

Comparativa ambiental i climàtica de sistemes dunars costaners de la zona temperada

Miquel MIR-GUAL i Guillem X. PONS

SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS

Mir-Gual, M. i Pons, G.X. 2023. Comparativa ambiental i climàtica de sistemes dunars costaners de la zona temperada. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 66: 197-212. ISSN 0212-260X. e-ISSN 2444-8192. Palma.

Els sistemes platja-duna costaners es caracteritzen per ser ecosistemes altament dinàmics amb una interacció continua entre elements biòtics i abiòtics, mostrant alhora un dinamisme geomorfològic que sovint queda relacionat amb els canvis dels règims climàtics. La seva evolució espacio-temporal depèn, bàsicament, de tres factors; la quantitat de sediment disponible com a font d'alimentació, l'espai d'acomodació i la correlació i intensitat de les forces físiques de mobilització (e.g. onatge i vent). No obstant, de cada vegada en són més els estudis que demostren com altres elements naturals, tals com els canvis climàtics (e.g. temperatura i precipitació) i la presència de vegetació, a més d'altres paràmetres antròpics (artificialització i/o destrucció parcial) condicionen la fisonomia i evolució d'aquests ambients. Aquest treball té per objecte l'estudi de 15 sistemes dunars situats a la zona temperada septentrional, a escala planetària, amb l'objectiu d'establir-ne els possibles patrons de correlació i, alhora, determinar si els elements climàtics en poder ser un factor denominador comú alhora de caracteritzar-los. Es du a terme una anàlisi estadística multivariable, prenent variables geoambientals i climàtiques i que parteix de la caracterització de cada una de les zones estudiades a partir d'estudis fotomètrics. Els resultats indiquen un alt grau de vegetació associat als sistemes dunars estudiats, convertint-los en ecosistemes estàtics des d'un punt de vista geomorfològic.

Paraules clau: *sistemes dunars, canvi climàtic, pressió antròpica, vegetació, desforestació.*

ENVIRONMENTAL AND CLIMATIC COMPARISON OF COASTAL DUNES SYSTEMS IN THE TEMPERATE ZONE. Coastal beach-dune systems are characterized by being highly dynamic ecosystems with a continuous interaction between biotic and abiotic elements, showing at the same time a geomorphological dynamism that is often related to changes in climate regimes. Its spatio-temporal evolution basically depends on three factors; the amount of sediment available as a food source, the accommodation space and the correlation and intensity of the physical forces of mobilization (e.g. waves and wind). However, more and more studies are showing how other natural elements, such as climate changes (e.g. temperature and precipitation) and the presence of vegetation, in addition to other anthropogenic parameters (artificialization and/or partial destruction) condition the physiognomy and evolution of these environments. This work aims to study 15 dune systems located in the temperate zone on a global scale with the aim of establishing the possible correlation patterns and, at the same time, determining if the climatic elements can be a common denominator factor while characterizing them. A multivariable statistical analysis is carried out, taking geo-environmental and climatic variables and starting from the characterization of each of the areas studied from photometric studies. The results indicate a significant degree of vegetation on the studied coastal dune systems, turning them into static ecosystems from the geomorphological perspective.

Keywords: *dune systems, climate change, human pressure, vegetation, deforestation.*

Miquel MIR-GUAL, Guillem X. PONS, Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km.7,5. Palma de Mallorca, 07122 (adreça contacte guillemx.pons@uib.es).

Recepció del manuscrit: 11-11-2023; revisió acceptada: 18-12-2023; publicació online: 18-12-2023.

Introducció

Els sistemes platja-duna costaners es caracteritzen per ser ecosistemes altament dinàmics amb una interacció continua entre elements biòtics i abiòtics, mostrant alhora un dinamisme geomorfològic que sovint queda relacionat amb els canvis dels règims climàtics. Les dunes costaneres se formen en presència d'un espai d'acomodació, durant períodes de forts vents, disponibilitat de sediment i vegetació per a fixar-lo (Provoost *et al.*, 2011). Una vegada establerts, els sistemes dunars presenten una alt dinamisme geomorfològic estretament relacionat amb la intensitat de les forces que hi interactuen. No obstant, des que és palesa la limitació en la disponibilitat sedimentària a escala planetària, el comportament morfològic dels sistemes sembla que està íntimament relacionat amb les variacions climàtiques que condicionen els règims de temperatura, precipitació i vent a escala local (Jackson i Cooper, 2011) i continental (Provoost *et al.*, 2011).

Si bé és cert que els factors antròpics han estat un dels elements que més han condicionat l'evolució i caracterització dels sistemes dunars costaners, en alguns casos a través de pràctiques que es remunten segles enrere (Roig-Munar, *et al.*, 2009; Mir-Gual *et al.*, 2010), de cada vegada són més els estudis que situen la presència o absència de vegetació com a factor nuclear alhora de condicionar l'evolució i caracterització d'aquests ambients (Martínez *et al.*, 2022), sobretot quan entra en simbiosis amb altres agents com el vent, el qual actua de

mecanisme de transport mobilitzant el sediment des de la platja emergida cap a l'interior del sistema dunar. De fet, és la vegetació la que juga un paper clau en la construcció de les estructures dunars, retenint el sediment i facilitant la seva formació, sobretot al llarg de la primera línia (Mir-Gual, 2014).

De fet, tal i com demostren estudis com els de Jackson i Cooper (2011), Provoost *et al.* (2011), Delgado-Fernández i Mir-Gual (2015), entre altres, la presència o absència de vegetació és el factor que deriva amb els períodes d'estabilitat o inestabilitat geomorfològica d'aquests ambients. Tanmateix, els factors embrionaris d'aquests escenaris queden dominats per les condicions climàtiques que suposen la variabilitat en els règims de precipitació, temperatura i vent a escala local i regional. Increments en la precipitació o temperatura mitjana i una disminució de la velocitat del vent tendeixen a afavorir el creixement de la vegetació, el qual estabilitza les dunes (Miot da Silva i Hesp, 2013). D'altra banda, un increment en el règim de vents, o les sequeres, propicien la mobilitat sedimentària del sistema (Pye *et al.*, 2014).

Sigui com vulgui, i tal i com manifesta Aagaard *et al.* (2007), la pobresa de les sèries de dades històriques al respecte dificulta l'estudi i anàlisi del comportament dunar i dels paràmetres ambientals que el condicionen. De fet, aquesta mancança fa que avui dia bona part de la bibliografia existent sobre aquesta temàtica es basi en aproximacions i estimacions, sent encara complex poder determinar empíricament

quina és la relació exacta entre les variacions climàtiques i el comportament dels sistemes dunars costaners. No obstant, de cada vegada apareixen més estudis que acoten una relació estreta entre el comportament dels camps de dunes litorals i el canvi climàtic a partir del comportament de la vegetació associada (Van der Maarel *et al.*, 1993; Hugenholtz *et al.*, 2005; Tsoar *et al.*, 2009; Provoost *et al.*, 2011; Miot da Silva *et al.*, 2013; Ajedegba *et al.*, 2019; Martínez *et al.*, 2004, 2022).

