

ESTUDIS GEOMORFOLÒGICS I GESTIÓ LITORAL AL SISTEMA PLATJA-DUNA DE TIRANT, NORD DE MENORCA (1998 – 2021)

Francesc X. Roig-Munar ¹, José Ángel Martín-Prieto ¹, Bernadí Gelabert Ferrer ², Carme Garriga ¹

¹ Investigador independent – Consultor ambiental, C/ Carritxaret 18, apt. 6, 07749 es Migjorn Gran, Menorca.

² Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Ctra. de Valldemossa, km 7,5, 07122 Palma, Mallorca.

Resum: El sistema platja-duna de Tirant, N de Menorca, és un dels sistemes dunars on, d'ençà dels primers treballs geomorfològics de 1988, diferents autors han desenvolupat les seves anàlisis. Tot plegat fa que sia un dels sistemes dunars amb major nombre d'estudis de l'illa. En aquest article es repassen tots els treballs que s'han fet des del punt de vista de la geomorfologia litoral. Tirant és un sistema força antropitzat des de la dècada de 1970, moment en què s'inicià l'extracció d'arena al sector de dunes establitzades. Des de l'inici de les diferents investigacions s'ha posat de manifest la fragilitat del sistema dunar, especialment de la duna davantera com a conseqüència de la pressió antròpica i la freqüentació turística que pateix el sistema (quioscs, retirada indiscriminada de necromassa de *Posidonia oceanica*, neteja mecànica de la platja, extracció d'àrids, etc.). A partir de l'any 2000 s'ha dut a terme una gestió del front dunar per tal de mitigar l'erosió, que es va abandonar amb la crisi econòmica de 2008. Amb posterioritat i arran de l'evidència de nous episodis erosius s'ha retornat a la gestió de l'espai, però aquest cop sense resultats positius. En paral·lel el present treball també aborda l'anàlisi de diferents lòbuls de deflació (*blowouts*) presents al sistema amb l'ajuda de dos vols LIDAR (2014 i 2020) mitjançant Sistemes d'Informació Geogràfica. La comparació entre els dos vols LIDAR ha permès quantificar els canvis en la fisiografia i morfologia de cada *blowout*, així com la seva migració cap a l'interior del sistema dunar durant la darrera dècada, fins arribar a la zona d'extracció d'arena dels anys 70.

Paraules clau: *duna davantera, lòbuls de deflació, sistema dunar, Menorca.*

Abstract: The Tirant beach-dune system (Northern Menorca) is one of the most intensively studied dune systems from Menorca. Different authors have worked on it since the first geomorphological published work at 1988. This article reviews all the contributions that has been done since 1998 from the point of view of coastal geomorphology. Tirant has been a highly anthropogenic system since the 1970s, when sand mining destabilized the inland dune sector. Older works already illustrated the sensitivity of the foredune and their degradation because of anthropogenic pressure (kiosks, removal of *Posidonia oceanica* wrack, beach mechanical cleaning, sand extraction, etc.). Since 2000 the coastal management concentrate in mitigating erosion, but since 2013 because the economic crisis of 2008 these practices stopped. Lately and due to new erosive episodes management actions were reactivated, but without positive results. Additionally this contribution analyse the evolution of several blowouts by means of two Lidar flights between (2014 and 2020) and Geographic Information Systems. The comparison between the two time-stacks allows to establish the topographical and morphological changes on each blowout, as well as their migration towards the inner part of the dune system until reaching the former sand extraction area.

Paraules clau: *foredune, blowouts, dune systems, Menorca.*

Introducció

Moltes de les gestions realitzades a les platges mediterrànies han partit de la concepció de la platja com a un solàrium d'arena, com a un recurs estrictament físic, sense considerar-ne de forma holística tots aquells elements que la defineixen com a sistema natural o bé totes aquelles gestions encaminades a la seva conservació (p.e., recuperació i manteniment dels seus sistemes i hàbitats o de les fonts de producció sedimentària).

La gestió del litoral, a nivell estatal, s'ha basat en la planificació, direcció i control dels recursos i la dotació de serveis; sense considerar-ne les característiques geoambientals. Els objectius turístics han inspirat –i inspiren– aquest enfoc mancat de planificació i d'una gestió escaient. El resultat d'aquesta gestió orientada al fet turístic ha resultat en processos de degradació i tensions que han exigit solucions que harmonitzin els interessos oferts i els explotats. Així les solucions adoptades en el camp de la gestió litoral s'han basat, principalment, en criteris estàtics de caire arquitectònic, d'enginyeria o d'enjardinament. Comptat i debatut, aproximacions que no han donat solucions a mig termini i, que en

alguns casos, acaben abocant a una dependència d'intervencions artificialitzadores sostingudes en el temps (RODRÍGUEZ-PEREA *et al.*, 2000).

En les últimes dècades s'ha pres consciència del deteriorament constant dels ecosistemes litorals i entre ells dels sistemes dunars. L'estabilitat i equilibri de les dunes costaneres depenen de diferents factors com: el subministrament d'arena, la taxa de transport sedimentari (DELGADO-FERNÁNDEZ, 2011), l'onatge i el vent (WALKER *et al.* 2006), l'estat de la platja a llarg termini (DAVIDSON-ARNOTT *et al.*, 2005), l'ocurrència i la magnitud de tempestes o el paper de la vegetació (MIOT da SILVA *et al.* 2008). L'impacte humà sobre les dunes ha estat àmpliament estudiat, tot apuntant entre les causes de degradació el desenvolupament turístic massiu, la construcció de passejos marítims i la desaparició dels sistemes dunars litorals, una elevada pressió antròpica, la instal·lació de serveis físicament sobre les dunes, o fins i tot la pràctica de mesures de gestió incorrectes (NORDSTROM, 2008).

Per pal·liar aquests processos, focalitzats en la pèrdua de platges, morfologies i vegetació, s'han aplicat històricament estratègies d'adaptació que han condicionat la seva evolució al llarg de les darreres dècades mitjançant la gestió i/o defensa de la costa (LITHGOW *et al.* 2013). Segons ROIG-MUNAR (2011) les actuacions de caràcter intervencionista estan condicionades per les característiques genètiques de cada espai, destacant:

- a) Actuacions dures: es tracta de la ubicació d'estructures que tenen per objectiu dissipar l'energia de l'onatge (p.e. dics, esculleres i espigons) amb l'objectiu de retenir sediment i evitar l'erosió de la costa.
- b) Actuacions toves: Segons CHARLIER i DE MEYER (1989) es basen en el "respecte" al medi, i a dins les que s'encabirien accions com les regeneracions artificials de platges.
- c) Actuacions sostenibles: Són aquelles accions que malden per emular els processos naturals del sistema. L'objectiu final és la restauració de l'equilibri dinàmic entre la platja emergida i el sector dunar només tindran èxit en espais que permetin el desenvolupament de morfologies dunars i la colonització vegetal, sense aportació de materials sedimentaris exògens del propi sistema (ROIG-MUNAR *et al.*, 2009). Les actuacions sostenibles són les més adequades per preservar i recuperar els sistemes platja-duna des d'una perspectiva geoambiental; encara que socioeconòmicament poden ser complexes d'implementar i no ajustar-se als calendaris de les expectatives a curt termini, ja que requereixen amplis espais on recuperar morfologies i temps prolongats en la seva restauració.

Àrea d'estudi

Cala Tirant es localitza a la part central de la façana litoral nord de Menorca, entre els promontoris del cap de Fornells, a la seva part oriental, i el cap de Cavalleria, a la occidental. La badia que l'acull es disposa amb una orientació N-S (Fig. 1). És un sistema platja-duna molt actiu, arran dels importants embats i per la canalització dels vents de Tramuntana, els quals condicionen el dinamisme del sistema dunar i el seu desenvolupament terra endins.

La cala presenta un clima semi-àrid, amb una precipitació mitjana anual al voltant dels 630 mm (MIR-GUAL, 2014). Segons les dades que ofereix el Punt SIMAR 2134121 de la xarxa d'observacions oceanogràfiques que Puertos del Estado, per al període 1958-2020, el vent del N és el més recurrent, i el que presenta un major nombre de dies amb velocitats superiors als 6 m/s. En termes generals aquest bufa a velocitat que oscil·len entre els 1-8 m/s, arribant a superar els 8 m/s en més d'un 10% dels dies (Fig. 1).

Pel que respecta a l'onatge, la direcció principal és de component N, on les estimacions per al mateix període, indiquen que el 65,9% de l'onatge té una altura d'ona significant (H_s) inferior a 1 m, mentre el 6,1% dels registres supera els 3 m d' H_s . Durant els episodis energètics, l'onatge pot superar H_s de 5 m, principalment al llarg del període hivernal i associat als temporals de Tramuntana. Pel que fa a l'oscil·lació del nivell mitjà del mar es tracta d'un règim micromareal amb un oscil·lació inferior a 0,25 m (Fig. 1). El temporal amb major altura d'ona registrat a la cala va esdevenir el 25 de gener de 2015,

amb una H_s de 8,72 m, amb un període de 12,5s i una direcció procedent del N. Pel que fa al període d'ona, en un 81% dels casos és inferior als 7s i només supera els 8s en un 4,8 % dels casos.

