



CARACTERIZACIÓN Y EVOLUCIÓN DEL SISTEMA PLAYA-DUNA DE LA COSTA MEDITERRÁNEA DE ANDALUCÍA (ESPAÑA): INFLUENCIA DE PROCESOS NATURALES Y ACTUACIONES ANTRÓPICAS

ROSA MOLINA-GIL^{1*} , GIORGIO MANNO² ,
CARLO LO RE² , GIORGIO ANFUSO¹ 

¹*Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales,
Universidad de Cádiz, Polígono Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real, España.*

²*Departamento de Ingeniería, Universidad de Palermo,
Viale delle Scienze, Bd. 8, 90128 Palermo, Italia.*

RESUMEN. En las últimas décadas, los impactos relacionados con la erosión costera en las costas del mundo han aumentado significativamente debido al actual desarrollo costero y a la ocupación turística, así como a los eventos naturales de erosión/inundación acelerados por el cambio climático. Las costas oceánicas son entornos muy dinámicos y cambiantes, ya que muestran una gran variabilidad temporal y espacial en respuesta a la acción de diferentes y complejos procesos costeros. Esta variabilidad a escala temporal interanual está relacionada con las variaciones climáticas estacionales del oleaje, debido a distribuciones temporales y espaciales de tormentas de alta latitud y tormentas/huracanes tropicales, o son resultado de eventos con un gran período de retorno, como el impacto de tormentas y tsunamis muy energéticos, elevación del nivel del mar y variaciones en el suministro de sedimentos de los ríos. Para prevenir y reducir tales impactos, los gestores deben conocer la sensibilidad de los sectores costeros naturales, que está relacionada con la energía de las olas, las características/evolución de las playas y la tendencia del nivel del mar, así como la vulnerabilidad potencial y el valor económico de los sectores urbanizados.

Este trabajo muestra la evolución costera y los impactos de las estructuras costeras y la caracterización y evolución de los sistemas dunares a lo largo de la costa mediterránea de Andalucía (España). Para ello, se definieron 47 unidades a lo largo de la costa de estudio, y se cuantificó la evolución de las tasas de evolución (erosión/acreción/estabilidad) para el período 1956-2016, mediante el uso de la extensión DSAS del software ArcGIS. Como resultado, 9 unidades registraron acreción, 19 erosión y 19 estabilidad y, en cuanto al balance de superficie de playa, 17 unidades presentaron balance positivo y 28 negativo con un balance neto de -29.738,4 m²/año. El análisis de la evolución costera evidenció el impacto de las estructuras sólidas: la acreción se observó principalmente aguas arriba de los puertos y espigones y en correspondencia con los rompeolas; la erosión se detectó aguas abajo de los puertos y espigones y en correspondencia con los malecones, revestimientos y deltas de los ríos más largos; la estabilidad se observó en las playas pequeñas y en las áreas costeras estabilizadas localmente por estructuras de protección y obras de sustento. Estos resultados se utilizaron para determinar la distribución de los sectores costeros alineados con la corriente y la deriva y la dirección principal del transporte de sedimentos.

En cuanto a la caracterización y evolución de los sistemas dunares, se cartografiaron diferentes tipos de sistemas dunares, así como la posición y fragmentación de la punta de las dunas, y la ocupación y evolución humana desde 1977 hasta 2001 y desde 2001 hasta 2016. En total, se delimitaron 53 sistemas dunares. a lo largo de la costa mediterránea de Andalucía, diferenciando tres tipos: dunas embrionarias y móviles, dunas fijadas por herbáceas y dunas estabilizadas. Se observa un descenso generalizado de la superficie dunar en el periodo 1977-2001 (-7,5 x 106 m²), ligado al aumento de la ocupación antrópica (+2,3 x 106 m²), y fragmentación de las dunas, especialmente en las provincias de Málaga y Almería. Durante el período 2001-2016 se observaron cambios menores en el nivel de fragmentación y en la superficie de las dunas. Solo se observó un aumento de la superficie de dunas en playas

estables o en acreción (4 de 53 sistemas de dunas), tanto en áreas naturales como antrópicas (generalmente aguas arriba de los puertos).

Characterization and evolution of the beach-dune system of the Mediterranean coast of Andalusia (Spain): influence of natural and anthropic processes

ABSTRACT. In past decades coastal, erosion related impacts on the world's shorelines have been significantly growing due to ongoing coastal development and tourist occupation as well as to natural erosion/flooding events exacerbated by climatic change. Ocean coastlines are highly dynamic and changing environments since they show great temporal and spatial variability in response to the action of different and complex coastal processes: at an inter-annual time scales, related to seasonal wave climate variations due to temporal and spatial distributions of high latitude storms and tropical storms/hurricanes, or as a result of events with a large return period, such as the impact of very energetic storms and tsunamis, sea level rise, and variations in rivers' sediment supplies. In order to prevent and reduce such impacts, coastal managers need to know the sensitivity of natural coastal sectors, which is related to wave energy, beach characteristics/evolution, and sea level trend as well as the potential vulnerability and economic value of the urbanized sectors.

This paper shows coastal evolution and the impacts on it of coastal structures and the characterization and evolution of dune systems along the Mediterranean coast of Andalusia (Spain). For this purpose, an amount of 47 units were defined along the studied coast, and evolution rates (erosion/accretion/stability), for the period 1956-2016, quantified by using the DSAS extension of ArcGIS software. As a result, 9 units recorded accretion, 19 erosion and 19 stability and, concerning the beach surface balance, 17 units presented a positive balance and 28 a negative one and a net balance of $-29,738.4 \text{ m}^2/\text{yr}$. The analysis of coastal evolution evidenced the impact of hard structures: accretion was essentially observed up-drift of ports and groins and in correspondence of breakwaters; erosion was observed down-drift of ports and groins and in correspondence of seawalls and revetments, and at largest river deltas; and stability was observed at pocket beaches and coastal areas locally stabilized by protection structures and nourishment works. These results were used to determine the distribution of swash- and drift-aligned coastal sectors and main direction of sediment transport.

Concerning the characterization and evolution of dune systems, they were mapped different type dunes' systems as well as dune toe position and fragmentation, and human occupation and evolution from 1977 to 2001 and from 2001 to 2016. In total, they were delimited 53 dune systems along the Mediterranean coast of Andalusia, differentiating three types: Embryo and mobile dunes, grass-fixed dunes and stabilized dunes. It was observed a general decrease in dunes' surfaces in the 1977-2001 period ($-7.5 \times 10^6 \text{ m}^2$), linked to the increase of anthropic occupation ($+2.3 \times 10^6 \text{ m}^2$), and dunes' fragmentation, especially in Málaga and Almería provinces. During the 2001-2016 period, smaller changes in the level of fragmentation and in dunes' surfaces were observed. An increase of dunes' surfaces was only observed on stable or accreting beaches (4 out of 53 dune systems), both in natural and anthropic areas (usually up-drift of ports).

Palabras clave: Evolución costera, estructuras costeras, caracterización de dunas, ocupación antrópica.

Key words: Coastal evolution, coastal structures, dune characterization, dune evolution, anthropic occupation.

Recibido: 30 Septiembre 2021

Aceptado: 17 Enero 2022

*Correspondencia: Rosa Molina Gil, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Polígono Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real, España. E-mail: rosa.molina@uca.es

1. Introducción

A consecuencia del continuo desarrollo del turismo y ocupación de la costa durante las últimas décadas (Silva *et al.*, 2014; UNWTO, 2015; Rangel-Buitrago *et al.*, 2018) y de los procesos relacionados con el cambio climático (Jones y Phillips, 2011; Masselink *et al.*, 2020), como son la subida del nivel del mar o los cambios en la frecuencia, intensidad y dirección de las tormentas (Cid *et al.*, 2016; Anfuso *et al.*, 2020; Wolf *et al.*, 2020), los impactos relacionados con la erosión costera han aumentado considerablemente en todo el mundo.

El desarrollo costero, que está esencialmente unido al turismo, continúa aumentando, encontrándose actualmente alrededor del 50% de las costas mundiales bajo la presión de un desarrollo excesivo (Finkl y Kruempel, 2005; Silva *et al.*, 2014). En Europa, durante el periodo 1990-2000, se ha producido una rápida expansión de las superficies urbanas en las zonas costeras mediterráneas y suratlánticas (European Environmental Agency, 2006), emplazando las actividades e infraestructuras humanas relacionadas tanto con el turismo como con la industria y la pesca extremadamente cerca de la orilla de mares y océanos (Silva *et al.*, 2014).

Las costas son ambientes cambiantes muy dinámicos que muestran una gran variabilidad temporal y espacial en respuesta a la acción de diferentes y complejos procesos, esencialmente relacionados con el oleaje y las corrientes (Komar, 1998). La erosión se observa tras eventos de tormenta a altas latitudes registradas durante los meses de invierno, y la recuperación de las playas tiene lugar durante el periodo estival en circunstancias climáticas favorables, lo que se conoce como comportamiento “estacional” de la playa (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2013). En este caso, los procesos de erosión representan un peligro ya que pueden amenazar localmente las estructuras y/o actividades humanas en intervalos de tiempo pequeños, mientras que la recuperación natural de la playa ocurre durante intervalos mayores de tiempo, de semanas a meses (Komar, 1998; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011). Esta recuperación garantiza la formación de una playa ancha y la función de protección asociada a ella, además de su uso turístico, pero la respuesta de las dunas a los eventos erosivos es muy diferente, es decir, la erosión es muy rápida y está asociada a eventos puntuales mientras que la acreción es un proceso que normalmente se produce durante un largo periodo de tiempo, de varios meses a años (Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011).

Por ello, la determinación de las características, comportamiento y evolución de las dunas costeras necesitan una especial atención con el fin de reducir los impactos de los procesos de erosión/inundación, tanto en costas naturales como urbanizadas.