De fet, aquest escenari està generant una disparitat d'opinions al respecte de com gestionar aquests sistemes enfront a processos de revegetació i fixació. Tant és així que, tal i com recullen Delgado i Mir (2015), la preocupació per la pèrdua d'arena mòbil està resultant en un canvi de paradigma en la restauració de dunes costaneres. Els programes més recents de restauració dinàmica, de fet, consisteixen en desestabilitzar dunes altament vegetades per a convertir-les, de nou, en sistemes dinàmics (Darke *et al.*, 2013; Pye *et al.*, 2014). No obstant la presència no lineal entre la interferència d'impactes humans i factors naturals dificulta en molts casos la identificació de factors determinants en la re-vegetació de les dunes, el que, sens dubte, té conseqüències per a futur plans de gestió interessats en pal·liar els efectes del canvi climàtic.

Tanmateix el clima exerceix una influència directa sobre les espècies vegetals. De fet, i en resposta al canvi climàtic, s'han identificat diferències fenològiques substancials determinades per les condicions climàtiques existents en funció de l'àrea geogràfica (Berry *et al.*, 2002; Root *et al.*, 2003). No obstant, a dia d'avui poc es coneix de la influència que aquests canvis poden exercir en el funcionament d'ecosistemes tals com els

sistemes dunars en zona temperada (Provoost *et al.*, 2011).

Si bé aquesta franja climàtica compta d'unes condicions òptimes pel creixement i proliferació de la vegetació, amb temperatures suaus, sobretot a l'estiu, i amb precipitacions que oscil·len entre els 500 mm i 1000 mm anuals, cap tenir en compte la variabilitat que a escala planetària pot existir (e.g. zona mediterrània, oceànica o continental). Endemés, i d'acord a l'escenari RPC8.5 de l'IPCC, les zones temperades albren a convertir-se en àrees climàticament més seques (Rubel *et al.*, 2017; Beck *et al.*, 2018) podent derivar en una alteració en quant a l'assentament i comportament de la vegetació als sistemes de dunes costaneres (Provoost *et al.*, 2011).

Sigui com sigui, i més encara en ecosistemes tan dinàmics i fràgils com les dunes costaneres, els canvis morfològics i de les comunitats vegetals que hi habiten són en bona part la raó de les mesures de gestió i protecció que es van prenent, normalment enfocades en la restauració dels valors inicials. Des de l'etapa post-glacial els canvis associats a aquests ambients han estat bàsicament d'origen natural. No obstant, a curt termini, aquests es lliguen majoritàriament a causes humanes (Provoost *et al.*, 2011).

Entendre els processos que condueixen aquests canvis és important en el sentit de poder seleccionar les mesures de gestió correctes i apropiades. Aquest treball pretén dur a terme una anàlisi descriptiva, basada en un prisma empíric i multivariable, que permeti determinar els atributs que defineixen els sistemes dunars en zones temperades, principalment en tant a la seva cobertura vegetal, i establir possibles relacions amb les condicions climàtiques (e.g. precipitació i temperatura) sobre les quals es desenvolupen.

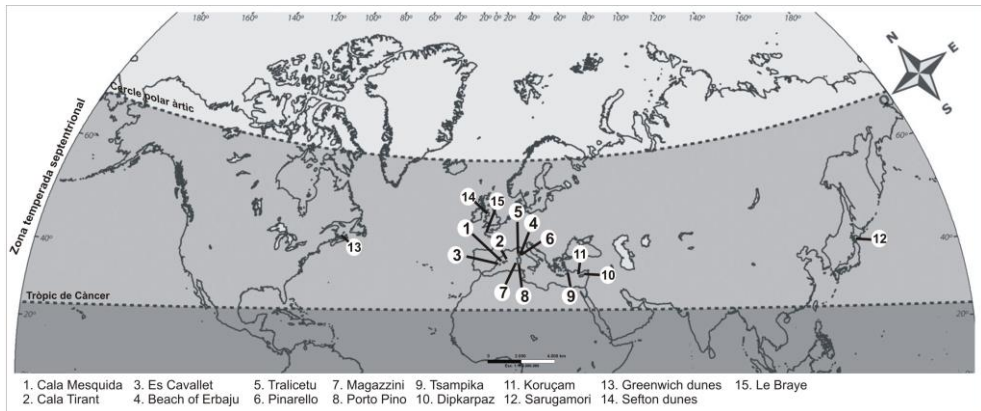


Fig. 1. Localització dels sistemes dunars costaners analitzats.

Fig. 1. Location of analyzed coastal dunes Systems.

Àmbit d'estudi, mètode i objecte

Les zones temperades són les dues regions climàtiques compreses entre els tròpics i els cercles polars. Queden afectades pel que es coneix com a clima temperat, que és l'intermedi entre el clima subtropical (càlid) i el clima polar (fred). Aquest article centre la seva anàlisi a la zona temperada septentrional, compresa entre el cercle polar àrtic i el tròpic de Càncer (Fig. 1). Seguint la classificació climàtica de Köppen, el clima temperat compta amb tres variants importants: la mediterrània (estius llargs, calorosos i secs i hiverns suaus), l'oceànica (amb estius frescos i hiverns suaus) i la continental (estius càlids i plujosos i hiverns freds i secs).

El present estudi s'ocupa en estudiar, a partir d'una anàlisi ambiental i climàtica multivariable, un total de 15 sistemes dunars costaners localitzats dins la franja temperada septentrional (Fig. 1). Bona part de les àrees seleccionades es localitzen dins l'àmbit Mediterrani, no obstant també s'analitzen sistemes ribereus amb l'oceà Atlàntic i Pacífic. Els criteris de selecció han primat

que fossin sistemes no urbanitzats o poc alterats i que, a més, disposin d'un perfil platja-duna òptimament desenvolupat des de la vessant geomorfològica i de la vegetació. Alhora s'han descartat sistemes arenosos de poc desenvolupament longitudinal, tals com restingues arenoses.

A l'igual que altres estudis tals com Jackson i Cooper (2011) o Delgado i Mir (2015), i partint de la superfície total estudiada en cada cas, la quantificació de duna mòbil i de zona vegetada (vegetació arbustiva i arbòria) s'ha dut a terme a partir de la digitalització de fotografia aèria a partir de Sistemes d'Informació Geogràfica. Tot i que aquesta tècnica ignora variacions a micro-escala, permet una aproximació fidel a la dualitat que cada sistema dunar analitzat mostra envers a les dues superfícies. En el cas de Sefton dunes (Regne Unit), les dades de superfície són les calculades per Delgado i Mir (2015).

Pel que fa a les sèries climàtiques, aquestes s'han centrat en la consideració de les tendències mitjanes de precipitació i temperatura en cada una de les zones valorades durant el període 1901-2019.