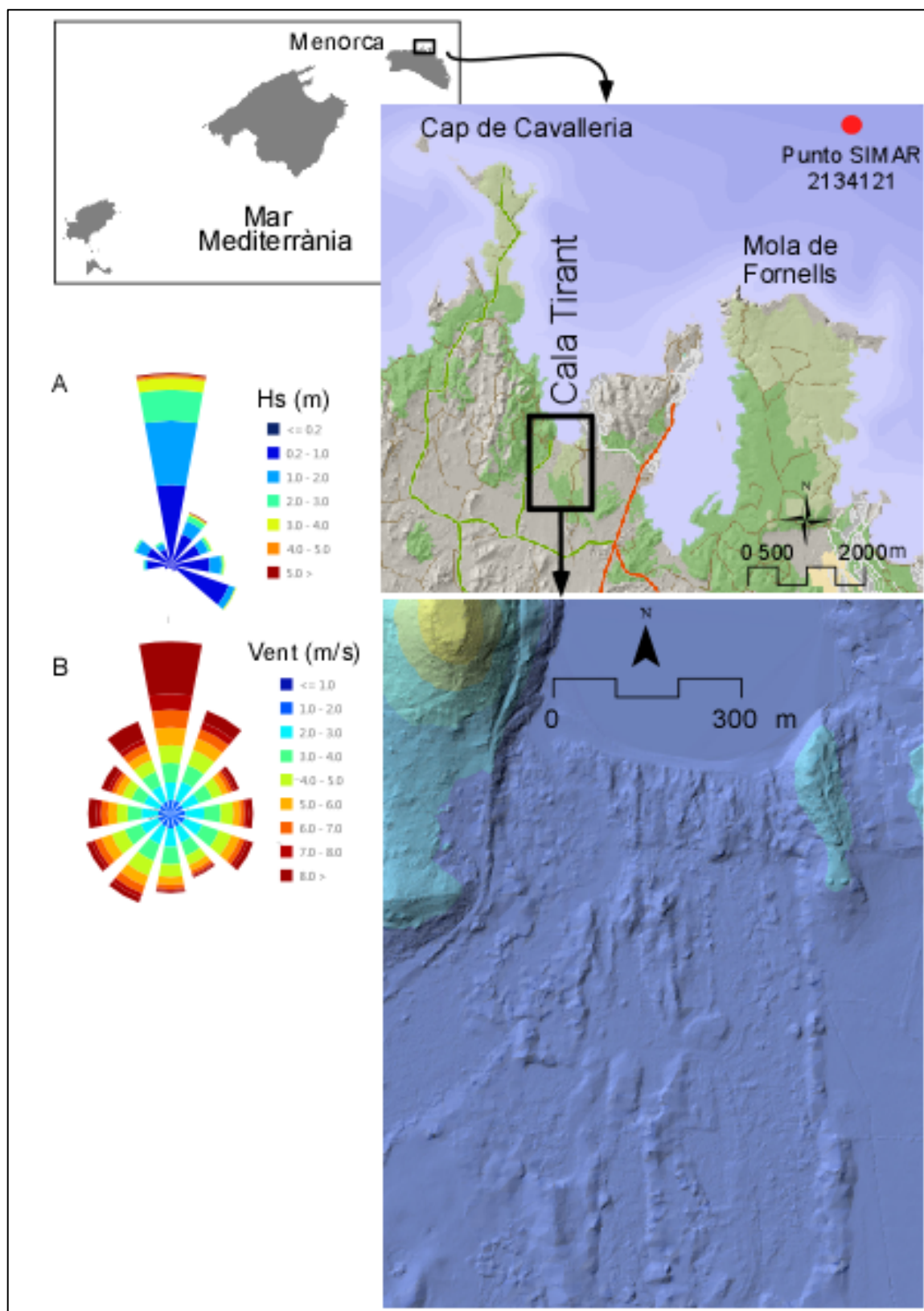


Fig. 1. Ubicació de l'àrea d'estudi del sistema platja-duna de Tirant, Menorca. Font cartogràfica: ideib.cat, LIDAR: Instituto Geográfico Nacional; Roses d'onatge (A) i vent (B): Puertos del Estado.

Antecedents

El sistema platja-duna de Tirant (Fig. 1) va ser explotat per a l'extracció d'àrids entre els finals dels anys 1970 i 1990. Tot i que no és possible fixar la data d'inici de l'activitat a partir d'una base documental, l'extracció d'arena es remuntaria com a mínim a l'any 1979 (GARRIGA-SINTES *et al.* 2017). El volum d'àrids que es varen extreure va ser tan important, que va arribar a exposar en superfície el nivell freàtic, donant lloc a la creació de basses temporals dins de les zones d'extracció, en el si del sector de dunes estabilitzades. Aquesta extracció no va arribar a envair la zona dunar davantera ni les primeres dunes mòbils. El resultat de les actuacions extractives va suposar un impacte en el sistema dunar semi-estabilitzat, amb una pèrdua sedimentària que va assolir la seva màxima extensió el 1995 amb un esvoranc de 176.208 m² de superfície i de potència superior als 5 m (GARRIGA-SINTES *et al.* 2017).

El sistema platja-duna fou descrit per primer cop per RITA *et al.* (1988). La importància del treball, de més a més, rau en què la memòria ve acompanyada de la primera cartografia geomorfològica de sistemes dunars realitzada a Balears. L'estudi en qüestió analitzava l'estat geoambiental de Tirant amb una cartografia detallada per cada un dels aspectes estudiats: vegetació, geomorfologia i usos. RITA *et al.* (1988) varen dividir el sistema en 3 subsectors (Fig. 2):

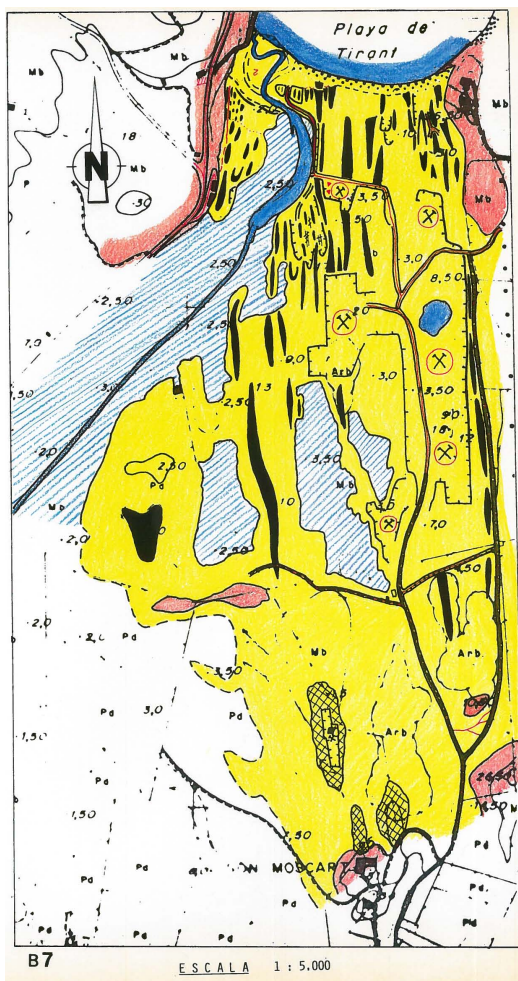


Fig. 2. Cartografia geomorfològica del sistema dunar de Tirant, segons Rita *et al.* (1988).

1a) La platja i el primer front dunar: des del punt de vista geomorfològic la platja presentava símptomes d'erosió i restava afectada per instal·lacions recreatives no permanents.

1b) Grans cordons dunars: format per dunes longitudinals que eren afectades per les extraccions d'àrids.

1c) Subsector associat a la desembocadura del torrent: amb una dinàmica controlada pel torrent, i afectada per les accions mecàniques de recollida i emmagatzemant d'"algues" (sic.) i de la neteja de platja.

Segons RITA *et al.* (1988), l'estat de conservació de Tirant era regular, amb un elevat nombre de factors de perturbació del conjunt del sistema: un ús recreatiu intens de platja, el primer cordó dunar i marges del torrent amb usos intensos (banyistes, quioscos, aparcament, retirada i acumulació de restes de *Posidonia oceanica*, neteja mecànica de la platja), presència d'extraccions locals d'arena, incendis, abocament de runes, proliferació de camins i localització d'antigues pedreres. En general el 1988, el sistema presentava una elevada fragilitat. RITA *et al.* (1988) varen recomanar accions per la seva gestió; entre d'altres: el manteniment de l'estat de les zones ben conservades i la recuperació de les que presentaven alteracions reversibles. De més a més també varen proposar delimitar els usos que provocaven perturbacions, com ara l'estacionament de vehicles, la instal·lació de quioscs, papereres, els usos a l'interior del sistema, les accions de gestió amb maquinària pesada i la prohibició de circulació de vehicles a l'interior del sistema dunar.

