudio abarcó cuatro comunidades vegetales: la de *Traganum moquinii*, la de *Tamarix canariensis*, la de *Cyperus laevigatus* y la de *Launaea arborescens*.

Para las dos primeras comunidades se utilizaron las ortofotos digitales de los años 1995, 1998 y 2003. Para cada espacio temporal se cartografiaron cada uno de los individuos de *Traganum moquinii* y de *Tamarix canariensis*, además de los bosquetes de esta última especie, existentes en las dunas transgresivas altas asociados a un frente de dunas. Asimismo, para la comunidad de *Traganum moquinii* también se compararon los individuos existentes en las dunas transgresivas bajas entre 1998 y 2003. Para las comunidades de *Cyperus laevigatus* y de *Launaea arborescens* se eligió el periodo temporal lo más corto posible, abarcando los años 2002 y 2003. Esto fue motivado porque este tipo de comunidades presenta un crecimiento más rápido que la anterior, de tal forma que se consideró más adecuado el estudio de su evolución en años consecutivos para evitar posibles tergiversaciones debido a la existencia de periodos de tiempo más prolongados. Asimismo, la calidad de las ortofotos digitales de los años

1995 y 1998 no eran las más adecuadas para identificar con claridad estas comunidades de porte herbáceo y arbustivo bajo. Por otra parte, un requisito indispensable era partir de un año en que la unidad estudiada ya estuviera formada. Se seleccionaron diferentes frentes de dunas, que fueron digitalizados para cada año, y se cartografió la superficie ocupada por cada comunidad vegetal. Se calcularon las tasas de desplazamiento de las dunas siguiendo el método explicado en el apartado 3.7.2.4, obteniéndose el valor del desplazamiento de cada frente mediante el cálculo de la media de todos los valores obtenidos. De este modo, se pudo relacionar las variaciones de la vegetación con las tasas de desplazamiento de las dunas.

3.8.3. Relación de la vegetación con la formación de superficies de deflación

Estudios anteriores determinan la formación y la ampliación de las superficies de deflación como consecuencia de las alteraciones debidas al desarrollo turístico (Hernández Calvento, 2006). Por lo tanto, es necesario conocer los procesos de colonización de estos nuevos espacios.

Se han seleccionado dos áreas (figura 3.17) dentro del campo de dunas, caracterizadas por haber experimentado cambios significativos, debido a la formación de amplias superficies de deflación en las últimas décadas. Se han utilizado dos escalas de trabajo diferentes y complementarias: una más general, utilizando ortofotos digitales para la interpretación y digitalización; y otra de detalle, mediante el seguimiento de la evolución de la vegetación en parcelas de observación. La evolución de la vegetación se ha relacionado con el régimen pluviométrico del periodo considerado.