	Àrea arena mòbil (ha)	Àrea vegetada (ha)	Total superfície (ha)	% vegetat
Cala Mesquida (ESP)	3,30	37,20	40,50	91,85
Cala Tirant (ESP)	0,40	13,40	13,80	97,10
Es Cavallet (ESP)	4,56	6,1	10,66	57,22
Erbaju (FRA)	2,75	16,8	19,55	85,93
Tralicetu (FRA)	0,49	19,04	19,53	97,49
Pinarello (FRA)	0,32	22,96	23,28	98,63
Magazzini (ITA)	82,56	982,44	1065,00	92,25
Porto Pino (ITA)	45,68	57,02	102,70	55,52
Tsampika (GRE)	28,45	6,42	34,87	18,41
Dipkarpaz (XIP)	1,53	161,47	163,00	99,06
Koruçam (XIP)	72,58	615,42	688,00	89,45
Sarugamori (JAP)	449,3	481,3	930,60	51,72
Greenwich (CAN)	8,92	65	73,92	87,93
Sefton dunes (UK)	230	1727	1957,00	88,25
Le Bray (FRA)	1	94	95,00	98,95

Taula 1. Superfícies calculades dels sistemes dunars analitzats.

Table 1. Calculated surfaces of the analyzed coastal dune systems.

Aquesta sèrie es consolida a partir de 8 observacions mensuals. Les dades utilitzades s'han extret de la plataforma CRUTEM4, desenvolupada i mantinguda pel *Climate Research Unit del Met Office Hadley Center* i basat en els treballs de Jones *et al.* (2012) i Osborn *et al.* (2014).

L'anàlisi multivariable s'ha desenvolupat a partir del paquet estadístic Primer6[®]. Prenent en consideració variables geomorfològiques (superfície total, longitud de costa, longitud de desenvolupament), vegetals (superfície d'arena lliure, vegetació mòbil, vegetació llenyosa) i climàtiques (mitjanes de precipitació i temperatura 1901-2019), es presenta una anàlisi *Cluster* basada en el grau de similitud entre les diferents zones d'estudi, així com una Anàlisi de Components Principals (ACP) per tal de ponderar el pes de cada una de les variables contemplades.

Amb tot, l'objecte del present estudi albira a determinar la caracterització ambiental dels sistemes dunars costaners en la zona temperada septentrional i, si n'és el cas, definir els possibles patrons de similitud que hi pugui haver a partir de les variables utilitzades. Endemés, una fita important és establir la relació (o manca de relació) entre les tendències climàtiques (temperatura i precipitació) i el grau de vegetació que presenten les zones estudiades.

Finalment, i a resulta de les conclusions extretes, es pretén dur a terme una valoració sobre les implicacions que determinats escenaris poden derivar sobre la gestió ambiental dels sistemes dunars costaners, així com establir una discussió amb algunes de les tendències que ja són aplicades en alguns sistemes costaners localitzats, principalment, a la costa europea septentrional.

Resultats

Grau d'estabilització vegetal

Els sistemes dunars analitzats es situen al llarg de la zona temperada septentrional, en la seva majoria a l'àmbit Mediterrani (Fig. 1), indret on més formacions arenoses litorals s'han identificat segons els criteris de selecció utilitzats. Si bé són ambients relativament comuns en territoris insulars, hi ha hagut illes com Malta o Creta on no ha estat possible la seva identificació. Tal i com reflecteix la Taula 1, la seva extensió és variable, oscil·lant entre els sistemes de dimensions més reduïdes, com es Cavallet (10,6 ha) o Cala Tirant (13,8 ha), als més extensos, com les dunes de Magazzini (1065 ha) o Sefton dunes, el sistema analitzat més extens, amb un total de 1957 ha. Amb tot, la superfície mitjana de la mostra es situa en les 349,1 ha.

Una de les característiques més inequívocament comuna és l'alt grau de vegetació que presenten els sistemes analitzats (Taula 1, Fig. 2), mostrant que es tracta de sistemes molt fixats per la massa vegetal associada. De fet, la mitjana indica que el 80,6% de la seva superfície està estabilitzada a partir de vegetació arbustiva i arbòria. Hi ha casos on les taxes de fixació són notablement superiors, com les dunes de Dipkarpaz (99%), Pinarello (98,6%) Tralicetu (97,5%) o Cala Tirant (97,1%), indicant una minsa superfície d'arena mòbil. Per altra banda, els sistemes més dinàmics i, per tant, els que més superfície d'arena mòbil ostenten són les dunes de Tsampika (18,4%), Sarugamori (51,7%), Porto Pino (55,5%) o es Cavallet (57,2%), aquests tres

darrers mostrant una realitat gairebé simètrica entre els dos escenaris analitzats (arena mòbil vers superfície vegetada).

En termes absoluts, la Fig. 2 indica que la tendència és la mateixa que l'exposada anteriorment, si més no s'hi identifiquen sistemes on les superfícies d'arena lliure i vegetada no disten especialment (e.g. Sarugamori, Sefton dunes, Porto Pino). En els extrems s'hi troben el sistema dunar de Le Braye, on en termes absoluts pràcticament no compta amb superfície d'arena mòbil i, en sentit contrari, les dunes de Tsampika, únic sistema que compta amb més superfície d'arena lliure que no fixada per la vegetació (28,4 ha vers 6,4 ha).

Partint del grau de fixació per la vegetació associada, la Fig. 3 ens grafia el grau de similitud que hi ha entre cada un dels sistemes analitzats. En base al llindar de similitud del 40% es poden identificar quatre grans grups. El primer estaria format pels sistemes de Sefton, Magazzini, Koruçam i Sugamori, coincidint amb els que presenten unes majors dimensions i compten amb més superfície (en termes absoluts) vegetada (Fig. 2). Un segon grup, el més nombrós de la mostra, queda format pels sistemes de Pinarello, Tralicetu, Tirant, Erbaju i Cala Mesquida, mostrant com a denominador comú que són els sistemes que, en termes relatius (de la comparativa entre les dues variables analitzades), mostren una menor disponibilitat d'arena mòbil. El patró de similitud que mostra la tercera agrupació identificada (Dipkarpaz, Le Braye, Greenwich i Porto Pino) és el mateix que el grup anterior; una superioritat notable de la superfície vegetada enfront la

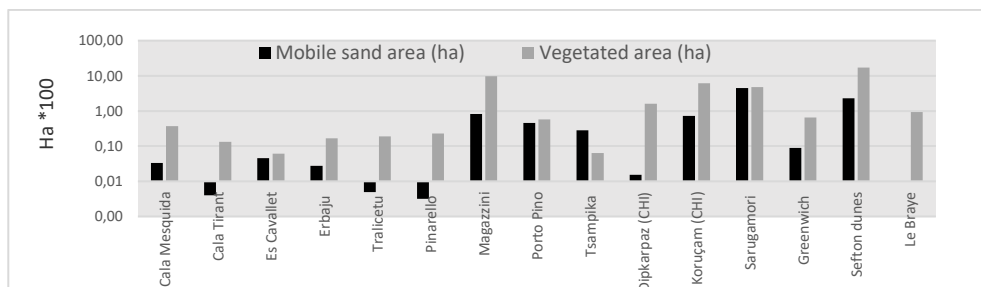


Fig. 2. Comparativa entre la superfície vegetada i l’arena mòbil disponible.
Fig. 2. Comparison between vegetated surface and mobile sand.