Una dècada després, SERVERA (1997 i 2003) realitzà una descripció del sistema dunar de Tirant associada a una cartografia geomorfològica, en base a les zonacions morfològiques del adoptant l'esquema del conjunt platja-duna com una unitat funcional (Fig. 3). L'autor esmentà que les formes dunars davanteres (*foredunes*) es trobaven molt desestabilitzades

per la pressió antròpica. Aquestes formes dunars, colonitzades per *Ammophila arenaria*, presentaven un gran nombre de lòbuls de deflació, de tipus *through blowout* i en menor mesura de *saucer blowouts*. A més a més d'aquestes formes erosives, en el seu front, en contacte amb la platja i com a resultat de les activitats de neteja mecànica de la platja amb maquinària pesada, el cordó dunar presentava un important talús d'erosió. Segons SERVERA (1997) el camp de dunes mòbils i semi-estabilitzades disposava d'una franja d'amplitud variable, situada per darrere les *foredunes*. Precisament en aquest sector del camp dunar, a la dècada dels vuitanta, al lateral oriental de l'albufera, el sistema va patir una reducció de la superfície, com a conseqüència d'importants extraccions d'arena. Al sector central, el més ampli del sistema, les dunes mòbils i semi-estabilitzades es reduïen a una estreta franja que transcorria immediatament per darrere de les *foredunes*. La resta de formes dunars foren eliminades a conseqüència de la extracció d'arena, donant lloc a punts d'una intensa reactivació dels processos eòlics, que es traduïren en l'obertura d'importants canals de deflació direcció terra-endins. Així mateix SERVERA (1997) esmenta que el sector de dunes estabilitzades també fou molt afectat per les extraccions d'àrids i estima una reducció de més d'un 50% de la superfície que ocupava el sistema dunar. No obstant això, la major pèrdua de superfície de dunes era deguda al trencament agrari dels marges exteriors del sistema. Segons SERVERA (1997, 2003) l'avaluació geo-ambiental del sistema platja-duna permeté constatar com les actuacions antròpiques havien tingut un paper important en la configuració del modelat actual, destacant la neteja mecanitzada i la retirada sistemàtica de les bermes vegetals de *Posidonia oceanica* entre els impactes més reiterats i transcendentals. Justament, a les zones on els mecanismes naturals de recuperació són, en la majoria de casos, infructuosos, ja que els impactes es generen a un ritme més intens que la velocitat amb què culminen els processos naturals de recuperació, entrant en una dinàmica en espiral que pot acabar amb la desaparició de sistema platja-duna.

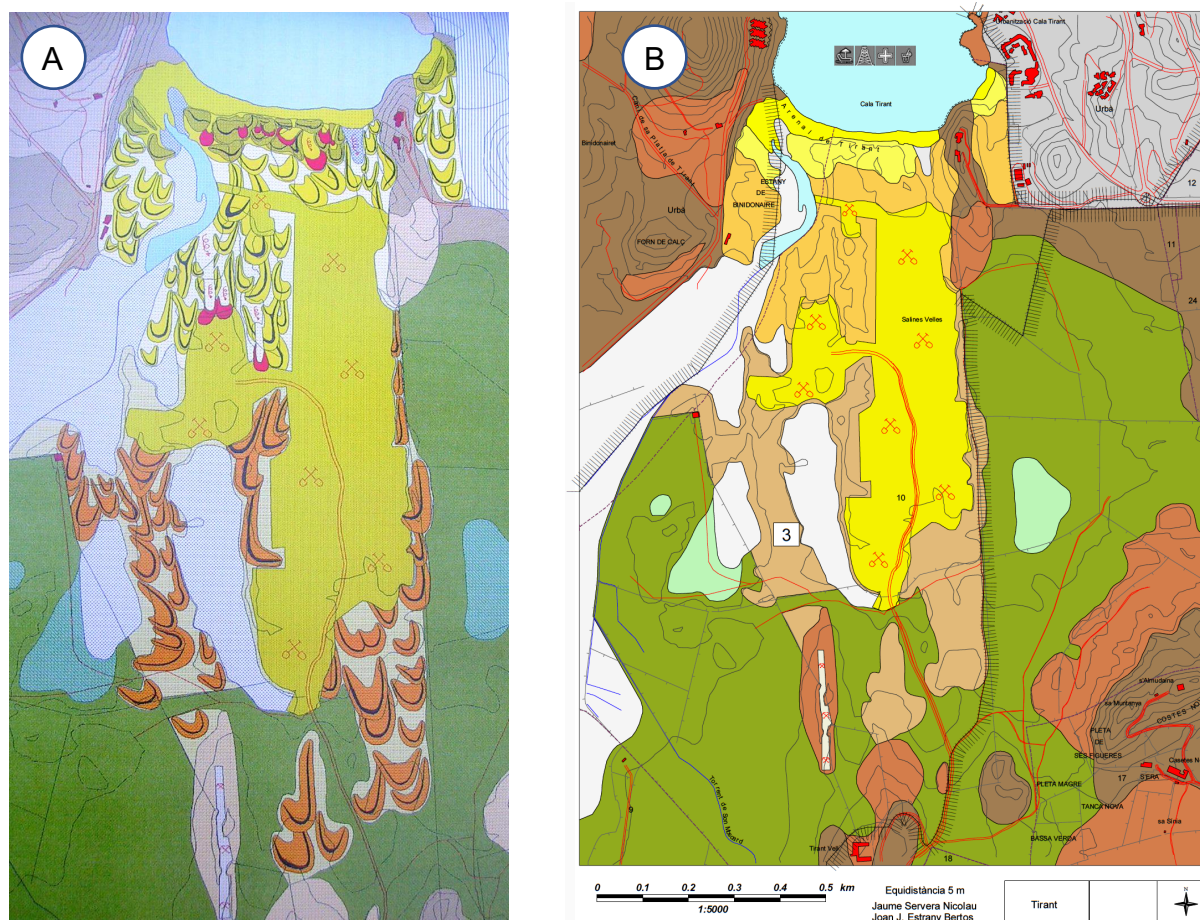


Fig. 3. (A) Cartografia geomorfològica del sistema dunar de Tirant, segons SERVERA (2003). (B) Cartografia geomorfològica del sistema dunar de Tirant, segons SERVERA i ESTRANY (2002).

ROIG-MUNAR i COMAS-LAMARCA (2004) classifiquen els sistemes platja-duna de Menorca, on aplicaren mesures de planificació, ús i gestió, amb els criteris establerts per RODRÍGUEZ-PEREA *et al.* (2000), i amb l'objectiu de modificar la gestió i que aquesta tingués un caire més sostenible i permetés la renaturalització dels sistemes, eliminats algunes gestions de caire erosiu. La platja de Tirant es classificà com a tipologia B, que es caracteritza per estar situada en una Àrea Natural d'Espècial Interès, amb elevats índex de freqüentació, accessibilitat rodada propera i sense serveis de platja (bar, parasols, socorristes, etc.), limitant la neteja mecànica i la retirada de restes de *Posidonia oceanica*, tot donant compliment a les recomanacions realitzades per RITA *et al.* (1988) i SERVERA (1997), així com a les propostes de RODRÍGUEZ-PEREA *et al.*, (2000).

ROIG-MUNAR (2011) va assenyalar que la gestió de sistema platja-duna de Tirant va ser realitzada històricament amb mesures poc adequades; entre les quals la retirada de bermes vegetals de *Posidonia oceanica* al llarg de tot l'any sota arguments d'aprofitament turístic i ramader, la neteja mecànica i l'extracció d'arenas. Així mateix, el front dunar va ser utilitzat com a àrea de serveis, estacionaments, quioscos i salvament, amb un ús recreatiu intens que agreujà les causes ja descrites per altres autors (RITA *et al.*, 1988; SERVERA, 1997). Dins el Pla de gestió de platges del Consell Insular de Menorca, redactat l'any 2000, el sistema dunar davant de Tirant va ser objecte d'accions encaminades a la seva renaturalització, restringint la retirada de *Posidonia oceanica* al llarg de tot l'any i la mecanització de la neteja, atesos els efectes erosius que de forma directa i indirecta estan associats a dita pràctica (ROIG-MUNAR i MARTÍN-PRÍETO, 2005). Paral·lelament es van eliminar les concessions temporals de platja, tant serveis de quioscs com serveis d'hamaques. En relació a la gestió de l'erosió i degradació de les dunes, les actuacions varen consistir en la instal·lació de diferents tipus de captadors d'interferència eòlica als fronts dunars i dins morfologies erosives tipus *blowout*, tanques per impedir o dissuadir el pas d'usuaris dins el sistema dunar i evitar el seu ús com a zona de repòs. Els primers anys s'utilitzaren restes de bermes de *Posidonia oceanica* com a elements per la recuperació de canals de deflació interns. Aquesta gestió va desenvolupar-se fins a l'any 2012. Amb l'inici de la crisi econòmica del 2008 (2012), la gestió deixà de tenir continuïtat, i com a conseqüència s'ha constatat de nou la fragmentació del front dunar i la reactivació de morfologies transgressives, així com la creació de nous canals de deflació de direcció N-S, que han envaït i reactivat el conjunt de el sistema fins arribar a la zona de l'antiga pedrera d'àrids (ROIG-MUNAR *et al.*, 2018).