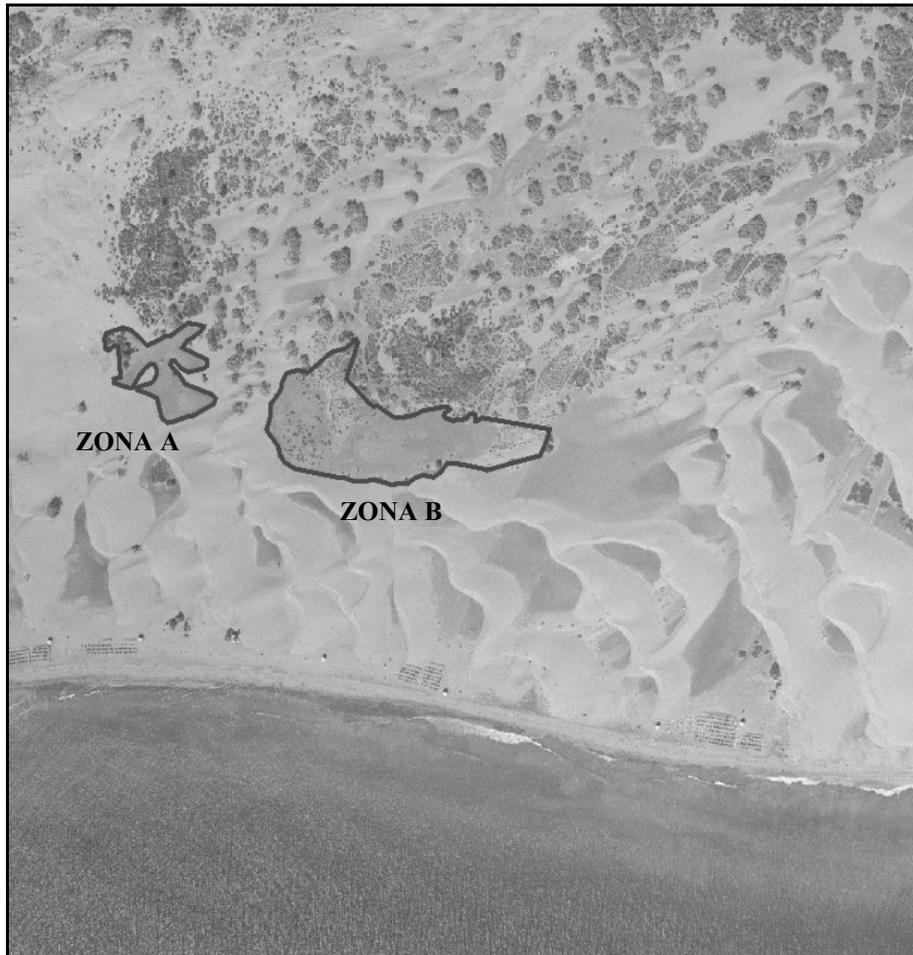


Figura 3.17. Localización de las superficies de deflación seleccionadas dentro del campo de dunas de Maspalomas (Ortofoto digital GRAFCAN, S.A. 2002).

3.8.3.1. Digitalización de las superficies de deflación y de las áreas con vegetación

Los años estudiados a partir de la fotografía aérea son los siguientes: diciembre de 1995, noviembre y diciembre de 1998, enero y febrero de 2002 y marzo de 2004. Para la digitalización de la información se han utilizado ortofotos digitales a escala 1:5.000, mientras que para el año 2004 se ha podido contar con una imagen del satélite QuickBird, de 0,65 m de resolución espacial nominal, obtenida con fecha 4 de marzo. En cada intervalo temporal se ha cartografiado, por un lado, la extensión de las superficies de deflación y, por otro, las áreas ocupadas por la vegetación. Los resultados obtenidos se han relacionado con las precipitaciones totales registradas en esos años.

3.8.3.2. Análisis de las precipitaciones 1995-2004

La media anual, obtenida según el apartado 3.7.1, se ha utilizado como referencia para estimar los años en que las precipitaciones estaban por encima o por debajo de la misma y, por lo tanto, se consideran suficientes para permitir la colonización vegetal. Los registros pluviométricos totales anuales entre 1995 y 2004 se han comparado con las variaciones en la superficie de la vegetación del mismo periodo,

de forma que se puede evaluar si el régimen pluviométrico es el factor que condiciona la colonización vegetal de las superficies de deflación.

3.8.3.3. Parcelas de observación permanentes

La instalación de parcelas permanentes tiene dos objetivos fundamentales: en primer lugar, evaluar el efecto del pisoteo de los usuarios del campo de dunas de Maspalomas sobre la vegetación; el segundo objetivo es analizar los procesos de colonización vegetal en las superficies de deflación formadas en el interior del sistema de dunas a una escala de detalle. Se instalaron dos parcelas permanentes, asociadas a la comunidad de *Zygophyllum fontanesii* y a la de *Juncus acutus*.

Las parcelas fueron cercadas mediante la colocación de postes de madera, a los que se ataron cuerdas a dos niveles. Su instalación se realizó durante los días 17 y 18 de marzo de 2006. Cada parcela permanente tenía otra próxima, de referencia, no acotada, reconocida mediante elementos naturales (piedras o plantas), de forma que, en total, se realizó el seguimiento a cuatro parcelas (figura 3.18; figura 3.19; tabla 3.8). Así, se ha podido monitorizar la evolución de la vegetación en dos zonas con características similares (tipo de vegetación, estado evolutivo de la misma, características físicas, etc.), pero con diferencias en cuanto al pisoteo. El seguimiento de estas parcelas se ha realizado mediante el recuento, primero semanal (entre marzo de 2006 y noviembre de 2007), y posteriormente mensual (entre diciembre de 2007 y febrero de 2009), del número de plántulas existentes en cada una de ellas, al que se han añadido observaciones sobre el tránsito de usuarios (tabla 3.9). El periodo de recogida de datos fue entre el 24 de marzo de 2006 y el 23 de febrero de 2009, abarcando un total de 100 campañas de campo. La información obtenida fue tratada estadísticamente mediante el programa Microsoft Excel. Estos datos se han agrupado en intervalos mensuales (0-1 mes, 1-2 meses, etc.), de tal forma que se ha obtenido un solo valor (número de plántulas) para cada mes. Posteriormente, con los datos ya agrupados se ha realizado un análisis demográfico transversal, consistente en registrar todos los eventos demográficos (nacimientos, muertes y edades en las que ocurre) de la población estudiada a lo largo de un año, siguiendo la metodología expuesta en Fernández-Palacios *et al.* (1996). Para ello se realiza una tabla de vida donde se recogen los eventos demográficos de cada parcela estudiada, y para cada especie vegetal nacida durante el periodo de estudio (*Zygophyllum fontanesii*, *Suaeda mollis* y *Juncus acutus*), que en este caso se corresponde con las plántulas germinadas a partir de marzo del año 2006 y enero de 2007. Los parámetros demográficos calculados fueron los siguientes:

a) El número de individuos vivos al comienzo de una clase de edad (N_x): hay que tener en cuenta que éste sirve de referencia para comenzar a estudiar las variaciones en la población, y se calcula a partir del mes en que ésta alcanza el mayor número de individuos. Es decir, que a partir del mes en que la población se estabiliza (no aumenta más) se inician los cálculos demográficos.

b) El número de individuos que mueren en una clase de edad (d_x). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$d_x = N_x - N_{x+1}$$

c) La fuerza de mortalidad (q_x): es la proporción de individuos que entran en un intervalo de edad y no lo sobrevive. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_x = d_x / N_x$$

d) La tasa de supervivencia (I_x): resulta del cociente entre el número de individuos de cada clase (N_x), y el número de individuos de la clase inicial.

$$I_x = N_x / N_0$$

La tasa de supervivencia en la clase inicial (I_0) siempre es igual a 1. Ésta disminuye hasta convertirse en 0 con la muerte del individuo más longevo. La tasa de supervivencia se representa gráficamente en la llamada “curva de supervivencia”.

También se realizó un levantamiento cartográfico detallado (a escala 1:50) en abril de 2006, abril de 2007 y abril de 2008, de todos los individuos presentes en las parcelas de observación localizadas en el interior del sistema de dunas, que tuvieran una altura igual o superior a 5 cm. Para ello, se preparó una cuadrícula que se utilizó para situar las plantas en el campo. Con una cinta métrica se calculó la distancia a la que estaba cada planta de los bordes de la parcela y de otras plantas. Luego se tomaron datos de las características morfológicas de cada individuo (altura, diámetro mayor y diámetro menor). Este mapa constituye, junto con las series fotográficas realizadas, la referencia inicial para el análisis espacial de la dinámica vegetal, ya que permite analizar los cambios de cobertura existentes entre los diferentes periodos temporales, así como las variaciones de altura de las plantas. La cobertura se ha calculado mediante la fórmula ideada por Cottam y Curtis (1956), la cual se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Cobertura} = \pi \times r^2$$

En la siguiente tabla se explica el procedimiento para calcular los valores necesarios para obtener la cobertura de cada especie presente en las parcelas. Finalmente, la suma de las coberturas específicas proporciona la cobertura total de cada parcela.

Id	Especie	Altura	Diám. mayor (cm)	Diám. menor (cm)	Diám. medio (cm)	Radio (cm)	Radio (m)	Cobertura (m ²)
1	Z.F	38	110	67	88,5	44,3	0,443	0,615
2	Z.F.	56	247	120	183,5	91,8	0,918	2,645
3	Z.F.	23	24	22	23	11,5	0,115	0,042
4	S.M.	23	110	65	87,5	43,8	0,438	0,601

Tabla 3.7. Ejemplo del cálculo de la cobertura de las plantas de una parcela.

Diám. Medio = (Diám. Mayor + diám, menor) / 2

Radio = Diámetro medio / 2

Los datos obtenidos de las parcelas se han relacionado con el régimen de precipitaciones del periodo 2006-2008.



Figura 3.18. Localización de las parcelas situadas en el interior del sistema de dunas.

Parcela	Tipo	Superficie (m ²)	Forma	Tipo de vegetación
5 A	Abierta	40	Rectangular	<i>Zygophyllum fontanesii</i>
5 B	Cerrada	40	Rectangular	<i>Zygophyllum fontanesii</i>
6 A	Abierta	40	Rectangular	<i>Juncus acutus</i>
6 B	Cerrada	40	Rectangular	<i>Juncus acutus</i>

Tabla 3.8. Características de las parcelas localizadas en la zona interior del sistema de dunas.