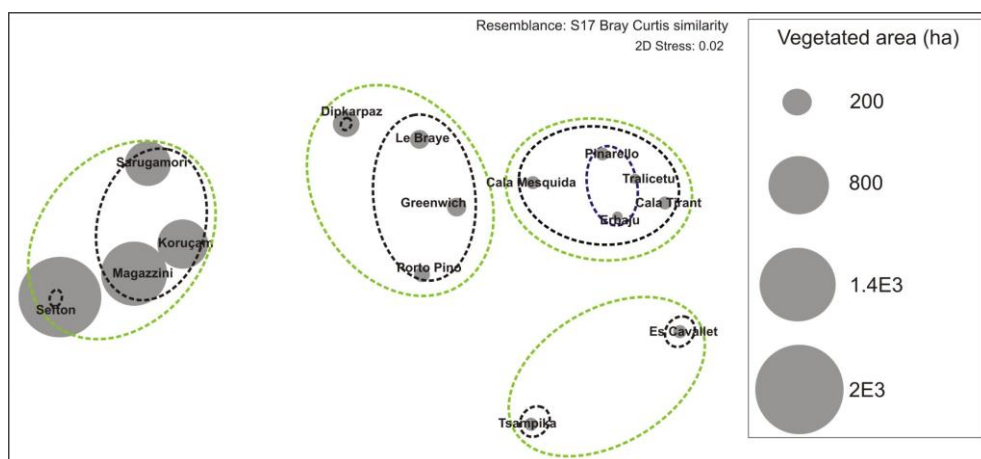


Fig. 3. Agrupació, a partir de l’índex de similitud Bray-Curtis tenint en compte la superfície vegetada i la superfície d’arena mòbil
Fig. 3. Cluster using Bray-Curtis similarity index considering vegetated and mobile sand area.

superfície d’arena mòbil. No obstant, en aquest cas, la diferència rau en la superfície total dels sistemes, en aquest cas de dimensions menors al del grup tres. Finalment, un quart grup residual format pels sistemes de Tsampika i es Cavallet, els quals es caracteritzen per una major presència d’arena mòbil que els altres casos, especialment el cas de Tsampika, amb una superfície d’arena (28,4 ha) superior a la fixada per massa vegetal (6,4 ha).

Caracterització climàtica

De les sèries climàtiques analitzades

corresponents al període 1901-2019 se’n deriva que, pel conjunt dels sistemes estudiats, la temperatura mitjana es situa en els 14,5 °C, mentre que el règim de precipitació ho fa en els 66,2 mm/any. No obstant, de l’observació de la Fig. 4 se’n desprenen diferències importants, sobretot pel que fa a la precipitació associada. Així, queda definit un grup de 4 sistemes on les el règim hídric és notablement superior a la resta; Sefton, amb una precipitació anual mitjana 158,4 mm és la zona més plujosa de tota la mostra. El segueixen els sistemes de Sarugamori (109,6 mm/any), Le Braye (87,1

mm/any) i Greenwich (85 mm/any). Des del punt de vista geogràfic, i com es grafia a la Fig. 1, són els 4 sistemes analitzats que queden fora de la regió mediterrània i que es situen, de fet, en les latituds més septentrionals. Finalment, la desviació estàndard de la mostra ens indica que aquests quatre sistemes suposen una alteració en tant a la dispersió dels valors mitjans, suposant així que aquesta estigui més allunyada de la mitjana en el conjunt dels sistemes estudiats (Fig. 4).

La situació en tant a la temperatura és molt més homogènia. No obstant també es deixa percebre la mateixa divisió identificada en el cas del règim hídric. És així que, tot i tenir una seqüència força similar dels valors mitjans, els sistemes de Greenwich (5,4°C), Sarugamori (8°C), Sefton (9,2°C) i Le Braye (11°C) mostren valors mitjans més baixos que la resta de sistemes, amb una mitjana al voltant dels 17°C (Fig. 4). Aquesta major homogeneïtat es percep també en una desviació estàndard molt més propera a la mitjana, mostrant així que la disparitat al llarg de tota la mostra és menor.

Des de la vessant geogràfica cal apuntar que dins dels sistemes mediterranis es diferencien lleugerament aquells que es

troben localitzats a les latituds més meridionals, sobretot pel que fa al règim de precipitació, esdevenint els casos més secs de tota la mostra; es Cavallet (41,2 mm/any), Tsampika (43,1 mm/any), Koruçam (44,4 mm/any) i Dipkarpaz (45,8 mm/any). A més, aquests quatre sistemes també es corresponen amb aquells que contempnen les màximes temperatures mitjanes identificades; Cavallet (17,3°C), Tsampika (18,2°C), Koruçam (19,2°C) i Dipkarpaz (19,2°C). Amb tot, es veu clarament que la vessant geogràfica esdevé un factor clau vers a la caracterització bioclimàtica dels sistemes dunars estudiats.

Caracterització general

L'anàlisi d'agrupacions duta a terme a partir de l'índex de similitud (*Bray Curtis Similarity*) s'ha executat tenint en compte les variables superficials (superfície total, superfície vegetada i superfície d'arena lliure) i les climàtiques (règims de precipitació i temperatura mitjana). Tal i com reflecteix la Fig. 6, el grau de similitud entre les distintes zones estudiades es posiciona, en termes generals, per sobre del 50% indicant una important similitud entre els diferents sistemes.

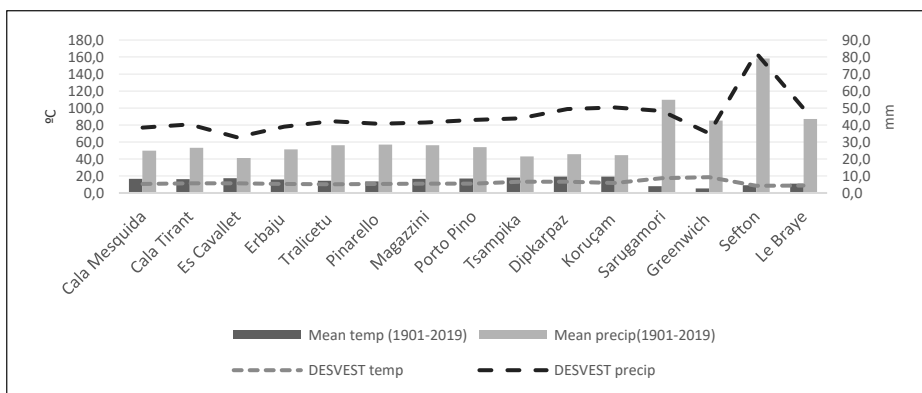


Fig. 4. Temperatura i precipitació mitjana de cada sistema estudiat en el període 1901-2019.

Fig. 4. Mean temperature and precipitation in each studied system over the period 1901-2019.