Diferente es el caso en el que la erosión costera es el resultado de una larga tendencia debido al impacto de grandes tormentas y tsunamis (Cooper *et al.*, 2004; Sánchez-García *et al.*, 2007), subida del nivel del mar, y variaciones en el aporte sedimentario, relacionadas con la contribución de los ríos y las corrientes longitudinales y transversales. Las contribuciones de los ríos están relacionadas con las variaciones de las lluvias, cambios en los usos del suelo y la construcción de presas y canalización de cauces (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993; Senciales González y Malvárez, 2003; Pranzini, 2007; Prieto *et al.*, 2012; Berguillos *et al.*, 2016, 2017; Pranzini *et al.*, 2020). Las contribuciones longitudinales y transversales registran variaciones debido a los cambios en el clima marítimo y las corrientes (Shand *et al.*, 2001; Orford *et al.*, 2002) o la acumulación aguas arriba de estructuras antrópicas (p. ej., puertos, espigones, etc., Nordstrom, 2000, 2014; Manno *et al.*, 2016; Molina *et al.*, 2019a). En este caso, los procesos de erosión producen un importante retroceso (parcialmente o sin una recuperación asociada) que en áreas naturales se refleja en procesos de *overwash* y/o erosión de las dunas y playas (Rizzo *et al.*, 2018), además de daños a las estructuras y actividades humanas en sectores costeros urbanizados (Cooper *et al.*, 2004; Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015).

Los estudios a escala regional sobre tasas de cambios de la línea de costa son escasos a pesar de su gran relevancia. Algunos intentos se han desarrollado en EE.UU. (Fletcher *et al.*, 2012) y Europa (Salman *et al.*, 2004). Sin embargo, la comparación de los datos no es fácil ya que aspectos como la

definición de la línea de costa o el formato de las series de datos difieren mucho en los distintos estudios (Ponte Lira *et al.*, 2016). Todavía se necesita mucho trabajo a escala regional/nacional para definir el mejor procedimiento en estudios regionales de erosión costera y para obtener una visión amplia de los factores regionales/locales que afectan a la evolución de la costa a medio plazo. Estos datos ayudarían a identificar las causas principales de la erosión en las últimas décadas.

La costa mediterránea de Andalucía (España) ha registrado una de las mayores tasas de crecimiento urbano a lo largo del litoral español, especialmente en la Costa del Sol (provincia de Málaga) (Malvárez *et al.*, 2000), cuya población alcanzó los 1.136.712 habitantes en 2006 (Malvárez, 2012) y continuó creciendo con una tasa del 9.2% entre 2006 y 2011 – lo que corresponde al 50% del incremento demográfico registrado a lo largo del litoral andaluz durante el mismo periodo (Martínez *et al.*, 2015).

El creciente y significativo interés turístico de las costas andaluzas conlleva a un aumento importante de la ocupación y las actividades humanas y, por tanto, de la presión antrópica cuyo papel se hace cada vez más relevante en los procesos de erosión costera. En este trabajo se pretende realizar un análisis de la evolución y el estado actual de la línea de costa y los sistemas dunares del litoral mediterráneo de Andalucía prestando una especial atención a los efectos de la presión antrópica.

2. Área de estudio

El litoral de Andalucía se extiende a lo largo del océano Atlántico, el estrecho de Gibraltar y el mar Mediterráneo, al sur de España. La costa mediterránea andaluza, de 546 km de longitud, se extiende desde el estrecho de Gibraltar hasta la Región de Murcia e incluye, desde el punto de vista administrativo, las provincias de Cádiz, Málaga, Granada y Almería. La línea de costa tiene una orientación predominantemente E-O, con dos sectores orientados NE-SO situados cerca del estrecho de Gibraltar y en el extremo E de la costa de Almería (Fig. 1).

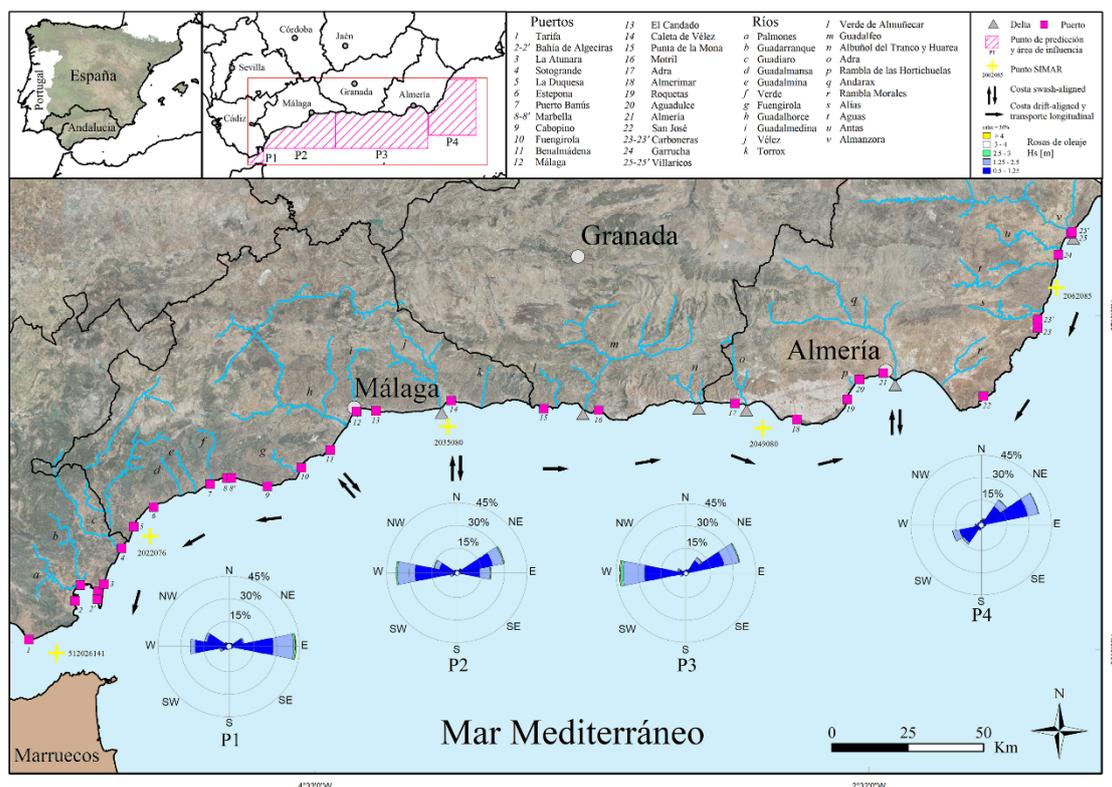


Figura 1. Área de estudio.

La orografía y la morfología costeras las determina la Cordillera Bética, formando una costa muy irregular con acantilados, bahías y promontorios. Al pie de estas montañas se desarrollan numerosas llanuras costeras de pequeño tamaño, principalmente en la desembocadura de ríos de escasa entidad y ramblas que drenan la cadena montañosa, siendo los más importantes los ríos Guadiaro, Guadalhorce, Guadalfeo, Adra y Andarax (Fig. 1). Especialmente, durante episodios de fuertes lluvias asociadas al clima semiárido, las arenas y gravas fluviales constituyen un importante aporte de sedimento al sistema playa-duna.

En las últimas décadas, los planes de regulación de cuencas hidrográficas han promovido la construcción de presas y embalses que han limitado sustancialmente los aportes sedimentarios a la costa, agravando el retroceso costero, especialmente en los principales deltas (Prieto *et al.*, 2012; Guisado *et al.*, 2013).

Las principales formaciones deltaicas de la costa mediterránea de Andalucía están asociadas a algunos de los ríos de mayor importancia: los ríos Vélez, Guadalfeo, Adra, Andarax y Almanzora y las ramblas de Albuñol y Huarea. El delta del río Vélez es un buen ejemplo de comportamiento erosivo: la desembocadura del río presenta materiales no consolidados que son muy susceptibles a la erosión y se depositan en los márgenes del delta debido a la deriva dominante (Prieto *et al.*, 2012). Esto también ocurre en los deltas de los ríos Guadalfeo y Andarax (Prieto *et al.*, 2012), en el delta del río Ebro (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993) y en el del río Arno (Pranzini, 2007). En muchas de estas áreas se han sucedido numerosos trabajos periódicos de regeneración artificial de playa con el fin de estabilizar la línea de costa (Malvárez *et al.*, 2000; Prieto *et al.*, 2012; Guisado-Pintado y Malvárez, 2015; Berguillos, 2016, 2017).

Respecto a las características de las playas del litoral mediterráneo de Andalucía, se pueden diferenciar dos grandes grupos: las playas de Cádiz, Málaga y Granada, con un ambiente micro-mareal (amplitud mareal < 20 cm), de tipo intermedio a reflectivo que se componen comúnmente por arenas oscuras de medias a gruesas y/o gravas en la desembocadura de ramblas, mientras que las playas de Almería, de tipo disipativo, se componen de arenas finas/medias ricas en cuarzo (Guisado y Malvárez, 2009; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011; Williams *et al.*, 2012; Mooser *et al.*, 2018). A menudo, las playas se ven interrumpidas por sectores rocosos o promontorios que dan lugar a calas o playas en bolsillo (*pocket beaches*) de diferentes tamaños y elevado valor paisajístico (Williams *et al.*, 2012).

En cuanto a ocupación del litoral, las mayores ciudades costeras son Málaga (>500.000 habitantes), Almería (200.000 habitantes) y las ciudades turísticas situadas en la parte oeste de la Costa del Sol, es decir Marbella (150.000 habitantes), Fuengirola (80.000 habitantes) y Torremolinos (70.000 habitantes). Los puertos comerciales más importantes se encuentran en Almería, Cádiz (especialmente en la Bahía de Algeciras), y Málaga donde, además, se encuentran numerosos puertos deportivos, esencialmente en la Costa del Sol (Malvárez *et al.*, 2000, 2003; Manno *et al.*, 2016).

Respecto a las características climáticas, las provincias de Cádiz, Málaga y Granada tienen un clima mediterráneo subhúmedo-húmedo (desde el estrecho de Gibraltar hasta el área occidental de la provincia de Málaga) y seco-subhúmedo temperado (provincias de Málaga y Granada) (Gómez-Zotano *et al.*, 2015). La orientación de la costa y la presencia de la cordillera Bética, que resguarda la zona de los vientos fríos septentrionales, favorecen temperaturas medias anuales de unos 15°C y de 19°C. Las precipitaciones anuales son de 600 a 1.000 mm, siendo más abundantes en el área del estrecho de Gibraltar (Gómez-Zotano *et al.*, 2015). La provincia de Almería presenta un clima mediterráneo semiárido-árido, con episodios de lluvias muy escasos (< 200 mm/año en algunos puntos, Gómez-Zotano *et al.*, 2015), y una temperatura media anual de 21°C y de 26°C en julio y agosto (Chica Ruiz y Barragán, 2011).