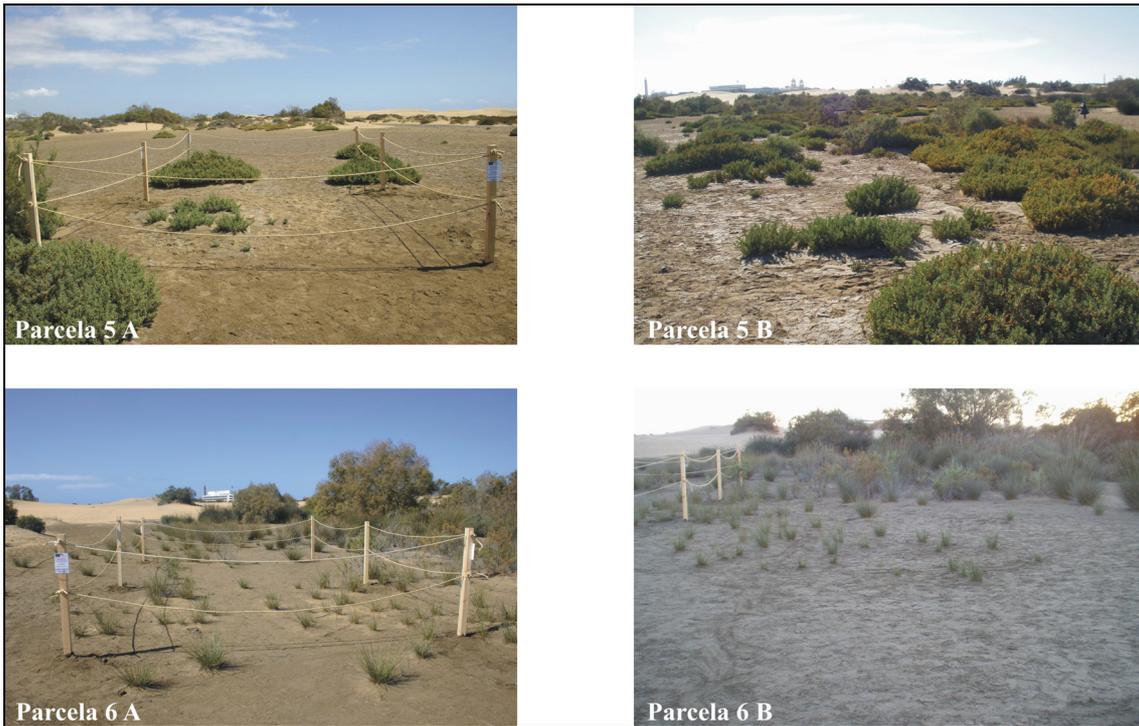


Figura 3.19. Fotografías de las parcelas localizadas en el interior del sistema de dunas.

Coordenada: 442172/3068385
 Superficie parcela: 40 m²
 Comunidad vegetal dominante: Comunidad de *Zygophyllum fontanesii*
 Cobertura global: 15%
 Observaciones:

Fecha: 24-03-06		Fecha: 31-03-06		Fecha: 7-04-06		Fecha: 17-04-06		Fecha: 24-04-06		Fecha: 28-04-06	
Especie	N° plántulas										
Z.F.	8	Z.F.	10	Z.F.	10	Z.F.	12	Z.F.	12	Z.F.	12
		S.M.	1	Z.F.	2	S.M.	1	S.M.	1	S.M.	1
Fecha: 5-05-06		Fecha: 12-05-06		Fecha: 19-05-06		Fecha: 26-05-06		Fecha: 2-06-06		Fecha: 9-06-06	
Especie	N° plántulas										
Z.F.	12	Z.F.	12	Z.F.	12	Z.F.	12	Z.F.	10	Z.F.	10
S.M.	1										

Tabla 3.9. Ficha modelo de las parcelas localizadas en el interior del sistema de dunas.

3.8.4. Dinámica de la vegetación mediante la interpretación de inventarios de vegetación

Se ha realizado mediante un estudio sincrónico. Este tipo de análisis se basa en la observación simultánea, en un periodo de tiempo corto, de la vegetación de parcelas diversas con las mismas características ecológicas; cada parcela tiene que estar colonizada por comunidades en distintos estadios de sucesión (Pintó, 2000: 169). En el caso concreto del área de estudio de esta tesis, la homogeneidad climática es evidente, pero no así las características ambientales específicas de cada zona del sistema de dunas. Esto permite analizar las variaciones florísticas y estructurales de las diferentes comunidades vegetales conforme varían los procesos sedimentarios eólicos. De esta forma, es posible realizar una modelización de los procesos de sucesión vegetal.

Para ello se ha procedido al análisis y comparación de la información de recogida en los inventarios de vegetación de cada comunidad vegetal asociados a diferentes estadios evolutivos que vienen definidos por los procesos sedimentarios eólicos existentes. Esto se ha apoyado en la observación de las fotografías aéreas y ortofotos digitales de diferentes fechas. El estudio sincrónico ha permitido analizar los procesos de sucesión vegetal existentes para cada comunidad de forma detallada, detectando las especies que aparecen en cada etapa, especialmente las primocolonizadoras.