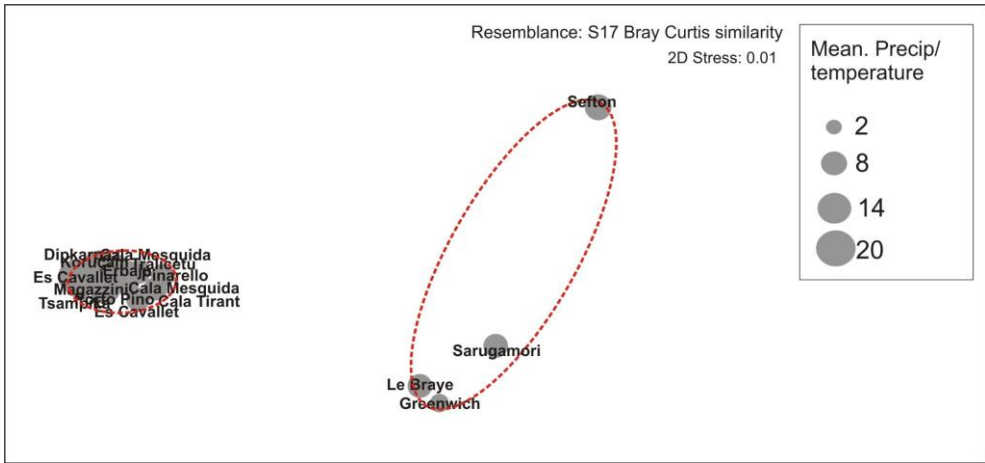


Fig. 5. Agrupació, a partir de l'índex de similitud Bray-Curtis tenint en compte temperatura i la precipitació.

Fig. 5. Cluster using Bray-Curtis similarity index considering temperature and precipitation.

No obstant, clarament es defineixen tres agrupacions diferenciades entre sí que es caracteritzen per establir patrons de similitud encara superiors. Un primer grup (G1) queda conferit pels sistemes de Sefton, Koruçam, Magazzini i Sarugamori, en tots casos interrelacionats per valors de concordança

superior al 60%, arribant al 77,3% de coincidència entre els sistemes de Magazzini i Sarugamori. Aquesta primera agrupació coincideix en la identificada a la Fig. 3, referent als sistemes que presenten majors dimensions i majors superfícies vegetades (en termes absoluts).

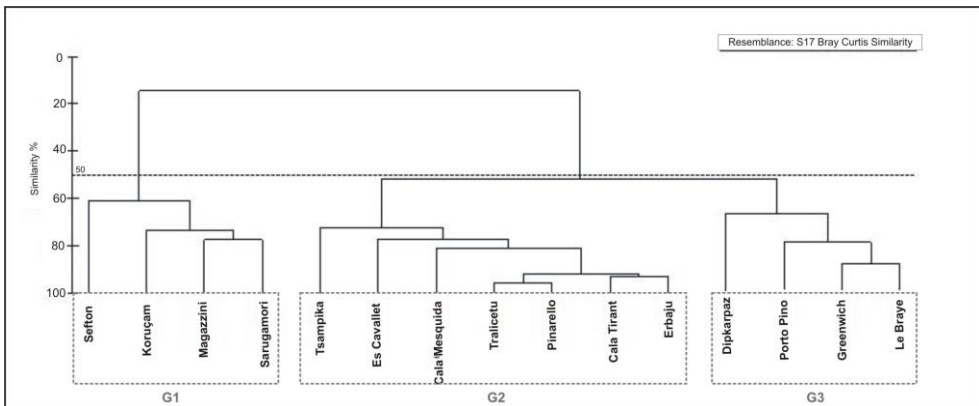


Fig. 6. Anàlisi clúster dels 15 sistemes analitzats en base a les variables de superfície (total, vegetada i arena lliure) i climàtiques (temperatura i precipitació mitjana en el període 1901-2019).

Fig. 6. Cluster analysis of the 15 studied systems according to surface (total, vegetated and fresh sand) and climate (mean temperature and rainfall over the period 1901-2019) variables.

En els casos de Sarugamori i Sefton cap destacar el factor de la precipitació com a variable de similitud determinat ja que, tal i com grafia la Fig. 4, esdevenen les dues zones amb els règims majors.

El segon grup que es defineix (G2) és el més nombrós i està format pels sistemes de Tsampika, es Cavallet, Cala Mesquida, Tralicetu, Pinarello, Cala Tirant i Erbaju, sempre amb un grau de similitud superior al 75% (e.g. Tsampika i es Cavallet = 75,4%) i en alguns casos arribant a una grau de concordança gairebé absoluta (e.g. Pinarello i Tralicetu = 95,8%; Cala Tirant i Erbaju= 93,1%). En aquest cas la vessant geogràfica hi té un paper important ja que tots els sistemes identificats es corresponen amb l'àrea Mediterrània. El fet de ser el grup més

nombrós fa, també, que sigui el més complex a l'hora d'establir quines són les variables (climàtiques i de fixació del sistema) que interrelacionen millor cada una de les zones. Amb tot, però, el denominador comú que caracteritza aquesta agrupació n'és la superfície total dels sistemes, coincidint tots ells amb els de menors dimensions.

Finalment, un tercer grup (G3) està format per un total de 4 sistemes; Dipkarpaz, Porto Pino, Greenwich i Le Braye, amb un grau de similitud que va des del 61% (Greenwich i Dipkarpaz) al 87,5% (Le Braye i Greenwich). En aquest cas queda clar que les variables climàtiques no són determinants en l'agrupació, ja que els casos de Le Braye i Greenwich esdevenen siste-

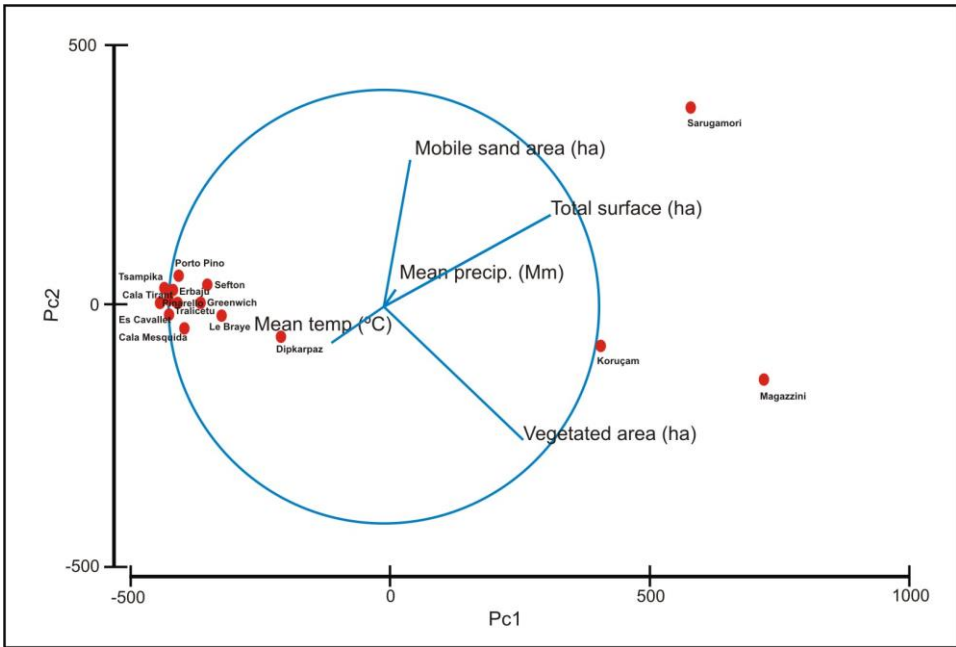


Fig. 7. Anàlisi de components principals (ACP) en base a les variables utilitzades per a la caracterització dels sistemes dunars estudiats. Els vectors (blau) representen el comportament de les variables, mentre que els punts (vermell) la posició de cada sistema vers a la disposició dels vectors.