Un dels darrer treballs a propòsit de Tirant és el capítol que MIR-GUAL (2014) hi dedica a la seva tesi. Segon l'esmentat autor, la pressió turística associada a la platja i la manca de mesures de gestió amb el sistema al llarg de molts anys va suposar la desaparició quasi bé total del *foredune*. No obstant, dit autor esmenta que al llarg de les darreres dècades els esforços destinats a la seva recuperació semblen tenir èxit, tot identificant a 2014 l'existència d'un cordó embrionari de primera duna o *foredune*. Segons MIR-GUAL (2014) al llarg dels 350 m del front de platja de Tirant es poden apreciar un total de 7 morfologies erosives, algunes d'elles de dimensions considerables, amb una distribució no homogènia, concentrant-se el major nombre d'aquestes formes a la part occidental del front dunar, coincidint, justament, amb l'accés preferencials dels usuaris de platja (Fig. 4). Pel que fa al sector de dunes mòbils o semi-estabilitzades, aquestes presenten una cobertura vegetal important i es desenvolupen terra endins d'una manera considerable. La presència de *blowouts* en primera línia ha fet que hi hagi algunes intrusions sedimentàries importants, que prenen forma de grans lòbuls de deposició que s'estenen terra endins, i que suposen una reactivació notable del sistema. Segons aquest autor, el cas de Tirant és un bon exemple per il·lustrar la recuperació de la línia de *foredune* a partir de l'aplicació de mesures de gestió blanques. MIR-GUAL (2014) presenta una sèrie de propostes de gestió i intervenció sobre la primera línia de duna i la importància de la vegetació com a mesura efectiva de gestió, tractament integrat de les morfologies *blowout* i el seu segellament per la recuperació del front dunar.

Posteriorment, ROIG-MUNAR *et al.* (2018) avaluen l'estat ambiental del cordó dunar davant d'acord amb la classificació de HESP (2002) que classificà l'estat ambiental de *foredunes* en 5 estadis (sent l'estadi 1 òptim i el 5 degeneratiu). Els mateixos autors destaquen que el sistema platja-duna de Tirant com a conseqüència de l'aplicació de diferents mesures de gestió (p.e. tancament accessos i captadors eòlics) va a migrar de l'estadi 5a l'estadi 3 entre el 2000 i el 2012. Però a partir de l'any 2017

retornà a un estadi 5 amb la reactivació de morfologies erosives en tot el sistema dunar, a causa d'un abandonament en la gestió. GARRIGA-SINTES *et al.* (2017) remarquen que la manca de un pla de restauració continu i efectiu de l'espai i l'acceleració de els processos erosius de el sector davanter, ha facilitat el desenvolupament de dos *blowouts* que avancen cap al interior de sistema, respectivament 61,5 m i 40,3 m entre els anys 2002 i 2016 (Fig. 5). D'altra banda, PONS i MIR-GUAL (2018) esmenten que el sistema dunar de cala Tirant presenta un estat de conservació en recuperació, tot i que la línia de dunes davanteres presenta, encara, importants signes de degradació, fragmentació i reactivació (GARRIGA-SINTES *et al.*, 2017; ROIG-MUNAR *et al.*, 2018)

L'any 2019 es va elaborar un document en què s'anализava l'evolució històrica de la línia de costa de Menorca entre els anys 1956 i 2015 (MARTÍN-PRÍETO *et al.* 2019). En aquest treball per a cala Tirant es quantifica un retrocés mitjà de la seva línia de costa de 12,3 m per als darrers 59 anys, el que implica una taxa de canvi de la línia de costa de -0,31 m/any. Tanmateix el sector de platja més oriental ha experimentat una erosió màxima 23,2 m (any 2012), mentre que el sector central exhibeix taxes de canvi molt més baixes. Entre els anys 2002 i 2008 hi ha un alentiment dels processos erosius, però que s'incrementen l'any 2012. Entre aquest darrer any i el 2015, els processos s'inverteixen amb una notable de acreció de la platja que pot arribar a representar un avançament de la línia de costa de 10 m.

Finalment el treball més recent a propòsit de Tirant és el de GARCIA-LOZANO *et al.* (2021) on s'esmenta que la gestió del litoral a Menorca en els darrers anys han seguit dinàmiques que s'allunyen de l'aplicació dels criteris tècnics sostenibles i es constata un retorn a antics models de gestió que donen a fenòmens d'erosió i a l'inici d'una nova fase de degradació dels sistemes

Objectiu, materials i mètodes

L'objectiu principal d'aquest treball consisteix a cartografiar l'evolució del sector de dunes mòbils i semi-estabilitzades del sistema-platja-duna de Tirant, tant pel que fa a la seva dinàmica i problemàtica com a l'anàlisi de la seva gestió.

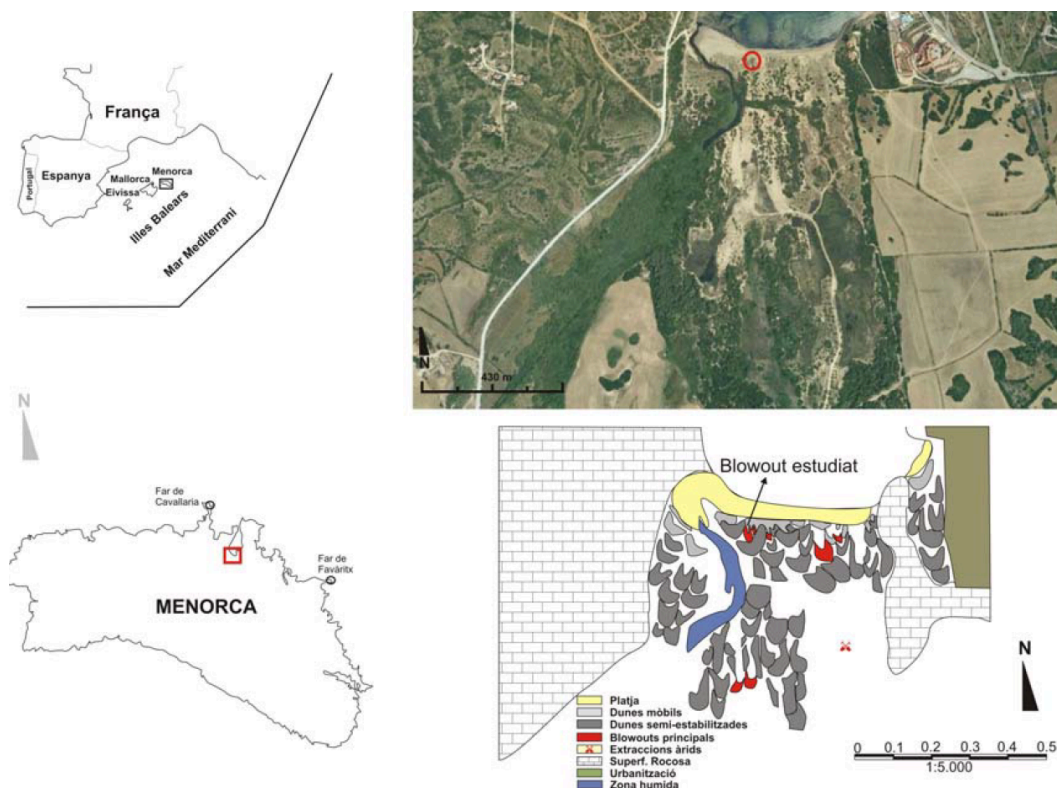


Fig. 4. Cartografia geomorfològica del sistema dunar de Tirant segons MIR-GUAL (2014).