Los datos de los inventarios de cada comunidad vegetal se han agrupado en función de las unidades definidas en función de los procesos sedimentarios eólicos. Luego se han analizado estadísticamente en el programa Microsoft Excel para obtener parámetros básicos (cobertura media, máxima y mínima), de forma que se pudieran detectar los cambios de la abundancia de las diferentes especies conforme se estabiliza el sistema de dunas.

3.8.5. Caracterización y dinámica de la duna costera

La dinámica de las poblaciones de *Traganum moquinii*, o al menos una parte significativa de ellas, parece estar íntimamente ligada a la duna costera. El conocimiento del funcionamiento actual de esta geoforma podría ser clave para entender la dinámica del sistema, de la importancia de esta especie vegetal en la dinámica dunar y en los cambios que han podido producirse tanto en el campo de dunas como en la propia duna costera, debido a las alteraciones experimentadas por esta comunidad vegetal. Además, es una geoforma escasamente estudiada en Canarias.

La primera aproximación a la duna costera de Maspalomas se realizó mediante el levantamiento cartográfico de las geoformas existentes en el año 2006. Para realizar esta cartografía se ha utilizado la ortofoto digital obtenida mediante el vuelo LiDAR del año 2006.

Una segunda aproximación se basa en la interpretación de los datos altimétricos obtenidos en el vuelo LiDAR. De esta forma, sobre el MDE se realizaron 8 perfiles

topográficos perpendiculares a la costa, utilizando el programa ArcGIS 9.x., con la finalidad de conocer la estructura de la duna costera y las geoformas asociadas. La mitad de los perfiles son rectilíneos y la otra mitad oblicuos. En el primer caso, se traza el perfil lógico a cualquier sistema de dunas, mientras que el oblicuo se basa en la dirección dominante del viento efectivo (NE-SO) y, sobre todo, en la disposición de las geoformas dunares de la duna costera y de los ejemplares de *Traganum moquinii*.

3.9. Evolución de la vegetación (1961-2003)

La segunda línea de investigación de esta tesis aborda la evolución de la vegetación entre principios de la década de los 60 del pasado siglo y la actualidad, de forma que se pueden analizar los cambios experimentados por la misma. De igual manera, se pretende valorar la influencia de la actividad turística en estos cambios y, por lo tanto, determinar las alteraciones producida por su desarrollo en el campo de dunas de Maspalomas. Se ha analizado la evolución de la vegetación entre 1961 y 2003.

En primer lugar, el estudio de la evolución de la vegetación requiere de la reconstrucción del paisaje vegetal de los diferentes años considerados. Esta reconstrucción se aborda de forma cartográfica, y los mapas del periodo temporal considerado se cruzan en el entorno del SIG, mediante técnicas de superposición, para obtener un mapa final que permite explicar la evolución espacio-temporal experimentada por la vegetación. De esta forma, además de poder cuantificar cuánto cambia las diferentes comunidades vegetales, se puede analizar donde se producen estas transformaciones.

3.9.1. Fuentes de información complementarias

Existen algunos documentos, tanto cartográficos como derivados a partir del trabajo de campo, que proporcionan información sobre las características de la vegetación del sistema de dunas de Maspalomas en épocas anteriores.

De los años 60 existente dos tipos de documentos: por un lado, los inventarios de vegetación realizados por los botánicos Sunding (1972) y Esteve (1968) y, por otro lado, mapas de vegetación realizados mediante fotointerpretación (Hernández Calvento, 2002; Hernández Calvento, 2006). Los inventarios recogidos en el trabajo de Sunding (1972) fueron tomados en el año 1967 y permiten caracterizar algunas comunidades vegetales, como el caso de las asociaciones fitosociológicas *Euphorbio paraliae-Cyperetum capitati*, *Traganetum moquinii* y *Cyperetum laevigati*, así como algunos datos ecológicos (pH, tipo de sustrato, etc.). Por su parte, los realizados por Esteve (1968) analiza las asociaciones *Traganetum moquinii* y la actualmente no admitida *Schizogyno-Juncetum acuti*. Estos inventarios aportan una información muy valiosa sobre la composición florística de algunas comunidades vegetales antes del desarrollo turístico, lo que permite compararlas con las actuales y valorar hasta cierto punto los cambios producidos. Sin embargo, estos trabajos no abordan todas las comunidades

existentes en Maspalomas durante los años 60, ni tampoco determinan con exactitud el lugar donde se tomaron los datos florísticos. Aunque los inventarios realizados por Sunding proporcionan coordenadas, éstas no se corresponden con las de la cartografía disponible de los años 60, por lo que no se han podido localizar. Por su parte, la citada cartografía realizada mediante fotointerpretación constituye un documento de apoyo para la delimitación de las comunidades vegetales.