La costa se expone, en general, a vientos provenientes de E a O y de NNE a SO en el área más oriental de Andalucía (Fig. 1 y 2), con velocidades mínimas y máximas que oscilan entre los 0,4 a 9,0 m/s (Molina *et al.*, 2019b). El oleaje y el flujo de energía durante las tormentas es muy variable (Molina

et al., 2019b, 2020a), ya que la costa de la provincia de Cádiz y la costa oriental de la provincia de Almería se ven afectadas principalmente por las tormentas que provienen del este, mientras que las provincias de Málaga, Granada y, parcialmente, Almería están expuestas a tormentas provenientes tanto del este como del oeste (Molina *et al.*, 2019b; 2020a). El oleaje muestra un comportamiento claramente estacional, registrando condiciones de tormenta durante los meses de invierno (Noviembre-Marzo) (Pita López, 2003; Guisado *et al.*, 2013; Molina *et al.*, 2019b). Debido a la orientación de la costa, los vientos predominantes del este asociados a condiciones de tormenta dan lugar a condiciones de oleaje que generan una deriva litoral preferente del oeste (Pita López, 2003), aunque en algunos sectores se produce, de forma particular, una deriva opuesta (Guisado *et al.*, 2013; Molina *et al.*, 2019b).

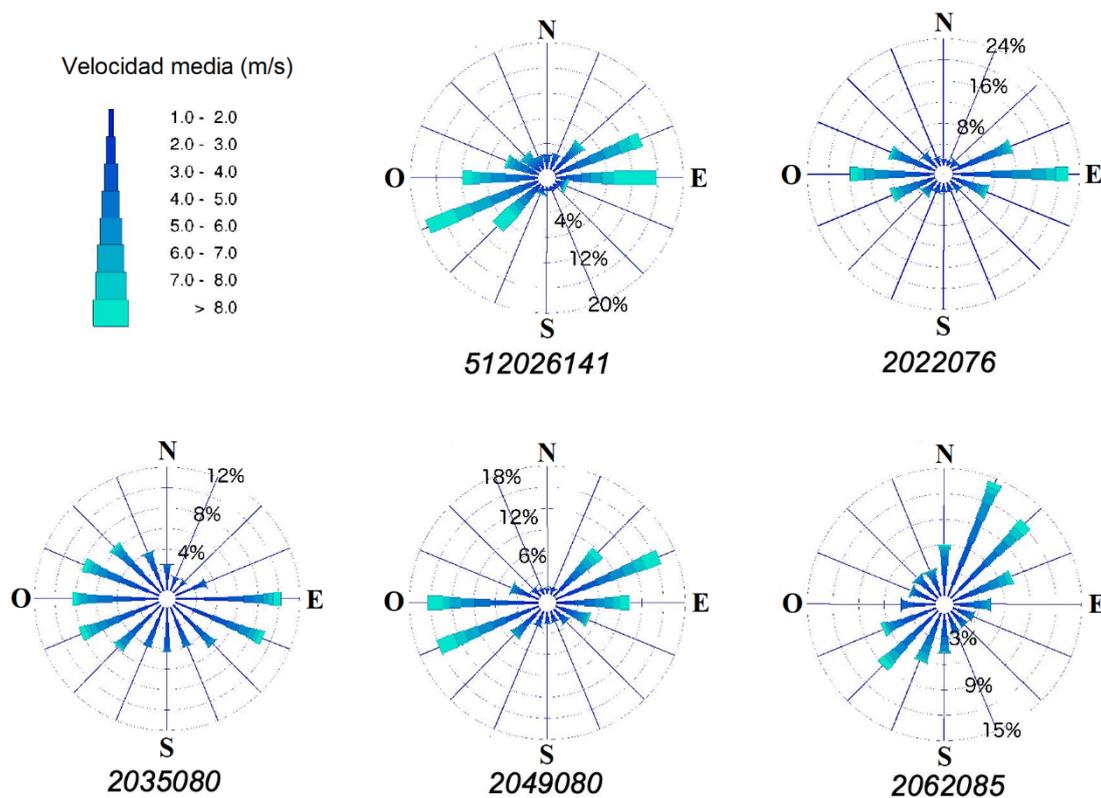


Figura 2. Rosas de viento modificada de Molina *et al.* (2019a).

3. Material y métodos

Para la determinación de la línea de costa y la cartografía de las dunas se han utilizado las ortofotografías aéreas disponibles de los años 1956, 1977, 2001, 2010 y 2016, obtenidas a través de los servicios *Web Map Services* (WMS) pertenecientes a los servicios *Open Geospatial Consortium* (OGC) de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (Junta de Andalucía) y del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica que, junto a la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN), dirigen el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), organismos autónomos adscritos al Ministerio de Fomento (Gobierno de España), (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las ortofotografías aéreas utilizadas.

Año	Vuelo	Color	Escala	Resolución espacial (m)
1956	1956-57	Blanco y negro	1:10000	1,0
1977	Iryda 1977-83	Blanco y negro	1:5000	0,5
2001	2001-02	Blanco y negro	1:10000	0,5
2010	PNOA 2010-11	Color	1:10000	0,5
2016	PNOA 2016	Color	1:5000	0,25

Las ortofotografías aéreas del año 1956 se han utilizado para el análisis de la evolución de la línea de costa y no para la cartografía de las dunas debido a la baja calidad de las mismas. Las características de estas ortofotografías, es decir, su baja calidad en ciertas áreas de la costa y su color pancromático, dificultan enormemente el reconocimiento y la definición de sistemas dunares poco evolucionados, de poca altura y/o con vegetación herbácea difícil de distinguir en una escala de grises y que, al tratarse en este caso de un estudio regional, se suman a la dificultad de utilizar una escala de trabajo mayor que si se tratara de un estudio a escala de detalle.

Los mapas se han elaborado en un proyecto GIS mediante la aplicación ArcMap del software ArcGIS, utilizando el sistema de referencia WGS84, UTM zonas 29 N y 30 N. Se han cartografiado todos los sistemas dunares con un mínimo de 100 m de longitud de frente de duna, resultando un total de 53 sistemas dunares y diferenciando las unidades que se describen a continuación:

- Línea de costa;
- Línea de pie de duna;
- Dunas embrionarias y móviles (Tipo I);
- Dunas fijas con céspedes (Tipo II);
- Dunas estabilizadas (Tipo III).

Al ser la costa mediterránea andaluza un ambiente micromareal, la posición de la línea de costa se ha establecido en el límite agua-tierra (Pajak y Leatherman, 2002; Boak y Turner, 2005), y las correcciones se han llevado a cabo teniendo en cuenta las condiciones mareales (σ_{td}) y de run-up (σ_{wr}) de acuerdo a Manno *et al.* (2017). La precisión de las medidas depende de la incertidumbre total (σ_T) asociada a la determinación de la posición de cada línea de costa, que a su vez depende de las características propias de las imágenes utilizadas y de los procesos de digitalización, i.e. error de digitalización (σ_d), precisión vinculada al tamaño del píxel (σ_p), error de orto-rectificación (σ_r) y error de co-registro de la imagen (σ_{co}) (Moore, 2000).

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{co}^2 + \sigma_{wr}^2 + \sigma_{td}^2} \quad (1)$$

La línea del pie de duna se ha establecido en el límite entre el frente de duna vegetado y la playa.

La definición de los ambientes dunares, i.e. Dunas embrionarias y móviles (Tipo I), Dunas fijas con céspedes (Tipo II) y Dunas estabilizadas (Tipo III), se ha basado en la clasificación morfo-ecológica descrita en el manual “Las dunas en España” de Sanjaume Saumel y Gracia Prieto (2011) en el que se definen los hábitats dunares costeros más importantes de España. Los hábitats dunares descritos se

corresponden con los Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) de la Directiva Hábitat de la Comisión Europea, enumerados en la siguiente tabla (Tabla 2).

Tabla 2. Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) descritos en el área de estudio y su correspondencia con las tipologías utilizadas en este trabajo
(https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/biogeog_regions/mediterranean/index_en.htm?ettrans=es#list_of_sites)

Lugares de Importancia Comunitaria (LIC)	Clasificación
2110 – Dunas móviles embrionarias 2120 – Dunas móviles de litoral con <i>Ammophila arenaria</i>	Tipo I – Dunas embrionarias y móviles
2130 – Dunas costeras fijas con vegetación herbácea 2150 – Dunas fijas descalcificadas atlánticas 2210 – Dunas fijas del litoral del <i>Crucianellion maritimae</i> 2230 – Dunas con céspedes de <i>Malcolmietalia</i> 2240 – Dunas con céspedes del <i>Brachyopodietalia</i> y de plantas anuales	Tipo II – Dunas fijas con céspedes
2250 – Dunas litorales con <i>Juniperus</i> spp. 2260 – Dunas con vegetación esclerófila de <i>Cisto-lavanduletalia</i> 2270 – Dunas con bosques de <i>Pinus pinea</i> y/o <i>Pinus pinaster</i>	Tipo III – Dunas estabilizadas

Para el análisis de la evolución de la costa se han estudiado los cambios producidos en la línea de costa, la variabilidad del cordón dunar incluyendo su vegetación y fragmentación y el efecto de las construcciones antrópicas sobre el tramo costero analizado. Para ello se ha utilizado la cartografía generada con software GIS con el fin de realizar una descripción detallada de los cambios que se han producido en las distintas unidades geomorfológicas estudiadas.

Para la estimación de las tasas de evolución de la línea de costa, se ha utilizado la extensión DSAS del software ArcGIS (Thieler *et al.*, 2009a) a través de la que se han calculado los parámetros SCE (*Shoreline Change Envelope*), NSM (*Net Shoreline Movement*), WLR (*Weighted Linear Regression*), LRR (*Linear Regression Rate*) y EPR (*End Point Rate*) (Thieler *et al.*, 2009b). El parámetro utilizado para la clasificación de las tasas de evolución fue WLR y la elección de los intervalos para cada clase se basó en el análisis estadístico de los resultados (Tabla 3), descrito en Molina *et al.* (2019a).

Tabla 3. Definición de las clases de evolución.