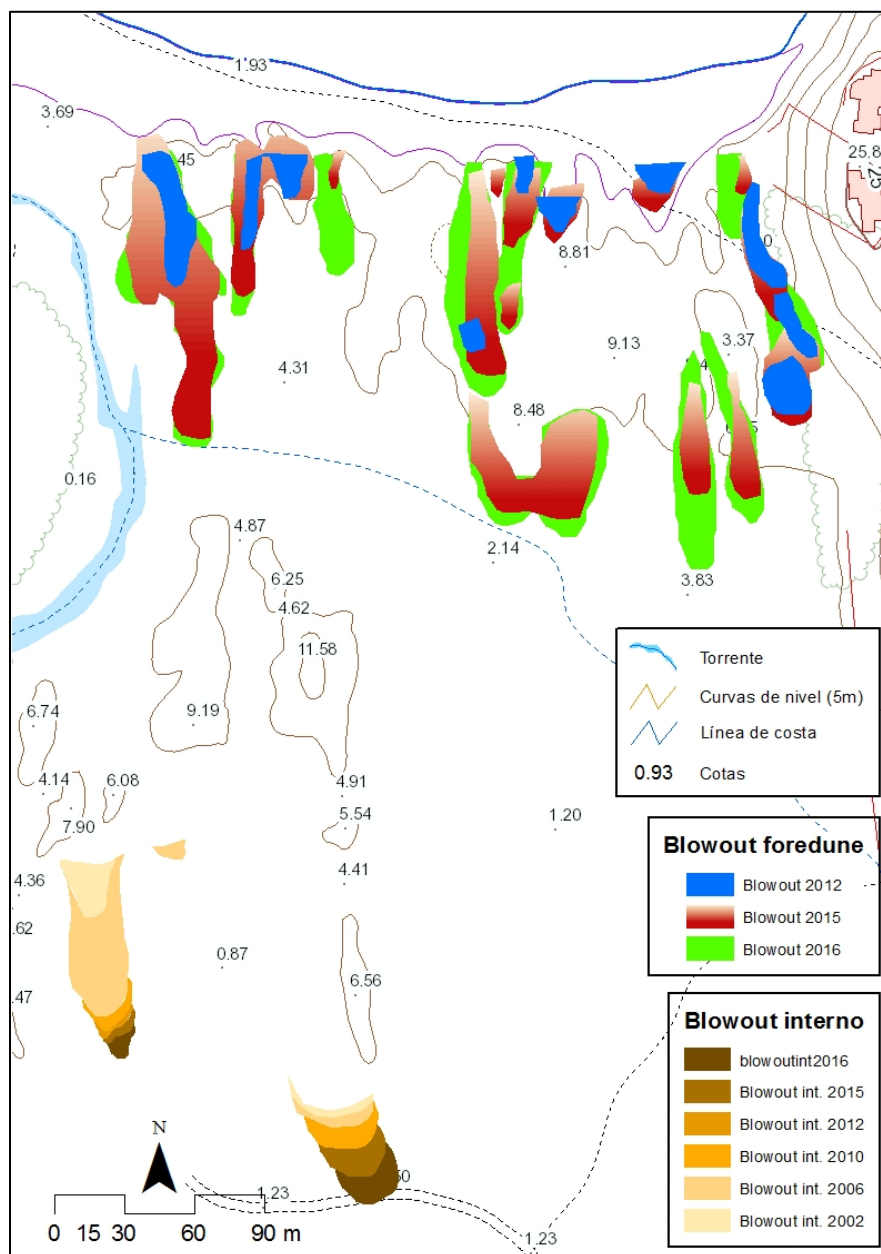


Fig. 5. Cartografia geomorfològica del sistema duner de Tirant, segons GARRIGA *et al.* (2017).

Per dur-ho a terme s'ha treballat amb capes de nigns de punts corresponents a dos vols LIDAR, que proporciona el *Centro Nacional de Información Geográfica, CNIG*. S'han emprat els arxius corresponents al vols de l'any 2014 i 2019 amb una cobertura de superfície de 2x2 km: PNOA_2014_BAL_594-4434_ORT-CLA-RGB, PNOA_2014_BAL_592-4434_ORT-CLA-RGB, PNOA_2019_BAL_594-4434_ORT-CLA-RGB i PNOA_2019_BAL_592-4434_ORT-CLA-RGB.

Els nigns de punts presenten una densitat de 0,5 y 1 punt/m² per al vol de 2014 y de 2020 respectivament. A partir de les dades LIDAR i mitjançant un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG), s'han generat models digitals de elevacions (MDE) amb una resolució horitzontal d'1 m i amb una precisió vertical i horitzontal inferior a 20 cm i a 30 cm respectivament, sobre una quadrícula de 2x2 km (Taula 1). A partir del núvol de punts LIDAR es generen models digitals del terreny (MDT) en què només s'inclou la superfície del terreny i no es carreguen les capes corresponents a la vegetació i les edificacions.

La superfície d'anàlisi s'ha delimitat a partir d'un polígon d'iguals dimensions per als dos vols LIDAR, per tal de comparar-ne les diferències i determinar l'evolució de les formes al llarg del període d'estudi

Taula 1. Característiques dels vols LIDAR analitzats. Font: CNIG.

	2014	2020
Resolució (P/m ²)	0.5	1
Dimensions píxel		0.15 m
RMSE (x/y)	0.3 m	0.3 m
RMSE (z)	0.2 m	0.15 m
Data	18-oct.	13-gen.
Fitxers	2x2 km	2x2 km

que abasta del 18 d'octubre de 2014 al 13 de gener de 2020. A partir dels dos MDTs s'ha creat una capa ràster per a cada vol, i mitjançant el SIG, a partir de l'eina *Spatial Analyst*, s'ha pogut determinar les variacions del terreny entre les dos vols. De la substracció d'ambdues capes en resultant una tercera capa ràster que mostra la diferència de cota per al període temporal analitzat. (Fig. 6).

Resultats

A la Fig. 6 es pot observar la diferència altimètrica en el període comprès entre els vols LIDAR de 2014 i 2020, un període de 5 anys i tres mesos. El sector que presenta major activitat es situa sobre les dunes mòbils ubicades darrera la duna davantera, coincidint amb els punts on es desenvolupen varis *blowouts* que ja varen ser descrits per RITA *et al.* (1988) i analitzats per MIR-GUAL (2014). Atès que el període analitzat coincideix amb el marc cronològic en el qual s'ha produït un canvi en el model de gestió del sistema platja–duna de Tirant, les dades vendrien a confirmar que la manca de gestió associada a manca de manteniment, ha resultat en el desenvolupament processos erosius importants que s'ha manifestat en l'organització de morfologies transgressives cap l'interior del sistema dunar.

Per a aquest estudi s'han analitzat els 4 sectors més dinàmics (Fig. 5) que coincideixen amb les àrees exposades per RITA *et al.* (1988), SERVERA (1997), ROIG-MUNAR (2011), MIR-GUAL (2014) i GARRIGA-SINTES *et al.* (2017).

Sector A: és el que presenta el major avanç cap l'interior del sistema, mostrant importants taxes erosives que incrementen la superfície del canal de deflació. que es manifesta en el desenvolupament d'un important lòbul de deposició. A la Fig. 7 es pot apreciar en un tall transversal del *blowout* (perfil inferior), com s'ha incrementat de manera notable el canal de deflació, tant en amplària (entre 7 i 8 m) com en alçària amb una diferència vertical en ambdós parets que arriba fins els 3,5 m. Tot plegat fa que el seu pendent sigui el 2020 més suau que al 2012 (Fig. 8), o que n'hagi augmentat la profunditat (0,5 m). Aquesta morfologia arranca a partir de la *foredune* amb una altura de 3,1 m i transporta importants volums de sediments terra endins, amb processos d'esllavissades de les seves parets que evidencia el desarrelament de vegetació arbustiva (Fig. 8, fotografia corresponent a 2016). A la figura 7, a partir del tall longitudinal es pot apreciar la disminució en altura del lòbul (ca. 1 m.) i la sobreexcavació d'aquest, així com el seu desplaçament al voltant de 27 m terra endins. A la figura 8 es pot apreciar com s'ha incrementat la cubeta de deflació del *blowout* entre els anys 2012 i 2016, així com en el seu avanç ha anat soterrant vegetació arbustiva. Si s'observa en direcció cap a terra (Fig. 8) es pot apreciar com l'amplària s'ha incrementat i ha desaparegut la vegetació herbàcia i arbustiva, com al 2012 formava un canal ben desenvolupat i com al 2021 las parets han gairebé desaparegut. A partir de l'any 2017 s'hi han instal·lat dues barreres d'interferència eòlica per intentar mitigar els processos erosius tant a la *foredune* com a l'interior del canal de deflació, tanmateix amb resultats poc significatius (Fig. 8, fotografia corresponent a l'any 2020).