Fig. 7. Principal component analysis (PCA) according to the variables used as for the studied dune systems. Vectors (in blue) represent the behavior of each variable, while the dots (in red) show the position of each system as for the vectors.

mes més plujosos i freds que els de Dipkarpaz i Porto Pino (Fig. 4). Tampoc ho és la variable geogràfica, ja que dos sistemes es localitzen a l'àmbit mediterrani (Dipkarpaz i Porto Pino), mentre que Le Braye ho fa a l'Atlàntic oriental i Greenwich a l'occidental. En aquest sentit, i atenent a les agrupacions identificades a la Fig. 3, es veu com el denominador comú d'aquest grup rau per ser sistemes de dimensions petites i, alhora, altament vegetats (i per tant amb poca disponibilitat d'arena lliure). Aquesta dualitat determina que siguin sistemes costaners molt estabilitzats per la vegetació (tant arbustiva com arbòria) i amb poca activitat sedimentària des d'un punt de vista geomorfològic.

Anàlisi de components principals

De l'anàlisi de components principals (ACP) se'n desprèn que no existeix una correlació clara entre les variables utilitzades (Fig. 7). Les que quedarien més relacionades entre sí són les que fan referència a la superfície d'arena lliure i la temperatura mitjana, i, amb menor mesura, la superfície total. D'altra banda identificar que hi ha vectors que funcionen de manera independent alhora de determinar la caracterització de les zones estudiades; e.g. la superfície d'arena lliure vers a la superfície vegetada (angle d'uns 150° a la Fig. 7). Finalment, apuntar que els vectors de temperatura mitjana i el de superfície total es correlacionen de manera totalment inversa entre sí, seguint direccions oposades, mentre que la temperatura i la precipitació mitjana, molt properes a 0, no esdevenen diferencials a l'hora de definir les zones analitzades.

La manca de pes específic s'aprecia de manera més clara si entrem a analitzar conjuntament la situació de cada sistema estudiat (dins la ACP; Fig. 7) amb la disposició dels vectors. Així veiem que la temperatura mitjana seria la variable que

més definiria la majoria dels sistemes analitzats (12 dels 15) ja que, com es veu a la Fig. 4, mostra una tendència força similar al llarg de tota la mostra.

En els casos de Koruçam i Magazzini destacar que el vector que més pes té envers a la seva caracterització és la superfície vegetada i, en menor mesura, la seva superfície total. De fet, tal i com es grafia a la Fig. 2, aquests són dos dels sistemes que més superfície vegetada tenen (92,1% Magazzini i 89,4% Koruçam; Taula 1) i, alhora, els de majors dimensions. Finalment el cas de Sarugamori es caracteritza de manera independents als dos casos anteriors. Això és que la variable de més pes en la seva caracterització és el vector de la superfície d'arena lliure, alhora que també el de la seva superfície total, fet que també queda palès a la Taula 1 i Fig. 2.

La component principal 1 (PC1 a la Fig. 7) representa el 96,9% de la informació de la mostra. En aquest cas, els vectors de superfície total i de superfície vegetada són els que més pes tenen a l'hora de definir les zones estudiades, mentre que en sentit negatiu s'hi troba la temperatura mitjana. La PC2 (eix vertical a la Fig. 7) representa el 3,1% de la informació i, en la seva construcció, la superfície d'arena lliure és el vector de més pes.

Discussió

L'increment de la vegetació que fixa els sistemes dunars costaners sembla ser una constant a escala planetària i que ha estat identificat per diferents estudis arreu del món (Jackson i Cooper, 2011; Miot da Silva i Hesp, 2013; Pye *et al.*, 2014, Delgado-Fernández i Mir-Gual, 2015; Martínez *et al.*, 2022). La conseqüència d'aquesta realitat, tal i com apunta Smyth *et al.* (2023), és que almenys des de la dècada de 1950 els sistemes dunars costaners arreu del món han

demostrat una tendència a la reducció d'arena mòbil i a un increment important de la seva coberta vegetal. Aquests canvis es poden atribuir a una reducció de la intensitat del vent, un increment de la temperatura (Delgado-Fernández *et al.*, 2019; Pye *et al.*, 2020), a un increment o estabilització de la precipitació (Martínez *et al.*, 2022) o a canvis en l'activitat humana sobre aquestes zones (Provoost *et al.*, 2011; Tsoar i Blumberg, 2002).

La realitat descrita pels estudis anteriorment citats es correspon amb la situació presentada pels diferents sistemes costaners analitzats en el present estudi. És així que el seu principal atribut, compartit unànimement, és l'alt grau d'estabilització vegetal que presenten (mitjana del 80,6%), en alguns casos, com el de Dipkarpak (99%) pràcticament total. Aquest fet té, sens dubte, conseqüències sobre el comportament ambiental dels sistemes arenosos costaners. La derivada principal és una disminució de l'arena mòbil disponible i, en conseqüència, una baixada dràstica de l'activitat sedimentària i geomorfològica (Smyth *et al.*, 2023). Endemés pot tenir conseqüències per a la conservació de la flora i la fauna especialitzada en aquests ambients (Smith, 2009).

Si bé és cert que en casos la revegetació de les dunes costaneres s'ha relacionat amb canvis al clima (Jackson i Cooper, 2011; Miot da Silva i Hesp, 2013) o amb una combinació de factors climàtics i d'impacte antròpic (Provoost *et al.*, 2011), la manca d'informació espacio-temporal ha dificultat poder-ne demostrar amb nitidesa la seva correlació. Amb tot, si bé hi ha estudis que certifiquen un pes important de les variables climàtiques als processos de revegetació identificats (Jackson i Cooper, 2011 en el cas d'Irlanda), altres, com Delgado-Fernández i Mir-Gual (2015) en el cas de les dunes de Sefton (Regne Unit), demostren una relació

no-lineal entre els canvis al clima i l'evolució de la vegetació.

En aquesta línia, el present estudi identifica una variabilitat geogràfica clara entre aquells sistemes que es localitzen en latituds més septentrionals, més plujosos i freds, i els que es localitzen dins l'arc mediterrani. Tot i aquesta variabilitat, però, no es perceben canvis significatius en el comportament mostrat per cada sistema vers al grau de cobertura vegetal. Aquest fet indueix a pensar que, en termes generals, les variables climàtiques, i en concret la precipitació, no es posicionen com a vectors diferencials en tant a la caracterització geoambiental.

Sigui com vulgui, l'homogeneïtat climàtica de la zona temperada septentrional sembla jugar un paper important en el grau de similitud ambiental dels sistemes dunars costaners. Aquest estudi demostra que aquest grau de concordança sempre es situa per sobre del 50% i que, en alguns casos, gairebé és absoluta (e.g. Tralicetu i Pinarello).

L'anàlisi estadística realitzada en aquest estudi suggereix que la variable geogràfica, en termes generals, és la que més pes té alhora de definir els sistemes arenosos. A partir d'aquí, les variables climàtiques, principalment la precipitació, es poden postular com a variable diferencial en casos concrets (e.g. Sarugamori).