Clase	Estado de la playa	m/año
1	Acreeión muy alta	$\geq + 1,5$
2	Acreeión alta	$\geq + 0,5; < + 1,5$
3	Acreeión moderada	$\geq + 0,2; < + 0,5$
4	Estabilidad	$> - 0,2; < + 0,2$
5	Erosión moderada	$> - 0,2; \leq - 0,5$
6	Erosión alta	$> - 0,5; \leq - 1,5$
7	Erosión muy alta	$\leq - 1,5$

El área de estudio se dividió en 47 unidades limitadas por estructuras artificiales y/o naturales.

El análisis de la distribución de las clases de evolución de acuerdo a su localización (libres de estructuras, en correspondencia, aguas arriba o abajo de estructuras de protección y puertos) se realizó a través del software estadístico “R” (<http://www.rproject.or>).

El análisis de la evolución de los sistemas dunares y la ocupación antrópica se realizó a través de cálculos de superficies y de la fragmentación del pie de duna, utilizando los programas ArcGIS y MATLAB. Debido a la heterogeneidad de los sistemas, los valores obtenidos de fragmentación se

normalizaron de acuerdo a una distancia constante utilizando un Índice de Fragmentación (*F Index*, Molina *et al.*, 2020b):

$$F = \frac{l}{L} \quad (2)$$

Donde *l* es la longitud de los espacios entre fragmentos y *L* es la longitud total del pie de duna. Los resultados se clasificaron en tres clases utilizando la Función de Rupturas Naturales (Jenks y Caspall, 1971), desde la Clase 1 (“Fragmentación nula o muy baja”, $0,00 < F < 0,06$), Clase 2 (“Fragmentación media”, $0,06 < F < 0,16$) a la Clase 3 (“Fragmentación alta”, $0,16 < F < 0,41$).

4. Resultados y discusión

4.1. Evolución de la línea de costa

De las 47 unidades estudiadas, 9 unidades (70,35 km) presentan la prevalencia de clases de acreción, 19 unidades (89,9 km) presentan prevalencia de estabilidad y otras 19 unidades (124,07 km) muestran prevalencia de clases de erosión. Ninguna de ellas muestra acreción muy alta como clase representativa y sólo una unidad muestra erosión muy alta (Fig. 3).

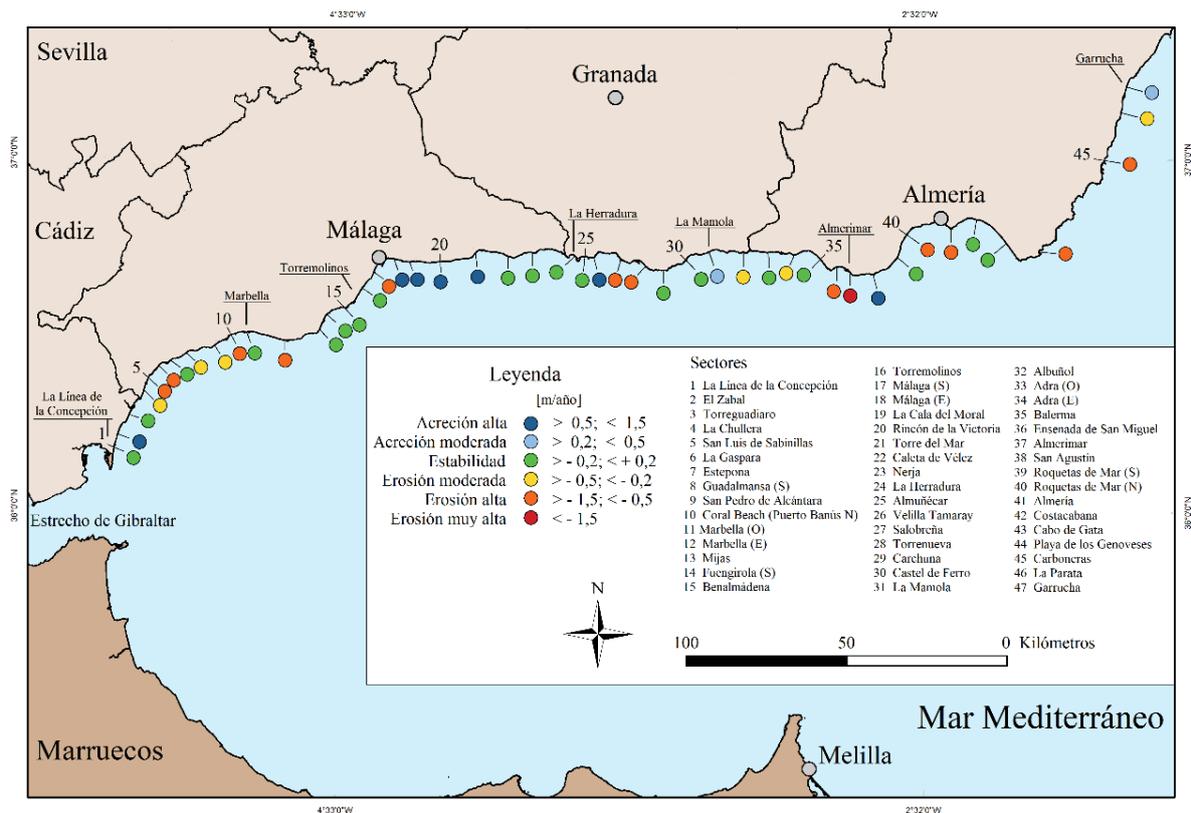


Figura 3. Evolución de la línea de costa.

La distribución de las diferentes clases se muestra en la Fig. 3, en la que se observan dos grandes áreas en erosión a lo largo del SO de la provincia de Málaga y al E de la provincia de Almería y una extensa área constituida por cuatro unidades con acreción muy alta se sitúa al este de la provincia de Málaga. Dentro de esta gran área se intercalan dos áreas estables, una de ellas cerca de Torremolinos

(provincia de Málaga) y otra en La Herradura (provincia de Granada). Respecto a las clases de acreción, la más frecuente es la acreción alta (0,5-1,5 m/año), y es resultado del emplazamiento de numerosas estructuras de protección costera y trabajos de regeneración artificial de playa.

Las clases de erosión se observan en áreas cercanas a puertos y estructuras de protección, en deltas y desembocaduras de ríos que han sido intervenidos. Por último, la clase de estabilidad se observa en playas en bolsillo y en algunas zonas que han sido estabilizadas con estructuras de protección costera.

Para determinar con mayor detalle la influencia de las estructuras antrópicas en la evolución de la línea de costa, se ha analizado la distribución de las clases de evolución de acuerdo a la localización de dichas estructuras, en otras palabras, se ha analizado si una zona estaba localizada aguas arriba, aguas abajo o en correspondencia de una estructura, o si se localizaba en áreas “naturales”, es decir tramos del litoral sin estructuras. Además, se han tenido en cuenta las características de las estructuras, la dirección de los frentes de aproximación del oleaje y la dirección prevalente del transporte longitudinal (Molina *et al.*, 2019a).

4.1.1. Sectores naturales

En la costa mediterránea de Andalucía, los sectores costeros naturales estudiados muestran una tasa media de erosión de 0,17 m/año y no se registra acreción en ninguno de ellos (Molina *et al.*, 2019a) (Fig. 4a). Es más, las áreas estudiadas situadas en deltas y desembocaduras de ríos son las que muestran tasas de erosión más elevadas, de 0,62 m/año de media, alcanzando valores de erosión alta y muy alta. Algunos ejemplos son los deltas de los ríos Adra (1,88 m/año) en la provincia de Almería y el delta del río Vélez (3,71 m/año) en la provincia de Málaga (Molina *et al.*, 2019a).

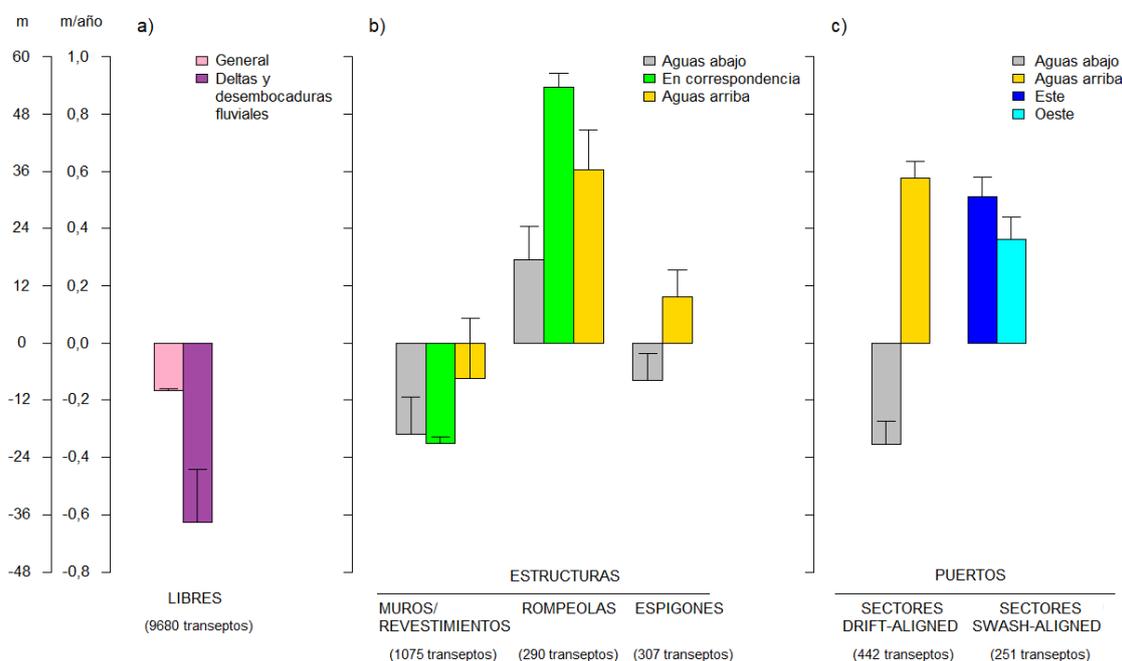


Figura 4. Valores y tendencias de las tasas de evolución según su localización: a) en áreas libre de estructuras, diferenciando entre áreas libres en general y áreas localizadas en correspondencia de desembocaduras fluviales y deltas; b) áreas aguas arriba, aguas abajo o en frente a estructuras (muros/revestimientos, rompeolas y espigones); y c) aguas arriba y abajo de puertos en costas drift-aligned (áreas costeras donde se observa una dirección clara de transporte longitudinal) y lados este y oeste de puertos en costas swash-aligned (áreas costeras donde la dirección de transporte es bidireccional y/o transversal). Entre paréntesis se muestra el número de transectos estudiados de cada tipo.