Sector B. Aquest sector se situa al centre de la platja, per sobre una forma de duna davantera que arriba a una altura de 2,5 m. Aquesta morfologia és el resultat de la coalescència de tres *blowouts* que avancen cap a terra (Fig. 9, vid. Fig. 6 per a localització). Es tracta de formes erosives amb importants talussos on es produeixen esllavissades per col·lapse i que contribueixen a l'increment en amplària del

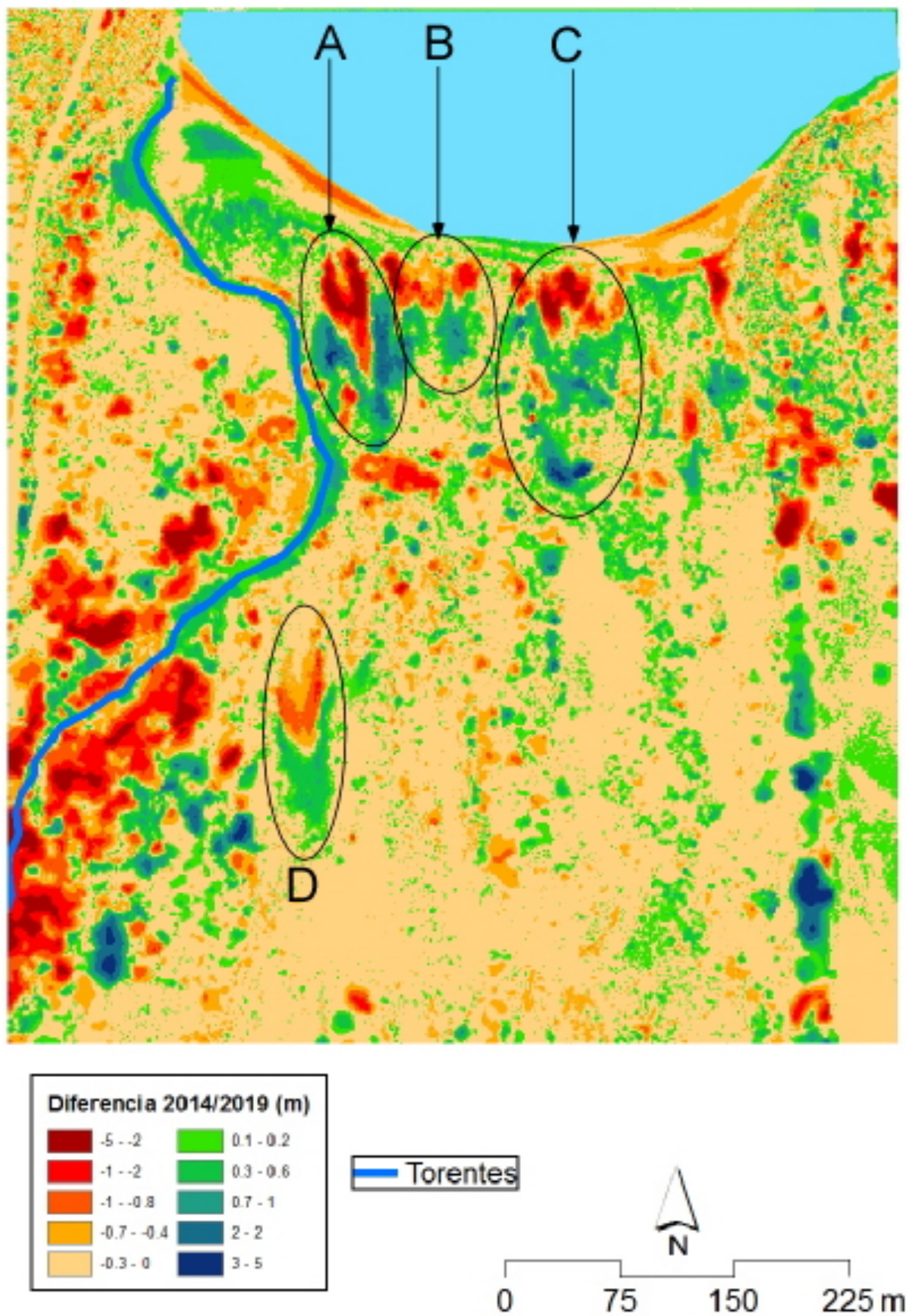


Fig. 6. Canvis en la cota topogràfica al sistema dunar resultat de la comparació dels vols LIDAR de 2014 i 2020.

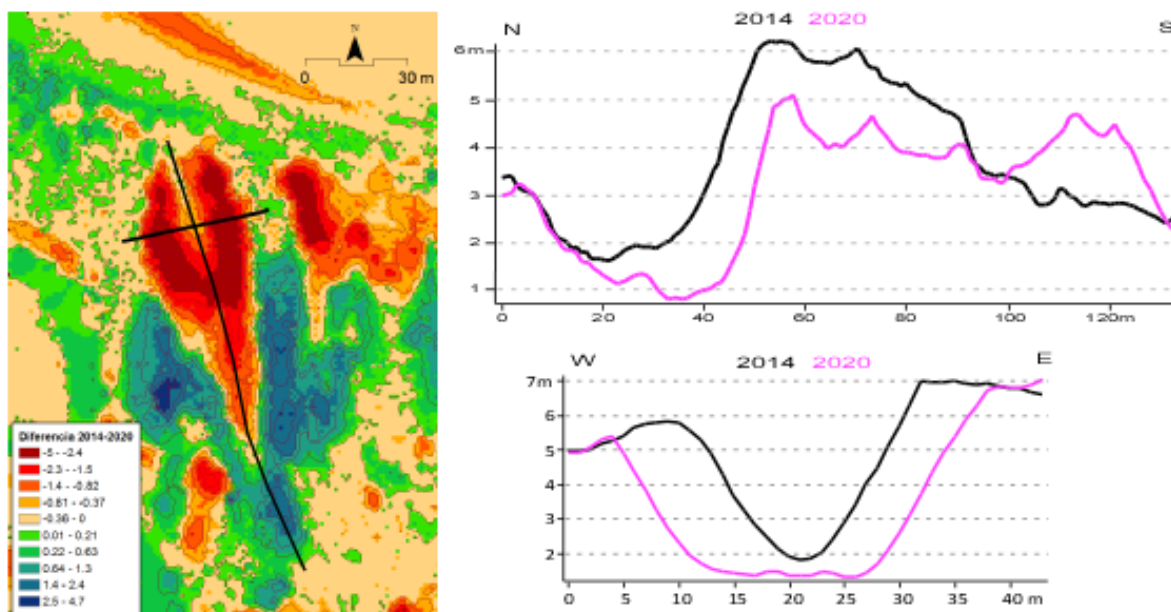


Fig. 7: Perfil transversals del *blowout* situat en el sector A, a partir del MDT (corbes de nivell: 5 m).



Fig. 8. Vistes cap a terra (esquerre) i cap a la mar (dreta) del *blowout* del sector A (vid. localització a la Fig. 6).

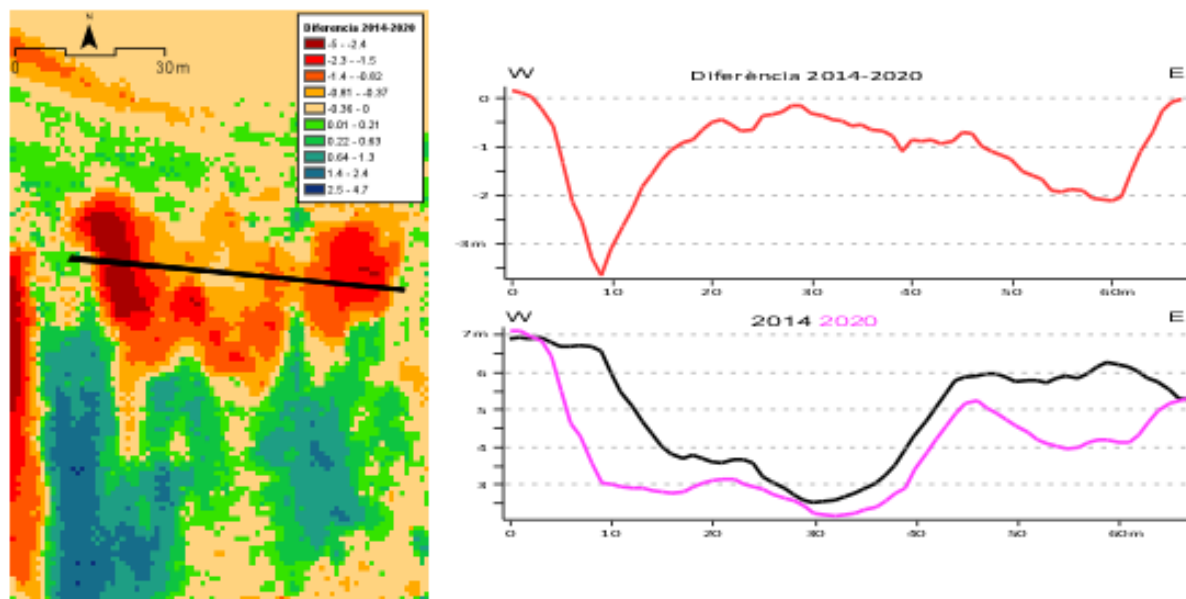


Fig. 9: Perfil transversals del *blowout* situat en el sector B, a partir del MDT (corbes de nivell: 5 m).

blowout de fins a 9 m i altres 3,5 m de profunditat a la paret W; així com una disminució constant de la cubeta de deflació al llarg de tot el perfil (Fig. 9). A l'altre costat, a la paret E, el *blowout* es profunditza fins a 2 m entre els anys 2014 i 2020, justament allà on el lòbul central avança 20 m terra endins.