No obstant, els resultats obtinguts de l'estudi que es presenta es correlacionen notablement amb el comportament estudiat en diferents sistemes dunars costaners arreu del món i que ha estat recollit per la bibliografia existent al respecte.

Sembla clar que la tendència de revegetació dels sistemes litorals arenosos és una màxima estesa arreu del món, i en aquest cas en concret, arreu de la franja temperada septentrional. Com ja s'ha descrit anteriorment, les conseqüències d'aquesta

realitat són clares; una disminució dràstica de l'activitat sedimentària i un increment important de la fixació d'aquests ecosistemes. Tot plegat, doncs, suposa un canvi de paradigma destacable envers a la gestió dels sistemes dunars costaners i, principalment, de les mesures de gestió que s'hi hagin de dur a terme per a garantir la seva conservació de cara al futur.

Aquest, de fet, és un dels debats, també científics, que més han aflorat al llarg d'aquests darrers anys. De fet, la preocupació per la pèrdua d'arena mòbil lligada a aquests ecosistemes està desembocant en un canvi de percepció envers a la restauració de dunes costaneres. Els nous programes de restauració consisteixen en desestabilitzar dunes altament vegetades per a tornar-les a convertir amb sistemes dinàmics (Darke *et al.*, 2013; Pye *et al.*, 2014). No obstant, val a tenir en compte que una evolució complexa en sistemes dunars antròpico-naturals podria complicar les coses. La presència de no-linealitat i d'impactes humans amb possibles efectes retardats dificulta la identificació de factors determinants en la revegetació de les dunes, el que pot tenir conseqüències per a futur plans de gestió centrats en pal·liar els efectes del canvi climàtic (Delgado-Fernández i Mir-Gual, 2015).

Tanmateix, tot i que la realitat presenta els sistemes arenosos costaners de cada cop més estabilitzats per la vegetació associada, sempre persisteixen petites zones on l'activitat geomorfològica i sedimentària encara hi és present, normalment associades a zones dinàmiques tals com *blowouts* o dunes parabòliques (Arens *et al.*, 2004). En canvi, diferents exemples on la vegetació ha estat eliminada amb l'objectiu de revitalitzar l'activitat sedimentària; Holanda (Arens *et al.*, 2004), Gales (Rhin i Jones, 2009), Canadà (Darke *et al.*, 2013) o França (Laporte-Fauret *et al.*, 2021), ha quedat

demostrat que la revegetació d'aquestes zones es produeix en un curt termini de temps - entre dos i vuit anys - (Arens i Geelen, 2006; Bar, 2013; Barchyn i Hugenholtz, 2013), suggerint, doncs la seva poca efectivitat des del punt de vista de gestió i planificació.

D'acord a aquestes controvèrsies, estudis recents com els de Smyth *et al.* (2023) afinen, a partir d'anàlisis eòliques i sedimentàries, que en els casos en que els gestors d'aquests espais tinguin com a objectiu revitalitzar els sistemes des d'un punt de vista sedimentari, els esforços s'haurien de centrar en intervenir a les zones de pendents pronunciades a sobrevent de les dunes ja que, entre els factors abiòtics que controlen l'activitat geomorfològica en dunes vegetades, la força i incidència del vent és la que més capacitat té a tal efecte (Pye, 1982, Rust, 1990, Wiggs *et al.*, 1995; Arens *et al.*, 2004).

Sens dubte l'estabilització dels sistemes dunars costaners per vegetació suposa reptes alhora de com gestionar aquests ecosistemes, no sols des de la vessant geomorfològica i ambiental, sinó també en tant a la seva resiliència vers als efectes del canvi climàtic. Amb tot es percep oportú que futurs estudis centrin els seus esforços en tant a determinar quines conseqüències pot tenir aquest nou paradigma enfront a la realitat climàtica que ens enfrontem. Per això seria necessari seguir indagant en sí les tendències climàtiques (vent, precipitació i temperatura) tenen una correlació directe en quant als patrons de revegetació i de com aquests poden donar resposta o fer més vulnerables aquests ecosistemes costaners enfront la previsible pujada del nivell de la mar i de l'increment de la virulència i recurrència d'episodis costaners extrems.

Conclusions

L'extensió dels sistemes costaners a la zona temperada septentrional és variable. El factor determinant d'aquesta realitat és l'espai d'acomodació del que disposen. Així, l'àrea Mediterrània compta amb els sistemes de dimensions menors, la majoria d'ells lligats a espais insulars.

La característica més comuna que defineix de manera conjunta els sistemes dunars analitzats és l'alt grau de fixació que tots presenten a partir de la vegetació existent, amb una mitjana que es situa en el 80,6% de la seva superfície i amb casos, com el de Dipkarpaz (99%) o Pinarello (98,6%), on la fixació és pràcticament total. Només des d'aquesta l'anàlisi no s'ha identificat cap correlació directa entre el grau de fixació i la variable geogràfica.

Pel que fa a les variables climàtiques, durant el període 1901-2019 es veu una tendència generalitzada d'increment de la temperatura i una lleugera pujada del règim hídric en el conjunt dels sistemes dunars analitzats. Des d'aquesta vessant, però, sí s'identifica una diferenciació clara en basa a la localització geogràfica dels sistemes. Aquells situats en latituds més septentrionals (i fora de l'àmbit mediterrani) presenten una realitat més freda i plujosa. Pel contrari, els sistemes situats a les latituds més meridionals del Mediterrani es corresponen amb aquells més càlids i àrids.

Amb tot, l'anàlisi de similitud que corrobora la dualitat identificada anteriorment (Fig. 5), deixant constància de que els patrons climàtics es diferencien entre els sistemes localitzats dins l'àmbit Mediterrani i aquells que ho fan fora d'aquest. No obstant, no es pot determinar una correlació directa entre els vectors climàtics i el grau de vegetació presentat en cada cas d'estudi.

En termes generals, tots els sistemes analitzats presenten sempre un grau de similitud entre sí de més del 50%. No obstant, de les diferents agrupacions derivades a la Fig. 6 se'n desprèn que la variable geogràfica, en termes generals, és la que més pes té alhora de definir i agrupar els sistemes en base a la seva correlació. A partir d'aquí, altres variables derivades, tals com la realitat climàtica hi poden tenir un paper, tot i que més secundari.

De l'anàlisi de components principals (ACP) se'n deriva que no existeix una correlació clara entre les variables utilitzades (Figura 7) i la caracterització dels sistemes dunars estudiats. En aquest cas la temperatura i la precipitació mitjana no esdevenen diferencials a l'hora de definir les zones analitzades. No obstant, la temperatura mitjana és la variable que defineix de forma compartida totes les zones d'estudi. En alguns casos, com el de Magazzini i Koruçam, el grau de vegetació sí que es posiciona com a variable diferencial vers als altres sistemes.

Finalment cal apuntar la importància de que estudis futurs centrin els seus esforços en afinar la relació que hi pugui haver entre els patrons de revegetació i les tendències climàtiques, a l'igual que determinar quines conseqüències pot tenir aquest nou paradigma envers a l'estat ambiental d'aquests ecosistemes i a la seva resiliència front al canvi climàtic.