En la provincia de Almería (Fig. 1 y 3), la evolución erosiva de los deltas y el área oriental de la provincia está muy influenciada por la naturaleza torrencial de los ríos y otros arroyos, además de por la progresiva construcción de presas que reducen considerablemente los aportes sedimentarios al litoral (Viciano Martínez-Lage, 2007). Esta tendencia general se ha observado también en otros deltas en Andalucía como los de los ríos Vélez y Guadalfeo (Fig. 1, Prieto *et al.*, 2012), en los deltas del río Ebro en Cataluña (Jiménez y Sánchez- Arcilla, 1993), y del Arno en Italia (Pranzini, 2007).

En las playas en bolsillo (*pocket beaches*), se observa estabilidad y un comportamiento típico pivotante (Valdemoro y Jiménez, 2006), como por ejemplo en la playa de La Herradura, en la provincia de Granada (Fig. 1 y 3). Este comportamiento se debe a que las playas en bolsillo son sistemas sedimentarios restringidos que experimentan muy poca o ninguna conexión con otros sistemas debido a la presencia de promontorios rocosos que las limitan (Dehouck *et al.*, 2009).

4.1.2. Sectores influenciados por estructuras antrópicas (presas y estructuras de protección)

En sectores arenosos, la distribución espacial de áreas en acreción, erosión y estabilidad se encuentran esencialmente influenciadas por el emplazamiento de estructuras de protección costeras, puertos y promontorios naturales, y por la forma en la que estas estructuras interaccionan con el oleaje, tal y como se ha observado en otras áreas (Manno *et al.* 2016; Anfuso *et al.*, 2007; Bray *et al.*, 1995; Pranzini *et al.*, 2018).

Como se ha mencionado antes, los ríos han visto menguada su capacidad para aportar sedimento al litoral debido a las numerosas intervenciones que se han llevado a cabo en los últimos años. Como ejemplo, en el río Verde (provincia de Málaga, Fig. 1 y 3), se encuentra la presa de La Concepción, la obra de ingeniería fluvial más importante de la Costa del Sol: antes de la construcción de esta presa, el río Verde constituía la principal fuente de sedimento del área costera de Marbella (Del Río y Malvárez, 2016).

Respecto al efecto de las estructuras de protección costeras, éste varía dependiendo del tipo de estructura (Molina *et al.*, 2019a), como se observa en la Figura 4b. Los muros y revestimientos reflejan la energía del oleaje, restringiendo la migración natural del sedimento hacia tierra e induciendo a la erosión y a la pérdida de las playas que se encuentran frente a estas estructuras (Griggs, 2005; Dugan *et al.*, 2011). Específicamente, las áreas estudiadas que se localizaron frente a este tipo de estructuras, así como las que se encontraban aguas arriba y abajo de ellas, se caracterizaron por registrar valores de erosión altos (desde 0,13 a 0,35 m/año) (Figura 4b). En cuanto a los rompeolas, éstos producen tómbolos (Nordstrom, 2000; Miles *et al.*, 2001), muy frecuentes en la provincia de Málaga (p. ej., Málaga y Puerto Banús, Fig. 1). En las áreas caracterizadas por la presencia de rompeolas se registró acreción, especialmente donde estas estructuras eran muy numerosas. Este tipo de estructuras son mucho más efectivas reteniendo sedimentos respecto a los espigones y muestran valores medios de acreción de hasta 0,89 m/año, cercanos a los valores que se registran aguas arriba de puertos (Figura 4b y c). Las estructuras perpendiculares a la orilla (diques y espigones) y los puertos actúan como límites absolutos o permeables de celdas (Bray *et al.*, 1995) que afectan a la circulación de la zona de surf y, normalmente, producen acreción aguas arriba y erosión aguas abajo, tal como observado también por Rangel-Buitrago *et al.* (2012, 2018) a lo largo de la costa caribeña de Colombia o por Anfuso *et al.* (2013) en el sureste de Sicilia. En este trabajo, los valores medios registrados en las áreas aguas arriba y abajo de estas estructuras reflejan el efecto del transporte longitudinal: valores medios de acreción aguas arriba de 0,16 m/año y de erosión aguas abajo de 0,13 m/año (Fig. 4 b). En cuanto a las áreas cercanas a puertos, éstas se dividen en dos grupos: áreas aguas arriba y abajo cuando los puertos se encuentran en sectores costeros *drift-aligned* (áreas costeras donde se observa una dirección clara de transporte longitudinal) y áreas este y oeste cuando los puertos se encuentran en sectores *swash-aligned* (áreas costeras donde la dirección de transporte es bidireccional y/o transversal).

Las áreas localizadas aguas arriba de los puertos registraron los valores más altos de acreción respecto a aquellas localizadas en correspondencia de todos los demás tipos de estructuras, y los valores de erosión se observaron en áreas aguas abajo (Figura 4c), una tendencia común a lo largo de costas arenosas (Dugan *et al.*, 2011; Miles *et al.*, 2001). Los puertos situados en sectores *swash-aligned* muestran acreción a ambos lados (Fig. 4c). La forma y dimensiones de las playas recién formadas dependen de las características de las estructuras y del régimen de oleaje, tal y como han observado diferentes autores en diversas áreas (Manno *et al.*, 2016; Anfuso *et al.*, 2012; Bray *et al.*, 1995).

Cabe señalar que la evolución de la línea de costa no se ha producido siempre de manera uniforme, es decir, se ha registrado una inversión en la tendencia, normalmente de erosión a acreción, en muchos lugares puntuales en los que la tendencia erosiva se ha contrarrestado con la construcción de estructuras costeras y/o regeneraciones artificiales de playa.

4.2. Evolución de los sistemas dunares

En cuanto a los sistemas dunares, se han calculado y clasificado las superficies de las dunas y se ha analizado la variación de éstas para el periodo 1977-2016. Un total de 15 sistemas dunares desapareció durante el periodo estudiado, 7 de ellos localizados en la provincia de Málaga, otros 7 sistemas en la provincia de Almería y un sistema en la provincia de Cádiz. La comparación de la superficie total de dunas en erosión y en acreción muestra un claro balance negativo en 49 de los 53 sistemas y positivo para los 4 sistemas restantes (Fig. 5). Finalmente, para determinar con mayor detalle la influencia de la presión antrópica sobre la evolución de las dunas, se han calculado las superficies ocupadas por estructuras y/o intervenciones humanas dentro de cada sistema dunar y su continuidad lateral a partir de un índice de fragmentación del pie de duna (Molina *et al.*, 2020b).

La erosión o la completa desaparición de los sistemas dunares se pueden producir como consecuencia de actividades humanas o por procesos naturales (Hesp, 2002; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011), siendo los impactos antrópicos los más evidentes en el área de estudio, especialmente en las costas de las provincias de Málaga y Almería (Viciano Martínez-Lage, 2007; Malvárez *et al.*, 2000; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011; Prieto *et al.*, 2012; Gómez-Zotano, 2014; Del Río y Malvárez, 2016; Manno *et al.*, 2016; Castaño Camero *et al.*, 2017; Díez-Garretas *et al.*, 2019; Molina *et al.*, 2020b).

En el área de estudio se han encontrado muy pocos casos de sistemas dunares en áreas naturales que permanezcan sin alterar, bien por la ocupación de su superficie o por la presencia de estructuras de protección costeras y, en general, se encuentran en erosión.

Las condiciones para la formación y el desarrollo de las dunas han sido discutidas por un gran número de autores quienes concuerdan que los factores más importantes que controlan la relación del sistema playa-duna son la variación temporal de los aportes sedimentarios y los regímenes de viento (Hesp, 2002; Nordstrom, 2000; Martínez y Psuty, 2008). En este trabajo, los pocos casos de sistemas dunares en acreción se asocian a procesos naturales de sedimentación, o ligados a la presencia de estructuras antrópicas, registrados en las playas directamente ubicadas en frente de los sistemas o al suministro de sedimento de los ríos que desembocan en su correspondencia.