Por otro lado, las fotografías históricas recopiladas por la Fundación para la Etnografía y el Desarrollo de la Artesanía Canaria (FEDAC) del Cabildo de Gran Canaria han sido de mucha utilidad para analizar y mostrar las características generales del sistema de dunas de Maspalomas antes del desarrollo turístico y, específicamente, de la vegetación existente en los años 60 del pasado siglo.

3.9.2. Digitalización de las unidades de vegetación y definición de las comunidades vegetales de los años 60

El paso previo indispensable para el estudio de la evolución de la vegetación es la reconstrucción de la distribución espacial de las comunidades vegetales. La línea básica a seguir, con base en el modelo histórico regresivo, consiste en ir en secuencia descendente desde el año 2003 hasta el año 1961. Esto se justifica porque los documentos más actuales se convierten en el marco de referencia de los que le anteceden temporalmente, ya que permite verificar los aspectos observados en las fotos aéreas mediante el trabajo de campo. De esta forma, el mapa de vegetación correspondiente al año 2003 constituye el marco de referencia básico, ya que se ha basado en el reconocimiento de campo. Hay que tener en cuenta que el mapa correspondiente al año 2003 ha sido fundamental para poder discernir las dudas que se hayan podido tener a la hora de interpretar las fotografías aéreas de los años anteriores. De esta forma, la interpretación de los documentos aéreos del año 1961 se validó mediante la extrapolación de los criterios de interpretación visual (tono y textura, principalmente) que presentaban las comunidades vegetales existente en el año 2003. Para ello también se utilizó la ortofoto digital del año 1987 y la fotografía aérea del año 1977, ya que permitía visualizar mejor el proceso de comparación, así como aclarar dudas o inconsistencias. Sin embargo, hay que ser consciente de las limitaciones que se deducen de este procedimiento, ya que es posible que se produzcan errores de identificación, por lo que se reconoce, de antemano, la existencia de un cierto grado de incertidumbre. Aun así se considera que la precisión y calidad de los documentos cartográficos derivados son, al menos, aceptables; y el método, el que permite una mejor aproximación a la reconstrucción histórica de las comunidades vegetales.

Utilizando la misma metodología que la empleada para elaborar la capa de vegetación del año 2003 (ver apartado 3.3), con la obvia ausencia del trabajo de campo, se ha procedido a reconstruir las correspondientes al año 1961.

Para la generación del mapa de vegetación del año 1961 se utilizó la ortofoto histórica del año 1961 de sur de Gran Canaria (OrtoExpress sur de Gran Canaria)

presente en la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias), creada y gestionada por la empresa pública GRAFCAN, S.A.. Las características técnicas de esta OrtoExpress son las siguientes: ortofoto obtenida de la ortorectificación de fotografías aéreas de un vuelo analógico 1:5.000 en escala de grises. Resolución de 12,5 cm/píxel. La OrtoExpress fue integrada en el SIG mediante protocolo OGC WMS, utilizando la dirección URL especificada en el catálogo de servicios de la página web de la IDECanarias, de forma que se pudiera utilizar como referencia para la delimitación de las unidades de vegetación. Para la reconstrucción de la vegetación que había en esta época también se ha utilizado como documento de apoyo la cartografía elaborada por Hernández Calvento (2002; 2006), derivada de ejercicios de fotointerpretación.

Para cada comunidad se elaboró la tabla de atributos de los ficheros *shapefile*, en la que se recogieron los siguientes campos: i) nombre de la comunidad vegetal, ii) superficie en metros cuadrados y iii) superficie en hectáreas. De esta forma, se han caracterizado las comunidades vegetales en función de la superficie que ocupan en cada año y su distribución espacial.

3.9.3. Caracterización de las comunidades vegetales

La generación de la capa de vegetación del año 1961 permite conocer únicamente la distribución y la superficie de las comunidades vegetales. La caracterización de las mismas, debido a la imposibilidad de realizar trabajo de campo, se ha llevado a cabo mediante la interpretación de los inventarios realizados por Esteve (1968) y Sunding (1972) en los años 60. Los datos proporcionados por estos autores han permitido caracterizar algunas comunidades vegetales. Asimismo, permiten comparar la composición florística del mismo tipo de comunidad vegetal entre los años 60 y la actualidad y, determinar, por ejemplo, la aparición de especies introducidas o el aumento de determinadas especies vinculadas a procesos específicos.