Agraïments

Aquest treball és una contribució del projecte de recerca Emergències Cròniques i Transformacions Ecosocials en Espais Costaners Turísticats (PID2022-137648OB-C21). Finançat per MCIN/AEI/10.13039/501100011033 i per "FEDER Una manera de fer Europa".

Bibliografia

- Aagaard, T., Orford, J. i Murray, A.S. 2007. Environmental controls on coastal dune formation; Skallingen Spit, Denmark. *Geomorphology*, 83: 29-47.
- Ajedegba, J.O., Perotto-Baldivieso, H.L. i Jones, K.D. 2019. Coastal dune vegetation resilience on South Padre island, Texas: a spatiotemporal evaluation of the landscape structure. *Journal of Coastal Research*, 35: 534-544.
- Arens, S.M., Slings, Q. i De Vries, C.N. 2004. Mobility of a remobilised parabolic dune in Kennemerland, the Netherlands. *Geomorphology*, 59 (1-4): 175-188.
- Arens, S.M. i Geelen, L.H.W.T. 2006. Dune landscape rejuvenation by intended destabilisation in the Amsterdam water supply dunes. *Journal of Coastal Research*, 22(5): 1094-1107.
- Bar, P. 2013. Restoration of coastal sand dunes for conservation of biodiversity: the israeli experience. *Restoration Coastal dunes*, 173-185.
- Barchyn, T.E. i Hugenholtz, C.H. 2013. Reactivation of supply-limited dune fields from blowouts: a conceptual framework for state characterization. *Geomorphology*, 201:172-182.
- Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. et al. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data*, 5: 180-214.
- Berry, P.M., Dawson, T.P., Harrison, P.A. i Pearson, R.G. 2002. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecol. Biogeogr.*, 11: 453-462.
- Darke, I.B., Eamer, J.B.R., Beaugrand, H.E.R i Walker, J. 2013. Monitoring considerations for a dynamic dune restoration project: Pacific Rim National Park Reserve, British Columbia, Canada. *Earth Surf. Process. Landforms*, 38: 983-993.
- Delgado-Fernández, I. i Mir-Gual, M. 2015. Incremento de la cobertura vegetal en las dunas de Sefton, NO de Inglaterra. *Geo-Temas*, 15: 9-12.
- Delgado-Fernández, I., O’Keeffe, N. i Davidson-Arnott, R. 2019. Natural and human controls on dune vegetation cover and disturbance. *Science of the Total Environment*, 672: 643-656.
- Hugenholtz, C.H. i Wolfe, S.A. 2005. Recent stabilization of active sand dunes on the Canadian prairies and relation to recent climate variations. *Geomorphology*, 68: 136-147.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M. i Morice C.P. 2012: Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117: D05127.
- Laporte-Fauret, Q., Castelle, B., Michalet, R., Marieu, V., Bujan, S. i Rosebery, D. 2021. Morphological and ecological responses of a managed coastal sand dune to experimental notches. *Science Total Environment*, 782:146813
- Martínez, M.L., Pérez-Maqueo, O. i Vázquez, V.M. 2004. Facilitative interactions on coastal dunes in response to seasonal weather fluctuations and benefactor size. *Ecoscience*, 11: 390-398.
- Martínez, M.L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G. i Landgrave, R. 2022. Warmer temperature and spatiotemporal dynamics during primary succession on tropical coastal dunes. *Plants*, 11(22), 3029.
- Miot da Silva, G. i Hesp, P. 2013. Increasing rainfall, decreasing winds and historical changes in Santa Catarina dunefields, southern Brazil. *Earth Surf. Process. Landforms*, 38: 1036-1045.
- Miot da Silva, G., Martinho, C.T., Hesp, P., Keim, B.D. i Ferligoj, Y. 2013. Changes in dunefield geomorphology and vegetation cover as a response to local and regional climate variations. *Journal of Coastal Research*, 165: 1307-1312.
- Mir-Gual, M., Fraga, P., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. i Brunet, P. 2010. Alteracions antròpiques en els boscos de *Pinus halepensis* Mill. dels sistemes dunars de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 53: 133-152.

- Mir-Gual, M. 2014. *Anàlisi, caracterització i dinàmica de les formes erosives blowout en sistemes dunars de Mallorca i Menorca (Illes Balears)*. Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears.
- Jackson, D.W.T. i Cooper, J.A.G. 2011. Coastal dune fields in Ireland: rapid regional response to climatic change. *Journal of Coastal Research*, SI64: 293-297.
- Osborn T.J. i Jones P.D. 2014: The CRUTEM4 land-surface air temperature dataset: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. *Earth System Science Data*, 6: 61-68.
- Provoost, S., Laurence Jones, M. i Edmolson, S. E. 2011. Changes in landscape and vegetation of coastal dunes in northwest Europe: a review. *J. Coast. Conserv.*, 15: 207-226.
- Artigas, P. 1887. Las dunas de Torroella de Mongrí. *Revista de Montes*, (257): 489-491.
- Pye, K. 1982. Morphological development of coastal dunes in a humid tropical environment, Cape Bedford and Cape Flattery, North Queensland. *Geographical Annaler: Ser Phys Geogr*, 64(3-4): 213-227.
- Pye, K., Blott, S.J. i Howe, M.A. 2014. Coastal dune stabilization in Wales and requirements for rejuvenation. *Journal of Coastal Research*, 18: 27-54.
- Pye, K., Blott, S.J., Forbes, N. i Maskell, L.C. 2020. Geomorphological and ecological change in a coastal foreland dune system, Sandscale haws, Cumbria, UK: the management challenges posted by climate change. *Journal of Coastal Conservation*, 24 (6): 1-34.
- Rhind, P. i Jones, R. 2009. A framework for the management of sand dune systems in Wales. *Journal of Coastal Conservation*, 13(1):15-23.
- Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X. i Rodríguez-Perea, A. 2009. Fixació i estabilització de sistemes dunars a les Illes Balears per processos de forestació: el cas de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 129-140.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. i Pounds, J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421: 57-60.
- Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K. i Auer, I. 2017. The climate of the european Alps: shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800-2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 26: 115-125.
- Rust, I.C. 1990. Coastal dunes as indicators of environmental change. *South Afr J Sci*, 86(7): 299.
- Smith, P.H. 2009. *The sands of time revisited. An introduction to the sand-dunes of the Sefton Coast*. Amberley publishing. Stroud, Gloucestershire.
- Smyth, T.A.G., Rooney, P. i Yates, K.L. 2023. Dune slope, not wind speed, best predicts bare sand in vegetated coastal dunes, 27 (27).
- Tsoar, H. i Blumberg, D.G. 2002. Formation of parabòlic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. *Earth Surf. Process. and Landforms*, 27 (11): 1147-1161.
- Tsoar, H, Levin, N., Porat, N., Maia, L.P., Herrmann, H.J., Tatumi, S.H. i Claudino-Sales, V. 2009. The effect of climate change on the mobility and stability on coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quat. Res.*, 71: 217-226.
- Van der Maarel, E. 1993. Dry coastal ecosystems. *In: Ecosystems of the World*. Elsevier. Amsterdam. 600 pp.
- Wiggs, G.F., Thomas, D.S., Bullard, J.E. i Livingstone, I. 1995. Dune mobility and vegetation cover in the southwest Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landform*, 20(6): 515-529.