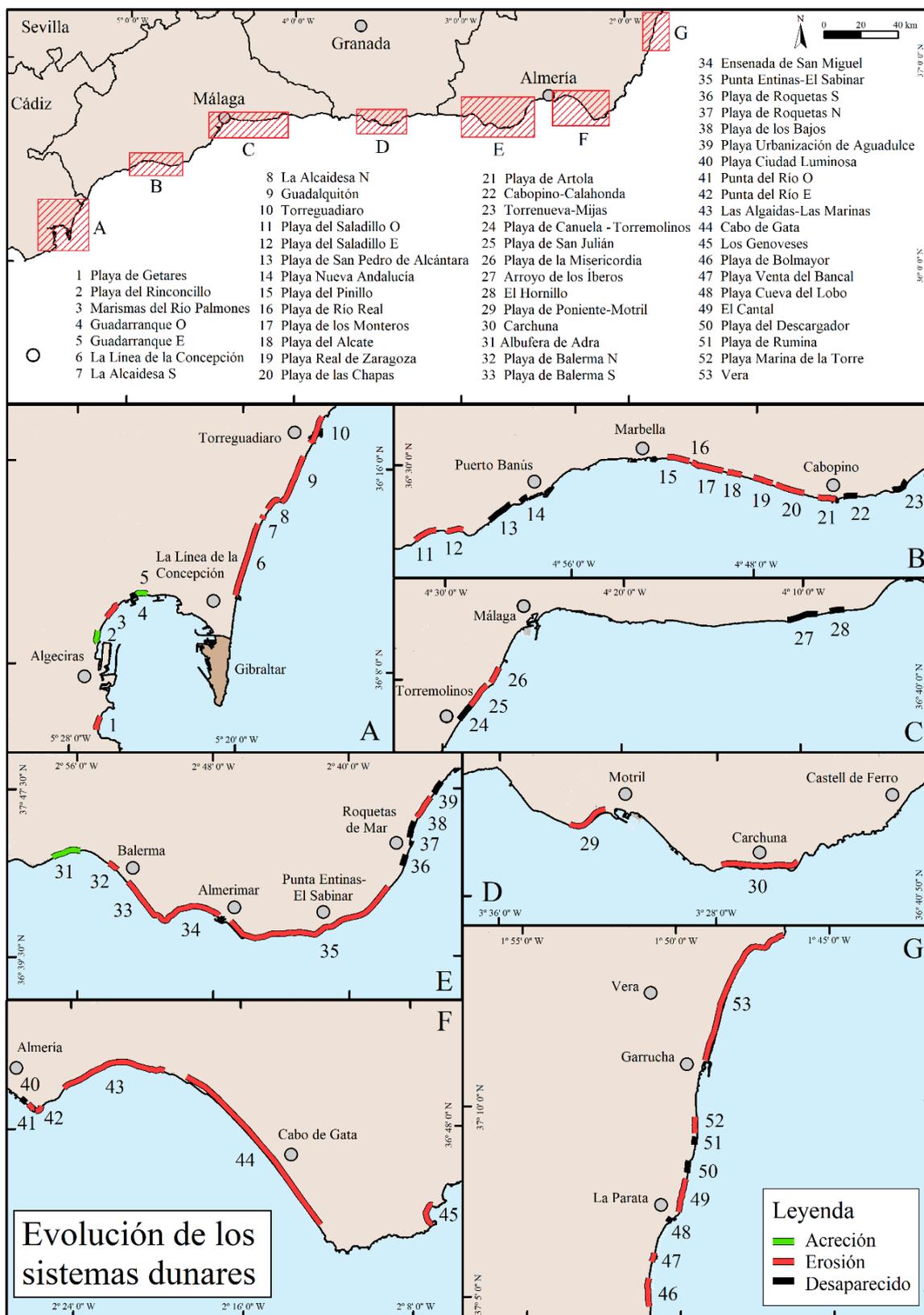


Figura 5. Resultados de la evolución de los sistemas dunares.

4.2.1. Sistemas en erosión

Respecto a los 53 sistemas dunares estudiados, todos menos 4 registraron una reducción de su superficie, o incluso su desaparición (Fig. 5), especialmente en los lugares donde los sistemas se han visto afectados por intensas intervenciones humanas (Gómez-Zotano, 2014; Díez-Garretas *et al.*, 2019; Castaño Camero *et al.*, 2017; Viciano Martínez-Lage, 2007; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011) y, secundariamente, por la pérdida de superficie producida por la erosión de la línea de costa (Viciano Martínez-Lage, 2007; Fernández-Salas *et al.*, 2009; Malvárez *et al.*, 2019).

La mayor pérdida de superficie de dunas se produjo en el periodo 1977-2001 debido a la ocupación urbana masiva de las áreas costeras, no obstante, en el periodo 2001-2016 se ha observado una disminución de la superficie de las dunas debido a que las principales causas de su destrucción registradas en el periodo anterior cesaron parcialmente. Aún se siguen observando casos de desaparición por ocupación urbana, especialmente en la provincia de Málaga (Gómez-Zotano, 2014; Molina *et al.*, 2020b), sin embargo, la presión antrópica derivada del uso turístico de las playas y la disminución de las contribuciones de los ríos no fueron tan evidentes en el periodo 1977-2001 (Malvárez *et al.*, 2000; Castaño Camero *et al.*, 2017; Viciano Martínez-Lage, 2007; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011).

La pérdida de superficie de dunas ha estado relacionada con la fragmentación del pie de duna (es decir, el incremento de la discontinuidad del cordón dunar), la cual es un factor a considerar para la estimación de la vulnerabilidad costera y la sensibilidad de las dunas (Gracia Prieto *et al.*, 2009; García-Mora *et al.*, 2001; Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015; Rizzo *et al.*, 2018) ya que un sistema dunar fragmentado es más sensible a la inundación temporal que se da durante las tormentas (Gracia Prieto *et al.*, 2009; Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015; Rizzo *et al.*, 2018). En este estudio, los sectores más fragmentados (y por tanto más susceptibles) se han observado en un área natural en el lado oeste del delta del río Andarax en la provincia de Almería (se trata del sistema más fragmentado, Fig. 1 y 5), y el sistema dunar de la playa de Las Chapas en la provincia de Málaga, situado en un área urbana fuertemente desarrollada (Fig. 1 y 5). En la mayoría de los sectores la fragmentación de las dunas se debe principalmente a la apertura de caminos y a su progresiva expansión debido a procesos de erosión marinos y eólicos, también observados en otras áreas por Gracia Prieto *et al.* (2009), Pintó *et al.* (2014), Rangel-Buitrago y Anfuso (2015) y Rizzo *et al.* (2018). Debido al detalle de las ortofotografías utilizadas en este estudio, las discontinuidades causadas por procesos de *overwash* se han podido detectar en muy pocos lugares.

En resumen, la mayoría de los sistemas dunares que han mostrado una disminución en su superficie han sido afectados por factores antrópicos, subrayando la importancia de las ocupaciones urbanas y agrícolas que han sido muy relevantes en las provincias de Málaga y Almería.

4.2.2. Sistemas en acreción

En cuanto a los 4 sistemas dunares que han registrado acreción, el incremento de los sistemas situados en la Bahía de Algeciras (Fig. 1 y 5) está asociado a los procesos de sedimentación registrados en sus respectivas playas (Molina *et al.*, 2019a; REDIAM, 2016) que reciben un suministro de sedimento de los ríos Palmones y Guadalarranque (Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011). Además, estas playas se localizan cerca de dos grandes estructuras de protección costeras que promueven los procesos de sedimentación (Fig. 5 y 6). Sin embargo, los sistemas en Guadalquivir y Albufera de Adra (Fig. 1 y 5) se encuentran en áreas que han registrado una erosión importante (Molina *et al.*, 2019a; REDIAM, 2016) y una ocupación antrópica significativa. El sistema dunar de Guadalquivir registró su mayor incremento durante el periodo 1977-2001, y fue debido a la degradación de la vegetación que facilitó la migración hacia tierra de las dunas (Molina *et al.*, 2020b). La formación de grandes dunas móviles en esta área se debe también a los fuertes vientos del este (Fig. 1 y 2), en especial en playas orientadas a esa dirección. En el caso del sistema dunar de la Albufera de Adra, se produjo una importante pérdida de superficie de dunas en el periodo 1977-2001 debido a la erosión de la línea de costa y a la importante presión antrópica

(intensas actividades agrícolas) (Molina *et al.*, 2019a; Prieto *et al.*, 2012; REDIAM, 2016); sin embargo, la sedimentación que se produjo en el extremo norte del sistema (Molina *et al.*, 2019a; REDIAM, 2016) apoyó el desarrollo de dunas móviles (Molina *et al.*, 2020b).



Figura 6. Playa del Rinconcillo (de Molina *et al.*, 2020b). En esta playa se registró un aumento de la superficie del sistema dunar de 732,26 m² en el periodo 2001-2006. (A) 1977, (B) 2001 y (C) 2016.

4.2.3. Evolución de los tipos de dunas

Muchos de los sistemas dunares estudiados en este trabajo han sido descritos por diferentes autores (Gómez-Zotano, 2014; Díez-Garretas *et al.*, 2019; Viciano Martínez-Lage, 2007; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011; Fernández-Salas *et al.*, 2009; Malvárez *et al.*, 2019), pero ninguno de ellos ha proporcionado una descripción de todo su conjunto a lo largo de la costa mediterránea de Andalucía.

A la hora de analizar la evolución de cada uno de los tipos de dunas, cabe destacar que cada tipología representa un claro estado de evolución, desde las dunas embrionarias y móviles (Tipo I) hasta las dunas estabilizadas (Tipo III) (Hesp, 2002). El incremento durante el periodo 1977-2016 de las dunas estabilizadas (Tipo III) se debió a la progresiva evolución de las dunas fijadas por céspedes (Tipo II) (Molina *et al.*, 2020b), un proceso natural descrito por Hesp (2002).

Las variaciones de superficie de los diferentes tipos de sistemas dunares fueron relativamente homogéneas. A excepción de la provincia de Cádiz, el resto de provincias mostraron una disminución de los tres tipos de dunas en el primer periodo y, en el segundo periodo, una disminución de los tipos I y III junto al incremento de las dunas de tipo II en todas las provincias excepto Almería. La disminución general registrada en el periodo 1977-2001 se debió principalmente a la ocupación urbana, la explotación agrícola intensiva y la extracción de arenas – actividades que no fueron reguladas hasta la aprobación de la Ley de Costas en 1988 (Gómez-Zotano, 2014; Malvárez *et al.*, 2000; Díez-Garretas *et al.*, 2019; Castaño Camero *et al.*, 2017; Viciano Martínez-Lage, 2007; Sanjaume Saumel y Gracia Prieto,

2011). La destrucción de las dunas se evidencia especialmente en las provincias de Málaga y Almería, donde han desaparecido sistemas de dunas completos: en la provincia de Málaga se perdió una superficie total de 1.766.711 m², de la que cerca de 1 x 10⁶ m² correspondían a dunas de tipo II y cerca de 600.000 m² fueron dunas de tipo III y, en la provincia de Almería, se perdió una superficie de unos 56.300.000 m², de la cual unos 4.360.000 m² correspondieron a dunas de tipo II. Algunos ejemplos de trabajos que han cuantificado la pérdida de superficie de dunas en áreas específicas son el de Viciano Martínez-Lage (2007) que cuantificó una pérdida de 262 ha de dunas en el Paraje Natural de Punta Entinas – El Sabinar, en la provincia de Almería, debido a las extracciones de arenas, o el trabajo de Gómez Zotano (2014) que cuantificó una reducción del 44,5% de la superficie de dunas durante el periodo 1956-2007 en el área de El Saladillo, en la provincia de Málaga.

El incremento, en el periodo 2001-2016, de la superficie de las dunas de tipo II en la provincia de Málaga estuvo ligado a la degradación de las dunas de tipo III, evidenciado especialmente en el área oeste de la ciudad de Marbella que fue fuertemente afectada por el desarrollo urbano, una tendencia muy común en la provincia de Málaga (Gómez-Zotano, 2014; Malvárez *et al.*, 2000; 2003; Molina *et al.*, 2020b). El incremento de las dunas de tipo III en la provincia de Almería se debió a la estabilización de las dunas de tipo II, en especial en un área cuya línea de costa es estable. En general, en la provincia de Cádiz, se observó un pequeño incremento de dunas de tipo III, y el resto de tipos registraron pequeñas variaciones. Este comportamiento se debió a una presión antrópica baja, las condiciones estables e incluso en acreción del área (Molina *et al.*, 2019a; REDIAM, 2016) y a la acción de los fuertes vientos del este que favorecen el crecimiento y la movilidad de las dunas (Sanjaume Saumel y Gracia Prieto, 2011).