3.9.4. Evolución de la vegetación

Una vez finalizado el proceso de generación de las capas de vegetación para cada año, se ha procedido a analizar su evolución. La metodología seguida es la misma detallada en el apartado 3.7.2, donde en el entorno del SIG se generó otra capa de salida con los polígonos resultantes de la intersección de las correspondientes a los años 1961 y 2003. A continuación se crea un nuevo campo en la tabla de atributos donde se calcula la superficie ocupada por los nuevos polígonos generados. De esta manera, la tabla de atributos de la capa de salida, correspondiente al periodo temporal 1961-2003, contiene las comunidades vegetales existentes en cada año, de forma que se puede cuantificar los cambios experimentados por la vegetación en el periodo considerado (figura 3.20).

Comunidad	COMUNIDAD	SCOMUNIDAD	Superficie	Supfla	Procesos
Comunidad de Tamarix canariensis	Vegetación escasa o ausente	Vegetación escasa o ausente	16,147657	0	Eliminación vegetación
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Tamarix canariensis	con Cyperus capitatus	2,869211	0	Estable
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Cyperus capitatus-Ononis serrata	1991,308506	0	Cambio comunidad
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Tamarix canariensis	con Cyperus capitatus	185,075995	0	Estable
Comunidad de Tamarix canariensis	Vegetación escasa o ausente	Vegetación escasa o ausente	1247,376301	0	Eliminación vegetación
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Tamarix canariensis	con Cyperus capitatus	1125,742274	0	Estable
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Neurada procumbens	95,158434	0	Cambio comunidad
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Tamarix canariensis	con Nicotiana glauca	984,174287	0	Estable
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Neurada procumbens	8,136456	0	Cambio comunidad
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Neurada procumbens	5,400562	0	Cambio comunidad
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Tamarix canariensis	con Cyperus capitatus	397,351324	0	Estable
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Cyperus capitatus-Ononis serrata	1,500471	0	Cambio comunidad
Comunidad de Tamarix canariensis	Vegetación escasa o ausente	Vegetación escasa o ausente	180,851028	0	Eliminación vegetación
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Tamarix canariensis	con Cyperus capitatus	67,1756	0	Estable
Comunidad de Tamarix canariensis	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Cyperus capitatus-Ononis serrata	17,246221	0	Cambio comunidad
Comunidad de Tamarix canariensis	Vegetación escasa o ausente	Vegetación escasa o ausente	249,368556	0	Eliminación vegetación
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Tamarix canariensis	con Cenchrus ciliaris	62,828064	0	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Suaeda mollis	con Mesembryanthemum crystallinum	916,557391	0	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Phragmites australis	C. Phragmites australis	2388,998968	0	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Suaeda mollis	con Mesembryanthemum crystallinum	281,87463	0	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Mesembryanthemum crystallinum	con Mesembryanthemum nodiflorum	1486,642451	0	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Cyperus capitatus-Ononis serrata	488,1525	0	Estable
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	con Cyperus capitatus-Ononis serrata	120,471036	0	Estable
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Suaeda mollis	con Mesembryanthemum crystallinum	9660,262525	1	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Tamarix canariensis	con Neurada procumbens	301,02169	0	Cambio comunidad
Comunidad de Cyperus capitatus-Ononis serrata	Comunidad de Tamarix canariensis	con Nicotiana glauca	28,464223	0	Cambio comunidad

Figura 3.20. Tabla de atributos de la capa resultante del cruce de las correspondientes a las comunidades vegetales del año 1961 y año 2003.

3.9.5. Causas de los cambios de la vegetación

El siguiente paso consiste en explicar las causas de los cambios experimentados por la vegetación. Para ello, cada una de las unidades generadas en el cruce de capas se clasifica en función del tipo de cambio que ha experimentado mediante la comparación de los dos documentos aéreos que se han utilizado para digitalizar las comunidades vegetales, así como otros de apoyo como la ortofoto digital del año 1987. Para ello, se añade un nuevo campo en la tabla de atributos de la capa de salida, denominado “procesos”, donde se indica el tipo de cambio existente (figura 3.20).

3.9.6. Evolución de las poblaciones de *Traganum moquinii*

Debido a sus características específicas, la evolución de la comunidad de *Traganum moquinii* también se analizó de forma separada. Debido a su patrón de distribución, donde los ejemplares normalmente se encuentran bastantes distanciados unos de otros, se consideró que la mejor manera de estudiar su evolución consistía en trabajar a escala de cada individuo. Así, además de analizar la evolución de unidades como para el resto de comunidades, se estudió a nivel de variaciones en el número y la localización de los ejemplares. Hay que tener en cuenta que se trata de una especie relativamente sencilla de detectar mediante fotografía aérea por dos motivos: por un lado, debido a su porte arbustivo alto; y por otro, a que es la única especie vegetal existente en la zona de ese tamaño. Sin embargo, su identificación plantea un inconveniente, sobre todo a la hora de diferenciar el número de individuos existentes en determinadas zonas. Algunos ejemplares de *Traganum moquinii* se encuentran fragmentados debido a la apertura de caminos por parte de los usuarios de la playa (figura 3.21). Esto puede inducir a error, de tal forma que se contabilicen más individuos de los que realmente existen. Esta problemática solamente se plantea para los