A la figura 10 es pot apreciar l'evolució d'aquest sector de dunes mòbils des de l'any 2004 fins al 2021, observant l'increment en amplària, especialment entre els anys 2011 i 2018, i que continua, però



Fig. 10. Vistes panoràmiques del *blowout* del sector central mirant cap l'Est (vid. localització a la Fig. 6).

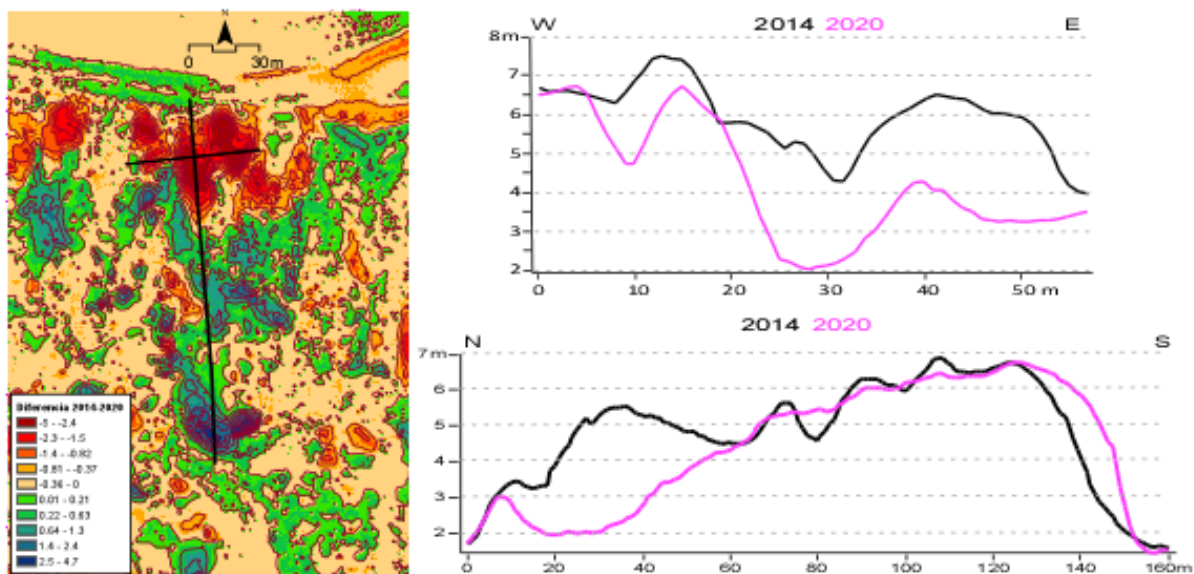


Fig. 11. Perfil longitudinal i transversal del *blowout* situat en el sector C, a partir del MDT (corbes de nivell: 5 m).

en menor mesura, entre 2018 i l’any 2021. Tot i la instal·lació d’una barrera d’interferència eòlica per tal de mitigar els efectes erosius a finals de l’any 2017, no s’observa ni acumulació ni retenció de sediment significativa. També es va instal·lar un altre barrera a la *foredune* amb resultats similars.

Sector C: El sector es desenvolupa al centre de la platja i a l’igual que l’anterior està format per la coalescència de varis *blowouts* de menor tamany que avancen ràpidament cap l’interior del sistema dunar fins arribar a l’antiga zona d’extracció d’àrids. La Fig. 11 presenta un perfil longitudinal on es pot apreciar que el sector més proper a la mar s’ha erosionat i part d’aquest sediment han estat transportats al lòbul de deposició, que ha incrementat el seu volum (Fig. 12; fotografies de 2018 i 2021). En aquesta



Fig. 12. Panoràmiques del *blowout* del sector C (vid. localització a la Fig. 6).

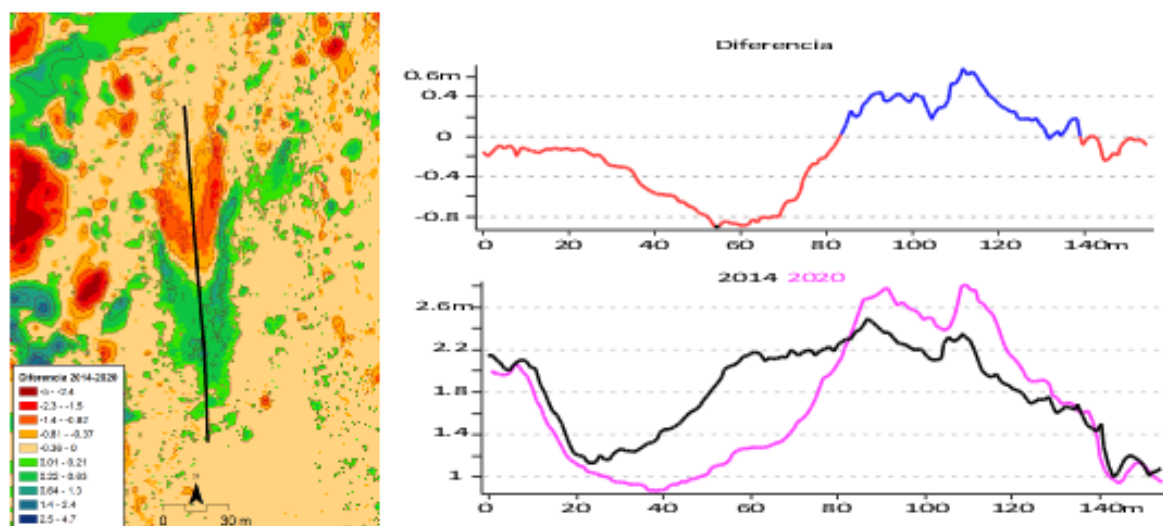


Fig. 13. Perfil longitudinal del *blowout* del sector D, estret a partir del MDT Corbes de nivell 5 m).

última figura també es mostra el canal de deflació que canalitza el sediment cap l'interior a les fotografies dels anys 2012 y 2021, que es corresponen amb el perfil transversal de la Fig. 11. S'hi pot apreciar el buit del volum de sediment desplaçat cap l'interior del *blowout*, especialment a la meitat oriental, amb valors que arriben fins els 3 m de potència al canal de deflació principal.

No es produeix cap fenomen de colonització vegetal per l'intens i les altes taxes d'enterrament, el que es tradueix en una manca de neoformes i petites dunes d'interferència. També sobre aquesta morfologia s'han instal·lat trampes d'interferència eòlica per retenir sediment, amb un resultat infructuós.

Sector D: aquest sector se situa cap l'interior del sistema dunar, proper a la zona de l'antiga extracció d'àrids (Fig. 3) i té un comportament semblant al del sector A, ja que sols es troben separats per una zona humida que, a poc a poc, es colmata pel sediment que li arriba del sector A. Al perfil longitudinal de la Fig. 13 es pot apreciar de forma nítida l'avanç del lòbul de deposició terra endins.

El perfil inferior compara el contorn de 2014 amb el de 2020, apreciament una important erosió que assoleix els 80 m, amb una pèrdua de potència de fins a 1 m. Mentre que entre els 80 i els 140 m es desenvolupa el lòbul de deposició, amb una potència màxima de 0,6 m, per a després continuar amb la zona d'extracció d'arena.

A les fotografies dels anys 1995 i 2016 (Fig. 14) es pot apreciar l'evolució del lòbul en una vista cap a la mar, mentre que en les fotografies dels anys 2004 i 2016, amb una vista cap a terra, s'observa l'increment en amplària d'aquest *blowout*. Les extraccions d'àrids i la manca d'un pla efectiu de restauració, juntament amb la desestabilització del front dunar davanter (sectors A, B i C) afavoreixen l'activació dels processos sedimentaris dels sectors més interns d'aquest sistema dunar.

Discussió i conclusions

El sistema dunar de cala Tirant ha estat objecte de nombrosos estudis que van començar al final de la dècada del 1980. Una de les principals causes del constant procés erosiu va ser la intensa extracció d'arena del sector de dunes estabilitzades. Una de les causes que han afavorit aquests processos negatius ha estat la falta de compliment de la Llei de Mines en una primera fase erosiva en el conjunt de sistema dunar semi-estabilitzat, y la seva posterior renaturalització.