5. Conclusiones

En cuanto a la evolución de la línea de costa, el área de estudio se dividió en 47 unidades; 9 unidades registraron prevalencia de clases de acreción, 19 registraron prevalencia de estabilidad y otras tantas prevalencias de procesos erosivos. Un balance positivo se observó en 17 unidades mientras que 28 presentaron un balance negativo.

Respecto a la influencia de las estructuras costeras, se ha observado acreción en áreas esencialmente localizadas aguas arriba de puertos y espigones y en correspondencia de rompeolas. Las áreas costeras frente a muros y revestimientos han mostrado siempre erosión, la cual fue también relevante aguas abajo de puertos y espigones, así como en las desembocaduras de grandes ríos y deltas (p. ej., los deltas de los ríos Vélez y Adra en las provincias de Málaga y Almería, y el río Verde en Málaga). Estabilidad se observó en muchas playas en bolsillo y en áreas estabilizadas por estructuras de protección costeras.

En relación a la evolución de los sistemas dunares, de los 53 sistemas estudiados, todos menos 4 registraron una reducción de su superficie, o incluso desaparecieron, especialmente durante el periodo 1977-2001 cuando fueron afectados por severas intervenciones humanas, como el emplazamiento de edificios y construcciones turísticas, en especial en la provincia de Málaga y la expansión agraria en la provincia de Almería y, secundariamente por procesos de erosión costera. La pérdida de los sistemas dunares se asoció a la fragmentación del pie de duna, principalmente como consecuencia de la apertura de caminos y su progresiva expansión debida a procesos erosivos eólicos y/o marinos. Un incremento de la superficie de las dunas se observó tanto en áreas naturales como antrópicas en las provincias de Cádiz y Almería, en playas en acreción y/o estables, normalmente en áreas aguas arriba de puertos, o debido a la acción de fuertes vientos del este en playas orientadas hacia esa dirección.

En cuanto a los tipos de dunas estudiados, esto es, dunas embrionarias y móviles (Tipo I), fijadas por céspedes (Tipo II) y estabilizadas (Tipo III), durante el periodo 1977- 2001 se registró, en la mayoría de las provincias, una disminución de la superficie de los tres tipos de dunas. En el periodo 2001-2016, en todas las provincias excepto Almería, se registró una disminución de las dunas de tipo I y III y un

aumento de las de tipo II. Este incremento de dunas de tipo II estuvo vinculado a la degradación de las dunas de tipo III en áreas muy antropizadas. En Almería se produjo un incremento de dunas de tipo III, en el periodo 2001-2016, en áreas estables y en acreción.

En definitiva, la costa mediterránea de Andalucía muestra una tendencia general erosiva en cuanto a la evolución de la línea de costa y de los sistemas dunares, siendo la ocupación y presión antrópica factores fundamentales a tener en cuenta en su evolución. Dichos factores, junto con la implementación de estructuras de protección costera, han aumentado considerablemente en las últimas décadas la sensibilidad del litoral frente a la erosión.

Los resultados obtenidos en este trabajo sobre la evolución de la línea de costa y los sistemas dunares pueden utilizarse para mejorar las bases de datos sobre las características de la costa mediterránea andaluza, sobretodo de las dunas, cuyo estudio se ha enfocado en pasado a nivel local sin tener una visión global. Finalmente, los datos obtenidos abren una puerta a la utilización de soluciones para la protección del litoral basadas en la mejora de los ecosistemas costeros que complementen o sustituyan al tradicional enfoque basado en la construcción de obras de defensa rígidas.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al grupo de investigación andaluz PAI RNM-328 y a la red PROPLAYAS, y ha sido parcialmente desarrollado en el Centro Andaluz de Ciencia y Tecnología Marinas (CACYTMAR), Puerto Real (Cádiz, España).

Referencias

- Anfuso, G., Dominguez, L., Gracia, F., 2007. Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain. *Catena* 70, 229-242. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.09.002>
- Anfuso, G., Martínez-del Pozo, J., Rangel-Buitrago, N., 2012. Bad practice in erosion management: The southern Sicily case study. In: J.A.G. Cooper, O.H. Pilkey (Eds), *Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 215-233.
- Anfuso, G., Martínez-del Pozo, J.Á., Rangel-Buitrago, N., 2013. Morphological cells in the Ragusa littoral (Sicily, Italy). *Journal of Coastal Conservation* 17, 369-377. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0233-8>
- Anfuso, G., Loureiro, C., Taaouati, M., Smyth, T. A. G., Jackson, D. W. T., 2020. Spatial variability of beach impact from post-tropical cyclone Katia (2011) on Northern Ireland's North coast. *Water* 12, 1380. <https://doi.org/10.3390/w12051380>
- Berguillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2016. Impact on river regulation on a Mediterranean delta: Assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research* 52, 5132-5148. <https://doi.org/10.1002/2015WR018395>
- Berguillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Ortega-Sánchez, M., 2017. Advances in management tools for modelling artificial nourishments in mixed beaches. *Journal of Marine System* 172, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.02.009>
- Boak, E. H., Turner, I. L., 2005. Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research* 21, 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Bray, M.J., Carter, D.J., Hooke, J.M. 1995. Littoral cell definition and budgets for central southern England. *Journal of Coastal Research* 11, 381-400. <https://www.jstor.org/stable/4298347>
- Castaño Camero, N., Arteaga Cardineau, C., Gómez Zotano, J., 2017. Erosión en la playa del "Saladillo-Matas Verdes" (Estepona, Málaga): Situación actual y causas potenciales. *Geo-Temas* 17, 59-62.
- Chica Ruiz, J.A., Barragan, J.M., 2011. *Estado y Tendencia de los Servicios de los Ecosistemas Litorales Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, Spain, p. 112.

- Cid, A., Menéndez, M., Castanedo, S., Abascal, A. J., Méndez, F. J., Medina, R., 2016. Long-term changes in the frequency, intensity and duration of extreme storm surge events in southern Europe. *Climate Dynamics* 46, 1503-1516. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2659-1>
- Cooper, J.A.G., Jackson, D.W.T., Navas, F., McKenna, J., Malvárez, G., 2004. Identifying storm impacts on an embayed, high-energy coastline: Examples from western Ireland. *Marine Geology* 210, 261-280. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.05.012>
- Dehouck, A., Dupuis, H., Sénéchal, N., 2009. Pocket beach hydrodynamics: The example of four macrotidal beaches, Brittany, France. *Marine Geology* 266, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.07.008>
- Del Río, J.L., Malvárez, G., 2016. Impacto de la regulación del río Verde en la erosión del sistema sedimentario litoral de la ensenada de Marbella, Costa del Sol. In: *XV Coloquio Ibérico de Geografía*, Universidad de Murcia, Murcia, Spain, pp. 1-10.
- Díez-Garretas, B., Comino, O., Pereña, J., Asensi, A., 2019. Spatio-temporal changes (1956-2013) of coastal ecosystems in Southern Iberian Peninsula (Spain). *Mediterranean Botany* 40, 111-119. <https://doi.org/10.5209/MBOT.62889>
- Dugan, J., Airoidi, L., Chapman, M., Walker, S., Schlacher, T., Wolanski, E., McLusky, D., 2011. Estuarine and coastal structures: Environmental effects, a focus on shore and nearshore structures. In: E. Wolanski, D.S. McLusky (Eds). *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham, MA, USA, pp. 17-41.
- European Environmental Agency. 2006. *The changing faces of Europe's coastal areas*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Fernández-Salas, L.M., Dabrio, C.J., Díaz del Río, V., Lobo, F.J., Sanz, J.L., Lario, J., 2009. Land-sea correlation between late Holocene coastal and infralittoral deposits in the SE Iberian Peninsula (Western Mediterranean). *Geomorphology* 104, 4-11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.013>
- Finkl, C.W., Kruempel, C., 2005. Threats, obstacles and barriers to coastal environmental conservation: societal perceptions and managerial positionalities that defeat sustainable development. In: *Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean*, Algarve, Portugal, pp. 3-28.
- Fletcher, C.H., Romine, B.M., Genz, A.S., Barbee, M.M., Dyer, M., Anderson, T.R., Lim, S.C., Vitousek, S., Bochicchio, C., Richmond, B.M., 2012. *National Assessment of Shoreline Change: Historical Shoreline Change in the Hawaiian Islands*. USGS Publications Warehouse: Reston, VA, USA.
- García-Mora, M.R., Gallego-Fernández, J.B., Williams, A.T., García-Novo, F. 2001., A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of Coastal Research* 17, 802-811.
- Gómez-Zotano, J., 2014. La degradación de dunas litorales en Andalucía: Aproximación geohistórica y multiescalar. *Investigaciones Geográficas* 62, 23-39.
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Olmedo-Cobo, J.A., Martínez-Ibarra, E., 2015. La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*. 61, 161-180.
- Gracia Prieto, F.J., Sanjaume, E., Hernández, L., Hernández, A.I., Flor, G., Gómez-Serrano, M.Á., 2009. Dunas marítimas y continentales. In: *Bases Ecológicas Preliminares Para la Conservación de los Tipos de Hábitat de Interés Comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid, Spain, pp. 106.
- Griggs, G.B., 2005. The impacts of coastal armoring. *Shore Beach* 73, 13-22.
- Guisado, E., Malvárez, G.C., 2009. Multiple scale morphodynamic mapping: methodological considerations and applications for the coastal atlas of Andalusia. *Journal of Coastal Research* 56, 1513-1517. <https://www.jstor.org/stable/25738042>
- Guisado, E., Malvárez, G.C., Navas, F., 2013. Morphodynamic environments of the Costa del Sol, Spain. *Journal Coastal Research* 65, 500-506. <https://doi.org/10.2112/SI65-085.1>