años 1987 y 2003, pues con anterioridad no existía un uso tan masivo y generalizado por parte de los usuarios de la playa, y se ha solventado mediante la comparación con las fotografías anteriores a la fecha en cada caso, recurriendo a fotografías aéreas y ortofotos digitales de los años 1961, 1977, 1995 y 1998. De esta forma, se ha podido verificar en cada caso si en realidad se trataba de más de un ejemplar de *Traganum moquinii* o, por el contrario, era el resultado de la fragmentación por la apertura de caminos u otras causas.

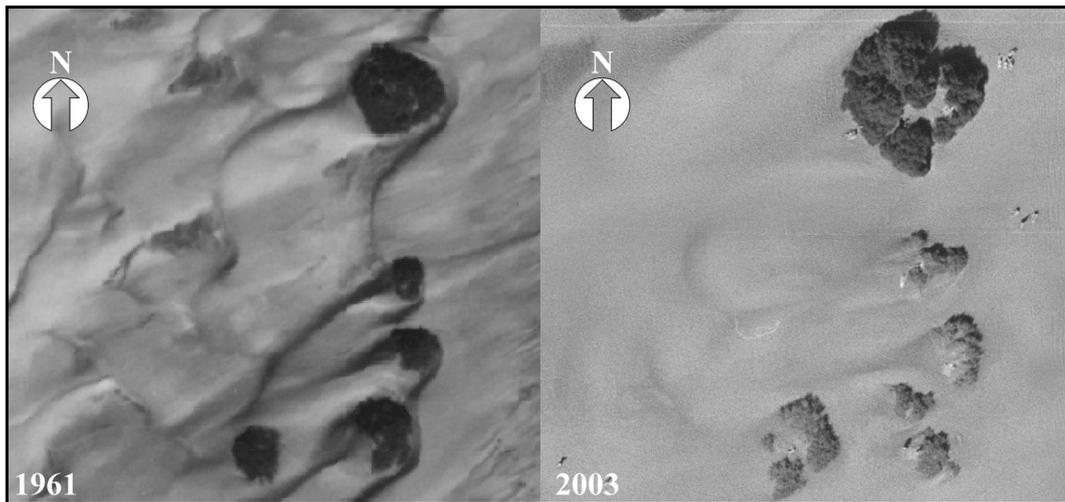


Figura 3.21. Fragmentación de los ejemplares de *Traganum moquinii* por apertura de caminos.

El método utilizado consiste en la identificación visual y digitalización de cada uno de los ejemplares existentes. Luego se analizan las variaciones en el número de individuos y localización en los periodos 1961-1987 y 1987-2003. En la playa del Inglés la evolución temporal y espacial detectada se analizó tanto a escala de toda la zona, como para diferentes sectores, diferenciados en función del tamaño y de la superficie que presentan los ejemplares de *Traganum moquinii*. Esto se debe a que se considera que las variaciones en las características de esta especie responden a factores ambientales, por lo que un análisis en cada área permite un mejor entendimiento de las relaciones de las plantas con su ambiente y con los impactos humanos. En primer lugar se procedió a la subdivisión de la zona de estudio en tres unidades en función del grado de cobertura y tamaño que presentan los ejemplares de *Traganum moquinii*. Debido a que estas características son constantes desde los años 60, se deduce que responden a causas naturales, y por ello las unidades permiten analizar las variaciones poblacionales de esta especie desde el punto de vista espacial.

Por otro lado, se analizaron las causas de las variaciones de las poblaciones de *Traganum moquinii* en la franja del Inglés, estudiando su relación con determinados parámetros como el tipo de geoforma y los impactos humanos. Las causas se determinaron mediante el análisis visual de los cambios observables en las ortofotos entre los diferentes años de las geoformas (aparición de superficies de deflación, desplazamiento de dunas, etc.) y de las alteraciones humanas como la construcción de infraestructuras (carreteras, equipamientos, etc.) y de edificaciones. En este último caso,

se digitalizaron en el SIG las infraestructuras y las construcciones mencionadas. Posteriormente con un análisis espacial simple consistente en una selección por localización realizada en el SIG se detectaron y cuantificaron los ejemplares de *Traganum moquinii* afectados por las mismas.