No ha estat aquesta l'única causa que ha contribuït a la seva degradació, des dels primers estudis ja es posava de manifest altres problemes com la instal·lació de quioscs de platja, la neteja mecànica de la platja, la retirada de les bermes vegetals *Posidonia oceanica* depositades sobre la platja al llarg de tot



Fig. 14. Panoràmiques del *blowout* del sector C (vid. localització a la Fig. 6).

l'any, etc. Qüestions que s'han repetit al llarg del temps de manera reiterada i que sols han estat gestionades de forma parcial i amb poc criteri geomorfològic.

En aquest treball s'ha analitzat l'evolució d'una sèrie de sectors dominats per morfologies dunars transgressives, *blowouts*, distribuïts al llarg del sector de dunes semi-estabilitzades i estabilitzades. Per poder dur a terme aquesta tasca, s'han comparat dos vols LIDAR corresponents als anys 2014 i 2020, tot abastant un període de 5 anys i 3 mesos. Amb la ajuda d'un SIG s'ha pogut establir l'evolució d'aquestes morfologies tant en longitud com en altura. El resultat és similar en les quatre àrees analitzades. Els tres sectors situats a la zona de dunes mòbils mostren importants processos erosius amb un increment tant en altura, longitud i superfície dels *blowouts*, especialment aquell situat en el Sector A del sistema, el més occidental, que presenta un important lòbul de deposició que soterra la vegetació que troba en el seu avanç terra endins.

Els altres dos sectors, B i C, es situen al centre de la platja i responen a la coalescència de varis *blowouts* que desenvolupen importants canals de deflació i que transporten importants quantitats de sediment terra endins, especialment el grup situat al sector B, el lòbul de deposició del qual arriba a la pedrera. El *blowout* situat en aquesta zona s'alimenta del sector de dunes semi-estabilitzades, fonamentalment del *blowout* del sector A, i presenta una potència menor que els altres tres perquè té menor disponibilitat de sediment.

Comptat i debatut, els resultats posen de manifest les conseqüències geo-ambientals de la manca de seguiment i coherència en l'aplicació de mesures correctores de restauració i recuperació de fronts dunars durant la última dècada, malgrat tenir la constància que les pràctiques prèvies al 2013 resultaren efectives i contribuïren a la recuperació del sistema.

Així mateix el treball posa de manifest la importància de la primera morfologia dunar com a factor clau per pal·liar les taxes de transport eòlic cap a l'interior dels sistema dunar. Els resultats obtinguts

demostrin que els sectors dunars davanters ben conservats presenten major estabilitat. Per tant les gestions del front dunar són importants per restablir l'equilibri platja-duna, evitar pèrdues sedimentaries cap a l'interior i minvar fins renaturalitzar els lòbuls interiors actius.

Agraïments

Els autors volen agrair la revisió, els comentaris i aportacions al primer mecanoscrit del treball dels Drs. Pau Balaguer i Lluís Gómez-Pujol.

Bibliografia

- CHARLIER, R. H. i DE MEYER, C.P. (1989): Coastal defense and beach renovation. *Ocean and Shoreline Management*, 12: 525-543.
- DAVIDSON-ARNOTT, R., MACQUARRIE K. i AAGAARD, T. (2005): The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on a beach. *Geomorphology*, 68: 115-129.
- DELGADO-FERNÁNDEZ, I. (2011): Meso-scale modelling of aeolian sediment input to coastal dune. *Geomorphology*, 130: 230-243.
- GARCIA-LOZANO, C., ROIG-MUNAR, F. X i PINTÓ, J. (2021): De la recuperació ambiental de sistemas playa-duna en período de confinamiento por Covid-19, al retorno de la mala praxis de gestión de playas en período de desconfinamiento. Los casos de Cataluña y las Islas Baleares, España. *Revistas Costas*, en premsa.
- GARRIGA-SINTES, C., MARTÍN-PRIETO, J.Á., ROIG-MUNAR, F.X. i RODRÍGUEZ-PEREA, A. (2017): «Reactivación del sistema dunar de Tirant, N de Menorca, asociada a la falta de gestión y extracciones de áridos». *GeoTemas*, 17: 167-170.
- HESP, P. A. (2002): Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology, and dynamics. *Geomorphology*, 48: 245-268.
- LITHGOW, D., MARTÍNEZ, M. L., GALLEGRO-FERNÁNDEZ, J. B., HESP, P. A., FLORES, P., GACHUZ, S. & ÁLVAREZ-MOLINA, L. L. (2013): Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology*, 199: 214-224.
- MARTÍN-PRIETO, J. A., CARRERAS, D., PONS, G. i ALMARAZ, A. (2019): *Evolución histórica de la línea de costa de playas de Menorca (Illes Balears): 1956-2015*. OBSAM, Maó. 61 pp.
- MIOT DA SILVA, G., HESP, P. A., PEIXOTO, J. i DILLENBURG, S. R. (2008): Foredune vegetation patterns and alongshore environmental gradients: Moçambique beach, Santa Catarina Island, Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33: 1557-1578
- MIR-GUAL, M. (2014): *Anàlisi, caracterització i dinàmica de les formes erosives Blowout en sistemes dunars de Mallorca i Menorca (ILLES BALEARS)*. Tesis doctoral inèdita. Departament de Geografia Universitat de les Illes Balears, Palma.
- NORDSTROM, K. F. (2008): *Beach and dune restoration*. Cambridge. Cambridge University Press.
- PONS, G. P i MIR-GUAL, M. (2018): El sistema dunar de cala Tirant (costa nord de Menorca). 133-152. En: *Guia de geologia de Menorca: itineraris naturals i culturals*. Agustí Rodríguez Florit, Guillem X. Pons Buades, Félix de Pablo Pons (eds.) Consell Insular de Menorca. Agència Menorca Reserva de Biosfera ; Institut Menorquí d'Estudis, 248 pp.
- RITA, J., RODRÍGUEZ, A. i TÉBAR, F. (1988): *Sistemas dunares de Menorca. Valoración Geoambiental y estado de conservación*. Document inèdit. IME, Menorca. 109 pp.
- RODRÍGUEZ-PEREA, A., SERVERA, J. i MARTÍN-PRIETO, J. A. (2000): Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial: Informe METADONA. *Col·lecció Pedagogia Ambiental*, 10. Universitat de les Illes Balears. 110 pp.
- ROIG-MUNAR, F. X. (2011): *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears*. Tesis doctoral inèdita. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les illes Balears, 366pp.
- ROIG-MUNAR, F. X. i COMAS LAMARCA, E. (2004): Propuesta de un modelo de clasificación para las playas de las Islas Baleares mediante el análisis de variables de uso, estado y gestión. *Boletín Asociación De Geógrafos Españoles*, 40: 429-448.
- ROIG-MUNAR, F. X. i MARTÍN-PRIETO, J. A. (2005): Efectos de la retirada de bermas vegetales de Posidonia oceánica sobre playas de las islas Baleares: consecuencias de la presión turística. *Investigaciones geográficas de México*, 57: 39-52.

- ROIG-MUNAR, F. X., RODRÍGUEZ-PEREA, A., MARTÍN-PRÍETO, J. A. i PONS, G. X. (2009): Soft Management of Beach-Dune Systems as a Tool for their Sustainability. *Journal of Coastal Research*, SI 56: 1284-1288.
- ROIG-MUNAR, F. X., MARTÍN PRIETO, J. A., RODRÍGUEZ PEREA, A. i BLÀZQUEZ SALOM, M. (2018): Restauración de sistemas dunares en las islas Baleares (2000-2017): una visión crítica. *Investigaciones Geográficas*, 69: 119-136.
- SERVERA, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis doctoral, inèdita. Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca. 908 pp.
- SERVERA, J. (2003): El sistema playa-duna de Cala Tirant. In: ROSSELLÓ, V.M., FORNÓS, J.J. y GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.). *Introducción a la Geografía Física de Menorca*: 142-155. Universitat de València - Universitat de les Illes Balears - Societat d'Història Natural de les Balears.
- SERVERA, J. i ESTRANY, J. J. (2002): *Catàleg dels Sistemes Platja-duna de les Illes Balears*. Document Tècnic inèdit: 4 Vols. Direcció General de Biodiversitat, Conselleria de Medi Ambient del Govern Balear.
- WALKER, I. J., HESP, P. A. i DAVIDSON-ARNOTT, R. G. Y OLLERHEAD, J. (2006). Topographic steering of alongshore airflow over a vegetated foredune: Greenwich Dunes, Prince Edward island, Canada. *Journal of Coastal Research*, 22 (5): 1279-1291.

Webs:

Centro Nacional de Información Geográfica: <http://centrodedescargas.cnig.es> (consultat dia 14 de maig de 2021)
Puertos del Estado: www.puertos.es (consultat dia 14 de maig de 2021)

Data recepció: 01.06.21

Data revisió: 25.06.21

Revisió acceptada: 06.07.21