- Guisado-Pintado, E., Malvárez, G., 2015. El rol de las tormentas en la evolución morfodinámica del Delta del río Vélez: Costa del Sol, Málaga. *Geo-Temas* 15, 189-192.
- Hesp, P., 2002. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48, 245-268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8)
- Jenks, G.F., Caspall, F.C., 1971. Error on choroplethic maps: Definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 61, 217-244; <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
- Jiménez, J.A., Sánchez-Arcilla, A., 1993. Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology* 114, 105-118. [http://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90042-T](http://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90042-T)
- Jones, A., Phillips, M., 2011. *Disappearing Destinations: Climate Change and Future Challenges for Coastal Tourism*. CAB International, Nosworthy Way, Wallingford, Oxfordshire OX UK.
- Komar, P.D. 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, New Jersey, NJ, USA.
- Malvárez, G.C. 2012. The history of shoreline stabilization on the Spanish Costa del Sol. In: *Pitfalls of Shoreline Stabilization*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 235-249.
- Malvárez, G., Pollard, J., Rodríguez, R.D., 2000. Origins, management, and measurement of stress on the coast of southern Spain. *Coastal Management* 28, 215-234. <https://doi.org/10.1080/089207500408638>
- Malvárez, G., Pollard, J., Domínguez, R., 2003. The planning and practice of coastal zone management in Southern Spain. *Journal of Sustainable Tourism* 11, 204-223. <https://doi.org/10.1080/09669580308667203>
- Malvárez, G., Navas, F., Guisado-Pintado, E., Jackson, D.W.T., 2019. Morphodynamic interactions of continental shelf, beach and dunes: The Cabopino dune system in southern Mediterranean Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 1647-1658. <https://doi.org/10.1002/esp.4600>
- Manno, G., Anfuso, G., Messina, E., Williams, A.T., Suffo, M., Liguori, V., 2016. Decadal evolution of coastline armouring along the Mediterranean Andalusia littoral (South of Spain). *Ocean & Coastal Management* 124, 549 84-99; <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.007>
- Manno, G., Lo Re, C., Ciralo, G., 2017. Uncertainties in shoreline position analysis: The role of run-up and tide in a gentle slope beach. *Ocean Sciences* 13, 661. <https://doi.org/10.5194/os-13-661-2017>
- Martínez, J.M.R., Padilla, Y.R., Jurado, E.N., 2015. Atributos urbanos contemporáneos del litoral mediterráneo en la crisis global: Caso de la zona metropolitana de la Costa del Sol. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales* 19. <https://doi.org/10.1344/sn2015.19.15119>
- Martínez, M.L., Psuty, N.P., 2008. *Coastal Dunes. Ecology and Conservation, Ecological Studies 171*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Masselink, G., Russell, P., Rennie, A., Brooks, S., Spencer, T., 2020. Impacts of climate change on coastal geomorphology and coastal erosion relevant to the coastal and marine environment around the UK. *MCCIP Science Review* 2020, 158-189. <https://doi.org/10.14465/2020.arc08.cgm>
- Miles, J.R., Russell, P.E., Huntley, D.A., 2001. Field measurements of sediment dynamics in front of a seawall. *Journal of Coastal Research* 17, 195-206. <https://www.jstor.org/stable/4300163>
- Molina, R., Anfuso, G., Manno, G., Gracia Prieto, F.J., 2019a. The Mediterranean Coast of Andalusia (Spain): Medium-Term Evolution and Impacts of Coastal Structures. *Sustainability* 11, 3539. <https://doi.org/10.339/su11133539>
- Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G., Ciralo, G., 2019b. Storm Energy Flux Characterization along the Mediterranean Coast of Andalusia. *Water* 11, 509. <https://doi.org/10.3390/w11030509>
- Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G., Ciralo, G. 2020°, A Methodological Approach to Determine Sound Response Modalities to Coastal Erosion Processes in Mediterranean Andalusia (Spain). *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 154. <https://doi.org/10.3390/jmse8030154>
- Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G., 2020b. Dune's systems characterization and evolution in the Andalusia Mediterranean Coast (Spain). *Water* 12, 2094. <http://doi.org/10.3390/w12082094>
- Moore, L. J. 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research* 16, 111-124. <https://www.jstor.org/stable/4300016>

- Mooser, A., Anfuso, G., Mestanza, C., Williams, A.T. 2018., Management implications for the most attractive scenic sites along the Andalusia coast (SW Spain). *Sustainability* 10, 1328. <https://doi.org/10.3390/su10051328>
- Nordstrom, K.F., 2000. *Beaches and Dunes of Developed Coasts*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Nordstrom, K.F. 2014. Living with shore protection structures: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 150, 11-23. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.003>
- Orford, J.D., Forbes, D.L., Jennings, S.C., 2002. Organisational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems. *Geomorphology* 48, 51-85. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00175-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00175-7)
- Pajak, M. J., Leatherman, S., 2002. The high-water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research* 18, 329-337. <https://www.jstor.org/stable/4299078>
- Pintó, J., Martí, C., Fraguell, R.M., 2014. Assessing current conditions of coastal dune systems of Mediterranean developed shores. *Journal of Coastal Research* 30, 832-842. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00116.1>
- Pita López, M.F. 2003. El clima de Andalucía. In: *Geografía de Andalucía*. Ariel Geografía, Barcelona, Spain, pp. 137-173.
- Ponte Lira, C., Nobre Silva, A., Taborda, R., Freire de Andrade, C., 2016. Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: An integrated approach. *Earth System Science Data* 8, 265-278. <https://doi.org/10.5194/essd-8-265-2016>
- Pranzini, E., 2007. Airborne LIDAR survey applied to the analysis of the historical evolution of the Arno River delta (Italy). *Journal of Coastal Research* 50, 400-409. <https://www.jstor.org/stable/26481622>
- Pranzini, E., Anfuso, G., Cinelli, I., Piccardi, M., Vitale, G., 2018. Shore Protection Structures Increase and Evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of Tourism Industry. *Water* 10, 1647. <https://doi.org/10.3390/w10111647>
- Pranzini, E., Cinelli, I., Cipriani, L.E., Anfuso, G., 2020. An integrated coastal sediment management plan: The example of the Tuscany Region (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 33. <https://doi.org/10.3390/jmse8010033>
- Prieto, A., Ojeda, J., Rodríguez, S., Gracia, J., Del Río, L., 2012. Procesos erosivos (tasas de erosión) en los deltas mediterráneos andaluces: Herramientas de análisis espacial (DSAS) y evolución temporal (servicios OGC). In: J. Martínez Vega, P. Martín Isabel (Eds). *Tecnologías de la Información Geográfica en el Contexto del Cambio Global. Proceedings of the XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. CSIC-Instituto de Economía, Geografía y Demografía, Madrid, Spain, pp. 185-193.
- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Correa, I., 2012. Obras de defensa costeras en el Caribe colombiano ¿Solución o problema? In: V. Verón, J. García Sanabria, J. García Onetti, J. A. Chica Ruiz (Eds). *Proceedings of I Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada de Áreas Litorales*. Grupo de Investigación Gestión Integrada de Áreas Litorales, Universidad de Cádiz, Spain, pp. 945-950.
- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., 2013. Winter wave climate, storms and regional cycles: The SW Spanish Atlantic coast. *International Journal of Climatology* 33, 2142-2156. <https://doi.org/10.1002/joc.3579>
- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., 2015. *Risk Assessment of Storms in Coastal Zones: Case Studies from Cartagena (Colombia) and Cadiz (Spain)*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 63. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15844-0>
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A.T., Anfuso, G., 2018. Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean and Coastal Management* 156, 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.006>
- REDIAM, 2016. Tasas de erosión en el litoral andaluz. Available at: <http://www.ideandalucia.es/catalogo/inspire/srv/api/records/28ab62de3404580167f5e310cf066b1056d0c873>

- Rizzo, A., Aucelli, P.P.C., Gracia, F.J., Anfuso, G., 2018. A novelty coastal susceptibility assessment method: Application to Valdelagrana area (SW Spain). *Journal of Coastal Conservation* 22, 973-987. <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0552-2>
- Salman, A., Lombardo, S., Doody, P., 2004. *Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability*. Technical Report. EUCC:Warnemünde, Germany.
- Sánchez-García, M.J., Rodríguez-Santalla, I., Montoya-Montes, I., 2007. Short term coastal dune evolution of Fangar Spit (Ebro Delta, Spain). In: *Proceedings of the International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*, Santander, Spain.
- Sanjaume Saumel, E., Gracia Prieto, F. J., 2011. *Las Dunas en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza, Spain.
- Senciales González, J.M., Malvárez, G., 2003. La desembocadura del río Vélez (provincia de Málaga, España). Evolución reciente de un delta de comportamiento mediterráneo. *Revista Cuaternario & Geomorfología* 17(1-2), 47-61
- Shand, R.D., Bailey, D.G., Shepherd, M.J., 2001. Longshore realignment of shore-parallel sand-bars at Wanganui, New Zealand. *Marine Geology* 179, 147-161. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00223-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00223-7)
- Silva, R., Martínez, M.L., Hesp, P.A., Catalan, P., Osorio, A.F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A., Govaere, G., 2014. Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research* 71, 1-16. <https://doi.org/10.2112/SI71-001.1>
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A., 2009a. *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0—An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change*. Technical Report. US Geological Survey, Reston, VA, USA.
- Thieler, E., Himmelstoss, E., Zichichi, J., Ergul, A., 2009b. *DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide* 4th ed., U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA.
- UNWTO, 2015. *Tourism Highlights*. Technical Report. United Nations World Tourism Organization, Madrid, Spain.
- Valdemoro, H.I., Jiménez, J.A., 2006. The influence of shoreline dynamics on the use and exploitation of Mediterranean tourist beaches. *Coastal Management* 34(4), 405-423. <https://doi.org/10.1080/08920750600860324>
- Viciana Martínez-Lage, A., 2007. La costa de Almería: Desarrollo socio-económico y degradación físico-ambiental (1957-2007). *Paralelo* 37 19, 149-183.
- Williams, A.T., Micallef, A., Anfuso, G., Gallego-Fernandez, J.B., 2012. Andalusia, Spain: An Assessment of Coastal Scenery. *Landscape Research* 37, 327-349. <https://doi.org/10.1080/01426397.2011.590586>
- Wolf, J., Woolf, D., Bricheno, L., 2020. Impacts of climate change on storms and waves relevant to the coastal and marine environment around the UK. *MCCIP Science Review* 132-157. <https://doi.org/10.14465/2020.arc07.saw>